

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie



NAVAŘOVÁNÍ RYCHLOŘEZNÝCH  
OCELÍ PLAZMATEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Autor:** Monika Boxanová

**Studijní obor:** Teoretický základ strojírenského inženýrství

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

Praha 2017



## Anotační list

Jméno autora:	Monika Boxanová
Název BP:	Navařování rychlořezných ocelí plazmatem
Anglický název:	High speed steel surfacing by PTA
Rok	2017
Obor studia	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí	Ing. Pavel Rohan, Ph.D., EWE
Konzultant	-
Bibliografické údaje:	Počet stran: 58 Počet obrázků: 27 Počet tabulek: 5 Počet příloh: -
Klíčová slova	Rychlořezná ocel, navařování plazmatem, tvrdost
Keywords:	High-speed steel, plasma transferred arc surfacing, hardfacing, PTA, pulsed – PTA, hardness
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá problematikou rychlořezných ocelí z hlediska navařování plazmatem. V teoretické části je proveden rozbor technologie navařování a rychlořezných ocelí. Experimentální část se zabývá určením vlastností výsledných návarů v závislosti na parametrech navařování.
Abstract:	The bachelor thesis inquiries into the issues of high-speed steel considering Plasma Transferred Arc. High-speed steels and a principle of Plasma Transferred Arc is described in detail. Experimental part deals determining the qualities of final cladding deposit depending on the parameters of cladding.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma Navařování rychlořezných ocelí plazmatem jsem vypracovala samostatně s využitím uvedené odborné literatury a pramenů a na základě konzultací s vedoucím práce.

V Praze dne 9. 5. 2017

.....  
podpis

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala panu Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D., EWE za odborné vedení, cenné připomínky a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Dále děkuji firmě KSK s.r.o. za možnost pracovat na moderním zařízení a své rodině za podporu po celou dobu studia.

## Obsah

Seznam obrázků .....	7
Seznam tabulek .....	8
Seznam zkratk a symbolů .....	9
Úvod .....	10
1 Proces navařování .....	11
1.1 Výhody a nevýhody navařování.....	12
1.2 Přídavné materiály pro navařování.....	13
1.3 Typy návarů dle základního materiálu.....	16
2 Technologie navařování.....	20
2.1 Navařování plamenem.....	20
2.2 Navařování laserem.....	21
2.3 Navařování elektrickým obloukem.....	23
2.4 Další metody navařování.....	26
3 Navařování plazmatem.....	28
3.1 Plazma.....	29
3.2 Plazmové plyny .....	30
3.3 Typy plazmových oblouků.....	31
3.4 Plazmový hořák.....	31
3.5 Základní materiály pro navařování plazmatem.....	32
3.6 Výhody a nevýhody navařování plazmatem.....	33
4 Rychlořezná ocel – High Speed Steel .....	34
4.1 Krystalizace rychlořezných ocelí.....	36
4.2 Ovlivňování struktury rychlořezných ocelí .....	36
4.3 Vliv legujících prvků.....	39

4.4	Výroba rychlořezné oceli.....	40
5	Experimentální část.....	42
5.1	Průběh experimentu .....	42
5.2	Navařovací automat .....	46
5.3	Přídavný materiál.....	47
5.4	Měření mikrotvrdosti .....	47
6	Výsledky a diskuze experimentální části.....	48
6.1	Výsledky a diskuze první a druhé fáze experimentu .....	48
6.2	Výsledky a diskuze třetí fáze experimentu .....	52
	Závěr .....	54
	Bibliografie.....	55

## Seznam obrázků

Obrázek 1. Navařování kladky bagru elektrodou [36].....	11
Obrázek 2. Diagram chemického složení v závislosti na odolnosti přídavného materiálu [37].....	13
Obrázek 3. Řezy plněnými elektrodami [39].....	15
Obrázek 4. ARA diagram pro ocel HSS23.....	17
Obrázek 5. Navařování plamenem doleva.....	20
Obrázek 6. Navařování plamenem doprava.....	21
Obrázek 7. Navařování laserem [34].....	22
Obrázek 8. Oblast elektrického oblouku.....	23
Obrázek 9. Navařování odtavující se elektrodou.....	25
Obrázek 10. Navařování pod tavidlem [35].....	26
Obrázek 11. Hoření nepřeneseného oblouku a oblouku u metody TIG.....	28
Obrázek 12. Plazmový paprsek [38].....	29
Obrázek 13. Schéma plazmového hořáku.....	32
Obrázek 14. Ukázka návarů metodou PTA [Krška Zdeněk, KSK s.r.o.].....	33
Obrázek 15. Tvrdost nástrojových materiálů v závislosti na pracovní teplotě.....	35
Obrázek 16. Ohřev rychlořezné oceli na kalicí teplotu [24].....	38
Obrázek 17. Popouštěcí vrstevnicový diagram rychlořezné oceli.....	39
Obrázek 18. Schéma zapojení termočlánků.....	42
Obrázek 19. Upnutí vzorku při chlazení ventilátorem.....	43
Obrázek 20. Schéma zapojení termočlánků.....	44
Obrázek 21. Navařovací automat PPC 250 R6.....	46
Obrázek 22. Závislost podpovrchové mikrotvrdosti na frekvenci proudu.....	49
Obrázek 23. Průběh teploty při frekvenci 200 Hz.....	49
Obrázek 24. Mikrostruktura návaru vzorku č. 1 (0 Hz).....	50
Obrázek 25. Mikrostruktura návaru vzorku č. 3 (76,9 Hz).....	51
Obrázek 26. Mikrostruktura návaru vzorku č. 6 (200Hz).....	51
Obrázek 27. Průběh mikrotvrdosti navařených vzorků [31].....	52



## Seznam tabulek

Tabulka 1. Rozdělení a označení nástrojových ocelí.....	34
Tabulka 2. Chemické složení RO používaných v České republice.....	36
Tabulka 3. Frekvence jednotlivých vzorků.....	44
Tabulka 4. Značení vzorků.....	45
Tabulka 5. Chemické složení prášku HSS23.....	47

## Seznam zkratek a symbolů

PTA – Navařování plazmatem (plasma transferred arc)

HSS – Rychlořezná ocel (high – speed steel)

RO – Rychlořezná ocel

HRC – tvrdost dle Rockwella

HV – tvrdost dle Vickerse

HVA – tvrdost dle Brinella

MIG – svařování s odtavující se elektrodou v inertním plynu

MAG – svařování s odtavující se elektrodou v aktivním plynu

TIG – svařování s neodtavující se wolframovou elektrodou

## Úvod

Technologie navařování kovů se v průběhu posledních desetiletí stala značně rozšířenou, a to zejména kvůli neustále se zvyšujícím požadavkům na životnost a spolehlivost součástí. Metoda navařování plazmatem PTA (plasma transferred arc) je určena především pro nanášení odolných povlaků nebo vytváření vrstev, které mají zcela odlišné vlastnosti než základní materiál. Je užívána především pro zvyšování životnosti namáhaných dílů a opravy a renovace již opotřebovaných součástí (viz obrázek 1). Proto je tato metoda hojně využívána ve výrobě, opravárenství a údržbě. Rychlořezné oceli jsou slitiny železa s obsahem legujících prvků do 20 %. Jsou určeny pro výrobu vysoce namáhaných řezných nástrojů, jako jsou pily, soustružnické či hoblovací nože, frézy, vrtáky a další. Mezi jejich významné vlastnosti patří vysoká tvrdost, ale i houževnatost a odolnost proti opotřebování při zvýšených teplotách. Moderní výroba rychlořezné ocele započala v druhé polovině 19. století, existují však důkazy o tom, že ocele podobného charakteru vznikaly i desítky let př. n. l. v Číně a Indii. Uvedené vlastnosti těchto typů ocelí byly však vesměs náhodné a byly důsledkem charakteru tamějších rud. V roce 1910 byla představena první slitina, která byla formálně klasifikována jako rychlořezná ocel, a to slitina s označením T1. [1] [2]

Navařování rychlořezných ocelí poskytuje novou možnost výroby nástrojů a jejich případné opravy. Přesto není tato technologie v technické praxi příliš využívána. Použití pulzního proudu je jednou z dalších, doposud málo využívaných, možností modifikace struktury návaru a zvýšení užitých vlastností navařených povlaků. [3]

# 1 Proces navařování

*„Navařování kovů je obdoba svařování, kdy se v omezeném prostoru dané součásti nanáší přídavný materiál za účelem doplnění nebo zvětšení objemu součásti s cílem dosáhnout ochrany proti korozi, nebo zvýšení odolnosti proti opotřebení, případně z jiných důvodů.“ [4]*

Technologie navařování je charakterizována jako metalurgický proces, při kterém dochází k natavení základního i přídavného materiálu (návarového kovu), tvoří se tavná lázeň a na povrchu základního materiálu se po ochlazení vytváří povlak s požadovanými vlastnostmi. K natavení základního a přídavného materiálu dochází působením vnějšího zdroje tepla, jako je plamen hořlavého plynu ve směsi s kyslíkem, elektrický oblouk, laser, obloukový výboj a v neposlední řadě plazma. [5]

Aby bylo možné použít již první, případně druhou vrstvu navařeného povlaku, je nutné zmenšit hloubku závaru. Zmenšením hloubky závaru se snižuje podíl základního materiálu v návarovém kovu, což pozitivně ovlivňuje kvalitu výsledného navařeného povlaku. Nezanedbatelné je také nižší tepelné ovlivnění základního materiálu při použití jedné vrstvy návaru a z toho vyplývající nižší deformace a hladina zbytkové napjatosti v navařené součásti. [5]



*Obrázek 1. Navařování kladky bagru elektrodou [36]*

Pro úspěšné navaření je nutné dodržet dvě základní kritéria. První kritérium požaduje, aby teplota tavení přídavného materiálu byla stejná, nejlépe nižší, než je teplota tavení základního materiálu. Pokud je teplota tavení přídavného materiálu vyšší,

než je materiálu základního, navařování je velmi problematické, v některých případech až nemožné. Druhým kritériem je specifická hmotnost základního a přídavného materiálu. Pokud má základní materiál nižší specifickou hmotnost, může nastat situace, že se částice základního materiálu dostanou do struktury návaru a negativně ovlivní vlastnosti výsledné funkční vrstvy. [5]

V průmyslu se proces navařování využívá jako součást výrobní technologie, při údržbě, opravách, pro zvýšení životnosti funkční plochy a jako prostá obnova poškozené části. Za účelem prodloužení životnosti součásti se návarový kov volí zpravidla kvalitnější, než je základní materiál renovované součásti. Je však nutné nejprve správně určit druh opotřebení, vliv pracovních podmínek a prostředí a na základě této analýzy zvolit nejvhodnější technologii navařování, popřípadě určit, zda je renovace z ekonomického a časového hlediska vhodná. Dle použitého zdroje tepla potřebného k provedení procesu se technologie navařování v průmyslové praxi rozděluje například na navařování plamenem, elektrickým obloukem, laserem, plazmatem aj. [5] [6]

## 1.1 Výhody a nevýhody navařování

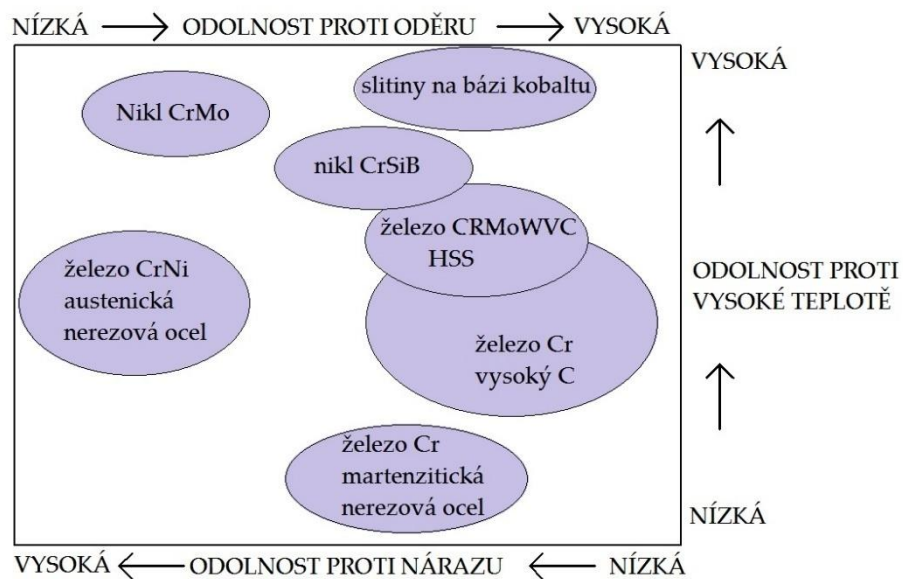
Jedna z hlavních výhod technologie navařování je metalurgické spojení vznikající mezi návarem a základním materiálem. Pomocí vysoce výkonných zdrojů tepla a s použitím vhodných druhů návarových kovů lze dosáhnout vysoké produktivity, využitelné především v sériové výrobě. Další výhodou je možnost automatizace procesu. Tvrdost odpovídá minimálně tvrdosti základního materiálu, ve většině případů je zpravidla vyšší. Ruční způsoby navařování jsou nenáročné na pořizovací náklady i samotné provedení návaru. Vyznačují se však nízkou produktivitou a opakovatelností, proto jsou využívány především v kusové výrobě nebo v opravárenství. [5]

K nevýhodám navařovacího procesu řadíme značné tepelné ovlivnění základního materiálu, ve kterém dochází ke změně struktury. Další nevýhodou je, že návarová materiál je vždy, více či méně, kontaminován základním materiálem. Pro dosažení konečné drsnosti a výsledné rozměrové přesnosti je nutno navařený povlak po ukončení procesu navařování obrábět. Při použití speciálních technologií je proces navařování

velmi energeticky i ekonomicky náročný, vyžaduje vyšší nároky na schopnosti operátorů a nákladnější zařízení. [5] [6]

## 1.2 Přídavné materiály pro navařování

Přídavné materiály pro navařování lze dělit dle chemického složení, dle způsobu provedení návaru nebo dle zdroje tepla použitého k jejich nanášení (viz obrázek 2). Přídavné materiály jsou zpravidla založeny na principu matrice s určitým obsahem zpevňující fáze.



Obrázek 2. Diagram chemického složení v závislosti na odolnosti přídavného materiálu [37]

Jako kritérium pro rozdělení dle chemického složení je zpravidla považován obsah nejvíce zastoupeného prvku (tj. matrice). V technické praxi jsou nejčastěji využívány návarové materiály s matricí kobaltovou, niklovou a železnou. Používaným zdrojem tepla k nanášení přídavných materiálů může být elektrický oblouk, plamen hořlavého plynu ve směsi s kyslíkem, plasma, laser nebo exotermická reakce. [5]

### 1.2.1 Kobaltová matrice

Využívá se především pro navařování plazmatem a laserem. Pro navařování plazmatem se velikost částic přídavného materiálu pohybuje v rozmezí 53–150  $\mu\text{m}$ . Kobaltová matrice zajišťuje odolnost proti oděru, vzniku trhlin, korozi a erozi

za vysokých teplot, proto jsou přídatné materiály s kobaltovou maticí vhodné pro aplikace v energetice a pro součásti, u kterých dochází k opotřebení za zvýšených teplot. Dnes jsou klasickým zastoupením těchto slitin materiály typu Stellite (například Stellite 1, obsahující 57 % C, 28 – 38 % Cr, 11 -13 % W, 2 – 3 % C). Tvrdost se pohybuje okolo 41 HRC. [7] [8]

### 1.2.2 Niklová matrice

Niklové matrice jsou, stejně jako ostatní slitiny, dodávány ve formě prášku, drátů, tyčí nebo elektrod. Jsou odolné proti opotřebení, otěru, oxidaci, korozi a mají dobré vlastnosti při vysokých teplotách. Používají se například v oblasti sklářského průmyslu. Nanášejí se na lící části forem, kde zamezují jejich opotřebení a zároveň nepoškozují barevný odstín skloviny. Vysoká tvrdost je zachována až do teplot 600 °C. [9]

### 1.2.3 Železná matrice

Materiály s železnou maticí jsou používány především díky výhodnější ceně v porovnání s materiály s kobaltovou maticí. Používají se u součástí, u kterých je nebezpečí účinku ionizujícího záření, například v jaderné energetice. Dle nabídky firmy Deutsche Edelstahlwerke jsou železné matrice pro metodu PTA vhodné a jsou odolné především proti korozi a opotřebení. [10]

Dle způsobu provedení a tvaru lze přídatné materiály pro navařování rozdělit do následujících několika skupin:

### 1.2.4 Dráty

Mají výhradně kruhový průřez o průměru 0,5 do 8 mm. Vyrábějí se tažením a válcováním a dle požadavků mohou být dodány s povrchovou úpravou. Používají se především u metod navařování elektrickým obloukem (MIG/MAG, TIG). [5]

### 1.2.5 Tyčinky

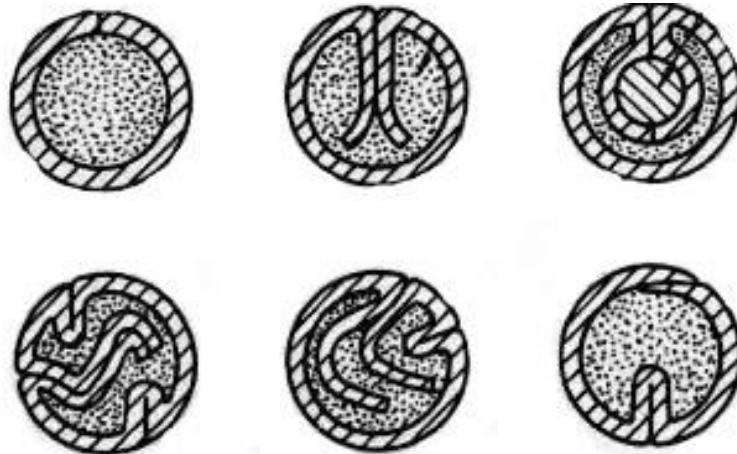
Vyrábějí se tažením, odléváním nebo jako kompozity. Tyčinky z tažených drátů jsou povrchově upravovány. Litím do pískových forem nebo vakuovým nasáváním

do speciálních forem se vyrábí tyčinky ze slitinových materiálů. Kompozitní tyčinky jsou vyráběny ve formách, do kterých je dávkován zrnitý materiál, který je následně zalit slitinovým kovem. Litinové tyčinky jsou používány pro navařování opotřebovaných nebo poškozených součástí ze šedé litiny. [5]

### 1.2.6 Obalované a plněné elektrody

U obalovaných elektrod je plné jádro opatřené speciálním obalem. Obalová hmota má funkci stabilizační, ochranou, struskotvornou a legující a zabezpečuje tak kvalitnější výsledný návar. V opravárenské praxi a při renovacích jsou obalované elektrody nejčastěji používaným navařovacím materiálem. [5]

Plněné elektrody (viz obrázek 3) se používají ve formě drátu a mohou mít různé složení náplně s funkcemi ionizačními, dezoxidačním, legujícími, struskotvornými a dalšími. Kovový pásek se s požadovanou náplní sbalí do požadovaného kruhového průřezu od 1 do 4 mm v průměru. Výhodou plněných elektrod je kompaktnost a zvýšená odolnost proti vlhku. [5]



Obrázek 3. Řezy plněnými elektrodami [39]

### 1.2.7 Pásy a plněné pásy

Pásy a plněné pásy se vyrábějí válcováním kovů a slitin v šířkách od 20 do 60 mm o tloušťce od 0,2 do 0,8 mm. Sbalením ocelového pásku s legujícími složkami v práškové nebo zrnité formě vzniká plněná páska. Pásy a plněné pásy se používají pro navařování pod tavidlem, případně pro elektrostruskové navařování. [5]



### 1.2.8 Prášky

Prášky představují v poslední době velmi využívaný přídavný materiál například v automobilovém průmyslu (navařování ventilů) nebo v energetice ve výrobě armatur (plazmové navařování). Vyrábějí se tavením slitiny v indukčních pecích a následným rozstříkáním taveniny pod vysokým tlakem do dusíku nebo argonu v rozprašovací věži. Výsledné jemné kapičky kovu spadají do zásobníků a jsou separovány dle požadovaných rozměrů. [5] [10]

## 1.3 Typy návarů dle základního materiálu

Při navařování je nutné brát ohled i na vlastnosti základního materiálu. Jeho teplota tání musí být rovná nebo vyšší než teplota tání navařovaného materiálu, důležitá je i jeho hmotnost, rozměry a tvar součásti nebo výrobku. V praxi se navařování nejčastěji provádí na základní materiály jako je ocel, litina, měď, nikl a další. Navařování na ostatní kovy a slitiny je velmi ojedinělé a používá se jen ve specifických situacích. [5]

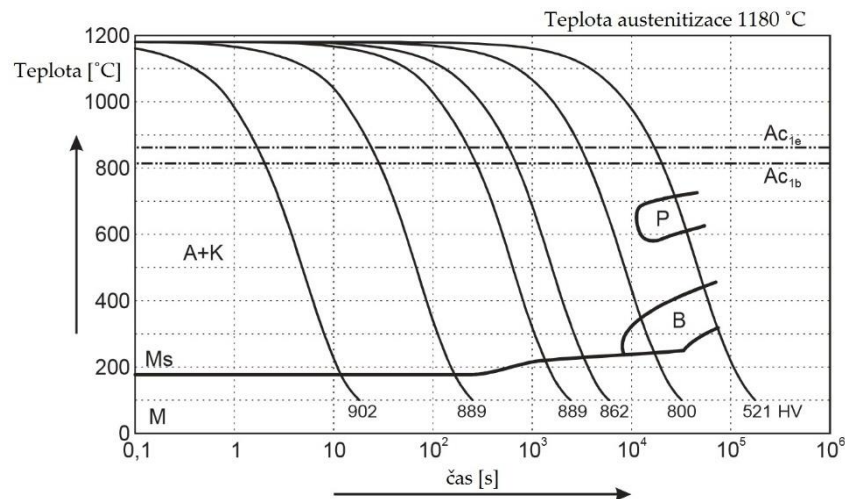
### 1.3.1 Ocel

Při volbě způsobu navařování musí být zohledněna jakost a zpracování oceli. Používají se ocele tvářené i lité. Zpravidla bez problému probíhá navařování na nízkouhlíkové a nízkolegované ocele. Pokud však mají oceli vyšší pevnost, je zpravidla nutné součást před navařováním předehřát. Teplota předehřevu záleží na pevnosti, tvrdosti, hmotnosti a tvarové členitosti dané součásti. K jednoduchému určení teploty předehřevu slouží výpočet ekvivalentu uhlíku [ČSN ISO 1011-2] (viz vzorec č. 1). Pro výpočet ekvivalentu uhlíku je však nutno znát chemické složení dané ocele

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} [\%]. \quad (1)$$

Při ekvivalentu > 0,41 % je nutné základní materiál předehřívát. [5]

Jako další pomůcku lze použít diagramy anizotermického rozpadu austenitu (ARA diagram, obrázek 4) pro určitou navařovanou ocel. Z ARA diagramu pro rychlořeznou ocel HSS23, která je použita v experimentální části, lze odečíst nutnost udržení součásti pod teplotou  $M_s$  (martenzit start), tj. přibližně nad  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , proto, aby nedošlo k zakalení návarového materiálu. [11]



Obrázek 4. ARA diagram pro ocel HSS23 [11]

Teplotu předehřevu lze také orientačně odečíst z jednoduchého vzorce č. 2.

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 539 - 423 C - 34,4 Mn - 17,7 Ni - 12,1 Cr - 7,5 Mo \quad (2)$$

Pokud byla součást s vyšším obsahem uhlíku zpracována kalením, musí se předehřát nad teplotu  $M_s$  v každém případě. Pouze pokud se jedná o úzkou plochu nebo hranu, je možno volit předehřev nižší nebo nepředehřívát vůbec, ohřev je proveden teplem vzniklým při samotném procesu navařování. Pokud má být navařen povrch součásti, který byl zpracován cementováním nebo nitridací (chemicko-tepelná úprava), chromováním, niklováním nebo měděním (galvanické pokování) nebo metalizací (nastříkaná vrstva), musí se takto zpracovaná povrchová vrstva zcela odstranit broušením. Navařování na korozivzdorné a žáruvzdorné oceli je používáno jen ve zvláštních případech z důvodu náchylnosti ke vzniku martenzitu. [5]

### 1.3.2 Litiny

Litiny jsou slitiny železa a uhlíku s obsahem uhlíku větším než 2 hm.%. Uhlík v nich převyšuje mezní hodnotu rozpustnosti uhlíku v austenitu, a proto litiny vyžadují při navařování specifické zacházení. V praxi se nejčastěji litiny navařují oxy-acetylenovým plamenem a elektrickým obloukem obalovanou elektrodou, v některých případech i metodami TIG a MAG. Navařování elektrickým obloukem vyžaduje rozsáhlé zkušenosti svářeče a technologa, který vypracovává technologický postup. Při navařování plamenem se volí přechodová podkladová vrstva (např. na bázi Ni) a vhodná slitinová tyčinka. [5]

Před samotným navařováním litin je vhodné povrchy litiny vykartáčovat a otryskat korundem, povrch litiny se tak částečně zbaví volného grafitu. Vždy musí být zvolena správná teplota předehřevu, která je závislá na tvaru, hmotnosti a konfiguraci součásti.

### 1.3.3 Měď a její slitiny

V praxi se na měď navařuje opět měď, a to při opotřebením měděné součásti. Jedná se o krystalizátory, elektrovodné lišty a další kontaktní součásti. Kvůli vysoké tepelné vodivosti mědi je nutno navařovanou součást předehřívát. Teplota předehřevu je závislá především na hmotnosti a tvaru navařované součásti a způsobu navařování. [5]

Jako další ze způsobu obnovy opotřebené měděné součásti je nanosové pájení nebo spojení nového měděného dílu se součástí pájením. V obou případech se ale sníží tepelná a elektrická vodivost mědi. Tomu lze zabránit použitím stříbrné pájky. Navařování mosazí se provádí většinou při opravárenských činnostech. Navařuje se na součásti z jednofázové i dvoufázové mosazi. Navařování bronzem probíhá plamenovými nebo obloukovými technologiemi (obalená elektroda, MIG, TIG). Častou aplikací navařování bronzu jsou kluzná ložiska, ozubená kola nebo lodní šrouby. Je nutné dodržet dvě základní podmínky, a to dokonale očistit povrch součásti a součást předehřát na teplotu v rozmezí 150 až 200 °C. [5]

### 1.3.4 Hliník a jeho slitiny

Hliník má dobrou tepelnou a elektrickou vodivost, nízkou měrnou hmotnost 2,7 kg/dm<sup>3</sup> a nízkou teplotu tavení 658 °C. S křemíkem, hořčíkem, manganem, zinkem

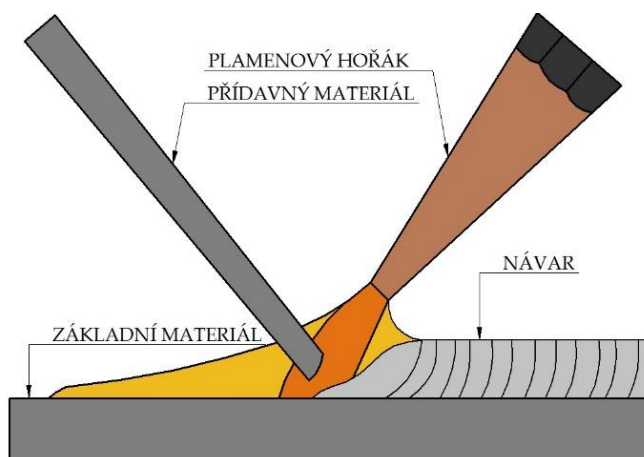
a mědí vytváří nízkolegované slitiny, které po vytvrzení dosahují vysoké pevnosti v tahu. Navařování na povrch hliníku a jeho slitin se téměř v technické praxi nepoužívá z důvodu, protože navařený hliník nedosahuje pevnosti základního materiálu. V opravárenské praxi se navařují především poškozené odlitky. Pro kvalitní návar musí být dokonale mechanicky rozrušen oxidický film. [5]

## 2 Technologie navařování

Volba technologie navařování je z hlediska kvality výroby důležitá a jsou na ni kladeny vysoké nároky. Při zvolení nevhodného technologického postupu může dojít k znehodnocení součásti. Vhodná volba technologie má vliv také na dobu a efektivitu výroby, proto je nezbytné vhodně zvolit technologii navařování a správně navařování provést. Vlastní navařovací procesy lze rozdělit například dle použitého zdroje tepla potřebného k natavení základního i přídavného materiálu. Jedná se především o navařování plamenem, laserem, plazmatem aj.

### 2.1 Navařování plamenem

Navařování plamenem je technologie snadno proveditelná i v málo vybavených výrobních provozech. Je také ekonomicky nenáročná, a proto se řadí mezi nejrozšířenější technologie navařování.

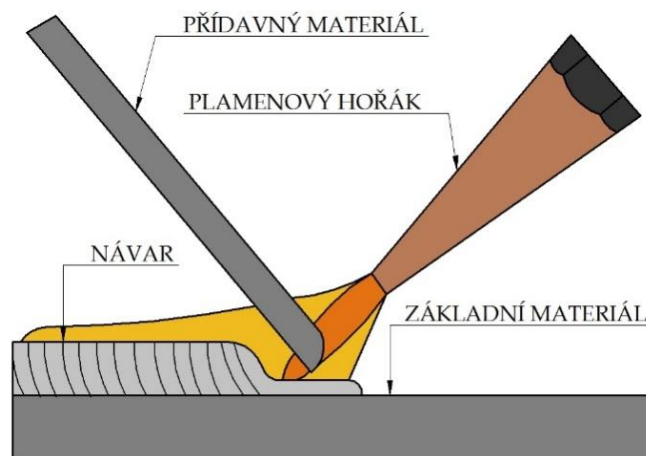


Obrázek 5. Navařování plamenem doleva

Při procesu navařování dochází působením tepla ke tvarovým deformacím materiálu a objemovým změnám, proto slitina návarového kovu není nanášena na výrobek obrobek na výsledný požadovaný rozměr. Je vhodné zařadit tento proces ihned pro ohrubování součásti. Jako návarový kov se nejčastěji používají slitiny kovů s vysokou tvrdostí, které se dle druhu a množství legujících prvků dělí na následující skupiny: slitiny s obsahem neželezných prvků pod 20 %, slitiny s obsahem legujících prvků nad 20 %, karbidy a neželezné návarové slitiny. Pro správné provedení metody navařování je důležité dodržet základní zásady a pracovní postupy, například: plochy

určené k navařování musí být dokonale hladké a čisté. Hrubý povrch může mít za následek zbytečné lokální natavení základního materiálu do tavné lázně návarového kovu. Zaoblením ostrých hran a jemným obrobením funkčních ploch lze tomuto nežádoucímu natavení předcházet. [5]

Pro navařování plamenem je nejčastěji využíván kyslíko-acetylenový plamen. Podle poměru  $C_2H_2$  a  $O_2$  lze rozdělit hoření na tři druhy plamenů, a to plamen neutrální, oxidační a redukční. Nejvhodnější je použít měkký redukční plamen, jelikož zaručuje rovnoměrné přehřátí základního materiálu a má nízkou výstupní rychlost (do 90 m/s). Množství tepla vyvíjeného ze základního materiálu je minimální, proto je tento plamen také hospodárnější než plamen oxidační. Navařování je možno vést směrem doleva (železné a niklové slitiny) (viz obrázek 5) a směrem doprava (viz obrázek 6). [12]



Obrázek 6. Navařování plamenem doprava

Proces navařování plamenem je rychlá a jednoduchá technologie. Je však zpravidla nutný vysoký přehřev materiálu, což je často energeticky i provozně náročné. Nedochází tak ale k praskání návaru při navařování vlivem rychlého ochlazování. Nízká teplota snižuje plamene riziko poškození základní materiálu v průběhu navařovacího procesu. [5]

## 2.2 Navařování laserem

Technologie navařování laserem patří v současnosti mezi nejdokonalejší způsoby navařování. Při této metodě dochází k velmi malému tepelnému ovlivnění základního materiálu, je možné navařovat velmi malé detaily a drobné součásti, a proto

v posledních letech začíná tato metoda nahrazovat v technické praxi starší a již tolik nevyužívané metody. Minimalizují se vnitřní pnutí, nedochází ke zvýšení tvrdosti a dalším negativním změnám ve struktuře základního materiálu. Laserové navařování je z ekonomického hlediska výhodné pro renovaci součástí. Patří k nejméně destruktivním opravám povrchu strojírenských součástí, jako jsou razníky, razidla, formy a další. [5]



*Obrázek 7. Navařování laserem [34]*

Návar vzniká působením vysoce koncentrovaného laserového paprsku na základní materiál (viz obrázek 7), který se nataví a do místa natavení se přidává přídavný materiál, který tvoří výsledný návar. Výsledné návary mohou být provedeny s přesností na desetiny milimetru. Laserové navařování je velmi rychlé, bezpečné a umožňuje opravy i na těžko dostupných místech. Nastavitelná optika pro vedení laserového paprsku umožňuje vytvořit plynulý návar na hranách, strmých plochách a hlubokých tvarech. V uzavřených laserech je možno navařovat obrobky až 35 kg těžké, těžší obrobky pak ve strojích s otevřenou kabinou. Uzavřené lasery nemají žádné zvýšené nároky na používání ochranných pomůcek. Navařování laserem je však oproti metodě PTA velmi náročné z hlediska nastavení vyhovujících parametrů navařování a pro svůj nízký výkon odtavení není vhodné pro všechny aplikace navařování. [5] [13]

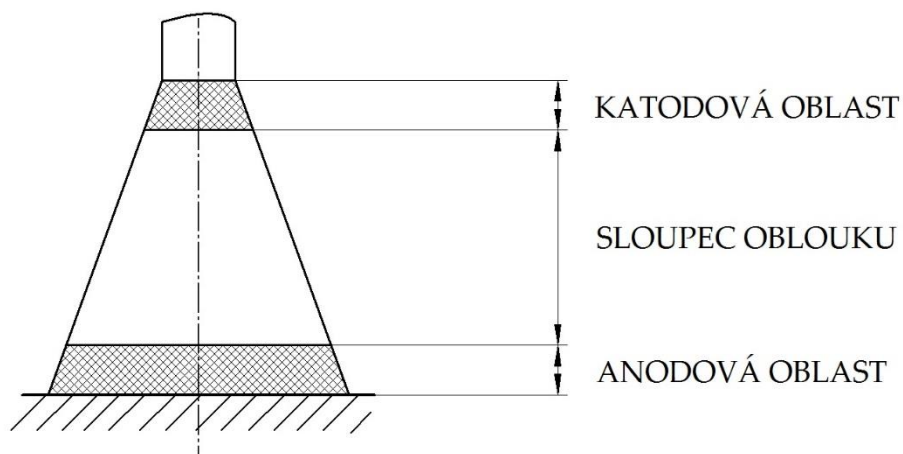
## 2.3 Navařování elektrickým obloukem

Technologie navařování elektrickým obloukem se v průmyslové praxi využívá především k navařování součástí, u kterých není vyžadována vysoká drsnost povrchu. Dále k navaření rozměrných ploch s nepravidelně opotřebeným povrchem a k navařování tvrdých slitin na rozměrné součásti. Při procesu navařování elektrickým obloukem dochází ke značnému zředění návarového kovu základním materiálem. Proto je doporučeno nanášet nejprve tenkou vrstvu návarového kovu a poté nanést finální vrstvu o odpovídající požadované tloušťce. [5]

Pro technologii navařování elektrickým obloukem je používán střídavý i stejnosměrný elektrický proud. U stejnosměrného je využíváno přímé polarity (elektroda mínus, základní materiál plus) a nepřímé polarity (elektroda plus, základní materiál mínus). Typ polarity je závislý na použité elektrodě a metodě navařování. Elektrický oblouk se skládá ze tří oblastí (viz obrázek 8), které se odlišují fyzikálními jevy, které v oblastech probíhají:

- Katodová oblast
- Sloupec oblouku
- Anodová oblast

Velikost katodové a anodové oblasti závisí na délce oblouku a dosahuje velikostí  $10^{-5}$  až  $10^{-6}$  mm pro katodovou oblast a  $10^{-3}$  až  $10^{-4}$  mm pro anodovou oblast. Plošky, mezi kterými hoří oblouk, tzv. aktivní plošky se nazývají katodová a anodová skvrna. Jejich rozměr závisí na velikosti proudu oblouku a intenzitě odvodu tepla. [14]



Obrázek 8. Oblast elektrického oblouku



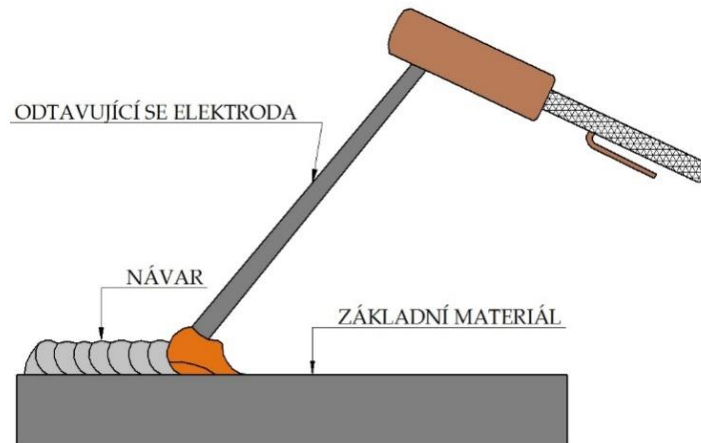
Teplota je vyšší v anodové oblasti (při svařování stejnosměrným proudem o 500 až 600 °C oproti katodové oblasti). Sloupec oblouku, tzv. obloukové plazma, je seskupení iontů, elektronů a neutrálních atomů. Probíhají zde procesy ionizace a rekombinace nabitých částic. [14]

V důsledku shromažďování nabitých částic, je oblouk elektricky vodivý a působí na něj elektrické a magnetické pole. Při přenosu kovu v elektrickém oblouku dochází působením několika sil, těmi jsou gravitace, síla povrchového napětí, elektromagnetické a dynamické síly. Navařování elektrickým obloukem využívá dvě metody navařování a to navařování s neodtavující se wolframovou elektrodou (TIG) a s odtavující se elektrodou (MIG/MAG). [12] [14]

Aby bylo zabráněno škodlivým strukturním změnám je vhodné povrch, který navařujeme, před samotným navařováním předehřát. Pro navařování lze použít střídavý i stejnosměrný proud. V praxi se více využívá proud stejnosměrný z důvodu hladšího povrchu součásti s nižším výskytem pórů než při navařování pomocí střídavého proudu. [12]

### 2.3.1 Navařování ruční obalenou elektrodou

Stejně jako pro svařovací účely se používají elektrody s bazickým, rutilovým, popř. i kyselým obalem. Pro dosažení požadovaných výsledků je nutno nechat před použitím elektrody vysušit po danou dobu a při teplotě určené výrobcem. Legující prvky jsou zpravidla obsaženy nejen v jádře elektrody, ale používá se i přilegování obalem. Výhodou této technologie jsou velmi nízké náklady a používá se na ruční opravy součástí jako vady odlitků, forem a další. Tepelně ovlivněná oblast je velmi výrazná a vnesené teplo do materiálu může negativně ovlivnit vlastnosti a strukturu základního materiálu. Schéma navařování ruční obalenou elektrodou je znázorněno na obrázku 9. [5] [12] [15]



Obrázek 9. Navařování odtavující se elektrodou

### 2.3.2 Navařování MIG, MAG

Jedná se o navařování odtavující se elektrodou. Oblouk i svarová lázeň jsou chráněny ochrannými plyny. Metoda MIG (metal inert gas) používá inertní plyny argon a helium, případně jejich směsi, metoda MAG (metal active gas) plyny aktivní. Aktivní plyny jsou nejčastěji tvořeny směsí argonu + O<sub>2</sub>, argonu + CO<sub>2</sub> nebo čistým CO<sub>2</sub>. Přídavný materiál je ve formě plných i plněných drátů (trubiček) o rozměrech průměru od 1,2 do 4,0 mm. Výhodu oproti navařování obalenými elektrodami a metodě TIG má navařování MIG, MAG ve vyšší produktivitě a možnosti automatizace procesu. [5] [12]

### 2.3.3 Navařování TIG

Metoda navařování TIG je založena na neodtavující se wolframové elektrodě a nezávisle podávaném přídavném materiálu. Ten může být ve formě drátu, tyčinky nebo prášku. Lze navařovat stejnosměrným i střídavým proudem. Navařování TIG je nezávislé na seřízení podávacích parametrů na proudu a jedná se o čistou technologii pro prvovýrobu i renovaci. Dochází zde k minimálnímu rozstříku a výsledný návar je kvalitní. Používá se pro navařování antikoročních materiálů nebo při navařování materiálů, které jsou odolné vůči adhezivnímu a abrazivnímu opotřebení. [5]

### 2.3.4 Navařování pod tavidlem

Navařovaný materiál ve formě drátu, trubičky nebo případně pásky je nepřetržitě podáván do místa navařování, kde se působením elektrického oblouku odtavuje (viz obrázek 10).

Elektrodu zde tvoří navařovaný (přídavný) drát, přídavná páska nebo trubičkový drát. Místo návaru je zasypáno tavidlem, které tvoří ochranu proti okolním vlivům atmosféry a zároveň leguje a formuje návar. Tavidla se používají tavená, keramická a sintrovaná. V praxi je využíváno několik způsobů navařování, a to například navařování jedním drátem, dvěma dráty (za sebou nebo vedle sebe), páskou či dvěma páskami. [5]

Výhodou této technologie je možnost automatizace, vysoká rychlost navařování a vysoký výkon odtavení. Nevýhodou je široce ovlivněná tepelná oblast a velikost zředění, které dosahuje až 60 %. Kvůli zakrytému navařovacímu procesu není možná jeho průběžná kontrola. Navařování pod tavidlem se v praxi používá například u dlouhých návarů, renovování kolejnic a pro návary válcových součástí. [5] [16]



Obrázek 10. Navařování pod tavidlem [35]

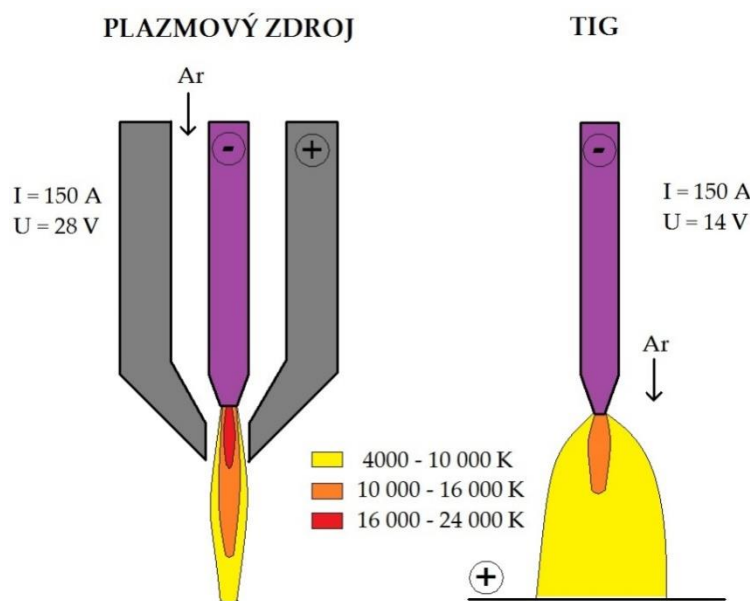
## 2.4 Další metody navařování

Mezi další metody navařování se řadí elektrostruskové navařování páskou, elektrokontaktní a elektrovibrační navařování, mikronavařování nebo navařování výbuchem. Elektrokontaktní navařování bylo vyvinuto pro navařování pístů hydraulických válců stojek pro důlní zařízení. Mezi dvěma kladkami z mědi se otáčí

rotační součást a impulsním proudem probíhá ohřev ve dvou kontaktních místech. V místě 1 dochází k navaření drátu, v místě 2 se návar uhlazuje. Mikronavařování je využíváno především při opravách nástrojů (např. zápustek) a vyznačuje se minimálním tepelným ovlivněním základního materiálu. Jeho aplikace je rychlá a jednoduchá. [17]

### 3 Navařování plazmatem

Plazmové navařování vzniklo postupným vývojem z metody navařování TIG/WIG a patří mezi moderní a vysoce produktivní metody s využitím plyných atmosfér. Rozdíl mezi metodou TIG a plazmatem je mimo jiné v teplotách oblouku (viz obrázek 11). Pro natavení základního materiálu je zdrojem tepla úzký svazek plazmatu mezi navařovaným materiálem a wolframovou elektrodou. Při ohřevu vzniká proud vysoce koncentrovaného plazmatu o teplotách 9000 – 30 000 K vystupující z trysky plazmového hořáku. [18] [19]



Obrázek 11. Hoření nepřeneseného oblouku a oblouku u metody TIG

Nejstarším způsobem, jak vytvořit trvale plazma ohříváné elektrickým proudem, je obloukový výboj mezi dvěma uhlíkovými elektrodami. Pokusy vedoucí k usměrnění elektrického oblouku za zvýšení jeho hustoty výkonu začaly již na počátku dvacátého století. Pojem tepelné plazma zavedl v roce 1923 fyzik Langmuire (1881–1957) při hledání tzv. čtvrtého skupenství hmoty. Tepelné plazma je složeno ze směsi iontů, elektronů a neutrálních částic. Atomy jsou za vysoké teploty ionizovány, molekuly jsou disociovány. Energie spotřebovaná při této přeměně se při dopadu na relativně studený povrch materiálu uvolní jako rekombinované teplo. V roce 1957 byl v USA zkonstruován první plazmový řezací hořák jako modifikace TIG hořáku, od roku 1977 se plazma

využívá k řezání pod vodou. Od roku 1990 existují plazmové zdroje s vysokou hustotou oblouku (high density plazma). [20] [21] [22]

### 3.1 Plazma

Plazma je disociovaný, vysoce ionizovaný elektricky vodivý plyn, který vedle neutrálních atomů a molekul obsahuje i záporně a pozitivně nabitě částice v různém množství (viz obrázek 12). Průchodem chlazenou tryskou se stabilizuje elektrický oblouk a vzniká koncentrovaný sloupec plazmatu. Na vnitřním povrchu stěn trysky dochází k rekombinaci ionizovaných částic. Jádro sloupce se silně přehřívá a ve vznikajícím úzkém sloupci plazmového oblouku je vysoce koncentrovaná energie. Takto vzniklá energie se dle druhu plazmových hořáků používá pro svařování plazmatem a mikroplazmatem, pro plazmové dělení materiálu nebo pro plazmové nástřiky a navařování materiálů. V proudu plazmatu dochází ke dvěma základním jevům, a to k disociaci a ionizaci. [4] [18] [19]



Obrázek 12. Plazmový paprsek [38]

- Disociace

Za teplot 4 000 – 10 000 K dochází ke srážkám molekul a k jejich následnému rozpadu. Při tomto procesu se spotřebovává teplo z okolí. Disociace probíhá účinkem zvýšené teploty nebo účinkem polárního rozpouštědla, a především u dvojjatomových plynů, kdy dochází k rozpadu molekul na jednotlivé atomy. [4] [21]

- Ionizace

K ionizaci plynu dochází například během svařování při teplotách 8 000 – 30 000 K. Pokud teplota plynu dosáhne těchto hodnot, dochází k oddělení elektronu z neutrálního atomu. Vzniká tím iont (kladně nabitá částice) a volný elektron (záporně nabitá částice).

Část plynu, která není ionizována, je chladnější, stabilizuje a koncentruje plazma v ose hořáku takovým způsobem, aby se nedotýkalo stěn trysky (dýzy). [4] [21]

## 3.2 Plazmové plyny

Jako plazmový plyn je třeba použít plyn, který chemicky nereaguje s materiálem katody a trysky. Nejvhodnějším plynem je argon, v závislosti na svařované tloušťce i druhu základního materiálu lze použít argon ve směsi s vodíkem, heliem nebo dusíkem. Vlastní plazma je zpravidla tvořené plazmovým plynem, průniku okolní atmosféry do místa svařování brání ochranný plyn a v případě navařování přídavného materiálu ve formě prášku se používá plyn podávací. [21]

### 3.2.1 Plazmový plyn

Plyn proudící okolo wolframové elektrody je nazýván plazmový plyn. Nejčastěji se jedná o argon, který se řadí mezi nejspornější plazmové plyny a díky nízké ionizační energii dosáhne vysokého stupně ionizace při snadném zapalování plazmového oblouku. Při ohřevu plynu se mnohonásobně zvyšuje jeho objem a tím stoupá výstupní rychlost plazmatu z plazmatronu. Výstupní rychlost při navařování se pohybuje mezi 200–500 m/s. [21] [22]

### 3.2.2 Ochranný plyn

Slouží pro ochranu svarové lázně proti oxidaci, průtok se volí 2–20 l/min. Volba ochranného plynu se řídí především dle druhu základního materiálu, který nesmí být ochranným plynem negativně ovlivněn. [21] [4]

### 3.2.3 Podávací plyn

Slouží k unášení částic prášku, který se používá jako přídavný materiál pro navařování. Jako podávací plyn je nejčastěji používán čistý argon, směs argonu s vodíkem nebo argonu s heliem. [21]

### 3.3 Typy plazmových oblouků

Pro procesy využívající plazma se používají plazmové hořáky s elektrickým obloukem napájeným stejnosměrným proudem. Existují tři základní druhy hořáků dle druhu zapojení:

- s nepřeneseným obloukem (nezávislé zapojení pro nevodivé materiály)
- přenesený oblouk (PTA)
- kombinované zapojení přeneseného i nepřeneseného oblouku

#### 3.3.1 Hořák s nepřeneseným obloukem (nezávislé zapojení)

Při nezávislém zapojení hoří plazmový oblouk mezi tryskou plazmového hořáku (anoda, + pól) a wolframovou elektrodou (katoda, - pól). Oblouk je nezávislý na navařovaném materiálu, proto se toto zapojení využívá především při metalizaci a řezání nevodivých materiálů. Hubice hořáku je velmi tepelně namáhána, a proto musí být intenzivně chlazena. Kvůli životnosti trysky se používají pouze inertní plyny. [22]

#### 3.3.2 Hořák s přeneseným a nepřeneseným obloukem (kombinované zapojení)

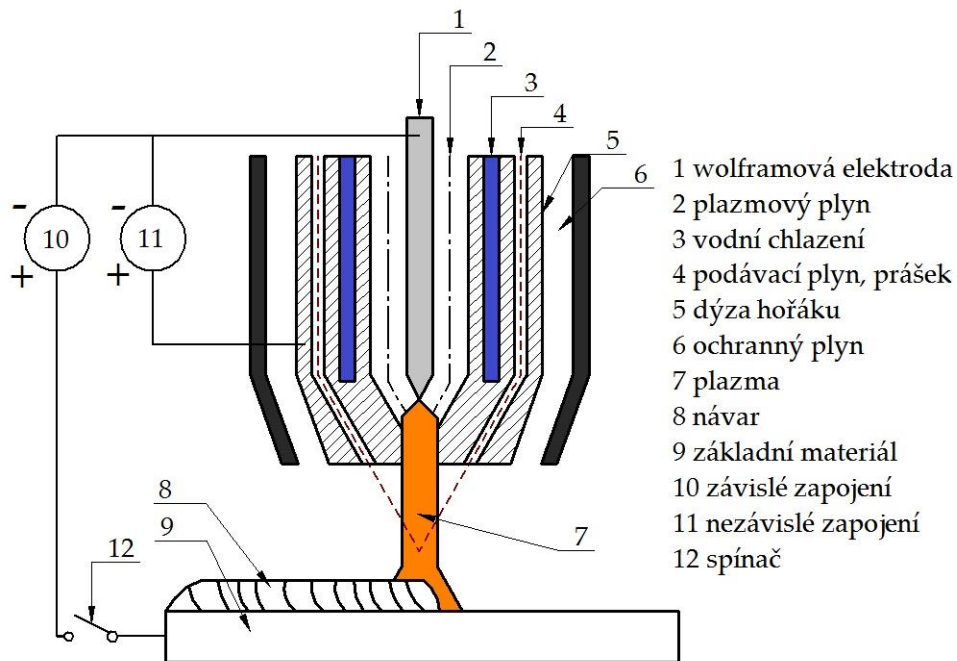
Plazmový oblouk hoří mezi navařovaným základním materiálem (anoda, + pól) a wolframovou elektrodou (katoda, - pól). Pro zapálení přeneseného oblouku (transferred arc) se využívá pomocného oblouku. Ten je zapalován vysokofrekvenčním výbojem mezi měděnou dýzou a elektrodou, kdy v kanálu dýzy dochází k ionizaci plazmového plynu, a vzniká pilotní (pomocný) oblouk. Hlavní přenesený plazmový oblouk se zapaluje přiblížením součásti nebo spuštěním plazmového proudu. Při kombinovaném zapojení je dýza hořáku méně tepelně namáhána a má větší životnost než dýza hořáku při nezávislém zapojení. Toto zapojení se využívá pro svařování, řezání a navařování. [22]

### 3.4 Plazmový hořák

Plazmový hořák pro navařování pomocí prášku vychází z hořáku pro metodu TIG/WIG, kde je keramická hubice nahrazena kovovou, nejčastěji měděnou dýzou chlazenou vodou nebo plynem (viz obrázek 13). Měděná dýza má malý průměr a dochází v ní ke koncentraci plazmatu zužováním plazmového paprsku. Pro svoji



vysokou odolnost proti tepelnému namáhání je jako materiál elektrody používán wolfram. Podávání prášku je zpravidla řešeno tak, aby letící prášek dopadal do proudu plazmatu nebo do tavné lázně. [22]



Obrázek 13. Schéma plazmového hořáku

### 3.5 Základní materiály pro navařování plazmatem

Plazmatem lze navařovat téměř všechny typy součástí z ocelí i slitin neželezných kovů (mědi, hliníku, niklu a titanu). Mezi nejčastěji navařované materiály patří rychlořezné oceli (řezné nástroje), nízkolegované oceli (zemědělství), nerezové oceli (chemický průmysl), vysoce chromované oceli (stavební průmysl) a slitiny niklu (ventily). Rychlořezné oceli nejsou v dnešní době v praxi navařovány, od roku 2014 však na ČVUT v Praze, Ústavu strojírenské technologie, probíhá výzkum této problematiky. Přídavné materiály se používají ve formě prášku, drátu nebo plněných elektrod. I když navařováním plazmovými hořáky lze získat kvalitnější výsledky než při navařování ostatními metodami, jako je flamespraying (navářování plamenem), vyskytují se zde i vážné problémy, kterými může být například porozita vzniklá kvůli špatné ochraně a kvůli vlivu nečistot. Na obrázku 14 jsou na fotografiích zobrazeny návary navařené metodou PTA. [19]



Obrázek 14. Ukázka návarů metodou PTA [Krška Zdeněk, KSK s.r.o.]

### 3.6 Výhody a nevýhody navařování plazmatem

Mezi výhody patří dobrá automatizovatelnost celého procesu navařování PTA, parametry podávání lze seřadit nezávisle na parametrech plazmatu. Vzniklý návar je kvalitně metalurgicky spojen se základním materiálem, má vysokou metalurgickou kvalitu a při správně seřízených parametrech dochází k minimálnímu promísení návarového materiálu se základním materiálem. Pro zajištění kvalitního návaru je nutné strojní vedení hořáku. Moderní stroje pro navařování plazmatem umožňují navařování pulzním proudem, což poskytuje další možnost pro přesné seřízení parametrů a snížení vneseného tepla.

Nevýhodou je vysoká teplota plazmatu, která může nepříznivě působit na základní materiál. Je nutné taktéž počítat s odpařováním jednotlivých legujících prvků. Kvůli intenzivnímu vyzařování plazmatu jsou zhoršeny pracovní podmínky obsluhy, a proto je nutné zakrytovat pracovní prostor stroje.

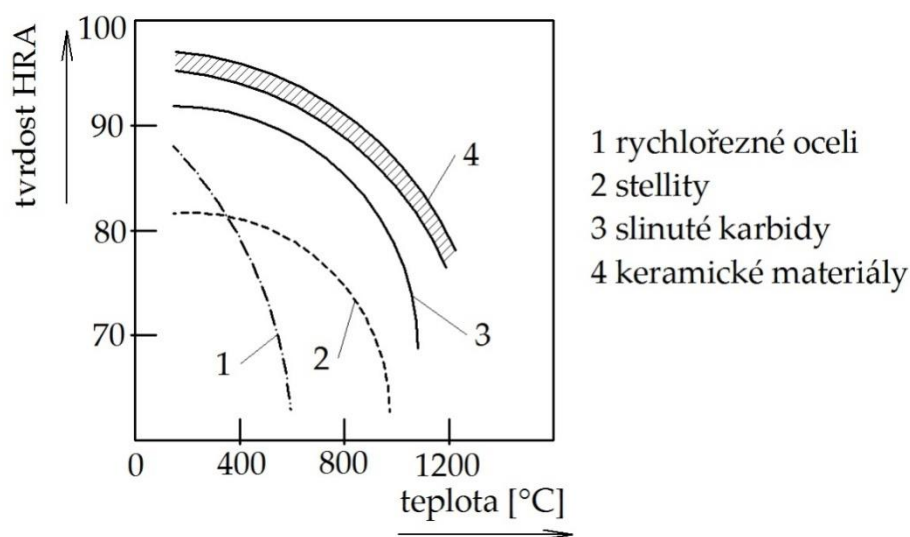
## 4 Rychlořezná ocel – High Speed Steel

Rychlořezné oceli (RO) jsou vysokolegované ocele a vyznačují se mimořádnou stabilitou řezných vlastností při obrábění za vyšších teplot, kdy si břit zachovává ještě potřebnou tvrdost a nedochází k popouštění (viz obrázek 15). Jako rychlořezné ocele jsou pojmenovány z důvodu jejich vysoké odolnosti při obrábění vysokými rychlostmi. Požadavky na RO jsou definovány mimo jiné dle Americké společnosti pro testování a materiály (ASTM). RO jsou zařazeny do skupiny nástrojových ocelí. Tyto oceli patří dle ČSN do samostatné třídy 19 a jsou to nejčastěji nadeutektoidní oceli s vysokým obsahem uhlíku do 1,6 % a s obsahem dalších legujících prvků. Rozdělení a označení nástrojových ocelí dle ČSN je zobrazeno v tabulce 1. Typ rychlořezné ocele HSS23, používaný v praktické části bakalářské práce, je řazen do skupiny 19 8XX. [23] [24]

Tabulka 1. Rozdělení a označení nástrojových ocelí

Označení dle ČSN	Druh nástrojové oceli	Kombinace přísadových prvků
19 0XX 19 1XX 19 2XX	Nelegované (uhlíkové)	0,3 % C až 0,6 % C 0,5 % C až 1,1 % C 1,0 % C až 1,6 % C
19 3XX Až 19 7XX	Legované	Cr-Mo-W-V (do 6 %)
19 8XX	Rychlořezné	W-Cr-V (15 – 22 %)

Z původního typu W18Cr5V1 se během druhé světové války přešlo na úspornější typy s nižším obsahem W, což se projevilo nepříznivě snížením řezivosti a stálosti ostří. V poválečné době byla snaha o dosažení maximální řezivosti i za vyšší cenu nástroje a vznikaly tak nové rychlořezné ocele s vyváženým chemickým složením, vysokou řezivostí a houževnatostí. Dle amerického ústavu pro železo a ocel (AISI) je v dnešní době klasifikováno 40 druhů RO a dle AISI je zaveden systém skupin s označením M a T. Rychlořezné oceli skupiny T mají jako hlavní legující prvek wolfram, oceli typu M molybden. Za písmenem M nebo T se nachází číslo, které slouží k odlišení typů RO. U některých typů se část wolframu nahrazuje molybdenem, který je metalurgicky výhodnější než wolfram. Pro nejvyšší výkony se používají oceli s přísadou kobaltu. [23] [25]



Obrázek 15. Tvrdost nástrojových materiálů v závislosti na pracovní teplotě [24]

RO obsahují 0,7 % až 1,3 % C a jsou legovány W, Cr, V, popřípadě Co v celkovém množství okolo 20 %. Základní typy mají složení: 18 % W, 4 % Cr, 1 % V při 0,8 % C. Pro větší výkony se přidává 5 až 10 % Co. Ve struktuře obsahují nad 25 % karbidů, které jsou stabilní i za vysokých teplot. Novější typy jsou legovány 10–12 % W, 4 % Cr a mají obsah vanadu do 4 % a uhlíku do 1,3 %. Legováním do 10 % Co se dosáhne dalšího zlepšení řezných vlastností RO. Vzhledem k vysokému obsahu přísad je rozpustnost uhlíku v rychlořezných ocelích jen 0,7 %, proto mají RO převážně ledeburitickou strukturu a jejich rovnovážný diagram je velmi složitý. Jsou samokalitelné a po vychladnutí z kovací teploty jsou neobrobitelné. Aby bylo možno RO dále opracovávat, je nutné vyžhání naměkko. [24] [25]

Jako základní RO se uvádí typ X80WCrV18-4-1 (19824). V tabulce 2 jsou uvedeny typy rychlořezných ocelí používané v České republice. [25]

Tabulka 2. Chemické složení RO používaných v České republice

Označení oceli dle ČSN	Chemické složení v %					
	C	Cr	W	V	Mo	Co
19 800	0,8	4,2	9	1,8	0,5	-
19 802	0,85	4,2	10	2,4	0,5	-
19 810	1,3	4,4	11	4	0,5	-
19 811	0,85	4,2	12	2,5	0,5	-
19 824	0,75	4,2	18	1,3	0,5	-
19 830	0,75	4,2	6,5	2	5	-
19 855	0,7	4,2	18	1,5	0,5	4,7
19 856	0,95	4,2	10,5	2,4	0,5	5
19 857	0,95	4,2	10,5	2,4	0,5	10
19 858	1,4	4,4	12	4,2	0,5	5

#### 4.1 Krystalizace rychlořezných ocelí

Krystalizace začíná okolo teploty 1450 °C vylučováním krystalů  $\delta$  feritu. Při teplotě okolo 1350 °C začíná probíhat peritektická reakce, při které reagují krystaly  $\delta$  feritu s taveninou za vzniku austenitu. Pokud složení neodpovídá peritektické koncentraci, zbyde tavenina nebo  $\delta$  ferit a reakce probíhá pouze částečně a je nahrazena rozpadem zbývající taveniny nebo rozpadem zbývajících krystalů. [25]

#### 4.2 Ovlivňování struktury rychlořezných ocelí

Příčinou vysoké řezivosti u rychlořezných ocelí jsou karbidy, které jsou tvrdé a stabilní i za vysoké teploty. Pokud jsou však karbidy hrubě vyloučeny nebo uspořádány do řádků, jedná se o nepříznivý jev, ocel je křehká, má zhoršenou pevnost zejména v ohybu a může dojít k tzv. naftalínovému lomu. V technické praxi je snaha této řádkovitosti předcházet, karbidy musí být vyloučeny v optimální disperzi. Rozložení karbidů ovlivňuje primární krystalizace, tvářeni nebo tepelné zpracování. Dodatečným tepelným zpracováním nelze vyřádkovanou strukturu v materiálu odstranit a jedná se o neopravitelnou vadu. [24] [25] [26]

#### 4.2.1 Ovlivnění primární krystalizace

Významnou možností ovlivnění velikosti karbidů je rychlost ochlazování. Ta závisí na hmotnosti a na tvaru ingotu. Maximální hmotnost ingotů se volí okolo 150 kg. Další možností je očkování taveniny oxidy nebo karbidy vhodných prvků jako je Mg, Al, Zr a Ti. [25]

Přetavováním elektronovým paprskem ve vakuu se získává kvalitní rychlořezná ocel s jemnou strukturou karbidů. Usměrněný svazek elektronů dopadá na tyč z rychlořezné ocele a postupně ji odtavuje. Natavená ocel tuhne v chlazené kokile. Odtavené kapky oceli mají velký povrch a díky procesu probíhajícího ve vakuu se kov dokonale odplyní. Malá tekutá lázeň rychle tuhne a krystalizace je velmi jemná. [25]

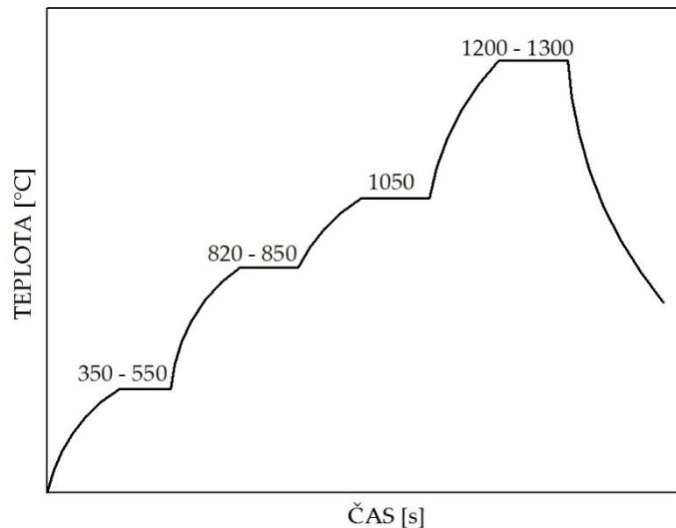
#### 4.2.2 Tváření

Tváření RO probíhá nejčastěji křížově, aby se dostatečně rozrušila nevhodná karbidická struktura a nevznikla vysoká anizotropie vlastností. RO má ve srovnání s uhlíkovou ocelí třetinovou až čtvrtinovou tepelnou vodivost, ohřev na kovací teplotu musí být zejména z počátku velmi pomalý, aby se zabránilo vzniku vnitřních pnutí a praskání nástroje. S rostoucí teplotou však teplotní vodivost stoupá a je možno rychlost ohřevu zvýšit. Ohřev proto probíhá v několika stupních. První stupeň probíhá na vzduchu, ostatní v solných lázních. Kovací teplota je 1 100 až 1 200 °C a kování probíhá silnými rázy pro překonání vysokého přetvárného odporu RO. [24] [25]

#### 4.2.3 Tepelné zpracování rychlořezné oceli

Cílem tepelného zpracování je odstranění zbytkového austenitu, částečné rozpuštění karbidů a jejich rovnoměrné a jemné vyloučení k dosažení nejlepších mechanických vlastností a maximální řezivosti. To se děje rozpouštěcím ohřevem, kalením a několikanásobným popouštěním. [24] [25]

Kalení RO probíhá za teplot 1 250 až 1 300 °C. Protože mají nízkou teplotní vodivost, předehtřívají se RO pro kalení postupně ve dvou nebo třech stupních (550, 850, 1 050 °C) na vzduchu nebo v solných lázních (viz obrázek 16). [24] [25]

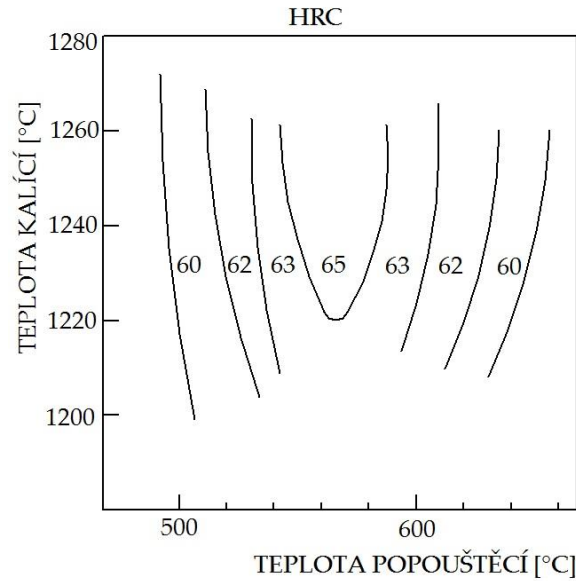


Obrázek 16. Ohřev rychlořezné oceli na kalící teplotu [25]

Zhrubnutí austenitického zrna je nežádoucí, proto se RO krátce austenitizují na kalící teplotě a poté se zakalí. Ohřev na kalící teplotu se obvykle provádí v solných neutrálních lázních. Rozšířené je i termální kalení do solné lázně o teplotě kolem 500 °C. Při setrvání nástroje 15–30 minut v lázni dojde k vyrovnání teploty jádra a teploty na povrchu. Poté se nástroj dochladí na vzduchu. Takto zakalená ocel obsahuje asi 40 až 70 % zbytkového austenitu. V tomto stavu je materiál rozměrově nestálý, křehký s malou tvrdostí a špatnou řezivostí, a proto musí být popouštěn. [24] [25]

Zakalená ocel se popouští při teplotách 540 až 600 °C a dochlazuje se na vzduchu. Při ochlazování se většina zbytkového austenitu přemění na martenzit, který je ale nutno také popoustit. Z tohoto důvodu se proces popouštění opakuje. Oceli s vysokým obsahem Co a W se popouštějí celkem třikrát. Nástroje složitých tvarů z RO se kalí na klidném nebo proudícím vzduchu. Jednoduché tvary se kalí v teplé solné lázni či olejích. [24] [25]

Výsledné vlastnosti RO závisí jak na teplotě kalení, tak i na teplotě popouštění. Nové materiálové listy norem proto zavádějí popouštěcí vrstevnicové diagramy (viz obrázek 17). Po tepelném zpracování je tvrdost 62 až 65 HRC (odpovídá 748 až 834 HV). Břity nástrojů si zachovávají tvrdost až do 600 °C. Díky tomu lze použít vysoké rychlosti obrábění – u oceli až 80 m/min. [24] [25]



Obrázek 17. Popouštěcí vrstevnicový diagram rychlořezné oceli

### 4.3 Vliv legujících prvků

Ve vyžíhaném stavu je struktura RO směsí karbidů ve feritické matici. Karbidy tvoří asi 30 % celkového objemu a jedná se o karbidy:

- $M_6C$  – nejpravděpodobněji  $Fe_4W_2C$ , vzniká primárně z taveniny, rozpouští v sobě i Cr, V a Co. Zvyšují tvrdost za tepla a řezivost.
- $M_{23}C_6$  – karbid  $Cr_{23}C_6$ , rozpouští v sobě Fe, Mo a V, vzniká sekundárně z austenitu, při vysokých teplotách se karbid rozpouští a přísady obohacují austenit, čímž je zapříčiněna vysoká prokalitelnost.
- $M_4C_3$  – karbid  $V_4C_3$ , velmi malá rozpustnost pro Fe, Cr a Mo, vzniká sekundárně z  $\alpha$  feritu, má velmi vysokou odolnost proti opotřebení a teplotní stabilitu, způsobuje sekundární tvrdost. [25]

Významy jednotlivých přísad:

- Wolfram W je přítomen v podobě karbidů, které zvyšují řezivost.
- Chrom Cr zlepšuje prokalitelnost a tvoří karbidy.



- Vanad V tvoří velmi jemné karbidy, které zabraňují hrubnutí zrna i po vysokém ohřevu a umožňují sekundární vytvrzení, nad 4 % ale zhoršuje kujnost.
- Molybdenem Mo lze částečně nahradit wolfram, jeho účinek zvyšování řezivosti je asi dvojnásobný.
- Kobalt Co netvoří karbidy, je rozpuštěn v matici, zvyšuje pevnost tuhého roztoku za vyšších teplot, zpomaluje difuzi dalších prvků. [25]

## 4.4 Výroba rychlořezné oceli

Průmyslově jsou dnes využívány dva procesy výroby RO.

### 4.4.1 Metalurgický způsob

Vysokolegované oceli se vyrábějí převážně v elektropecích, nejčastěji v obloukových nebo indukčních pecích. Obloukové pece využívají přímého oblouku a taví se v nich vsázky od 20 až do 100 tun (např. Héroultova pec). Indukční pece taví ocel indukčním účinkem střídavého proudu. Metalurgický způsob umožňuje ekonomickou výrobu téměř hotových nástrojů, např. vyměnitelných břitových destiček nebo závitových čelistí. [24] [26]

### 4.4.2 Prášková metalurgie

Začala se objevovat v 70. letech a zahrnuje výrobu rozměrných ingotů pomocí zhutňování prášků, které se dále zpracovávají tvářením na polotovary o požadovaných rozměrech. Nástroje, vyrobené z těchto polotovarů, mají vysokou spolehlivost a jakost. Cena výrobku vyrobeného způsobem práškové metalurgie je přibližně dvakrát vyšší než u výroby metalurgickým způsobem. [27]

Na řezné nástroje z RO se mohou aplikovat povlaky pro zvýšení řezivosti a řezné rychlosti. Povlaky o tloušťce 4 až 5  $\mu\text{m}$  zvyšují odolnosti břitu z RO proti adhezivnímu, abrazivnímu i chemickému opotřebení a snižují koeficient tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou. Nejvhodnějším typem nástrojů pro nanášení povlaku jsou nástroje, u kterých se přeastřuje pouze jedna funkční plocha břitu. [27]

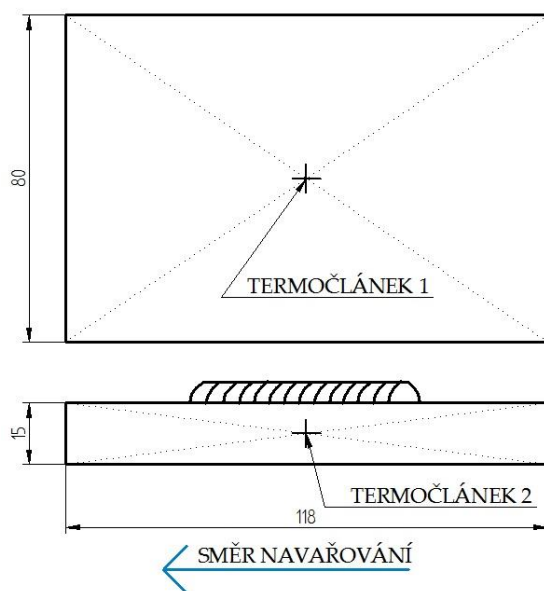
Výhodou rychlořezné oceli je mimořádná stabilita řezných vlastností za vyšších teplot (až 600 °C), kdy si břit zachovává tvrdost a nedochází k jeho popouštění. Nástroje z rychlořezné oceli lze vyrábět kování, válcováním, odléváním nebo třískovým obráběním. Má vysokou houževnatost a odolnost proti opotřebení. V současné technologii a výrobě patří rychlořezná ocel mezi nejpoužívanější materiály pro výrobu řezných nástrojů. Nevýhodou RO je nízká životnost a poměrně rychlé opotřebení.

## 5 Experimentální část

Experimentální část se zabývá navařením rychlořezné oceli plazmatem při sedmi různých parametrech navařovacího proudu a studiem vlastností výsledných návarů v závislosti na parametrech navařování. Z již publikované literatury [3] lze předpokládat, že při použití pulzního proudu bude dosaženo vyšší tvrdosti a jemnozrnnější struktury návarů.

### 5.1 Průběh experimentu

Experiment probíhal ve třech fázích. První fáze byla zaměřena především na vyhledání parametrů pro navaření použitelného a kvalitního návaru a změření podpovrchové tvrdosti u všech vzorků. Na základě výsledků prvního navaření bylo rozhodnuto provést druhou fázi navaření, zaměřenou na proměření tepelných účinků plazmového navařování. V obou případech bylo navařeno sedm vzorků totožnými navařovacími parametry. Ve třetí fázi byla navařena rychlořezná ocel na základní materiál podobného chemického složení. Vzorky byly předehřáty v peci, tepelně zpracovány a navařeny jako kontinuální, tak pulzním navařovacím proudem. [28]

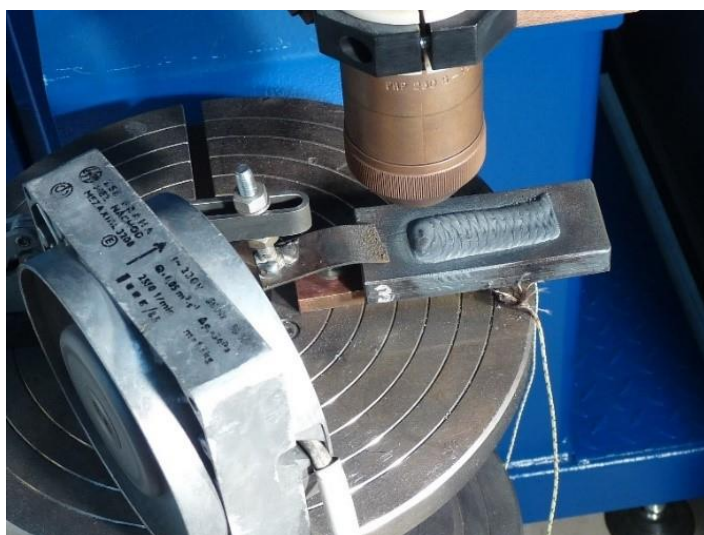


Obrázek 18. Schéma zapojení termočlánků

### 5.1.1 První fáze

Při první fázi experimentu byly použity plechy z materiálu S355 o rozměrech 80 x 118 mm a 15 mm tloušťky. Povrch každého vzorku byl obroušen a očištěn od nečistot. Následně byly pomocí stanice pro kapacitní navařování termočlánků přivařeny dva termočlánky. Jeden byl umístěn ze spodní strany vzorku přibližně ve středu návarového housenky, druhý po straně vzorku, taktéž ve středu strany (viz obrázek 18). Termočlánky jsou na schématu zobrazeny křížky. [28]

Vzorky byly postupně upnuty na pracovní stůl svařovacího automatu (viz obrázek 19) a na každý byly navařeny dvě vrstvy návaru o rozměrech 20 x 50 mm. První vrstva byla navařena na vzorek o počáteční pokojové teplotě. Druhá vrstva byla navařována až po dochlazení na 400 °C na volném vzduchu. Jednotlivé vzorky chladly upnuté v navařovacím automatu na 200 °C a poté byly odpojeny od termočlánků. Následně vzorky chladly na volném vzduchu až na teplotu okolí. Pro urychlení chladnutí na stroji bylo použito proudícího vzduchu. Hodnoty zaznamenané teploty z termočlánků byly zaznamenány přístrojem ALMEMO 5690-2M, a to po celou dobu navařování a po část doby chladnutí. Po vychladnutí byly vzorky nařezány pomocí vodního paprsku a metalografické pily na výřezy, ze kterých byly vyhotoveny metalografické výbrusy. [28]



Obrázek 19. Upnutí vzorku při chlazení ventilátorem

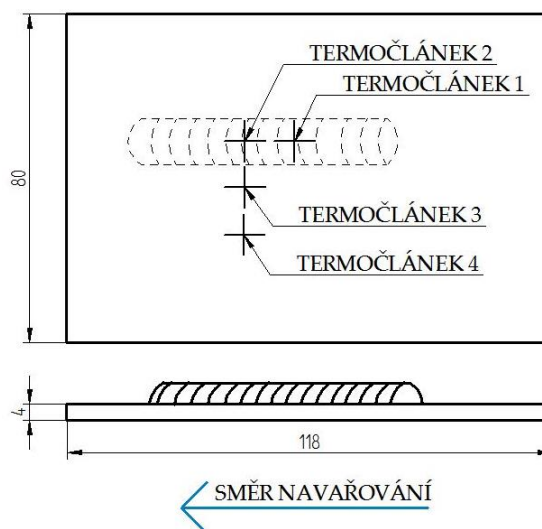
V rámci první fáze experimentu byly použity programy pro různé frekvence navařovacího proudu při zachování trajektorie hořáku. Šest vzorků bylo navařeno pulzním proudem, zbylý vzorek byl navařen proudem stejnosměrným (viz Tabulka 3). Pulzní navařovací proud byl 200/80 A, kontinuální proud byl 160 A.

Tabulka 3. Frekvence jednotlivých vzorků

Číslo vzorku	Použitá frekvence [Hz]
1	-
2	20
3	76,9
4	101
5	133,3
6	200
7	170

### 5.1.2 Druhá fáze

V druhé fázi experimentu byl kladen důraz na podrobnější zmapování teplotních polí. Bylo navařeno nových sedm vzorků, hodnoty navařovacích frekvencí byly totožné s hodnotami použitých pro navaření návarů pro metalografické zkoušky (viz tabulka 4). Jednotlivé housenky byly navařeny bez rozkyvu rychlostí 2,5 mm/s. Teplotní pole bylo zaznamenáváno čtyřmi termočládky. Ty byly umístěné tak, aby co nejlépe zaznamenávaly průběh teploty ve středu a v okolí svarové housenky (viz obrázek 20). Přídavný materiál byla ocel HSS23 a jako základní materiál byly použity plechy



Obrázek 20. Schéma zapojení termočláneků

z materiálu 14 260 o tloušťce 4 mm. Kontinuální navařovací proud byl 160 A, pulzní navařovací proud 240/80 A. [30]

### 5.1.3 Třetí fáze

Na základě předchozích prací ( [28] [30] ) byla frekvence 100 Hz zvolena za nejvýhodnější pro navařování rychlořezné oceli na podložku z totožného materiálu. Ve třetí etapě experimentu byly navařeny čtyři vzorky, jejich popisy a značení jsou uvedeny v tabulce 4. Základní materiál HSS23 tloušťky 18 mm byl nařezán na vzorky 40x80 mm. Na každý vzorek byly přivařeny dva termočlánky pro snímání teploty. Umístěné byly dle schématu v první části experimentu (viz obrázek 18). Kontinuální navařovací proud byl 155–165 A, hodnota pulzního navařovací proudu byla 170/80 A. Rychlost rozkvyvu byla 9 mm/s, rychlost kroku 3 mm/s, návar byl o šířce 13 mm. [31]

*Tabulka 4. Značení vzorků*

Vzorek	Základní materiál	Navařovací proud	Tepelné zpracování
A	Zušlechtěný	Kontinuální	Bez
B	Zušlechtěný	Pulzní	Bez
C	Zušlechtěný	Pulzní	Popuštěno
D	Žíhaný	Pulzní	Popuštěno

Experiment byl rozdělen do dvou etap. V první etapě byly navařeny návary na dva vzorky na zušlechtěný materiál (tvrdost 64 HRC). První byl navařen kontinuálním navařovacím proudem (A), druhý pulzním proudem o frekvenci 100 Hz (B). Tyto dva vzorky byly dochlazeny v peci na teplotu okolí. Na základě vyhodnocení vlastností těchto návarů (tvrdost, stav housenky) byla frekvence 100 Hz navařovacího proudu určena za vhodnější v porovnání s navařováním kontinuálním proudem vzhledem k menšímu tepelnému ovlivnění základního materiálu. Ve druhé fázi experimentu byl navařen vzorek ze zušlechtěného (C) a vzorek z vyžíhaného (D) základního materiálu. Oba vzorky byly předehřáty na teplotu 250 °C a poté na ně byla navařena vrstva při navařovací frekvenci 100 Hz. Neprodleně po navaření byly vzorky dochlazeny v peci

na 50 °C a následně popuštěny při teplotách 550, 550 a 560 °C po dobu 1 hod výdrže na popouštěcích teplotách. [31]

## 5.2 Navařovací automat

Navařovací automat PPC 250 R6 (KSK, s.r.o., Česká republika), zobrazen na obrázku 21, je určen pro navařování rotačních součástí na obvodu nebo z čela, jako jsou klíny a kuželky armatur, ventily a sedla spalovacích motorů a další. Jako přídatný materiál je zde používán prášek. Automat má hořák řízený v čtyřech osách X, Y, Z, N, polohovadlo navařované součásti je řízeno ve dvou osách C, R. Nosnost stolu činí max. 70 kg a jeho průměr je 300 mm. Navařovací automat je možné provozovat v ručním nebo automatizovaném režimu a vytvořené parametry lze ukládat do paměti automatu jako jednotlivé programy. [29]

Při navařování byl hořák umístěn ve vzdálenosti 10 mm nad základním materiálem. Rozměry návaru byly 50x20mm, krok 2,1 mm a počet housenek 30. Argon o čistotě 4.8 byl použit jako podávací, plazmový i ochranný plyn. Rychlost rozkyvu 5,0 mm/s, rychlost kroku 3,0 mm/s. [28]



Obrázek 21. Navařovací automat PPC 250 R6

### 5.3 Přídavný materiál

Přídavný materiál byl podáván ve formě prášku typu HSS23. Použitá velikost částic byla 80–180  $\mu\text{m}$ . Rychlost podávání prášku byla nastavena na hodnotu 9, tato hodnota byla určena předchozími experimenty jako optimální a odpovídá rychlosti podávání 13,7 g/min, tj. 0,8 kg/hod. Prášek byl před použitím přesušen při 110°C. [28]

V Tabulce 5 je zaznamenáno chemické složení prášku HSS 23. Mezi nejvýznamnější prvky patří uhlík, křemík, chrom, molybden, vanad, wolfram a železo. [11]

Tabulka 5 Chemické složení prášku HSS23

Chemický prvek	Hmotností procento [hm%]
<b>C</b>	<b>1,30</b>
<b>Si</b>	<b>0,36</b>
Mn	0,2
P	0,016
S	0,011
<b>Cr</b>	<b>4,05</b>
<b>Mo</b>	<b>5,19</b>
<b>V</b>	<b>3,18</b>
<b>W</b>	<b>6,07</b>
B	0,0006
N	0,047
O	0,018
<b>Fe</b>	<b>zbytek</b>

### 5.4 Měření mikrotvrdomosti

Měření mikrotvrdomosti dle Vickerse probíhalo na tvrdoměru IndentaMet 1104 (Buehler). Zatížení hrotu odpovídalo 1 kilogramu, doba působení vtisku 11 s. Vtisky byly vedeny středem vzorků ve vzdálenosti 0,5 mm od sebe.



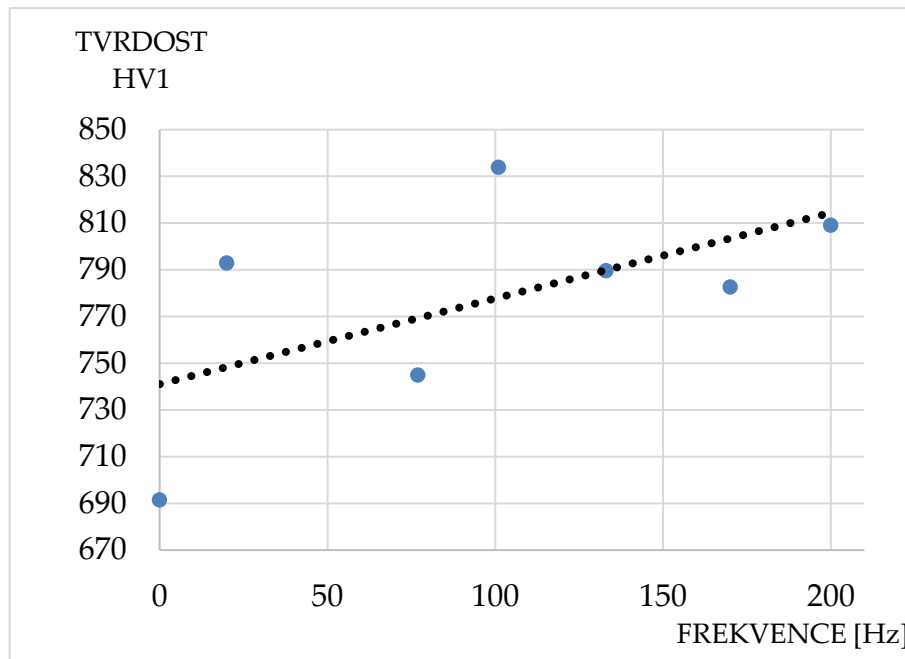
V první fázi experimentu bylo všech sedm vzorků změřeno patnácti jednotlivými vtisky, dva vtisky do základního materiálu, jeden vtisk na rozhraní základní materiál – návar, dále několika vtisky po půl milimetru do návarové části. Pod povrchem bylo provedeno pět vtisků. Z těchto pěti vtisků byly následně aritmetickým průměrem určeny výsledné podpovrchové mikrotvrdosti pro všechny vzorky. Ty jsou vyneseny do grafu na obrázku 22. [28]

Ve třetí fázi byly vtisky u vzorků A, B, C, D vedeny od povrchu navařené vrstvy do základního materiálu. Protože počet vtisků nebyl ve všech navařených vrstvách stejný, byly hodnoty naměřených mikrotvrdostí srovnány dle vtisku, který se nacházel v oblasti přechodu návar-základní materiál a vloženy do grafu (viz obrázek 27).

## 6 Výsledky a diskuze experimentální části

### 6.1 Výsledky a diskuze první a druhé fáze experimentu

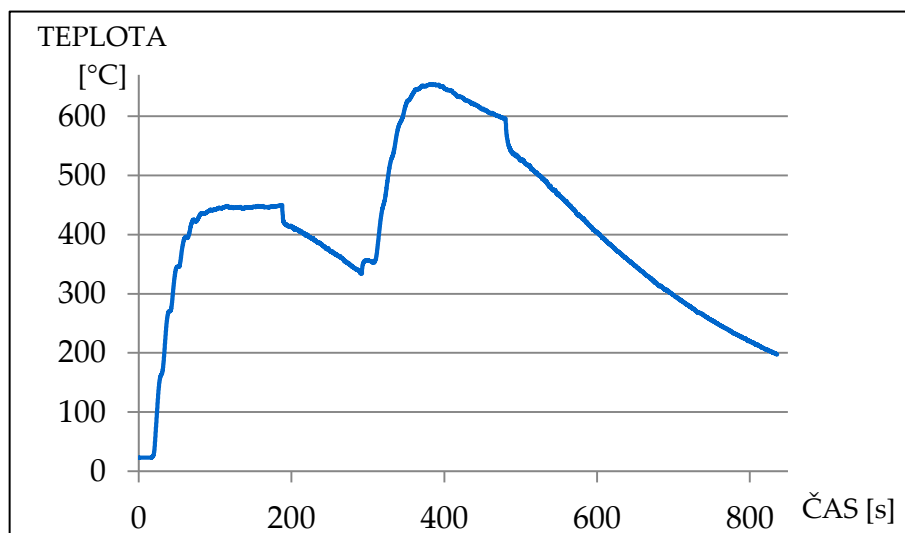
Nejvyšší mikrotvrdosti 834 HV bylo dosaženo při frekvenci 100 Hz, i když je patrná celková tendence zvyšování mikrotvrdosti se zvyšující se frekvencí (viz obrázek 22). Zvýšená hodnota byla potvrzena výsledky z měření teplotních polí termočlánky při navařování jednotlivých housenek. Dosažené mikrotvrdosti neodpovídají předpokladům dle ARA diagramu. Navařování nelze totiž považovat za typický teplotní cyklus jako při tepelném zpracování, mimo jiné proto, že stanovení přesné doby a teploty austenitizace při rychlém chladnutí z taveniny při navařování je technicky problematické. Z naměřených mikrotvrdostí byl prokázán vliv frekvence navařovacího proudu na podpovrchovou mikrotvrdost návaru, byl tedy prokázán předpoklad, že se zvyšující se frekvencí pulzace dochází ke zvyšování mikrotvrdosti navařené vrstvy. Pro vzorek s nulovou nebo vyšší frekvencí navařovacího proudu je majoritní fází zodpovědnou za mikrotvrdost martenzit a se vzrůstající frekvencí přebírají hlavní úlohu zpevňující fáze karbidické částice. [28] [30]



Obrázek 22. Závislost podpovrchové mikrotvrlosti na frekvenci proudu

Všechny návary byly dokonale propojeny se základním materiálem. Na hranicích se nevyskytly žádné trhliny ani póry. Dle předpokladů bylo dosaženo vyšší tvrdosti a jemnozrnnější struktury návarů navařených pulzním navařovacím proudem. [28]

Na obrázku 23 je zobrazen průběh teploty při frekvenci 200 Hz. U prvního návaru bylo dosaženo maximální teploty 450 °C, u druhého 651 °C. Zrychlený pokles a následný skok teploty je způsoben použitím ventilátoru. [28] [30]

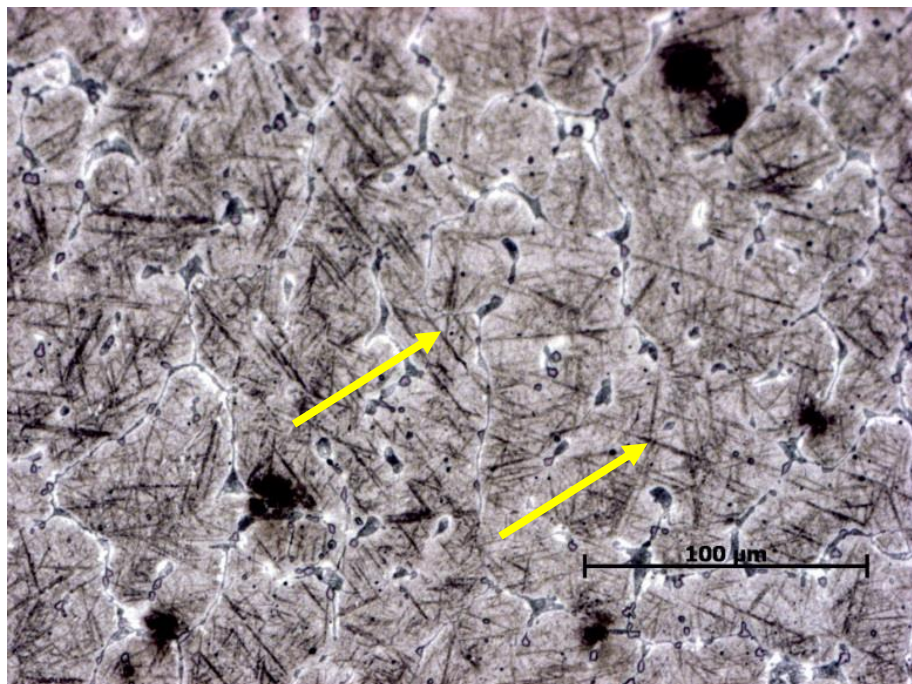


Obrázek 23. Průběh teploty při frekvenci 200 Hz

Na obrázku 24 je uveden mikrosnímek struktury při nulové frekvenci, kde jsou patrné martenzitické částice (žluté šipky). Mikrosnímek při frekvenci 76,9 Hz je zobrazen na obrázku 25. Na mikrosnímku pro frekvenci 200 Hz (viz obrázek 26) jsou vidět zvýrazněné hranice zrn. Karbidické částice jsou ve struktuře rovnoměrně rozloženy. Drobnější okrouhlé částice obsahují dle [32] vanad, lamelové útvary vykazují zvýšený obsah molybdenu, resp. wolframu. Chrom byl detekován jako rozpuštěný v matici. [28]

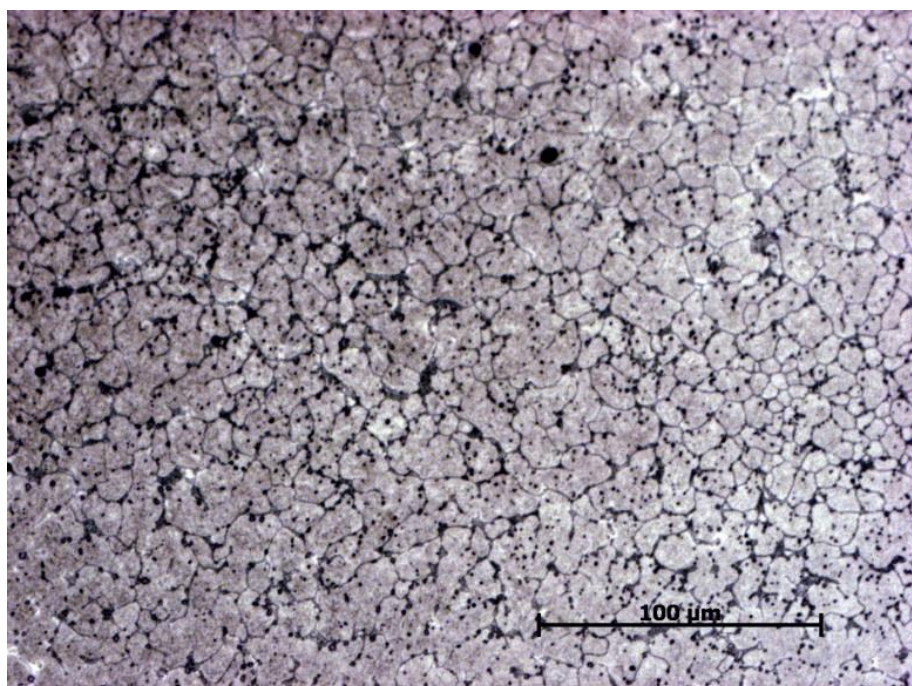
Dle literárních odkazů [32] lze na snímcích rozlišit dominantnější martenzitické částice pro frekvenci 0 Hz (označení žlutými šipkami). Černé tečky označené červenými šipkami na obrázku 26 obsahují vanad. Tyto karbidy vanadu jsou výrazně tvrdší než okolní martenzit, což bylo potvrzeno při měření nanotvrdosti na přístroji TI 950 TriboIndenter. [33] [28]

Černou šipkou jsou označené karbidy wolframu nebo molybdenu, použitou diagnostickou metodou je lze od sebe velmi těžko odlišit.

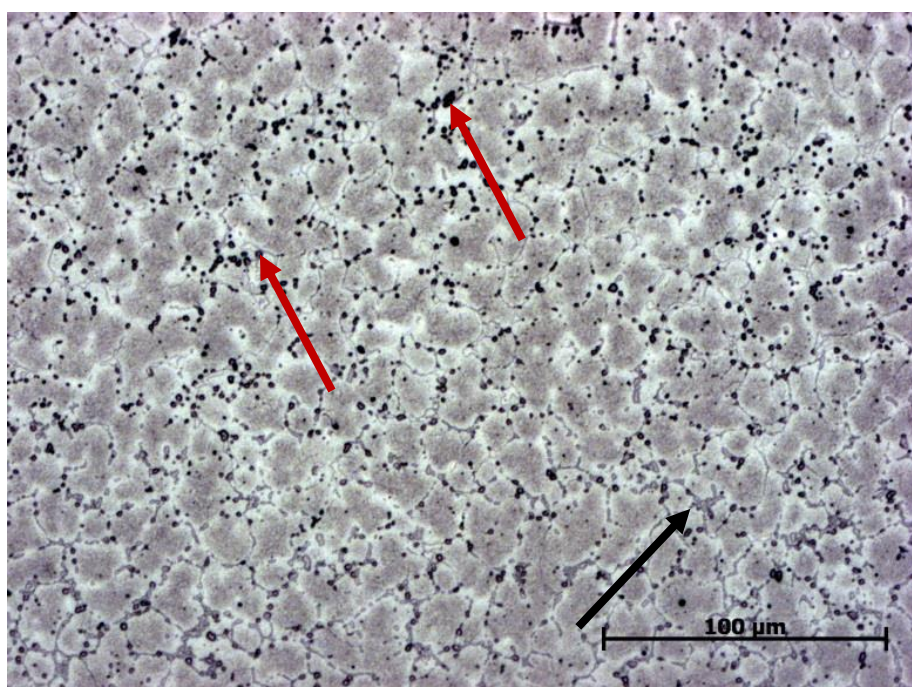


Obrázek 24. Mikrostruktura návaru vzorku č. 1 (0 Hz)





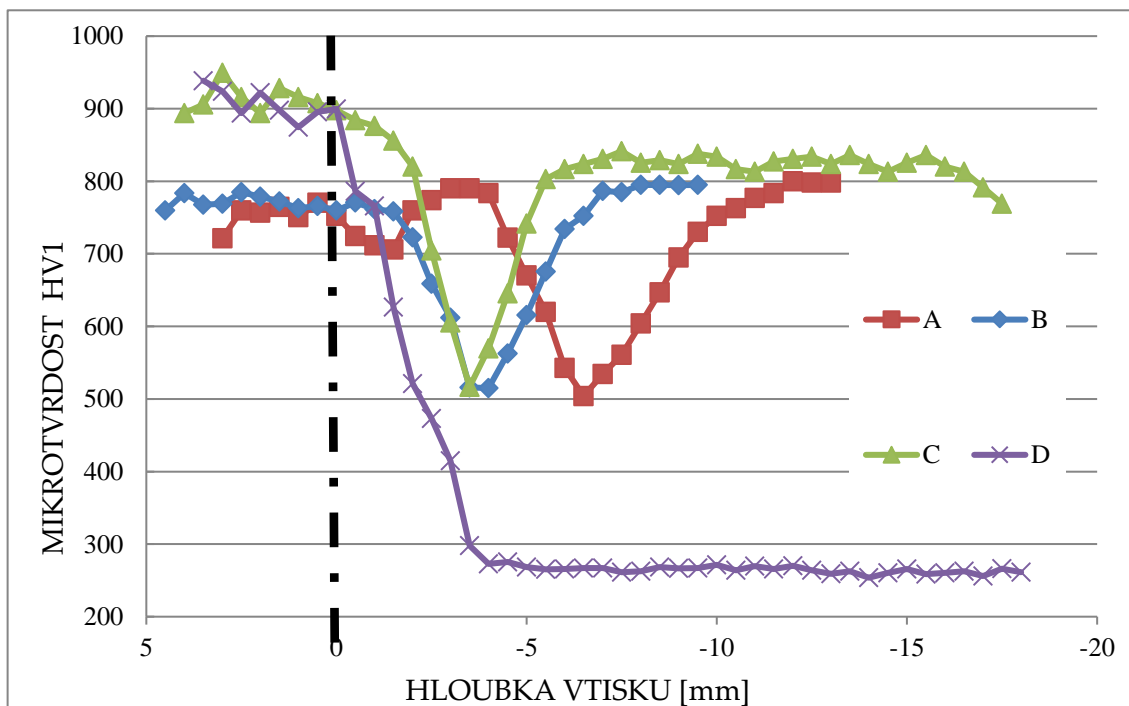
Obrázek 25. Mikrostruktura návaru vzorku č. 3 (76,9 Hz)



Obrázek 26. Mikrostruktura návaru vzorku č. 6 (200Hz)

## 6.2 Výsledky a diskuze třetí fáze experimentu

Pro třetí etapu experimentu je průběh mikrotvrdosti u všech vzorků charakterizován výrazným poklesem tvrdosti v přechodu návar – základní materiál (obrázek 27). Osa x odpovídá hloubce vtisku tak, že hodnota 0 leží na povrchu základního materiálu (označena čerchovanou čarou). [31]



Obrázek 27. Průběh mikrotvrdosti navařených vzorků [31]

Nejvyšší naměřená mikrotvrdost se u nepopuštěných vzorků A a B pohybovala okolo hodnot 785 HV (64 HRC), nejnižší okolo hodnot 505 HV (49 HRC). U vzorku C byla nejvyšší mikrotvrdost 950 HV (68 HRC), nejnižší kolem 515 HV (50 HRC). Nejvyšší mikrotvrdost vzorku D byla 939 HV (68 HRC), nejnižší mikrotvrdost 264 HV (25 HRC). Vzorky B, C mají podobnou křivku poklesu a růstu mikrotvrdosti. Odlišnost vzorku A je způsobena kontinuálním proudem navařování, který tepelně ovlivnil zónu návar – základní materiál a oblast promísení. Závar u vzorku A je větší než u vzorků B, C, D, které byly navařeny pulzním proudem o frekvenci 100 Hz, a proto je i pokles mikrotvrdosti posunutý více do základního materiálu. Vzorek D vykazuje monotónní pokles mikrotvrdosti v oblasti hranice ztavení. Mikrotvrdost klesá až na hodnotu vyžíhaného základního materiálu 264 HV. Všechny navařené povlaky jsou bez trhlin, propojeny se základním materiálem.

Zvýšení mikrotvrdotí návaru u popuštěných vzorků může být způsobeno rozpadem zbytkového austenitu na martenzit při popuštění vzorků nebo precipitací karbidů ve vhodné disperzi. Velice pravděpodobně se ale superponují oba dva uvedené vlivy. [31]

## Závěr

V teoretické části této bakalářské práce byla vypracována rešerše popisující problematiku navařování, typů a druhů navařovacích technologií a jejich použití v praxi. Podrobněji byly zpracovány technologie navařování plamenem, laserem, elektrickým obloukem a plazmatem. V druhé části rešerše jsou shrnuty základní informace o rychlořezných ocelích, jejich typy, chemické složení a tepelné zpracování. Technologie navařování plazmatem se jeví jako technologie vhodná pro opravu, renovaci a výrobu součástí, u kterých je v praxi využívána funkční plocha. Rychlořezná ocel má značnou odolnost při vysokých řezných rychlostech, a proto je často využívána v oblasti obráběcích nástrojů. Ve spojení s navařováním plazmatem může rychlořezná ocel tvořit novou technologii pro výrobu i renovace nejen řezných nástrojů, ale i součástí vystavených nejružnějším druhům opotřebení (abraze, eroze apod.)

Cílem experimentální části této bakalářské práce bylo úspěšně navařit rychlořeznou ocel typu HSS23 na základní materiál a vyhodnotit návary z hlediska teploty a podpovrchové mikrotvrlosti. Ve dvou fázích bylo navařeno celkem čtrnáct vzorků o sedmi různých frekvencích navařovacího proudu. Byl potvrzen předpoklad vlivu hodnoty frekvence navařovacího proudu na podpovrchovou mikrotvrdot návaru. Nejvyšší mikrotvrdoti 834 HV bylo dosaženo při frekvenci 100 Hz. Pro preciznější vyhodnocení historie teplotního cyklu návaru je v dalších výzkumech potřeba provést detailní měření teplotního pole s termočlánky umístěnými v těsné blízkosti svaru. Změna frekvence navařovacího proudu měla taktéž vliv na tvar a hloubku provaření základního materiálu. Z hlediska tepelného zpracování navařených vzorků byl prokázán vliv popuštění na výslednou mikrotvrdot návaru, kde byla mikrotvrdot zvýšena až o 200 HV.

Vzhledem k tomu, že v oblasti navařování pulzním plazmatem bylo doposud publikováno jen málo vědeckých prací, lze doporučit další výzkum v oblastech mikrotvrlosti, mikrostruktury, tvaru a velikosti závaru, promísení a teplotních cyklů při navařování.

## Bibliografie

- [1] High-Speed Tool Steels. BAYER, Alan, Bruce BECHERER a Teledyne VASCO. *Machining*. 9. ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1989, s. 9. ISBN 9780871700223.
- [2] HSS – historie a vývoj rychlořezné oceli. *Svět dílny* [online]. 2015 [cit. 2016-07-28]. Dostupné z: <http://www.svetdilny.cz/co-je-to-hss/>
- [3] 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 také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605006448>
- [4] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
- [5] BAJDA, Miloslav. Navařování kovů. *Svět svaru*. 1996. ISSN 1214-4983.
- [6] HLAVATÝ, Ivo, Jiří HLAVATÝ a Lucie KREJČÍ. Navařování tvrdokovů. *Svět svaru*. Hadyna International s.r.o., 2007, **11**(3), 18-19. ISSN 1214-4983.
- [7] HÄGANÄS, *Thermal Surfacing: Marine & Offshore Industry Solutions*. Häganäs, b.r.
- [8] Stellite Alloys - Chemical Composition, Mechanical Properties and Common Applications. *AZO materials* [online]. 2013 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9857#2>
- [9] Nickel Alloys; Powder, Wire, Rods, Electrodes. *Kennametal: Stellite* [online]. 2013 [cit. 2016- 10- 30]. Dostupné z: <http://www.stellite.com/ProductsServices/HardfacingAlloys/NickelAlloysPowderWireRodsElectrodes/tabid/111/Default.aspx>
- [10] *Metal powder and continuous cast rods*. Krefeld, Germany: Deutsche Edelstahlwerke, 2011.



- [11] *Sonderwerkstoff: DE - Bezeichnung PMD23*. Dörrenberg Edelstahl GmbH, b.r.
- [12] LÖBL, Karel. *Navarování: Knižnice strojírenské výroby*. První. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. ISBN nemá.
- [13] Laserové navařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001 [cit. 2016-08-16]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-navarovani.html>
- [14] PROCHÁZKA, Jiří, Miroslav ZAPOTIL, Milan NĚMEC a Jiří NOVOTNÝ. *Technologie slévání, tváření a svařování*. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1982. ISBN nemá.
- [15] LAPŠANSKÁ, Hana. Přehled metod svařování. In: *Portál moderní fyziky* [online]. Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, b.r. [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: [http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/lapsanska\\_prehled\\_metod\\_svarovani.pdf](http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/lapsanska_prehled_metod_svarovani.pdf)
- [16] *Svařování nerezavějících ocelí: Přídavné materiály pro svařování a navařování nerezavějících ocelí a niklových slitin*. Vamberk: ESAB, b.r.
- [17] KUBÍČEK, Jaroslav. *RENOVACE A POVRCHOVÉ ÚPRAVY* [online]. Brno, 2006 [cit. 2017- 01- 24]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/renovace\\_a\\_povrchove\\_upravy\\_\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/renovace_a_povrchove_upravy__kubicek.pdf). Vysoké učení technické v Brně.
- [18] TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvarovania*. Bratislava: Alfa, 1989. ISBN 80-05-00097-9.
- [19] ELIEZER, Yaffa. a Shalom. ELIEZER. *The fourth state of matter: an introduction to plasma science*. 2nd ed. Philadelphia: IOP, 2001. ISBN 07-503-0740-4.
- [20] BARTÁK, Jiří, Václav PILOUS a Rudolf KOVAŘÍK. *Učební texty pro evropské svařečské specialisty, praktiky a inspektory*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2002. Svařování. ISBN 80-857-7197-7.
- [21] SCHWARZ, Drahomír a Ivo HLAVATÝ. Svařování plazmovým obloukem. *Svět svaru*. 2014, (1), 5. ISSN 1214-4983.

- [22] MORAVEC, Jaromír. *Teorie svařování a pájení II: speciální metody svařování*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-439-9.
- [23] High - Speed Tool Steels. *Machining*. 9. ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1989, s. 9. ISBN 9780871700223.
- [24] HORÁČEK, Jaroslav. *Nauka o materiálu*. Vyd. 1. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2000, 71 s. ISBN 80-213-0397-2.
- [25] PLUHAŘ, Jaroslav a Václav BENEŠ. *Konstrukční a nástrojové oceli*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1980. ISBN nemá.
- [26] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Strojírenské materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2798-8.
- [27] KVASNIČKA, Ivo, Lubomír ŠTAJNOCHR a Vladimír SLAVÍK. *Obráběcí nástroje*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1755-9.
- [28] BOXANOVÁ, Monika a Pavel ROHAN. Navařování rychlořezných ocelí plazmatem. *Studentská tvůrčí činnost 2016*. České vysoké učení technické v Praze, 2016, 4.
- [29] Plazmové automaty. *KSK Česká Třebová* [online]. b.r. [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: <http://www.kskct.cz/plazmove-automaty/>
- [30] BOXANOVÁ, Monika, Pavel ROHAN a Lecheng ZHANG. Plasma transferred arc of high-speed steel II: The effect of pulsation on thermal field. *Technological forum 2016*. Jaroměř: TISK AS, s.r.o., 2016, **2016**(1), 5.
- [31] BOXANOVÁ, Monika a Pavel ROHAN. Způsoby renovace nástrojů z rychlořezné oceli. *Studentská tvůrčí činnost 2017*. České vysoké učení technické v Praze, 2017, 4.

- [32] HWANG, Keun, Sunghak LEE a Hui LEE. Effects of alloying elements on microstructure and fracture properties of cast high speed steel rolls. *Materials Science and Engineering: A*. 1998, **254**(1-2), 282-295. DOI: 10.1016/S0921-5093(98)00626-1. ISSN 09215093. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509398006261>
- [33] *TI 950 TriboIndenter®*. Minneapolis: Hysitron, b.r.
- [34] FORTECOAT Laser Cladding Powders. *SENTESBiR* [online]. b.r. [cit. 2016-08-29]. Dostupné z: <https://sentes-bir.com/fortecoat/laser-cladding-powders/>
- [35] What is submerged arc welding?. *NuSteel* [online]. 2015 [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: <http://nusteelfab.com/what-is-submerged-arc-welding/>
- [36] *Opravy a údržba: svařovací materiály pro opravy a údržbu*. 6. Vamberk: ESAB VAMBERK, s.r.o, 2011.
- [37] HÄGANÄS, *Thermal Surfacing Powder Choice With Ease*. Švédsko: Häganäs, b.r.
- [38] Advantages Plasma Welding. *Schweissmaschinen* [online]. b.r. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://www.schweissmaschinen.net/en/schweissmaschinen/plasma-welding-machines/plasma-welding-vs-tig-welding/>
- [39] *Flux core welding wire* [online]. b.r. [cit. 2016- 10- 30]. Dostupné z: [http://www.weldingwire.org/flux\\_core\\_welding\\_wire.html](http://www.weldingwire.org/flux_core_welding_wire.html)