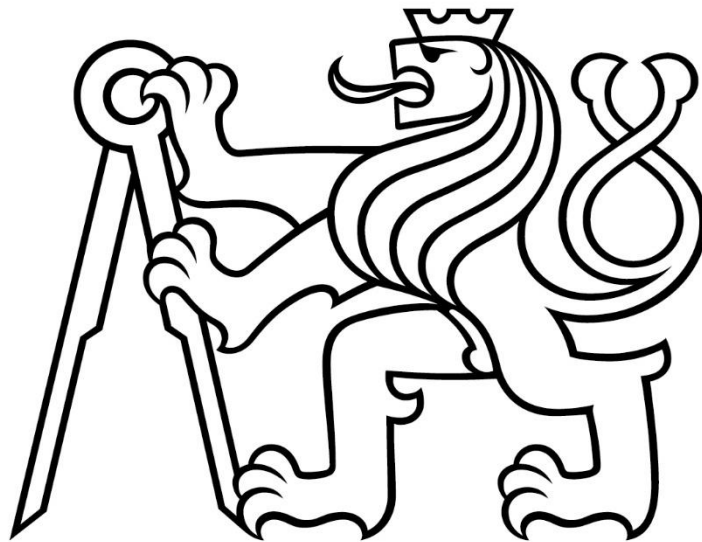


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Plazmové navařování wolframu na kovovou podložku

Karolína Výletová

PRAHA 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Výletová** Jméno: **Karolína** Osobní číslo: **459248**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Plazmové navařování wolframu na kovovou podložku

Název bakalářské práce anglicky:

PTA depositon on metallic substrate

Pokyny pro vypracování:

- provést literární rešerši na téma navařování plazmatem, materiály pro první fúzní reaktory
- experimentálně prověřit možnost navaření wolframu na měděnou podložku PTA depozicí
- vyhodnotit výsledky navařování a porovnat s literární rešerší

Seznam doporučené literatury:

- Hardfacing by Plasma Transferred Arc Process
http://cdn.intechopen.com/pdfs/25058/InTech-Hardfacing_by_plasma_transferred_arc_process.pdf
- Use of tungsten material for the ITER divertor <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352179115301046#>
- Material properties and their influence on the behaviour of tungsten as plasma facing material
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-4326/aa6938/pdf>
- KSK, s.r.o., firemní materiály
<http://www.kskct.cz/cs/ksk-cesky-vyrobce-svarovacich-navarovacich-automatu-kooperant-v-oboru-navarovani-tvrdokovu/>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

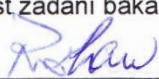
Ing. Pavel Rohan, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


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


Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**

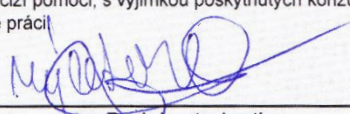

Ing. Pavel Rohan, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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


16.05.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Cílem bakalářské práce je provést literární rešerši na téma fúzní reaktory, materiály pro první stěnu fúzních reaktorů a navařování plazmatem. Dále experimentálně prověřit možnost navaření wolframu na měděné podložky metodou PTA. Na závěr shrnout výsledky, porovnat je s literární rešerší a navrhnout vyhovující parametry.

AUTOR: Karolína Výletová

FAKULTA: Fakulta strojní

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství

ÚSTAV: Ústav strojírenské technologie

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

NÁZEV BAKALÁŘSKÉ PRÁCE: Plazmové navařování wolframu na kovovou podložku

NÁZEV BAKALÁŘSKÉ PRÁCE ANGLICKY: PTA deposition on metallic substrate

Anotační list

Abstrakt

Práce se zaměřuje na problematiku nanášení wolframu, jako perspektivního materiálu na první stěnu fúzního reaktoru typu tokamak na vysoce tepelně vodivý měděný základní materiál.

Teoretická část je věnována přiblížení termonukleární fúze, s použitím zařízení typu tokamak a jeho historii. Dále je představena metoda PTA (pozn. Plasma Transferred Arc), která má potenciál k využití při nanášení PFM (pozn. Plasma-Facing Materials) do vysokoteplotních zařízení kvůli svému metalurgickému spojení kovů a tím větší mechanické odolnosti.

V praktické části je zkoumáno nastavení vhodných parametrů v metodě PTA na spojování měděného a wolframového materiálu. Podstatná část je orientována na vyhodnocení příčin defektů a návrhů jejich odstranění.

Abstract

This work focuses on the application of tungsten as a perspective material on the first wall of the tokamak fusion reactor on a highly thermally conductive copper base material.

The theoretical part is devoted to the general approach of thermonuclear fusion, using the tokamak type device and its history. PTA (plasma transferred arc) method is presented, which has the potential to be used in the application of PF materials to high temperature equipment due to its metallurgical bonding of metals and thus greater mechanical resistance.

In the practical part is investigated the setting of suitable parameters in the PTA method for joining copper and tungsten material. The main part is focused on the evaluation of the causes of defects and proposals for their removal.

Klíčová slova

Termonukleární fúze, tokamak, PTA, depozice, PFM, plazma, wolfram, měď

Keywords

Thermonuclear fusion, tokamak, PTA, deposition, PFM, plasma, tungsten, copper

Prohlášení

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

V Praze dne:

.....

Karolína Výletová

Poděkování

Chci poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlovi Rohanovi Ph.D., EWE za odborné vedení, kontrolu a rady, které mi pomohly dokončit bakalářskou práci. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE za pomoc s metalografickými výbrusy a jejich vyhodnocením. Děkuji také Mgr. Jakubovi Palackému za konzultace v oblasti fyziky plazmatu a kontrolu formy psaného projevu. Za gramatickou kontrolu bych chtěla poděkovat Věře Haase, a velmi bych chtěla poděkovat své rodině a blízkým, kteří měli se mnou trpělivost.

Obsah

Obsah	1
Seznam zkratek:	3
Úvod	4
1. Termonukleární fúze	5
1.1. Od historie po současnost	5
1.2. Termonukleární reakce v tokamaku	7
1.3. Plazma	7
1.4. Tokamak	9
1.5. Projekt ITER a budoucnost	11
2. PFM („Plazma-facing Materials“)	11
2.1. Wolfram	12
2.2. Měď	13
2.3. Ostatní materiály	13
3. PTA („Plazma Transferred Arc“)	14
3.1. Technologie plazmového navařování	14
3.2. Druhy hořáků	15
3.3. Plyny	16
3.3.1. Plazmový plyn	16
3.3.2. Transportní plyn	17
3.3.3. Ochranný plyn	17
3.4. Materiály	17
3.4.1. Základní materiály	17
3.4.2. Přídavné materiály	18
3.5. Výhody a nevýhody plazmového navařování	18
3.6. Využití plazmového navařování	18
4. Cíl a úvod experimentu	19

5.	Přístroje a zařízení	20
5.1.	PPC 250 R6 [24]	20
5.2.	Almemo 5690-2 [15]	21
5.3.	Zařízení pro navařování termočlánků BT-2 [19]	21
5.4.	Struers Labotom – 3 [22]	22
5.5.	Struers CitoPress – 1 [23].....	22
5.6.	BUEHLER® Beta & Vector™ [21]	23
6.	Postup a metody	24
6.1.	První sada návarů	25
6.1.1.	Vstupní parametry – jednotlivé návary	26
6.1.2.	Posouzení struktury jednotlivých návarů	26
6.1.3.	Vstupní parametry – 3 vrstvý návar [18]	28
6.1.4.	Posouzení struktury vícevrstvého návaru	29
6.2.	Druhá sada návarů.....	29
6.2.1.	Vstupní parametry druhé sady jednotlivých návarů	30
6.2.2.	Posouzení struktury druhé sady jednotlivých návarů	31
6.2.3.	Vstupní parametry návaru bez rozkyvu se změnou rychlostí	33
6.2.4.	Posouzení struktury jednotlivých návarů	34
6.2.5.	Vstupní parametry návaru krátkého rozkyvu	34
6.2.6.	Posouzení struktury jednotlivých návarů	35
7.	Mikrostruktura vybraných vzorků	35
7.1.	Vzorek č. 2.1.	35
7.2.	Vzorek 2.2.	39
	Závěr	42
	Použitá literatura	43
	Seznam obrázků.....	46

Seznam zkratek:

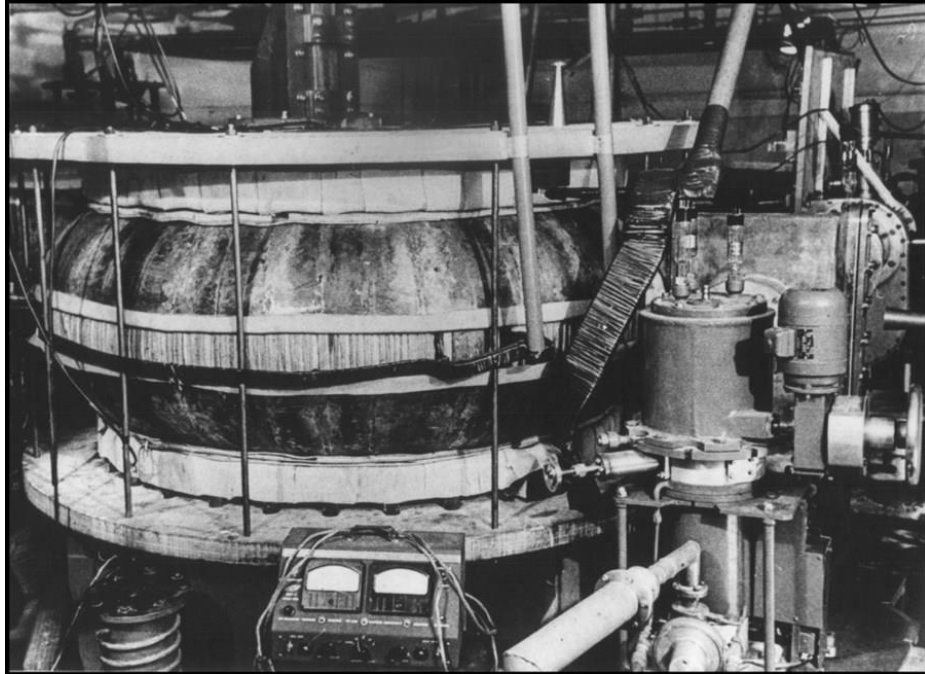
MH	microwawe heating
CASTOR	Czech Academy of Siences TORus
CFC	Carbon fiber composite
PFM	Plasma-facing materials
FGM	Funkčně gradované materiály
PTA	Plasma Transferred Arc
TIG	Tungsten Inert Gas

Úvod

Hlavním problémem dnešní civilizace je uhlíková stopa. Jedním z faktorů, který by mohl pomoci této problematice je výzkum a realizace fúzních elektráren. Prozatím je lidstvo v začátku uvědomování si problematiky emisí a teprve se začíná nahrazovat uhelná energie přírodními zdroji tzv. zelenou energií. Nahrazování probíhá pomaleji, než stoupá spotřeba energie a růst CO₂. Navíc některé objekty potřebují stálý vysoký přísun energie, který je možno zaručit pouze stabilním zdrojem, nezávislým na klimatických podmínkách. Velmi slibně se jeví jaderné reaktory, které dokážou vyrobit skutečně velké množství elektřiny. Bohužel je od začátku doprovází různé nehody, které prohlubují obavy o bezpečnost populace na planetě. Navíc jsou u nich problémy spojené s vyhořelým vysoce radioaktivním palivem. Paralelně s využíváním rozpadu těžkých jader se tak zkoumá fúze lehkých jader, které je nápadně podobné reakcím probíhajícím ve hvězdách. Kromě využívání vodíku jako paliva, kterého je dostatek, navíc nedochází k hromadění radioaktivního odpadu. Zásadním problémem je bohužel udržení horkého plazmatu, k tomu slouží zařízení jako tokamak a stelarátor. Tyto zařízení jsou ale stále pouze experimentální a pro svou konstrukci vyžadují použití velmi specifických materiálů, které potřebují zvláštní podmínky při výrobě zpracování. Většina materiálů používaných k výrobě fúzních zařízení jsou těžko zpracovatelné například kvůli jejich vysoké teplotě tání, nebo toxicitě. Mluví se o materiálech jako je wolfram, titan, uhlík, beryllium, dural a dalších. Všechny materiály musí být teplotně a mechanicky odolné, a splňovat mnoho parametrů, pro vytvoření správných vlastností, aby nedošlo k poškození zařízení vlivem nesprávné reakce ve struktuře materiálu. Jedním z často řešených úkolů v oblasti konstrukce fúzních reaktorů je řešení problematiky materiálů použitých na první stěnu a divertor. V současné době je tento technický problém řešen wolframovými bloky na měděných chladících tyčích. Ukazuje se ale, že výhodnější by bylo využít komplexního materiálu na principu funkčně gradovaného materiálu (FGM) tak, aby byla zajištěna jak možnost rychlého odvodu tepla, tak i odolnost proti mechanickému poškození. Tyto nároky by mohl splnit například postupně vrstvený materiál s různým obsahem wolframu v mědi provedený metodou navařování plazmatem. Bakalářská práce tedy pojednává o nalezení vhodných parametrů při nanášení směsi wolframu a mědi na měděný základní materiál plazmovým navařováním.

1. Termonukleární fúze

1.1. Od historie po současnost



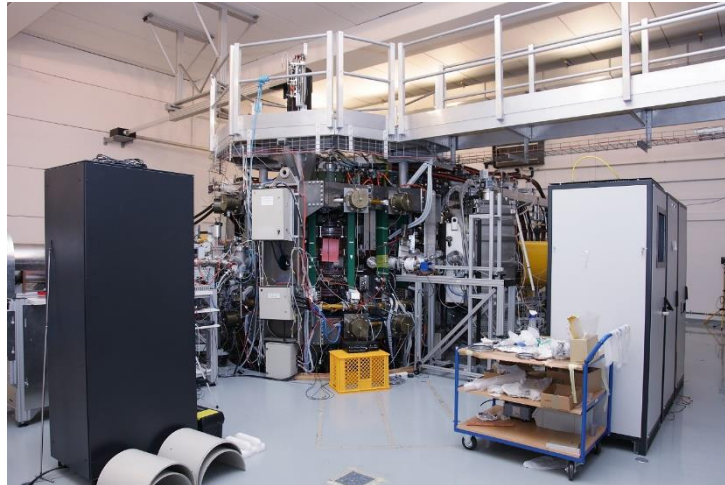
Obrázek 1 - První tokamak: Ruský T1 v Kurčatově Institutu v Moskvě [1]

Pro pochopení vývoje termonukleární fúze, je nutné se vrátit do minulosti, kdy lidé začali podrobněji zkoumat vesmír. Prvním zdrojem inspirací se stala termonukleární fúze na slunci. Aktivně se začala zkoumat v první polovině 20. století, a tehdy také vědci získali první konkrétní poznatky o jaderných přeměnách na slunci. Se vzrůstající spotřebou energie se řízená termojaderná fúze začala jevit jako dobrý zdroj energie do budoucna.

První tokamak T-1 byl navržen a postaven v Sovětském svazu v polovině 20. století v Ústavu pro atomovou energii I. V. Kurčatova a od té chvíle probíhá intenzivní fúzní výzkum. [5]

Za tu dobu přinesl pokrok nezbytné poznatky a technologie, díky kterým má lidstvo schopnost rychleji se posouvat dál a pokračovat v podrobném výzkumu dlouhodobého udržení fúzní reakce jako zdroje energie. Dalším úspěšným milníkem byl

tokamak CASTOR, což byl původně Sovětský tokamak TM-1, po přesunu pojmenován TM-



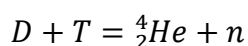
Obrázek 2 – Tokamak COMPASS na Akademii Věd ČR [9]

1-MH (pozn. „microwawe heating“ [9]). V roce 1985 tokamak TM-1-MH prošel výraznou rekonstrukcí vakuové komory, inovací systémového řízení plazmatu a změnou jména na CASTOR, což je zkratka: **Czech Academy of Sciences TORus**. Jeho provoz pod jménem CASTOR skončil v roce 2006, kdy byl nahrazen tokamakem COMPASS. CASTOR byl přemístěn na FJFI ČVUT a do teď pracuje pod názvem GOLEM.

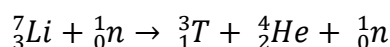
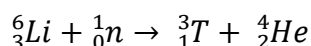
Anglický tokamak COMPASS byl v minulosti nabídnut Akademii věd ČR, což Českou republiku zařadilo mezi země s pokročilým výzkumem vysokoteplotního plazmatu a termojaderné fúze. Tomu předcházelo velice těžké vyjednávání kvůli finančním zdrojům ČR. Nový tokamak nebyl jedinou investicí, kterou musela AV ČR vynaložit. Spolu s instalací tokamaku musela Akademie věd postavit nové prostory a řídicí zázemí, které odpovídaly velikosti a technickým parametrům nového zařízení. Představení tokamaku byl pro Českou republiku významným dnem, ve kterém se sešlo mnoho vlivných osobností politického a akademického statusu. 1. dubna 2008 mohla Akademie věd představit svůj nový tokamak COMPASS, který byl cestou do uznávaných vědeckých kruhů. O čtyři roky později se Akademie věd pyšnila dosáhnutým H-módem, který zařadil COMPASS do skupiny tokamaků s podobným provozem jako se předpokládá u nejnovějšího zařízení ITER. [5][9]

1.2. Termonukleární reakce v tokamaku

Jak už napovídá název termonukleární, nebo termojaderná, v reakci figuruje vysoká teplota a jádra atomů. K reakci dochází, při slučování vysokoenergetických atomových jader zahřátých na několik milionů stupňů například Joulovým teplem a dalším ohřevem. Pokud je těchto reakcí dostatek, aby plasma zahřívalo samo sebe, nazývá se tato chvíle momentem zapálení. Podmínkou sloučení jader je překonání potenciální bariéry, a to je možné pouze při dostatečně velké energii interagujících částic. [4] V případě použití deuteria a tritia dojde k reakci:



Fúzní reakce je doprovázena reakcí v obálce reaktoru (pozn. Blanket), kde reagují fúzní neutrony s lithiem pro vyrobení tritia, jak uvádí [7]:



Jak je z reakce zřejmé, jako „odpadní“ materiál vzniká helium, které nezatěžuje přírodu a lze je využít pro další zpracování.

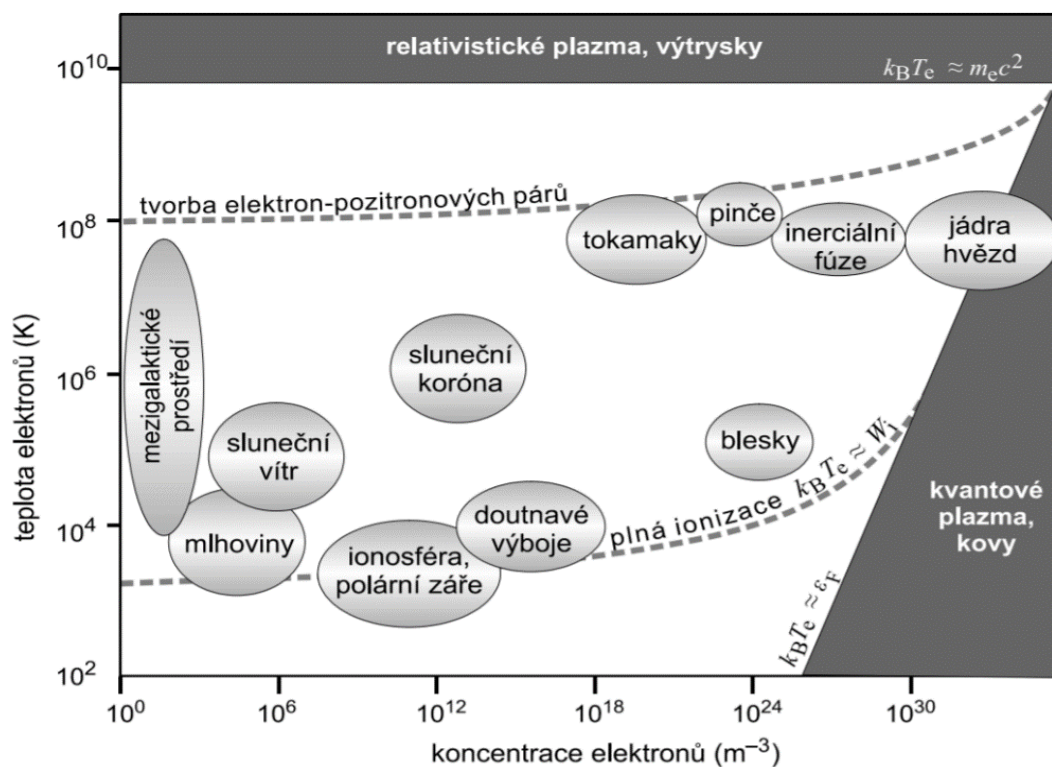
V druhé generaci fúzních reaktorů se uvažuje ještě čistší forma reakce, ke které nebude potřeba žádný jiný prvek než vodík. Reakce je poměrně složitější, a proto je zatím uvažována do budoucna, stejně jako fúzní reaktory třetí generace.

1.3. Plazma

Plazmatem nazýváme 4. skupenství, které je nejrozšířenějším skupenstvím známého vesmíru, jsou z něj tvořeny mlhoviny, obálky hvězd a další tělesa, a oproti ostatním skupenstvím je velmi odlišné. Jedná se o vysoce ionizovaný plyn, který je elektricky vodivý a působí na něj jak magnetické, tak elektrické pole. Tato pole navíc plazma samo vytváří, protože na rozdíl od plynů obsahuje velké množství kladně a záporně nabitých částic. Nicméně je jako celek přibližně nábojově neutrální. Aby se plyn stal plazmatem,

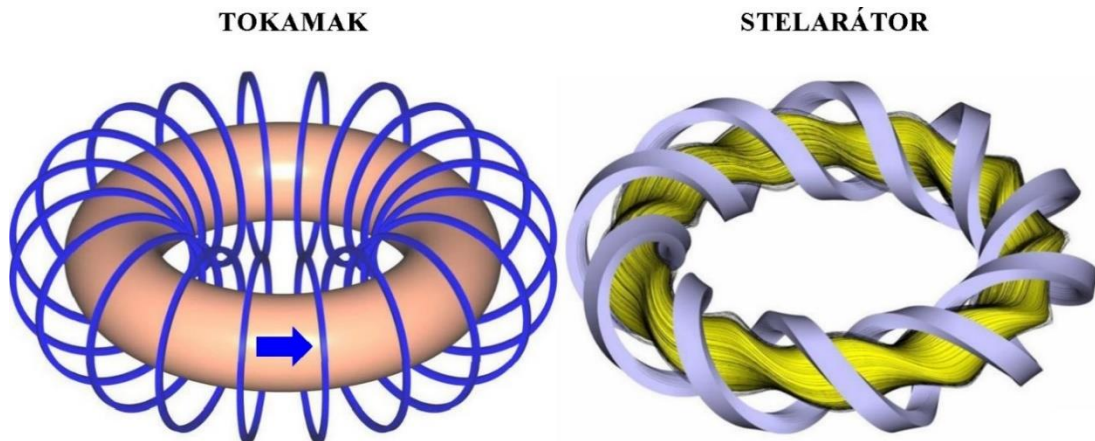
musí se jeho částice ionizovat neboli rozštěpit na ionty a elektrony, a to pomocí srážek, anebo velkého elektrického pole. Plazma jako první popsal Irving Langmuir roku 1928, a jeho název vychází z řeckého „plásma“. V českém jazyce je to plazma často zaměňováno s tou plazmou. Plazma a plazmu rozlišujeme dle rodu, plazmatem se rozumí ionizovaný plyn a plazmou plazma krevní. Plazma lze dělit dle několika kritérií – srážkové a bezsrážkové; nízkoteplotní a vysokoteplotní; klasické a kvantové; a další rozdělení.

V této bakalářské práci je plazma rozlišováno na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Vysokoteplotním plazmatem je rozuměno plazma s teplotou přes 10^6 K, je možné ho najít právě ve fúzních reaktorech, ale převážně v jádru hvězd. Nízkoteplotní plazma lze nalézt všude kolem nás, jedná se o plazma s teplotou menší než 10^5 K, ale u nízkoteplotního plazmatu se rozlišuje částečně a plně ionizovaný plyn. [10]



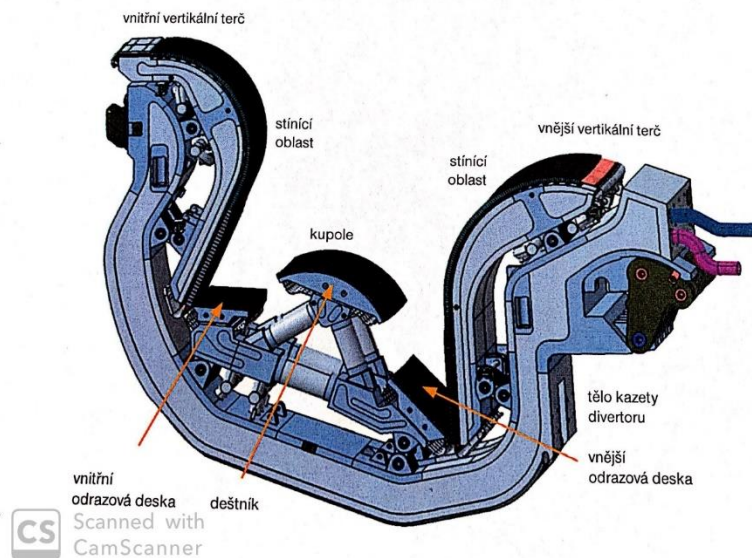
Obrázek 3 - Srovnání teplot plazmatu [10]

1.4. Tokamak



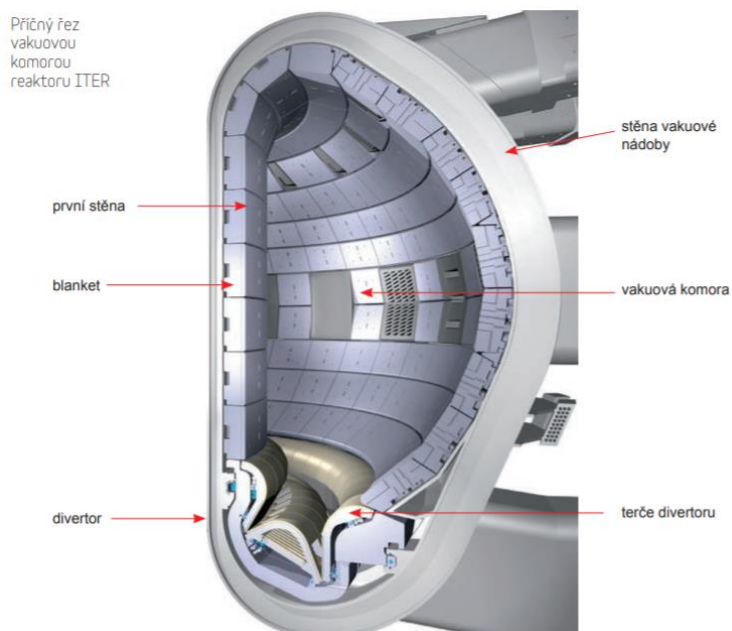
Obrázek 4 - Rozdíl mezi konstrukcí tokamaku a stelarátoru [1]

Název tokamak je zkratkou ruského „toroidalnaja kamera i magnitnyje katuški“, což v češtině znamená toroidální komora a magnetické cívky. Jak název napovídá, tokamak se skládá z duté toroidní komory (pozn. toroid vznikne rotací obecné uzavřené rovinné křivky okolo osy), magnetických cívek, a transformátorovým jádrem. Cívek je několik, a každý typ má svůj speciální účel. Vnitřní cívky poloidálního pole, leží centrálně a obtáčejí se kolem transformátorového jádra. Vnější cívky poloidálního pole, vedou ve směru obvodu komory a ovlivňují polohování plazmatu. Cívky toroidálního pole, procházející kolem osy a ovlivňuje směr proudu plazmatu. Celkově by se tokamak dal přirovnat k sekundárnímu vinutí transformátoru. Hlavním účelem cívek je udržení plazmatu v rovinném toku. Plazma má tendenci se zakřivit do šroubovice, což je vidět na druhém typu termonukleárního reaktoru stelarátoru (srovnání viz Obrázek 3 [1]), který nevyužívá magnetické indukce, ale je velmi náročný na přesnou konstrukci. [2][5]



Obrázek 5 - Popis divertoru [5]

Jak už bylo zmíněno v 1.2. pro slučování jader je potřeba vysoká teplota v řádech milionů stupňů Celsia, čehož se dosáhne bezkontaktním ohřevem a dodatečným ohřevem, a to buď přidáváním energie elektromagnetického záření (pozn. Princip mikrovlnné trouby), nebo srážkami s neutrálními částicemi, které jsou vstřikovány do



Obrázek 6 - Průřez komory tokamaku [9]

komory s energií až stonásobku teploty plazmatu. Vysoká teplota, materiály a fúzní reakce způsobují znečišťování plazmatu. Aby bylo možné udržet tak vysokou teplotu plazmatu musí se čistit od nečistot a odčerpávat vzniklý heliový popel a další nečistoty (kyslík, uhlík,

mikročástice), k tomuto účelu slouží divertor. Divertor, jedna z nejméně namáhaných částí tokamaku, která zachycuje nečistoty vedené vychýlenými siločárami, a skládá se z terčů, stínících oblastí, odrazových desek a deštníku, viz obr. 5.

Další namáhanou částí je první stěna, která se skládá z panelů, jejichž materiál musí odolávat silnému cyklickému tepelnému namáhání. Úkolem první stěny je ochrana zařízení před působením plazmatu. Musí odolávat vyšším tepelným tokům a k odvádět teplo ze srážek, dopadajícího plazmatu na první stěnu. Může se stát, že při poruše plazmatu je první stěna lokálně vystavena velmi vysoké teplotě, která způsobí defekt na jejím povrchu (pozn. při vážném poškození svrchní vrstvy je panel vyměněn), tato situace je výjimečná. [8]

1.5. Projekt ITER a budoucnost

Po dlouholetém výzkumu tokamaků se 35 států domluvilo vybudovat největší tokamak na světě. Celý projekt je navržen tak, aby prokázal možnosti termojaderné fúze, jako bezemisního zdroje energie. Pro uvážení tokamaku jako elektrárny je potřeba splnit Lawsonovo kritérium, kdy fúzní energie musí být větší než energie dodaná pro ohřev (pozn. nyní se k tomu nejméně blíží tokamak JET [5]). Tokamak ITER bude prvním tokamakem s výrobou desetinásobku potřebné vstupní energie, která zaručuje funkčnost zařízení. V tomto případě ještě nebude energie využívána komerčně, ale otevírá to dveře dalšímu již komerčnímu využití tokamaků jako ekologických zdrojů energie. [1]

2. PFM („Plazma-facing Materials“)

Materiály odolávající podmínkám plazmatu jsou rozsáhlým tématem v oblasti termonukleární fúze. Tato problematika je velmi složitá, proto je zatím uvažován téměř ideální materiál. PFM jsou používány zpravidla ve formě kompaktního bloku. V poslední době se objevují práce, kde se PFM objevují ve formě povlaků, a FGM (pozn. funkčně gradované materiály), nanesených žárovými nástřiky. Pro plazmově navažené materiály

nebyly dosud publikovány širší relevantní studie problematiky. PFM lze rozdělit do tří skupin podle primárního použití na [12]:

- I. Materiály první stěny vakuové nádoby (wolfram, beryllium, uhlíkové kompozity), jsou namáhány částicovými toky a změnami teplot a toků.
 - Vyžadována tepelná vodivost a odolnost
 - Odolnost proti erozi
 - Neznečišťování plazmatu
- II. Konstrukční materiály (vanad, wolfram, disperzně zpevněné oceli, měď), tvoří konstrukci a odvádí teplo.
 - Mechanicky odolné, i při vysokém tepelném a radiačním zatížení
 - Tepelně vodivé
- III. Materiály elektrické a chemické izolace (keramické materiály), musí zajistit izolaci při velkých změnách teploty a být odolné vůči chemickému působení.
 - Izolační vlastnosti
 - Odolnost proti teple
 - Odolnost proti záření
 - Odolnost proti korozi

Aby bylo možné zvolit správný materiál, musí se vypracovat podrobná studie, která zohledňuje nejen normální provoz, ale i náhodné změny. Jedná se hlavně o náhodné změny teplot a toků, které podporují erozi, kontaminaci plazmatu a další nežádoucí jevy.

2.1. Wolfram

Šedý kov s protonovým číslem 74 a prostorově centrovanou kubickou krystalovou mřížkou, který je znám jako kov s nejvyšší teplotou tání a vysokou hustotou. Jeho teplota tání je 3414 °C [26], a proto se je považován za nejvhodnějšího kandidáta na první stěnu. Získat ho můžeme z wolframové rudy (pozn. Wolframitu), z níž se vyrábí čistý wolfram.

Má vysokou tvrdost (pozn. 3430-4600 MPa), což ale není výhodou kvůli větší náchylnosti na křehkost. Při tak vysokém protonovém čísle dochází za vysokých teplot k znečišťování a ovlivňování plazmatum což je značná nevýhoda.[16][14][17]

2.2. Měď

Měď je známá svou vysokou tepelnou vodivostí a červeno-oranžovou barvou. Její protonové číslo je 29. Je měkká, houževnatá a má plošně centrovanou kubickou krystalovou mřížku. Jelikož je měď jednofázový materiál, nedochází za působení vysokých teplot ke změnám krystalické mřížky, což je značná výhoda při využití ve vysokoteplotním zařízení. [17]

2.3. Ostatní materiály

2.3.1. Beryllium

Lesklý šedý kov vyznačující se svou nízkou hmotností a vysokou toxicitou. Má nižší protonové číslo než uhlík (pozn. $Z=4$), díky čemuž není plazma tolik znečišťováno a ovlivňováno. Má hexagonální těsně uspořádanou mřížku, která přechází na kubickou mřížku při teplotě 1250 °C. [17][16]

2.3.2. Kompozit s uhlíkovými vlákny

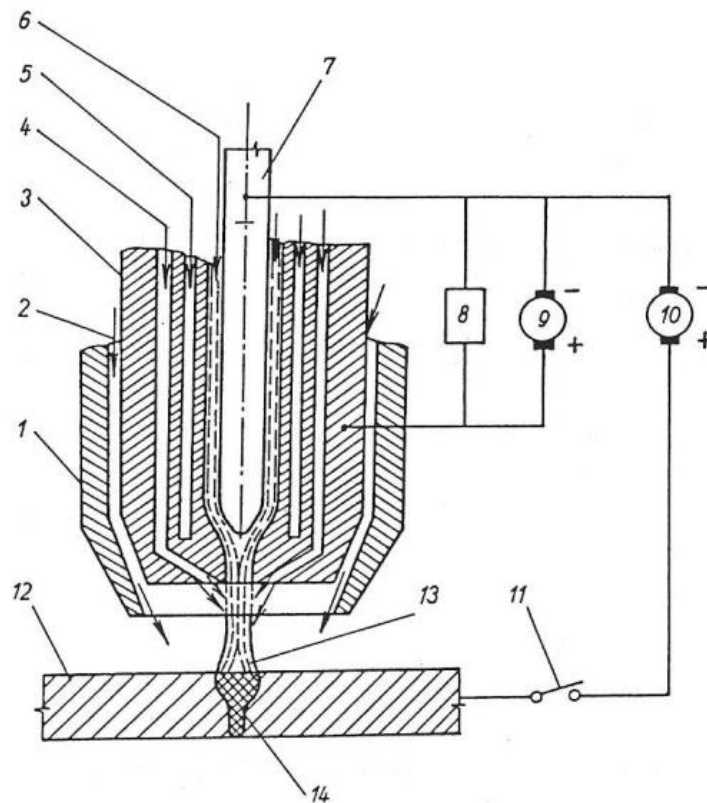
Díky nízkému protonovému číslu uhlíku (pozn. $Z=6$) a vysokému bodu sublimace (pozn. Přibližně 3500 °C) jsou uhlíková vlákna (pozn. CFC - „Carbon Fibre Composite“) druhým nejvhodnějším kandidátem na materiál pro vysoce teplotně namáhanou část tokamaku. Je velmi pevný, lehký a houževnatý, má dlouhou životnost a lze recyklovat. Nevýhodou je jeho reaktivita s vodíkem, díky které dochází k chemické erozi. [12][16]

3. PTA („Plazma Transferred Arc“)

3.1. Technologie plazmového navařování

Plazmové navařování patří mezi technologie s velkým potenciálem. Má vysokou produktivitu, a proto je ve světě velice rozšířené. Můžeme jej rozdělit na PAW („Plasma Arc Welding“) a PTA („Plasma Transferred Arc“) dle formy přídavného materiálu. U metody PAW se jako přídavný materiál používá drát, který je podavačem podáván do plazmového paprsku, kde se natavuje. PTA využívá jako přídavný materiál kovový prášek, který je natavován plazmovým paprskem. Hlavním zdrojem tepla je svazek plazmatu vznikající pomocí elektrického proudu protékajícím wolframovou elektrodou a ionizovaným plynem. Elektroda se, stejně jako v metodě TIG („Tungsten Inert Gas“), nenatavuje, ale teploty jsou mnohem vyšší. Teplota plazmatu se pohybuje v rozmezí 8 500 °C – 30 000 °C (pozn. horní hranice pro vodou moderované plazma), proto je nutné trysku ochlazovat vodou, aby se nenatavila. Celý proces uzavírá a chrání ochranný plyn, který usměrňuje plazmový paprsek a ochraňuje svarovou lázeň. U metody PTA hraje významnou roli nosný plyn, který vede kovový prášek přímo do lázně, kde se taví. Jeho vedení se nachází mezi plazmovým a ochranným plynem.

3.2. Druhy hořáků



Obrázek 7 - Schéma hořáku [20] - keramická hubice (1), ochranný plyn (2), tryska (3), prášek s podávacím plynem (4), integrované vodní chlazení (5), plazmový plyn (6), wolframová elektroda (7), vysokofrekvenční a vysokonapěťový ionizátor (8), pomocný oblouk (9) a ke zdroji (10), spínač (11), základní materiál (12), plazmový paprsek (13) svarová lázeň (14).

Závislé zapojení plazmatronu, používané u metody PTA je konstruováno tak, aby oddělovalo jednotlivé sekce a zvyšoval tak účinek svařování a bylo moderováno teplo působící na plazmatron. Vnější keramická hubice (1) vede ochranný plyn (2). Dále je tryska (3), která odděluje ochranný plyn (2) od prášku (4) s podávacím plynem (4), který je veden rovnou do plazmového paprsku (13), nebo do svarové lázně (14). V další stěně je integrované vodní chlazení (5), které ochlazuje měděnou trysku (pozn. dýzu). Měděný materiál je zvolen, pro jeho dobrou tepelnou vodivost. Dýza je zúžená, tím se zvyšuje rychlost proudění a zužuje plazmový paprsek. V dýze je plazmový plyn (6) a wolframová elektroda (7), která je připojená na vysokofrekvenční a vysokonapěťový ionizátor (8), k pomocnému oblouku (9) a ke zdroji (10). [20]

Nezávislé zapojení plazmatronu je vhodné pro použití u elektricky nevodivých materiálů, a pracuje pouze s vnitřním obloukem, který zahrnuje měděnou trysku chlazenou vodou (dýza) a wolframovou elektrodu. Chlazení probíhá intenzivněji a namáhání materiálu trysky je výrazně vyšší. Celá konstrukce je delší než u plazmatronu závislého, ale působení a vznik plazmového paprsku je stejný.

Pro snížení namáhání závislého hořáku existuje třetí typ plazmatronu, tj. **kombinované zapojení**. Princip spočívá v zapálení plazmového paprsku pomocí nezávislého oblouku, ale hoření probíhá pomocí závislého oblouku, který se nachází mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem.

3.3. Plyny

Pro svařování a navařování metodou PTA se využívají plyny, které chrání svarovou lázeň, snadno ionizují a usměrňují plazmový oblouk. Plyny musí být voleny na základě reaktivity s materiálem elektrody, nebo trysky. Vnik okolních vlivů je nežádoucí, čemuž brání ochranný plyn, který vytváří ochrannou atmosféru. Vzhledem k vysokým teplotám je nutné použít inertní plyny, případně vodík, nebo dusík.

3.3.1. Plazmový plyn

Jak už bylo zmíněno plazmový plyn je plyn protékající okolo wolframové elektrody urychlený zúžením v trysce. Pro plazmový plyn je žádoucí vysoký stupeň ionizace při malé spotřebě energie z elektrického oblouku. Nejčtenější je využití čistého argonu jako plazmového plynu díky jeho nízké ionizační energii. Ionizační stupeň (pozn. četnost elektronů odtržených od atomu při ionizaci) argonu je vysoký a popisuje ho Sahova rovnice:

$$\frac{n_e^2}{n_n} = C \frac{2g_1}{g_0} \exp \left[- \frac{I}{k_B T} \right]$$

Při zahřátí, argon zvyšuje svůj objem (probíhá termická expanze) a v zúžené trysce se zvýší jeho rychlost, dle rovnice kontinuity pro stlačitelné kapaliny:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

Objemový průtok činí *od 0,5 do 9 l/min⁻¹*. [10]

3.3.2. Transportní plyn

Pro transport částic se používá čistý argon, směs argonu s vodíkem, nebo směs argonu s heliem. Stejně jako u plazmového plynu, je požadováno, aby byl co nejméně reaktivní s ostatními částmi plazmatronu a základním materiálem. Částice jsou dopravovány do plazmového paprsku, anebo svarové lázně, kde se natavují. Plyn zároveň s dopravou kovových částic usměřuje tok plazmatu a zvyšuje hustotu jeho energie. Objemový průtok transportního plynu je *3 až 18 l/min⁻¹*.

3.3.3. Ochranný plyn

Aby na svarovou lázeň nepůsobily okolní atmosférické vlivy, obepíná celý proces ochranný plyn, který brání oxidaci, nitridaci, podporuje stabilní hoření a přenos tepelné energie do svaru. Pro zachování ochranných vlastností musíme volit ochranný plyn tak, aby nepůsobil negativně na základní materiál. Objemový průtok je *2 až 20 l/min⁻¹*. Průtok ochranného plynu zvyšujeme u aktivních materiálů jako je titan nebo zirkonium a to na *20 až 30 l/min⁻¹*.

3.4. Materiály

3.4.1. Základní materiály

Jako základní materiál pro navařování lze použít téměř všechny typy ocelí, ale i slitiny neželezných kovů. Díky různým variacím hořáku a elektrického oblouku lze navařovat i na elektricky nevodivé materiály.

Při malé tloušťce plechu se vlivem vysoké teploty může základní materiál zvlnit, čemuž je možno předcházet podložením základního materiálu vysoce tepelně vodivým materiálem pro odvod tepla. Pokud je použit materiál náchylný na přehřátí, je zvolen pulzní proud pro zmenšení tepelně ovlivněné oblasti. [25]

3.4.2. Přídavné materiály

Přídavné směsi materiálů lze kombinovat téměř neomezeně, jde je rozdělovat podle matrice (pozn. převažujícího materiálu, základních prvků). Matrice je smíchána s dalšími prvky podle požadovaných výsledných vlastností. Nejrozšířenějšími prvky jsou například železo, kobalt a nikl, viz literatura [25].

3.5. Výhody a nevýhody plazmového navařování

Výraznou výhodou je vysoká rychlost a produktivita procesu. Je možné automatizovat a mechanizovat proces navařování a svařování. Na základním materiálu probíhá tavení úzké oblasti a díky tomu dochází k malému tepelnému ovlivnění a tím dochází pouze k malé změně povrchové struktury. Vzniká tenká a kvalitní přechodová vrstva, a rovnoměrný návar.

Nevýhodou PTA je cena, jelikož práškový přídavný materiál je zpravidla nejdražší formou přídavného materiálu na trhu, vzhledem k cenám ostatních běžně používaných přídavných materiálů. Další nevýhodou je odpařování plynů z lázně, které jsou zdraví škodlivé, a proto musí být důkladně odsávány. Dalším faktorem je intenzita záření a vysoká teplota. Pro zachování bezpečnosti je pracovní prostor zařízení zakryt.

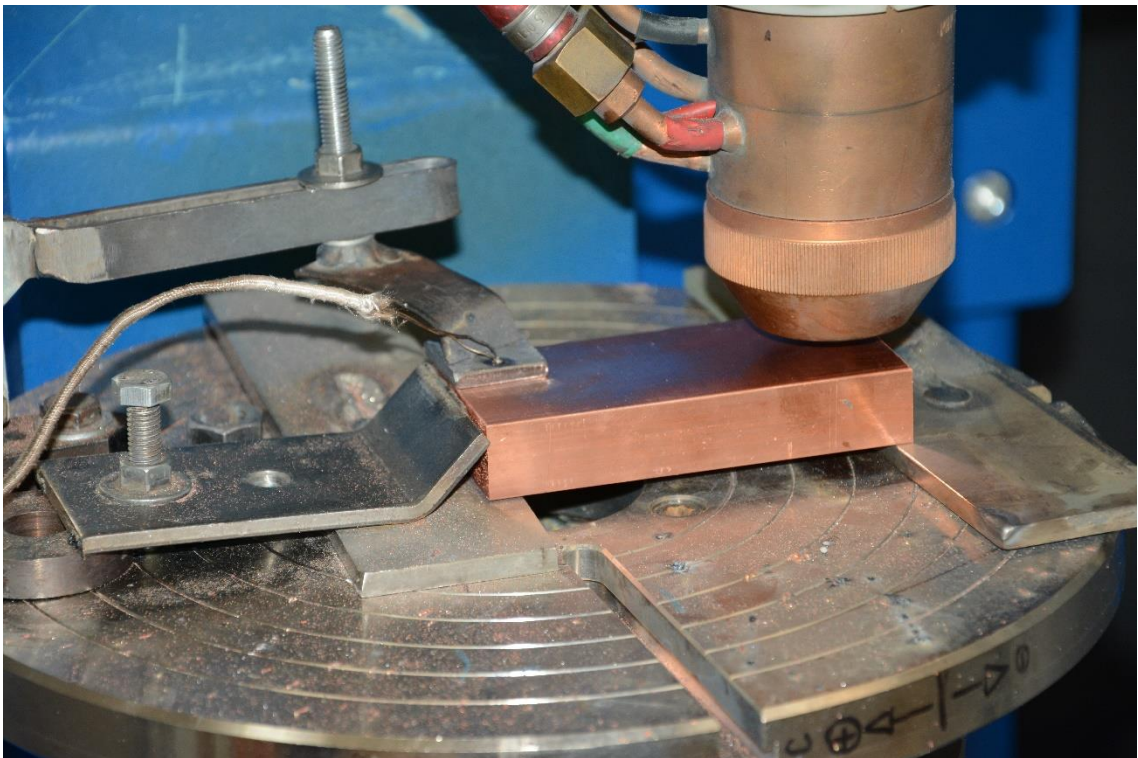
3.6. Využití plazmového navařování

Obecně se plazmové navařování používá v odvětvích, kde je vyžadována vysoká kvalita a produktivita procesu. Zejména se používá pro ušlechtlejší materiály v oblastech jako je jaderný průmysl, chemický průmysl, potravinářství, elektronika, letecký průmysl, automobilový průmysl, kosmický průmysl a další.

Experimentální část

4. Cíl a úvod experimentu

Cílem experimentálního výzkumu je prozkoumat efektivitu navařování směsi wolframu a mědi na měděný základní materiál. Na rozdíl od žárového stříkání dochází při plazmovém navařování k metalurgickému propojení kovů a tím pádem i lepší mechanické odolnosti spojovaného materiálu. Vzhledem k použití stejného základního materiálu a jedné složky přídavného materiálu není potřeba snižovat promísení materiálů během navařovacího procesu.



Obrázek 8 - Hořák a základní materiál před navařováním

5. Přístroje a zařízení

5.1. PPC 250 R6 [24]

K navařování wolframu na vzorky byl použit plazmový navařovací automat PPC 250 R6 od firmy KSK s.r.o, Česká Třebová, který je určen k navařování na rotační součásti s práškovým přídavným materiálem. Hořák se pohybuje ve čtyřech osách (X, Y, Z, N) a stůl ve dvou osách (C, R). Výhodou navařovacího automatu PPC250 R6 je možnost mísení dvou různých práškových materiálů v různých poměrech. Materiály se podávají přes speciální směšovací nádobu dále do hořáku.



Obrázek 9 - Navařovací automat KSK s.r.o. Česká Třebová [23]

5.2. Almemo 5690-2 [15]

K zaznamenávání teploty byla použita měřící ústředna Almemo 5690-2 (Ahlborn Německo). Ústředna je multifunkční zařízení s velkoplošným displejem, a velkou kapacitou měření.



Obrázek 10 - Měřící ústředna Almemo 5690-2 [15]

5.3. Zařízení pro navařování termočlánků BT-2 [19]

Navařuje termočlánky pro měření teploty pomocí kondenzátorového výboje. BT – 2 je akumulátorový typ, umožňuje proto navařování i v místech bez přívodu síťového napětí. Lze s ním navařovat dráty a termočlánky do průměru 1,4 mm.



Obrázek 11 - Zařízení k navařování termočlánků BT-2

5.4. Struers Labotom – 3 [22]

Manuální laboratorní pila s vysokou řezací kapacitou, která zaručuje rozdělení materiálu bez tepelného ovlivnění, díky aktivnímu chlazení brusného kotouče s příměsí antikorozi emulze.



Obrázek 12 - Laboratorní rozbrušovací pila Struers Labotom - 3

5.5. Struers CitoPress – 1 [23]

Automatický, elektrohydraulický montážní lis, který za tepla a tlaku lisuje metalografické vzorky do termostatické pryskyřice.



Obrázek 13 - Automatický montážní lis na metalografické vzorky



Obrázek 14 - Metalografický vzorek vytvořený pomocí Struers CitoPress - 1

5.6. BUEHLER® Beta & Vector™ [21]

K předpřípravě metalografických vzorků byla použita automatická metalografická leštička/bruska s přítlačnou hlavou Vector. Pro zabroušení zkoumané plochy byl použit brusný papír SiC 1200 a SiC 2000 pro broušení za mokra, pro leštění leštící kotouč s diamantovou suspenzí (velikost zrna 1 μ m).



Obrázek 15 - Metalografická leštička/bruska Buehler s přítlačnou hlavou Vector [21]

6. Postup a metody

Jako zkušební podložky pro navařování byly zvoleny měděné kvádry (pozn. EN CW004A, ČSN 423001) 100x50x20 mm, upnuty do kovového svěráku na navařovacím zařízení. K měření teploty byly použity dva termočlánky, z každé strany jeden (viz obrázek 16). Termočlánky byly navařeny na ocelové destičky stejné velikosti, vzhledem k tomu, že přivařování termočládku na měděný materiál je problematické. Umístění se volilo vzhledem k posuvu navařovacího zařízení. Termočlánek č. 1 byl umístěn shora

vlevo a termočlánek č. 2 zdola vpravo.



Obrázek 16 - Základní upnutí vzorku a termočláneků

Teplota byla měřena po celou dobu navařování. Plocha každého měděného vzorku byla očištěna od oxidů pomocí ručního drátěného kartáče. Pro porovnání bylo zvoleno několik různých vstupních parametrů, aby byly pokryty všechny možnosti a metody k úspěšnému návaru.

6.1. První sada návarů

Parametry první sady byly navrženy v návaznosti na diplomovou práci [18], která se zabývala návaru W/Cu na chrom-niklovou austenitickou ocel. Proud byl pozměněn v závislosti na měděném základním materiálu. Vzhledem k vysoké tepelné vodivosti mědi bylo nutné upravit parametry tak, aby vznikalo větší teplo v oblasti návaru a nestačilo se odvést do zbytku materiálu. V první sadě byly navařeny 4 vzorky, které se následně vizuálně porovnávaly. Parametry první sady jsou zaneseny v Tabulce 1.

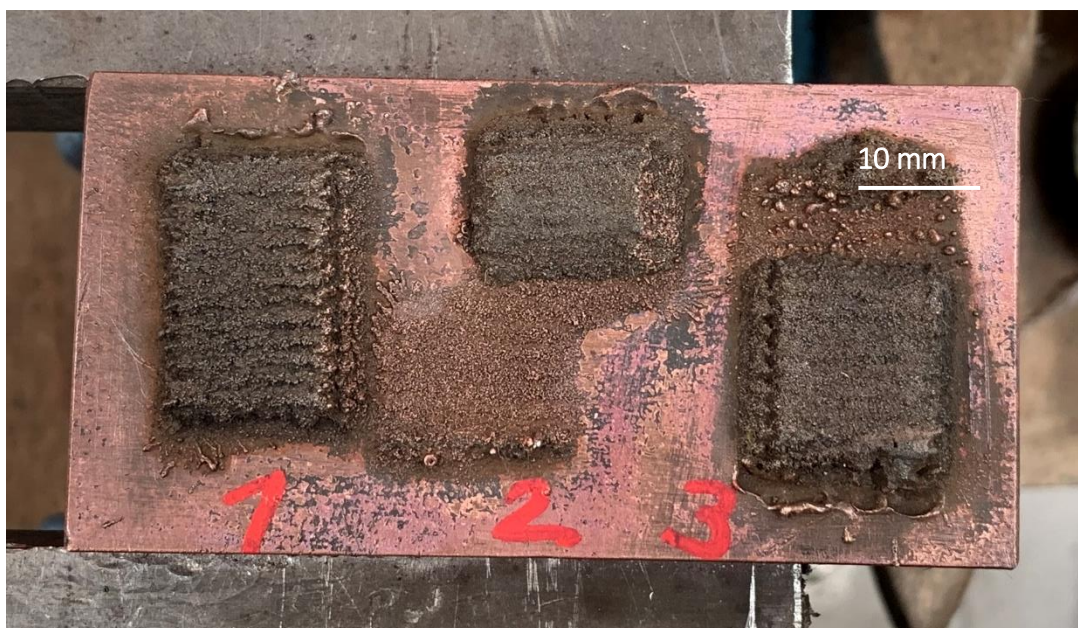
6.1.1. Vstupní parametry – jednotlivé návary

Tabulka 1 – Jednotlivé návary

Č.	Proud [A]		Pulzace [Hz]	Prášky		Procesní plyny		Lineární rychlost [mm/s]	Rozkvy			Teplota	
	IH	IL	f	Podávání	Procenta W	Plazma	Ochrana + transport		šířka	rychlost	Pauza	T poč.	T kon.
1.1.	230	170	10,8	20	75 %	Ar	Ar	0,8	16	16	0,3/0,3	150	330
1.2.	245	185			75 %							150	400
1.3.	245	205			75 %							150	450

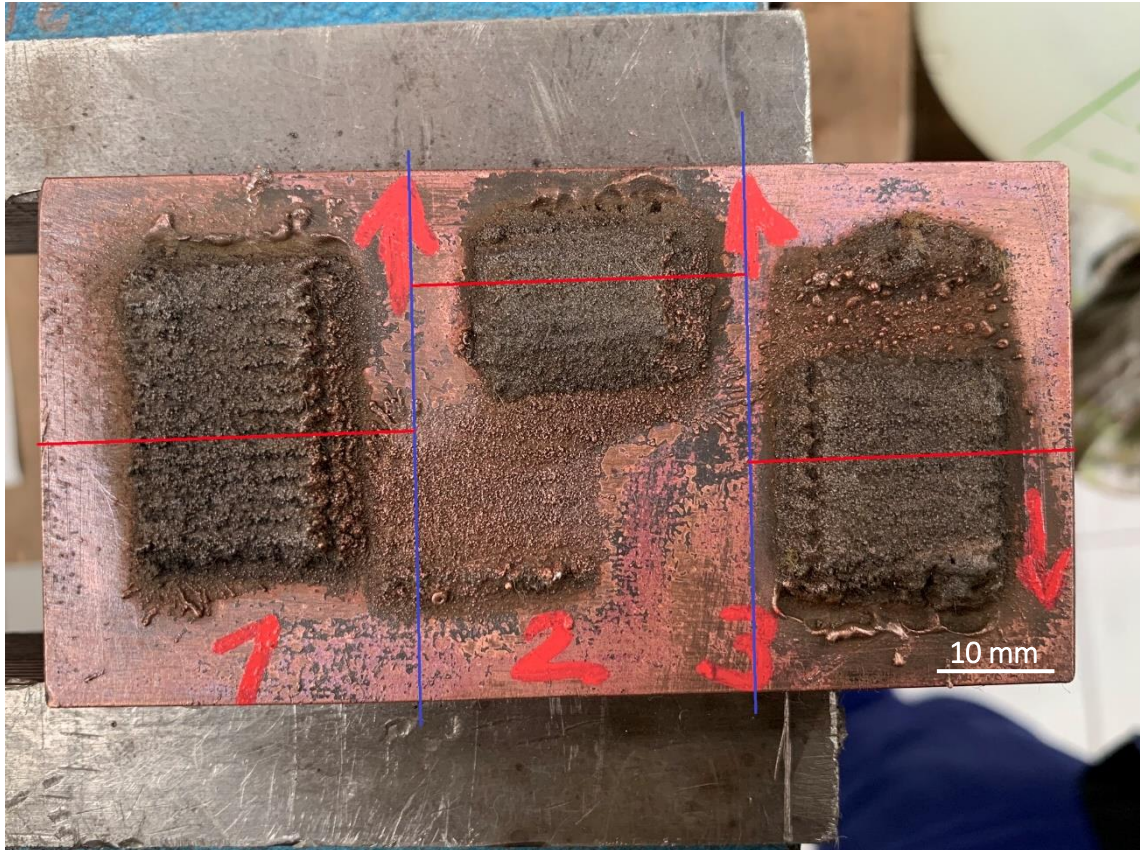
Při vzorku č. 2 nastal technický problém uvnitř nádoby na wolframový prášek. Jelikož zrna wolframu jsou ostrá, tak je skluz prášku poněkud problematictější a dochází k výpadkům přísunu wolframového přídatného materiálu. To samé lze vidět i u vzorku č. 3, ale v menší míře. Technické potíže neovlivnily další vyhodnocování vzorků. Pro vyřešení problému by bylo vhodné zařídit lepší skluznou plochu v násypném zařízení.

6.1.2. Posouzení struktury jednotlivých návarů



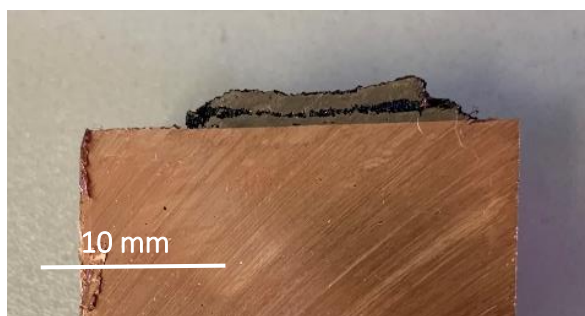
Obrázek 17 - Návary 1.1, 1.2, 1.3

Každý návar byl oddělen na samostatný vzorek, a poté rozdělen viz obrázek 17. Vzorek 1.3. byl navařován v jiném směru než ostatní vzorky, kvůli upevnění na navařovacím zařízení.



Obrázek 18 - Zpracování návarů

Po rozdělení vzorků je vidět, že přídavný materiál se základním materiálem není promísený, pouze na krajích návaru je vidět deformace. Při lehkém tlaku lze lehce návar odloupnout, tudíž nedošlo k navaření, nýbrž pouze k „nalepení.“



Obrázek 19 - Návar 1.1.

6.1.3. Vstupní parametry – 3 vrstvý návar [18]

Po navaření prvních tří vzorků, které se vizuálně jevily úspěšně, byl zařazen do dalšího postupu vícevrstvý návar. Ten je nutný pro docílení co nejvyššího procenta wolframu v horní vrstvě. Spolu s procentem wolframu se musí zvedat i proud, aby došlo ke správnému promísení materiálu a nevznikala nesmíšená struktura (pozn. parametry viz tabulka 2).

Tabulka 2 – Vícevrstvý návar

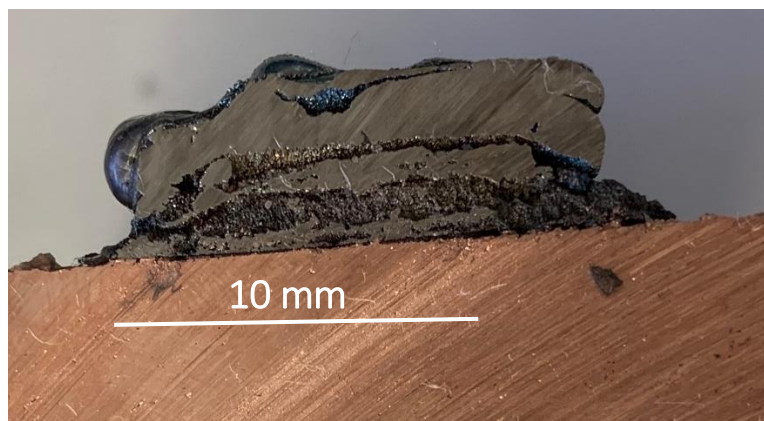
Vrstvy	Proud [A]		Pulzace [Hz]	Prášky		Procesní plyny		Lineární rychlost [mm/s]	Rozkvyv			Teplota	
	IH	IL	f	Podávání	Procenta W	Plazma	Ochrana + transport		šířka	rychlost	Pauza	T poč.	T kon.
1.	245	185	10,8	20	75 %	Ar	Ar	0,8	16	16	0,3/0,3	150	650
2.	245	205			95 %							250	450
3.	245	205			98 %							250	400



Obrázek 20 - Vícevrstvý návar

6.1.4. Posouzení struktury vícevrstvého návaru

Vzorek třívrstvého návaru byl rozříznut v místě, ve kterém ležely všechny vrstvy, aby byla vidět propojenost daných vrstev. Na obrázku 21 lze vidět, že byly zvoleny nevhodné parametry pro první vrstvu, kvůli nimž první vrstva není navařená, ale utvořil se studený spoj. Vzorek vykazuje další vnitřní vady, jako je dutina, nebo póry, utvořené špatným natavením prášku, nebo sublimací měděného přídavného materiálu.



Obrázek 21 - Vnitřní řez vícevrstvého návaru

Se stoupajícím procentem wolframu je struktura stálejší a jednodušší, jelikož teplo zůstává v materiálu a neodvádí se dál, jako je vidět mezi základním materiálem a navařem. Studený spoj je způsobem nedostatečnou teplotou pro natavení materiálu, jelikož všechno teplo je odvedené dál do materiálu.

6.2. Druhá sada návarů

Pro vyřešení studených spojů, které nastaly u předchozích vzorků bylo zvoleno řešení vytvořením vyššího tepla změnou parametrů. Daná problematika byla zúžena na první vrstvu návaru. Předehřev byl zvolen pro všechny vzorky na 100 °C, pro možnost porovnání při stejných počátečních podmínkách. Od první sady se druhá sada liší i v ochranném plynu, který byl změněn na argon s 10 % vodíku pro zvýšení tepelné energie.

6.2.1. Vstupní parametry druhé sady jednotlivých návarů

Kvůli změně ochranného plynu se začínalo na stejných parametrech, jako u první sady návarů, aby bylo možné porovnat vliv změny ochranného plynu. Změna nastala u druhého vzorku, kde se změnila pulzace z 10,8 Hz na 200 Hz. Dále byla měněna lineární rychlost (viz tabulka 3).

Tabulka 3 – druhá sada jednotlivých návarů

Vzorek	Proud [A]		Pulzace [Hz]	Prášky		Procesní plyny		Lineární rychlost	Rozkvy			Teplota	
	I _H	I _L	f	Podávání	Procenta W	Plazma	Ochrana + transport	[mm/s]	šířka	rychlost	Pauza	T poč.	T kon.
2.0.	245	185	10,8	20	75 %	Ar	Ar+10 %H	0,8	16	16	0,3/0,3	100	650
2.1.	245	210	200		75 %			100				700	
2.2.	245	210	200		75 %			100				750	
2.3.	245	210	200		75 %			100				680	

Pozn. K popisu byly zvoleny nejúspěšnější vzorky, fotodokumentaci ostatních vzorků lze nalézt v příloze.

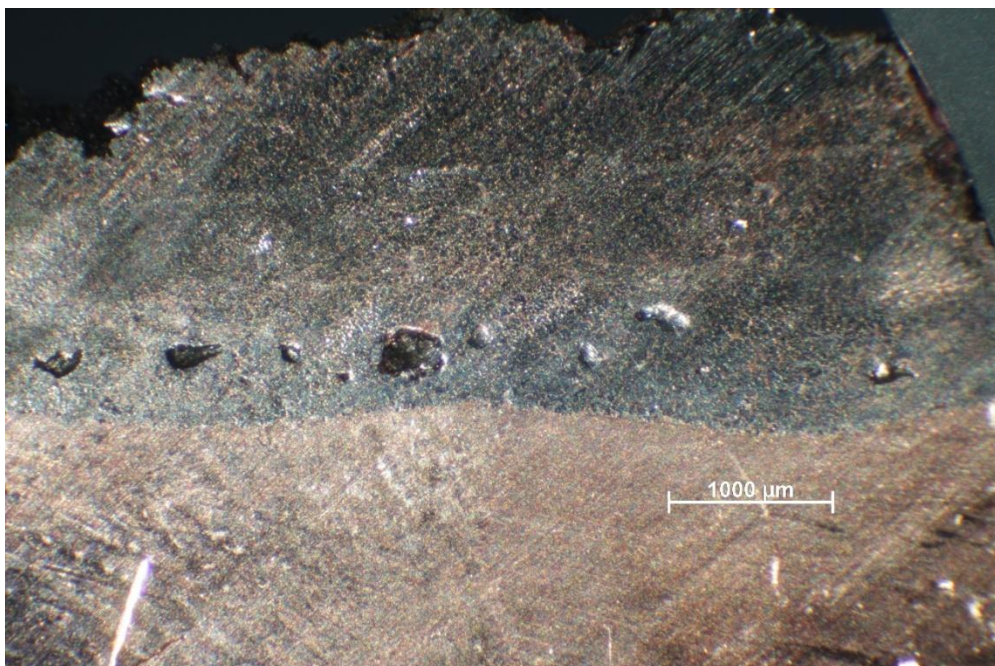
Po navaření byla provedena vizuální kontrola jednotlivých vzorků a následně kontrola vizuální struktury. Vizuálně se jeví úspěšně vzorek 2.1 a vzorek 2.2., ostatní měly viditelné defekty ve formě neroztaveného přídavného materiálu.

6.2.2. Posouzení struktury druhé sady jednotlivých návarů



Obrázek 16 - Návar 2.1.

Na vzorku 2.1 lze pozorovat jemnou pórovitost způsobenou vysokou teplotou, konkrétně vypařováním měděného přídavného materiálu. Po rozříznutí lze vidět i vnitřní pórovitost, způsobenou stejnými procesy jako vnější defekty.



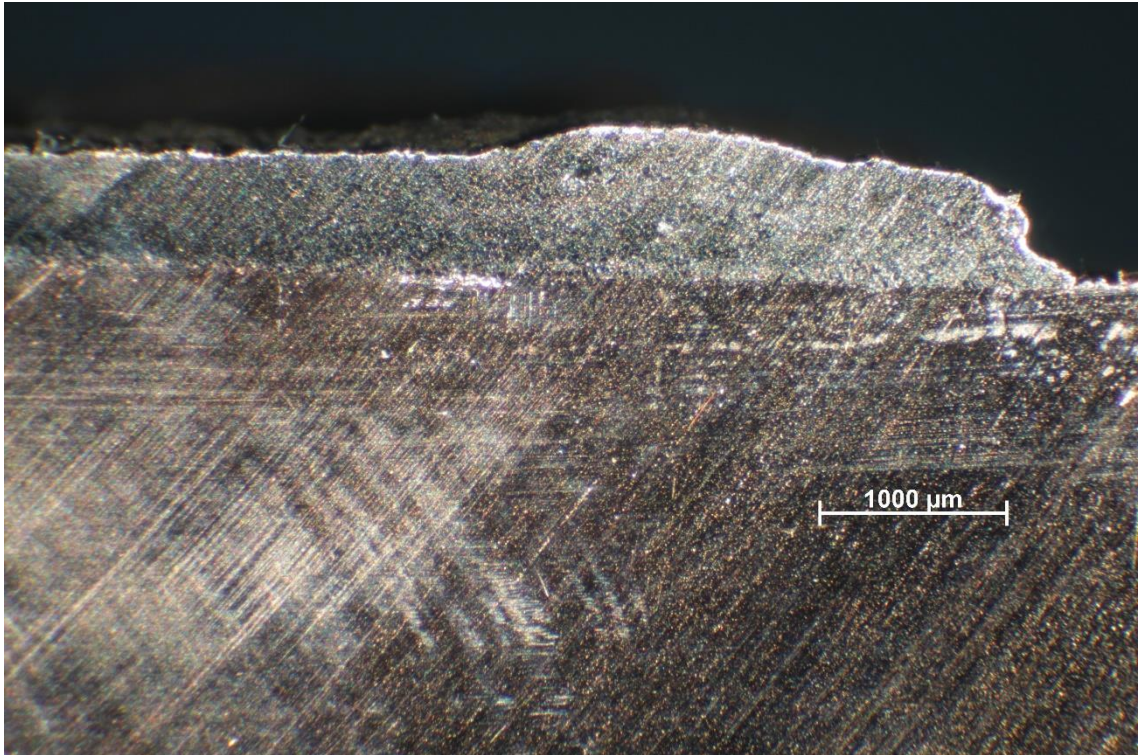
Obrázek 17 - Vnitřní struktura návaru 2.1.

Při prozkoumání přechodu přídatného a základního materiálu, se přechod jeví jako úspěšně navařený. Základní materiál byl nataven, což je zřejmé ze zvlnění horní plochy základního materiálu.



Obrázek 18 - Návar 2.2.

Vzorek č. 2.2. je druhým vzorkem, který se jeví jako úspěšně navařený. Vnitřní struktura má méně defektů než vzorek č. 2.1., ale jeho přechod je o něco méně tepelně ovlivněný (viz obrázek 25) než u předchozího vzorku, dle přezkoumání mikrostruktury bylo zjištěno, do jaké míry je struktura základního materiálu a přídatného materiálu promísena.



Obrázek 19 - Vnitřní struktura návaru 2.2.

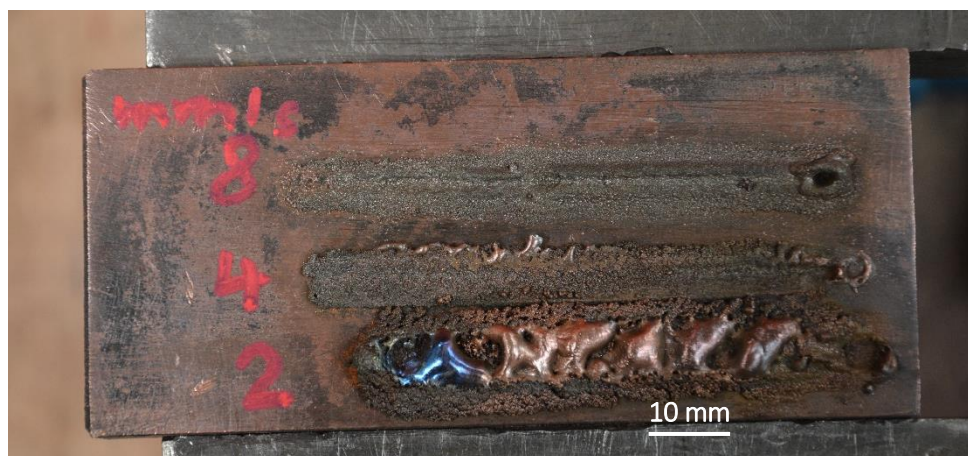
6.2.3. Vstupní parametry návaru bez rozkvyu se změnou rychlostí

V rámci druhé sady návarů byla navržena změna formy navařování bez zapojení pendlu (pozn. rozkvyu), pouze se změnami rychlosti viz tabulka 4. Snižováním rychlosti se bude zvyšovat kumulované teplo v místě návaru, tak snáze bude možné zvolit ideální rychlost.

Tabulka 4 – jednoduché návary bez rozkvyu

Vzorek	Proud [A]		Pulzace [Hz]	Prášky		Procesní plyny		Lineární rychlost [mm/s]	Rozkvy			Teplota	
	I _H	I _L	f	Podávání	Procenta W	Plazma	Ochrana + transport		šířka	rychlost	Pauza	T poč.	T kon.
2.4.	245	190	200	20	75 %	Ar	Ar+10 %H	8	0	0	0	100	650
2.5.	245	190	200		75 %			4				100	700
2.6.	245	190	200		75 %			2				100	750

6.2.4. Posouzení struktury jednotlivých návarů



Obrázek 20 - Návary bez rozkyvu (2.4, 2.5, 2.6)

Na obrázku 26 lze zřetelně vidět u návaru 2.4. a 2.5. nenařazený wolframový prášek, ale pouze „naprášený“. U návaru 2.6. při menší lineární rychlosti lze pozorovat navařenou střední část, lemovanou nenařazeným přídavným materiálem. Při rozdělení vzorku byl zřetelně vidět studený spoj, a návar 2.6. se oddělil od základního materiálu, který pod návarem nebyl téměř mechanicky porušen.

6.2.5. Vstupní parametry návaru krátkého rozkyvu

Jako další možnost byl zvolen návar s krátkým rozkyvem a pro porovnání se měnily parametry rychlosti. Ostatní parametry zůstaly konstantní viz tabulka 5.

Tabulka 5 – Návary s krátkým rozkyvem

Vzorek	Proud [A]		Pulzace [Hz]	Prášky		Procesní plyny		Lineární rychlost [mm/s]	Rozkyv			Teplota	
	I _H	I _L	f	Podávání	Procenta W	Plazma	Ochrana + transport		šířka	rychlost	Pauza	T poč.	T kon.
2.7.	245	190	200	20	75 %	Ar	Ar+10	2	3	30	0/0	100	650
2.8.	245	190	200		75 %		%H	4				100	700

6.2.6. Posouzení struktury jednotlivých návarů



Obrázek 21 - Návary s krátkým rozkvyem 30/3 (2.7, 2.8)

Na návarech 2.7. a 2.8. lze pozorovat stejný jev, jako u vzorku 2.6., kdy střední část je natavená a natavenou část lemuje nenařazený materiál. Po rozdělení vzorku laboratorní pilou byl opět základní materiál zcela nedotčen, z čehož vyplývá, že zadané parametry nejsou vhodné.

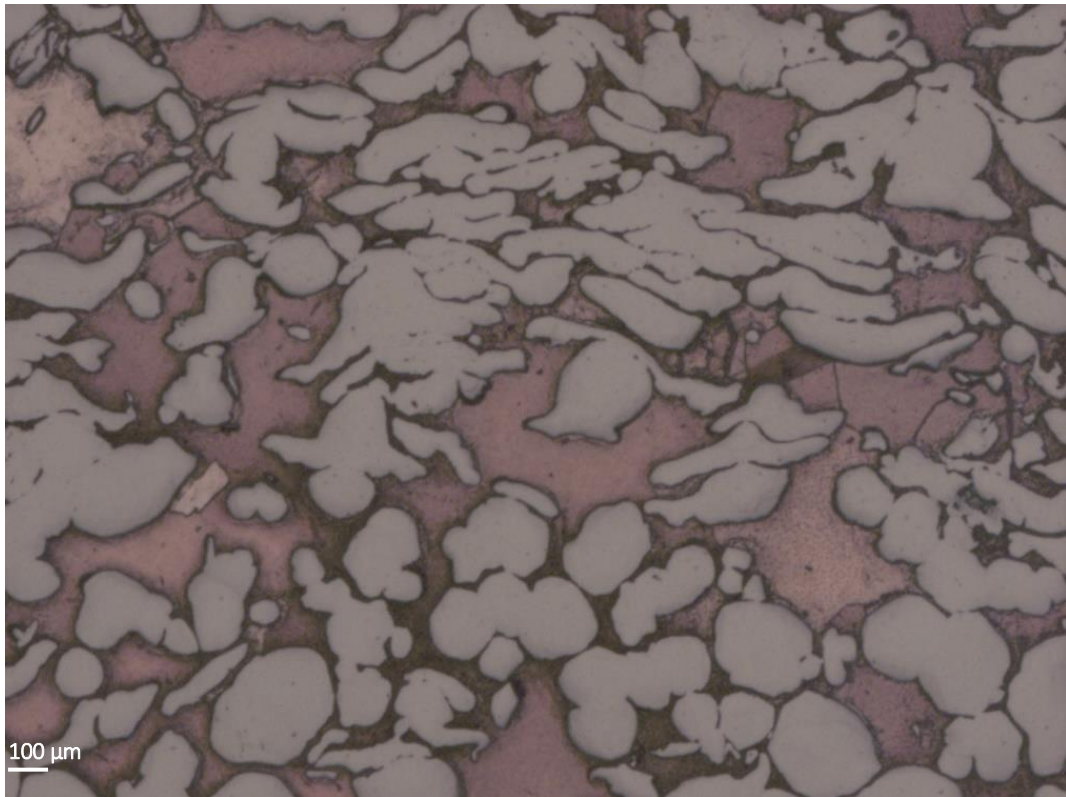
7. Mikrostruktura vybraných vzorků

Pro detailní posouzení vzorku 2.1. musela být prozkoumána mikrostruktura návaru pomocí metalografických výbrusů. Pro zabroušení nerovností byl použit brusný papír SiC 1200 a SiC 2000, dále pro vyleštění struktury byl použit leštící kotouč s diamantovou suspenzí (pozn. velikost zrna 1 μm). K naleptání struktury byl použit chlorid železitý. První kvalita leptání vzorků nebyla uspokojivá, tudíž se musel postup opakovat znovu. Po omytí musel být vzorek řádně osušen, aby nedošlo ke znečištění mikroskopu chloridem železitým.

7.1. Vzorek č. 2.1.

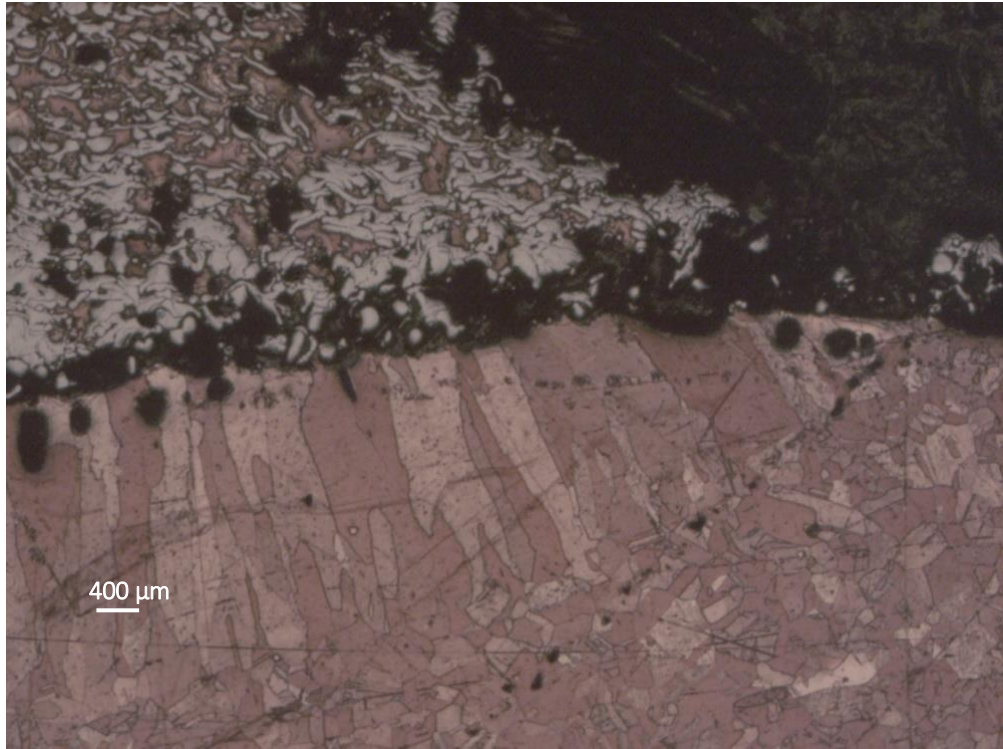
Na obrázku 28 lze vidět přehledně struktura přídavného materiálu. Je možné pozorovat stavbu wolframových zrn, která jsou v horní části obrázku 28 natavená, ale

v dolní části jsou zřídka natavena, nebo vůbec nenatavena. Dle obrazové analýzy se podařilo dostat do struktury přibližně 53 % wolframu.



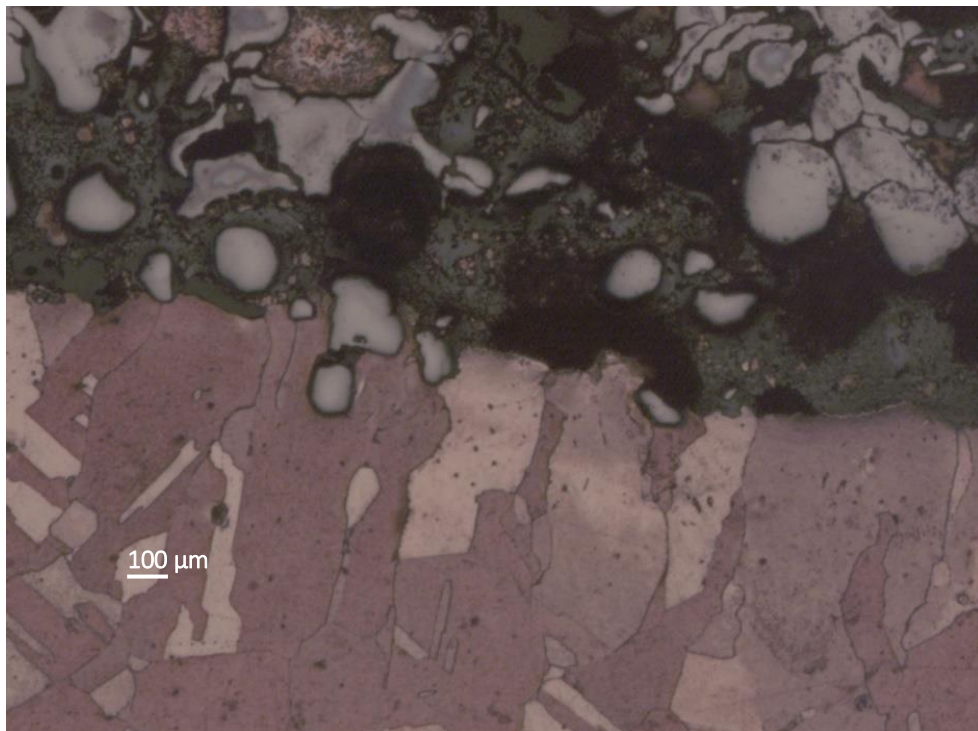
Obrázek 28 - Mikrostruktura návaru 2.1. – Přídavný materiál 53 %W (100x), zploštělá zrna wolframu – natavená, kulatá – nenatavená

Při pohledu na okraj návaru (viz obrázek 29), lze spatřit, že měděný základní materiál je tepelně ovlivněn, a jeho zrna zhrublo, ale nedošlo ke spojení základního materiálu a přídavného materiálu. Tmavé skvrny značí porézní strukturu způsobenou jednak vypařením měděného základního materiálu, ale také nedostatečnou teplotou pro natavení wolframového přídavného materiálu, a tudíž došlo k vzniku studeného spoje.



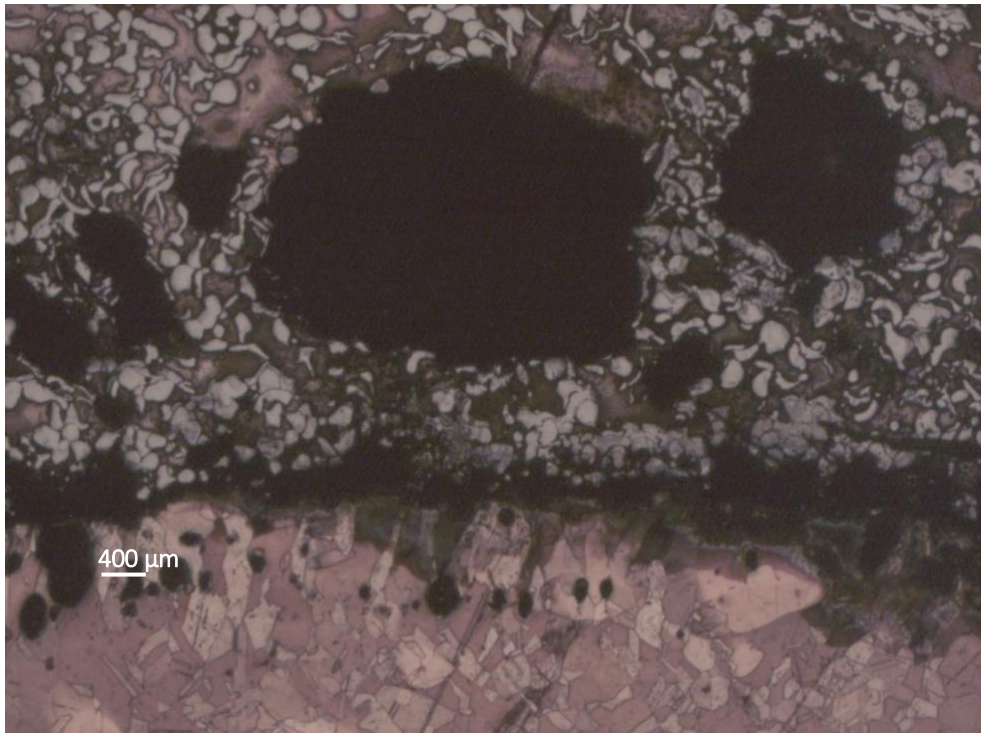
Obrázek 29 - Okraj návaru (25x)

Na obrázku 30 je vidět zateklý materiál pryskyřicového puku, který značí hluboký studený spoj. Wolframová zrna nejsou z větší části natavená a absence měďného přídatného materiálu značí jeho odpaření.



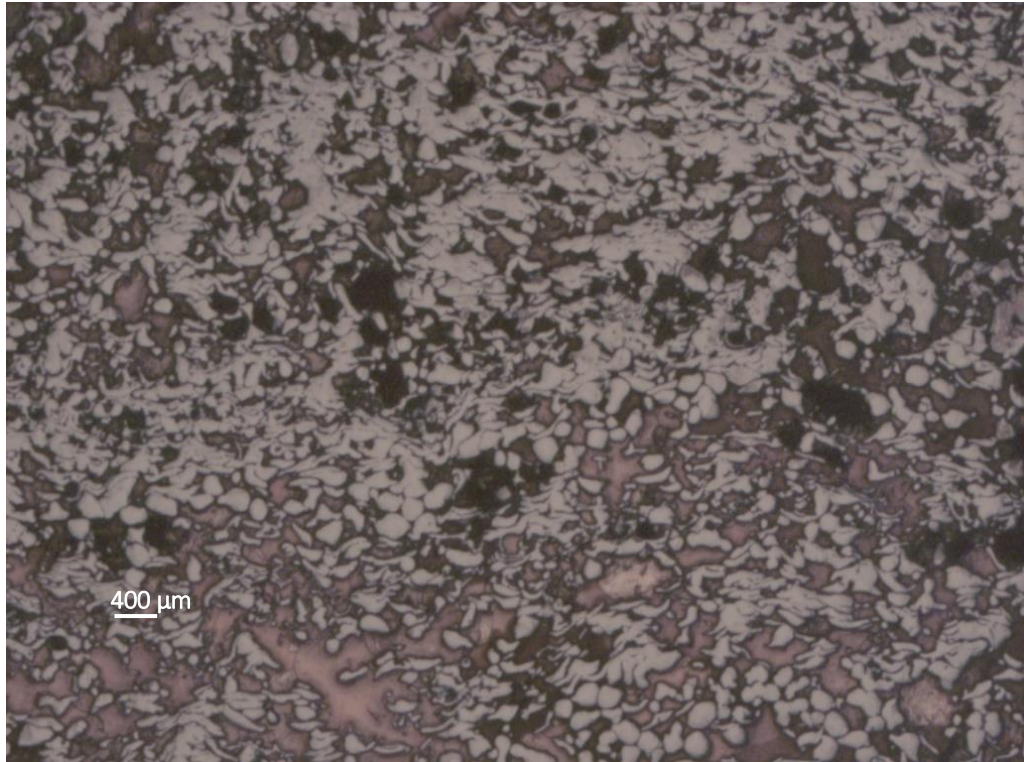
Obrázek 30 - Detail dutiny vyplněné pryskyřicí (100x)

Dále na obrázku 31 lze vidět tepelně ovlivněnou oblast základního materiálu, ale žádné propojení s přídatným materiálem na základě nenatavení wolframových zrn. Nenatavení přídatného materiálu vzniklo rychlým odvodem tepla do dalších částí měděného základního materiálu, tudíž nezbyl dostatek tepla na tavení. Značí to i malá tepelně ovlivněná oblast.



Obrázek 31 - Nespojitost základního materiálu a přídatného materiálu (25x)

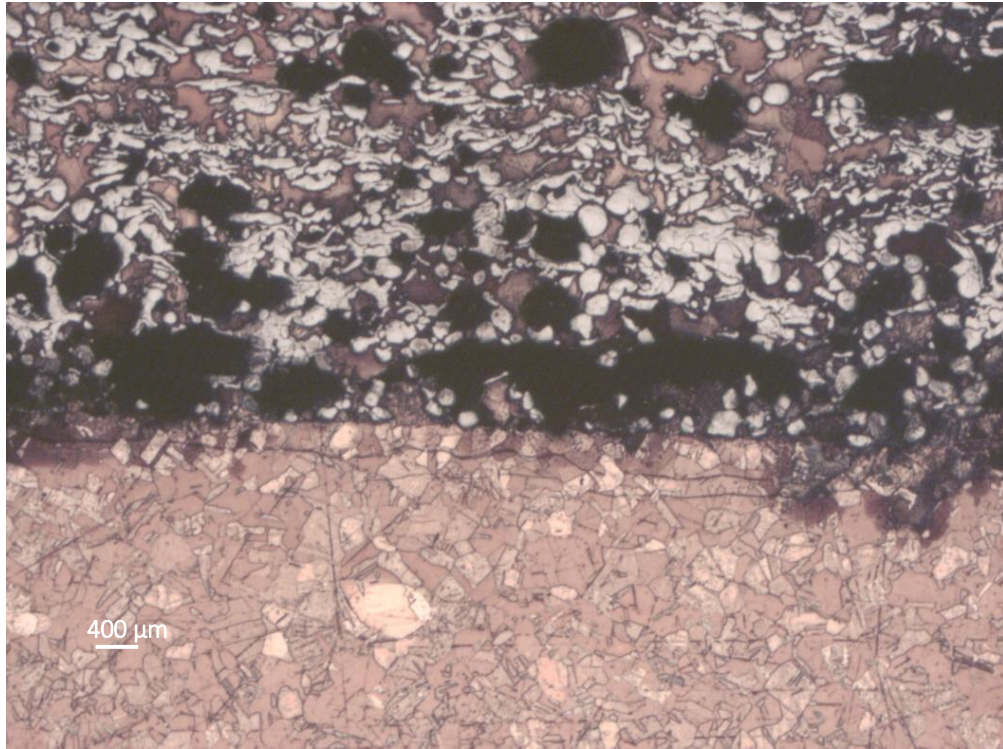
Obrázek 32 je vytvořen v horní části návaru. Wolframová zrna jsou více natavená, při absenci mědi okolo a tvoří tak stálou strukturu. Naopak v okolí pórů lze pozorovat často nenatavená zrna wolframového přídatného materiálu.



Obrázek 22 - Detail z horní části návaru (25x)

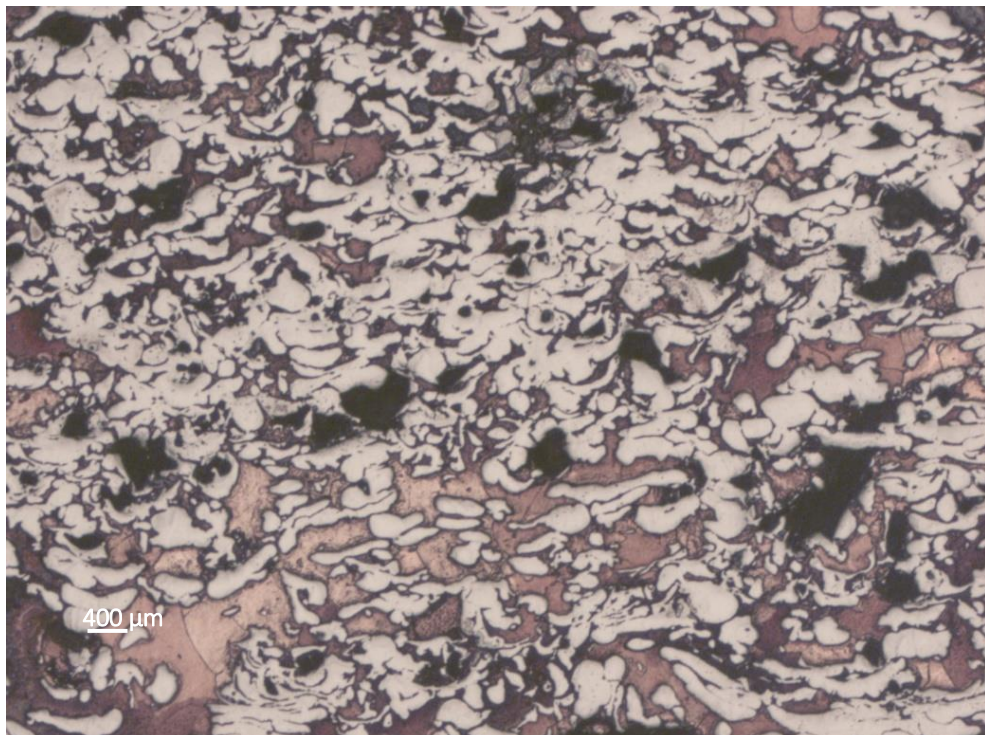
7.2. Vzorek 2.2.

Dalším vzorkem pro zkoumání mikrostruktury byl zvolen návar 2.2., u kterého se ukázalo, že základní materiál není z velké části nataven, jak lze vidět na obrázku 33. Tepelně ovlivněná oblast je velmi úzká, a lze tak konstatovat, že nedošlo k řádnému utvoření tepla pro utvoření svarové lázně.



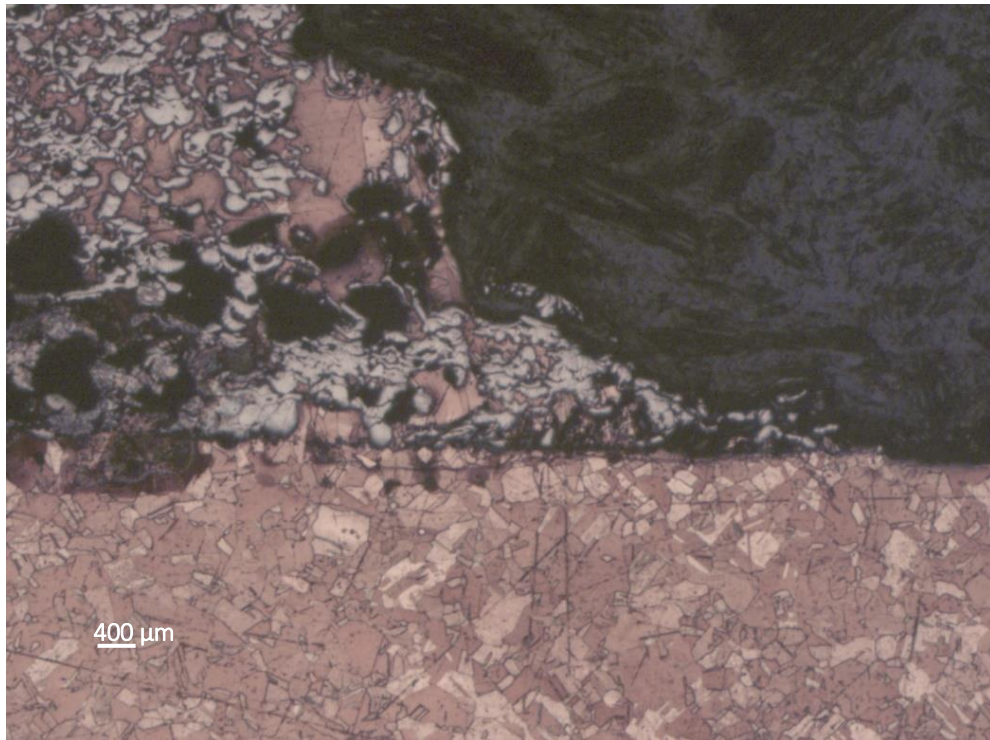
Obrázek 23 - Mikrostruktura vzorku 2.2. (25x)

Podobně jako u vzorku 2.1. bylo dosaženo u vzorku 2.2. přibližně 50 % wolframu. V okolí pórů se vyskytuje větší četnost nenatavených wolframových zrn než ve struktuře spojitě (viz obrázek 33 a 34).



Obrázek 24 - Horní část návaru 2.2. (25x)

Na obrázku 35 je zachycen okraj návaru, na kterém není vidět téměř žádná tepelně ovlivněná oblast. Mezi základním materiálem a přídavným materiálem je tak tvořen studený spoj. Lze pozorovat pár spojení mědi ze základního materiálu s mědí z přídavného materiálu, ale je to ojedinělý jev.



Obrázek 25 - Okraj vzorku 2.2. (25x)

Závěr

V teoretické části byla shrnuta dosavadní historie vysokoteplotních plazmových nádob typu tokamak a představen přehled používaných materiálů při jejich konstrukci. Jde o materiály, které musí mít konkrétní vlastnosti, jako jsou tepelná odolnost, malé znečišťování plazmatu a další. Tyto materiály připadají v úvahu pro další využití a z nich bylo pokračováno dále k wolframu s mědí, jelikož se jeví jako ideální materiály pro daný studovaný problém.

Dále byla provedena vyhledávací studie pro problematiku navařování měděného přídavného materiálu s příměsí na měděný základní materiál. Ukázala se značná problematičnost ve vysoké tepelné vodivosti měděného základního materiálu.

Na začátku experimentální části byl předpokládán bezproblémový průběh a práce s předpoklady, které vycházely z práce [18]. Bylo zjištěno, že navařování vysoce tepelně vodivých materiálů vyžaduje přesnější optimalizaci parametrů spojenou s vyššími teplotami přehřevu základního materiálu, aby přivedené teplo nemohlo být odvedeno dál do základního materiálu, nýbrž aby zůstalo v místě návaru. Další zjištěná optimalizace v navařování vysoce vodivých materiálů bylo využití plynů s vyšším obsahem H_2 pro větší vnesené teplo v místě navařování. Praktickou část značně komplikovalo podávací zařízení wolframového přídavného materiálu, ve kterém docházelo k výpadkům přísunu wolframového přídavného materiálu, a tudíž některé navařené vzorky nebylo možné použít k přesnému vyhodnocení parametrů navařování. K napravení by bylo nutné upravit skluznou plochu podávacího zařízení, nebo vyzkoušet jemnější wolframový přídavný materiál.

Metoda plazmové depozice wolframu ve směsi s mědí vykazuje potenciál pro využití ve vysokoteplotních zařízeních, ale je třeba podrobnější rozsáhlá studie pro vyřešení problematiky odvodu tepla z návaru dál do základního materiálu.

Použitá literatura

- [1] *ITER: iter.org* [online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.iter.org/>
- [2] ENTLER, Ing. Slavomír. *Základy fúzní energetiky II: Základní fyzika fúzních reaktorů* [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14538-zaklady-fuzni-energetiky-ii-zakladni-fyzika-fuznich-reaktoru>
- [3] Věda kolem nás: Historie výzkumu řízené termojaderné fúze v ČR. *Věda kolem nás: Historie výzkumu řízené termojaderné fúze v ČR* [online]. , 28 [cit. 2019-03-01]. ISSN 2464-6245. Dostupné z: http://www.vedakolemna.cz/miranda2/m2/sys/galerie-download/vkn_41web.pdf?0.2471155811526633
- [4] ARCIMOVIČ, Lev Andrejevič. *Řízené termonukleární reakce*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. ISBN 04-022-63.
- [5] ŘÍPA, Milan. *Řízená termojaderná fúze pro každého - 4U*. 4., rozš. a čís. vyd. Praha [i.e. Ostrava]: Vítkovice - výzkum a vývoj - technické aplikace, 2013. Svět energie. ISBN 978-80-260-4785-8.
- [6] DUFFY, D.M. Modeling plasma facing materials for fusion power. *Materials Today* [online]. 2009, **12**(11), 38-44 [cit. 2019-03-31]. DOI: 10.1016/S1369-7021(09)70297-4. ISSN 13697021. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369702109702974>
- [7] MLYNÁŘ, Jan. ITER: cesta k zvládnutí termonukleární fúze: Pokroky matematiky, fyziky a astronomie Vol. 49. In: *DML-CZ: Czech Digital Mathematics Library* [online]. 2004 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://dml.cz/handle/10338.dmlcz/141220>
- [8] *Věda kolem nás: Spoutání Slunce* [online]. Praha 5: Serifa, 2016, (50) [cit. 2019-05-25]. ISSN 2464-6245. Dostupné z: http://www.vedakolemna.cz/miranda2/export/sitesavcr/data.avcr.cz/academia/vedakolemna/sys/galerie-download/vkn_50_web.pdf

- [9] COMPASS Tokamak: Czech Academy of Sciences. *Institute of Plasma Physics of CAS* [online]. Prague [cit. 2019-07-31]. Dostupné z: http://www.ipp.cas.cz/vedecka_struktura_ufp/tokamak/tokamak_compass/
- [10] KULHÁNEK, Petr. *Úvod do teorie plazmatu*. 1. Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80-904582-2-2
- [11] KUBÍČEK, Ing. Jaroslav. *SPECIÁLNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ TLAKOVÉ SVAŘOVÁNÍ: Technologie II - ČÁST SVAŘOVÁNÍ*. 1. BRNO, 2006.
- [12] KLEVAROVÁ, Veronika. *Interakce tokamakového plazmatu s vybranými fúzními materiály* [online]. Praha, 2012 [cit. 2019-07-31]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/113014/>. Bakalářská práce. Matematicko-fyzikální fakulta. Vedoucí práce Doc. RNDr. Miloš Janeček, CSc.
- [13] MATĚJČEK, Jiří. *Materials for Fusion Application*. Czech Technical University in Prague, 2013. ISSN 1805-2363. Dostupné také z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/1761/1593>
- [14] BROŽEK, Vlastimil, Jiří MATĚJČEK a Karel NEUFUSS. *PLAZMOVÁ DEPOZICE WOLFRAMOVÝCH POVLAKŮ: METAL 2005* [online]. Hradec nad Moravicí: Ústav fyziky plazmatu AV ČR, 2005 [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2005/sbornik/papers/126.pdf>
- [15] AHLBORN MĚŘICÍ A REGULAČNÍ TECHNIKA S.R.O. *MĚŘICÍ ÚSTŘEDNA - ALMEMO 5690-2M: Popis zařízení*. 2009. Dostupné také z: <https://www.ahlborn.cz//out/pictures/wysiwigpro/ALMEMO%205690-2M-bc.pdf>
- [16] J. Matějček, P. Chráska, J. Linke, Thermal spray coatings for fusion applications – review, *Journal of Thermal Spray Technology* 16(2007) 64-83
- [17] *Princeton Scientific corp.: Metal Single Crystals* [online]. [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: <https://princetonscientific.com/materials/metal-single-crystals/>
- [18] ANTOŠ, Jakub. *Plazmové navařování materiálů pro první stěnu fúzních reaktorů*. Praha, 2018, 98 s. Diplomová práce. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Pavel Rohan, Ph.D., IWE.
- [19] *Svarservis group* [online]. [cit. 2019-07-24]. Dostupné z: <http://www.svarservis.cz/produkty/prislusenstvi/>

- [20] *Scheme of micro plasma arc welding* [online]. [cit. 2019-07-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-micro-plasma-arc-welding-1-shielding-nozzle-2-shielding-gas-3-water-cooled_fig1_293135229
- [21] *BUEHLER® Alpha, Beta & Vector™ GRINDER-POLISHERS AND POWER HEAD: Katalog*. Dostupné také z: www.labequip.com/stock/pictures/24711.pdf
- [22] *Struers Labotom - 3: Katalog*. Dostupné také z: http://www.priniotakis.gr/catalog2/manuals/Labotom-3_brochure_English.pdf
- [23] *Struers CitoPress - 1: Katalog*. Dostupné také z: http://www.priniotakis.gr/catalog2/manuals/CitoPress-1_brochure_English.pdf
- [24] KSK Česká Třebová: navařovací a svařovací stroje, kooperace, plazmové automaty, polohovadla, robotizace, svařovací materiály. *KSK CT* [online]. [cit. 2019-07-28]. Dostupné z: http://www.kskct.cz/?page_id=2506&lang=cs
- [25] *Metal powder and continuous cast rods: DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GMBH* [online]. In: . 2011 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Broschueren/051_DEW_Metallpulver_GB.pdf
- [26] *Royal Society of Chemistry: Periodic Table* [online]. 2019 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/74/tungsten>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - První tokamak: Ruský T1 v Kurčatově Institutu v Moskvě [1]	5
Obrázek 2 – Tokamak COMPASS na Akademii Věd ČR [9].....	6
Obrázek 3 - Srovnání teplot plazmatu [10]	8
Obrázek 4 - Rozdíl mezi konstrukcí tokamaku a stellarátoru [1].....	9
Obrázek 5 – Popis divertoru [5]	10
Obrázek 6 - Průřez komory tokamaku [9]	10
Obrázek 7 - Schéma hořáku [20] - keramická hubice (1), ochranný plyn (2), tryska (3), prášek s podávacím plynem (4), integrované vodní chlazení (5), plazmový plyn (6), wolframová elektroda (7), vysokofrekvenční a vysokonapěťový ionizátor (8), pomocný oblouk (9) a ke zdroji (10), spínač (11), základní materiál (12), plazmový paprsek (13) svarová lázeň (14).....	15
Obrázek 8 - Hořák a základní materiál před navařováním	19
Obrázek 9 - Navařovací automat KSK s.r.o. Česká Třebová [23]	20
Obrázek 10 - Měřicí ústředna Almemo 5690-2 [15]	21
Obrázek 11 - Zařízení k navařování termočlánků BT-2	21
Obrázek 12 - Laboratorní rozbrušovací pila Struers Labotom - 3	22
Obrázek 13 - Automatický montážní lis na metalografické vzorky	23
Obrázek 14 - Metalografický vzorek vytvořený pomocí Struers CitoPress - 1	23
Obrázek 15 - Metalografická leštička/bruska Buehler s přítlačnou hlavou Vector [21] ..	24
Obrázek 16 - Základní upnutí vzorku a termočlánků	25
Obrázek 17 - Návary 1.1, 1.2, 1.3.....	26
Obrázek 18 - Zpracování návarů	27
Obrázek 19 - Návar 1.1.....	27
Obrázek 20 - Vícevrstvý návar.....	28
Obrázek 21 - Vnitřní řez vícevrstvého návaru	29
Obrázek 22 - Návar 2.1.....	31
Obrázek 23 - Vnitřní struktura návaru 2.1.....	31
Obrázek 24 - Návar 2.2.....	32
Obrázek 25 - Vnitřní struktura návaru 2.2.....	33
Obrázek 26 - Návary bez rozkvyvu (2.4, 2.5, 2.6)	34
Obrázek 27 - Návary s krátkým rozkvyvem 30/3 (2.7, 2.8)	35
Obrázek 28 - Mikrostruktura návaru 2.1. – Přídavný materiál 53 %W (100x), zploštělá zrna wolframu – natavená, kulatá – nenatavená.....	36
Obrázek 29 - Okraj návaru (25x)	37
Obrázek 30 - Detail dutiny vyplněné pryskyřicí (100x)	37
Obrázek 31 - Nespojitost základního materiálu a přídavného materiálu (25x).....	38
Obrázek 32 - Detail z horní části návaru (25x)	39
Obrázek 33 - Mikrostruktura vzorku 2.2. (25x).....	40
Obrázek 34 - Horní část návaru 2.2. (25x).....	40
Obrázek 35 - Okraj vzorku 2.2. (25x)	41