

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Plazmové navařování mědi a wolframu pro fúzní reaktory
PTA deposition of copper and tungsten for fusion reactors

AUTOR: Bc. Jan Vosáhlo

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní a materiálové inženýrství

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

PRAHA 2020



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vosáhlo** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **457588**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Plazmové navařování mědi a wolframu pro fúzní reaktory

Název diplomové práce anglicky:

PTA depositon of copper and tungsten for fusion reactors

Pokyny pro vypracování:

Provést rešerši na téma fúze, PTA navařování, plasma facing materials, funkčně gradované materiály
Experimentálně ověřit možnost navaření směsi mědi a wolframu na kovovou podložku
Charakterizovat základní vlastnosti nanesených povlaků
Zhodnotit výsledky

Seznam doporučené literatury:

ELIEZER, Yaffa. a Shalom. ELIEZER. The fourth state of matter: an introduction to plasma science. 2nd ed. Philadelphia: IOP, 2001
MATĚJČEK, J. Materials for Fusion Applications. Acta Polytechnica [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013
D'OLIVEIRA, A., R. PAREDES a R. SANTOS. Pulsed current plasma transferred arc hardfacing. Journal of materials processing technology. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2006
NAEBE, Mino a Kamyar SHIRVANIMOGHADDAM. Functionally graded materials: A review of fabrication and properties. Applied Materials Today [online]. 2016

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

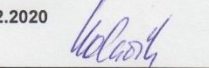
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

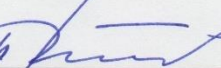
Datum zadání diplomové práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**

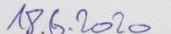

Ing. Pavel Rohan, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

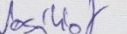

doc. Ing. Ladislav Kolářik, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá plazmovým navařováním mědi a wolframu pro fúzní reaktory. Teoretická část práce se zabývá problematikou termojaderné fúze a materiálů ve fúzní energetice, zejména pak materiály vystavené působení plazmatu. Dále se zabývá problematikou funkčně gradovaných materiálů, a nakonec charakteristikou metody plazmového navařování PTA. Experimentální část se zabývá ověřením možnosti navaření mědi a wolframu na wolframovou destičku pomocí metody plazmového navařování PTA. Snahou je vytvořit funkčně gradovaný materiál, jehož složení bude postupně přecházet z čistého wolframu v čistou měď.

Klíčová slova

termonukleární fúze, tokamak, ITER, PFM, FGM, funkčně gradované materiály, plazmové navařování, PTA

Annotation

This diploma thesis deals with plasma surfacing of copper and tungsten for fusion reactors. The theoretical part of the thesis deals with the problematics of thermonuclear fusion and materials in fusion energetics, particularly plasma facing materials. It also deals with the problematics of functionally graded materials, and finally the characteristics of the method of plasma surfacing PTA. The experimental part deals with the verification of the possibility of surfacing copper and tungsten on a tungsten plate using the method of plasma surfacing PTA. The effort is to create a functionally graded material, the composition of which will gradually change from pure tungsten to pure copper.

Keywords

thermonuclear fusion, tokamak, ITER, PFM, FGM, functionally graded materials, plasma surfacing, PTA

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Pavlu Rohanovi Ph.D., IWE za jeho odborné vedení, podnětné rady a projevenou trpělivost při zpracování diplomové práce. Rovněž bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Matějčkovi, Ph.D. z Ústavu fyziky plazmatu AV ČR za konzultace a nesmírnou pomoc při analýze výsledků.

Obsah

Obsah	7
Seznam použitých zkratek	9
Úvod.....	10
1. Teoretická část	11
1.1. Termojaderná fúze	11
1.1.1. Princip	11
1.1.2. Tokamak.....	15
1.1.3. Stelarátor	18
1.1.4. Projekt ITER.....	19
1.2. PFM (Plasma Facing Materials)	20
1.2.1. Materiály	21
1.2.2. Spojování PFM	23
1.3. Funkčně gradované materiály.....	24
1.3.1. FGM na bázi W/Cu	24
1.4. PTA (Plasma Transferred Arc)	25
1.4.1. Princip a charakteristika plazmového svařování	26
1.4.2. Procesní plyny	29
1.4.3. Základní parametry svařování	30
1.4.4. Navařování	31
2. Experimentální část	32
2.1. Cíl experimentu	32
2.2. Návrh experimentu	32
2.3. Použité materiály	33
2.4. Použitá zařízení	34
2.4.1. Plazmový navařovací automat PPC 250 R6	34

2.4.2.	Svařovací komora.....	35
2.4.3.	Ostatní použitá zařízení a pomůcky.....	36
2.5.	Parametry procesu.....	37
2.6.	Vyhodnocovací metody.....	38
2.6.1.	Vizuální kontrola	38
2.6.2.	Optický mikroskop	38
2.6.3.	SEM	38
2.7.	Postup experimentu.....	39
2.7.1.	Podávání přídavného materiálu	39
2.7.2.	Postup navařování	42
2.8.	Výsledky a diskuze.....	44
2.8.1.	Vzorek č. 1.....	44
2.8.2.	Vzorek č. 2.....	48
2.8.3.	Vzorek č. 3.....	53
2.8.4.	Vzorek č. 4.....	60
2.8.5.	Vzorek č. 5.....	64
	Závěr	69
	Seznam zdrojů.....	72
	Seznam obrázků.....	76
	Seznam tabulek.....	78
	Seznam příloh	78
	Přílohy	79

Seznam použitých zkratek

CFC	Carbon Fibre Composites
CVD	Chemical Vapour Deposition
EDS	Energiově disperzní Spektrometrie
FGM	Funkčně Gradovaný Materiál
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
JET	Joint European Torus
PAW	Plasma Arc Welding
PFM	Plasma Facing Materials
PTA	Plasma Transferred Arc
PVD	Physical Vapour Deposition
SEM	Skenovací Elektronový Mikroskop
SOL	Scrape-off Layer
TIG	Tungsten Inert Gas
VPS	Vacuum Plasma Spraying

Úvod

Lidstvo se již od pradávna potýká s potřebou zdrojů a energie. S nárůstem populace a s rostoucím technickým vývojem se spotřeba energie neustále zvyšuje. Zásoby nerostných surovin jako je uhlí, ropa a zemní plyn se neustále snižují a v následujících desítkách až stovkách let budou pravděpodobně zcela vyčerpány. Lidstvo si rovněž začíná více uvědomovat ekologické dopady spojené se spalováním fosilních paliv, avšak výroba energie z obnovitelných zdrojů nedokáže ani zdaleka pokrýt celosvětovou potřebu. Zásoby uranu, jakožto paliva pro štěpné jaderné reaktory, také nejsou nevyčerpatelné a za předpokladu dobré recyklace lze předpokládat jejich využití pouze na stovky let. Zároveň se jaderná energetika potýká s problematikou skladování jaderného odpadu a s obavami veřejnosti o případnou jadernou havárii.

Pozornost vědců se proto již řadu let upíná k uskutečnění termojaderné fúze, tedy procesu, který probíhá již miliardy let ve Slunci a umožňuje tak život na Zemi. Termojaderná fúze je proces syntézy jader lehkých prvků na jádra těžší, při kterém se uvolňuje obrovské množství energie. Snahou vědců je již několik desítek let uskutečnění řízené termojaderné fúze na Zemi ve fúzních reaktorech.

Materiálová náročnost fúzní energetiky je jedním z hlavních limitujících faktorů jejího využití v praxi. Vzhledem k vysoce náročným požadavkům obtojí v prostředí plazmatu ve fúzním reaktoru pouze vysoce odolné materiály, případně jejich kombinace ve formě tzv. FGM (funkčně gradovaných materiálů).

Cílem diplomové práce je na základě literární rešerše získat přehled o fúzní energetice a materiálech pro konstrukci fúzních reaktorů. V experimentální části je snahou prověřit možnost vytvoření FGM na wolframové podložce tak, aby wolfram z podložky postupně přecházel v měď. FGM požadovaného typu bude vytvořen plazmovým navařováním jednotlivých vrstev o různém poměru wolframu a mědi ve struktuře.

1. Teoretická část

1.1. Termojaderná fúze

Termojaderná fúze je proces, který v obrovském měřítku probíhá na Slunci a lze tím tak považovat za prazáklad většiny obnovitelných zdrojů na planetě. Oproti jiným chemickým reakcím je účinnost využití paliva při jaderné fúzi 10 000 000x větší. Například pro elektrický výkon 1 GW by bylo zapotřebí spálit 2,5 milionu tun uhlí nebo využít v porovnání pouze 500 kilogramů vodíku, jakožto paliva pro fúzní reaktory. Vodík se vyskytuje na Zemi ve velkém množství, díky čemuž představuje potenciální zásobu paliva pro fúzní elektrárny na desítky milionů let. Během fúzní reakce navíc nevznikají žádné emise skleníkových plynů jako při spalování fosilních paliv a rovněž odpadá potřeba dlouhodobého skladování vyhořelého jaderného paliva, jako v případě jaderných elektráren. Zároveň je obrovskou výhodou fúzního reaktoru jeho vysoká bezpečnost, kdy výbuch reaktoru je v případě poruchy naprosto vyloučen. [1]

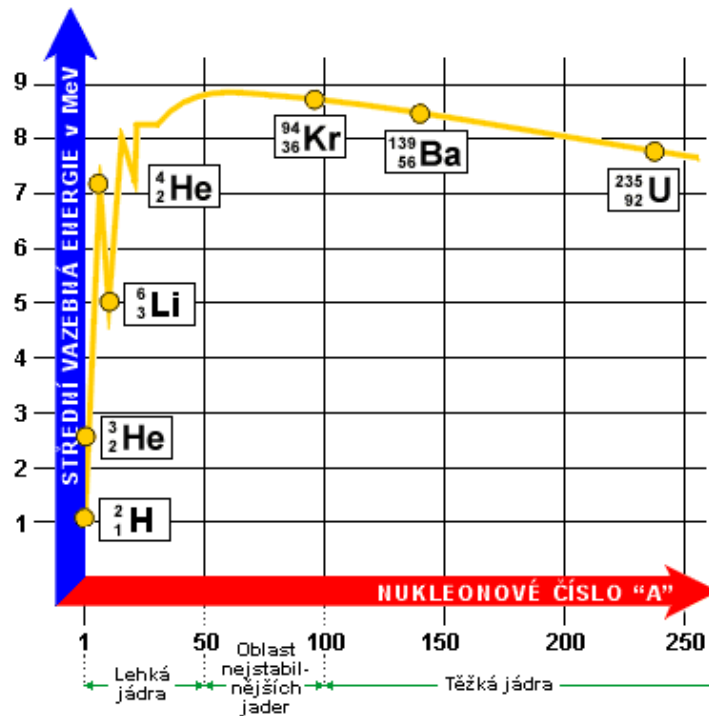
Termojaderná fúze se tedy jeví jako nesmírně perspektivní způsob výroby elektrické energie, který bude bezemisní, bezpečný a zároveň prakticky nevyčerpatelný. [1]

1.1.1. Princip

Princip termojaderné fúze spočívá ve slučování jader lehkých prvků na jádra těžší za vzniku velkého množství energie. [1]

Jadernou energii je možné uvolnit dvěma způsoby, štěpením jader těžkých prvků, nebo slučováním jader prvků lehkých. Významnou roli při tom hraje vazebná energie nukleonů¹, kterou lze definovat jako práci potřebnou k rozdělení jádra na jednotlivé protony a neutrony. Tato energie je závislá na počtu nukleonů v jádře a pro jednotlivé prvky a jejich izotopy je různá. Na obrázku 1 je možné pozorovat graf závislosti vazebné energie připadající na jeden nukleon v závislosti na počtu nukleonů v jádře. [1] [2]

¹ Nukleon je společný název pro částice tvořící jádro atomu (protony a neutrony).

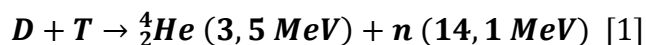


Obrázek 1 – Závislost střední vazebné energie na nukleonovém čísle A [2]

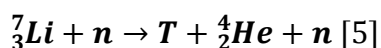
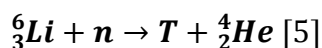
Graf zobrazuje rostoucí vazebnou energii u lehkých jader až do hodnoty necelých 9 MeV a následný pokles energie u jader těžkých. Během jaderných reakcí pak uvolněná energie vyplývá z rozdílu vazebných energií jednotlivých prvků na začátku a na konci reakce. Z grafu je tedy zřejmé, že slučováním jader lehkých prvků lze uvolnit mnohem více energie než štěpením jader těžkých prvků. [1] [2]

Aby bylo možné dosáhnout syntézy, je potřeba k sobě jádra přiblížit na vzdálenost 10^{-14} m. Jádra jsou totiž kladně nabitá a vzájemně se vlivem elektrostatické síly odpuzují. Až při dosažení takto malé vzdálenosti začne působit přitažlivá jaderná síla a dojde k jejich sloučení. Toho lze docílit srážením jader dostatečně velkou rychlostí, kterou jim je možné udělit pomocí lineárního urychlovače. Tento způsob je však kvůli své energetické náročnosti nevhodný a spotřebovaná vstupní energie by byla mnohem vyšší než vyrobená energie výstupní. Druhým, vhodnějším způsobem, jak udělit jádrům potřebnou rychlost je jejich ohřev na tzv. zápalnou teplotu. Se zvyšující se teplotou roste přímo úměrně rychlost pohybu částic a dostatečným ohřevem je tak možné dosáhnout termojaderné fúze. [1]

Jaderných fúzních reakcí existuje velké množství. Nejsnáze dosažitelná, je díky nejnižší zápalné teplotě reakce těžších izotopů vodíku, deuteria a tritia (D-T reakce). Jejich sloučením vzniká těžší jádro hélia a neutron. [1]



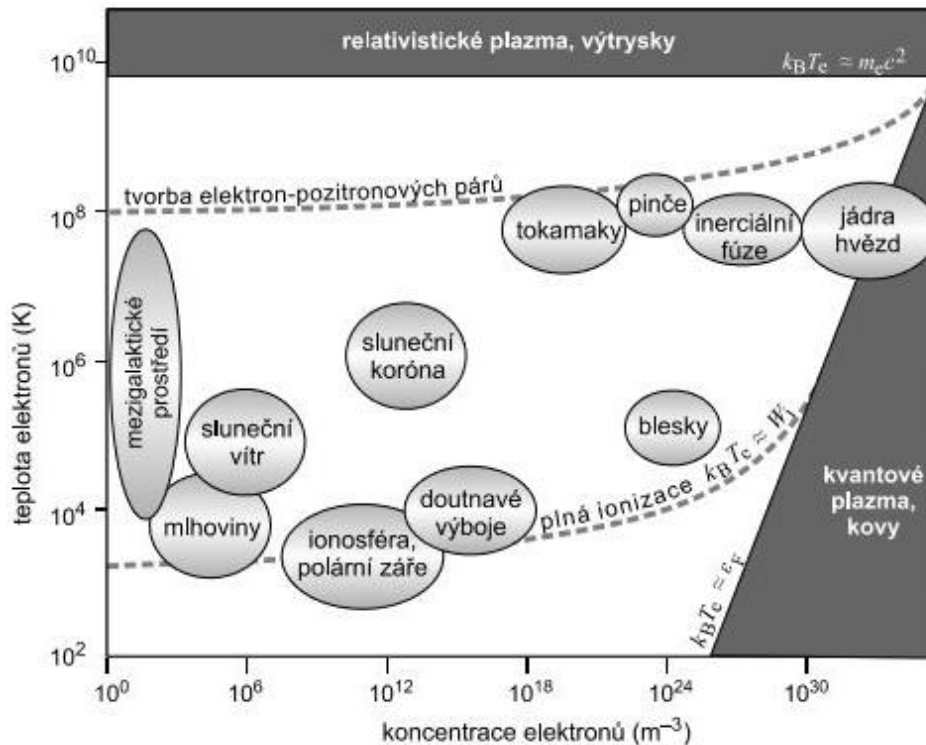
Deuterium je stabilní izotop vodíku ${}^2\text{H}$ s jedním neutronem a v přírodě se vyskytuje ve velkém množství. Například ve světových oceánech je odhadem okolo 35 milionů tun. Oproti tomu tritium je nestabilní izotop vodíku ${}^3\text{H}$ s dvěma neutrony a poločasem rozpadu 12,3 let, díky čemuž se v přírodě volně nevyskytuje. Lze jej však vyrábět z lithia pomocí reakce s neutronem, a to přímo v obálce fúzního reaktoru. [3] [4] [5]



Zápalná teplota, při které je možné dosáhnout reakce deuteria a tritia se řádově pohybuje v desítkách milionů stupňů celsia. Při takto vysokých teplotách se může hmota nacházet pouze v jediném skupenství, které je označováno jako plazma. [1]

Plazma je fyzikální pojem zavedený pro speciální stav plynu, který je většinou označován jako čtvrtý stav hmoty. Plazma vzniká dodáním dostatečného množství tepelné energie do plynu, čímž dojde k jeho částečné a později úplné ionizaci. Při ionizaci se uvolňují záporně nabitě elektrony z elektronového obalu, které se pak pohybují nezávisle vůči kladně nabitým iontům. Díky tomu, že plazma obsahuje volné nosiče elektrického náboje, vykazuje vysokou elektrickou vodivost a tzv. kolektivní chování, kdy jako celek reaguje na elektrická a magnetická pole, a také je sama vytváří. Další základní vlastností plazmatu je kvazineutralita, což znamená, že v makroskopických objemech obsahuje stejný počet kladně a záporně nabitých částic. [6] [7]

Plazma lze dělit podle mnoha různých kritérií jako je například stupeň ionizace, teplota, hustota a další. Na obrázku 2 jsou různé druhy plazmatu rozděleny v závislosti na teplotě a koncentraci elektronů.



Obrázek 2 - Různé druhy plazmatu [6]

V případě termojaderné fúze hovoříme o vysokoteplotním plně ionizovaném plazmatu, kdy teplota překračuje 10^6 K a všechny atomy jsou plně ionizované. [6]

Aby bylo možné dosáhnout termojadernou reakcí energetického zisku, musí být splněny podmínky týkající se hustoty plazmatu a doby, po kterou je plazma při této hustotě udrženo. Tato podmínka se označuje jako Lawsonovo kritérium a určuje minimální hodnotu součinu hustoty plazmatu n a doby jeho udržení t_E tak, aby bylo dosaženo energetického vyrovnání. [1] [6]

$$n \cdot t_E \geq f(T) \quad [6]$$

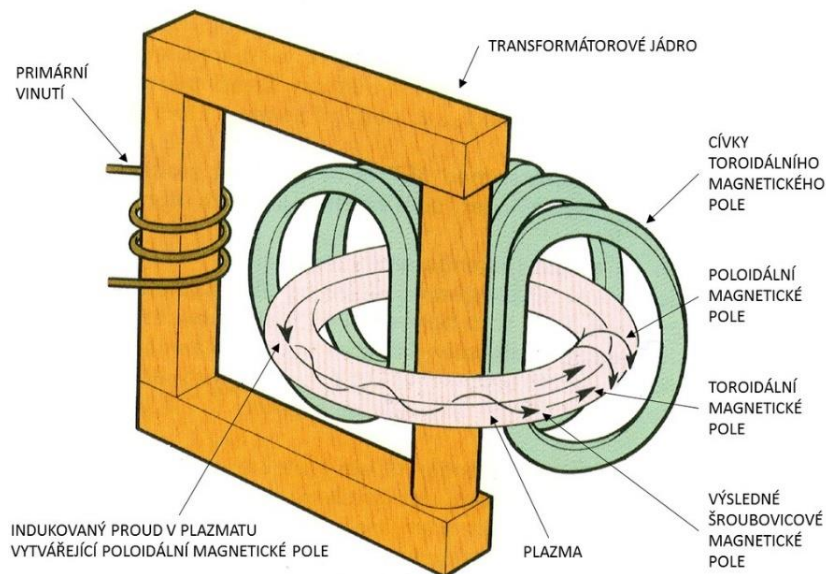
Pro dosažení rovnováhy mezi energií vyrobenou a spotřebovanou na ohřev a náhradu ztrát, přesahuje Lawsonovo kritérium hodnotu $10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$. [3]

Ke splnění tohoto kritéria je možné využít dvou přístupů. První možností je dosažení velké hustoty plazmatu (10^{31} jader/cm³) a krátkého udržení okolo 10^{-10} sekund. Druhou možností je naopak dosažení malé hustoty (10^{20} jader/cm³) s dlouhou dobou udržení řádově několika sekund. První způsob se nazývá inerciální udržení, druhý způsob magnetické udržení. Pro inerciální udržení plazmatu je velmi důležité stlačení paliva, ke

kterému se používá velmi výkonný laser, nebo intenzivní svazek částic či iontů. Výzkum se také zaměřuje na možnost sestavení kompaktního urychlovače částic pomocí laserových svazků. V současné době se však zatím nepodařilo termojadernou reakci inerciálním způsobem realizovat. Výrazně perspektivnější se zdá být druhý způsob, magnetické udržení, které má k dosažení řízené termojaderné fúze výrazně blíže. Výzkum se však stále ubírá oběma směry. [1] [3] [4]

1.1.2. Tokamak

Tokamak (z ruského: Toroidalnaja Kamera i Magnitnyje Katuški, neboli toroidální komora a magnetické cívký), je zatím nejúspěšnější typ zařízení pro uskutečnění řízené termojaderné reakce. Jedná se o uzavřenou vakuovou komoru ve tvaru dutého prstence, která je umístěna na transformátorovém jádře a obklopena magnetickými cívkami. Schéma tokamaku je možné pozorovat na obrázku 3. [1]



Obrázek 3 - Schéma tokamaku [4]

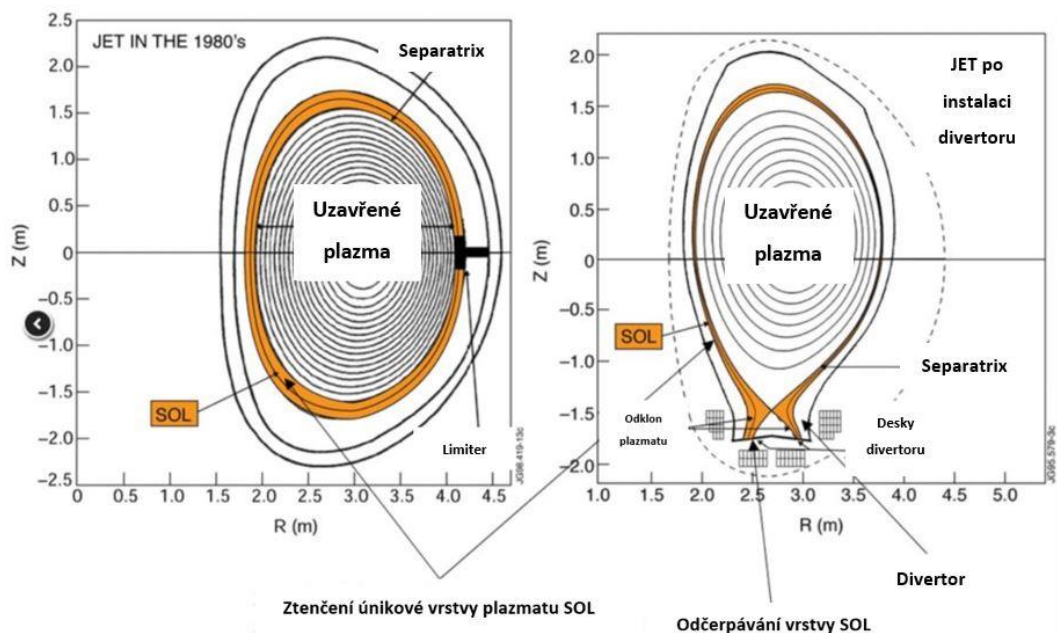
První tokamak byl vyroben v Sovětském svazu již v 50. letech minulého století [1]

Tokamak používá k uskutečnění fúze magnetického udržení plazmatu. Aby bylo vysokoteplotní plazma udrženo v magnetickém poli mimo dotyk stěn, využívá se kombinace toroidálního a poloidálního magnetického pole. Toroidální magnetické pole se vytváří pomocí magnetických cívek, které jsou umístěny okolo komory. Poloidální pole, jehož složka je přibližně 100x menší, je vytvářeno elektrickým proudem, který je

indukován do plazmatu pomocí transformátoru. Kombinací těchto dvou polí je vytvořeno magnetické pole ve tvaru šroubovice a umožňuje plazmatu cirkulovat uvnitř komory. Proud indukovaný do plazmatu zároveň slouží k jeho základnímu ohřevu. Tento ohřev lze však použít pouze v počáteční fázi, s rostoucí teplotou a klesajícím odporem ztrácí účinnost. Další způsob ohřevu lze uskutečnit pomocí elektromagnetického vlnění o vhodné frekvenci, která se pohybuje u iontů v rozmezí 40 – 120 MHz a u elektronů 60 – 200 GHz. Třetím způsobem ohřevu je vstřikování neutrálních atomů deuteria. Energie atomů by měla odpovídat stonásobku teploty plazmatu a svou energii předávat pomocí srážek. Vstřikování atomů deuteria bude zároveň dodáváno další palivo. Posledním způsobem ohřevu je pak ohřev pomocí samotné fúzní reakce. Po dosažení zápalné teploty začne docházet ke slučování jader a energii vzniklou při reakci je možné využít k samoohřevu. Pro budoucí termojaderné elektrárny se předpokládá, že kromě okamžiku zapálení reakce bude dostačujícím způsobem ohřevu pouze samoohřev. Vnější ohřev by v průběhu reakce sloužil pouze jako prostředek zvyšující bezpečnost. [1] [3] [4]

Z hlediska využitelnosti tokamaku v energetickém průmyslu představuje mechanismus s indukci elektrického proudu problém. Pokud je v primárním vinutí transformátoru dosažen maximální proud, který je napájecí zařízení schopno dodat, přestává se do plazmatu proud indukovat, změní se konfigurace magnetického pole a již nelze udržet cirkulující plazma. Tento problém by bylo možné vyřešit pomocí přepólování a změny směru proudu v plazmatu. Tokamak by tak pracoval v pulzním režimu. Z hlediska výroby elektřiny je však nutné zachovat konstantní tok energie a z toho důvodu se pro budoucí fúzní reaktory předpokládá neinduktivní generování proudu pomocí tzv. vlečných systémů. Tento způsob spočívá ve směřování vysokofrekvenčních elektromagnetických vln nebo svazků neutrálních atomů do plazmatu. Toto vlnění by pak neslo elektrony na čele vlny podél prstence a vytvářelo tak vlečný proud. Dnes je možné docílit tímto způsobem výboje trvajících několik desítek sekund. Současně je možné využít i tzv. bootstrap proudu, který vzniká v plazmatu samovolně v důsledku rostoucího tlaku směrem do středu komory. S využitím neinduktivního generování elektrického proudu by již bylo možné dosáhnout konstantního výkonu reaktoru. [1] [4] [8]

Dalším podstatným problémem, se kterým je nutné počítat, je odvod odpadních produktů ven z vakuové komory. Původní koncepcce tokamaku s tímto problémem příliš nepočítala, dnes je však nutné se tímto problémem zabývat, neboť přítomnost spalin způsobuje energetické ztráty a znesnadňuje ohřev plazmatu. Spaliny vznikají v průběhu fúzní reakce, jejíž výsledkem jsou jádra atomů hélia. Jejich vysoká koncentrace v plazmatu by časem znemožnila uskutečnění reakce. Z toho důvodu byla vakuová komora upravena a byl přidán tzv. divertor. Divertor je zařízení sloužící k čištění a stabilizaci plazmatu. Obvykle je umístěn ve spodní části komory, a kromě hélia odvádí také nečistoty uvolněné ze stěn, jako je uhlík a kyslík. Zároveň odvádí i nespálené vodíkové palivo, které je pak možné znovu použít. Během výzkumu bylo zjištěno, že se nečistoty v plazmatu koncentrují ve vrchní vrstvě, proto bylo pro možnost odčerpání spalin nutné modifikovat magnetické pole, aby byly spaliny odváděny do spodní části komory. Divertor pak odčerpává spaliny pomocí výkonných vymrazovacích vývěv. Na obrázku 4 je možné vidět porovnání průřezu plazmové komory u tokamaku JET před a po instalaci divertoru. Nečistoty jsou obsažené ve vnější vrstvě plazmatu označené jako SOL (scrape-off layer). Z obrázku je patrné, že divertor značně snížil jejich koncentraci. [1] [4]

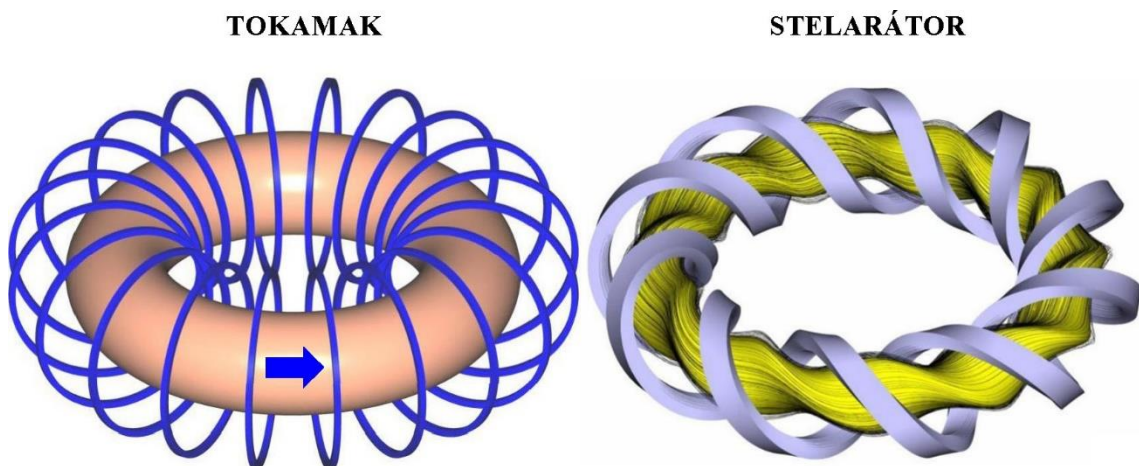


Obrázek 4 - Průřez plazmovou komorou tokamaku JET před a po instalaci divertoru [4]

Během výzkumu se zjistilo, že kromě odstraňování nečistot přispěl divertor významným způsobem také ke stabilizaci plazmatu. [4]

1.1.3. Stelarátor

Stelarátor je další typ zařízení, které slouží k uskutečnění řízené termojaderné fúze. První stelarátor byl navržen a vyroben podobně jako tokamak v 50. letech minulého století. Stejně jako tokamak využívá i tento typ zařízení magnetického udržení plazmatu v komoře ve tvaru dutého prstence. Porovnání konstrukcí obou zařízení je zobrazeno na obrázku 5. [1] [3] [4]



Obrázek 5 - Porovnání konstrukce tokamaku a stelarátoru

Oproti svému konkurentovi však stelarátor nevyužívá k vytvoření magnetického pole indukci elektrického proudu do plazmatu. Magnetické pole je tvořeno pouze vnějšími cívkami. Díky tomu, že plazmatem neprotéká elektrický proud, je možné plazma udržovat kontinuálně s nepřetržitým režimem uvolňování tepla. Rovněž odpadají problémy spojené s proudovými nestabilitami. Na druhou stranu tento způsob magnetického udržení bez indukce proudu do plazmatu vylučuje možnost účinného počátečního ohřevu plazmatu Jouleovým teplem. Mnohem závažnější problém se však týká samotného udržení plazmatu pouze pomocí vnějších cívek. Cívky musí být schopné vytvořit velmi komplikované magnetické pole, ve kterém je možné udržet cirkulující plazma. Z toho důvodu jsou tvary cívek nesmírně složité. Díky těmto komplikacím má tokamak nad stelarátorem vývojově velký náskok. Vývoj stelarátorů však stále pokračuje a díky moderní výpočetní technice je možné vytvořit optimální tvary cívek pro dlouhou dobu udržení energie i zde. [1] [3] [4]

V současnosti existují velké experimentální termojaderné reaktory na principu stelarátoru, které dosahují pokroku, například v Německu reaktor W7-X, nebo v Japonsku reaktor LHD. Je tedy možné, že budoucí fúzní elektrárny budou využívat k výrobě elektřiny i zařízení typu stelarátor. [1]

1.1.4. Projekt ITER

Projekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), je druhý největší mezinárodní vědecký projekt s cílem postavit dosud největší experimentální termojaderný reaktor, který by byl schopen dosáhnout kladného energetického zisku. Reaktor bude typu tokamak s produkovaným výkonem 500 MW. Poměr mezi vyrobenou energií z fúzní reakce a dodanou energií pro ohřev by měl být vyšší než 10. Teplota plazmatu bude dosahovat 150 milionů kelvinů a doba jeho udržení 400 sekund. [1] [3]

Smlouva o projekt ITER byla podepsána již v roce 1987 mezi USA, SSSR, Japonskem a Evropským společenstvím. V roce 1998 byly známy parametry reaktoru, který měl dosahovat fúzního výkonu 1500 MW a poměr mezi vyrobenou energií a energií pro ohřev měl dosahovat téměř nekonečna. Cena projektu byla stanovena na 6 miliard dolarů. Spojené státy pak vzhledem k nízkému zájmu o vývoj termojaderné energetiky od projektu odstoupily. Zájem začal postupně upadat také u ostatních zemí. Nakonec byl v roce 2001 vypracován nový, redukovaný plán projektu, který představoval parametry reaktoru v dnešní podobě a snížil cenu projektu na 3 miliardy dolarů. V roce 2003 se do projektu zapojila Čína, Jižní Korea a znovu se připojily i Spojené státy. O dva roky později v roce 2005 se k projektu připojila také Indie. Téhož roku bylo také definitivně rozhodnuto o místě stavby ITERu. Konkrétně bylo vybráno místo na jihu Francie nedaleko zámku Cadarache. Výstavba samotného ITERu pak začala v roce 2007. [1] [3]

V současné době se na projektu podílí celkem 35 zemí světa. Dnes v roce 2020 je již dostavěna budova s výškou 80 m, délkou 120 m a šířkou 73 m a začíná sestavování samotného reaktoru. První zapálení plazmatu se předpokládá na přelomu roku 2025 a 2026. [3]

1.2. PFM (Plasma Facing Materials)

Plasma facing materials je označení pro materiály, které jsou vystavené působení plazmatu. Problematika těchto materiálů je v oblasti termojaderné energetiky důležitým tématem. Vnitřní stěny vakuové komory jsou vystaveny extrémním podmínkám v podobě vysokých teplotních toků, obrovského tepelného namáhání a vysokého neutronového záření. Tyto části reaktoru, které se dostávají do kontaktu s plazmatem, se označují jako plasma facing components. Konkrétně se pak jedná o divertor a tzv. first wall neboli první stěnu, která je první materiálovou stěnou pokrývající vnitřní část vakuové komory. Nejvíce namáhaným komponentem je divertor, který jako jediný přichází do přímého kontaktu s plazmatem a bude muset u tokamaku ITER odolat teplotě až 3000 °C a tepelnému toku mezi 10 až 20 MWm⁻². První stěna v přímém kontaktu s vysokoteplotním plazmatem nebude, díky jeho udržení v elektromagnetickém poli. I přesto však bude muset snášet teploty dosahující až 700 °C a tepelný výkon okolo 2 MWm⁻². Z toho důvodu je od materiálu vyžadována vysoká teplotní odolnost, vysoká teplotní stabilita a odolnost proti teplotním tokům. Velkou zátěží pro materiál první stěny bude také vysoký teplotní gradient směrem k plazmatu. Velký rozdíl teplot na povrchu a uvnitř materiálu může způsobit pnutí a následně vznik trhlin. Zároveň může dojít k delaminaci povrchových vrstev materiálu. Z toho důvodu je důležitým požadavkem na materiál vysoká odolnost proti teplotním šokům a nízká hodnota součinitele délkové teplotní roztažnosti. Zároveň je také vyžadována vysoká tepelná vodivost, aby bylo možné materiál účinně chladit. Pro plasma facing materials je důležitá také interakce s plazmatem. Vlivem účinků plazmatu může docházet k erozi materiálu, ten pak uvolňuje částice, které mohou mít negativní vliv na udržení plazmatu a mohou ukončit výboj. Nejvíce ovlivňují stabilitu plazmatu částice s vysokým protonovým číslem Z. Proto je potřeba využít pro vnitřní obložení materiály s nízkým protonovým číslem. Dále je důležitá interakce materiálu s palivem. První stěna je vystavena velkému toku izotopů vodíku, který může způsobit vodíkovou křehkost. Obrovský tok neutronů, které vznikají během fúzní reakce, může způsobit vznik poruch v krystalové mřížce materiálu a ty mohou vést k jeho zkřehnutí. Z toho důvodu je u materiálů vyžadována odolnost proti vodíkové křehkosti a neutronovému záření. Zároveň je potřeba brát zřetel na možnost vzniku dlouhodobých radioaktivních prvků

vlivem reakce neutronů s materiálem stěny. V neposlední řadě je také důležité, aby materiály uvnitř komory nezadržovaly tritium. Zadržování tritia v první stěně snižuje účinnost paliva, a dokonce může pro reaktor představovat bezpečnostní rizika. [1] [9] [10]

1.2.1. Materiály

Z výše uvedených požadavků na PFM se jako nejvhodnější materiály jeví beryllium, materiály na bázi uhlíku a wolfram.

Beryllium je lesklý, šedý, velice tvrdý kov s dvěma alotropickými modifikacemi a velmi nízkým protonovým číslem. Díky nízkému protonovému číslu dobře interaguje s plazmatem a neovlivňuje jeho stabilitu, čímž se jeví jako velmi vhodný materiál pro první stěnu. Celkem bylo beryllium použito na první stěnu již na třech tokamacích. Při jeho použití bylo experimentálně zjištěno snížení koncentrace nečistot v plazmatu na minimum. Z původních 4 – 7 % uhlíku došlo k jeho snížení na 0,5 % a z původní koncentrace 0,5 – 2 % kyslíku došlo ke snížení na zanedbatelné množství. Díky tomu bude beryllium použito i na první stěnu tokamaku ITER. Způsob aplikace bude například ve formě dlaždic, které budou připevněny k chlazení. Další možností je vytvoření silného povlaku pomocí plazmového nástřiku, který umožňuje zároveň snadnou opravu přímo uvnitř komory. Nevýhodou beryllia je jeho reakce téměř se všemi kovy, se kterými vytváří křehké intermetalické fáze. Pro potlačení jejich vzniku je vhodné použít při spojování mezivrstvy titanu. Byla vyvinuta také speciální metoda pájení s velmi rychlým ohřevem pomocí elektronového paprsku, která rovněž umožňuje potlačení vzniku intermetalických fází. Další nevýhodou beryllia je poměrně nízká teplota tání a degradace mechanických vlastností v důsledku neutronového záření. Vlivem reakce s neutrony vznikají v materiálu defekty, které zadržují vodík, což je rovněž nežádoucím efektem. Další nevýhodou beryllia je obtížná zpracovatelnost kvůli jeho vysoké toxicitě. [9] [10] [11]

Další materiály vhodné pro plasma facing components, jsou materiály na bázi uhlíku, konkrétně uhlíkové kompozity neboli CFC (Carbon Fibre Composites). Pro tokamak ITER je určeno použití kompozitu vyztuženého 3D uhlíkovými vlákny v uhlíkové matici na části divertoru, které budou vystaveny vysokým teplotním tokům. Tyto

materiály se totiž vyznačují vysokou tepelnou odolností a také odolností vůči teplotním šokům. Zároveň mají vysokou tepelnou vodivost a nízký koeficient délkové teplotní roztažnosti. Uhlíkové kompozity mají také vysokou pevnost a díky vyztužujícím vláknům mají na rozdíl od homogenního grafitu menší sklon k poškození. Jedná se však o anizotropní materiály a jejich vlastnosti se mohou v různých směrech lišit. Výhodou materiálů na bázi uhlíku je také nízké protonové číslo (vyšší než u beryllia). Nevýhodou je pak degradace některých vlastností při neutronovém záření, konkrétně snížení tepelné vodivosti. Další nevýhodou je nízká odolnost proti chemické erozi a vysoké zadržování tritia. Odolnost proti chemické erozi je však možné zlepšit pomocí příměsí bóru a pro minimalizaci absorbování tritia lze použít příměs křemíku. V oblasti výzkumu a vývoje je velmi složitým tématem spojování těchto materiálů s chladicími systémy. Jako materiál chlazení bude použita měď. Problémem je však veliký rozdíl teplotních roztažností obou materiálů, který může způsobit delaminaci. [9] [10]

Hlavním konkurentem uhlíkových kompozitů je wolfram. Jeho využití se předpokládá pro divertor tokamaku ITER. Wolfram je kov s nejvyšší teplotou tání 3422 °C. Má vysokou odolnost proti teplotním šokům, vysokou pevnost za tepla a dobrou tepelnou vodivost. V porovnání s uhlíkovými kompozity a berylliem nejméně zadržuje tritium. Nevýhodou wolframu je oproti dvěma předchozím materiálům výrazně vyšší protonové číslo. Další nevýhodou je špatná odolnost vůči neutronovému záření, které způsobuje křehkost. Neutronové záření zároveň vede u wolframu k tvorbě rhenia a osmia, které mají nepříznivý vliv na tepelnou a elektrickou vodivost. Dávka ozáření 4 dpa vede ke snížení elektrické vodivosti až o 24 %. Přítomnost 5 % rhenia pak snižuje tepelnou vodivost o 20 % v porovnání s čistým wolframem. Na druhou stranu příměs rhenia ve wolframem zlepšuje jeho mechanické vlastnosti při nižších teplotách. Nevýhodou wolframu je totiž tranzitní lomové chování. Z toho důvodu je možný rozsah použití čistého wolframu pouze nad tranzitní teplotou a pod teplotou rekrytalizace. Rozšíření tohoto teplotního intervalu je možné například pomocí disperzních částic TiC. Hmotnostní obsah 0,2 % TiC ve wolframem výrazně snižuje tranzitní teplotu a zároveň zvyšuje teplotu rekrytalizace. Zvýšení rekrytalizační teploty a zlepšení pevnostních vlastností s ohledem na minimální ovlivnění tepelné vodivosti, je možné realizovat disperzí oxidů La_2O_3 nebo Y_2O_3 , které stabilizují zrna. Perspektivním způsobem zvýšení

houževnatosti wolframu je vytvoření kompozitu na bázi wolframové matrice a wolframových vláken, pomocí chemického napařování. Stejně jako v případě uhlíkových kompozitů, je problémem wolframu velký nesoulad v teplotní roztažnosti s materiálem chlazení, který může vést ke vzniku napětí a následnému porušení. [9] [10] [12] [13] [14] [15]

1.2.2. Spojování PFM

Složitá zařízení jako jsou fúzní reaktory, vyžadují spojování různých materiálů s rozdílnými vlastnostmi, což může představovat technologické problémy. V předchozí kapitole 1.2.1 byl zmíněn vznik problémů při spojování PFM s materiálem chlazení. Tyto problémy jsou dány rozdílnými mechanickými a tepelnými vlastnostmi spojovaných materiálů a mohou způsobit vznik koncentrace napětí, problémy se smáčivostí nebo vzájemnou reaktivitu. Chlazení tokamaku ITER bude realizováno pomocí kanálů ze slitiny mědi CuCrZr. Reaktivita beryllia může při spojování s mědí vést ke vzniku křehkých intermetalických fází. Při spojování mědi s wolframem nebo uhlíkovými kompozity zase dochází vlivem velkého rozdílu teplotních roztažností k velké koncentraci napětí na materiálovém rozhraní. [9] [10] [16]

Dostupné technologie spojování zahrnují například tvrdé pájení, svařování, izostatické lisování za tepla, nebo lepení. Alternativním řešením může být také vytvoření povlaku přímo na materiálu chladiče. Vytváření povrchových vrstev PFM materiálů lze realizovat například pomocí plazmových nástřiků VPS (Vacuum Plasma Spraying), nebo pomocí chemického napařování CVD (Chemical Vapour Deposition). [9] [10]

Současný návrh tokamaku ITER počítá s využitím kompaktních wolframových monobloků, kterými bude vést chladicí potrubí. Slibným řešením problému se vnikem velké koncentrace napětí na rozhraní wolframu a mědi, by mohlo být využítí tzv. funkčně gradovaných materiálů, které by ostré rozhraní nahradily rovnoměrným přechodem. [9] [10] [17]

1.3. Funkčně gradované materiály

Funkčně gradované materiály neboli FGM (Functionally Graded Materials), jsou pokročilé inženýrské materiály navržené pro specifickou funkci a použití. Tyto materiály se vyznačují záměrně vytvořenou proměnou mikrostrukturou nebo proměnným chemickým složením, díky čemuž cíleně mění své užité vlastnosti. U funkčně gradovaných materiálů není ostré rozhraní mezi jednotlivými složkami, nýbrž gradovaná přechodová oblast. Pozvolná změna složení umožňuje lepší adhezi a zabraňuje možné delaminaci, například při tepelném namáhání vlivem skokové změny vlastností. [18]

1.3.1. FGM na bázi W/Cu

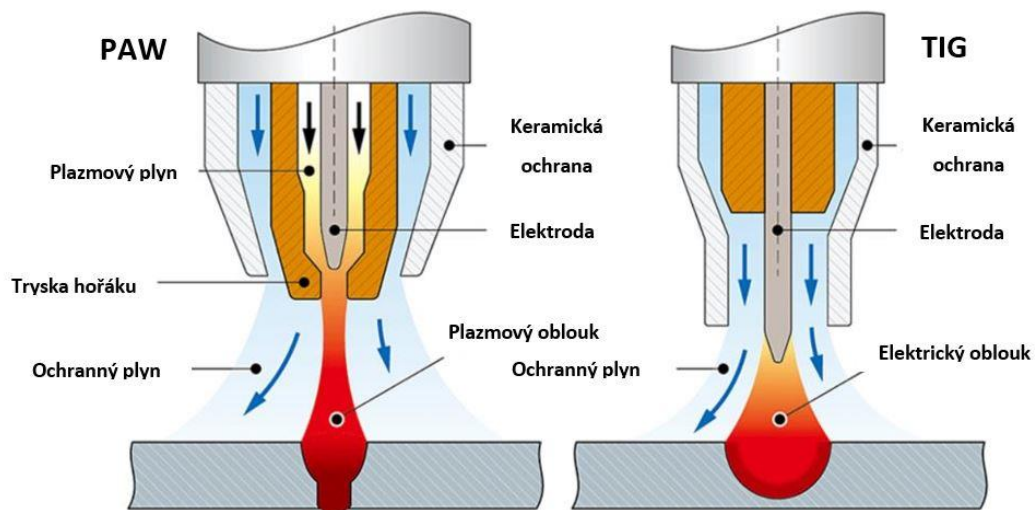
Funkčně gradované materiály na bázi wolframu a mědi by mohl být řešením problému se vznikem vysoké koncentrace napětí vlivem nesouladu teplotních roztažností. Využití funkčně gradované mezivrstvy mezi wolframovým monoblokem a měděným chladícím potrubím má kromě snížení teplotního namáhání pozitivní vliv také na zvýšení pevnosti. Částice wolframu mají totiž v mědi zpevňující účinek. Výzkumy zabývající se FGM na bázi W/Cu zjistily snížení koncentrace napětí při použití minimálně tří odstupňovaných vrstev s minimální tloušťkou 0,3 mm. Příliš tenké vrstvy v řádu desítek mikrometrů ke snížení napětí nevedly. Možné způsoby vytváření FGM na bázi wolframu a mědi jsou například pomocí plazmových nástřiků, izostatického lisování za tepla nebo pomocí CVD a PVD povlaků. [19] [20] [21]

Experimentální část práce je zaměřena na zhotovení takového materiálu metodou plazmového navařování PTA.

1.4. PTA (Plasma Transferred Arc)

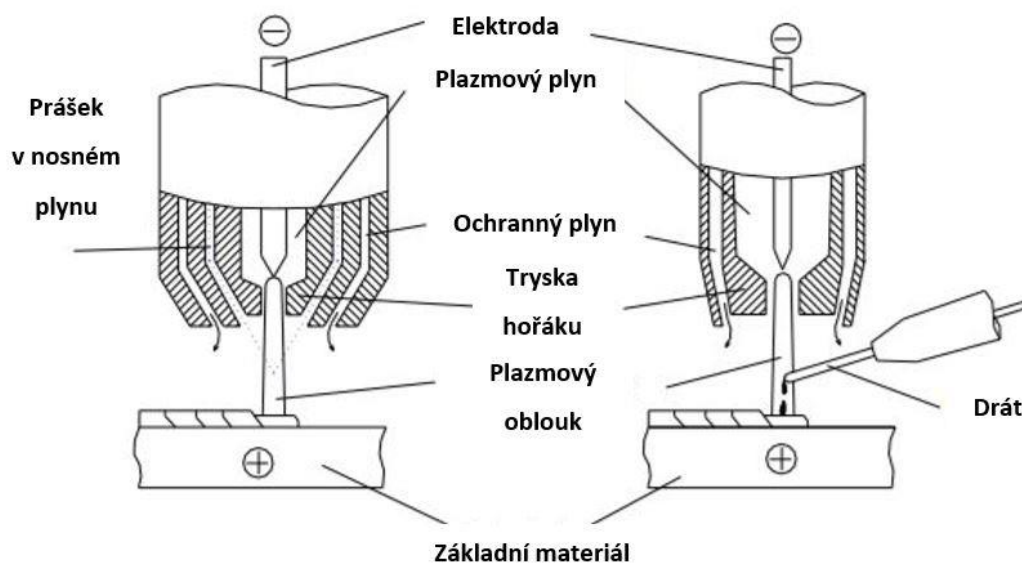
Plazmové svařování a navařování patří mezi nejmodernější a vysoce produktivní metody obloukového svařování v ochranné atmosféře. Pro tuto metodu je typická vysoká koncentrace energie a vysoká pracovní teplota. [22]

Technologie plazmového svařování se vyvinula z metody TIG (Tungsten Inert Gas). Stejně jako u metody TIG hoří oblouk mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem v ochranné atmosféře inertního plynu. Od svého předchůdce se liší rozdílným uspořádáním hořáku a také fyzikálními odlišnostmi svařovacího procesu. Na rozdíl od metody TIG je přenos oblouku realizován pomocí plazmatu. Plazmové svařování je zároveň produktivnější a dosahuje se při něm výrazně vyšších teplot. Porovnání metod plazmového svařování a TIG je znázorněno na obrázku 6. [22]



Obrázek 6 - Srovnání metod PAW a TIG [23]

Plazmové svařování lze rozdělit podle druhu přídavného materiálu na PAW (Plasma Arc Welding), kdy je použit přídavný materiál ve formě drátu a na PTA (Plasma Transferred Arc), při kterém je použit přídavný materiál ve formě prášku. Porovnání obou metod znázorňuje obrázek 7. [24]



Obrázek 7 – Srovnání plazmového svařování metodou PTA (vlevo) a PAW (vpravo) [24]

Metody se mezi sebou liší v rozdílném uspořádání hořáku, kdy u PTA je navíc použit tzv. nosný (podávací) plyn, který slouží k transportu prášku do tavné lázně. Výhodou metody PTA je menší promísení mezi přídavným a základním materiálem (řádově okolo 6 až 10 %), oproti metodě PAW (20 až 25 %). Díky tomu lze metodou PTA připravit tvrdší návary s čistší mikrostrukturou a menší tepelně ovlivněnou oblastí. [24]

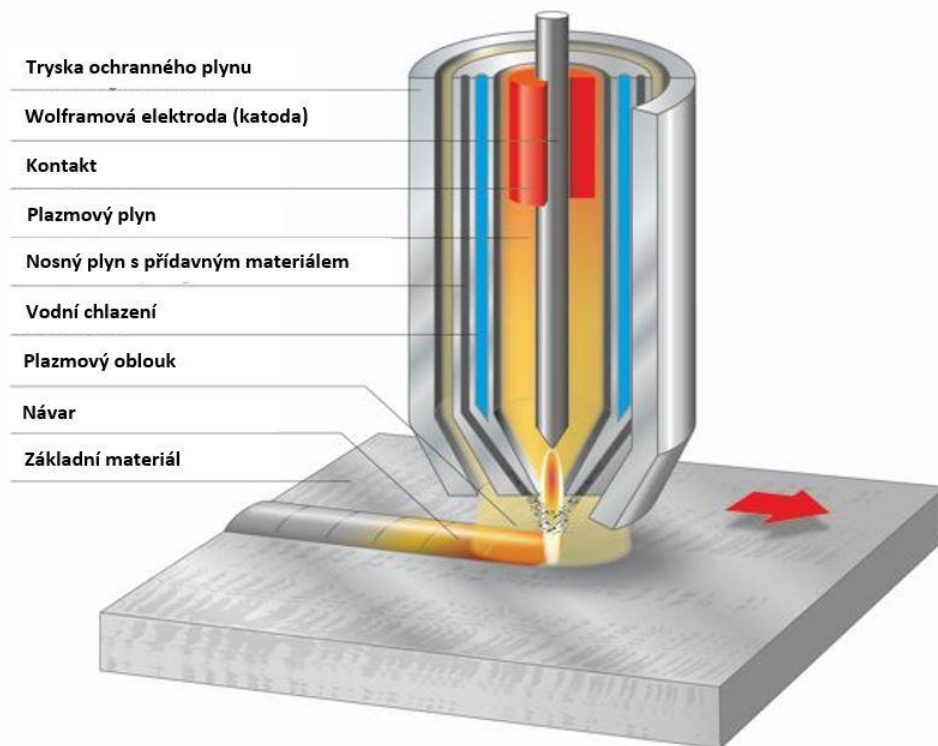
1.4.1. Princip a charakteristika plazmového svařování

Při plazmovém svařování dochází k přenosu elektrického oblouku pomocí plazmatu. Definice plazmatu je vysvětlena v kapitole 1.1.1. Pokud je plazmový plyn procházející kolem elektrody při normální teplotě dvou a víceatomová molekula, dochází ještě před ionizací nejprve k jeho disociaci, čímž dojde k rozpadu molekul plynu na jednotlivé atomy. Plazma je forma disociovaného a ionizovaného plynu, který je elektricky vodivý a svými vlastnostmi umožňuje hoření elektrického oblouku. Stabilita oblouku závisí na dostatečném napětí potřebném pro ionizaci plynu a dostatečném proudu potřebném k udržení plazmatu v ionizovaném stavu. Při svařování se nedosahuje tak vysokých teplot, aby došlo k úplné ionizaci plynu, ke které dochází až při teplotách okolo 100 000 K. Plazma je tak ionizováno pouze částečně. Část plynu, která

není zcela ionizována a je chladnější tak stabilizuje plazmový oblouk v ose hořáku, aby nedošlo k dotyku se stěnou trysky. [6] [25]

Metoda využívá k natavení materiálu vysoké koncentrace tepla a dynamického účinku plazmatu, což umožňuje fokusovat elektrický oblouk vznikající mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem, a tím minimalizovat natavení základního materiálu. Okolo elektrody proudí plazmový plyn, který se vlivem tepla oblouku prudce roztahuje, mění se v plazma a vysokou rychlostí proudí ven otvorem v trysce hořáku. Okolo je integrované vodní chlazení, které intenzivně chladí výstupní trysku hořáku, kvůli vysokým teplotám dosahujícím až 20 000 K. Okolo plazmového plynu proudí sekundární neboli ochranný plyn, který chrání samotnou tavnou lázeň od okolního prostředí. V případě použití technologie PTA je mezi plazmovým a ochranným plynem navíc koaxiální štěrbinu pro přívod přídavného materiálu ve formě prášku pomocí nosného plynu. K zapálení plazmového oblouku na začátku svařovacího procesu dochází pomocí tzv. pomocného (pilotního) oblouku, který je zapálen pomocí vysokofrekvenčního ionizátoru připojeného ke kovové trysce. Pomocný oblouk je zapálen mezi wolframovou elektrodou a měděnou stěnou trysky a vytváří tak dostatečně vodivé prostředí pro zapálení hlavního oblouku i na relativně dlouhou vzdálenost. [22] [25]

Podrobný popis hořáku včetně chlazení je znázorněn na obrázku 8.



Obrázek 8 - Podrobný popis hořáku pro metodu PTA [26]

U plazmového svařování rozdělujeme dva způsoby elektrického zapojení hořáku. První je tzv. přenesený způsob neboli závislé zapojení. Druhý je tzv. nepřenesený způsob neboli nezávislé zapojení. Zapojení závislé s přeneseným elektrickým obloukem je vhodné pro elektricky vodivé materiály. Záporný pól je připojen na wolframovou elektrodu a kladný pól na základní materiál. Tento způsob zapojení se používá zejména při svařování, navařování a řezání. U nezávislého zapojení s nepřeneseným obloukem jsou póly zdroje připojeny pouze na elektrodu a kovovou trysku. Tento způsob je vhodný pro elektricky nevodivé materiály a používá se především u žárových nástřiků a povrchového kalení. [25]

1.4.2. Procesní plyny

Obecně u plazmového svařování používáme tři druhy plynů. Prvním je plazmový plyn, který prochází tryskou hořáku a vlivem tepla oblouku se mění v plazma. Průtok plazmového plynu je 0,5 až 9 l/min. Druhým plynem je takzvaný fokusační plyn, který se používá pro zúžení plazmového paprsku a zároveň slouží jako podávací plyn pro přídavný materiál ve formě prášku². Jeho průtok se pohybuje v rozmezí 3 až 18 l/min. Posledním plynem je ochranný plyn, který chrání tavnou lázeň proti oxidaci a vlivům okolní atmosféry. Průtok ochranného plynu se pohybuje od 2 do 20 l/min a u aktivních materiálů jako je Ti, Zr, Ta se zvyšuje na 20 až 30 l/min. [22] [25] [27]

Jako plazmový plyn se nejčastěji používá argon, který patří mezi inertní plyny a má vysoký stupeň ionizace. Díky své poměrně nízké ionizační energii 15,7 eV tak umožňuje snadné zapálení plazmového oblouku. Zároveň umožňuje dobrou stabilitu oblouku a je vhodný pro všechny kovové materiály. Kromě čistého argonu lze použít také směs argonu a hélia nebo argonu a vodíku. Hélium má oproti argonu výrazně vyšší ionizační energii 24,6 eV, což má za následek horší zapalovací vlastnosti. Tepelná vodivost hélia je oproti argonu 11x vyšší, což umožňuje širší a hlubší průvar a také vyšší svařovací rychlost, a to především u uhlíkových ocelí. Hélium je stejně jako argon vhodné pro všechny kovové materiály a lze jej použít také jako ochranný plyn. Výhodou použití směsi Ar+He je také díky jeho vysoké tepelné vodivosti možnost použití nižšího svařovacího proudu a tím prodloužit životnost hořáku a elektrody. [22] [25] [27]

Stejně jako hélium má i vodík vyšší tepelnou vodivost než argon (9x), což umožňuje hlubší průvar a vyšší rychlost svařování. Ionizační energie vodíku je 13,6 eV, nicméně je důležité počítat také s disociační energií 4,46 eV, neboť se jedná o dvouatomovou molekulu. Směs Ar+H₂ lze použít také jako fokusační a ochranný plyn. Vodík vyniká svými dobrými rafinačními účinky a zvyšuje tak ochranu svarové lázně proti oxidaci. Použití kombinace těchto dvou plynů je vhodné především pro nelegované a austenitické oceli, není vhodné jej používat pro feritické oceli a pro citlivé materiály jako je titan či zirkon, nebo pro slitiny mědi a hliníku. [22] [25] [27]

² Při svařování používáme termín fokusační plyn, při navařování termín nosný (podávací) plyn.

1.4.3. Základní parametry svařování

Výslednou kvalitu svarového spoje technologií plazmového svařování ovlivňuje celá řada parametrů. Nejdůležitějšími parametry jsou pak svařovací proud, rychlost toku plazmového plynu a rychlost svařování. [22]

Svařovací proud ovlivňuje vlastnosti svaru prostřednictvím teploty a výstupního tlaku plazmatu. Zesílením svařovacího proudu lze dosáhnout větší šířky svaru, a to jak v oblasti kořene, tak na povrchu. Volba velikosti svařovacího proudu by měla vždy odpovídat volbě ostatních parametrů jako je rychlost svařování a rychlost průtoku plazmového plynu, aby nedošlo k nadměrné penetraci svarové lázně. [22]

Velikost svařovacího proudu je závislá také na způsobu plazmového svařování. U mikroplazmového svařování, kde se svařují velmi tenké materiály od tlouštěk 0,01 mm, například kovové fólie, až po plechy o tloušťce 2 mm, se pohybuje hodnota proudu v rozmezí 0,05 až 20 A. Při středněplazmovém svařování pro tloušťky materiálu od 0,6 do 3 mm se používá svařovací proud v rozsahu od 20 do 100 A. Posledním způsobem je svařování průvarové neboli svařování klíčovou dírkou (tzv. keyhole welding), kdy dochází vlivem tepla a dynamického účinku plazmatu k tvorbě otvoru ve svarové lázni, který se při posunu hořáku vlivem povrchového napětí opět zacelí. Díky tomu je možné svařovat tupé svary do tloušťky 8 mm bez nutnosti úpravy svarového úkosu. Metoda se používá pro svařování materiálů s tloušťkou stěny od 3 do 10 mm a hodnota svařovacího proudu se volí nad 100 A. [22] [25]

Ve spojitosti se svařovacím proudem není jediným parametrem, který ovlivňuje jakost svaru, pouze jeho velikost. U plazmového navařování metodou PTA, lze dosáhnout lepší kvality návaru pomocí pulzace proudu, kdy není použita konstantní hodnota, ale velikost proudu se s určitou frekvencí opakovaně zvyšuje a snižuje. Tím lze dosáhnout jemnější mikrostruktury a menšího promísení přídavného a základního materiálu a dosáhnout tak vyšší tvrdosti návaru. [28]

Velikost objemového toku plazmového plynu je úzce spjata s kinetickou energií oblouku a také hloubkou penetrace. Jedná se o parametr, který je volen v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu a také na rychlosti svařování, kdy se musí s rostoucí

hodnotou těchto parametrů úměrně zvyšovat. Rychlost posuvu hořáku se u plazmového svařování pohybuje v rozmezí 20 až 85 cm/min. [22] [25]

1.4.4. Navařování

Navařování je proces modifikace materiálu, při kterém dochází k vytváření povlaku na povrchu součásti. Jeho využití je významné zároveň z hlediska oprav a renovací. Nejvýznamnějším účelem je však zlepšování užitečných vlastností na povrchu materiálu, jako je například tvrdost, otěruvzdornost, chemická nebo tepelná odolnost atp. Navařování zaujímá významnou roli mezi technologiemi povrchového inženýrství, obzvláště pak plazmové navařování. Obecná výhoda navařování spočívá v pevném metalurgickém spojení základního materiálu s navařeným povlakem. [29]

Oproti ostatním metodám navařování umožňuje plazmové navařování velmi dobrou možnost kontroly svařovacího procesu s ohledem na zachování přijatelných investičních nákladů. Další velkou výhodou je možnost zhotovení návaru téměř libovolné tloušťky s minimálním promísením, a také možnost řízení teplotního výkonu bez ohledu na dodávání přídavného materiálu. Díky minimálnímu promísení lze dosáhnout požadované čistoty návaru již v první vrstvě, čímž lze významně snížit časovou náročnost. Zároveň lze dosáhnout velmi přesného a hladkého návaru s tolerancí povrchu v rozmezí 0,5 mm, což rovněž umožňuje zkrátit výrobní čas díky menším přídávům na obrábění. [29]

Navzdory poměrně dlouhodobému využití plazmového navařování, řádově několika desítek let, stále přicházejí zásadní zlepšení celého technologického procesu. [29]

2. Experimentální část

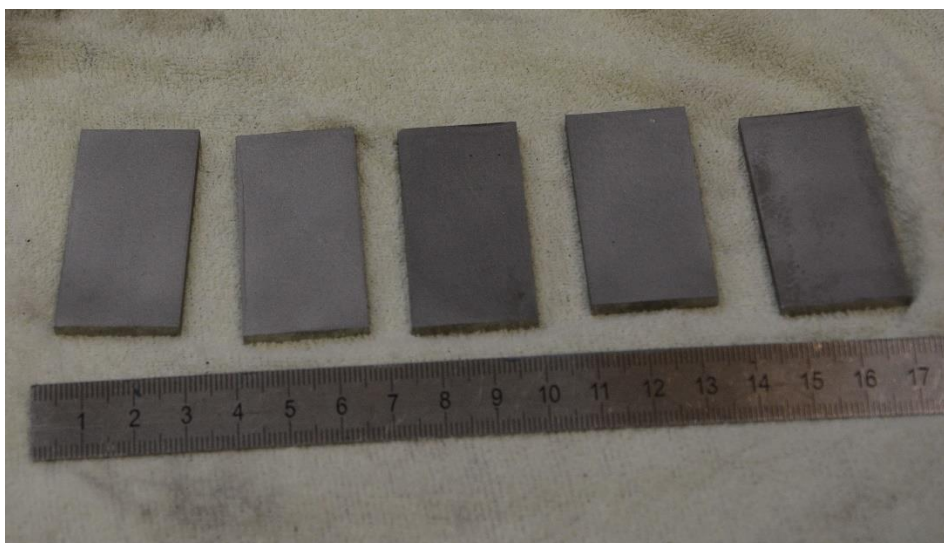
2.1. Cíl experimentu

Cílem této diplomové práce bylo ověřit možnost navaření směsi mědi a wolframu na kovovou podložku. Následně charakterizovat základní vlastnosti nanesených povlaků a zhodnotit výsledky.

Snahou bylo vytvořit funkčně gradovaný materiál na bázi mědi a wolframu. V teoretické části práce byla vysvětlena problematika těchto materiálů a byly zmíněny hlavní technologie výroby. V experimentální části práce bylo snahou vytvořit funkčně gradovaný materiál na bázi W/Cu pomocí technologie plazmového navařování PTA. Dosud nebyly vydány žádné odborné publikace, které by se touto problematikou zabývaly. Výhoda zhotovení těchto materiálů pomocí plazmového navařování spočívá ve vytvoření pevného metalurgického propojení jednotlivých vrstev, které by bylo odolné proti delaminaci. Zároveň je výhodou této technologie vysoká efektivnost a rychlost vytváření povlaků.

2.2. Návrh experimentu

Experiment spočíval ve vytvoření několikavrstevného návaru na základní materiál ve formě pěti kovových destiček. (obrázek 9) Destičky byly vyrobeny z čistého wolframu pomocí práškové metalurgie.



Obrázek 9 – Základní materiál – wolframové destičky

Přídavný materiál byl použit ve formě prášku. Konkrétně byla použita směs prášků mědi a wolframu. Každý návar byl tvořen celkem z pěti vrstev s různým hmotnostním poměrem obou prášků. Snahou bylo vytvořit funkčně gradovaný materiál se 100 % obsahem mědi na povrchu a 100 % obsahem wolframu ve spodní části. Gradovanou přechodovou oblast tvořily čtyři vrstvy s odstupňovaným složením. Na obrázku 10 je možné vidět schéma návaru s označením jednotlivých vrstev a příslušným hmotnostním poměrem prášků.

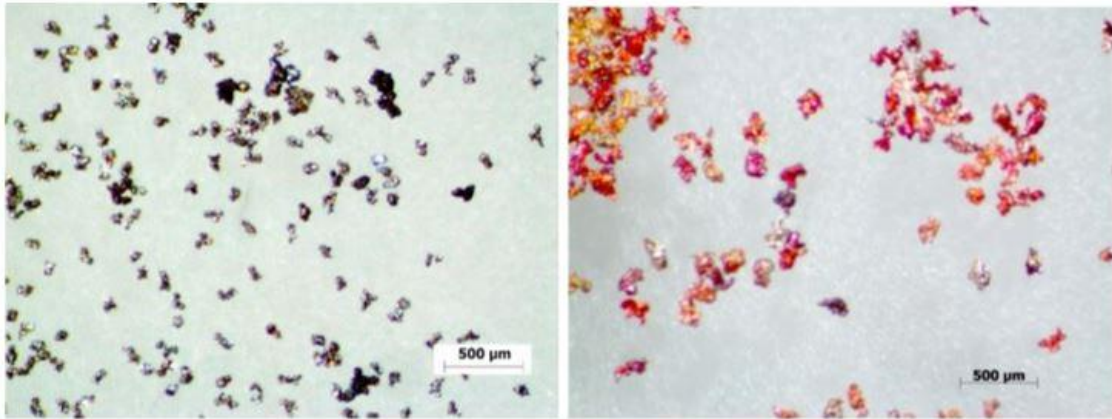
5. vrstva	100 % Cu / 0 % W
4. vrstva	75 % Cu/ 25 % W
3. vrstva	50 % Cu/ 50 % W
2. vrstva	30 % Cu/ 70 % W
1. vrstva	15 % Cu/ 85 % W
Základní materiál	0 % Cu / 100 % W

Obrázek 10 - Schéma návaru

2.3. Použité materiály

Základním materiálem byly wolframové destičky vyrobené práškovou metalurgií. Destičky byly vyrobeny a dodány firmou POREXI, s.r.o. Jako přídavný materiál byl použit prášek čistého wolframu a čisté mědi. Zrna obou prášků byla ostrohranná, měla nepravidelný tvar a jejich velikost byla velmi různorodá. Střední hodnota velikosti zrn wolframu se pohybovala okolo 80 μm a u prášku mědi okolo 170 μm . Na obrázku 11 jsou zobrazeny snímky zrn obou prášků pod mikroskopem. V tabulce 1 jsou pak zobrazeny vybrané fyzikální vlastnosti použitých materiálů.

Před samotným navařováním byly oba prášky sušeny v peci po dobu několika hodin, aby byly zbaveny vlhkosti.



Obrázek 11 - Zrna prášku wolframu (vlevo), mědi (vpravo) [30]

Tabulka 1 - Vybrané fyzikální vlastnosti použitých materiálů

Vlastnost	Zkratka	Jednotka	Wolfram	Měď
Protonové číslo	Z	-	74	29
Hustota	ρ	g/cm ³	19,25	8,96
Teplota tání	t_t	°C	3422	1083
Měrné skupenské teplo tání	l_t	KJ·kg ⁻¹	192	204
Měrná tepelná kapacita	c	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	134	383
Tepelná vodivost	λ	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	173	395
Součinitel délkové teplotní roztažnosti	α	K ⁻¹	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$16,7 \cdot 10^{-6}$

2.4. Použitá zařízení

2.4.1. Plazmový navařovací automat PPC 250 R6

Experiment byl proveden na plazmovém navařovacím automatu PPC 250 R6 od firmy KSK s.r.o. Česká Třebová. Stroj je určen pro navařování rotačních součástí z čela a na obvodu metodou PTA. Zařízení umožňuje polohování hořáku ve čtyřech osách (X, Y, Z, N) a polohování pracovního stolu ve dvou osách (C, R). Průměr pracovního stolu je 300 mm. Stroj disponuje dvěma podavači prášku a směšovací zařízením, díky čemuž umožňuje provádět návary směsi dvou prášků s možností nastavení jejich objemového poměru. [31]

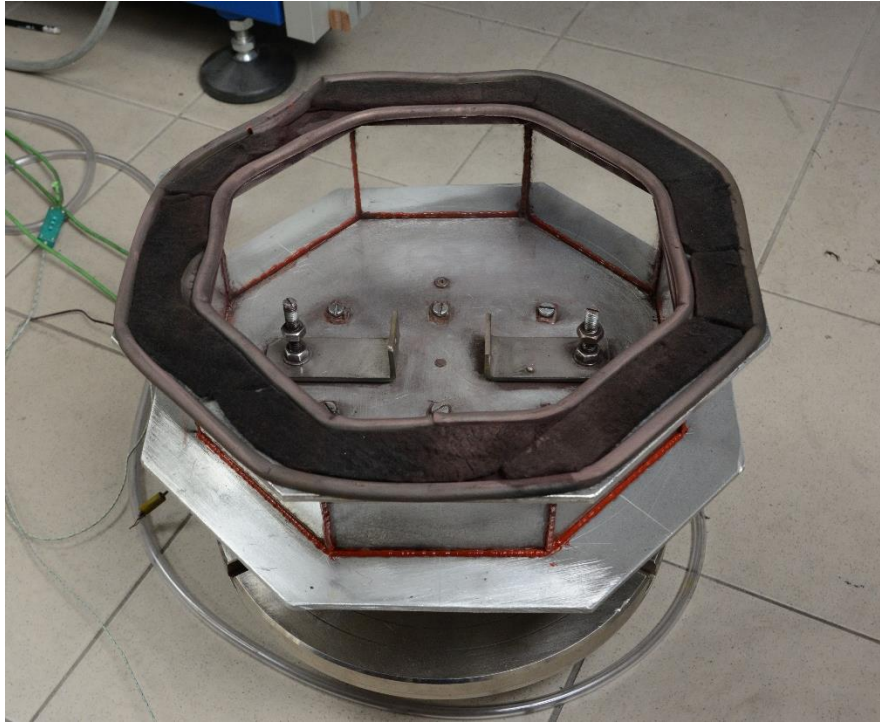
Celé pracoviště včetně navařovacího automatu je možné vidět na obrázku 12.



Obrázek 12 - Plazmový navařovací automat PPC 250 R6

2.4.2. Svařovací komora

Navařování bylo prováděno ve speciální svařovací komoře z důvodu vyššího zabezpečení ochrany svarové lázně proti oxidaci. Komoře byla během procesu navařování naplněna inertním ochranným plynem. Po skončení procesu byl plyn do komory ještě krátce přiváděn, aby byla zajištěna ochrana návaru i během chladnutí z vysokých teplot. Svařovací komoru je možné vidět na obrázku 13.



Obrázek 13 - Svařovací komora

Svařovací komora má tvar osmiúhelníku a její základ tvoří kovová deska se dvěma závitovými tyčemi, ke kterým lze pomocí matic připevnit upínky pro aretaci podložky a základního materiálu. Základní materiál byl během navařování vždy položen na podložce, aby vlivem tepla nedošlo k poškození dna komory. Stěny komory jsou tvořeny sklem a na jeho vrchu je umístěno těsnění. Před samotným navařováním byla komora z vrchu zakryta kovovou deskou, kterou bylo ještě nutné zatížit, aby nedocházelo k úniku ochranného plynu. Uprostřed krycí desky je velký otvor, kolem kterého je umístěna tepelně odolná kůže, ta je zároveň připevněna okolo ústí hořáku. Tímto způsobem je umožněn volný pohyb hořáku a zároveň nedochází k úniku ochranného plynu. Celá komora je pak připevněna přes hliníkový chladič na přírubu, která je pomocí sklíčidla upevněna do pracovního stolu stroje. Komora byla navržena a zhotovena pro navařování titanu v rámci práce [32].

2.4.3. Ostatní použitá zařízení a pomůcky

- Termočláanky pro měření teploty během navařování
- Univerzální měřicí ústředna Almemo 5690-2 pro záznam teploty
- Zařízení pro navařování termočláanků BT-2
- Vybavení metalografické laboratoře pro přípravu metalografických vzorků

- Světelný optický mikroskop ZEISS Neophot 32 pro vyhodnocení makrostruktury
- Elektronový mikroskop ZEISS EVO MA 15 (ÚFP AV ČR) pro vyhodnocení mikrostruktury a chemického složení strukturních částí
- Pec pro sušení přídavných materiálů

2.5. Parametry procesu

U procesu plazmového navařování PTA lze nastavit celá řada parametrů. V kapitolách 1.4.2 a 1.4.3 teoretické části jsou vysvětleny základní parametry, jako jsou proud, rychlost toku plazmového plynu, rychlost navařování a procesní plyny. Během experimentu bylo nastavováno celkem dvanáct parametrů přímo na stroji. Další parametry tvořily použité procesní plyny. Během experimentu byl použit pulzní proud. Z toho důvodu bylo nutné nastavit dvě hodnoty proudu pro horní a dolní pulz, zároveň dobu trvání obou pulzů a frekvenci, se kterou se mění. Hodnoty proudů byly během experimentu měněny, doba trvání pulzu a frekvence byla pro všechny vzorky stejná. Dalším proměnným parametrem byla rychlost posuvu hořáku, rychlost podávání přídavného materiálu a rychlost rozkyvu hořáku. V souvislosti s rozkyvem byla nastavována také jeho šířka a doba setrvání v krajních polohách. Tyto parametry však byly z důvodu zachování stejné geometrie návaru konstantní pro všechny vzorky. Dále byl nastavován poměr prášků v jednotlivých vrstvách. Posledním parametrem byly použité procesní plyny, které byly v průběhu experimentu rovněž měněny. Celkem byly použity tři různé plyny. Argon 5.0 (čistota 99,999 %), směs argonu a 5 % vodíku a směs argonu a hélia. Během experimentu byl vždy podávací plyn použit stejný jako ochranný. Průtoky plynů byly po celou dobu experimentu konstantní. Konkrétní hodnoty použitých parametrů u jednotlivých vzorků budou uvedeny v kapitole 2.8.

V tabulce 2 jsou uvedeny a vysvětleny nastavované parametry procesu včetně jednotek.

Tabulka 2 - Parametry procesu

parametr	jednotka	poznámky
hmotnostní poměr Cu/W	[%]	hmotnostní poměr v jednotlivých vrstvách
proud horní (IH)	[A]	horní hodnota proudu během pulzace
proud dolní (IL)	[A]	dolní hodnota proudu během pulzace
proud ekvivalentní ($I_{ekv.}$)	[A]	střední hodnota horního a dolního proudu
doba horního pulzu (TH)	[s]	doba udržení horního proudu
doba dolního pulzu (TL)	[s]	doba udržení dolního proudu
frekvence (f)	[s]	frekvence, se kterou dochází ke změně proudu
lineární rychlost	[mm/s]	rychlost posuvu hořáku
rychlost podávání	[-]	stupeň rychlosti podávání, možno volit 1 až 40
šířka rozkyvu	[mm]	šířka rozkyvu hořáku
rychlost rozkyvu [mm]	[mm/s]	rychlost rozkyvu hořáku
pauza pozitiv.	[s]	doba udržení v krajní poloze rozkyvu
pauza negativ.	[s]	doba udržení v krajní poloze rozkyvu

2.6. Vyhodnocovací metody

2.6.1. Vizuální kontrola

První vyhodnocovací metodou vytvořeného návaru je vizuální kontrola. Na základě znalostí a zkušeností s technologií PTA lze vizuálně určit dosaženou kvalitu návaru ihned po jeho vytvoření a následně optimalizovat procesní parametry.

2.6.2. Optický mikroskop

Další vyhodnocovací metodou je vytvoření a vyhodnocení snímků makrostruktury pomocí metalografického mikroskopu. Pro tuto analýzu již bylo nutné z vytvořených návarů připravit metalografické výbrusy. Pro pozorování a vytvoření snímků makrostruktury byl použit světelný optický mikroskop ZEISS Neophot 32. Díky rozdílným barvám mědi a wolframu bylo snadné od sebe oba prvky rozlišit. Z toho důvodu bylo zhotovení snímků makrostruktury velmi užitečnou analýzou k hodnocení vytvořených návarů.

2.6.3. SEM

Hlavní vyhodnocovací analýzou bylo vyhodnocení mikrostruktury návarů pomocí elektronového mikroskopu, SEM (Scanning Electron Microscope). Vyhodnocení bylo provedeno ve spolupráci s ÚFP AV ČR, v. v. i. K vyhodnocení byl použit skenovací elektronový mikroskop ZEISS EVO MA 15 s programem SmartSEM. Analýza byla

provedena v módu zpětně odražených elektronů. Pomocí elektronového mikroskopu bylo možné provést detailní pozorování mikrostruktury s vysokým zvětšením a zhotovit detailní snímky ve vysoké kvalitě. Zároveň bylo možné pomocí metody EDS (energieově disperzní spektrometrie) provést analýzu prvkového složení.

2.7. Postup experimentu

2.7.1. Podávání přídatného materiálu

Před samotným navařováním bylo nejprve nutné provést několik měření a výpočtů týkajících se podávání přídatného materiálu. Stroj umožňuje podávání dvou prášků, přičemž lze nastavit jejich vzájemný objemový poměr. Zvolené poměry prášků v jednotlivých vrstvách jsou však zadány v poměru hmotnostním. Z toho důvodu bylo nutné provést přepočítání mezi hmotnostním a objemovým poměrem.

Nejprve bylo nutné provést vážení obou prášků s cílem zjistit jejich sypanou hmotnost. U každého prášku bylo provedeno několik vážení při různých objemech. Jednotlivé naměřené hmotnosti pak byly poděleny odpovídajícími objemy prášku. Výsledkem bylo zjištění sypané hustoty. Toto měření bylo nutné provést, neboť hustota materiálu ve formě prášku je velmi rozdílná v porovnání s hustotou homogenního materiálu. V tabulce 3 jsou zaznamenány hodnoty hmotností, příslušných objemů a vypočtené hodnoty sypaných hustot.

Tabulka 3 - Sypaná hustota mědi a wolframu

Měď			Wolfram		
V [cm ³]	m [g]	ρ [g/cm ³]	V [cm ³]	m [g]	ρ [g/cm ³]
8	30,66	3,83	5	44,35	8,87
8,25	28,42	3,44	6	51,51	8,59
6,52	23,04	3,53	9	76,02	8,45
6	21,06	3,51	8,1	70,42	8,69
4,1	14,65	3,57	7,2	62,84	8,73
3,1	11,22	3,62	6	50,85	8,48
3,2	11,75	3,67	Sypaná hustota W		8,63
4,5	16	3,56			
7,5	26,89	3,59			
9,5	23,11	2,43			
Sypaná hustota Cu		3,48			

Pomocí sypaných hustot bylo možné provést přepočítání námi zvolených hmotnostních poměrů prášku na objemové poměry, které budou zadávány do stroje. Do stroje byl zadáván pouze hmotnostní podíl wolframu v procentech.

Výpočet se provedl podle následujícího vztahu:

$$\%V_W = \frac{100 \cdot \%m_W \cdot \rho_{Cu}}{\%m_W \cdot \rho_{Cu} + \%m_{Cu} \cdot \rho_W} [\%]$$

$$\%V_{Cu} = 100 - \%V_W [\%]$$

Kde: $\%V_W$ - objemová % wolframu, $\%V_{Cu}$ - objemová % mědi, $\%m_W$ - hmotnostní % wolframu, $\%m_{Cu}$ - hmotnostní % mědi, ρ_{Cu} - sypaná hustota mědi, ρ_W - sypaná hustota wolframu

Příklad výpočtu pro hmotnostní poměr 85 % W/ 15 % Cu:

$$\%V_W = \frac{100 \cdot 85 \cdot 3,48}{85 \cdot 3,48 + 15 \cdot 8,63} \%$$

$$\%V_W = 69,56 \cong 70 \%$$

$$\%V_{Cu} = 100 - 70 \%$$

$$\%V_{Cu} = 30 \%$$

Stejným způsobem byl proveden výpočet pro všechny hmotnostní poměry. V tabulce 4 jsou uvedeny výsledné přepočtené hodnoty objemových poměrů, které byly nastaveny na stroji.

Tabulka 4 - Přepočítání hmotnostních a objemových procent

Hmotnostní %				
Cu [%]	15	30	50	75
W [%]	85	70	50	25
Objemová %				
Cu [%]	30	52	71	88
W [%]	70	48	29	12

Dále bylo provedeno měření objemového toku podávaného přídavného materiálu za čas, v závislosti na nastavené rychlosti podávání. Důvodem tohoto měření bylo zjistit, jaký je skutečný průtok prášku v závislosti na nastavené rychlosti, zda je tato závislost lineární a jak se mezi sebou podávané objemy jednotlivých prášků liší.

Měření bylo provedeno přímo na stroji bez zapnutého elektrického obvodu. Měřen byl objem podaného prášku za půl minuty při pěti různých rychlostech podávání.

Při prvním měření byla rychlost podávání postupně zvyšována, při druhém měření byla postupně snižována. Střední hodnota objemu z obou měření pak byla vynásobena sypnou hustotou získanou z předchozího měření, čímž byl získán hmotnostní tok. V tabulce 5 a 6 je možné vidět naměřené hodnoty pro oba prášky, a také přepočítaný hmotnostní a objemový tok za minutu.

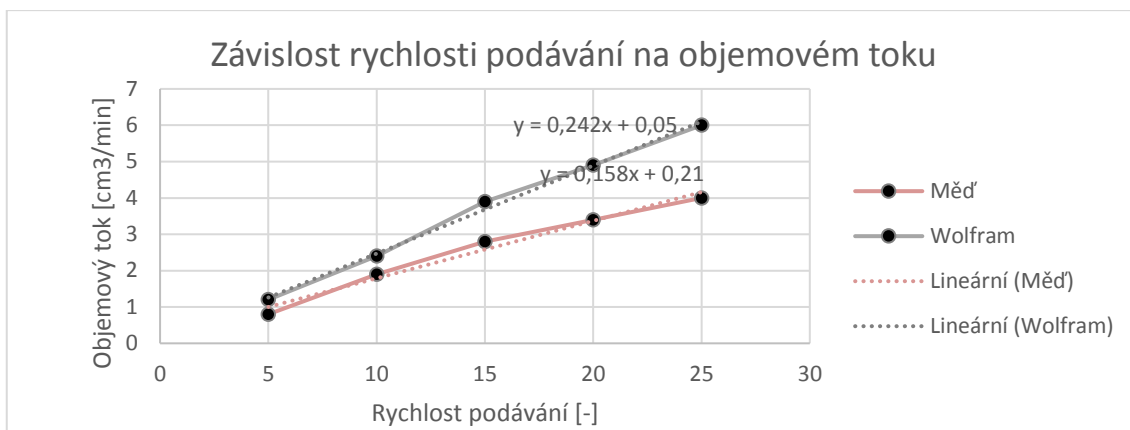
Tabulka 5 - Hmotnostní a objemový tok prášku mědi

Měď				
rychlost podávání [-]	průtok prášku (1. měření) [cm³/0,5 min]	průtok prášku (2. měření) [cm³/0,5 min]	průtok prášku [cm³/min]	průtok prášku [g/min]
5	0,4	0,4	0,8	2,78
10	0,9	1	1,9	6,61
15	1,4	1,4	2,8	9,74
20	1,8	1,6	3,4	11,83
25	2	2	4	13,92

Tabulka 6 - Hmotnostní a objemový tok prášku wolframu

Wolfram				
rychlost podávání [-]	průtok prášku (1. měření) [cm³/0,5 min]	průtok prášku (2. měření) [cm³/0,5 min]	průtok prášku [cm³/min]	průtok prášku [g/min]
5	0,6	0,6	1,2	10,36
10	1,2	1,2	2,4	20,71
15	1,9	2	3,9	33,66
20	2,4	2,5	4,9	42,29
25	3	3	6	51,78

Na obrázku 14 je zobrazena závislost rychlosti podávání na objemovém toku za minutu.

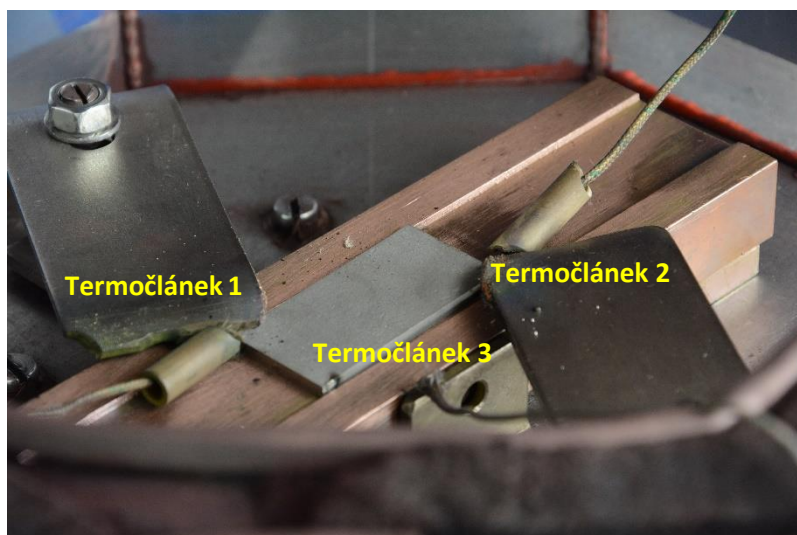


Obrázek 14 - Závislost rychlosti podávání na hmotnostním toku

Z výsledků je patrné, že při všech rychlostech podávání dochází k vyššímu objemovému průtoku wolframu oproti mědi. Důvodem může být například rozdílná velikost zrn prášků. Zároveň je možné pozorovat, že závislost průtoku prášku na nastavené rychlosti podávání je u obou materiálů nelineární. U mědi dochází k mírnému snížení objemového průtoku při vyšších podávacích rychlostech. Předchozí zkušenosti s podáváním těchto prášků na stejném stroji ukazují na častou problémovost s nepravidelným podáváním, a to především u prášku wolframu. Z toho důvodu, lze toto měření považovat spíše jako orientační. Důvodem problematického podávání je především tvar zrn. Podavače přídatného materiálu jsou uzpůsobeny na prášek ve tvaru kuliček. Zrna prášku wolframu a mědi jsou však ostrohranná a mají nepravidelný tvar, čímž pravděpodobně dochází k jejich napěchování a ucpání podavačů. Aby bylo možné případným komplikacím s podáváním předejít, byly v experimentu záměrně voleny vyšší podávací rychlosti.

2.7.2. Postup navařování

Před samotným navařováním bylo nejprve provedeno odmaštění základního materiálu. Následně byly na základní materiál navařeny dva termočlánky pro měření teploty. Základní materiál byl poté umístěn na podložku, společně s kterou byl vložen do svařovací komory a zajištěn pomocí upínek. Třetí termočlánek snímal teplotu z boku podložky. Způsob upnutí základního materiálu, podložky ve svařovací komoře a umístění termočlánků je zobrazeno na obrázku 15.



Obrázek 15 - Upnutí základního materiálu a umístění termočláneků

Měření teploty během navařování bylo důležité především z hlediska nastavení a optimalizace procesních parametrů. Příklad grafického zobrazení průběhu teplot v závislosti na čase během a navařování vzorku č. 1 je zobrazeno v příloze 8.

Před prvním návarem byl vždy proveden předehřev základního materiálu pomocí přejezdu plazmového hořáku bez podávání prášku. Následně byl proveden samotný návar. Po nanesení jedné vrstvy a poklesu teploty uvnitř svařovací komory byla komora otevřena a byla pořízena fotografie návaru. Stejným způsobem se postupovalo u všech vrstev. U některých vzorků byl tento postup pozměněn například z důvodu problematického podávání přídavného materiálu, kdy bylo nutné návar opakovat, nebo bylo provedeno například přetavení mezi jednotlivými vrstvami. Konkrétní změny v pracovním postupu a jejich důvody budou uvedeny v kapitole 2.8.

2.8. Výsledky a diskuze

2.8.1. Vzorek č. 1

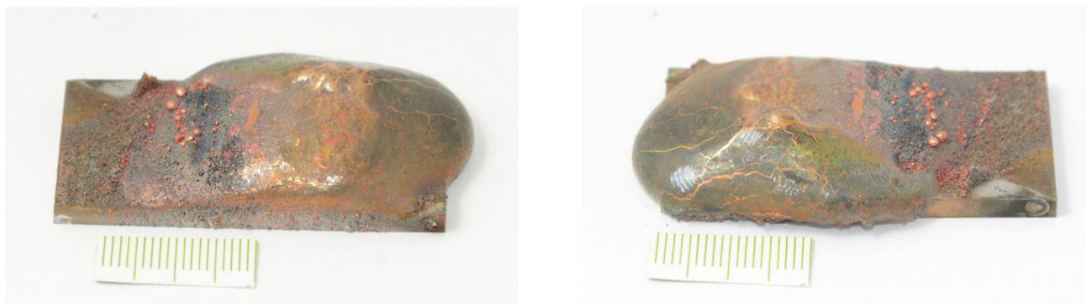
Parametry nastavení procesu u prvního vzorku byly zvoleny na základě předchozích zkušeností s navařováním wolframu na tomto stroji [30] [33]. Vzorek č. 1 byl během navařování položen na měděné podložce. Parametry procesu jsou zobrazeny v tabulce 7.

Tabulka 7 - Vzorek č. 1 - parametry

	procesní plyn	plazmový			podávací, ochranný						rozkv			
	argon 5.0										šířka [mm]	rychlost [mm/s]	pauza poz. [s]	pauza neg. [s]
číslo návaru	hmotnostní poměr [%]	proud						lineární rychlost [mm/s]	rychlost podávání [-]	rozkv				
		I _H [A]	I _L [A]	I _{ekv.} [A]	T _H [s]	T _L [s]	f [Hz]			šířka [mm]	rychlost [mm/s]	pauza poz. [s]	pauza neg. [s]	
přehřev	-	192	123	158	0,0025	0,0025	200	2	-	18	16	0,2	0,2	
1	15 Cu/ 85 W	201	125	163	0,0025	0,0025	200	1	20	18	16	0,2	0,2	
2	30 Cu/ 70 W	210	137	174	0,0025	0,0025	200	1	20	18	16	0,2	0,2	
3	50 Cu/ 50 W	225	137	181	0,0025	0,0025	200	1	20	16	16	0,2	0,2	
4	75 Cu/ 25 W	234	150	192	0,0025	0,0025	200	1	20	16	16	0,2	0,2	
5	100 Cu/ 0 W	234	150	192	0,0025	0,0025	200	1	20	16	16	0,2	0,2	

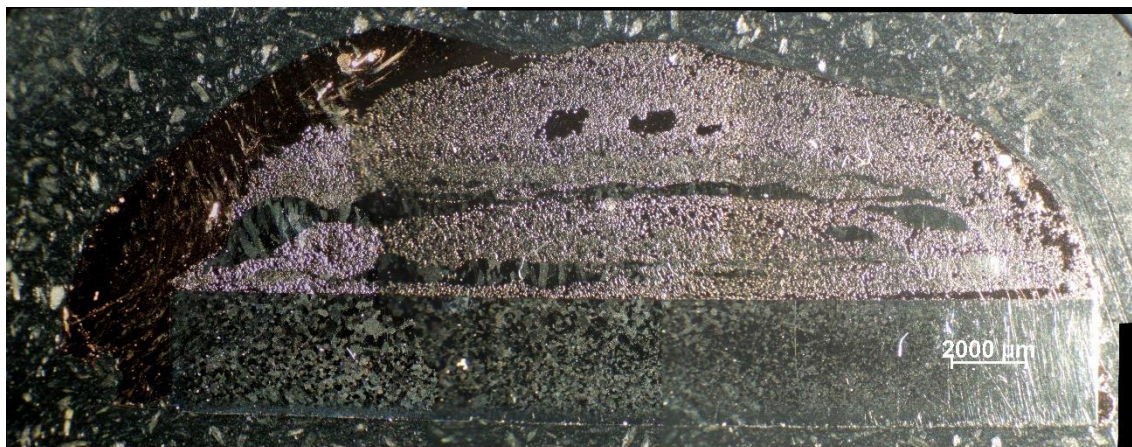
U vzorku č. 1 bylo snahou zachovat konstantní parametry během navařování všech vrstev a v případě špatných výsledků měnit pouze hodnoty horního a dolního proudu. Po provedení prvního návaru bylo vidět, že došlo k nedostatečnému natavení přídavného materiálu a docházelo k tvorbě zásypu. Z toho důvodu byla v dalších vrstvách postupně zvyšována hodnota proudu, aby bylo dosaženo vyšší teploty. U vrstvy číslo 4 se tímto způsobem již podařilo dosáhnout částečného natavení přídavného materiálu. Stejně hodnoty proudu proto byly použity i pro poslední vrstvu. Obrázky jednotlivých vrstev jsou zobrazeny v příloze 1.

Zhotovený pětivrstvý návar je zobrazen na obrázku 16. Makrostrukturu návaru je zobrazena na obrázku 17.



Obrázek 16 - Vzorek č. 1

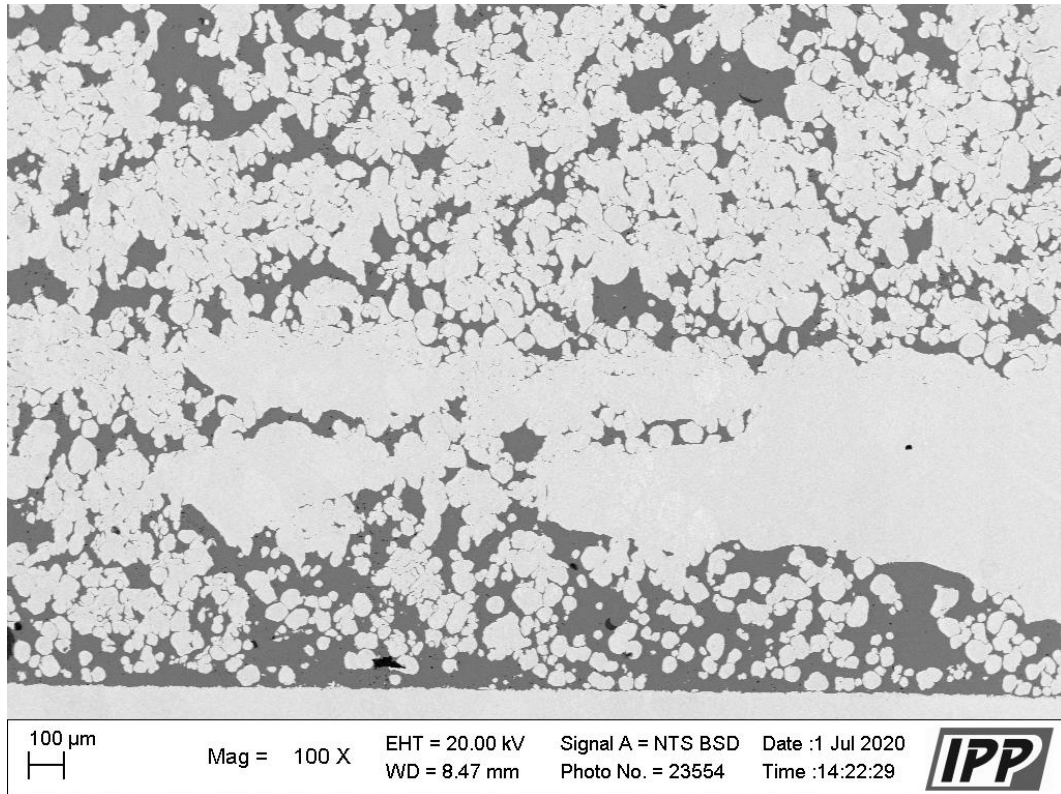
Na základě obrázku 16 lze konstatovat, že zvýšením hodnot proudů se podařilo dosáhnout vysoké teploty pro natavení přídavného materiálu. Na obrázku je rovněž vidět, že návar nemá po celé délce stejnou výšku. Důvodem bylo problematické podávání, kdy stroj přestal zhruba 7 milimetrů před koncem podávat.



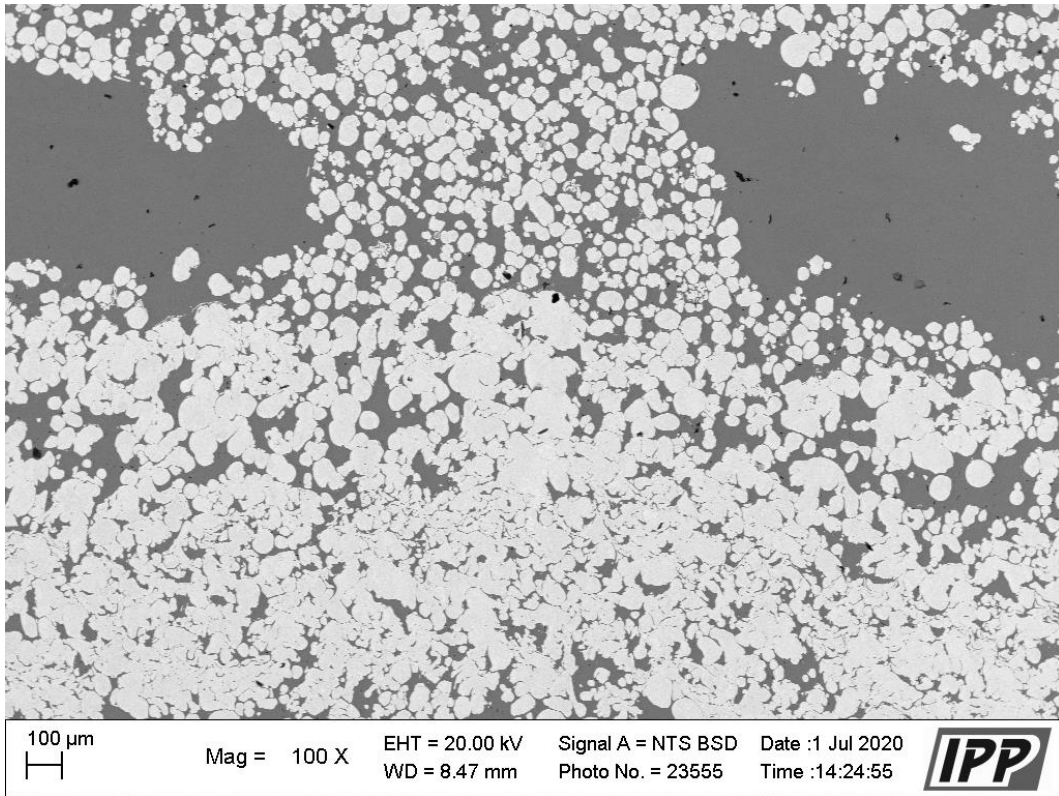
Obrázek 17 – Vzorek č. 1 - makrostruktura

Na obrázku 17 je zobrazena makrostruktura návaru. Na snímku je vidět, že pravděpodobně nedošlo k natavení základního materiálu, neboť destička má v celém průřezu stejnou tloušťku. To by však nemusel být problém, neboť adheze mezi návarem a základním materiálem je dobrá. Zároveň je možné pozorovat větší kompaktní útvary čistého wolframu v levé části snímku těsně nad rozhraním se základním materiálem a dále takřka po celé šířce zhruba uprostřed návaru. Tyto oblasti mohly vzniknout například v důsledku nedostatečného promíchání prášků. Na povrchu návaru vlevo je vidět velký útvar čisté mědi. Jednou z možných příčin vzniku může být například její nízká hustota, díky které se měď ve svarové lázni dostala na povrch. Této domněnce by nasvědčoval i fakt, že se měď koncentruje na jedné straně návaru a přesahuje až přes okraj základního materiálu. Měď tedy mohla ve svarové lázni vzlínat a následně stéci na

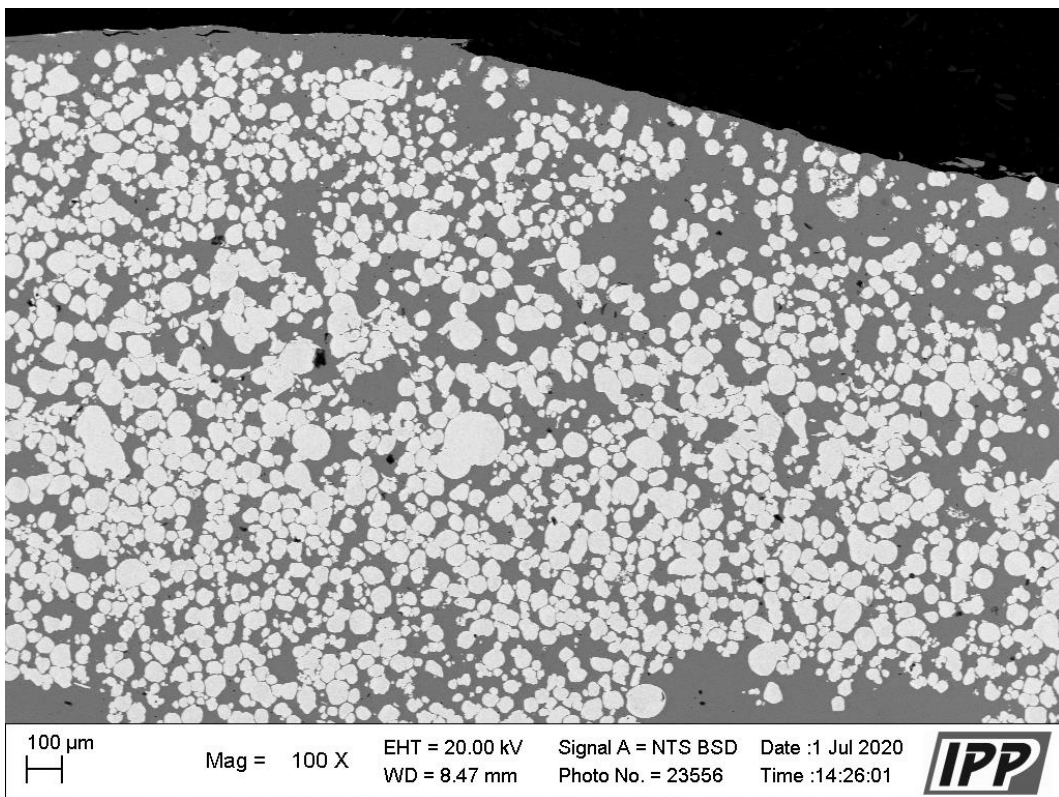
okraj návaru, kde došlo k jejímu ztuhnutí. Na obrázcích 18, 19 a 20 je zobrazena mikrostruktura návaru se zvětšením 100x. Snímky jsou pořízeny ze středu řezu. Snímky zobrazují mikrostrukturu na rozhraní se základním materiálem, uprostřed návaru a na povrchu.



Obrázek 18 – Vzorek č. 1 – mikrostruktura (rozhraní návaru a základního materiálu) [J. Matějček]



Obrázek 19 - Vzorek č. 1 - mikrostruktura (střední část návaru) [J. Matějček]



Obrázek 20 - Vzorek č. 1 - mikrostruktura (povrch návaru) [J. Matějček]

Ze snímků je patrné, že nedochází k mísení mědi a wolframu, a oba materiály lze od sebe na úrovni mikrostruktury dobře odlišit. Díky tomu ani nedochází ke vzniku nových fází, které by mohly negativně ovlivnit užité vlastnosti. Na obrázku 18 a 19 je vidět, že došlo k mírné změně tvaru a velikosti wolframových zrn, z čehož lze usuzovat, že došlo k jejich částečnému natavení. Naopak na obrázku 20 mají všechna wolframová zrna téměř stejnou velikost a tvar a k jejich natavení pravděpodobně nedošlo. Ze snímků je patrné, že během navařování došlo k velkému promísení vrstev a nepodařilo se vytvořit povlak s gradovaným složením. Důvodem promísení může být například vysoký tepelný příkon na jednotku plochy a dynamický účinek plazmatu, který způsobí natavení již nanesené vrstvy, která se následně promísí s vrstvou novou. Zároveň může být problémem již zmiňovaná nízká hustota mědi, díky které měď ve svarové lázni vzlíná na povrch. Výslednou strukturu mohlo ovlivnit rovněž nepravidelné podávání přídatného materiálu.

2.8.2. Vzorek č. 2

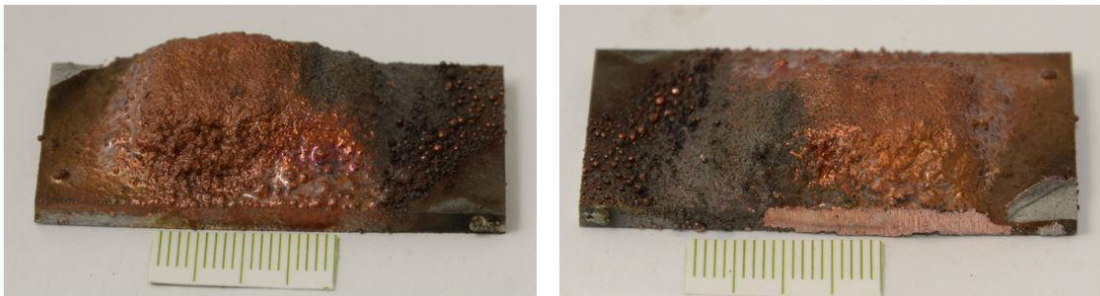
U druhého vzorku bylo snahou docílit lepšího natavení přídatného materiálu pomocí změn parametrů podávání a rychlosti posuvu a rozkvy hořáku. Hodnoty proudů byly na základě zkušenosti se vzorkem č. 1 hned od první vrstvy nastaveny mírně vyšší. Stejně jako u prvního vzorku byl základní materiál položen na podložce z mědi. Nastavené procesní parametry jsou zobrazeny v tabulce 8.

Tabulka 8 - Vzorek č. 2 - parametry

	procesní plyn	plazmový		podávací, ochranný									
		argon 5.0		argon + 5% vodík									
číslo návaru	hmotnostní poměr [%]	proud						lineární rychlost [mm/s]	rychlost podávání [-]	rozkvy			
		IH [A]	IL [A]	I _{ekv.} [A]	TH[s]	TL[s]	f [Hz]			šířka [mm]	rychlost [mm/s]	doba poz. [s]	doba neg. [s]
přehřev	-	165	125	145	0,0025	0,0025	200	2	-	18	14	0,2	0,2
1	15 Cu/ 85 W	210	137	174	0,0025	0,0025	200	1,2	20	18	14	0,2	0,2
2	30 Cu/ 70 W	210	137	174	0,0025	0,0025	200	1,1	17	18	14	0,2	0,2
3	50 Cu/ 50 W	220	137	179	0,0025	0,0025	200	1,1	17	16	14	0,2	0,2
4	75 Cu/ 25 W	234	150	192	0,0025	0,0025	200	1,1	17	16	14	0,2	0,2
5	100 Cu/ 0 W	234	150	192	0,0025	0,0025	200	1	20	16	16	0,2	0,2

Rychlost rozkvyvu hořáku byla snížena, aby došlo k intenzivnějšímu ohřevu základního materiálu. Nutné bylo snížit také rychlost podávání přídatného materiálu, aby vlivem pomalejšího rozkvyvu nedocházelo k velkému hromadění prášku v jednom místě. Velké množství prášku na jednom místě by znemožnilo jeho dostatečný ohřev a natavení. Ze stejného důvodu byla také zvýšena rychlost posuvu hořáku. U vzorku č. 2 bylo snahou pomocí těchto změn dosáhnout lepšího natavení přídatného materiálu bez nutnosti použití velkých proudů. Tyto změny však nepřinesly pozitivní výsledek a stále docházelo k tvorbě zásypu. Z toho důvodu byl proud opět zvyšován a u posledních dvou vrstev byly jeho hodnoty stejné jako u vzorku číslo 1. Ve snaze o lepší natavení byla vrstva číslo 4 jednou přetavena při stejných parametrech bez podávání prášku. Ani přes to se však nepodařilo přídatný materiál dostatečně natavit. Obrázky jednotlivých vrstev jsou zobrazeny v příloze 2.

Vzorek č. 2 je možné vidět na obrázku 21. Makrostruktura je zobrazena na obrázku 22.



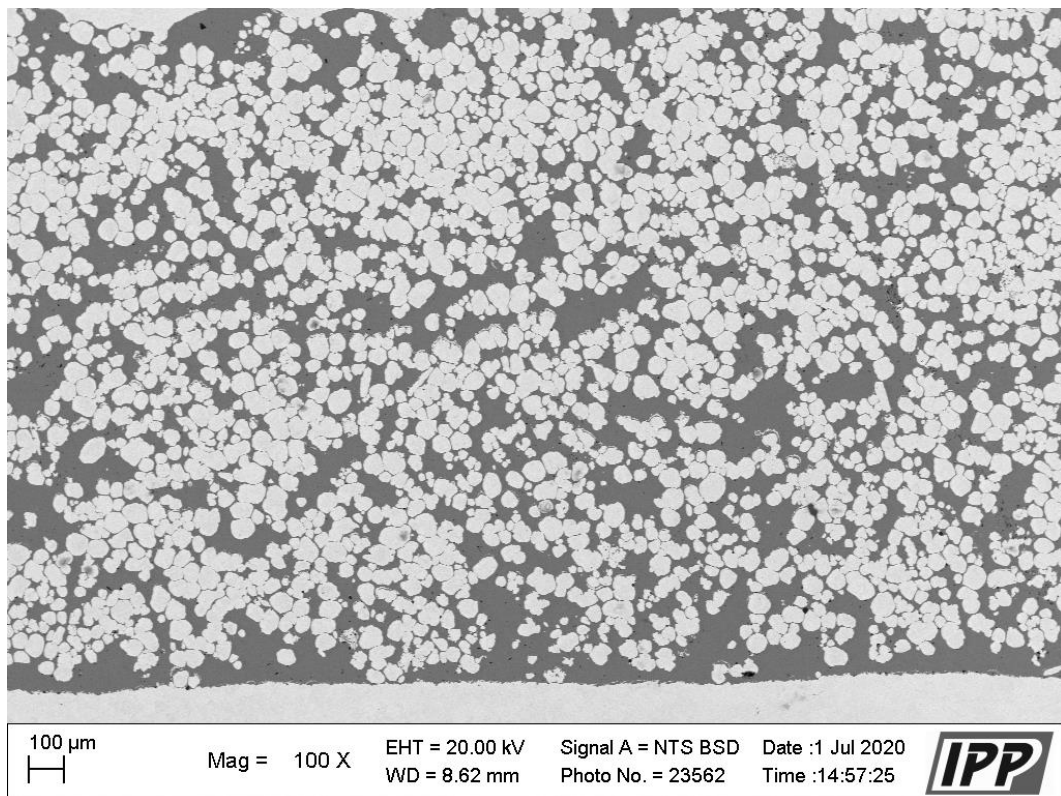
Obrázek 21 - Vzorek č. 2

Na obrázku je vidět výrazný zásyp, z čehož lze konstatovat, že natavení přídatného materiálu bylo menší než u předchozího vzorku a zvolené parametry byly nevhodné. Stejně jako v předchozím případě docházelo i zde k problematickému podávání, kvůli čemuž nemá návar konstantní výšku v celé délce.

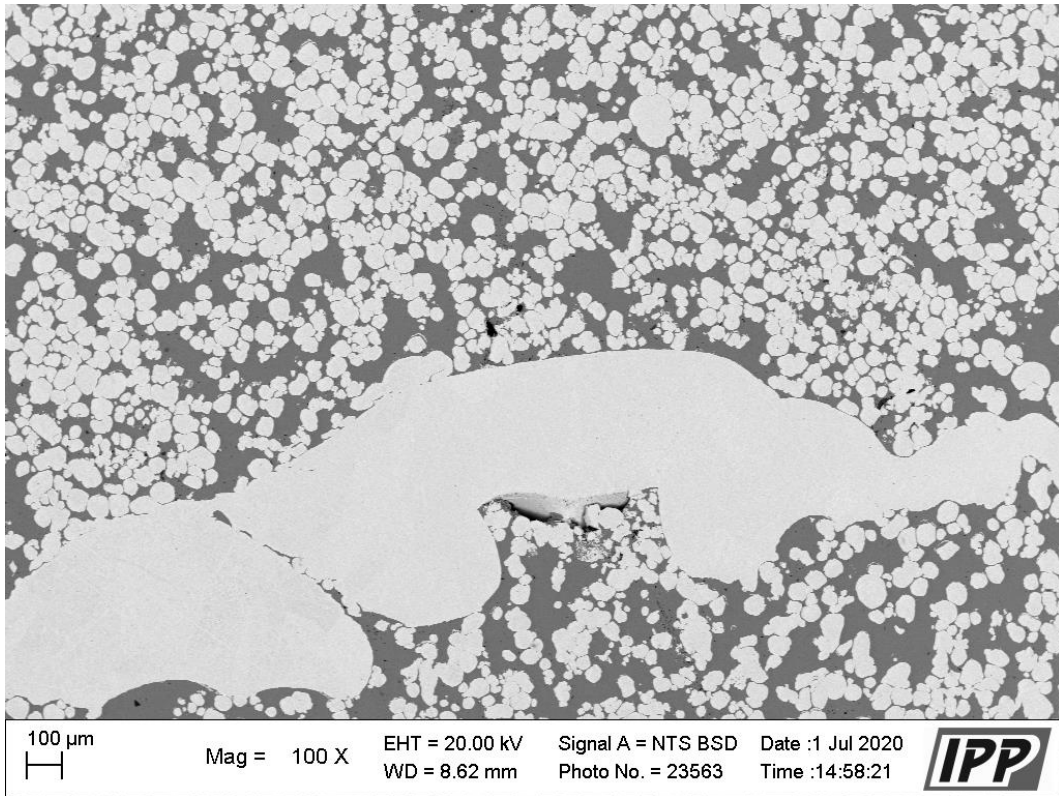


Obrázek 22 – Vzorek č. 2 - makrostruktura

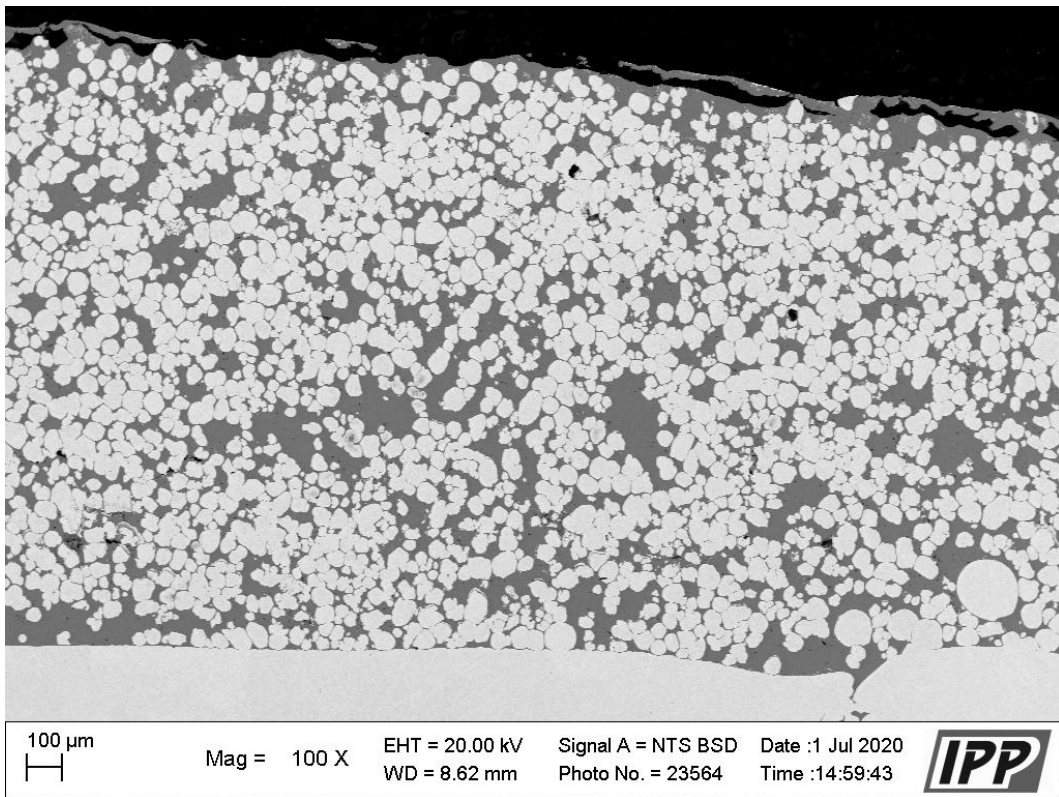
Ze snímku makrostruktury vyplývá, že nedošlo k natavení přídavného materiálu. I přes to je návar se základním materiálem pevně spojen. Stejně jako u prvního vzorku, i zde se vyskytují kompaktní útvary čistého wolframu. Na rozdíl od prvního vzorku zde nedošlo ke vzlínání mědi na povrch. To mohlo být způsobeno menším ohřevem, kdy se pravděpodobně nevytvořila velká tavná lázeň, ve které by mohla měď vlivem nízké hustoty vzlínat. Na obrázcích 23 až 25 je zobrazena mikrostruktura návaru.



Obrázek 23 – Vzorek č. 2 - mikrostruktura (rozhraní návaru a základního materiálu) [J. Matějček]



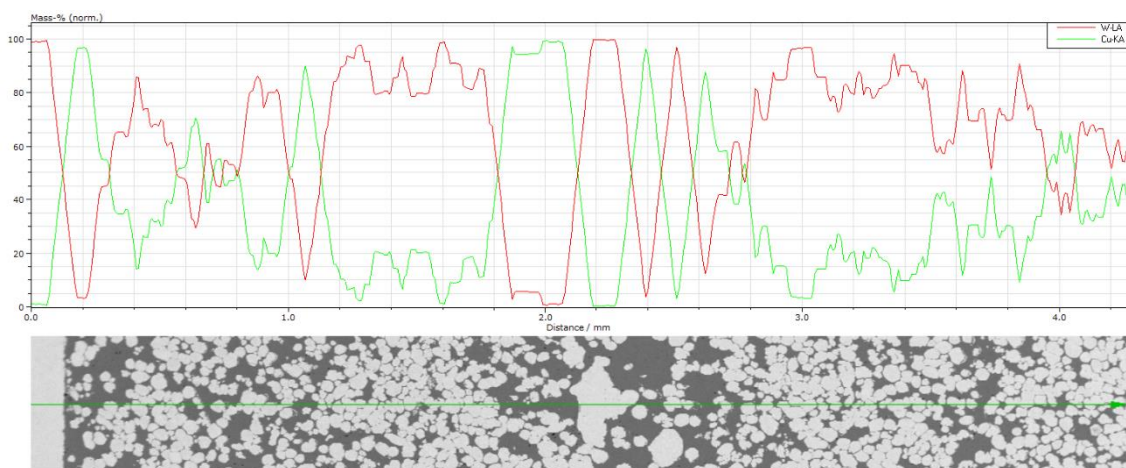
Obrázek 24 – Vzorek č. 2 - mikrostruktura (střední část návaru) [J. Matějček]



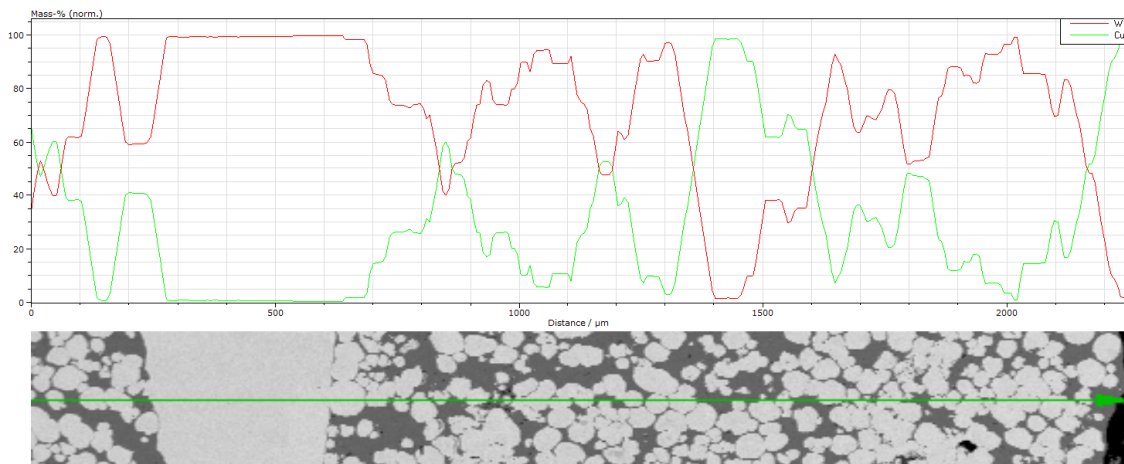
Obrázek 25 – Vzorek č. 2 - mikrostruktura (povrch návaru) [J. Matějček]

Snímky mikrostruktury ukazují, že wolframová zrna mají v celé výšce průřezu přibližně stejnou velikost a tvar. Z toho lze usuzovat, že pravděpodobně nedošlo k jejich natavení. Stejně jako u prvního vzorku však došlo k promísení všech vrstev a byla ovlivněna gradace složení. Oproti prvnímu vzorku se vyskytovaly ve vzorku č. 2 občasné póry.

U vzorku číslo 2 byla provedena analýza obsahu wolframu a mědi v průřezu návaru pomocí energiově disperzní spektrometrie. Analýza složení byla provedena podél úsečky, která byla vedena středem návaru od základního materiálu až po povrch. Účelem analýzy bylo měření gradace složení. Grafické zobrazení výsledku je zobrazeno na obrázku 26 a 27. Analýza byla provedena pouze podél jedné úsečky. Z důvodu výšky návaru však bylo nutné měření rozdělit na dvě části. Na obrázku 26 je zobrazena analýza složení od základního materiálu zhruba do třech čtvrtin výšky návaru. Na obrázku 27 je zobrazena zbývající vzdálenost k povrchu.



Obrázek 26 - Vzorek č. 2 - Analýza obsahu prvků v průřezu návaru 1/2 [J. Matějček]



Obrázek 27 - Vzorek č. 2 - Analýza obsahu prvků v průřezu návaru 2/2 [J. Matějček]

Křivky zobrazují průběh složení prvků, přičemž měď je označena zelenou barvou a wolfram barvou červenou. Z výsledku analýzy je patrné, že se nepodařilo dosáhnout gradovaného složení a struktura je velmi promísená.

2.8.3. Vzorek č. 3

Na základě průběhu navařování druhého vzorku, kdy se nepodařilo dosáhnout natavení přídatného materiálu a tvořil se výrazný zásyp, bylo u vzorku č. 3 provedeno několik změn. Před samotným navařováním na wolframovou destičku, bylo provedeno navaření čtyř zkušebních návarů na základní materiál z korozivzdorné oceli. Během těchto cvičných návarů byla použita různá konfigurace procesních plynů a byly zachovány stejné procesní parametry. Cílem bylo získat vhodnou konfiguraci plynů pro dosažení vysoké teploty. Nejvyšší teploty se podařilo dosáhnout použitím směsi argon + 5 % vodíku pro plazmový plyn a směsi argon + hélium pro podávací a ochranný plyn.

Další změnou bylo upnutí wolframové destičky na podložku z korozivzdorné oceli. Předchozí vzorky byly upnuty na měděné podložce, která díky své vysoké tepelné vodivosti odváděla velkou část tepla ze základního materiálu. Korozivzdorná ocel má tepelnou vodivost výrazně nižší a její použití by mohlo přispět k intenzivnějšímu ohřevu potřebnému k natavení materiálu.

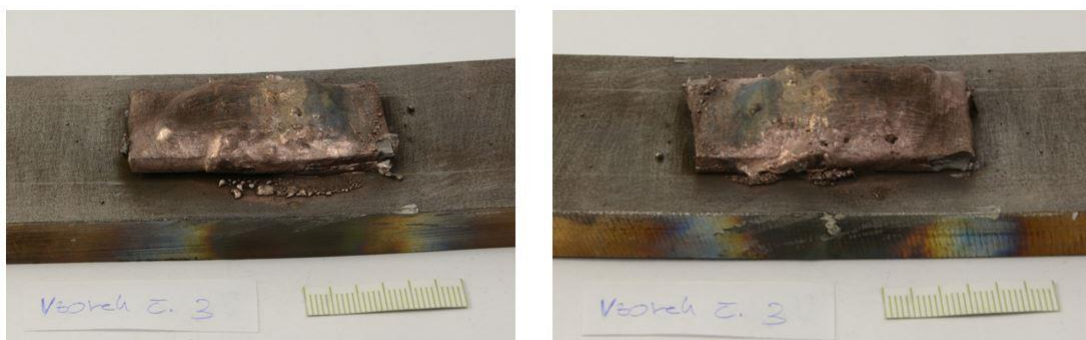
Použité procesní parametry jsou zobrazeny v tabulce 9.

Tabulka 9 - Vzorek č. 3 - parametry

	procesní plyn	plazmový			podávací, ochranný			lineární rychlost [mm/s]	rychlost podávání [-]	rozkyv			
		Argon + 5% Vodík			Argon + Hélium					šířka [mm]	rychlost [mm/s]	doba poz. [s]	doba neg. [s]
číslo návaru	hmotnostní poměr [%]	proud						f [Hz]	rychlost podávání [-]	šířka [mm]	rychlost [mm/s]	doba poz. [s]	doba neg. [s]
		IH [A]	IL [A]	I _{ekv.} [A]	TH[s]	TL[s]							
předehřev	-	210	150	180	0,0025	0,0025	200	2	-	18	16	0,2	0,2
1	15 Cu/ 85 W	243	150	197	0,0025	0,0025	200	1	17	18	16	0,2	0,2
2	30 Cu/ 70 W	243	185	214	0,0025	0,0025	200	1	16	18	16	0,2	0,2
3	50 Cu/ 50 W	243	185	214	0,0025	0,0025	200	1	17	16	16	0,2	0,2
4	75 Cu/ 25 W	243	185	214	0,0025	0,0025	200	1	20	16	16	0,2	0,2
5	100 Cu/ 0 W	243	185	214	0,0025	0,0025	200	1	23	16	16	0,2	0,2

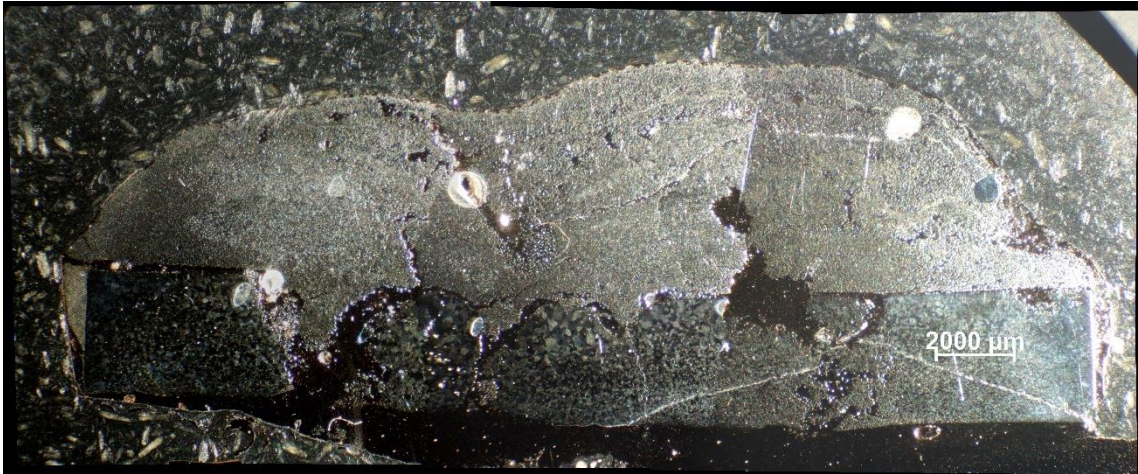
S odkazem na předchozí nedostatečné natavení prášku u předchozích vzorků, byly hodnoty proudů u vzorku č. 3 nastaveny hned od první vrstvy na vysokou hodnotu. Rychlost posuvu a rozkyvu hořáku byla nastavena na stejné hodnoty jako u vzorku č. 1. Snahou bylo také snížit rychlost podávání prášku pro možnost lepšího natavení. V posledních dvou vrstvách však byla rychlost podávání znovu zvýšena. Pro lepší natavení přídavného materiálu bylo mezi každou vrstvou, kromě přechodu vrstvy 4 a 5, provedeno přetavení při stejných parametrech bez podávání přídavného materiálu. Poslední dvě vrstvy přetaveny nebyly z důvodu převažujícího obsahu mědi. Jednotlivé vrstvy je možné pozorovat na obrázcích v příloze 3.

Hotový návar je zobrazen na obrázku 28. Makrostruktura návaru je zobrazena na obrázku 29.



Obrázek 28 - Vzorek č. 3

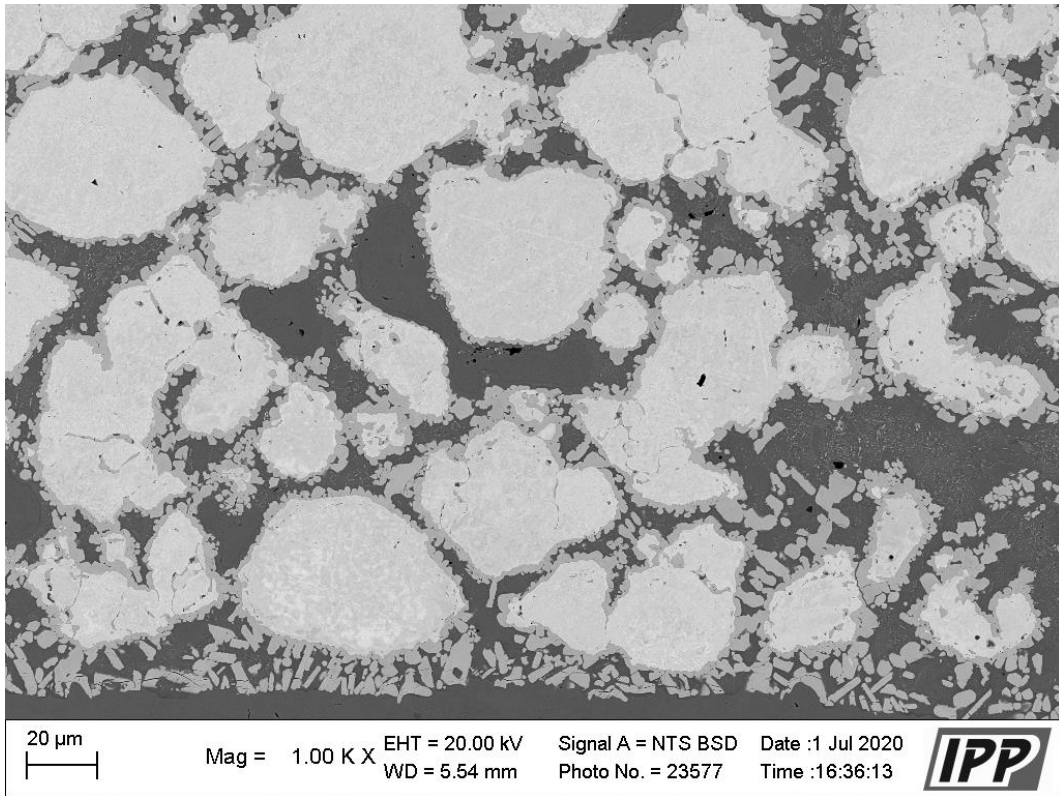
Z obrázku 28 je patrné, že se již podařilo přídavný materiál dostatečně natavit. Návar je však stále nerovnoměrný, a navíc došlo k přivaření základního materiálu k podložce. Na podložce je vidět výrazná tepelně ovlivněná oblast, která svědčí o vysoké teplotě dosažené během navařování.



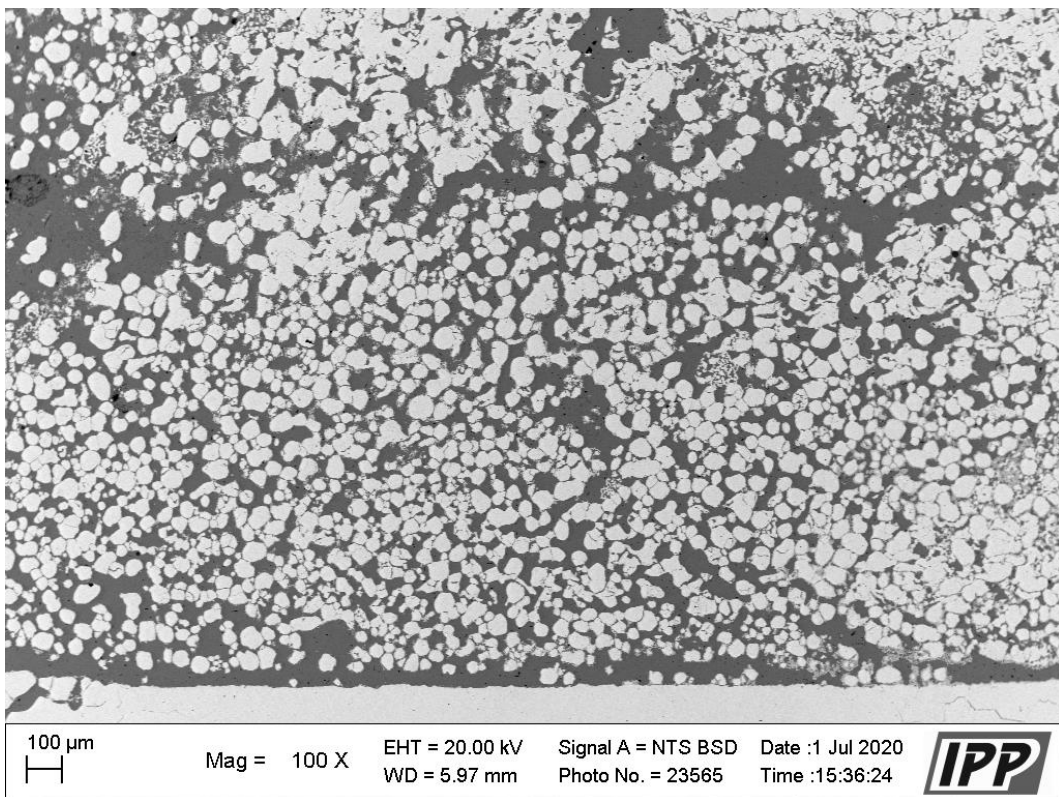
Obrázek 29 - Vzorek č. 3 – makrostruktura

Snímek makrostruktury zobrazuje viditelné poškození wolframové destičky. Zároveň je ze snímku viditelné, že se měď dostala až pod základní materiál. Vlivem tohoto poškození došlo během navařování k roztavení podložky z korozivzdorné oceli, jejíž prvky se vmísily do návaru a vytvořily nové fáze. Na obrázku 30 je možné pozorovat vznik nových fází na hranicích zrn wolframu. Vznik těchto fází je v návaru nežádoucí, neboť může negativně ovlivnit jeho mechanické a tepelné vlastnosti. Tyto fáze se však v návaru vytvořily pouze vlivem poškození základního materiálu. Wolfram a měď se navzájem nemísí a z toho důvodu při navařování jejich směsi k tvorbě žádných fází nedochází. Detailnější snímky vzniklých fází včetně popisu jejich chemického složení jsou zobrazeny v příloze 6.

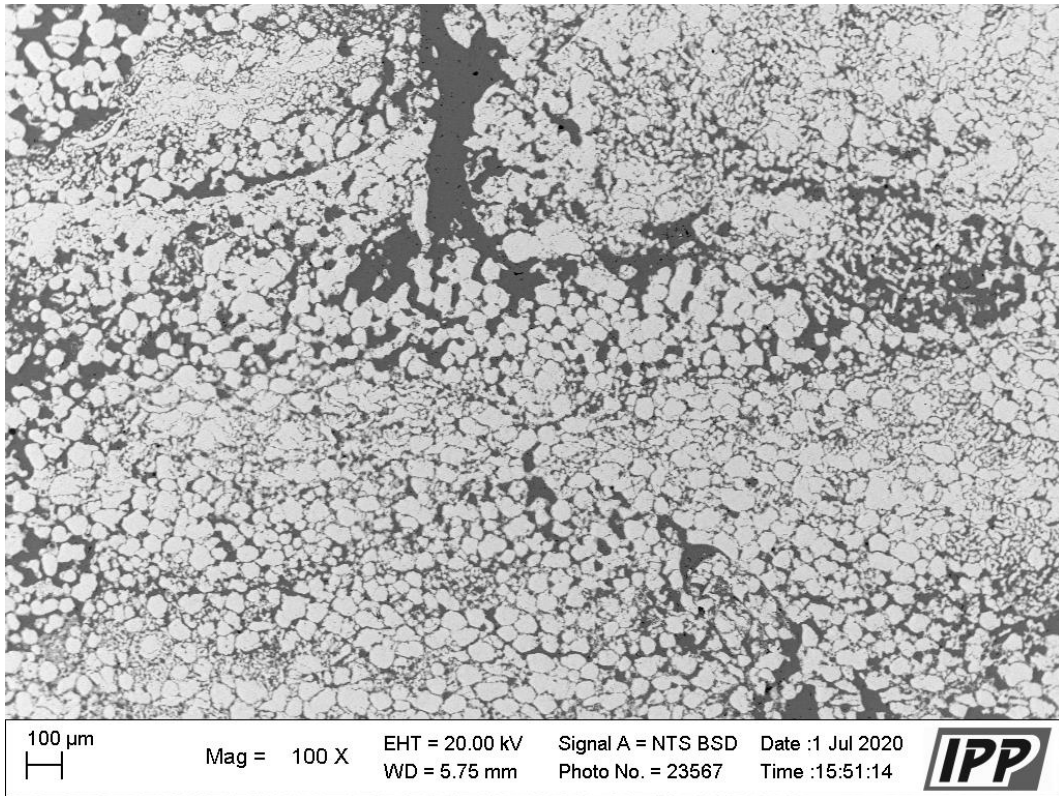
Na obrázcích 31 až 34 je zobrazena mikrostruktura vzorku č. 3.



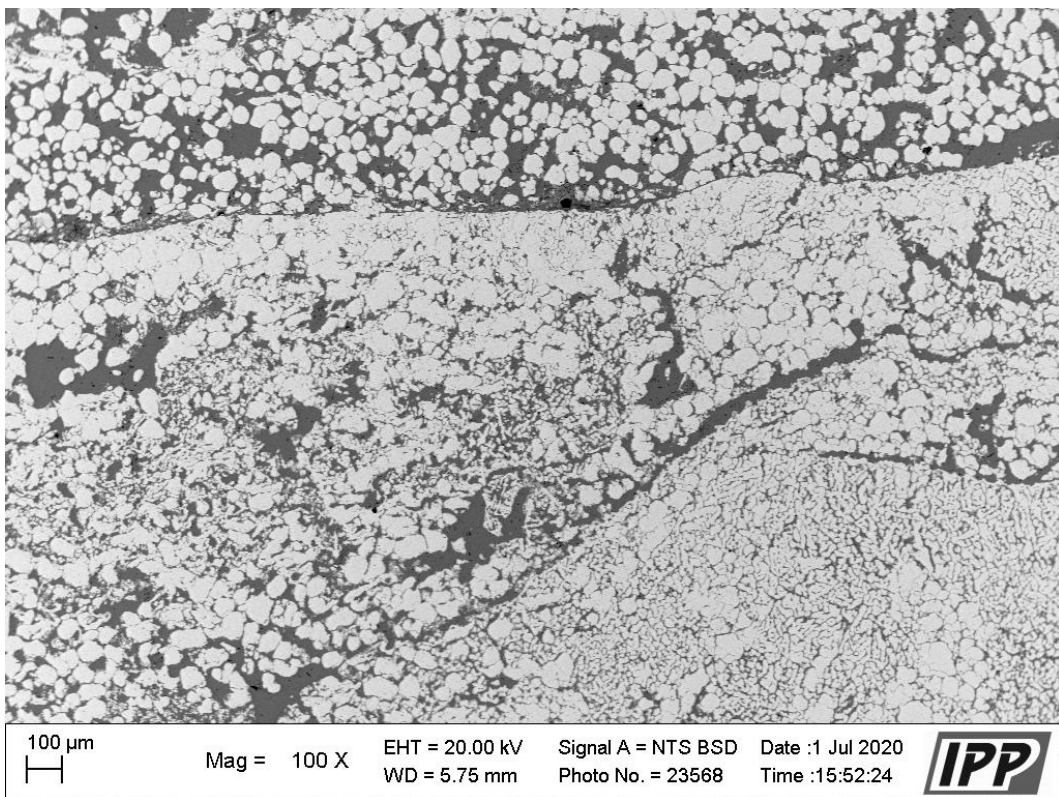
Obrázek 30 - Vzorek č. 3 - mikrostruktura (první vrstva-detail) [J. Matějček]



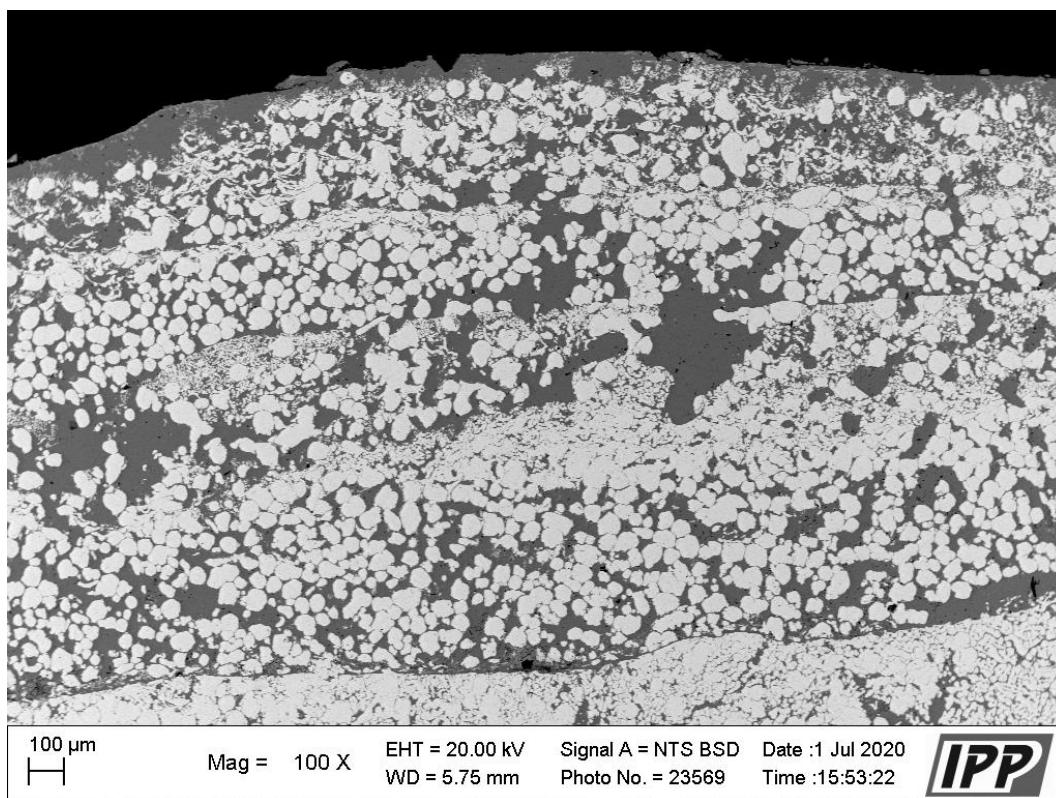
Obrázek 31 - Vzorek č. 3 - mikrostruktura (rozhraní návaru a základního materiálu) [J. Matějček]



Obrázek 32 - Vzorek č. 3 - mikrostruktura (první vrstva) [J. Matějček]



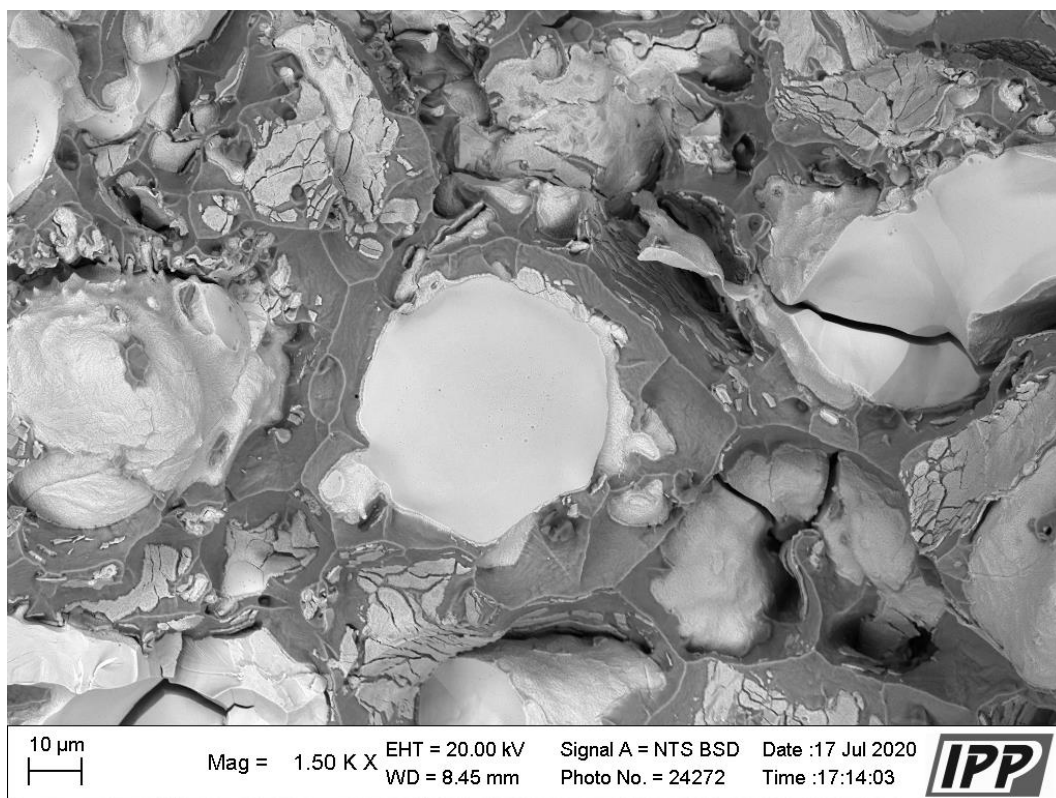
Obrázek 33 - Vzorek č. 3 - mikrostruktura (střední část návaru) [J. Matějček]



Obrázek 34 - Vzorek č. 3 - mikrostruktura (povrch návaru) [J. Matějček]

Ze snímků mikrostruktury je jasně patrné, že stejně jako u předchozích dvou vzorků došlo k promísení vrstev a nebyla vytvořena gradovaná struktura. Na snímcích je možné pozorovat, že wolframová zrna mají v některých oblastech jinou morfologii. V některých místech, například na obrázku 33 vpravo dole, mají zrna velmi malé rozměry, což svědčí o tom, že došlo k jejich natavení. Zrna mají zároveň zploštělý tvar, což mohlo být způsobeno přetavováním jednotlivých vrstev, kdy došlo k jejich zploštění vlivem dynamického účinku plazmatu. Není však vyloučeno, že by nemohly být do svarové lázně přivedeny již roztavené. Na obrázcích 33 a 34 jsou jasně viditelná rozhraní jednotlivých vrstev, což mohlo být rovněž způsobeno mezivrstevovým přetavováním. Této domněnce napovídá i fakt, že wolframová zrna obsažená v poslední vrstvě u povrchu viditelně roztavená nebyla. Jejich tvar a velikost odpovídá velikosti zrn podobné jako u vzorku číslo 2. Další možností, proč jsou wolframová zrna na povrchu z větší části nenatavená může být z důvodu tepelné setrvačnosti, kdy se více pod povrchem drží vyšší teplota, a naopak ve vnější vrstvě dochází k odvodu tepla do okolí a teplota je tak nižší. Viditelná rozhraní jednotlivých vrstev však nejsou žádoucím jevem. Pro lepší gradaci složení je naopak lepší plynulý přechod mezi vrstvami bez viditelného rozhraní.

Vzhledem k tomu, že se u vzorku č. 3 podařilo dosáhnout výrazně rozdílných tvarů a velikostí wolframových zrn, byl vzorek podroben zkoumání adheze zrn wolframu k měděné matici. Cílem bylo zjistit, zda existuje spojitost mezi adhezí obou fází a velikostí zrn wolframu. Vzorek byl přelomen a následně byla zkoumána lomová plocha. Na obrázku 35 je lomová plocha zobrazena.



Obrázek 35 - Vzorek č. 3 - snímek lomové plochy [J. Matějček]

Uprostřed snímku je vidět velké wolframové zrna, u kterého zjevně došlo k lomu v jeho středu. Stejně tak jako u prasklého wolframového zrna vpravo nahoře. Tato skutečnost, že došlo k prasknutí zrna a nedošlo k jeho vypadnutí z měděné matrice svědčí o tom, že adheze mezi fázemi byla dobrá. V levé části snímku je vidět wolframové zrna, které podle svého hrubého povrchu bylo jasně natavené. Na zrnu je zhruba uprostřed vidět malá část mědi, jejíž přítomnost rovněž potvrzuje dobrou adhezi obou fází. Podél hranice wolframového zrna uprostřed, je možné vidět nežádoucí fázi, která vznikla vlivem poškození základního materiálu a promísení prvků z podložky se svarovou lázní. Z výsledků lze konstatovat, že spojení wolframu a mědi bylo dobré a velikost wolframového zrna na adhezi nemá žádný vliv. Lom mimo jiné odhalil, že se v návaru objevovaly velké póry.

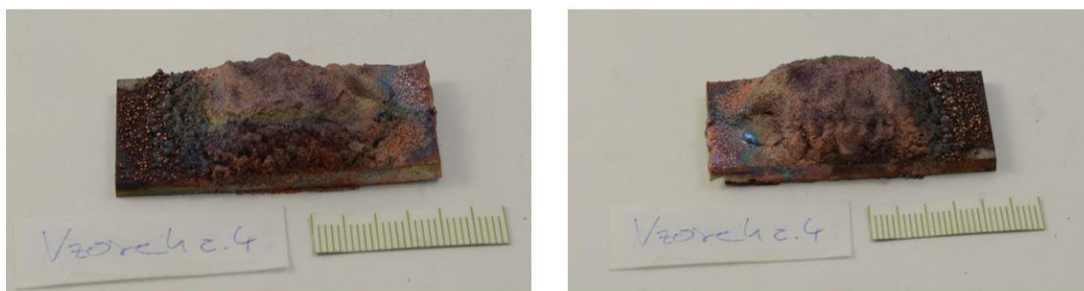
2.8.4. Vzorek č. 4

Vzorek č. 4 byl stejně jako vzorek č. 3 položen na podložce z korozivzdorné oceli. Aby bylo zabráněno opětovnému přivaření základního materiálu k podložce, byl mezi wolframovou destičku a podložku umístěn list uhlíkového papíru. Konfigurace plynů byla stejná jako v případě vzorku č. 3. Nastavené parametry procesu jsou zobrazeny v tabulce 10.

Tabulka 10 - Vzorek č. 4 - parametry

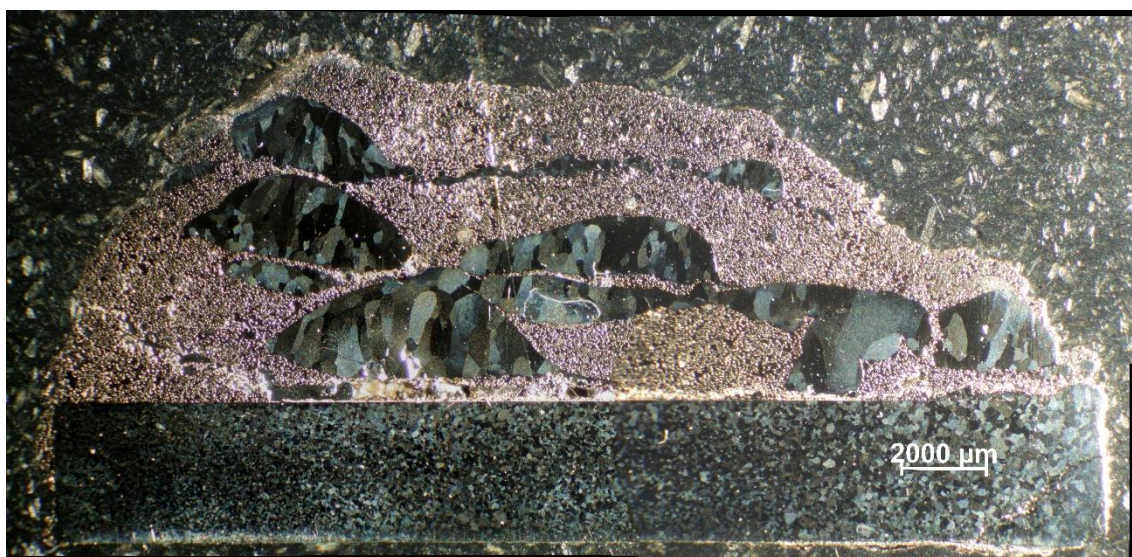
číslo návaru	procesní plyny	plazmový			podávací, ochranný			lineární rychlost [mm/s]	rychlost podávání [-]	rozkyv			
		Argon + 5% Vodík			Argon + Hélium					šířka [mm]	rychlost [mm/s]	doba poz. [s]	doba neg. [s]
hmotnostní poměr [%]	IH [A]	IL [A]	I _{ekv.} [A]	TH[s]	TL[s]	f [Hz]							
předehřev	-	210	150	180	0,0025	0,0025	200	2	-	18	16	0,2	0,2
1	15 Cu/ 85 W	243	185	214	0,0025	0,0025	200	1	17	18	16	0,2	0,2
2	30 Cu/ 70 W	245	205	225	0,0025	0,0025	200	1	17	18	16	0,2	0,2
3	50 Cu/ 50 W	245	205	225	0,0025	0,0025	200	1	17	16	16	0,2	0,2
4	75 Cu/ 25 W	245	205	225	0,0025	0,0025	200	1	17	16	16	0,2	0,2
5	100 Cu/ 0 W	245	205	225	0,0025	0,0025	200	1	17	16	16	0,2	0,2

U vzorku č. 4 byly hned od první vrstvy použity vyšší hodnoty proudů než u vzorku číslo 3. Zejména pak byla výrazně zvýšena hodnota spodního proudu, která dosahovala 205 A. Rychlosti podávání přídavného materiálu byly po celou dobu konstantní. Rychlost rozkyvu a posuvu hořáku byla stejná jako u předchozího vzorku. Na rozdíl od předchozího pokusu nebyly jednotlivé vrstvy přetavovány. Během navařování první vrstvy došlo k technickému problému s podáváním prášku, z toho důvodu byla první vrstva nanášena třikrát a následně jednou přetavena. Během navařování byla pořízena fotografie pouze vrstvy 1 a 5. Fotografie jsou zobrazeny v příloze 4. Na obrázku 36 je zobrazen zhotovený návar.



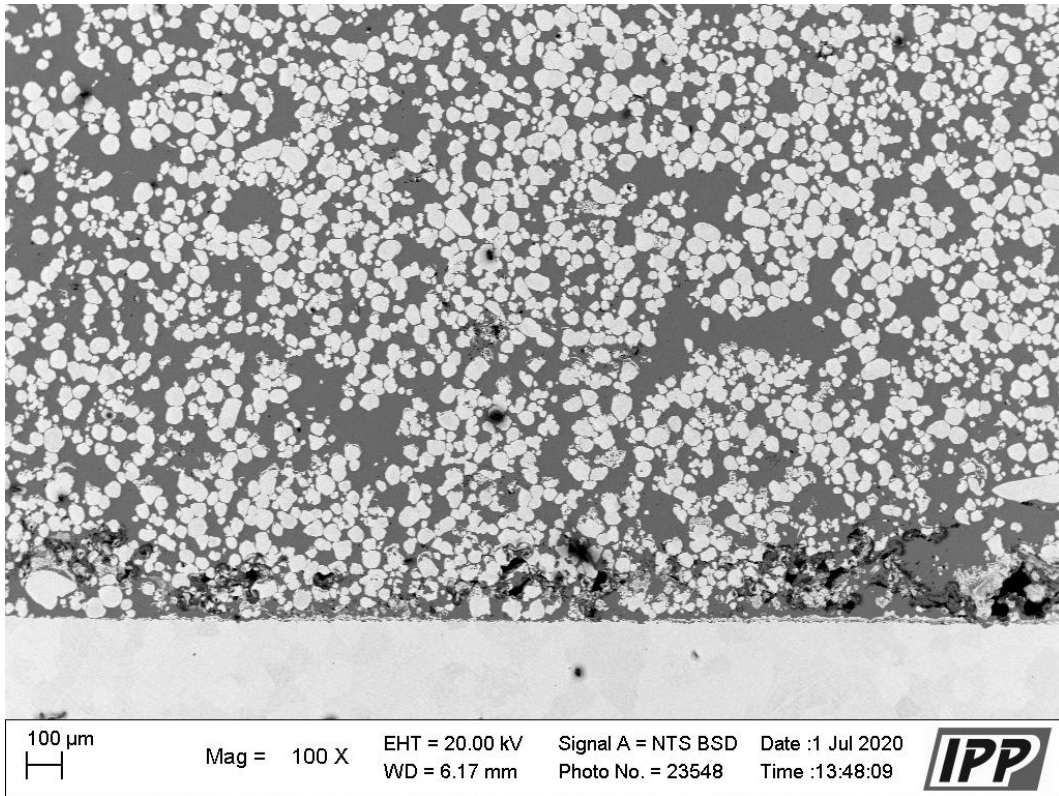
Obrázek 36 - Vzorek č. 4

Z obrázku je patrné, že došlo k natavení přídavného materiálu, nicméně ne tak velkému jako v případě vzorku č. 3. Na obrázku lze pozorovat poměrně výrazné zbarvení návaru. To mohlo být způsobeno vysokou teplotou, které byl materiál vystaven. Vzhledem k problematickému a nerovnoměrnému podávání přídavného materiálu je návar velmi nepravidelný. Na obrázku 37 je zobrazena makrostruktura návaru.

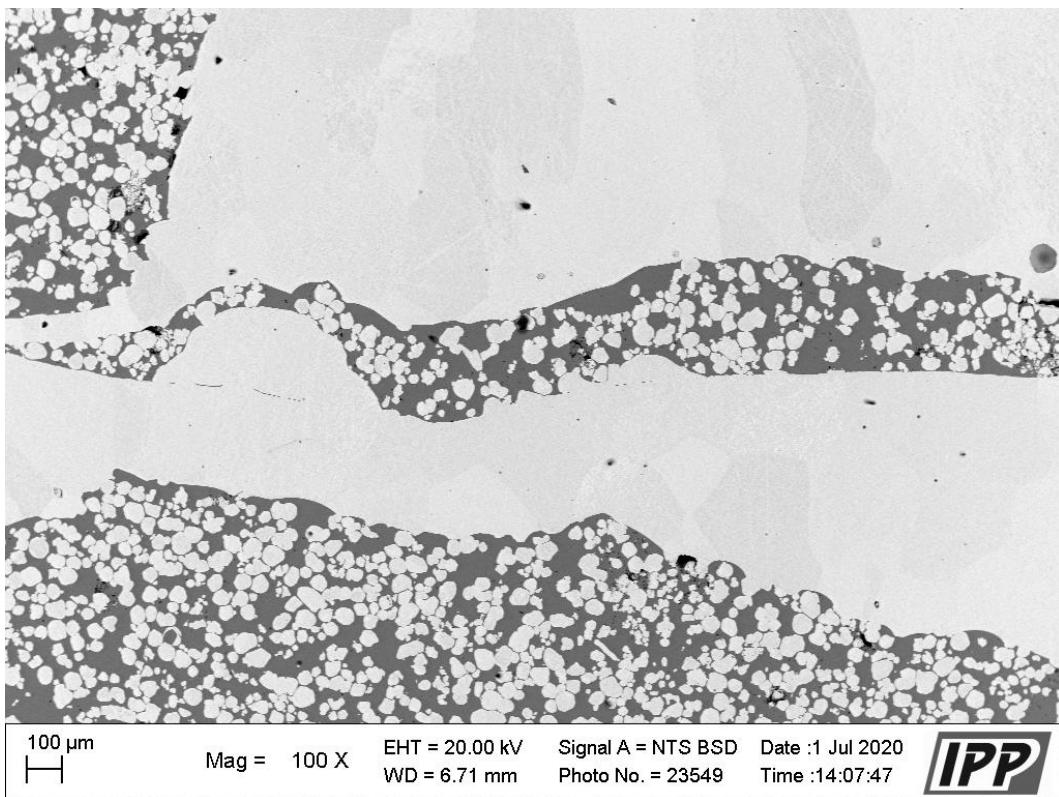


Obrázek 37 - Vzorek č. 4 - makrostruktura

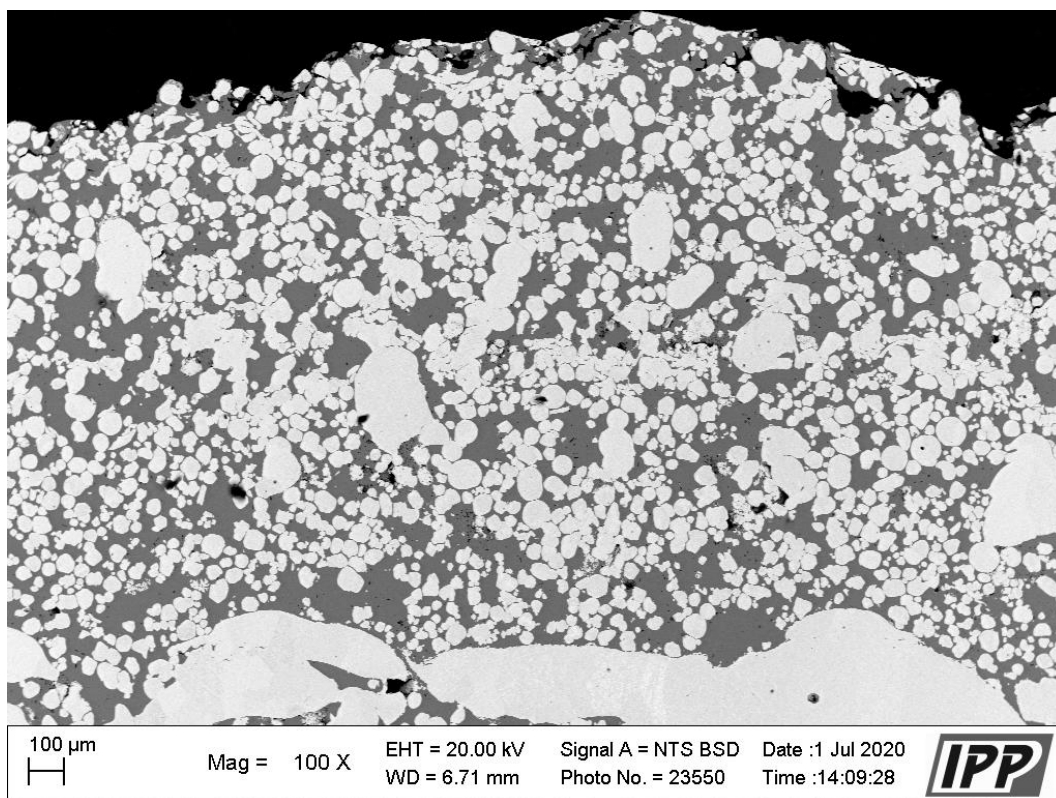
Snímek makrostruktury ukazuje, že u vzorku č. 4 nedošlo k poškození základního materiálu. Zároveň lze tvrdit, že nedošlo ani k jeho natavení, neboť tloušťka destičky je v celém průřezu stejná. Návar má i přes to na základním materiálu dobrou adhezi. Nejpozoruhodnějším úkazem v makrostruktuře jsou velmi rozsáhlé oblasti čistého wolframu. Podobné útvary bylo možné pozorovat i u vzorku č. 1 a č. 2. V tomto případě jsou však oblasti čistého wolframu podstatně větší. Na obrázcích 38 až 40 je zobrazena mikrostruktura návaru.



Obrázek 38 - Vzorek č. 4 - mikrostruktura (rozhraní návaru a základního materiálu) [J. Matějček]



Obrázek 39 - Vzorek č. 4 - mikrostruktura (střední část návaru) [J. Matějček]



Obrázek 40 - Vzorek č. 4 – mikrostruktura (povrch návaru) [J. Matějček]

Stejně jako u předchozích vzorků došlo i u vzorku č. 4 k výraznému promísení vrstev a nedošlo k vytvoření funkčně gradovaného materiálu. Na obrázku 38 je na rozhraní základního materiálu a návaru patrná výrazná pórovitost. Ta mohla být způsobena opakovaným navařováním první vrstvy a jejím následným přetavením. Pórovitost se místy vyskytovala v celém průřezu vzorku, nicméně ne v takovém měřítku jako je tomu u rozhraní se základním materiálem. Velikost a tvar wolframových zrn, je v celém průřezu vzorku velmi podobný. Malá wolframová zrna se na snímcích vyskytují velmi zřídka. Z toho důvodu lze usoudit, že i přes použití vysokých parametrů a intenzivního ohřevu, nedošlo k jejich výraznému natavení jako v případě vzorku č. 3. V průřezu vzorku se vyskytují velké kompaktní oblasti čistého wolframu. Vznik těchto oblastí mohl být způsoben například vypařováním mědi ze svarové lázně. Měď se mohla vlivem vysoké teploty ze svarové lázně částečně vypařit a v návaru tak zbyly především velké oblasti wolframu. Další možností mohlo být zachytávání wolframové prášky po cestě do svarové lázně. Wolfram mohl ulpívat ve větším množství například v okolí trysky hořáku a následně se uvolnit do svarové lázně v podobě velkého kompaktního útvaru. Tato varianta se zdá být nejpravděpodobnější, neboť vysvětluje, proč jsou útvary

tvořeny pouze čistým wolframem, když ve zbytku návaru jsou zrna nenatavená. Další méně pravděpodobnou variantou může být například nedostatečné promíchání prášku nebo nepravidelné podávání, které mohlo způsobit přísun velkého množství wolframu najednou.

2.8.5. Vzorek č. 5

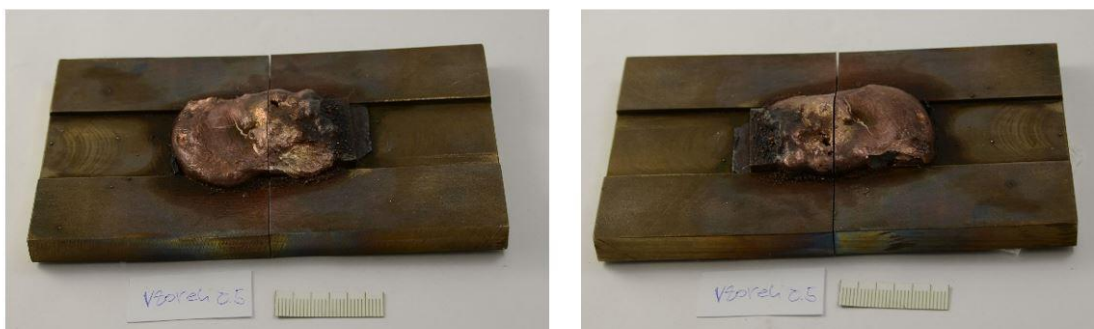
Základní materiál vzorku č. 5 byl stejně jako v předchozích dvou případech položen na podložce z korozivzdorné oceli. Procesní parametry jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11 - Vzorek č. 5 - parametry

číslo návaru	hmotnostní poměr [%]	procesní plyny		plazmový		podávací, transportní		lineární rychlost [mm/s]	rychlost podávání [-]	rozkyv			
		Argon + 5% Vodík	Argon + Hélium	I _H [A]	I _L [A]	I _{ekv.} [A]	TH[s]			TL[s]	f [Hz]	šířka [mm]	rychlost [mm/s]
přehřev	-	210	137	174	0,0025	0,0025	200	2	-	18	16	0,2	0,2
1	15 Cu/ 85 W	240	137	189	0,0025	0,0025	200	1	17	18	16	0,2	0,2
2	30 Cu/ 70 W	240	137	189	0,0025	0,0025	200	1	17	18	16	0,2	0,2
3	50 Cu/ 50 W	240	137	189	0,0025	0,0025	200	1	17	18	16	0,2	0,2
4	75 Cu/ 25 W	240	137	189	0,0025	0,0025	200	1	20	16	16	0,2	0,2
5	100 Cu/ 0 W	240	137	189	0,0025	0,0025	200	1	25	16	16	0,2	0,2

U vzorku číslo 5 byly použity menší hodnoty proudu než u vzorku číslo 3 a 4. Především pak byla použita výrazně nižší hodnota dolního proudu. Ostatní parametry byly stejné jako v předchozím případě. Během navařování se vyskytoval technický problém s podáváním prášků, které bylo velmi problematické a nerovnoměrné. Z toho důvodu bylo nutné opakovat navaření vrstvy číslo 1 a 3, neboť stroj při prvním navaření téměř vůbec nepodařilo. U vrstvy 4 a 5 byla ve snaze o zlepšení zvýšena rychlost podávání. Problém se však nepodařilo zcela vyřešit. Důvodem problematického podávání mohlo být například navlhnutí prášku, který následně ucpal podávací mechanismus. U vzorku č. 5 nebyly kromě vrstvy 1 a 5 pořizovány fotografie jednotlivých vrstev. Vrstvy byly nanášeny bezprostředně po sobě. Fotografie vrstev 1 a 5 je možné vidět v příloze 5.

Na obrázku 41 je zobrazen hotový návar. Na obrázku 42 je možné vidět snímek makrostruktury návaru.



Obrázek 41 - Vzorek č. 5

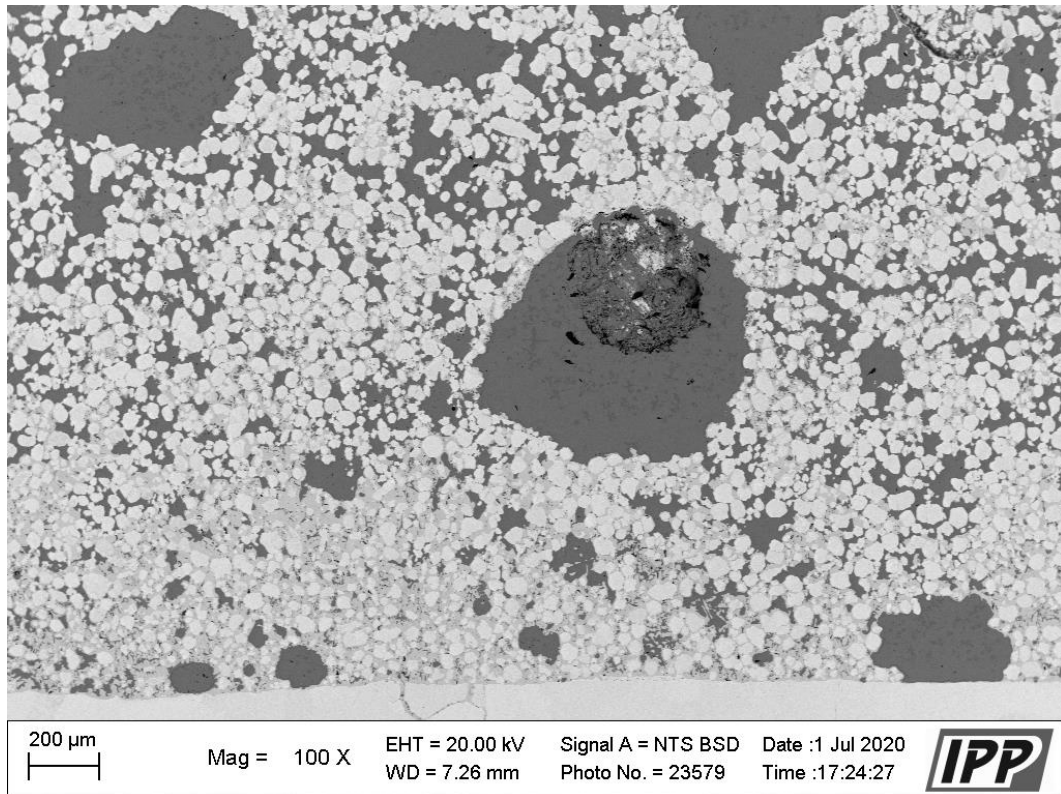
Během navařování došlo opět k přivaření základního materiálu k podložce i přes to, že byl základní materiál opět položen na listu uhlíkového papíru. Kvůli obzvláště problematickému podávání je návar velmi nepravidelný. Na obrázku je však poměrně dobře viditelné, že byl materiál dobře nataven. U vzorku č. 5 se podařilo dosáhnout velmi intenzivního ohřevu. Uhlíkový papír v tomto případě sloužil jako izolační vrstva, a návar měl i několik desítek sekund po navaření svítivě rudou barvu.



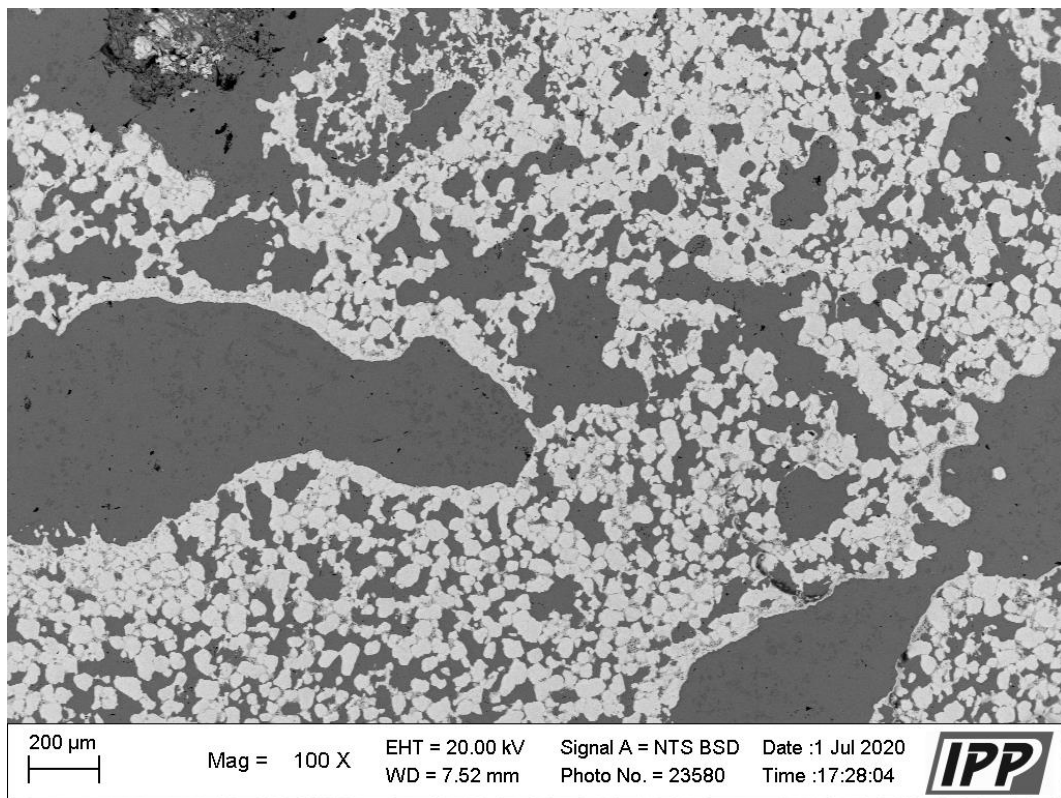
Obrázek 42 - Vzorek č. 5 – makrostruktura

U vzorku č. 5 se základní materiál opět přivařil k podložce. Tentokrát však nedošlo k jeho poškození. Vlivem nepravidelného podávání se z podavače dostalo najednou velké množství prášku, které se dostalo mimo základní materiál až na podložku. I přes velmi vysokou teplotu, která se podařila vytvořit především díky izolaci uhlíkového papíru, nejeví wolframová destička známky natavení. Na snímku jsou dobře viditelné

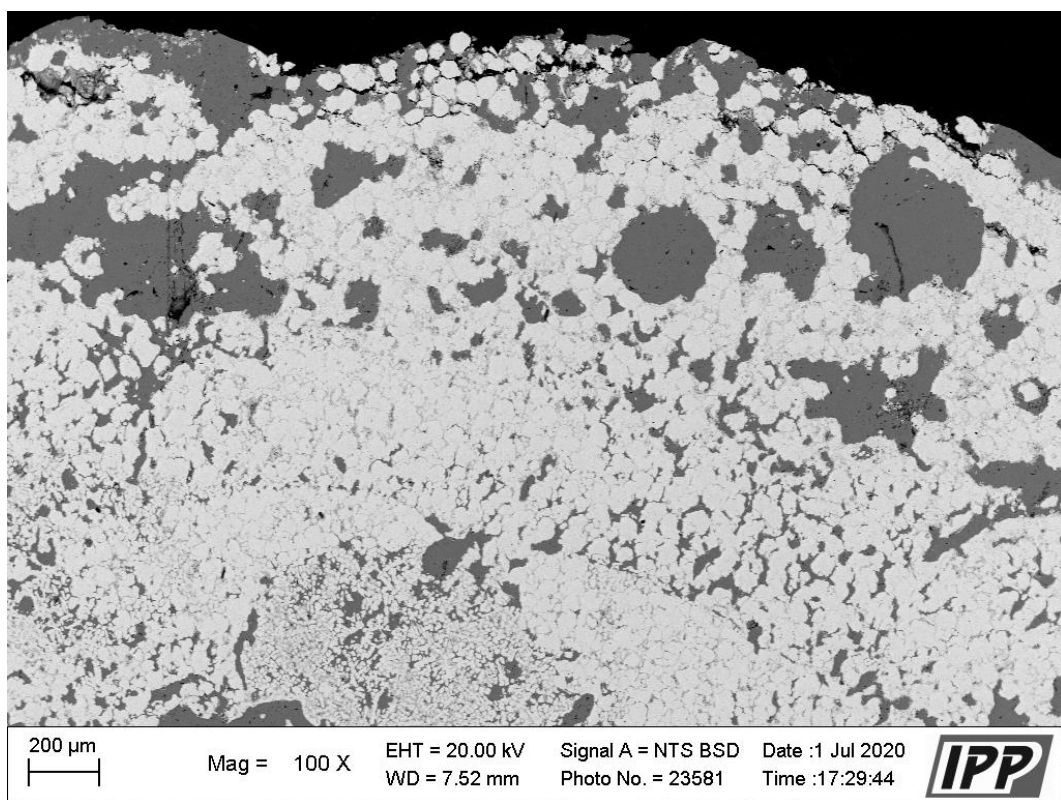
velké póry v celém průřezu návaru. Stejně jako u vzorku č. 3 se do návaru dostaly některé chemické prvky vlivem natavení podložky. Na obrázcích 43 až Obrázek 44 45 je zobrazena mikrostruktura návaru.



Obrázek 43 - Vzorek č. 5 - mikrostruktura (rozhraní návaru a základního materiálu) [J. Matějček]



Obrázek 44 - Vzorek č. 5 - mikrostruktura (střední část návaru) [J. Matějček]



Obrázek 45 - Vzorek č. 5 - mikrostruktura (povrch návaru) [J. Matějček]

Na obrázku 43 jsou dobře viditelné nově vzniklé fáze na hranicích wolframových zrn. Tyto fáze jsou tvořeny chemickými prvky, které se do návaru dostaly z podložky. Především se pak jedná o železo, chrom, nikl a mangan. Detailnější snímek včetně popisu chemického složení jednotlivých fází je možné vidět v příloze 7. V návaru je možné vidět místy větší shluky mědi. Kompaktní útvary wolframu, které bylo vidět v předchozích vzorcích však nevznikly. V návaru se téměř v celém průřezu objevovaly velké póry.

Závěr

V teoretické části diplomové práce byla provedena literární rešerše zabývající se termojadernou fúzí a problematikou materiálů ve fúzní energetice. Konkrétně pak materiály, které jsou vystaveny působení plazmatu. Dále byla vysvětlena problematika funkčně gradovaných materiálů a v poslední kapitole byla popsána metoda plazmového navařování PTA.

V experimentální části práce byla prověřena možnost navaření směsi mědi a wolframu na wolframovou destičku se snahou vytvořit FGM, jehož složení by postupně přecházelo z wolframu v měď. K tomu byla použita metoda plazmového navařování PTA, pomocí které byly navařovány jednotlivé vrstvy s různým poměrem mědi a wolframu. Každý návar se skládal celkem z pěti vrstev. Celkem bylo vytvořeno pět vzorků, přičemž bylo snahou najít optimální procesní parametry pro dosažení úspěšného výsledku. Vytvořené návary byly následně podrobeny analýze na optickém a elektronovém mikroskopu s cílem vyhodnotit jejich strukturu a ověřit úspěšnost vytvoření funkčně gradovaného materiálu.

Obecným problémem během navařování bylo nedostatečné tavení přídavného materiálu, kdy docházelo k tvorbě zásypu. Z toho důvodu bylo po čas experimentu snahou dosáhnout pomocí optimalizace parametrů vyšších teplot a intenzivnějšího ohřevu.

Během analýzy vytvořených návary bylo zjištěno, že během navařování nedocházelo k natavení základního materiálu. Tato skutečnost však není problémem, neboť návary byly se základním materiálem vždy pevně spojeny. Analýza mikrostruktury ukázala, že během navařování nedocházelo k mísení wolframu s mědí a obě fáze od sebe byly na úrovni mikrostruktury velmi dobře rozeznatelné. Díky tomu, že se materiály nemísily, nevznikaly během navařování žádné jiné fáze, které by mohly negativním způsobem ovlivnit užité vlastnosti materiálu. Pouze v případě vzorku č.3 a č. 5 došlo k interakci svarové lázně s podložkou z korozi-vzdorné oceli, kvůli čemuž se do návary dostaly jiné chemické prvky a vytvořily nové fáze okolo hranic wolframových zrn.

Kromě vzorku č. 3, se u žádného jiného vzorku nepodařilo dosáhnout výrazného natavení wolframových zrn. Během pozorování mikrostruktury bylo zjištěno, že si zrna takřka ve všech případech zachovávají stejnou velikost a stejný tvar. Z toho lze usoudit, že pravděpodobně došlo k jejich natavení pouze na povrchu. Výjimkou je vzorek č. 3, u kterého bylo aplikováno mezivrstevové přetavování. Výsledky analýzy mikrostruktury ukázaly, že se tímto způsobem podařilo dosáhnout výrazného natavení wolframových zrn. Mikrostruktura obsahovala místy velmi jemná wolframová zrna, která měla zploštělý tvar a malou velikost. Pro ověření, zda jemnozrná struktura přispívá ke zlepšení adheze wolframu a mědi, byl vzorek č. 3 přelomen a podroben zkoumání lomové plochy. Výsledky dokázaly, že mezi velikostí zrn a adhezí neexistuje přímá spojitost a spojení wolframu s matricí mědi bylo velmi pevné bez ohledu na velikost zrn. U vzorku č. 3 se zároveň podařilo vytvořit viditelná rozhraní jednotlivých vrstev. Ta však nejsou nutnou podmínkou funkčně gradovaného materiálu, a naopak je vhodnější plynulý přechod.

Obecně lze konstatovat, že ve všech případech došlo k výraznému promísení vrstev a nepodařilo se vytvořit materiál s odstupňovaným složením. Příčina může vycházet z podstaty samotné technologie, kdy mohlo vlivem dynamického účinku plazmatu a vysoké teploty dojít k interakci a promísení již nanesených vrstev. Gradace složení nebyla možná pozorovat také proto, že vytvořené návary byly značně heterogenní. U vzorků č.1, č. 2 a č. 4 došlo navíc k vytvoření velkých kompaktních útvarů čistého wolframu. Příčinou mohlo být zadržování wolframu po cestě do svarové lázně například v okolí trysky hořáku, kde mohl být průběžně ohříván a následně mohl být jednorázově přiveden do svarové lázně, kde vytvořil velký kompaktní útvar. Další možností mohlo být například odpařování mědi vlivem vysoké teploty, díky kterému v návarech zbyl velký podíl wolframu. Méně pravděpodobnou variantou je pak například nerovnoměrné promísení obou prášků.

Závěrem lze říci, že se vzhledem k počtu vzorků a různorodosti dosažených výsledků, nepodařilo určit přesný vztah mezi procesními parametry a vytvořeným návarem směsi mědi a wolframu. Výrazným podílem k tomu přispělo problematické a nepravidelné podávání přídavného materiálu, které více či méně ovlivňovalo celý průběh experimentu. Kvůli tomu nelze s přesností určit, do jaké míry ovlivnily nastavené

procesní parametry promísení jednotlivých vrstev, a jaký podíl na tom zaujímá nepravidelné podávání. Z toho důvodu, je pro další zkoumání této problematiky nezbytně nutné docílit zaručeně rovnoměrného a pravidelného podávání přídavného materiálu.

Plazmové navařování metodou PTA je velmi perspektivní metodou tvorby povlaků, které by jistě bylo možné využít i pro tvorbu FGM ve fúzní energetice. Pro úspěšné a reprodukovatelné výsledky vytváření těchto materiálů je však potřeba provést podrobnější výzkum.

Seznam zdrojů

- [1] ŘÍPA, Milan, Jan MLYNÁŘ, Vladimír WEINZETTL a František ŽÁČEK. *Řízená termojaderná fúze pro každého*. Třetí přepracované vydání. Praha: TA PRINT, 2011. ISBN 80-902724-7-9.
- [2] *CESTA K JADERNÉ ENERGII* [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/cesta_6.html
- [3] WAGNER, Vladimír. Jak daleko jsme pokročili k jaderné fúzi?. *OSEL: Objective Source E-Learning* [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/11176-jak-daleko-jsme-pokrocili-k-jaderne-fuzi.html>
- [4] ENTLER, Slavomír. Elektřina z fúze (II) – fyzikální základy: Fyzika jaderné fúze. *TZB-info* [online]. [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/10045-elektrina-z-fuze-ii-fyzikalni-zaklady>
- [5] MLYNÁŘ, Jan. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie: ITER: cesta ke zvládnutí řízené termonukleární fúze* [online]. Vol 49. 2004 [cit. 2020-07-02]. ISSN 0032-2423. Dostupné z: https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/141220/PokrokyMFA_49-2004-2_6.pdf
- [6] KULHÁNEK, Petr. *Úvod do teorie plazmatu*. Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80904582-2-2.
- [7] ELIEZER, Shalom a Yaffa ELIEZER. *The Fourth State of Matter: And Introduction to Plasma Science*. First edition. 1989. ISBN 0 750307404.
- [8] ENTLER, Slavomír, Jan MLYNÁŘ a Václav DOSTÁL. Základy fúzní energetiky II. – Základní fyzika fúzních reaktorů. *TZB-info* [online]. [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14538-zaklady-fuzni-energetiky-ii-zakladni-fyzika-fuznich-reaktoru>

- [9] MATĚJČEK, Jiří. *MATERIALS FOR FUSION APPLICATIONS* [online]. Czech Technical University in Prague [cit. 2020-07-06]. ISSN 1805-2363. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/67039>
- [10] HIRAI, Takeshi, Koichiro EZATO a Patrick MAJERUS. *ITER Relevant High Heat Flux Testing on Plasma Facing Surfaces* [online]. [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/46/03/412.pdf>
- [11] FEDERICI, Gianfranco, Russ DOERNER, Renee FORD a V. BARABASH. *Beryllium as a Plasma-Facing Material for Near-Term Fusion Devices* [online]. [cit. 2020-07-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818098052>
- [12] PINTSUK, Gerald a Akira HASEGAWA. *Tungsten as a Plasma-Facing Material* [online]. , 551-581 [cit. 2020-07-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818116960>
- [13] KHRIPUNOV, B.I., V.S. KOIDAN a A.I. RYAZANOV. *Study of tungsten as a plasma-facing material for a fusion reactor* [online]. , 63-67 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389215010792>
- [14] CHAN KIM, Hyoung, Eunnam BANG a Nojun KWAK. *Thermal and microstructural properties of spark plasma sintered tungsten for the application to plasma facing materials* [online]. , 2649-2653 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379619306052#!>
- [15] BERNARD, E. *Tritium retention in W plasma-facing materials: Impact of the material structure and helium irradiation* [online]. , 403-410 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352179118302424>
- [16] RICHOU, M. a F. GALLAY. *Performance assessment of thick W/Cu graded interlayer for DEMO divertor target* [online]. [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379620301587>

- [17] HOU, Qing, Lai LUO, Zhen HUANG, Ping WANG, Ting DING a Yu WU. Comparison of three kinds of MC-type carbide modified thick W coatings fabricated by plasma transferred arc surfacing. *Surface and Coatings Technology*. 2015, **283**, 52-60. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.10.059>. ISSN 02578972. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897215303546>
- [18] NAEBE, Minoo a Kamyar SHIRVANIMOGHADDAM. *Functionally graded materials: A review of fabrication and properties* [online]. , 223-245 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352940716301214>
- [19] QIANG, Li, Xie CHUNYI a Wang WANJING. *Optimization of W/Cu monoblock mock-up with FGM interlayer for CFETR divertor targets* [online]. [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379619307409>
- [20] GUPTA, Rajat a Rohit KUMAR. *Fabrication and characterization of W-Cu functionally graded material by spark plasma sintering process* [online]. , 24-30 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379618305659>
- [21] ZHOU, Zhang-Jian, Shu-Xiang SONG a Juan DU. *Performance of W/Cu FGM based plasma facing components under high heat load test* [online]. , 1309-1314 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311507002656>
- [22] NEDUCHAL, Přemysl. *Plazmové svařování (navařování)* [online]. [cit. 2020-04-25].
- [23] Plasma Welding Machines. *CHIH SHENG YI: Automatic welding machines* [online]. [cit. 2020-04-25].
- [24] DÍAZ, Víctor, Jair DUTRA a Ana D'OLIVEIRA. *Hardfacing by Plasma Transferred Arc Process: Arc Welding*. InTech, 2011.. Open access. Vedoucí práce Wladislav Sudnik (Ed.).

- [25] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II - část svařování: Speciální metody tavného svařování, tlakové svařování*. Brno, 2006.
- [26] *What is Plasma - Transferred Arc Welding*. Kjellberg [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <http://www.kjellberg.de/Welding-Equipment/Service/Welding-Methods/PTA-Welding.html>
- [27] MRŇA, Libor. *Dělení a svařování svazkem plazmatu* [online]. [cit. 2020-05-05].
- [28] D'OLIVEIRA, A.S.C.M., R.S.C. PAREDES a R.L.C. SANTOS. Pulsed current plasma transferred arc hardfacing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, **171**(2), 167-174. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.269>. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605006448>
- [29] ROHAN, Pavel, Ladislav KOLAŘÍK, Tomáš KRAMÁR a Zdeněk KRŠKA. Navařování plazmatem - ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu. *MM spektrum* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-plazmatem-ochranne-povlaky-ve-vyrobe-i-vyzkumu.html>
- [30] ANTOŠ, Jakub. *Plazmové navařování materiálů pro první stěnu fúzních reaktorů* [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/80486>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Pavel Rohan, Ph.D., IWE.
- [31] KSK, s.r.o. *KSK - český výrobce navařovacích automatů, kooperant v oboru navařování tvrdokovů* [online]. Česká Třebová: KSK, s.r.o., 2016 [cit. 2017-11-30]. Dostupné z: <http://www.kskct.cz/cs/navarovani/>
- [32] BOXANOVÁ, Monika. *Aditivní výroba polotovarů pulzní PTA metodou* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84365/F2-DP-2019-Boxanova-Monika-M.%20Boxanova%2c%20diplomova%20prace.pdf?sequence=->

1&isAllowed=y. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Pavel Rohan, Ph.D., IWE.

[33] VÝLETOVÁ, Karolína. *Plazmové navařování wolframu na kovovou podložku* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84826/F2-BP-2019-Vyletova-Karolina-Vyletova%20Karolina%20-%20Bakalarska%20Prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Pavel Rohan, Ph.D., IWE.

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Závislost střední vazebné energie na nukleonovém čísle A [2].....	12
Obrázek 2 - Různé druhy plazmatu [6]	14
Obrázek 3 - Schéma tokamaku [4].....	15
Obrázek 4 - Průřez plazmovou komorou tokamaku JET před a po instalaci divertoru [4]	17
Obrázek 5 - Porovnání konstrukce tokamaku a stellarátoru.....	18
Obrázek 6 - Srovnání metod PAW a TIG [23].....	25
Obrázek 7 – Srovnání plazmového svařování metodou PTA (vlevo) a PAW (vpravo) [24]	26
Obrázek 8 - Podrobný popis hořáku pro metodu PTA [26]	28
Obrázek 9 – Základní materiál – wolframové destičky.....	32
Obrázek 10 - Schéma návaru	33
Obrázek 11 - Zrna prášku wolframu (vlevo), mědi (vpravo) [30]	34
Obrázek 12 - Plazmový navařovací automat PPC 250 R6	35
Obrázek 13 - Svařovací komora	36
Obrázek 14 - Závislost rychlosti podávání na hmotnostním toku	42
Obrázek 15 - Upnutí základního materiálu a umístění termočlánků.....	43
Obrázek 16 - Vzorek č. 1	45
Obrázek 17 – Vzorek č. 1 - makrostruktura	45

Obrázek 18 – Vzorek č. 1 – mikrostruktura (rozhraní návaru a základního materiálu) [J. Matějčíček]	46
Obrázek 19 - Vzorek č. 1 - mikrostruktura (střední část návaru) [J. Matějčíček]	47
Obrázek 20 - Vzorek č. 1 - mikrostruktura (povrch návaru) [J. Matějčíček].....	47
Obrázek 21 - Vzorek č. 2	49
Obrázek 22 – Vzorek č. 2 - makrostruktura	50
Obrázek 23 – Vzorek č. 2 - mikrostruktura (rozhraní návaru a základního materiálu) [J. Matějčíček]	50
Obrázek 24 – Vzorek č. 2 - mikrostruktura (střední část návaru) [J. Matějčíček]	51
Obrázek 25 – Vzorek č. 2 - mikrostruktura (povrch návaru) [J. Matějčíček]	51
Obrázek 26 - Vzorek č. 2 - Analýza obsahu prvků v průřezu návaru 1/2 [J. Matějčíček] .	52
Obrázek 27 - Vzorek č. 2 - Analýza obsahu prvků v průřezu návaru 2/2 [J. Matějčíček] .	53
Obrázek 28 - Vzorek č. 3	54
Obrázek 29 - Vzorek č. 3 – makrostruktura	55
Obrázek 30 - Vzorek č. 3 - mikrostruktura (první vrstva-detail) [J. Matějčíček]	56
Obrázek 31 - Vzorek č. 3 - mikrostruktura (rozhraní návaru a základního materiálu) [J. Matějčíček]	56
Obrázek 32 - Vzorek č. 3 - mikrostruktura (první vrstva) [J. Matějčíček]	57
Obrázek 33 - Vzorek č. 3 - mikrostruktura (střední část návaru) [J. Matějčíček]	57
Obrázek 34 - Vzorek č. 3 - mikrostruktura (povrch návaru) [J. Matějčíček].....	58
Obrázek 35 - Vzorek č. 3 - snímek lomové plochy [J. Matějčíček]	59
Obrázek 36 - Vzorek č. 4	61
Obrázek 37 - Vzorek č. 4 - makrostruktura	61
Obrázek 38 - Vzorek č. 4 - mikrostruktura (rozhraní návaru a základního materiálu) [J. Matějčíček]	62
Obrázek 39 - Vzorek č. 4 - mikrostruktura (střední část návaru) [J. Matějčíček]	62
Obrázek 40 - Vzorek č. 4 – mikrostruktura (povrch návaru) [J. Matějčíček]	63
Obrázek 41 - Vzorek č. 5	65
Obrázek 42 - Vzorek č. 5 – makrostruktura	65
Obrázek 43 - Vzorek č. 5 - mikrostruktura (rozhraní návaru a základního materiálu) [J. Matějčíček]	66
Obrázek 44 - Vzorek č. 5 - mikrostruktura (střední část návaru) [J. Matějčíček]	67

Obrázek 45 - Vzorek č. 5 - mikrostruktura (povrch návaru) [J. Matějček].....	67
--	----

Seznam tabulek


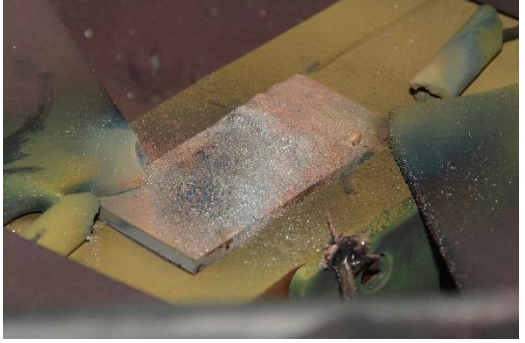



Tabulka 1 - Vybrané fyzikální vlastnosti použitých materiálů	34
Tabulka 2 - Parametry procesu	38
Tabulka 3 - Sypná hustota mědi a wolframu	39
Tabulka 4 - Přepočet hmotnostních a objemových procent	40
Tabulka 5 - Hmotnostní a objemový tok prášku mědi.....	41
Tabulka 6 - Hmotnostní a objemový tok prášku wolframu	41
Tabulka 7 - Vzorek č. 1 - parametry	44
Tabulka 8 - Vzorek č. 2 - parametry	48
Tabulka 9 - Vzorek č. 3 - parametry	54
Tabulka 10 - Vzorek č. 4 - parametry	60
Tabulka 11 - Vzorek č. 5 - parametry	64

Seznam příloh






Příloha 1 – Vzorek č. 1 – fotografie návarů.....	79
Příloha 2 - Vzorek č. 2 – fotografie návarů	80
Příloha 3 - Vzorek č. 3 – fotografie návarů	81
Příloha 4 - Vzorek č. 4 – fotografie návarů	82
Příloha 5 - Vzorek č. 5 – fotografie návarů	82
Příloha 6 - Vzorek č. 3 – prvkové složení fází.....	83
Příloha 7 - Vzorek č. 5 - prvkové složení fází.....	84
Příloha 8 - Vzorek č. 1 - grafické zobrazení průběhu teplot	85

Přílohy





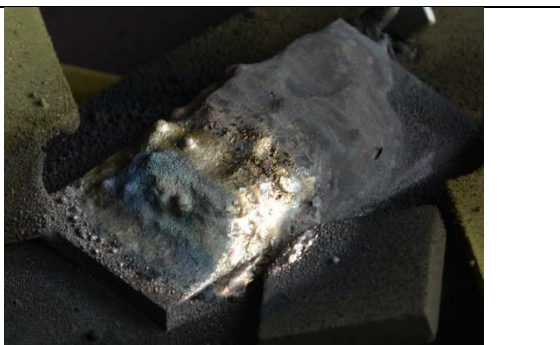
Příloha 1 – Vzorek č. 1 – fotografie návarů

Vrstva 1	Vrstva 2
	
Vrstva 3	Vrstva 4
	
Vrstva 5	
	

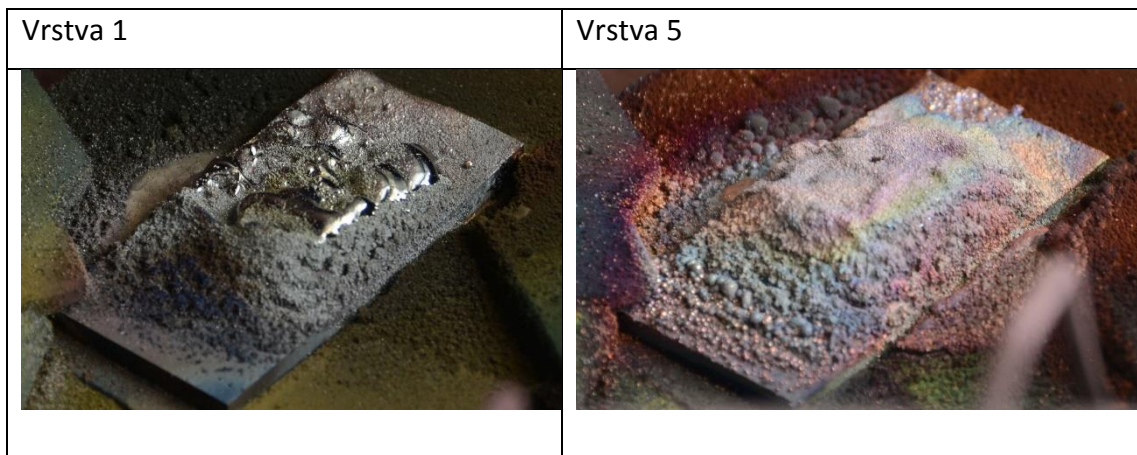
Příloha 2 - Vzorek č. 2 – fotografie návarů

Vrstva 1	Vrstva 2
	
Vrstva 3	Vrstva 4
	
Vrstva 5	
	

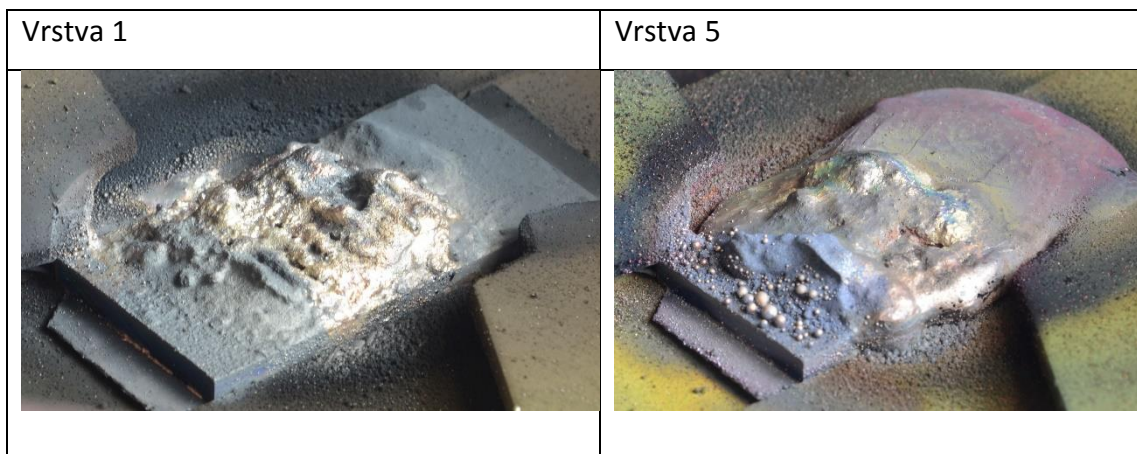
Příloha 3 - Vzorek č. 3 – fotografie návarů

Vrstva 1	Vrstva 2
	
Vrstva 3	Vrstva 4
	
Vrstva 5	
	

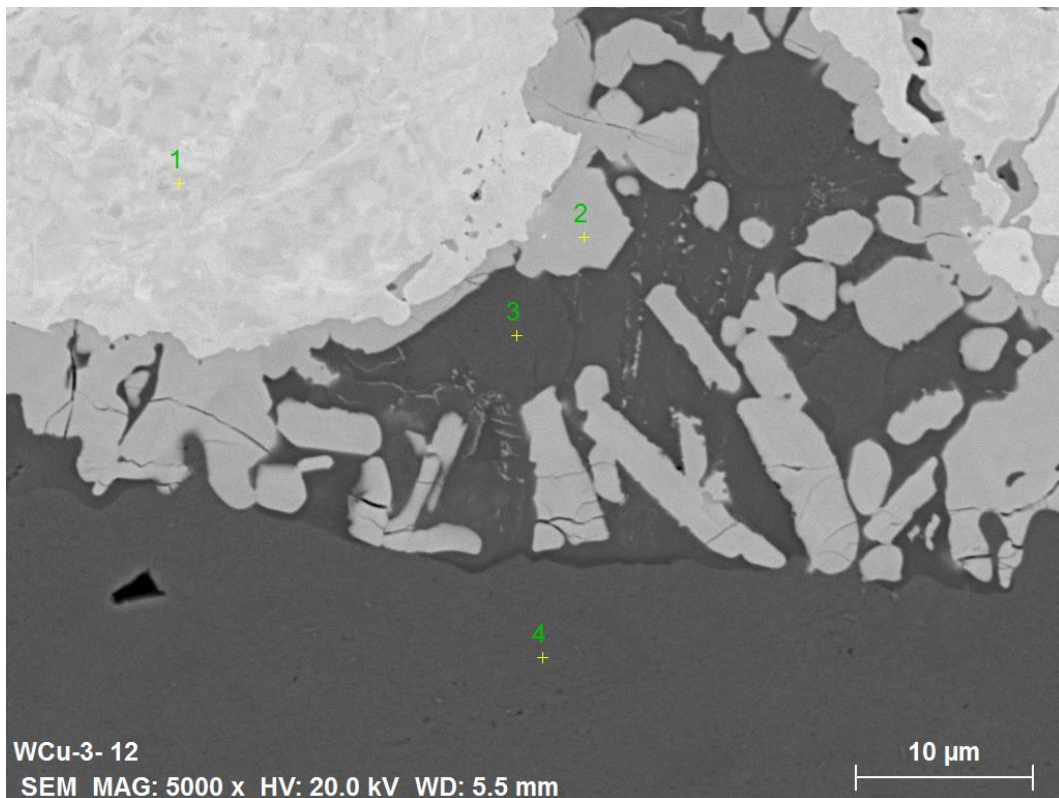
Příloha 4 - Vzorek č. 4 – fotografie návarů



Příloha 5 - Vzorek č. 5 – fotografie návarů



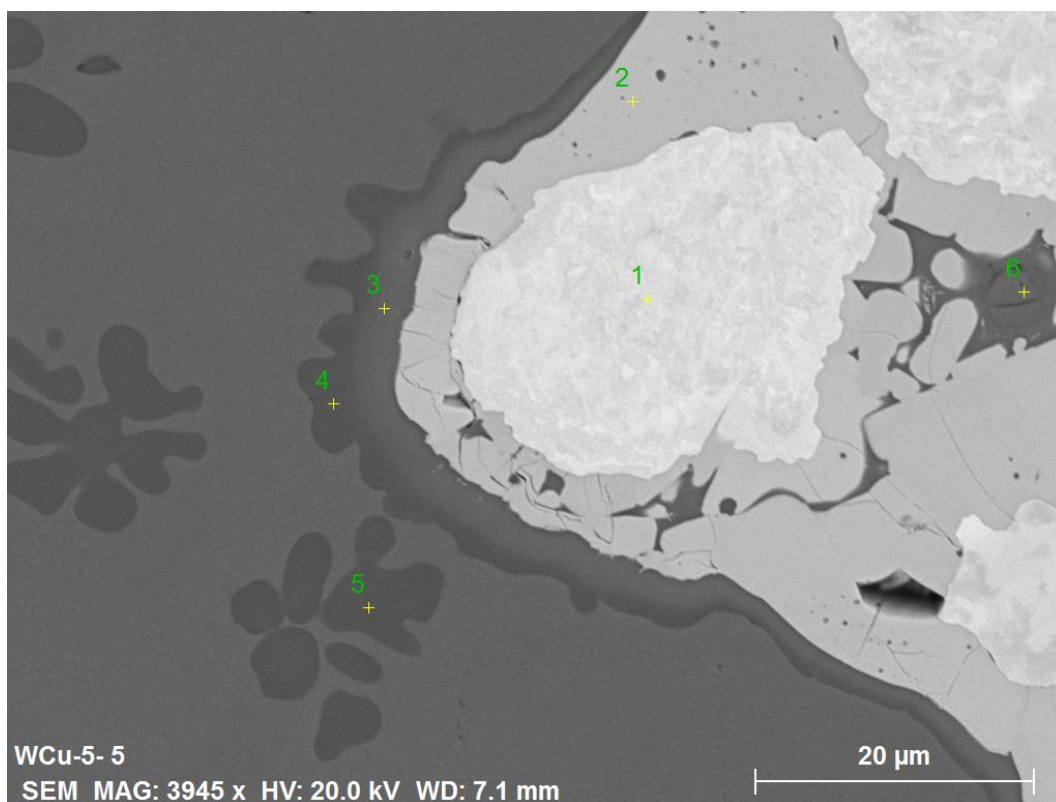
Příloha 6 - Vzorek č. 3 – prvkové složení fází



bod	O [%]	Cr [%]	Fe [%]	Cu [%]	W [%]
1	1,1	-	-	-	98,9
2	0,9	6,7	28	-	64,4
3	0,7	-	4,5	94,6	0,1
4	-	0,6	3,5	95,6	0,3

V tabulce je uvedeno prvkové složení v jednotlivých bodech na snímku.

Příloha 7 - Vzorek č. 5 - prvkové složení fází



bod	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Ni [%]	Cu [%]	W [%]
1	-	-	-	-	-	100
2	6,2	-	18,3	1,4	-	74,1
3	11,4	-	64,3	6,8	8,2	9,4
4	10,8	-	64,6	11,3	12,9	0,4
5	11,1	-	65,7	8,4	14,1	0,7
6	2,2	0,7	10,1	2,6	82,3	2,2

V tabulce je uvedeno prvkové složení v jednotlivých bodech na snímku.

Příloha 8 - Vzorek č. 1 - grafické zobrazení průběhu teplot

