



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NÁHRADA NÁVARŮ NIKLOVÝCH SLITIN SLITINOU MANGANOVOU

REPLACEMENT OF NICKEL ALLOY OVERLAY BY MANGANESE ALLOY OVERLAY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Albert Hlobil**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Marian Sigmund, Ph.D.,**

**IWE**

**BRNO 2023**

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Albert Hlobil</b>
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Marian Sigmund, Ph.D., IWE</b>
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Náhrada návarů niklových slitin slitinou manganovou

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o nastavení a odladění parametrů navařování konkrétně manganové slitiny jako náhrady niklové slitiny na definovanou součást. Navařování bude realizováno u spolupracující firmy. Manganové slitiny se obecně navařují na součásti z uhlíkových a nízkolegovaných konstrukčních ocelí, hlavně z důvodu vysoké otěruvzdornosti a to i bez ohledu na možné vysoké provozní teploty a tlaky. Cílem této diplomové práce bude zjistit co vedlo spolupracující firmu ke zvážení této možné ekvivalentní náhrady. Rovněž bude cílem zmapovat, zda některé mechanické i procesní vlastnosti, včetně korozní odolnosti, náhrady niklového návaru manganovým budou i nadále splněny.

### Cíle diplomové práce:

Literární rešerše technologií navařování manganových slitin.  
Teorie svařitelnosti základního i návarového materiálu.  
Volba a odladění parametrů navařování.  
Kvalitativní vyhodnocení provedeného návaru, včetně korozní odolnosti.  
Zhodnotit vhodnost navařování manganové slitiny pro danou aplikaci.

### Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan. Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.

AMBROŽ, Oldřich. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

FOLDYNA, Václav. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.

BARTÁK, Jiří. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.

LÖBL, Karel. Navařování. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. Knižnice strojírenské výroby.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Práce je zaměřena na problematiku ladění procesu navařování slitiny třídy 18.8. Mn metodou 152. Navařovanou součástí je válcové hrdlo Venturiho trubice z uhlíkové oceli ASME SA-106 Grade C. Byla provedena série návarů, které byly kvalitativně zhodnoceny a porovnány. Byly provedeny metalografické výbrusy a zjištěna hodnota zředění, převýšení a šířka tepelně ovlivněné zóny. Proběhlo také vyhodnocení mikrostruktury a mikrotvrdosti. Na základě provedených zkoušek byly použity vhodné parametry procesu navařování. Pro porovnání byla provedena zkouška chemické koroze a koroze v solné mlze, kde byla porovnána korozní odolnost návaru slitiny třídy 18.8. Mn se slitinou Inconel 625.

### **Klíčová slova**

navarování, PTA, Venturiho trubice, manganová slitina, korozní odolnost

## **ABSTRACT**

The thesis is focused on the issue of tuning the welding process of the 18.8. Mn alloy using the method 152. The welded component is the cylindrical throat of a Venturi tube made of ASME SA-106 Grade C carbon steel. A series of welds were performed, which were qualitatively evaluated and compared. Metallographic sections were made, and the dilution, excess, and width of the heat-affected zone were determined. Evaluation of microstructure and microhardness were also performed. Based on the tests performed, suitable welding process parameters were used. For comparison, a test for chemical and salt mist corrosion was undertaken, where the corrosion resistance of the 18.8. Mn alloy weld was compared to Inconel 625 alloy.

### **Keywords**

weld overlay cladding, PAW, Venturi tube, manganese alloy, corrosion resistance

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HLOBIL, Albert. *Náhrada návarů niklových slitin slitinou manganovou* [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149439>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marian Sigmund.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Náhrada návarů niklových slitin slitinou manganovou vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně, 20. 5. 2023

místo, datum

Albert Hlobil

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu Ing. Marianu Sigmundovi, Ph.D., IWE za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále děkuji panu Ing. Michalu Stáncovi a firmě SEIKO Flowcontrol, spol. s r. o., za poskytnutí podkladů a cenných rad při vypracování. Poděkování si zaslouží také Ing. Josef Izák a všichni, co se podíleli na realizaci experimentální části. V neposlední řadě děkuji rodině, kamarádům a všem, co mi pomáhali a podporovali mě, po celou dobu studia.

---

## OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD .....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 Navařování manganových slitin .....	13
2.1 Technologie provedení návaru .....	14
2.1.1 Metoda 152 navařování plazmou .....	14
2.1.2 Metoda navařování 141 TIG (WIG).....	18
2.1.3 Metoda 121 navařování pod tavidlem (SAW).....	19
2.1.4 Metoda 111 navařování ruční obalovanou elektrodou .....	20
2.1.5 Navařování laserem (metoda 52).....	21
2.2 Manganové slitiny .....	23
2.3 Korozivzdornost manganových slitin.....	26
2.4 Technologie navařování a svařování slitin manganu .....	28
2.5 Základní materiál (uhlíková ocel) .....	29
2.6 Návar ze slitin niklu .....	30
2.7 Kvalitativní vyhodnocení návarů .....	31
2.7.1 Nedestruktivní vyhodnocení návaru .....	31
2.7.2 Destruktivní zhodnocení návaru .....	33
3 Experimentální část .....	36
3.1 Parametry navařování .....	37
3.2 Vyhodnocení makrostruktury a zředění návarů .....	39
3.3 Zkouška korozní odolnosti v solné mlze .....	44
3.4 Zkouška chemické koroze .....	50
3.5 Vyhodnocení mikrostruktury a mikrotvrdosti .....	53
ZÁVĚR.....	59

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam příloh



## ÚVOD

Voda, ropa, plyn a všechny ostatní druhy kapalin, které používáme v každodenním životě, jsou nějakým způsobem dopravovány na místa, kde jsou využity nebo spotřebovány. Dopravu kapalin lze realizovat více způsoby, ať už se jedná o lodní a automobilní přepravu, případně jiné druhy transportu. Nicméně nejefektivnější dopravou z hlediska ekonomiky a ekologie je doprava kapalin pomocí potrubí (obr.1). Ať už se jedná o rozvody kapalin v domácnostech (voda, plyn) či dopravu na větší, případně mezistátní vzdálenosti. Neodmyslitelnou součástí potrubí jsou měřicí členy, díky kterým lze snadno zjistit odběr nebo průtok daného kapalného média. V závislosti na aplikaci se v technické praxi využívá několik druhů průtokoměrů, jedním z nichž je Venturiho trubice. [1; 2; 3]

Podle toho, jaký druh kapalného média měřicím členem protéká, je nutné dimenzovat zařízení z hlediska životnosti. V agresivnějším kapalném prostředí, jako jsou např. chemikálie, dochází k opotřebením funkčních částí průtokoměrů rychleji než v prostředí neutrálním. Z těchto důvodů je vhodné části měřicího členu, které jsou v kontaktu s kapalinou, vyrobit z kvalitnějších a odolnějších materiálů. Vyrábět celou součást z kvalitních materiálů však může být nákladné, proto se často využívá povlakování či navařování funkčních částí měřidel. [1; 2; 3]

Mezi požadované vlastnosti povlaků nebo navařů nejčastěji řadíme odolnost proti korozi a odolnost proti opotřebením. Obě tyto vlastnosti splňuje nikl a jeho slitiny, proto je také jedním z nejpoužívanějších kovů v této oblasti. Nicméně z důvodů vyšší ceny niklu bývá jeho podíl ve slitinách snížen nebo nahrazen. Jako vhodnou náhradu lze použít slitiny na bázi manganu v kombinaci s chromem, které mohou zajistit dostatečnou ochranu a prodloužení životnosti zařízení pro měření průtoku kapalin. [3; 4]

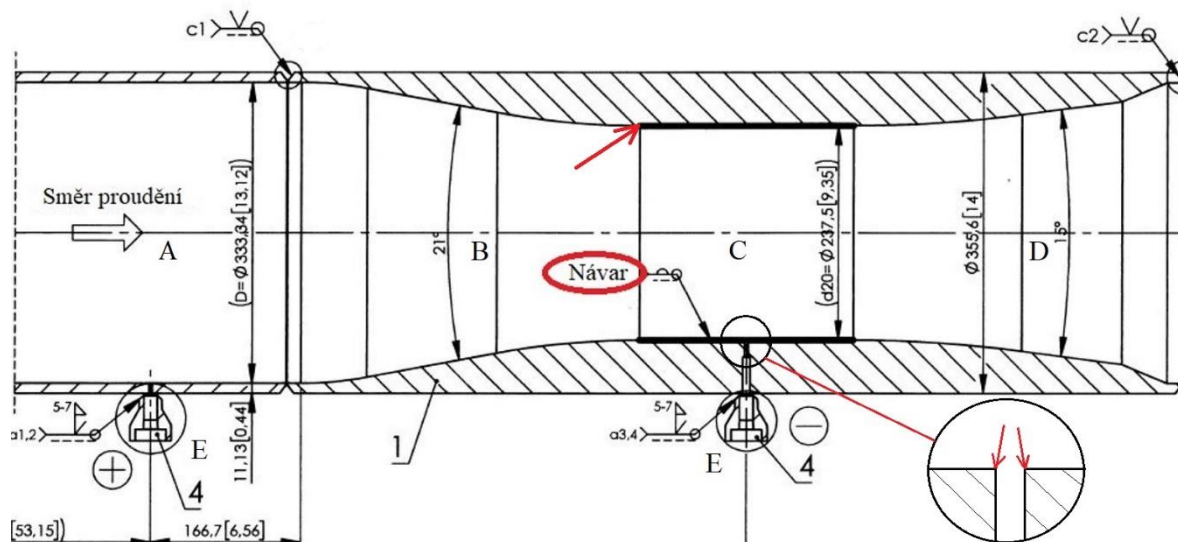


Obr. 1 Svařované a navařované potrubní rozvody [1; 2].

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ

Řešeným problémem je odlaďování parametrů navařování slitiny třídy 18.8. Mn pomocí plazmového automatu. Vyhodnocení kvality provedených návarů, jako např. vizuální zkouška, zhodnocení makro a mikrostruktury, hodnoty promísení atd. Kontrolována bude také korozní odolnost manganové slitiny v agresivních korozních prostředích.

V rámci kvalifikace WPQR proběhnou sady zkušebních návarů plazmovým hořákem. První návar bude jednovrstvý a druhý bude kvalifikován jako dvouvrstvý (vícevrstvý). Oba budou navařeny kovovým práškem DEW A 7 CN-P, jednotlivé housenky budou provedeny do kruhů, nikoliv po šroubovici (vždy je navařen kruh návarové housenky, následně se hořák posune o krok a je navařena další kruhová housenka). Návar bude proveden v hrdlové části Venturiho trubice, viz obr. 2. Výkres celé sestavy je v příloze 1.



Obr. 2 Navařovaná Venturiho trubice.

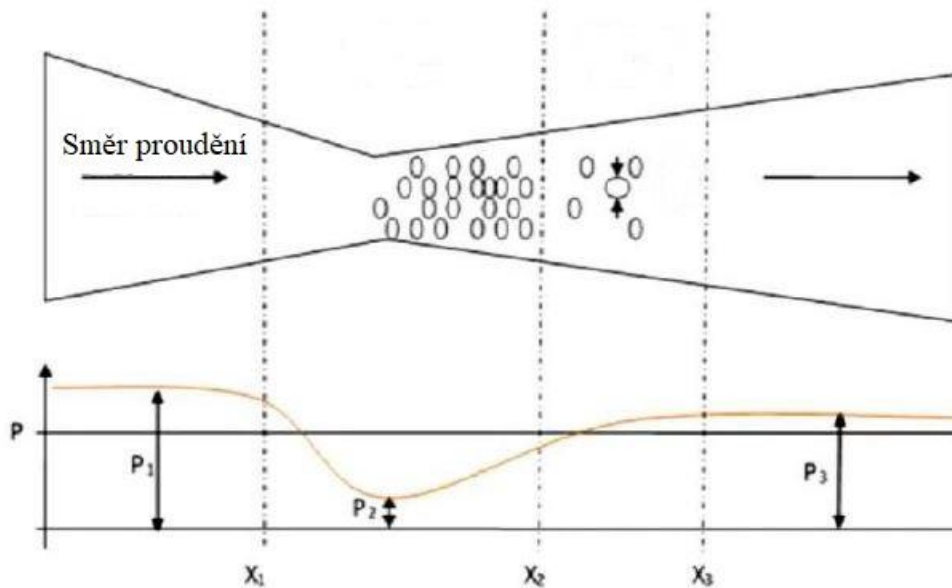
Problematika byla řešena ve spolupráci s firmou SEIKO Flowcontrol, spol. s r. o. Jde o Rakouskou firmu, jejíž výroba se nachází v Jihomoravském kraji ve vesnici Blatnice pod Svatým Antonínkem a specializuje se na výrobu měřicích zařízení do potrubí, které se využívají v energetickém, chemickém a petrochemickém odvětví průmyslu. Tyto zařízení zde nejsou pouze vyráběny, ale provádí se zde seřízení a také kalibrace měřidel. [5]

Venturiho trubice se používá pro měření průtoků kapalin a plynů. Její aplikace se uplatňuje zejména tam, kde je jedním z hlavních požadavků nízká tlaková ztráta. Tlaková ztráta se pohybuje od 5 do 10 % [5]. Venturiho trubice je zařízení pro nízkotlaké měření poklesu tlaku v potrubí. Díky svým konvergentním vstupním a divergentním výstupním kuželům lze efektivně korigovat tlak v trubici. Další výhodou může být i vysoká provozní spolehlivost u tekutin proudících vysokou rychlostí (např. vodní pára). Za pomoci těchto vlastností je Venturiho trubice jedním z nejučinnějších diferenčních měřičů. [5; 6]

Samotná Venturiho trubice se skládá ze čtyř dílčích částí označených na obr. 2 písmeny A až D. První vtokovou částí je vstupní válec (A), v němž je umístěn odběr (měřidlo tlaku) před vstupem do trubice. Druhou částí je kuželový konfuzor (B) nabývající celkového vnitřního úhlu 21°. Následuje válcové hrdlo (C), kde je umístěn druhý odběr. Délka válcového hrdla odpovídá jeho průměru. V pořadí posledním členem trubice je kuželový difuzor (D), který může nabývat celkového vrcholového úhlu 7 až 15°. [5; 6]

Samotný výpočet průtoků kapalného média se provádí dle ISO 5167 - část 4. Výpočet vychází z Bernoulliho rovnice, kdy na základě rozdílných tlaků při vstupu kapaliny do trubice (ve vstupním válci) a v její nejužší části (válcovém hrdle) je vypočítán průtok. Tlak je

měřen pomocí odběrů, které vidíme na obr. 2 označené písmenem „E“. Odchylka nekalibrované Venturiho trubice se pohybuje obvykle od 1,5 do 3 % [5]. Ve vstupním válci nabývá tlak nejvyšších hodnot, zatímco ve válcovém hrdle dochází k poklesu tlaku na nejnižší hodnotu. Průběh tlaku ve Venturiho trubici v závislosti na aktuálním průměru trubky je vidět na obr. 3. Pokles tlaku je způsoben zvýšením rychlosti proudění kapaliny ve válcovém hrdle. Z důvodů vysoké rychlosti proudění spolu s vysokými teplotami může v těchto místech trubice docházet k většímu opotřebení. Zvýšené opotřebení ve válcovém hrdle má za následek rychlejší degradaci trubky v těchto místech, proto se pro výrobu válcového hrdla používají kvalitnější materiály. [5; 6; 7; 8]



Obr. 3 Průběh tlaku ve Venturiho trubici [7].

Venturiho trubice se vyrábějí třemi způsoby. Méně rozměrné jsou vrtány, u větších zařízení je využíváno zakružování a následné svařování, další méně používanou technologií výroby může být odlévání. Velikosti vyráběných trubíc jsou v rozmezí průměrů 50 až 1200 mm. [6]

Materiál pro výrobu Venturiho trubíc bývá standardně používaná uhlíková ocel nebo korozivzdorná ocel, do teplot 350 °C. Pro aplikace při teplotách přehřáté páry nad 650 °C to mohou být žárupevné či žáruvzdorné vysoce legované oceli s hlavními legurami jako je Cr, Mo, V, Nb či Ni. U měřicího členu je kladen důraz zejména na rozměrovou přesnost a stálost v průběhu používání. Zachovány musí být průměry v místech odběrů (vstupní válec a válcové hrdlo), a dále nesmí během provozu dojít k opotřebení náběžných ostrých hran válcového hrdla a hran odběrů, viz červené šipky na obr. 2. [6]

Výroba trubice z polotovaru ve formě trubky či kulatiny z korozivzdorné oceli přináší řadu problémů. Prvním z nich je vysoký podíl odpadového materiálu při výrobě. Dalším samotné zavádění členu do potrubí z uhlíkové oceli, kde je třeba provést kvalifikace a vytvořit přechodový niklový návar z důvodu zachování korozivzdornosti měřidla. Obdobně s odběry, které jsou také z uhlíkové oceli a musí být svařeny s trubicí. Zde se jeví výhodnější trubicí vytvořit z uhlíkové oceli a navařit funkční část kvalitnějším materiálem. Takto lze snížit náklady a alternativně měnit navařovací materiál dle požadavků zákazníka.

Požadavkem je použít pro navařování slitinu třídy 18.8. Mn, jelikož funkční části měřicího členu musí odolat vysokým teplotám a velkým provozním tlakům. Proudícím médiem bude přehřátá vodní pára. Návar bude ve finální fázi obroben na požadovanou tloušťku 3 mm.

Základním materiálem pro zkušební návary je trubka o vnitřním průměru 323,3 mm a tloušťce 33,23 mm. Materiál trubky je uhlíková ocel ASME SA-106 Gr.C, jejímž nejbližším evropským ekvivalentem je ocel s označením P265GH. Jedná se o uklidněnou, za tepla válcovanou trubku odolnou až do tlaku kapaliny 19 MPa. Součást byla následně normalizačně žhánána při teplotě kolem 925 °C a ochlazena na vzduchu. Mechanické vlastnosti této trubky jsou uvedeny v tab. 1. Výsledné chemické složení pak nalezneme v tab. 2.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti oceli ASME SA-106 Gr.C při teplotě 20 °C.

Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Smluvní mez kluzu určená z celkové deformace $R_{t0,5}$ [MPa]	Tažnost A [%]
523	337	36

Tab. 2 Chemické složení navařované trubky z oceli ASME SA-106 Gr.C.

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]
0,21	0,82	0,33	0,13	0,03
Ni [%]	Cu [%]	P [%]	S [%]	V [%]
0,09	0,17	0,019	0,007	0,002

Navářováním (přidavným) materiálem bude kovový prášek s označením DEW A 7 CN-P, jehož chemické složení je v tab. 3. Ekvivalentem tohoto práškového přidavného materiálu je drát s obchodním označením Thermanit X. Chemické složení drátu nalezneme v tab. 4.

Tab. 3 Chemické složení kovového prášku DEW A 7 CN-P.

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]
0,12	6,6	0,9	18,9	-
Ni [%]	Cu [%]	P [%]	S [%]	Fe [%]
8,9	-	0,01	0,01	Zbytek

Tab. 4 Chemické složení drátu Thermanit X.

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]
0,08	7	0,8	19	-
Ni [%]	Cu [%]	P [%]	S [%]	Fe [%]
9	-	-	-	Zbytek

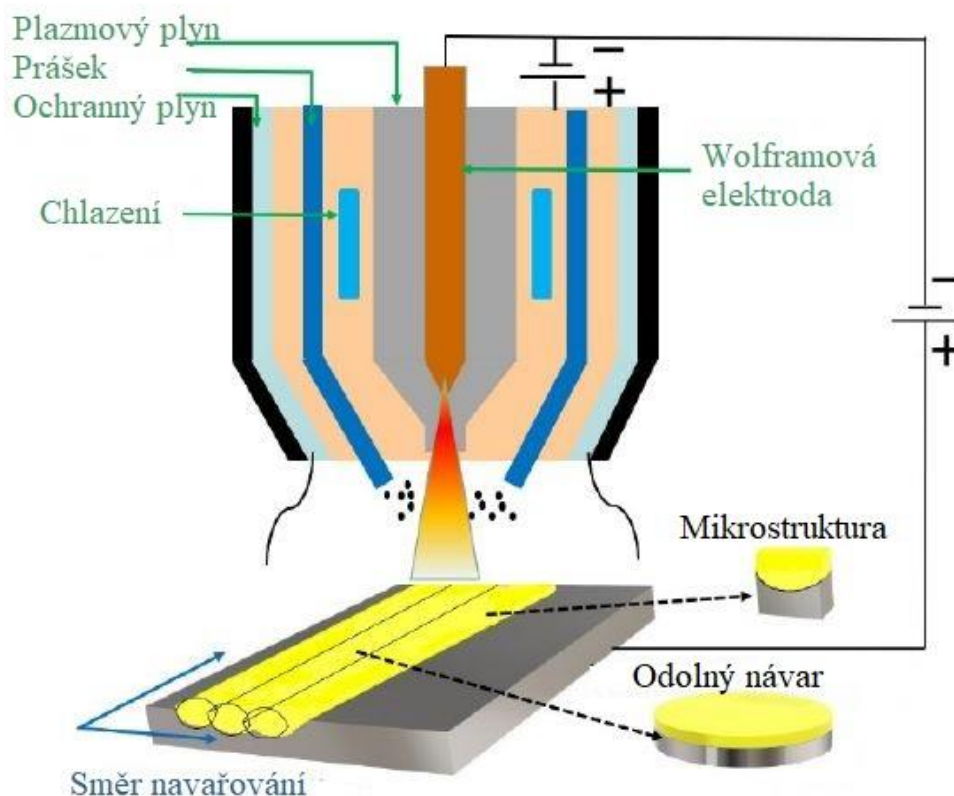
Firma kromě slitin třídy 18.8. Mn navařuje také chromniklové návary nebo návary na bázi niklu. Příkladem navařované niklové slitiny je Inconel 625. Slitina disponuje vynikajícími vlastnostmi jako je dobrá otěruvzdornost, korozivzdornost a odolnost při vysokých teplotách. Ve srovnání s manganovou slitinou je násobně dražší, což hraje při výrobě více kusů zásadní roli. Navíc v této aplikaci není kladen vysoký důraz na korozní odolnost, ale bude u obou slitin zkoumána a porovnána v souladu s požadavkem firmy. Z těchto důvodů se jeví slitina 18.8. Mn jako vhodnější náhrada. [5]

Ve zmíněné firmě jsou k dispozici různé technologie, kterými lze manganový návar provést. Teoretická část bude zaměřena na rozbor technologií navařování manganových slitin a vlastnosti slitiny samotné. V experimentální části proběhne ladění parametrů navařování, přičemž provedené návary budou kvalitativně zhodnoceny. Dále budou provedeny zkoušky a bude porovnána korozní odolnost manganových a niklových návarů. [5]



## 2 NAVAŘOVÁNÍ MANGANOVÝCH SLITIN

Navarování je proces, při němž dochází ke spojování dvou chemicky stejných nebo rozdílných materiálů. Návar může být proveden různými technologiemi, z nichž velké množství používá pro natavení přídavného materiálu elektrický oblouk. Pro navarování manganových slitin se často používají metody navarování plazmatem s přídavným materiálem ve formě prášku (metoda 152), laserem (metoda 52), obloukové navarování netavicí se wolframovou elektrodou v inertním plynu (metoda 141), automatem pod tavidlem (metoda 121) nebo ruční obalovanou elektrodou (metoda 111), případně další metody. Samotné návary provádíme za účelem oprav či renovací, kdy jsou díly navraceny nebo zlepšeny jeho užitné vlastnosti. Při procesu dochází k natavení přídavného (částečně i základního) materiálu pomocí některé z tavných metod. Natavený kov je potom deponován na povrch navarované součásti a tvoří samotný návar. Návar může být jedno či vícevrstvý. Při navarování stejně jako u svařování dochází k promísení základního a přídavného materiálu. Stupeň zředění (promísení) je přímo závislý na použité technologii navarování a navarovacích parametrech. Součásti, u kterých požadujeme specifické lepší vlastnosti (tvrdost, oteruvzdornost, pevnost atd.), než má základní materiál, je vhodné, aby bylo dosaženo co nejmenších hodnot zředění. Je to dáno z důvodů zachování požadovaných vlastností přídavného materiálu. Celý proces si lze dobře přiblížit na obr. 4, kde vidíme navarování plazmou s přídavným materiálem ve formě prášku. [9; 10; 11]



Obr. 4 Navarování metodou 152 [10].

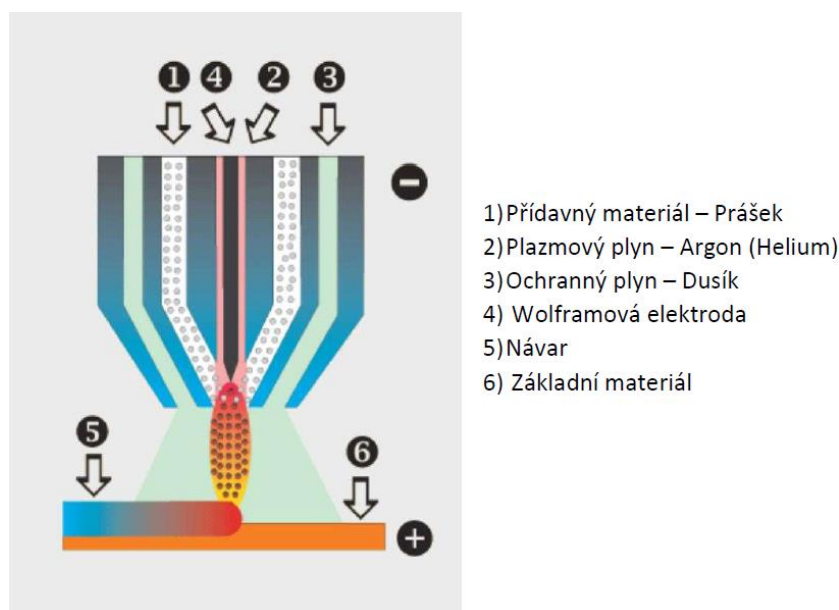
## 2.1 Technologie provedení návaru

Technologie navařování se jako taková používá pro opravu (navaření) poškozených dílů pro obnovení jeho užitečných vlastností. Typickým příkladem takové opravy je navařování forem, kde vlivem opotřebení dojde k porušení povrchu. Důležité postavení má tato technologie také v oblasti renovací, kde se návar provádí pro navýšení či zlepšení vlastností navařované součásti. Do této oblasti lze zařadit i zmíněnou Venturiho trubici. Hlavní výhodou navařování je prodloužení životnosti a pracovní spolehlivosti používaných, ale i nových zrovna vyrobených zařízení nebo součástí. Výraznou měrou k tomu přispívá navařování odolných ocelí nebo slitin speciálních vlastností. Příkladem může být slitina s dobrou odolností proti otěru. Návar aplikujeme na hrany a pracovní plochy součástí, které jsou vystaveny značnému opotřebení. Provedení tohoto opatření může velikost opotřebení zmenšit nebo jej zcela potlačit. Navařování strojních součástí slitinami z tvrdokovů bývá často nákladnější než provedení většiny povrchových úprav. Nicméně namáhané součásti opatřené těmito návary mají obvykle takovou trvanlivost, že se volba této nákladnější metody v provozu násobně vyplatí. Často se jedná o jedinou možnost, jíž lze dosáhnout toho, že zařízení zůstane bez poruchy dlouho v provozu, aniž by bylo nutné provádět rekonstrukci nebo by docházelo ke snížení vlastního výkonu. Navařování slitin na bázi tvrdých kovů se uplatňuje zejména ve výrobě zařízení pro energetický průmysl, hutnictví, těžbu ropy, uhlí a kamene, součásti dopravních zařízení, letectví, zemědělství atd. [9; 12]

Samotný proces navařování manganové slitiny by mohl být proveden několika technologiemi, kterými firma disponuje. Tyto technologie budou porovnány z hlediska vhodnosti jejich použití. Jednou z těchto technologií je technologie navařování plazmovým hořákem. [12]

### 2.1.1 Metoda 152 navařování plazmou

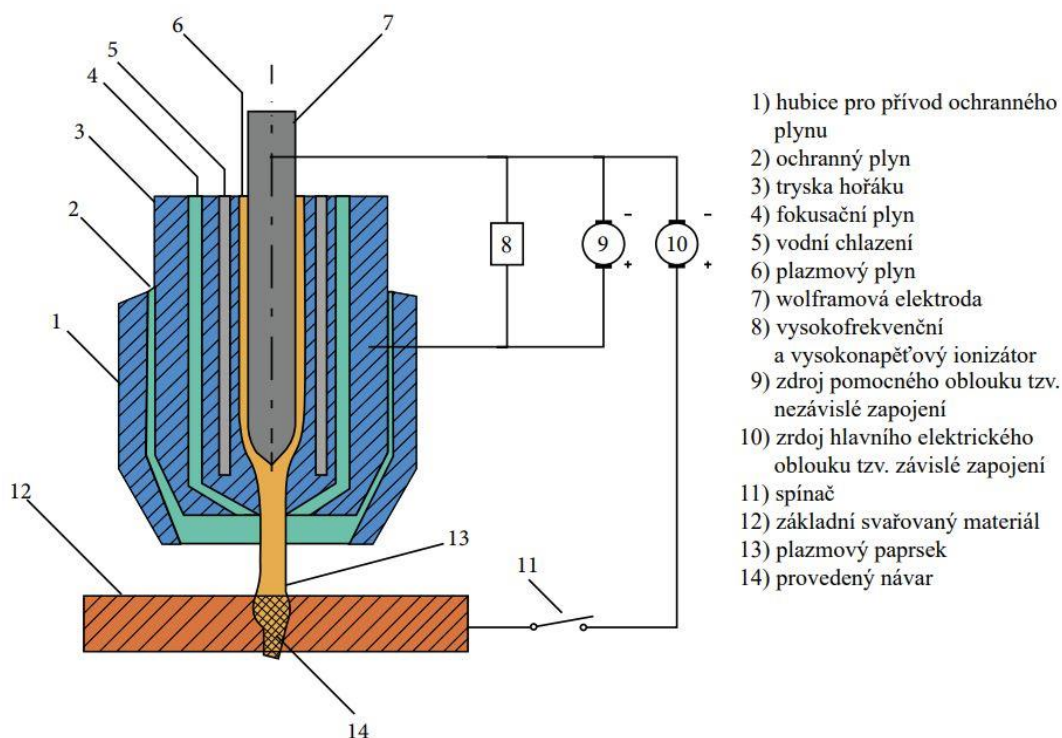
První a zároveň nejvhodnější technologií pro provedení manganového návaru je metoda 152 (plazmové navařování s přídavným materiálem ve formě prášku). Technologie využívání plazmového zdroje tepla při tavných procesech, byla odvozena od metody 141, protože jsou principiálně velmi podobné. Jedná se o rozšířenou metodu pro navařování přídavného materiálu ve formě prášku. Metoda využívá koncentrovaného proudu plazmatu pro natavení přídavného materiálu. Schéma metody navařování kovového prášku a přívod plynů lze podrobně vidět na obr. 5. [13; 14]



Obr. 5 Schéma metody 152 [13].

Látky existují ve čtyřech stavech, ve stavu pevném, kapalném, plynném a ve stavu plazmatu. Samotná plazma je plyn obsahující nabitě částice, jako jsou elektrony nebo ionty, ale jako celek je plazma elektricky neutrální. Ke vzniku plazmatu dochází dvěma způsoby, buď ionizací nebo disociací. Oba způsoby vyžadují dodání značného množství energie (u plazmového svařování, navařování či řezání je zdrojem této energie elektrický oblouk). Při ionizaci dodáváme energii atomu, který se štěpí na záporně nabitý elektron (vyražený z valenčního orbitalu) a kladně nabitý ion (ionizované jádro atomu). Zatímco u disociace je energie spotřebována na štěpení dvouatomových molekul plazmového plynu. Energie dodaná při disociaci je nižší než energie potřebná k ionizaci. U dvouatomových plynů (dusík, vodík, kyslík) proběhne nejprve disociace a následně i ionizace. Stejnorodý plyn se mění na směs iontů, elektronů, atomů atd. Elektrická vodivost plazmy závisí na rychlosti vyražených elektronů a plazma je silně náchylná na působení elektrického a magnetického pole. Aby proběhla úplná ionizace bylo by za potřeby dodat velké množství tepla, jehož teplota by se pohybovala klem 100 000 K. Toho však za normálních podmínek nelze úspěšně dosáhnout, proto je paprsek plazmatu u této technologie pouze částečně ionizován. [13; 14; 15; 16]

Pro vytvoření plazmového paprsku, jak již bylo řečeno, je zapotřebí množství energie a vhodného plynu, který lze dobře ionizovat. U technologií využívajících účinků plazmy se využívá tří druhů plynů. Prvním z nich je plyn plazmový, který se vlivem dodané energie ionizuje a vytváří samotný paprsek plazmatu. Mezi nejčastěji používané plazmové plyny řadíme Ar, Ar v kombinaci s H<sub>2</sub> nebo Ar s He. Průtok těchto plynů se pohybuje od 0,5 do 9 l·min<sup>-1</sup>. V závislosti na použitém plazmovém plynu se také mění teplota výsledného plazmového paprsku, která se pohybuje v rozmezí 9 000 až 35 000 stupňů kelvinu. Použití jednotlivých plazmových plynů a jejich příslušné dosažené teploty jsou uvedeny v tab.5. Druhým používaným plynem je plyn fokusační. Jeho úkolem je zúžení plazmového paprsku a zaostření do požadovaného místa. Průtok fokusačních plynů je od 3 do 18 l·min<sup>-1</sup>. Jako třetí se používá ochranný plyn, jehož hlavním úkolem je zamezit oxidaci svarové lázně. Objemový průtok ochranných plynů se pohybuje od 2 do 20 l·min<sup>-1</sup>, u materiálů náchylnějších na oxidaci (Ti, Zr, Ta) se průtok zvyšuje na 20 až 30 l·min<sup>-1</sup>. Schéma plazmové hlavice, zapojení a přívod plynů je přiblížen na obr. 6. [13; 14; 15]



Obr. 6 Schéma plazmové hlavice [15].

Tab. 5 Plazmové plyny a jejich průměrné dosažené teploty [15].

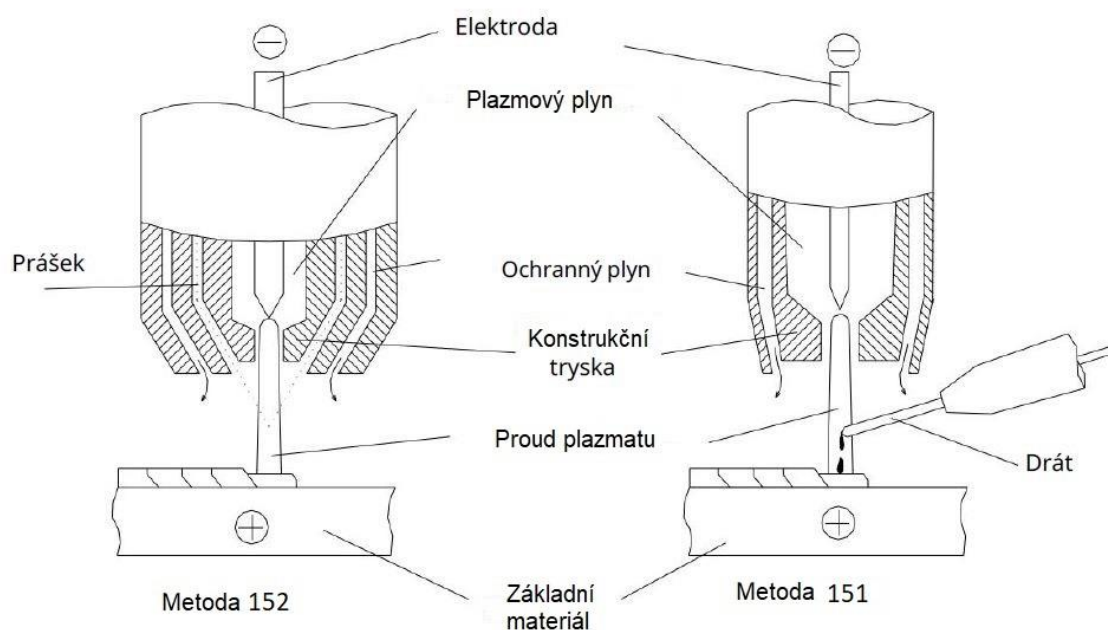
Plazmový plyn	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Ar	He	Stabilizovaná H <sub>2</sub> O
Teplota [K]	9 000	10 000	16 000	20 000	35 000

Jak již bylo řečeno, svařování plazmovým hořákem je odvozeno od technologie 141 (TIG), přičemž keramická hubice u metody 141 je nahrazena kovovou tryskou chlazenou vodou či plynem. Známe jsou dva druhy zapojení, prvním z nich je závislé zapojení (přenesen oblouk), kde je záporný pól připojen na wolframovou elektrodu a kladný pól na základní materiál. Aby mohl být zapálen oblouk mezi elektrodou a materiálem, je v první fázi použit pomocný (pilotní) oblouk, který využívá vysokofrekvenční ionizátor připojený ke kovové trysce. Pilotní oblouk vytvoří vhodné vodivé prostředí, pomocí kterého jsme schopni zapálit hlavní oblouk i na relativně velké vzdálenosti. Závislé zapojení využíváme zejména u svařování, navařování a řezání plazmou. Druhým způsobem zapojení je nezávislé zapojení (nepřesný oblouk). Jeho využití je především v oblasti žárových nástřiků nebo povrchovém kalení součástí. [13; 14; 15]

Pro lepší fokusaci a zúžení plazmového paprsku má plazmový hořák zúženou výstupní trysku. Toto zúžení je také podpořeno fokusačním plynem přiváděným přímo do plazmového paprsku. Jako fokusační plyn bývá použit Ar s příměsí H<sub>2</sub> nebo N<sub>2</sub>. Samotné zúžení plazmového paprsku je způsobeno dvouatomovými plyny, které spotřebovávají velké množství energie na disociaci. Vysoká tepelná kapacita těchto plynů má za následek odebrání tepla z vnějších vrstev plazmatu a vysokou tepelnou vodivostí vodíku je efekt kontrakce paprsku ještě zesílen. Kontrakce paprsku je doprovázena zvýšením teploty, jelikož plazma musí přenést výkon odpovídající nastaveným procesním parametrům. Zvýšení teploty ve zúženém plazmovém paprsku je doprovázeno vyšším stupněm ionizace a zvýšením elektrické vodivosti. Jakmile paprsek plazmatu dorazí k povrchu základního materiálu, nastává proces opačný ionizaci, tzv. rekombinace. Je to proces, kdy dochází ke slučování elektronů s ionty za vzniku atomů. Rekombinace je doprovázena uvolňováním energie ve formě tepla, které je přenášeno do materiálu. Účinnost tepelného přenosu se pohybuje od 70 do 80 %. Vysoká výstupní rychlost plazmatu je spojena se zvětšováním objemu plazmových plynů při jejich ohřevu elektrickým obloukem. Vysoká teplota a dynamická účinnost dopadající plazmy má za následek průnik paprsku hluboko do materiálu. Při svařování, respektive navařování musí být dodržena rovnováha mezi dynamickým účinkem plazmy a povrchovým napětím taveniny, aby při svařovacím procesu nedošlo k vyfouknutí taveniny ze spáry (využití u řezání plazmovým paprskem). Výstupní rychlost plazmatu při svařování a navařování bývá obvykle mezi 200 až 500 m·s<sup>-1</sup>. [13; 14; 15]

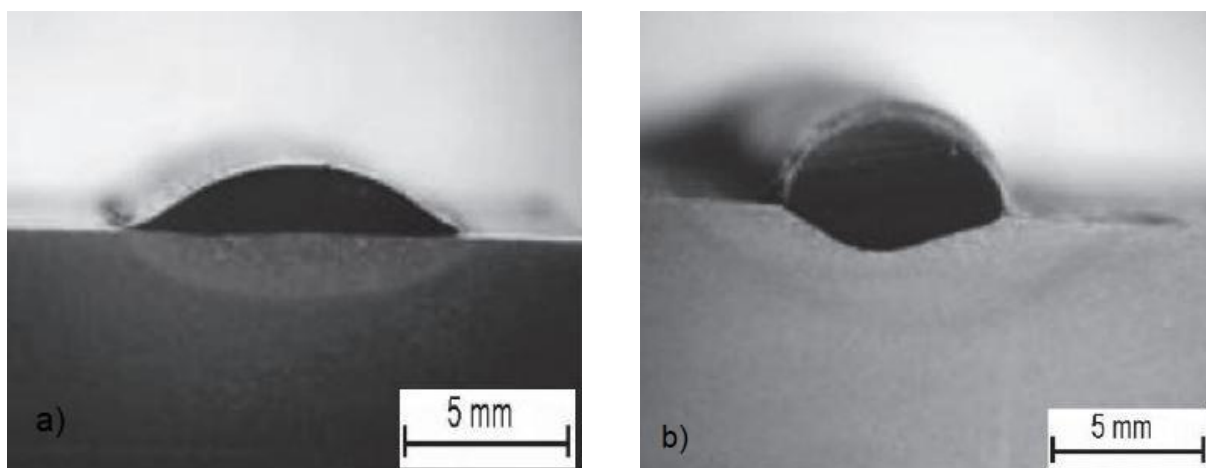
Pro navařování přeneseného oblouku se používá zkratka PTA (Plazma Transferred Arc) a obecně pro obloukové plazmové navařování PAW (Plazma Arc Welding). Plazmové navařování se provádí buď pomocí přídavného materiálu ve formě prášku (metoda 152), nebo je přídavným materiálem kovový drát (metoda 151). Srovnání těchto dvou podobných metod si lze přiblížit na obr. 7. Z obrázku je patrné, že hlavním rozdílem těchto metod je již zmíněný přídavný materiál. U metody 151 je podávací zařízení schopno přidávat drát různých průměrů a různých materiálů konstantně či pulzně do místa natavení. Při procesu navařování metodou 152 je prášek přiváděn do proudu plazmatu pomocí dopravního plynu, kde je nataven a tvoří samotný návar. [13; 15; 16]





Obr. 7 Srovnání metod 152 a 151 [16].

Pokud bychom provedli srovnání z hlediska kvality provedeného návaru, dospějeme k závěru, že metoda 152 je v mnoha ohledech vhodnější, než je tomu u metody 151. První výhodou metody 152 je nízká hodnota zředění přídavného materiálu základovým. Hodnota se u této metody pohybuje od 6 do 10 % [16]. S hodnotou zředění také souvisí výsledná tvrdost svaru, která je u metody 152 vyšší. Další výhodou je lepší smáčivost nataveného kovu u metody 152 a s tím související větší šířka svarové housenky. Tuto skutečnost lze dobře demonstrovat na obr. 8 (a) a (b). Pro navaření obou housenek bylo použito stejného objemového průtoku plazmového plynu,  $3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . [13; 16]

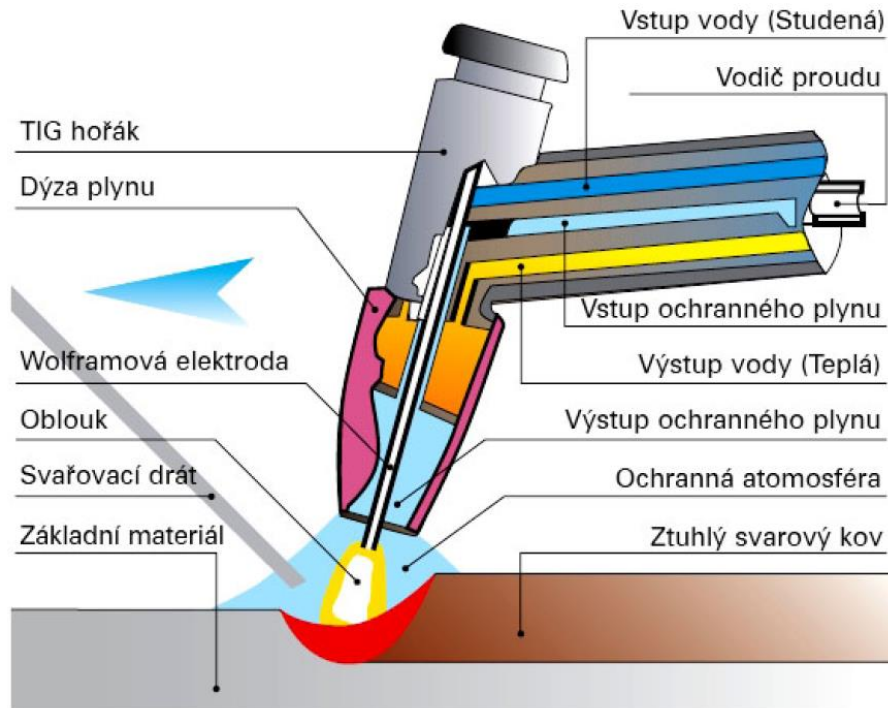


Obr. 8 Návar provedený metodou 152 (a) a metodou 151 (b) [16].

Spolupracující firma SEIKO Flowcontrol, spol. s r. o. ovšem disponuje pouze metodou 152. Pokud bychom chtěli provést návar pomocí přídavného materiálu ve formě drátu (např. zmiňovaný manganový drát Thermanit X), museli bychom použít jinou metodu dostupnou ve firmě. Tou je např. metoda 141 (TIG), která bude více popsána v následující kapitole. [5]

### 2.1.2 Metoda navařování 141 TIG (WIG)

Obloukové svařování (navářování) wolframovou netavicí se elektrodou v inertním plynu lze aktuálně uplatnit v celém spektru svařovaných konstrukcí a zařízení. Elektrický oblouk hoří mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Ochrana elektrody, nataveného materiálu a blízkého okolí je zajištěna pomocí inertního plynu, kterým bývá většinou Ar, He nebo jejich kombinace. Chrání svar (návar) před účinky okolního vzduchu (především v něm obsažených prvcích  $O_2$  a  $N_2$ ). Podávání přídatného materiálu ve formě drátu lze provádět ručně nebo pomocí automatického podavače, pomocí kterého můžeme snadno korigovat rychlost podávání drátu v závislosti na rychlosti svařování. Princip metody je patrný z obr. 9. [17; 18]

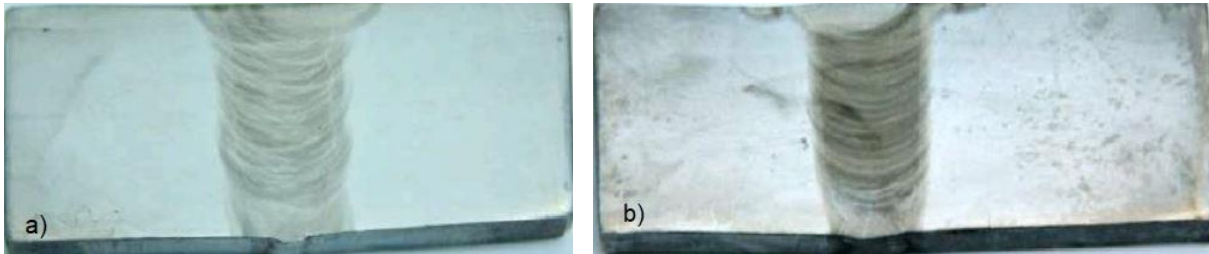


Obr. 9 Navařování metodou 141 [17].

Svařování, respektive navařování metodou 141 dělíme na dvě kategorie pomocí použitých proudů. Proud použitý pro navařování může být střídavý nebo stejnosměrný dle jeho použití. Střídavý proud je používán pro materiály jako jsou Al, Mg, případně jejich slitiny. Zatímco stejnosměrný proud je využit na středně a vysoce legované oceli, Cu, Mo, Ni, Ti a další, tato metoda je méně často použita při svařování (navářování) uhlíkových ocelí, a to z důvodu většího výskytu pórů a z ekonomického hlediska. [17; 18]

Dalším způsobem dělení navařování metodou TIG může být metoda 141 - horký nebo studený drát. Jak již název napovídá, hlavním rozdílem metod je teplota přídatného materiálu ve formě drátu. U klasické metody studeného drátu může být materiál podáván ručně či automaticky přímo do elektrického oblouku, kde je nataven a deponován na povrch navařované součásti. U metody horkého drátu je naopak předehřátý drát přidáván přímo do natavené lázně (za oblouk). Tato metoda je z důvodu předehřevu drátu a jeho vložení do svarové lázně plně automatizována. U metody horkého drátu se uplatňuje odporový ohřev na teplotu blízkou teplotě tavení drátu, aby při jeho kontaktu se svarovou lázní docházelo k minimálnímu ochlazení svarové lázně. Na obr. 10 můžeme vidět srovnání svaru provedeného metodou studeného (a) a horkého drátu (b). Z obrázku je patrné, že svar provedený metodou horkého drátu je pohledově kvalitnější než u metody studeného drátu. Kromě této skutečnosti je hlavní výhodou metody 141 – horký drát nízká hodnota promísení základního a přídatného materiálu. Malého zředění základního a přídatného materiálu je proto často využíváno v chemickém,

ropném a plynárenském průmyslu, kde je kladen požadavek na maximální obsah železa 5 % v oblasti promísení [19]. Pokud jde však o mechanické vlastnosti navařených či svařených materiálů, jsou hodnoty houževnatosti srovnatelné u obou metod. Mechanické vlastnosti návaru závisí především na rychlosti navařování a použitých navařovacích parametrech. Metoda horkého drátu je díky tavení drátu ve svarové lázni produktivnější ve srovnání s metodou studeného drátu. [19, 20]

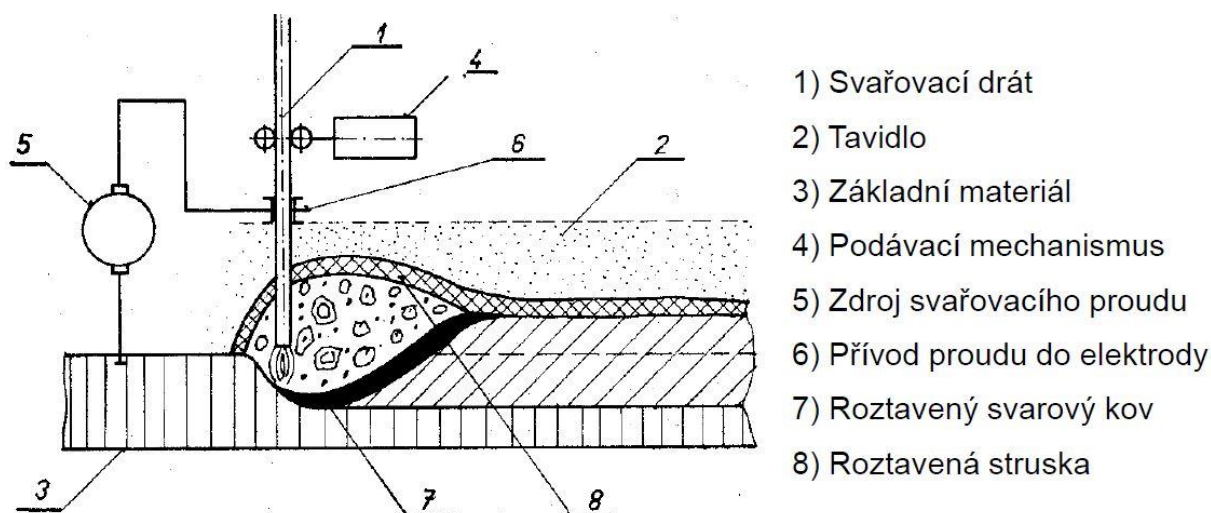


Obr. 10 Svar metoda 141 - studený a), horký b) drát [20].

Ve srovnání s ostatními technologiemi má metoda 141 velké množství výhod, mezi které řadíme např. ochranu návaru a přehřáté oblasti před nežádoucími účinky vzdušných plynů pomocí inertního plynu. Kromě ochrany inertní plyn zabraňuje propalu prvků a tvorbě strusky, proto je zajištěn vznik čistého povrchu návaru. Metoda nevyžaduje použití tavidel a elektrický oblouk je charakteristický vysokou stabilitou v širokém rozsahu navařovacích proudů. Významnou výhodou je také jednoduchá regulace a obsluha zařízení. Metoda je vhodná pro všechny svařovací polohy. Při navařování lze dobře regulovat množství vneseného tepla, tepelně ovlivněná oblast je malá a tím je také minimalizována deformace. Z důvodů zmíněných výhod je tato metoda využívána v oblastech chemického, farmaceutického, potravinářského průmyslu a v odvětví energetiky. Uplatnění nalezneme u žárupevných a žáruvzdorných ocelí použitých na kotle, tepelné výměníky či pece. Lze také svařovat titan a speciální slitiny pro použití v leteckém průmyslu. Neopomenutelným využitím metody 141 je také svařování hliníku a jeho slitin pro oblast strojírenství nebo všeobecné dopravní techniky. [17; 18]

### 2.1.3 Metoda 121 navařování pod tavidlem (SAW)

Spolupracující firma disponuje také automatickým zařízením pro svařování či navařování pod tavidlem. Metodu řadíme opět mezi obloukové metody, jelikož při samotném procesu hoří elektrický oblouk mezi tavící se elektrodou ve formě drátu či pásky (metoda 121, 122) a základním materiálem. Hlavním rozdílem oproti předcházejícím metodám je použití tavidla. Tavidlo chrání elektrický oblouk a natavený přídavný materiál. Při navařování není viditelný žádný oblouk, jiskry či dým, protože je tavidlo v bezprostřední blízkosti oblouku a tavený materiál je sám o sobě také přídavným materiálem. Děje se to díky již zmíněné ochraně tavidlem. Celý proces navařování pod tavidlem je vyobrazen na obr. 11. Tavidla dle výroby a jejich složení lze dělit do čtyř následujících skupin. Tavidla tavená, která vznikají tavením suché směsi v peci a následným chlazením či odléváním do vody. Nevýhodou těchto tavidel je náročné přidávání dezoxidačních a legujících prvků. V pořadí druhou skupinou jsou tavidla keramická vyrobená suchou směsí spojenou za pomoci vodního skla. Dalšími druhy tavidel jsou tavidla sintrovaná vyráběná spékáním prášku za vysokých tlaků. Poslední skupinou jsou aglomerovaná tavidla, která se vyrábějí obdobně jako sintrovaná, nicméně bez působení tlaku. Před použitím se musejí sušit. [12; 21; 22]



Obr. 11 Princip metody 121 [21].

Metoda navařování pod tavidlem bývá používána zpravidla pro návary délky 1000 mm a více, protože jinak není vhodná z ekonomického hlediska. Rozsah tloušťky základního materiálu se pohybuje od 3 do 100 a více mm. Svařovací proud bývá v rozmezí 200 až 2000 A a ovlivňuje průvar přídavného a základního materiálu. Se zvyšujícím se proudem dochází ke zvětšování oblasti průvaru. Použitý proud může být střídavý, ale i stejnosměrný. Průměry drátu se u metody 121 používají od 2 do 6 mm. Při zvyšování hodnoty napětí dochází k rozšiřování svarové housenky. Významnou roli hraje také rychlost svařování, protože při vyšších rychlostech dochází k neprovaření kořene svaru. [12; 21; 22]

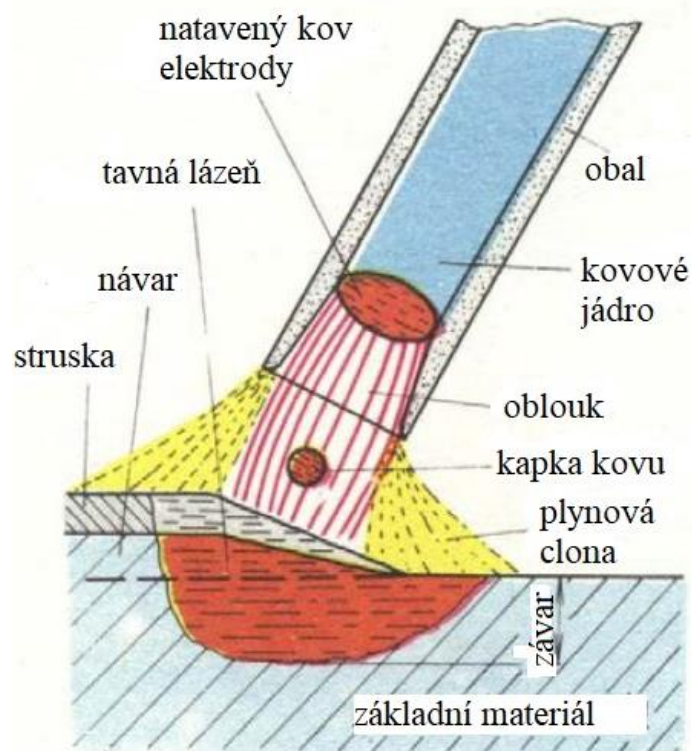
Mezi hlavní výhody metody navařování pod tavidlem řadíme vysokou produktivitu metody, dále pak velký průvar se základním materiálem a vysokou kvalitu svaru či návaru. Nevýhodou této metody může být velká oblast promísení a vyšší hodnoty zředění základního a návarového materiálu. Metodu lze uplatnit pouze v poloze PA (poloze shora). Dále jsou kladeny vyšší požadavky na čistotu návarových ploch a nevýhodou může být i odstraňování přebytečné strusky, která ulpí na návaru. Spolupracující firma používá tuto metodu výhradně na spojování trubek či měřicích členů. [12; 21; 22]

#### 2.1.4 Metoda 111 navařování ruční obalovanou elektrodou

Obdobně jako tomu bylo u předcházejících metod, i metodu 111 řadíme mezi obloukové metody. Při ručním navařování obalovanou elektrodou vzniká elektrický oblouk mezi ní a základním materiálem. Při navařování lze použít jak střídavý, tak stejnosměrný proud. Celý proces navařování metodou 111 vidíme na obr. 12, kde je zobrazeno natavení kovového jádra elektrody a jeho ulpívání na povrchu základního materiálu, přičemž celý proces probíhá pod plynovou clonou a výsledný návar je chráněn struskou. [12; 15; 23; 24]

Navařovací elektroda se skládá z kovového jádra (návarový kov) a obalu. Používané obaly elektrod lze rozdělit do čtyř základních skupin. První skupinou jsou kyselé obaly elektrod (A). Tyto obaly se vyznačují vyšším podílem oxidů železa a dezoxidčních látek. Následující skupinou jsou bazické obaly elektrod (B). Jde o nejrozšířenější skupinu obalovaných elektrod. Obal obsahuje minerály jako je kazivec či vápenec. Posledním používaným obalem je obal rutilový (R), který je tvořen z velké míry oxidem titaničitým a lze jej kombinovat s předcházejícími typy obalů. Samotný obal má zásadní vliv na vlastnosti návaru a ovlivňuje také navařovací proces (stabilní hoření oblouku). Mezi hlavní funkce obalu řadíme





Obr. 12 Navařování ruční obalovanou elektrodou [24].

plynotvornou funkci, která zajišťuje ochranu nataveného kovu před vzdušným kyslíkem a dusíkem, struskotvornou funkci čili tvorbu strusky a formování návaru. Dále zde patří rafinační a legující funkce, díky kterým je zajištěno přidání dezoxidačních a legujících prvků do tavné lázně. [12; 15; 23; 24]

Pro navařování používáme průměry elektrod od 1,6 až do 5 mm. V závislosti na průměru a materiálu elektrod volíme proud (10 až 500 A) a napětí (10 až 50 V). Dosažená teplota oblouku se pohybuje kolem 5000 °C. Sklon elektrody při navařování bývá od 20 do 30 °. Hlavní výhodou metody 111 je její dostupnost a snadné použití, čehož je často využíváno při drobných opravách, svařování nebo navařování jednodušších dílů. Pro navařování rozměrných a přesných dílů se z důvodů ručního provedení návaru nehodí. [12; 15; 23; 24]

### 2.1.5 Navařování laserem (metoda 52)

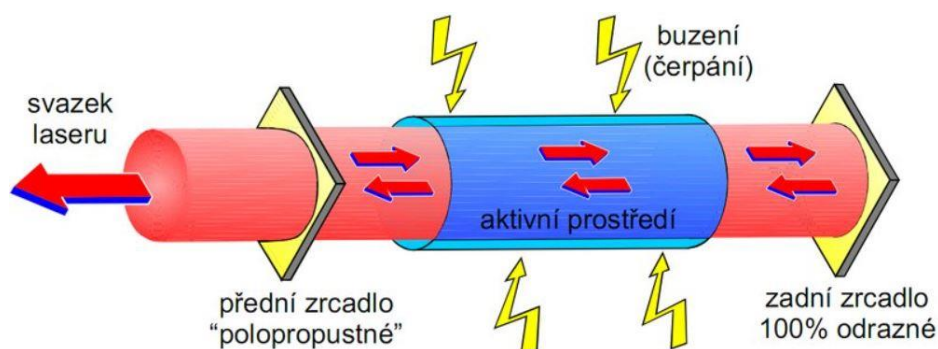
Spolupracující firma technologií laserového navařování nedisponuje. Jedná se o metodu, která se často používá pro navařování velkého množství slitin a mezi nimi i slitin na bázi manganu. V této kapitole bude proto stručně nastíněn popis a princip laserového navařování, ať už to bude plynový (CO<sub>2</sub>) nebo pevnolátkový laser. [12; 15]

Vznik laserového paprsku vychází z principu zesílení světelného paprsku vynucenou emisí záření. Toto zesílení probíhá v aktivním prostředí. Dle prostředí dělíme lasery na dvě hlavní skupiny pevnolátkové a plynové. V aktivním prostředí dochází k vybuzení záření (fotonu). Toto záření dopadá na atom, který se díky tomuto záření dostává do excitovaného stavu (stavu s vyšší energií). Atom v excitovaném stavu se vrací do stavu původního, přičemž jeho energie je vyzářena ve formě fotonu. Tento proces se opakuje a světelná emise je zesílena pomocí dvou zrcadel. První ze zrcadel má odrazivost 100 %, druhé je polopropustné s odrazivostí 80 až 90 %. [12; 15]

Pevnolátkové lasery rozdělujeme na další typy dle druhu použitého materiálu v aktivním prostředí. Druhy používaných pevnolátkových laserů jsou uvedeny v tab. 6. Čerpání vstupní energie je zajištěno kryptonovými výbojkami. Vznik laserového paprsku je patrný z obr. 13. Vytvořený laserový paprsek je veden pomocí zrcadel do laserové hlavy, kde probíhá fokusace na navařovaný materiál. Významnou výhodou pevnolátkových laserů je vedení paprsku laseru pomocí světlovodných kabelů. [12; 15]

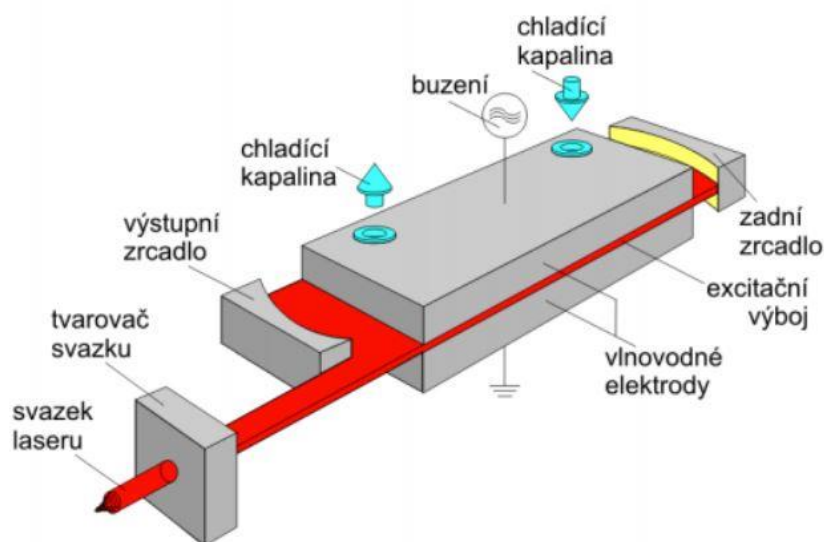
Tab. 6 Druhy pevnolátkových laserů [12].

Název	Aktivní prostředí		Vlnová délka $\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]
	Iont	Materiál	
Rubín	$\text{Cr}^{3+}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,694
Neodymové sklo	$\text{Nd}^{3+}$	Sklo	1,060
Nd: YAG	$\text{Nd}^{3+}$	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	1,065



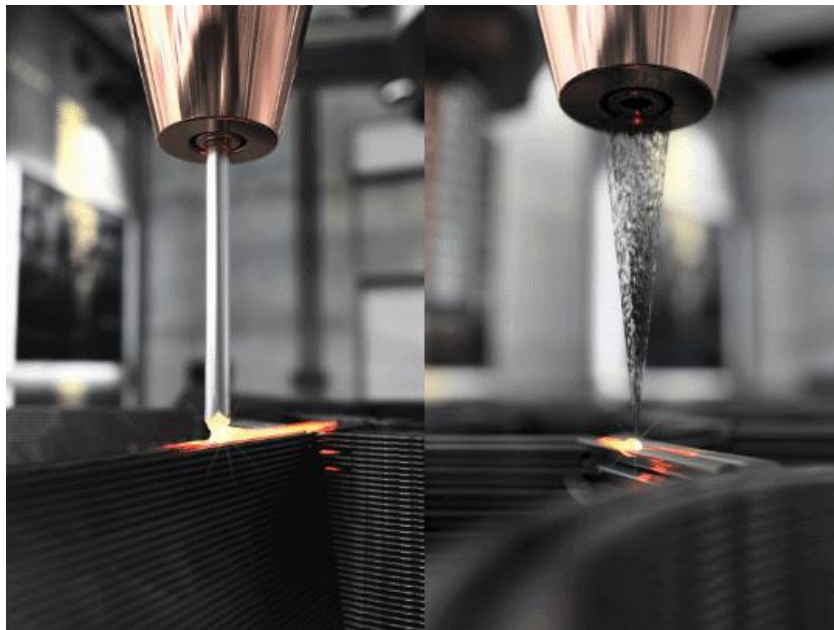
Obr. 13 Vznik laserového paprsku u pevnolátkového laseru [25].

Plynový  $\text{CO}_2$  laser jako aktivní prostředí používá směs plynů  $\text{He} + \text{N}_2 + \text{CO}_2$ . Tyto plyny jsou uzavřeny ve skleněné trubici. Poměry plynů v trubici mohou být různé a čistota těchto plynů musí být vysoká. Vznik laserového paprsku je přiblížen na obr. 14. [12; 15]



Obr. 14 Plošný chlazený  $\text{CO}_2$  laser [12].

U navařování laserem dochází k natavení přídavného materiálu (drátu či prášku, viz obr. 15). Částečně nataven je také základní materiál. Natavený přídavný materiál dopadá do lázně na základním materiálu, kde dochází ke spojení těchto dvou materiálů. Hodnota zředění návarového a základního materiálu je velmi nízká díky vysoké přesnosti, zaostření a vhodné korekci navařovacích parametrů. Během celého procesu je nutné do místa návaru přivádět ochranný plyn. Jako ochranné plyny se nejčastěji používají Ar, Ar + CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> nebo He. Plyn zajišťuje ochranu před vzdušným kyslíkem a chrání návar před oxidací, kromě ochrany návaru také vychyluje laserem vytvořenou plazmu, která vzniká ionizací kovových par. Obsah uhlíku v navařovaném materiálu je omezen na 0,2 %, protože při vysoké rychlosti ochlazování by mohlo dojít ke tvorbě martenzitu. Hustota výkonu se při navařování pohybuje v hodnotách až 10<sup>6</sup> W·cm<sup>-2</sup>. [12; 15]



Obr. 15 Navařování laserem pomocí přídavného materiálu ve formě drátu a prášku [26].

Mezi hlavní výhody navařování laserem řadíme jeho vysokou adaptabilitu a možnost rychlé změny technologie (svařování, navařování a řezání). Navařované plochy nemusí být speciálně očištěny, jelikož nečistoty na povrchu jsou vysokou teplotou odpařeny. Při navařování laserem je také zajištěna vysoká přesnost a malá tepelně ovlivněná oblast. Velkou výhodou může být také již zmíněná oblast promísení, která může dosahovat nízkých, ale i relativně vysokých hodnot v závislosti na nastavených procesních parametrech. V oblasti navařování součástí pro jadernou energetiku byl proveden unikátní experiment [27], který srovnává navařování metodou TIG a laserovým svazkem. Z výsledků tohoto experimentu je patrné, že návar metodou TIG je ve většině ohledů kvalitnější (tvrdost, houževnatost, promísení, pevnost a poměrné prodloužení). Navzdory tomu laser měl mnohem větší rychlost navařování. Zhoršení vlastností navařované vrstvy pomocí laserového svazku bylo nejspíše způsobeno nevhodně zvolenými parametry navařování. Nevýhodou technologie navařování laserem může být její vysoká pořizovací cena a spotřeba plynů potřebných k provozu. [12; 15; 27]

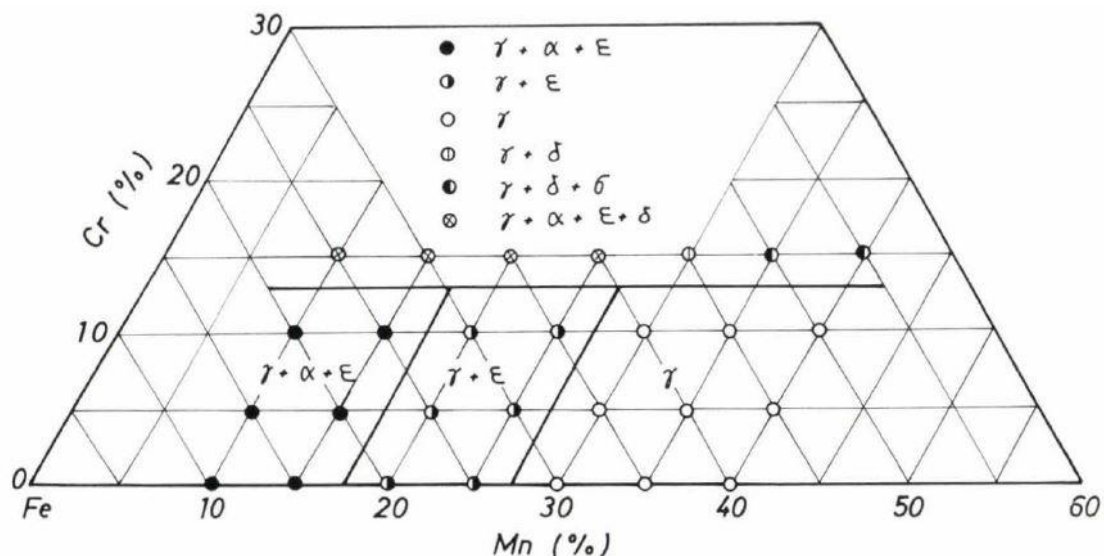
## 2.2 Manganové slitiny

Manganové slitiny v závislosti na obsahu manganu a dalších příměsových prvků lze dělit do následujících skupin. Obsahy manganu a ostatních prvků ve slitině se totiž přímo podílejí na výsledných mechanických i fyzikálních vlastnostech oceli. Zastoupení jednotlivých prvků ovlivňuje také proces výroby manganových slitin, proto se slitiny, v nichž je podíl prvků

nevhodný nevyrábějí nebo musí být dodržen přesný technologický postup, aby byl zhotoven vyhovující materiál či součást. [4; 28]

Mangan spolu s niklem, dusíkem a dalšími bývá označován jako austenitotvorný prvek neboli prvek, který rozšiřuje oblast austenitu u ocelí. Pro výrobu austenitických ocelí je často použit nikl, který se nahrazuje právě manganem z důvodu nižší ceny tohoto prvku. V závislosti na obsahu prvků jako je Mn, Cr, Ni či N dělíme manganové slitiny do tří nejpoužívanějších skupin. V následujících odstavcích budou popsány vlastnosti, chemické složení a použití daných manganových slitin. [4; 28]

Prvním zástupcem manganových slitin jsou austenitické chrommanganové oceli s přísadou dusíku. Ze stabilního diagramu Fe-Mn-Cr, který vidíme na obr. 16, je patrné, že pro dosažení homogenní fáze gama jsou zapotřebí vysoké hmotnostní podíly manganu a nízké podíly chromu. Nízký obsah chromu však nemusí zajišťovat korozní odolnost, avšak vyšší hmotnostní podíly chromu naopak vedou ke tvorbě fáze sigma, která se objevuje v matici a způsobuje křehnutí materiálu. Z těchto důvodů nelze zhotovit ocel se zaručenou korozní odolností a vyhovujícími vlastnostmi. Aby došlo k odstínění nežádoucích vlastností vyšších obsahů chromu a zachování korozní odolnosti, je nutné přidat další austenitotvorný prvek. Tímto prvkem může být dusík nebo dusík v kombinaci s niklem. U chrommanganových slitin s příměsí dusíku se obsah manganu pohybuje od 14 do 17 %. Obsah dusíku rozpuštěného v austenitu je potom mezi 0,32 až 0,42 %. Tento druh ocelí bývá tepelně zpracován rozpouštěcím žháním při teplotě 1100 °C po dobu 2 hodin v závislosti na tloušťce stěny. Oproti tomu obsah manganu u chrommanganových ocelí s příměsí niklu je od 8 do 10 %, obsah niklu od 4 do 6 % a obsah dusíku mezi 0,15 až 0,25 %. Využití těchto ocelí se uplatňuje především v potravinářském průmyslu a ve strojírenství. Z důvodů náchylnosti na tvorbu mezikrystalové koroze se nepoužívají v chemickém průmyslu. [4; 28; 29]



Obr. 16 Část diagramu Fe-Mn-Cr s obsahem C 0,1 % a za normální teploty [29].

Další významnější skupinou manganových slitin jsou tzv. manganchromové oceli. Obsah manganu v tomto druhu ocelí bývá od 13 do 22 %, přičemž podíl chromu se pohybuje v rozmezí 2 až 16 % v závislosti na obsahu manganu (čím více Mn tím méně Cr a naopak). Hlavní využití těchto ocelí najdeme jako náhradu za nákladnější chromniklové oceli, kde je opět nikl nahrazen manganem. Použití manganchromových ocelí nalezneme zejména tam, kde si musí materiál zachovat dostatečnou vrubovou houževnatost i v záporných teplotách. Speciálním příkladem manganchromové oceli je ocel 17 481. Tato ocel je stabilizována titanem a po tepelném zpracování dochází ke zvýšení meze kluzu a meze pevnosti při zachování plastických vlastností manganchromových ocelí. Vrubová houževnatost této oceli se u plechů do tloušťky 30 mm



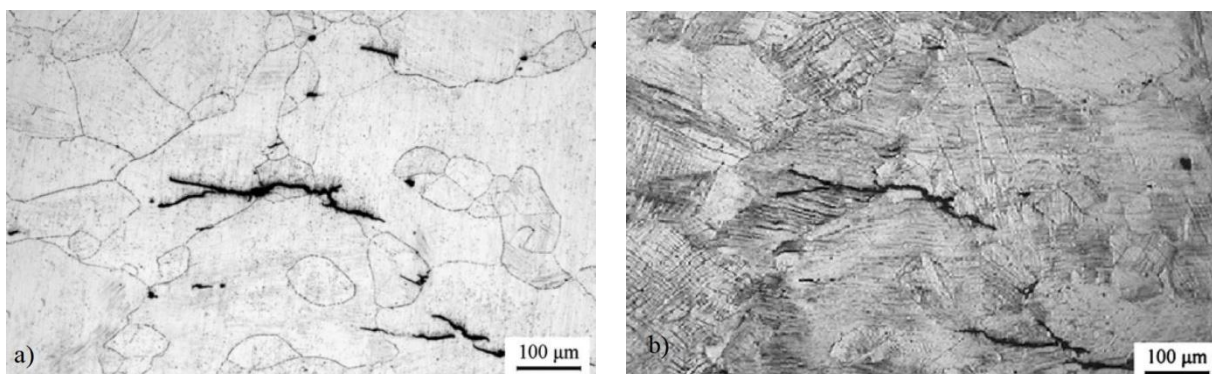
pohybuje kolem  $30 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$  i za teplot blízkých  $-200 \text{ }^\circ\text{C}$  [4]. Jako tepelné zpracování těchto ocelí je prováděno rozpouštěcí žhání v teplotách od  $1000$  do  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  a následné ochlazování na vzduchu. V úvahu přichází také žhání ke snížení vnitřního pnutí, přičemž teplota tohoto tepelného zpracování může být až  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ , protože materiál neprodělává během ohřevu žádné změny. [4; 28; 30]

Jednou z nejvýznamnějších skupin manganových slitin jsou austenitické manganové oceli s obsahem manganu od  $11,5$  do  $14,5 \%$  a obsahem uhlíku  $1$  až  $1,5 \%$ . Tato skupina ocelí byla objevena a v roce  $1883$  patentována R. A. Hadfieldem, po němž bývá také označována jako Hadfieldova ocel. Pro své specifické vlastnosti je tento materiál neodmyslitelnou součástí strojírenství a téměř všech odvětví průmyslu. [4; 28; 30]

Vliv na výsledné mechanické vlastnosti mají krom jiného především podíly jednotlivých prvků ve slitině. Prvkem, který ovlivňuje odolnost proti opotřebení, ale zároveň zvyšuje pravděpodobnost tvorby trhlin, je uhlík. Se stoupajícím množstvím uhlíku roste odolnost proti opotřebení, avšak také sklon ke tvorbě trhlin. Vyšší obsah uhlíku způsobuje ve slitině tvorbu karbidů, které se vytvářejí na hranicích zrn. Odstraněním tohoto problému může být snížení procenta uhlíku nebo zjemnění zrna austenitické matrice pomocí malého množství titanu. Mangan při podílu  $11$  až  $14 \%$  ve slitině nemá významný vliv na odolnost proti opotřebení, nicméně kladně ovlivňuje plastické vlastnosti oceli. Významným faktorem je také obsah křemíku, který musí být kontrolován, jelikož při podílech větších než  $0,7 \%$  způsobuje horší rozpustnost uhlíku v austenitu a podporuje tvorbu karbidů. [4; 28; 30]

Tepelné zpracování Hadfieldovy oceli se provádí z důvodů eliminace karbidů železa a manganu, které jsou vyloučeny na hranicích zrn a snižují houževnatost ocele. Provádíme rozpouštěcí žhání při teplotách  $1030$  až  $1080 \text{ }^\circ\text{C}$ . Výdrž na teplotě je přímo úměrná tloušťce zpracovávaného materiálu. Po výdrži na teplotě je materiál prudce ochlazen do vody, aby nedošlo ke zpětnému vyloučení nežádoucích karbidů. Hadfieldova ocel má velkou tažnost, ale nízkou tepelnou vodivost. Z důvodů nízké tepelné vodivosti musíme komplikovanější součásti zahřívat pozvolna maximálně  $100 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ . [4; 28; 30; 31]

Mechanické vlastnosti manganové oceli závisí především na velikosti austenitických zrn a množství karbidů. Hadfieldova ocel je charakteristická vlastní houževnatostí, zpevněním a odolností vůči některým typům abrazivního a adhezivního opotřebení. Pro manganové oceli je charakteristickou vlastností zpevňování při působení zvýšeného tlaku či rázových zatížení. Samotný mechanismus zpevnění vzniká při plastické deformaci oceli a je způsoben pohybem soustavy dislokací, které při svém pohybu iniciují tvorbu nových vrstevných chyb a dvojčatových lamel. Tím je způsobeno zpevnění materiálu v počáteční fázi. Ve druhé fázi strukturální poruchy zabraňují pohybu soustavy dislokací, tím dochází k navýšení jejich hustoty a dodatečnému zpevňování oceli. Zpevnění Hadfieldovy oceli je dobře viditelné na obr. 17, kde na obr. 17 a) je struktura v nezpevněném, b) zpevněném stavu. [4; 28; 30; 32]



Obr. 17 Struktura manganové oceli před a) a po b) deformačním zpevnění [32].

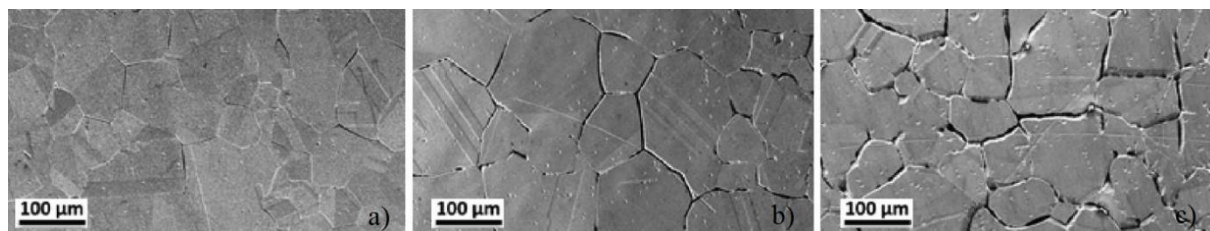
Vlastnosti materiálu jsou také ovlivněny velikostí zrna. Stejně jako u většiny ocelí, také u manganových austenitických ocelí je vhodná jemnozrná struktura. Hranice zrn představují překážky pro pohyb dislokací, proto je výhodné, aby měl materiál jemné zrna. To má opět za následek zvýšení hustoty dislokací na hranicích zrn a nárůst pevnosti materiálu. Jemné zrna kromě pevnostních vlastností také podporuje odolnost materiálu proti abrazivnímu opotřebení. [4; 28; 30]

Získání přesné hodnoty tvrdosti austenitické manganové oceli je velmi obtížné, protože se při působení tlaku při měření začne materiál zpevňovat. Záleží také na velikosti zatížení a použitém indentoru pro vniknutí do materiálu. Hodnoty se proto výrazně liší, např. tvrdost nezpevněné manganové oceli se pohybuje kolem 270 HV, zatímco u ocelí v provozu (zpevněných) je hodnota násobně vyšší, mezi 725 až 760 HV. Tepelně zpracované manganové oceli dosahují za pokojových teplot vysokých hodnot vrubové houževnatosti, jedná se o hodnoty kolem  $300 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Výrazně vysokou vrubovou houževnatost si materiál zachová až do teplot  $-70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Jednou z nevýhod Hadfieldovy oceli je relativně nízká mez kluzu, jelikož při působení zatížení v plastické oblasti těsně nad mezí kluzu může dojít k plastické deformaci součásti ještě před jejím zpevněním. To může negativně ovlivnit provozuschopnost součásti. Hodnota meze kluzu je také závislá na teplotě, stejně jako mez pevnosti, tažnosti a houževnatosti. Mez kluzu s klesající teplotou mírně roste a její hodnota se pohybuje kolem 400 MPa. Mez pevnosti roste až do teplot kolem  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  a potom zůstává stejná, meze pevnosti manganových ocelí se pohybují v rozmezí hodnot 800 až 1000 MPa. Hodnota napětí při přetržení, čili hodnota, při níž dojde k narušení spojitosti materiálu, vzrůstá do teploty  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  a následně klesá. Napětí při porušení soudržnosti materiálu se pohybuje od 1400 do 1600 MPa. Stejně jako závislost napětí při přetržení na teplotě můžeme popsat závislost tažnosti do přetržení, které má do záporné teploty  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  mírný nárůst a za touto teplotou prudší pokles. I tak se ale hodnoty tažnosti pohybují kolem 50 až 60 %. Využití těchto ocelí potom nalezneme zejména v těžebním průmyslu, jako např. rypadla, součásti důlních vrtáků, radlice, korby nákladních automobilů atd. Významné využití také nalezneme v železniční dopravě, při výrobě namáhaných částí železničních tratí (výhybky). [4; 28; 30; 32]

### 2.3 Korozivzdornost manganových slitin

Korozivzdornost jako taková je schopnost materiálu odolávat korozi. Korozi dělíme na chemickou a elektrochemickou. Koroze je převážně způsobena kapalnými nebo plynnými látkami a jedná se o reakci, při níž kovy nebo slitiny přecházejí do oksyločeného stavu. Jedná se o proces, při němž kovy ztrácejí své volné elektrony a dochází k degradaci materiálu. Na proces koroze má výrazný vliv teplota (vyšší teplota značí vyšší náchylnost ke korozi) a prostředí, ve kterém se součást pracuje. Korozivzdornost u ocelí je ovlivněna legujícími prvky ve slitině. Prvky, které podporují odolnost proti korozi jsou např. chrom, nikl, mangan a další. Pouze přítomnost těchto prvků v určitém množství však nemusí vždy korozivzdornost zajišťovat. Je to proto, že jednotlivé prvky spolu mohou interagovat a tvořit sloučeniny, např. karbidy. Prvky přítomné ve sloučeninách nejsou rozpuštěny v matrici a nepodílejí se na ochraně materiálu před korozi. Korozivzdorné oceli můžeme dělit do skupin podle výsledné struktury v oceli. Jedná se o oceli austenitické, feritické, martenzitické a duplexní (dvoufázové). Vzhledem k tomu, že manganové slitiny spadají především do oblasti austenitických ocelí, bude rozebrána především tato skupina. [4; 33]

Druhy korozního napadení můžeme rozdělit na několik druhů podle toho, jakým způsobem se koroze v daném místě koroze projeví. Prvním velmi rozšířeným druhem je plošná koroze po celém povrchu materiálu. Další druhy řadíme do oblasti tzv. nerovnoměrné koroze, kam spadá bodová, důlková, štěrbinová či nitková. Korozivzdorné austenitické oceli jsou náchylné především na korozi pod napětím, kdy vznikají v materiálu mikrotrhliny v důsledku působení mechanického zatížení. Stejně tak jako koroze pod napětím i mezikrystalická koroze často vzniká u korozivzdorných austenitických ocelí. Tento druh koroze je patrný na obr. 18. Mezikrystalická koroze vzniká při práci materiálu za teplot od 400 až do 850 °C. Vznik mezikrystalické koroze je způsoben vyloučením karbidů chromu na hranicích zrn za působení vyšších teplot. [33; 34]



Obr. 18 Mezikrystalická koroze austenitické oceli [34].

Austenitické manganové slitiny za normálních okolností korozivzdorné nejsou. Korozní odolnost je však mírně vyšší než u klasických uhlíkových ocelí. Zvýšenou afinitu ke korozi mají manganové oceli, které jsou v provozu vystaveny větší míře opotřebení, nebo se vyskytují v agresivnějším prostředí. Pro dosažené chtěné korozní odolnosti je možno zvolit dvě metody. První metodou může být povrchová úprava manganové slitiny. Druhá metoda vychází z konceptu legování ocelí vhodným množstvím intersticiálních prvků, jako je C a N. [4; 33]

Studie jako jsou [35; 36; 37] dokazují, že je možné vyrobit manganchromovou ocel, která má zvýšenou odolnost proti korozi. V experimentu [35] byly použity dva zkušební vzorky s různými obsahy a podíly uhlíku a dusíku. Chemické složení obou vzorků najdeme v tab. 7. Pro srovnání byla také testována Hadfieldova ocel s 12 % manganu a 1,2 % uhlíku. Ze studie vyplývá, že při dodání intersticiálních prvků (C + N) došlo k výraznému nárůstu meze kluzu i meze pevnosti, tvrdosti a houževnatosti. Při zkoušce odolnosti proti opotřebení byly výsledky téměř shodné, mírný pokles odolnosti byl zaznamenán u vzorku č. 2. U zkoušky korozivzdornosti byly použity vodné roztoky NaCl a H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>. Na rozdíl od Hadfieldovy oceli měla ocel Cr18Mn18 (C+N) mnohem menší hmotností úbytky. Závěrem tedy lze říci, že ocel legovaná uhlíkem a dusíkem má mechanické vlastnosti lepší než Hadfieldova ocel. Odolnost proti opotřebení je srovnatelná u všech zkoušených vzorků. Manganchromová ocel legovaná prvky uhlík a dusík má dobrou odolnost proti korozi. Studie také naznačují, že vhodný obsah uhlíku v kombinaci s dusíkem by se měl pohybovat kolem 0,85 %. [4; 33; 35; 36; 37]

Tab. 7 Chemické složení manganchromových ocelí v hm. % [35].

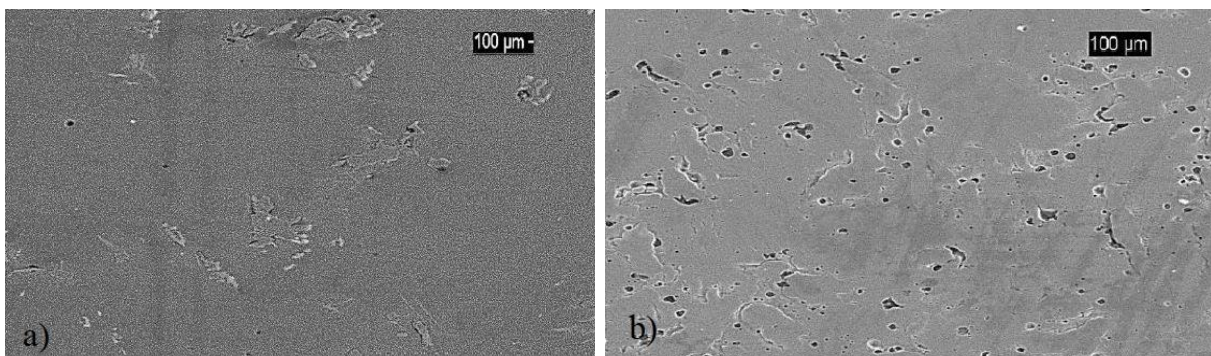
Prvky	N	C	Cr	Mn	Ni	Si	Mo	C+N	C/N
Vzorek č. 1	0,614	0,344	18,1	19,0	0,34	0,26	0,06	0,96	0,56
Vzorek č. 2	0,578	0,489	18,9	19,0	0,39	0,40	0,08	1,07	0,85



## 2.4 Technologie navařování a svařování slitin manganu

Manganové slitiny spadají do oblasti austenitů, proto při navařování postupujeme obdobně jako u navařování austenitických ocelí s určitými výjimkami. Manganová ocel je nemagnetická extrémně houževnatá. Pod teplotami 1000 °C jsou fázové přeměny této oceli potlačeny vysokým obsahem manganu. [4; 38]

Manganové slitiny je možno navařit za určitých podmínek. Při navařování používáme výhradně obloukové či laserové metody. Pokud provádíme navařování ruční obalovanou elektrodou (metoda 111), měla by mít sklon ve směru kladení návaru, aby nedocházelo ke stlačování oblouku a byl zajištěn dobrý odvod plynů z místa navařování. Vnesené teplo by se mělo pohybovat v co možná nejmenších hodnotách. Teplota v tepelně ovlivněné oblasti by neměla překročit hodnotu 300 °C a u tlouštěk materiálu do 12 mm by měla být maximální dosažená teplota ještě nižší, kolem 250 °C [38]. Tuto teplotu lze částečně regulovat navařovacími parametry. Je nutné používat mezihouseňkovou teplotu (interpass), jelikož při překročení mezní teploty v tepelně ovlivněné oblasti může docházet k vylučování karbidů. Karbidy způsobí zkřehnutí materiálu a snížení jeho lomových vlastností, pevnosti a houževnatosti. Pokud se u procesu svařování dosáhne vysokých teplot v tepelně ovlivněné oblasti může také docházet k ochuzení (difuzi) některých prvků ve slitině. Jde o prvky jako je např. chrom, čímž je negativním způsobem ovlivněna korozní odolnost materiálu. Dále je také vhodné vyloučit přehřev. Ten se doporučuje pouze pokud je teplota oceli v záporných hodnotách. Výjimečně lze použít přehřev do 100 °C. V některých aplikacích můžeme použít chlazení tepelně ovlivněné oblasti vodou pro urychlení procesu navařování. Důsledky chlazení přídavného materiálu můžeme pozorovat na obr. 19, kde vidíme množství vyloučených karbidů v závislosti na tom, zda bylo použito chlazení či nikoliv. Chlazením je zamezeno vzniku nežádoucích karbidů, nicméně je možné, že proces chlazení bude mít vliv na kvalitu provedeného návaru. Ovlivněna nejspíše bude také struktura základního materiálu (zakalení feritické či perlitické matrice na martenzit), což by mohlo mít nepříznivý vliv na výsledné vlastnosti součásti. Stejně jako u všech metod svařování či navařování by přídavný materiál měl být skladován na suchém místě, aby se zabránilo zvlhnutí materiálu a při navařování nedocházelo ke vnášení vodíku do návaru. Podobně i povrch před samotným navařováním by měl být očištěn od nežádoucích částic pískových inkluzí, pórů, strusky a podobně. Očištění návaru je vhodné provést bezprostředně po navařování. Dochází ke snížení vnitřního napětí a tím i deformace při chladnutí a smršťování součásti. Manganové slitiny se vyznačují nízkou tepelnou vodivostí a tepelnou roztažností, to má za následek vysoké teplotní gradienty a vysoká zbytková napětí. Proto je nutné s těmito deformacemi při navařování počítat. Při vícevrstevném navařování nebo svařování musí být předcházející návar také řádně očištěn před nanesením další vrstvy materiálu. [4; 30; 38; 39; 40]



Obr. 19 Manganový návar s chlazením a) a bez chlazení b) [38].

## 2.5 Základní materiál (uhlíková ocel)

Jako základní materiál (trubka) bude použita zmíněná uhlíková ocel ASME SA-106 Gr.C (chemické složení nalezneme v tab. 2). Pro uhlíkovou ocel je typická nízká odolnost proti korozi a oxidaci. Tyto oceli mění své vlastnosti, jako je např. pevnost, tažnost a další, se zvyšující se teplotou. Proto je při jejich volbě vhodné počítat s vlastnostmi, jako jsou nízká prokalitelnost, výrazný pokles tvrdosti a pevnosti při zvýšených teplotách (např. žíhání) a již avizovaná nízká odolnost proti oxidaci a korozi. [15; 41]

U navařování materiálu na uhlíkovou ocel o provedení kvalitního návaru rozhoduje více faktorů. Hlavními faktory jsou chemické složení uhlíkové oceli a použitá metoda navařování, procesní parametry a teplotní cykly v samotném navařovém spoji a tepelně ovlivněné oblasti. Pokud jde o chemické složení, významnou roli zde hraje právě obsah uhlíku. Ten se pohybuje od nízkých obsahů až po hodnotu 1,7 % C, ale u většiny uhlíkových ocelí je obsah C do 1,3 % [41]. Uhlík se v nelegovaných ocelích podílí na zvyšování pevnosti a tvrdosti, současně však zhoršuje plastické vlastnosti materiálu. Tento jev může být nežádoucí při navařovacím procesu a může vést ke vzniku vyšších hodnot pnutí a ke tvorbě trhlin. Z tohoto důvodu můžeme navařovat ocel s obsahem C do 0,25 % bez použití zvláštních postupů. Vyšší procento uhlíku v tepelně ovlivněné oblasti způsobí přeměnu austenitu na martenzit, což je právě doprovázeno zvýšením tvrdosti, poklesu houževnatosti a náchylnosti materiálu na tvorbu trhlin. Uhlíkové oceli s obsahem C nad 0,25 % jsou podmíněně svařitelné a při jejich svařování (navařování) je třeba využít zvláštních postupů, jako je např. předehřev. Předehřev snižuje rychlost ochlazování materiálu a prodlužuje dobu přeměny austenitu. Tím je zajištěn nižší obsah martenzitu ve struktuře (max. obsah martenzitu by měl být 50 %, aby nedocházelo ke tvorbě trhlin), jak uvádí literatura [41]. V tab. 8 jsou znázorněny teploty předehřevu pro jednotlivé obsahy uhlíku v hm. %. [15; 41]

Tab. 8 Teplota předehřevu uhlíkové oceli v závislosti na obsahu C [41].

Obsah uhlíku [hm. %]	Teplota předehřevu [°C]
0,2 až 0,3	100 až 150
0,3 až 0,45	150 až 275
0,45 až 0,8	275 až 425

Pro posouzení vlivu jednotlivých prvků na kvalitu provedeného návaru je jednou z charakteristik uhlíkové oceli tzv. uhlíkový ekvivalent značený  $C_e$ . Pro jeho výpočet se používají různé druhy vzorců v závislosti na tom, o jakou ocel se jedná (jaké má chemické složení). V závislosti na hodnotě uhlíkového ekvivalentu lze dopočítat vhodnou teplotu předehřevu dané oceli. Opět můžeme použít více vztahů v závislosti na použitém materiálu a aplikaci. [15; 41]

Významný vliv na kvalitu návaru má také druh použité metody navařování a navařovací parametry procesu. Je ovlivněno množství vneseného tepla, velikost tepelně ovlivněné oblasti a zrn základového materiálu. Ovlivněny jsou také deformace a zbytkové napětí vznikající při tuhnutí návaru. Velkou roli hraje také rychlost ochlazování návaru a ovlivněné oblasti. Vysoká rychlost ochlazování může vést ke vzniku nežádoucích tvrdých a křehkých fází, jako je martenzit či bainit. Vliv rychlosti ochlazování v závislosti na výsledném fázovém složení nalezneme v diagramech ARA „in situ“ (anizotermický rozpad austenitu v návaru). Diagramy se liší podle chemického složení ocelí. Podobně i rychlost ochlazování závisí na materiálu (odvodu tepla), velikosti tepelně ovlivněné zóny, vneseném teple, teplotě předehřevu, tloušťce materiálu (čím silnější materiál, tím větší je rychlost ochlazování) a dalších faktorech. [15; 41]

V dané aplikaci, čili při provedení manganového návaru ve střední části Venturiho trubice, je předehřev trubky z uhlíkové oceli zbytečný. Obsah uhlíku je totiž 0,21 % a hodnota uhlíkového ekvivalentu nepřevyšuje hodnotu 0,5. Předehřev vylučuje také fakt, že u navařování manganových ocelí se předehřívání nedoporučuje. [15; 41]

## 2.6 Návar ze slitin niklu

Vlastnosti návaru manganové slitiny budou částečně porovnávány s vlastnostmi niklových slitin. V této kapitole budou přiblíženy vlastnosti niklových slitin a jejich použití v praxi. Rozebrána bude také problematika provedení návaru tohoto materiálu. [4; 41]

Nikl a niklové slitiny jsou charakteristické svými vlastnostmi. Slitiny na bázi niklu jsou využívány pro výbornou korozní odolnost. Uplatnění nalezneme u materiálů, které musí zajišťovat žáruvzdornost a žárupevnost. Tyto slitiny se také uplatňují v odvětvích, kde jsou žádoucí speciální fyzikální vlastnosti. Jde o materiály např. se zvláštním magnetickým nebo odporovým chováním a různou hodnotou součinitele roztažnosti. Díky těmto vlastnostem nalezneme niklové slitiny ve většině průmyslových odvětví, především v potravinářském a farmaceutickém průmyslu, v jaderné energetice, chemickém průmyslu a také v elektrotechnice. [4; 41]

Používané slitiny niklu jsou většinou legovány prvky jako je Cr, Fe, Cu, Mo či Co. Nejběžnější slitiny niklu a technického niklu jsou uvedeny v tab. 9. Jako technický nikl označujeme slitinu s obsahem Ni minimálně 99 %. [4; 41]

Tab. 9 Nejpoužívanější slitiny niklu a technického niklu [41].

Druh slitiny	Chemické složení [hm. %]						Mez pevnosti $R_m$ [MPa] (žíhaný stav)
	Ni	Cu	Cr	Fe	Co	Mo	
Ni 99,5	99,5	0,2	-	0,05	-	-	340 až 550
NiCu30	66,5	31,5	-	1,2	-	-	420 až 580
NiCr20	76,0	-	19,5	-	-	-	Min. 650
NiCr16Fe8	76,0	-	15,5	8,0	-	-	550 až 690
NiCr15Fe24	57,0	-	16,0	25,0	-	-	Min. 640
NiCr22Fe17	47,0	-	22,0	-	6,5	2,5	Min. 710

Niklové slitiny můžeme navařovat téměř všemi dostupnými metodami. Zvláštní postupy navařování nutno využít pouze u precipitačně vytvrzených slitin. Při navařování slitin s hlavním podílem niklu je nutné dbát především na čistotu přídavného materiálu. Problematické mohou být prvky jako S, C a Pb. Navařujeme výhradně bez předehřevu. U navařování je také vhodné dodržet teplotu interpass, která bývá do 150 °C. Stejně tak limitujeme tepelný příkon při navařování podobně jako u manganových slitin. Pokud navařujeme nikl a jeho slitiny v ochranných atmosférách, je nutno dbát na čistotu plynu (čistota Ar min. 99,95 %) [41]. Pokud není dodržena ochrana nataveného kovu, může docházet ke vzniku pórovitosti a snížení plastických vlastností navařovaného materiálu. Z důvodu vysoké plasticity niklu se většinou tepelné zpracování po navaření neprovádí. [4; 41]

Nikl spolu s chromem jsou základními příměsovými prvky austenitických ocelí. Obsah Cr se u těchto ocelí pohybuje v rozmezí od 17 do 20 % a obsah Ni od 8 až 10 %. Nikl rozšiřuje oblast austenitu a spolu s chromem se podílí na korozní odolnosti těchto ocelí. Výrazným problémem austenitických korozivzdorných ocelí je vylučování karbidů při pomalém ochlazení zejména u nestabilizovaných austenitických ocelí. Tvorbou těchto karbidů ( $M_{23}C_6$ ) dochází k ochuzení hranic zrn o prvky zajišťující korozivzdornost a může dojít ke tvorbě mezikrystalické koroze. Při navařování je proto nutné dbát právě na tento jev, který může nastat v rozsahu teplot 425 až

815 °C. Dále je důležité dodržovat stanovené postupy, parametry navařovacího procesu a nízké procento nežádoucích prvků, aby nedocházelo ke vzniku horkých trhlin. V neposlední řadě může u ocelí s vyšším obsahem Cr docházet ke zkřehnutí fáze  $\sigma$ , což je tvrdá intermetalická sloučenina podporující křehké chování materiálu. Při samotném procesu navařování zajišťujeme ochranu návarového kovu. Vnesené teplo udržujeme pod hodnotou  $15 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$  a teplotu interpass do 150 °C. Nižší tepelný příkon také snižuje riziko zhrubnutí zrna v tepelně ovlivněné oblasti. [4; 41]

## 2.7 Kvalitativní vyhodnocení návarů

Pro ověření funkčnosti navařených dílů používáme nedestruktivní a destruktivní metody. Při procesu navařování může dojít ke vzniku vad, které mají přímý vliv na vlastnosti návarového ale i základního materiálu. Ke tvorbě těchto vad může docházet nedodržením nebo špatnou volbou navařovacího postupu, nevhodnou volbou materiálů, vlivem rozměrů a geometrie, případně dalšími vlivy. Jednotlivé typy vad vzniklých při navařování jsou popsány normou ČSN EN ISO 6520-1. V závislosti na tom, jaký typ zkoušek provádíme, jsou děleny na nedestruktivní a destruktivní. [42; 43; 44]

Nedestruktivní zkoušky návarů mají za úkol, jak již název napovídá, posoudit kvalitu a funkčnost provedeného návaru. Vyhodnocení těchto zkoušek nalezneme v normě ČSN EN ISO 15614-7, která se při provedení posuzovaných zkoušek odkazuje na normy nedestruktivního zkoušení svarů. Hlavní výhodou těchto metod je fakt, že při provádění těchto zkoušek není ovlivněna kvalita ani funkčnost navařovaných součástí. Zkoušky lze zařadit do jakékoliv části výrobního postupu a jsou proveditelné i na finálních (smontovaných) dílcích, konstrukcích nebo sestavách. Neopomenutelnou výhodou může být také časová úspora některých nedestruktivních metod (vizuální a penetrační zkouška). Pomocí nedestruktivních metod mohou být odhaleny povrchové, podpovrchové a vnitřní vady. Pro odhalení povrchových a podpovrchových vad, které se nacházejí těsně pod vrchní částí návaru, se nejčastěji používají vizuální, penetrační nebo magnetické zkoušky. Pokud jde o vnitřní vady silnějších nebo vícevrstvých návarů, používají se ultrazvukové nebo prozařovací (rentgenové) zkoušky. Z důvodů vyšší spolehlivosti se v rámci vyhodnocení často využívá více zkoušek na jednom návaru. Z nedestruktivních zkoušek budou v experimentu vyhodnoceny pouze vizuální a penetrační zkoušky. [42; 43; 45]

Při destruktivním zkoušení dochází k poškození nebo celkové destrukci návaru a navařované součásti. Postup provedení a vyhodnocení jednotlivých zkoušek je popsán normou ČSN EN ISO 15614-7. U destruktivního zkoušení návarů používáme nejčastěji vyhodnocení makro a mikrostruktury, měření tvrdosti návaru, základního materiálu a oblasti promísení. Dále to mohou být tahová zkouška, zkouška lomové houževnatosti či jiné. V rámci experimentální části bude provedena a vyhodnocena makroskopická kvalita provedeného návaru a zhodnocení mikrostruktury, mikrotvrdost návaru, oblasti promísení a základního materiálu. V neposlední řadě bude provedena zkouška korozní odolnosti navařovaných slitin. [42; 43; 46; 47]

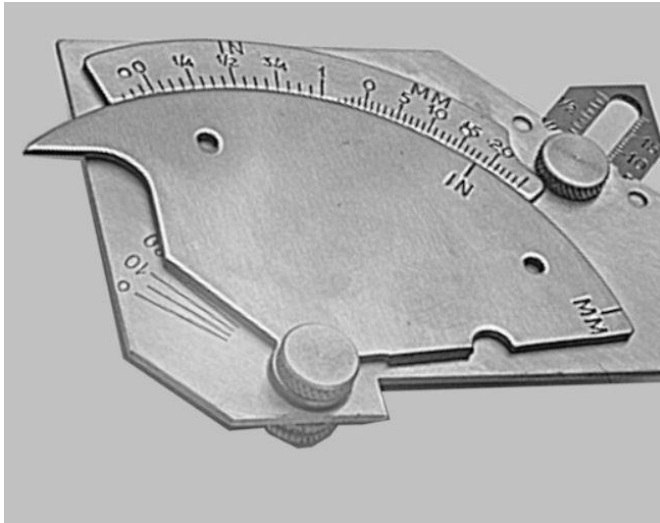
### 2.7.1 Nedestruktivní vyhodnocení návaru

První a nejspíše nejjednodušší metodu ověření kvality metalurgického spoje z hlediska náročnosti na vybavení je vizuální zkouška. Tato metoda je využívána pro přesné nalezení trhlin, neprůvarů, chyb geometrie a dalších typů vad. Přesný popis a vyhodnocení zkoušky nalezneme v normě ČSN EN ISO 17637. [42; 43; 48]

Zásadní roli ve výsledném vyhodnocování vizuální zkoušky hrají podmínky, za kterých je zkouška provedena. Minimální osvětlení povrchu bílým světlem musí být 350 lx, přičemž doporučená hodnota je vyšší (zhruba 500 lx). Vyhodnocení musí být provedeno ve vzdálenosti nejvýše 600 mm od oka a kontrolovaná část musí být přístupná. Úhel pohledu na metalurgický



spoj by neměl přesahovat  $30^\circ$ . Jestliže není zajištěn potřebný úhel nebo přístupnost ke spoji, je možno využít zrcátek, optických kabelů, kamer a dalších zařízení. Pokud při zjišťování kvality návaru nepoužíváme žádné pomůcky, jedná se o kontrolu přímou, jestliže jsou využity zmíněné kamery nebo měřidla (obr. 20, 21), jde o nepřímou kontrolu. [42; 43; 46; 48]



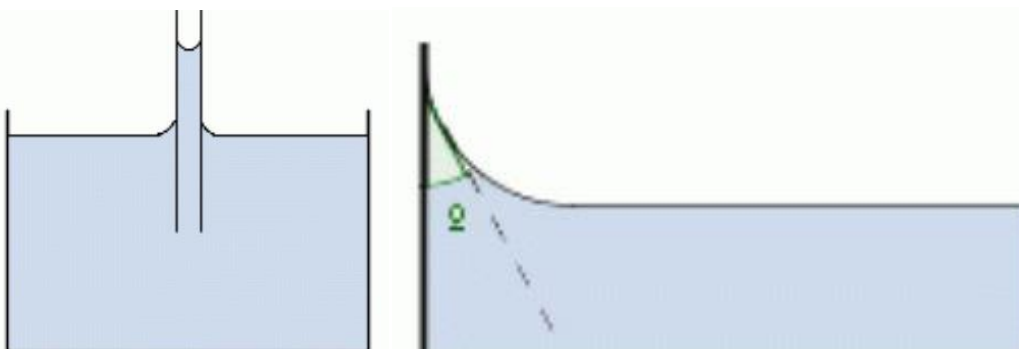
Obr. 20 Svarová měřka [49].



Obr. 21 Digitální měřka [50].

U samotného provedení zkoušky musí být vyhodnocovaná část návaru řádně očištěna od vměstků, strusky, mastnoty a všech nečistot, které by mohly zakrýt vzniklé vady. Zkoušku musí provádět způsobilý a kvalifikovaný pracovník. Kontrolu provádíme až po tepelném zpracování. Závěrem vizuální zkoušky je vyhotoven protokol, ve kterém je uveden např. název komponenty, druh materiálu, druh spoje, nalezené vady, použitá zařízení a další. K protokolu je vhodné přiložit také náčrty či fotografie s příslušnými vadami. Pro kvalitnější kontrolu provedených návarů by mělo být provedeno více zkoušek např. kapilární nebo prozařovací zkouška. [42; 43; 46; 48]

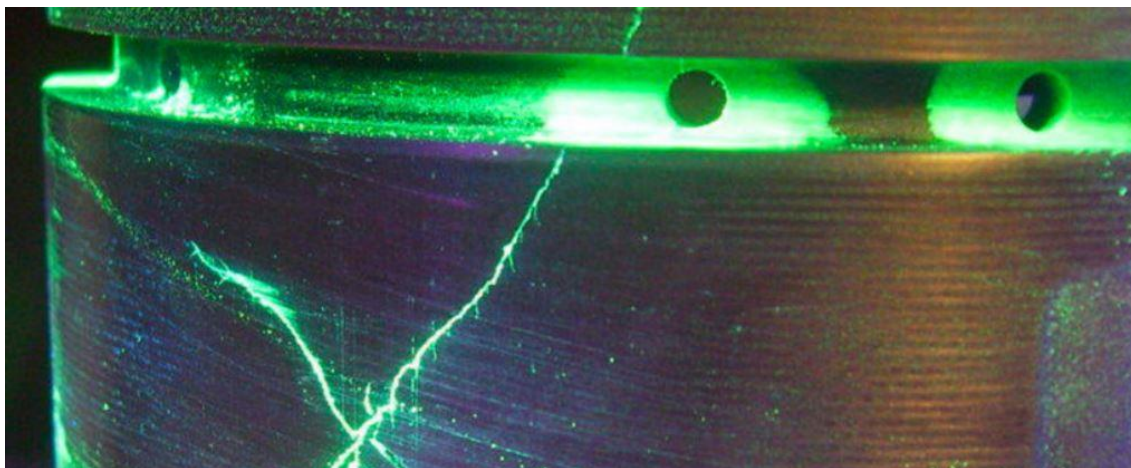
V pořadí druhou metodou zkoušení je kapilární zkouška. Její postup je popsán normou ČSN EN ISO 3452-1. Kapilární zkoušku opět řadíme mezi nedestruktivní metody pro ověření kvality návaru nebo svaru. Tuto metodu využíváme pro zjišťování vad, jako jsou např. rýhy, trhliny, studené spoje či přeložky, které se nacházejí na povrchu zkoušené součásti. Při vyhodnocování penetrační metodou musí být povrch dostatečně osvětlen bílým světlem nebo ultrafialovým zářením. Zkouška se provádí především u kovových součástí, nicméně ji lze užít i u jiných materiálech za předpokladu, že je povrch dostatečně smáčivý. Při vyhodnocování této zkoušky je využito jevu kapilární elevace a smáčivosti povrchu zkoušeného návaru (obr. 22).



Obr. 22 Kapilární elevace a smáčivost povrchu [51].



Na očištěný povrch je nejprve nanesen penetrant, který právě díky povrchovému napětí a tím vzniklého kapilárního tlaku zateče do trhlinek a nečelistvostí povrchu. Po nanesení penetrantu je jeho vztlínání podpořeno aplikací vývojky (pomocného média). Výsledkem kapilární zkoušky je zvýraznění případných vzniklých vad (obr. 23), které by mohly vest k možným poruchám či selhání návaru. [42; 43; 46; 51; 52]



Obr. 23 Fluorescenční penetrační zkouška [53].

Jednou z nedestruktivních zkoušek návarů je také prozařovací zkouška. Při tomto kvalitativním posuzování návaru je využito vysokofrekvenční záření. Toto záření prochází materiálem (návarovým i základním) a je zachyceno na detekční zařízení. Tento typ zkoušek je používán pro zjišťování vnitřních vad návarů a svarů, případně součástí. Spojené materiály jsou vystaveny různým intenzitám záření (většinou RTG záření). Při průchodu návarem je prošlé záření zachyceno na stínítku, kde jsou také vyhodnoceny případné vady. [42; 43; 46; 54; 55]

Hlavní výhodou prozařovací zkoušky je fakt, že lze kontrolovat materiály do tloušťky jednotek či desítek mm. Touto metodou můžeme efektivně detekovat objemové vady, jako jsou vměstky nebo póry. Vady plošného typu jsou pomocí této metody obtížněji detekovatelné. Nejspíše největší nevýhodou této zkoušky je používané záření, které je nutno odstínit, jelikož je zdraví škodlivé. Z tohoto důvodu je zkouška finančně náročnější. [42; 43; 46; 54; 55]

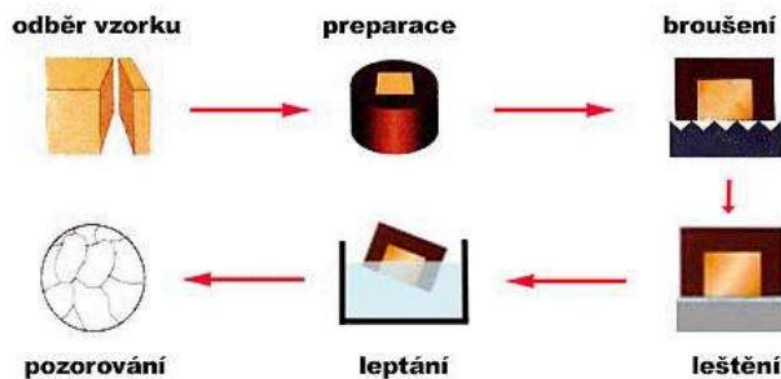
### 2.7.2 Destruktivní zhodnocení návaru

V pořadí první uvedenou destruktivní zkouškou je metoda vyhodnocení tvrdosti návarů. O zhodnocení tvrdosti návarů pojednává norma ČSN EN ISO 15614-7 s odkazem na normu ČSN EN ISO 9015-1. Vtisky mohou být provedeny jednotlivě nebo v řadách a zkušební postup musí být přizpůsoben danému návaru. Zkouška musí probíhat při teplotě 23 až 28 °C. Vtisky jsou provedeny pod úhlem 15° k povrchu součásti. Jednotlivé vtisky od sebe musí být vzdáleny o přesnou vzdálenost a musí procházet základním materiálem přes tepelně ovlivněnou oblast a oblast promísení až do návarového kovu. Vzdálenost od povrchu součásti k návaru je také přesně definována. [42; 45; 46; 56; 57]

U návarů lze také vyhodnotit mikrotvrdomost. Zkouška se provádí pro určení tvrdosti jednotlivých struktur vzniklých spojení dvou různých materiálů. Vyhodnocení obvykle provádíme na metalografickém výbrusu pomocí zkoušek dle Vickerse nebo Knoopu. Povrch vzorku musí být řádně očištěn. Maximální zatížení při této zkoušce je 2 N, proto nelze naměřené hodnoty mikrotvrdomosti srovnávat s hodnotami makrotvrdomosti naměřenými při násobně větším zatížení. [42; 46; 56]

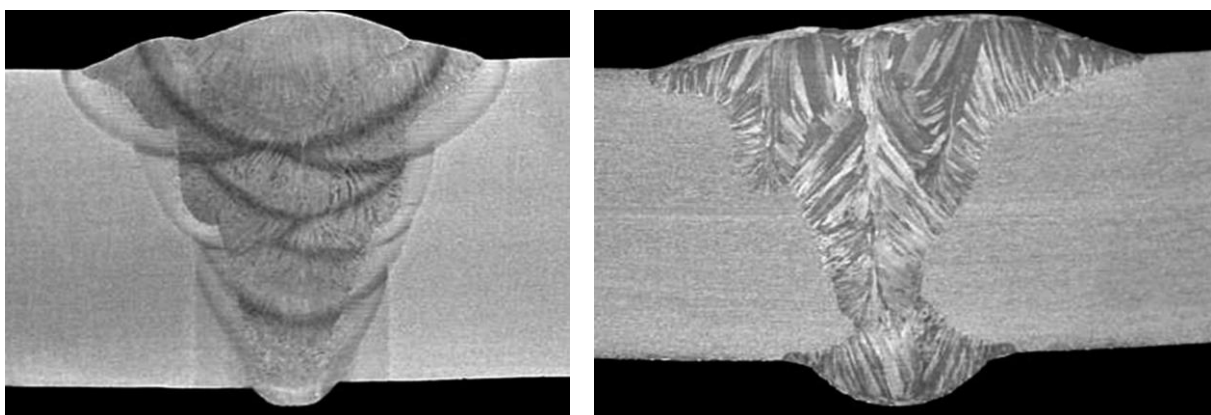
Proces destruktivního zkoušení návarů pomocí metalografického zhodnocení popisuje norma ČSN EN ISO 15614-7 s odkazem na normu ČSN EN ISO 17639. Zkouška se zpravidla provádí na příčném řezu, tj. kolmo k ose návaru (lze vyhodnocovat i vzorky řezané v jiných směrech). K samotnému vyhodnocení využíváme vizuální či optickou kontrolu. Makro a mikroskopická kontrola je prováděna za účelem vyhodnocení struktury v závislosti na tvorbě trhlin a vad vzniklých při navaření. Zjišťovány jsou např. výsledné vzniklé struktury v oblasti promísení a tepelně ovlivněné zóně, velikost a orientace zrn nebo množství vzniklých precipitátů, případně vměstků. [42; 45; 46; 58; 59; 60]

Příprava a vyhodnocení metalografické zkoušky začíná přípravou vzorku. Tento vzorek musí být vyřezán a pro mikroskopické pozorování zalit nebo zalisován (za studena nebo za tepla) do preparátu na bázi polymerní pryskyřice či speciálního polymeru. Po zatuhnutí preparátu následuje broušení, leštění, případně leptání. Výsledný vzorek nesmí být ovlivněn přípravnými procesy. Zmíněný postup je na obr. 24. [42; 45; 46; 58; 59; 60]



Obr. 24 Postup metalografického vyhodnocení [59].

Makroskopické zhodnocení návaru provádím pouhým okem pomocí vizuální kontroly. Lze také využít zařízení jako jsou kamery či zařízení pro zvětšení obrazu, avšak maximálně do zvětšení 50x. Pohled na makrostrukturu je veden kolmo k ose řezu (obr. 25) a předmětem vyhodnocení je oblast promísení, tepelně ovlivněná oblast, výška návaru a další. U navařování nebo svařování dochází vždy k promísení (zředění) základního a přídatného materiálu. Vyjadřuje se v procentech a při navařování dosahuje hodnot 5 až 10 %. [12; 42; 46; 58; 59; 61]

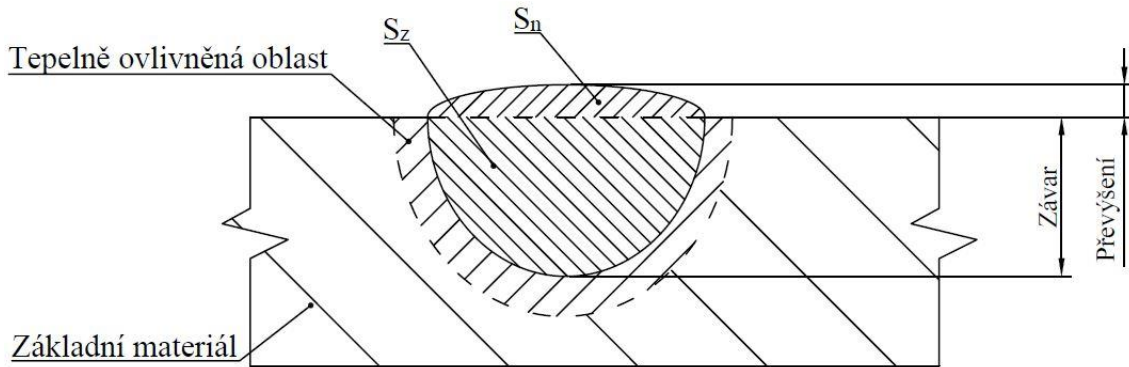


Obr. 25 Makrostruktury svaru [61].

Výpočet hodnoty zředění vychází z obr. 26 a je vypočten podle vztahu [12]:

$$Z = \frac{S_z}{S_n + S_z} \cdot 100, \quad (2.1)$$

kde:  $S_n$  – plocha navařeného kovu [mm<sup>2</sup>],  
 $S_z$  – plocha závaru [mm<sup>2</sup>].



Obr. 26 Oblast zředění základního a návarového materiálu [12].

Jak bylo již řečeno, při promísení dochází k částečné změně vlastností základního i návarového materiálu. Pokud u navařování dojde k vysokému promísení (ztrátě požadovaných vlastností) je nutné modifikovat proces. Buďto změnou navařovacích parametrů nebo využitím dvou či vícevrstvých návarů, kde hodnota promísení bude v přijatelných mezích. [12; 42; 46; 58; 59]

U mikroskopického zhodnocení je při vyhodnocování použit mikroskop. Zvětšení se obvykle pohybuje od hodnoty 50x až do 500x, někdy i více. Při pozorování může být využito leptadla stejně jako u makroskopického zhodnocení. Vyhodnocována je výsledná struktura a vady základního nebo návarového materiálu či oblast promísení. Závěrem metalografické zkoušky je vystaven protokol, kde jsou vypsány odpovídajícími náležitosti předepsanými normou pro mikroskopické zhodnocení. [42; 46; 58; 59]

Důležitou vlastností návarů pracujících v agresivních prostředích je jejich korozní odolnost. Zkoušku korozní odolnosti v umělých atmosférách, přesněji v solné mlze, popisuje norma ČSN EN ISO 9227. Jelikož tato zkouška probíhá specifickým způsobem, je nutno podotknout, že její výsledky nejsou zcela vypovídající a nelze podle nich určit přesné chování toho či onoho materiálu v korozním prostředí. Je to z důvodů velkého množství faktorů, které ovlivňují průběh zkoušky (materiál, korozní prostředí, tvorba pasivačních vrstev atd.). [42; 46; 62; 63]

Při testování korozních vlastností jsou nejprve vzorky nebo celé součásti vloženy do solné komory, kde jsou ponechány stanovenou dobu. Doba trvání je stanovena specifikací pro daný výrobek, nicméně doporučené rozmezí se pohybuje od 2 do 1008 hodin. Po uplynutí stanoveného času se vzorky (součásti) vyjmou a očistí. Čištění probíhá nejprve mechanicky, kdy je odstraněn snímatelný povlak. Následuje chemické čištění, při kterém je vzorek ponořen do roztoku citronanu amonného, kde je ponechán po dobu 10 min při 23 °C. Odmořené vzorky jsou opláchnuty vodou a následně etanolem. Před vyhodnocením jsou vzorky důkladně vysušeny. Vzorky jsou zváženy a naměřené hodnoty jsou porovnány s jejich hmotností před provedením zkoušky. Korozní odolnost bývá vyhodnocena na základě různých kritérií. Mohou to být např. vzhled po provedení zkoušky, změna hmotnosti, doba do indikace prvních známek koroze, změna mechanických vlastností, tvar a množství vzniklých defektů, změny zjištěné mikroskopicky a další. [42; 46; 62; 63]



### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V rámci praktické části byly provedeny zkušební návary na navařovacím modulu PPC 550 SA 600 (obr.27) od firmy KSK s. r. o. Jedná se o plazmový navařovací automat navržený výhradně pro navařování rotačních součástí jako jsou např. armatury, difuzory, klíny a jiné. Navařování probíhá metodou 152 (plazmové navařování s přídavným materiálem ve formě prášku). Zařízením můžeme navařovat dílce průměrů od 100 do 1000 mm a maximální délky až 5000 mm. Funkční délka navařovacího ramene činí 2000 mm (navařování vnitřních částí trubek). [64; 65]



Obr. 27 Navařovací modul PPC 550 SA 600.

Pro samotné navařování byl použit zdroj EWM Tetrax 300 Comfort. Zdroj je přednostně určen pro svařování metodou 111 a metodou 141. Rozsah proudů, napětí a jiných technických parametrů nalezneme v tab. 10. [66]

Tab. 10 Rozsah parametrů zdroje Tetrax 300 Comfort [66].

Parametry	Rozsah proudů	Napětí metoda 141	Napětí metoda 111	Frekvence
Hodnoty	5 až 300 A	10,2 až 22 V	20,2 až 32 V	50/60 Hz
Parametry	Účinnost	Zatěžovací cyklus	Proudový chránič	Rozsah okolních teplot
Hodnoty	88 %	10 min (6 min navařování, 4 min pauza)	Typ B	-25 až 40 °C

V rámci kvalifikace WPQR proběhlo navařování trubky o vnitřním průměru 323,3 mm a tloušťce 33,23 mm. Základovým materiálem byla uhlíková ocel ASME SA-106 Gr.C, jejíž mechanické vlastnosti jsou zaznamenány v tab. 1. Podrobné chemické složení uhlíkové oceli je v tab. 2. Přídavným materiálem byl kovový prášek DEW A 7 CN-P. Chemické složení prášku je vyobrazeno v tab. 3. Všechny provedené návary byly nanесeny pomocí plazmového hořáku metodou 152.

### 3.1 Parametry navařování

Ve spolupracující firmě SEIKO flowcontrol byly provedeny tři sady návarů, pro odladění procesu navařování manganové slitiny. Ve všech sadách byl nejprve navařen jednovrstvý návar metodou 152 zmíněným kovovým práškem ze slitiny třídy 18.8. Mn. Jelikož při navařování dochází k promísení a částečné ztrátě vlastností návarového kovu, byl ve všech sadách proveden vícevrstvý návar. Navařovací parametry první sady návarů pro jedno a vícevrstvý návar jsou zaznamenány v tab. 11 a 12.

Tab. 11 Parametry navařování první sady návarů pro jednovrstvý návar.

Parametry	Vrstva	Přehřev / interpass	Proud	Napětí	Navařovací rychlost
Hodnoty	1.	21 / 289 °C	197 až 209 A	26,0 až 29,3 V	16,3 cm/min
Parametry	Přísun prášku	Vnesené teplo	Průtok plazmového plynu (Ar)	Průtok dopravního plynu (Ar)	Průtok ochranného plynu (Ar)
Hodnoty	25,0 g/min	11,95 až 13,47 kJ/cm	180 l/h	120 l/h	800 l/h

Tab. 12 Parametry navařování první sady návarů pro vícevrstvý návar.

Parametry	Vrstva	Přehřev / interpass	Proud	Napětí	Navařovací rychlost
Hodnoty	2.	50 / 251 °C	196 až 222 A	24,6 až 27,2 V	15,6 cm/min
Parametry	Přísun prášku	Vnesené teplo	Průtok plazmového plynu (Ar)	Průtok dopravního plynu (Ar)	Průtok ochranného plynu (Ar)
Hodnoty	22,5 až 28,5 g/min	11,30 až 13,31 kJ/cm	180 l/h	120 l/h	800 l/h

Při navařování první sady návarů došlo k detekci vad, které byly způsobeny zejména nedostatečným vysušením přídavného materiálu a vyšším přísunem prášku, vzhledem k použitým hodnotám proudu. Z tohoto důvodu byla provedena druhá sada návarů. Parametry navařování pro druhou sadu návarů nalezneme v tab. 13 a 14. Z tabulek je patrné, že při procesu navařování nedošlo k výraznějším změnám procesních parametrů. Ve srovnání s předešlou sadou návarů byl ve druhé a třetí sadě dostatečně přesušen přídavný materiál ve formě prášku, a právě změnou tohoto parametru bylo dosaženo lepších výsledků.

Tab. 13 Parametry navařování druhé sady návarů pro jednovrstvý návar.

Parametry	Vrstva	Předehřev / interpass	Proud	Napětí	Navařovací rychlost
Hodnoty	1.	20 / 300 °C	197 A	24,9 až 26,0 V	15,6 cm/min
Parametry	Přísun prášku	Vnesené teplo	Průtok plazmového plynu (Ar)	Průtok dopravního plynu (Ar)	Průtok ochranného plynu (Ar)
Hodnoty	18,0 g/min	11,20 až 11,60 kJ/cm	180 l/h	120 l/h	800 l/h

Tab. 14 Parametry navařování druhé sady návarů pro vícevrstvý návar.

Parametry	Vrstva	Předehřev / interpass	Proud	Napětí	Navařovací rychlost
Hodnoty	2.	50 / 286 °C	178 A	25,2 až 26,4 V	15,1 cm/min
Parametry	Přísun prášku	Vnesené teplo	Průtok plazmového plynu (Ar)	Průtok dopravního plynu (Ar)	Průtok ochranného plynu (Ar)
Hodnoty	18,0 g/min	10,70 až 11,20 kJ/cm	180 l/h	120 l/h	800 l/h

U navařování druhé sady vzorků došlo k vytvoření kvalitního návaru pouze u jednovrstvého navařování. Druhá vrstva návaru nebyla dostatečně provařena a byly detekovány vady v oblasti mezi první a druhou návarovou vrstvou. Proto byla provedena třetí sada návarů. Pro jednovrstvý návar byly procesní parametry ponechány stejné, viz tab. 13. Navařovací parametry druhé vrstvy jsou v tab. 15.

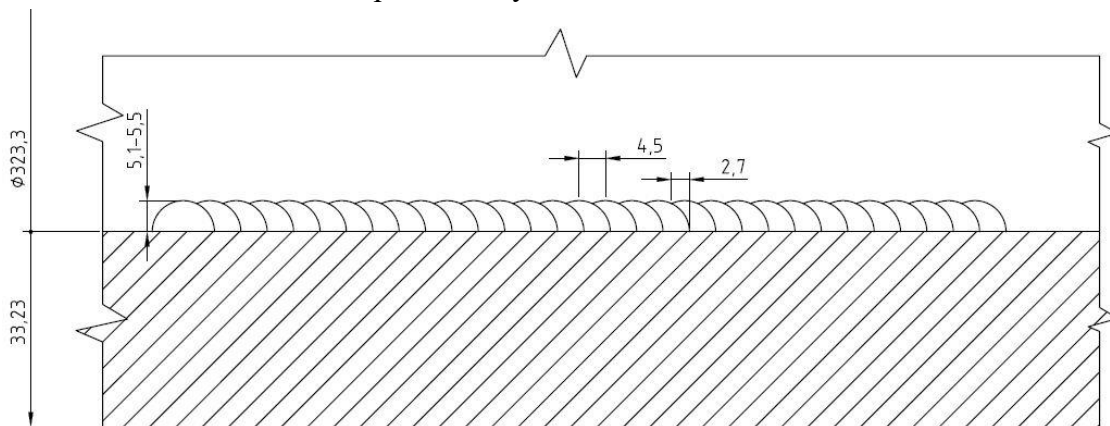
Tab. 15 Parametry navařování třetí sady návarů pro vícevrstvý návar.

Parametry	Vrstva	Předehřev / interpass	Proud	Napětí	Navařovací rychlost
Hodnoty	2.	50 / 286 °C	198 A	25,1 až 26,3 V	15,1 cm/min
Parametry	Přísun prášku	Vnesené teplo	Průtok plazmového plynu (Ar)	Průtok dopravního plynu (Ar)	Průtok ochranného plynu (Ar)
Hodnoty	18,0 g/min	11,90 až 12,40 kJ/cm	180 l/h	120 l/h	800 l/h

Použitím parametrů z tab. 13 pro navaření jednovrstvého návaru nebyly detekovány vady. Obdobně nebyly nalezeny vady u vícevrstvého návaru, pokud bylo použito navařovacích parametrů z tab. 15. Proces navařování manganové slitiny třídy 18.8. Mn byl odladěn a došlo k vytvoření kvalitních návarů.

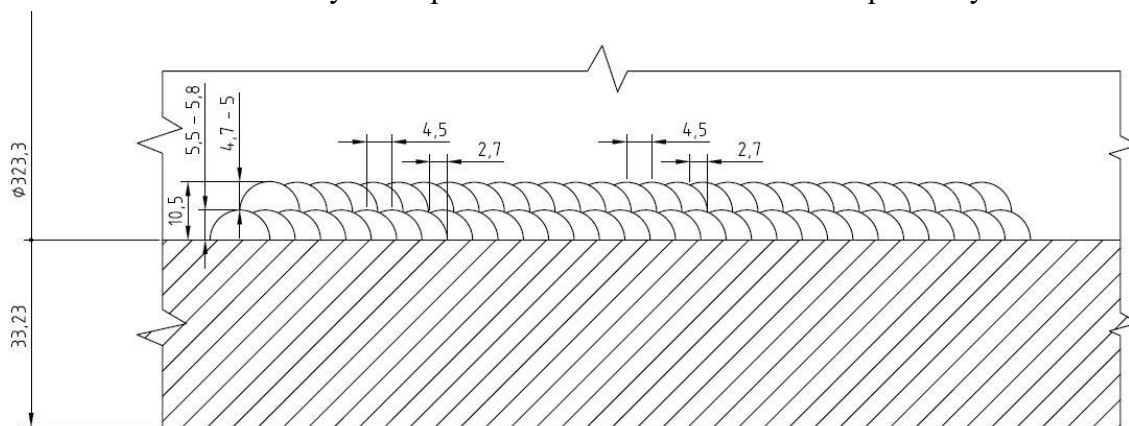
Schématický náčrt provedení jednovrstvého návaru je patrný na obr. 28. Příslušné rozměry jsou uvedeny v mm. Je patrné, že rozteč mezi jednotlivými průchody návaru činila 4,5 mm.

Překrytí návarů bylo 2,7 mm a převýšení se pohybovalo od 5,1 do 5,5 mm. Po provedení byl návar obroben soustružením na požadovaný rozměr.



Obr. 28 Schéma jednovrstvého návaru.

Na obr. 29 můžeme vidět náčrt dvouvrstvého návaru s příslušnými rozměry v mm. Lze si povšimnout, že hodnota rozteče a přikrytí je shodná s hodnotami jednovrstvého návaru čili 4,5 a 2,7 mm. Z obrázku je také patrná celková výška návarů, která činila 10,5 mm. Stejně jako u jednovrstvého návaru i tady došlo po navaření k obrobení návaru na příslušný rozměr.



Obr. 29 Schéma dvouvrstvého návaru.

### 3.2 Vyhodnocení makrostruktury a zředění návarů

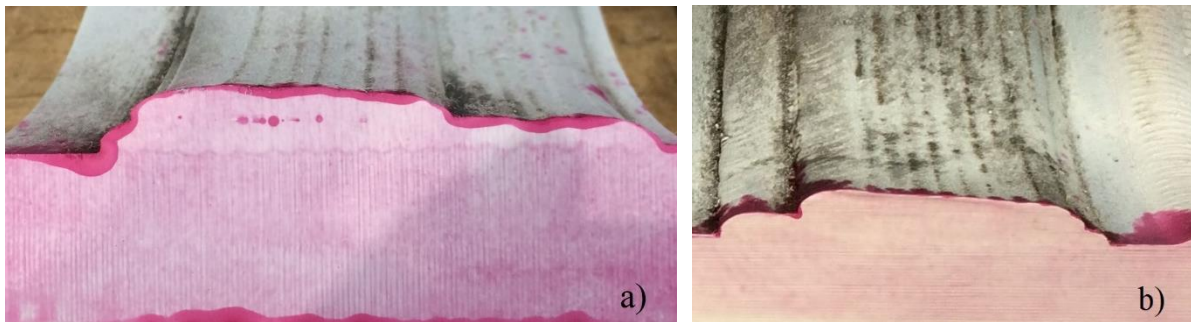
Při posuzování kvality provedeného návaru byl proveden kolmý řez navařovaným i základním materiálem. Byla provedena kapilární zkouška jak na povrchu, tak také v řezu posuzované trubky. Při vyhodnocování povrchu nebyly nalezeny vážnější indikace, které by zpochybnily kvalitu navařené plochy. V řezu první sady návarů byla situace opačná. Tuto skutečnost dokládá obr. 30, kde je zobrazen dvouvrstvý návar z první sady. V některých místech nedošlo k vytvoření dostatečného metalurgického spojení. Důkazem je také prozařovací zkouška, na jejímž základě byly potvrzeny vzniklé vady. Dle normy ČSN EN ISO 6520-1 byl detekován vznik studeného spoje na svarové ploše (vada 4011) a také studený spoj mezi jednotlivými housenkami (vada 4012). [44]

Porovnáním druhé sady zkušebních návarů na obr. 31 a) s návaru první sady je zřejmé, že použité procesní parametry byly voleny lépe. Vysušením přídavného materiálu došlo k dostatečnému provaření první vrstvy se základním materiálem. Ve spojení první a druhé vrstvy je patrný vznik studeného spoje mezi jednotlivými housenkami. Pro třetí sadu návarů na obr. 31 b) byly použity vhodné parametry a byl vytvořen kvalitní vícevrstvý návar bez detekcí povrchových či podpovrchových vad.



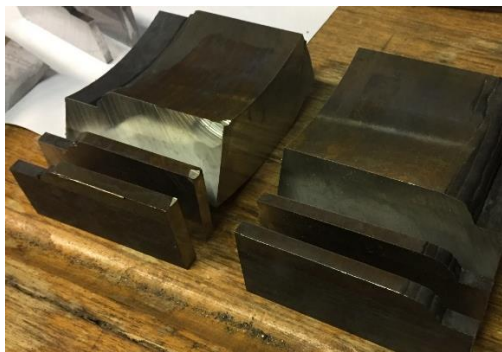


Obr. 30 Kapilární zkouška dvouvrstvého návaru z první sady.



Obr. 31 Kapilární zkouška dvouvrstvého návaru z druhé a) a třetí b) sady.

Bylo provedeno vyhodnocení zředění návarového se základním materiálem na první sadě návarů, přestože u návarů byly nalezeny vady. Vzorky pro zkoušku byly odebrány v kolmém řezu pomocí kotoučové metalografické pily značky Struers s označením Labotom 5. Nejprve byl proveden řez zhruba v polovině návaru pro snadnější manipulaci a z důvodů kolize rozměrů vzorků se zařízeními použitými při přípravě. Dále již byly vzorky nařezány na plátky o tloušťce zhruba 7 mm (obr. 32). Všechny vzorky byly postupně broušeny na brusce Saphir 330 pro dosažení co možná nejlepší kvality zkoumaného povrchu. Pro broušení bylo použito zrnitosti brusných kotoučů #80 až 600. Po broušení byly vzorky naleptány leptadlem Nital 3 (roztok kyseliny dusičné) o koncentraci 3 %. Naleptané vzorky byly omyty vodou, následně opláchnuty lihem a usušeny.



Obr. 32 Odebrané vzorky pro makroskopické vyhodnocení.

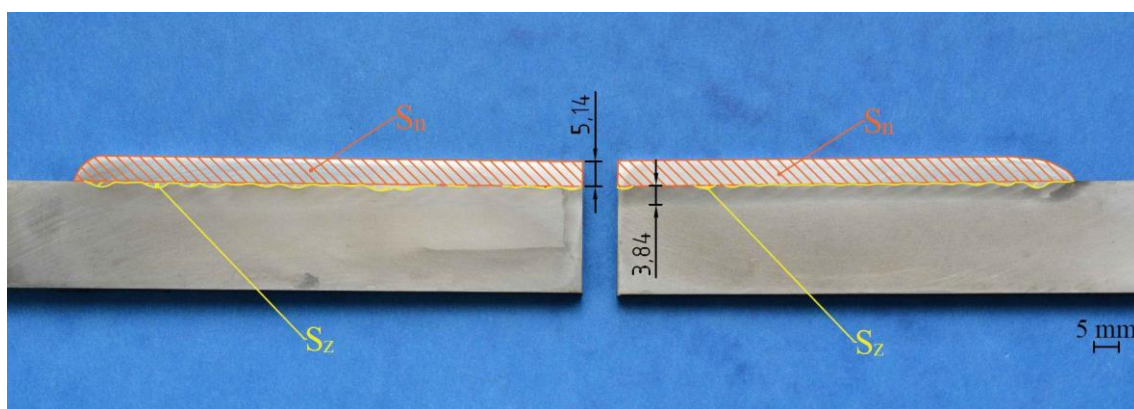


Na připravených vzorcích jednovrstvého a dvouvrstvého návaru byla vypočtena hodnota zředění, i přes zjištěné vady. Hodnoty zředění pro jednovrstvý manganový návar jsou v tab. 16. Označení dílčích ploch návaru a závaru je patrné z obr. 33. Lze také pozorovat výšku navažené plochy, která po obrobení činila zhruba 5,14 mm. Šířka tepelně ovlivněné oblasti byla určena zhruba 3,84 mm. Hodnoty zředění návarů byly počítány podle vztahu 2.1. Pro názornost je uveden vzorový výpočet zředění pro jednovrstvý manganový návar:

$$Z = \frac{S_z}{S_n + S_z} \cdot 100 = \frac{58,57}{891,76 + 58,57} \cdot 100 = 6,16 \%$$

Tab. 16 Zředění a jednotlivé plochy pro jednovrstvý manganový návar.

Plocha jednovrstvého manganového návaru $S_n$ [mm <sup>2</sup> ]	Plocha jednovrstvého manganového závaru $S_z$ [mm <sup>2</sup> ]	Hodnota zředění $Z$ [%]
891,76	58,57	6,16



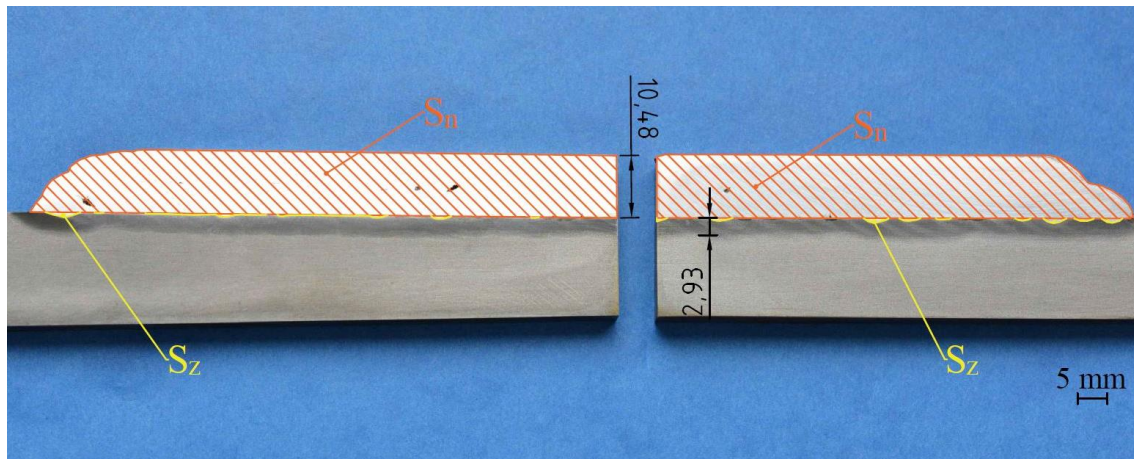
Obr. 33 Grafické znázornění návaru a závaru pro jednovrstvý návar.

Z vypočtených výsledků je patrná hodnota zředění návarového kovu s kovem základním. Vypočtená hodnota je něco málo přes 6 %, což koresponduje s literaturou [16], která uvádí, že u metody navařování 152 se hodnota zředění pohybuje od 6 do 10 %. Nutno však podotknout, že zředění se pohybuje na spodní hranici. Z tohoto důvodu by bylo vhodné dostatečně vysušit přídavný materiál, zvolit vyšší příkon nebo snížit navařovací rychlost, čímž by bylo dosaženo většího průvaru a zvýšení hodnoty zředění. [16]

Obdobně jako u jednovrstvého návaru proběhl výpočet hodnoty promísení u dvouvrstvého návaru. Vzorky pro výpočet byly také připraveny stejným způsobem, tj. řezány kolmo na směr kladení jednotlivých housenek, následně broušeny kotouči zrnitosti od #80 do 600, leptány Nitalem 3 a závěrem umyty a vysušeny. Vypočtené hodnoty zředění a velikosti dílčích ploch pro dvouvrstvý návar jsou v tab. 17. Na obr. 34 jsou graficky znázorněny plochy návaru a závaru. Převýšení obrobeného návaru činilo 10,48 mm a šířka tepelně ovlivněné oblasti se pohybovala okolo hodnoty 2,93 mm.

Tab. 17 Zředění a jednotlivé plochy pro dvouvrstvý manganový návar.

Plocha dvouvrstvého manganového návaru $S_n$ [mm <sup>2</sup> ]	Plocha dvouvrstvého manganového závaru $S_z$ [mm <sup>2</sup> ]	Hodnota zředění $Z$ [%]
1788,79	20,53	1,13



Obr. 34 Grafické znázornění návaru a závaru pro dvouvrstvý návar.

Jak z výpočtu, tak pomocí grafického znázornění je patrné, že plocha závaru je velmi malá ve srovnání s objemem navařeného materiálu. Vícevrstvé návary jsou prováděny z důvodu snížení hodnoty zředění, čímž si návarový kov zachová své vlastnosti. V tomto případě se ovšem zředění materiálu pohybuje okolo 1 %. Z obr. 34 a vniklých vad můžeme usoudit, že nedošlo k vytvoření dostatečného metalurgického spojení mezi housenkami. Při provozu by mohl být návar zatížen vibracemi, které by mohly způsobit odtržení návaru a poškození či destrukci měřicího zařízení, případně potrubí. Díky zmíněným důvodům by bylo vhodné vysušit přídavný materiál, snížit rychlost navařování nebo zvýšit příkon, aby došlo k dostatečnému průvaru materiálů a bylo zamezeno vzniku vad.

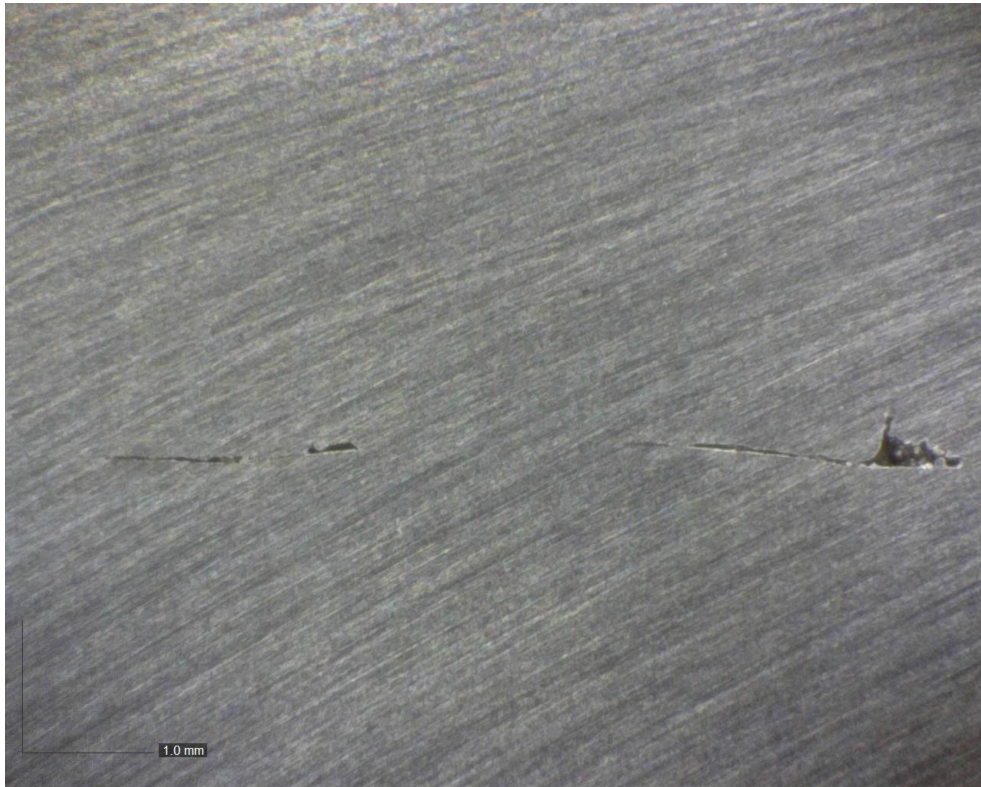
Již při pohledu vlastním okem jsou na vzorcích makrostruktury patrné vady. Pro upřesnění a přiblížení jednotlivých typů vad u dvouvrstvého návaru bylo využito optické stereo lupy. Byla detekována vada 4012 (vznik studeného spoje mezi jednotlivými housenkami) a vada 4011 (vznik studeného spoje na svarové ploše) dle normy ČSN EN ISO 6520-1. Vada 4011 pro jednovrstvý návar je patrná z obr. 35. [44]



Obr. 35 Vznik studeného spoje na svarové ploše u jednovrstvého návaru.



Vady 4012 jsou znázorněny na obr. 36 a 37. Z obr. 36 je zřejmé, že vady dosahují rozměrů přes jeden a více mm. Vady těchto rozměrů jsou nepřijatelné. Pokud jde o obr. 38, lze si povšimnout, že vzniklá vada 4012 dosahuje na výšku i na šířku rozměrů přes 1 mm.



Obr. 36 Vznik studeného spoje mezi jednotlivými housenkami u dvouvrstvého návaru.



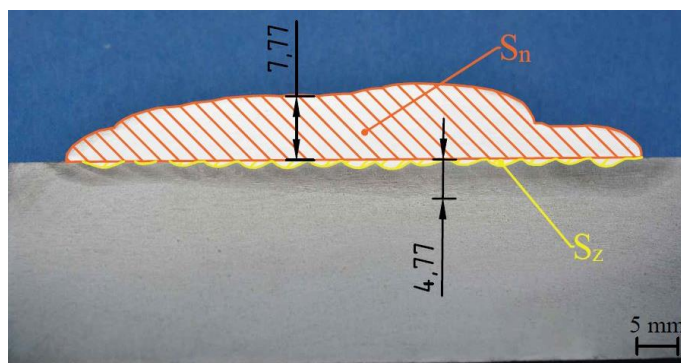
Obr. 37 Vada 4012 u dvouvrstvého návaru.

Pro srovnání byla na třetí sadě odladěných návarů vypočtena hodnota zředění. Výpočet byl proveden pouze pro dvouvrstvý návar. Firma z důvodu vyčerpání stroje a úspory času odladovala proces navařování druhé vrstvy na jednovrstvých návarech. Proto nebyl zhotoven jednovrstvý návar, na němž by mohla být vypočtena hodnota zředění.

Vzorek pro výpočet byl připraven kolmým řezem na směr kladení jednotlivých housenek, následně broušen kotouči zrnitosti od #80 do 600, leptán Nitalem 3, závěrem umyt a vysušen. Hodnoty zředění a velikosti dílčích ploch pro dvouvrstvý návar jsou v tab. 18. Na obr. 38 jsou zobrazeny plochy návaru a závaru. Převýšení odladěného návaru činilo zhruba 7,77 mm. Šířka tepelně ovlivněné oblasti se pohybovala kolem hodnoty 4,77 mm.

Tab. 18 Zředění a jednotlivé plochy pro dvouvrstvý odladěný manganový návar.

Plocha dvouvrstvého manganového návaru $S_n$ [mm <sup>2</sup> ]	Plocha dvouvrstvého manganového závaru $S_z$ [mm <sup>2</sup> ]	Hodnota zředění $Z$ [%]
461,20	33,31	6,74



Obr. 38 Grafické znázornění promísení odladěného dvouvrstvého návaru.

Hodnota promísení kolem 7 % je z hlediska procesu navařování plazmou vhodná. Na metalografickém výbrusu nebyly nalezeny žádné pozorované vady. Lze tedy podotknout, že zvolené navařovací parametry byly odladěny.

### 3.3 Zkouška korozní odolnosti v solné mlze

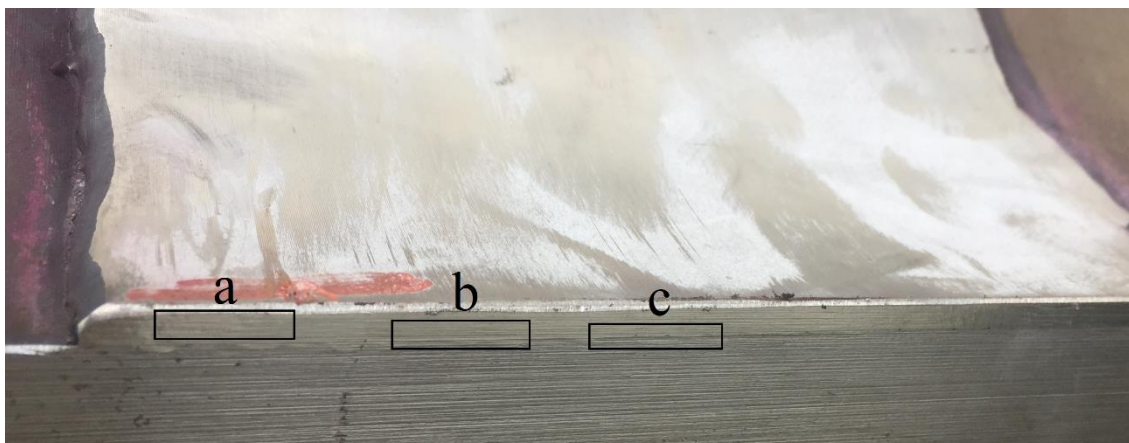
Úkolem korozní zkoušky v solné mlze bylo zjistit korozní úbytky posuzovaných materiálů v agresivním prostředí. Zkoušeným materiálem byl manganový návar slitiny třídy 18.8. Mn, jehož úbytky budou posouzeny s niklovou slitinou Inconel 625. Chemické složení slitiny 18.8. Mn nalezneme v tab. 3 a chemické složení použité niklové slitiny v tab. 19.

Tab. 19 Chemické složení testované niklové slitiny Inconel 625 [67].

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]
<0,03	0,3	0,6	20,7	8,1
Fe [%]	Nb [%]	O [%]	N [%]	Ni [%]
0,7	3,3	0,06	0,07	Zbytek

Experiment chemické koroze v solné komoře byl proveden ve spolupráci s Mendelovou univerzitou. Při realizaci zkoušky bylo přihlédnuto k normě ČSN EN ISO 9227. Z důvodu obtížně zhotovitelných zkušebních vzorků a náročnosti na vybavení byla metodika provedení upravena. [63]

Zkušební vzorky jak manganových, tak niklových slitin byly odebrány z navařených trubek. U obou slitin byly odebrány tři druhy vzorků. Všechny vzorky měly rozměry přibližně 15 x 15 x 2 mm. Místo odběru jednotlivých vzorků vidíme na obr. 39. První byly odebrány vzorky obsahující pouze návarový materiál označený písmenem (a). Dále byly vyřezány vzorky z oblasti promísení (b), přičemž zbytek materiálu vzorku tvořil návarový kov. Poslední řada vzorků byla odebrána tak, že základní materiál měl tloušťku 0,5 mm a zbytek objemu vzorku zaujímal návarový kov (c).



Obr. 39 Místo odběru jednotlivých vzorků.

Po vyřezání byly vzorky zváženy s přesností na dvě desetinná místa pomocí přesné váhy značky Kern KB (obr. 40). Nařezané a označené vzorky byly systematicky vloženy do solné komory značky Liebisch Constasal (obr. 41). V komoře dochází k rozptýlu a proudění solných par, které kondenzují na zkušebních vzorcích a součástech. Kondenzací solných par na bázi NaCl dochází k iniciaci koroze na zkušebních materiálech. [62]



Obr. 40 Přesná váha Kern KB.



Obr. 41 Solná komora Liebisch Constasal.

Použito bylo celkově 24 vzorků, 12 vzorků ze slitiny 18.8. Mn a stejný počet vzorků ze slitiny na bázi niklu. Vyřezané vzorky byly rozděleny do 4 skupin, přičemž každá skupina obsahovala jeden vzoreček návaru, promísení a část základního materiálu (vzorky a, b, c). Vzorky byly umístěny do 4 řad pro jejich následný snadnější odběr a orientaci. Příklad rozmístění vzorků niklových slitin je patrný z obr. 42. Vzorky byly postupně odebírány po jednom týdnu (168 hodinách), zatímco celková doba trvání experimentu byla 4 týdny (672 hodin).





Obr. 42 Rozmístění vzorků niklové slitiny v solné komoře.

Po uplynutí stanovené doby v korozním prostředí, tj. jeden, dva, tři nebo čtyři týdny, byly vzorky postupně vyjmuty. Před samotným zvážením vzorků a vyhodnocením korozního úbytku byly vzorky očištěny. Větší kusy zkorodovaného materiálu byly odstraněny mechanicky pod proudem tekoucí vody. Jakmile byly ze vzorků odstraněny hrubě zkorodované vrstvy a nečistoty, následovalo chemické čištění. Vzorky byly vloženy do roztoku organické sloučeniny s označením hexamethylentetramin (urotropin)  $C_6H_{12}N_4$ , kde byly ponechány po dobu 10 minut, viz obr. 43.



Obr. 43 Chemické čištění vzorků sloučeninou hexamethylentetramin.

Po uplynutí stanovené doby chemického čištění byly vzorky vyjmuty a opět opláchnuty pod proudem tekoucí vody. Následovalo čištění technickým lihem pro odstranění vody nebo případných zbytků permanentního popisovače. Očištěné vzorky byly vysušeny a připraveny na vážení.

Nejprve proběhlo vážení a vyhodnocování niklové slitiny Inconel 625. Vstupní naměřené hmotnosti na dvě desetinná místa jsou v tab. 20. Hmotnostní úbytky pro jednotlivé týdny potom vidíme v tab. 21. Celkový hmotnostní úbytek vyjádřený v procentech nalezneme v tab. 22.

Tab. 20 Vstupní hmotnosti niklových vzorků.

Materiál	Hmotnost vzorku z niklové slitiny [g]	Hmotnost vzorku s oblastí promísení [g]	Hmotnost vzorku se základním materiálem [g]
Vzorky pro 1. týden	4,92	4,81	7,56
Vzorky pro 2. týden	4,47	6,79	7,28
Vzorky pro 3. týden	5,08	6,48	7,37
Vzorky pro 4. týden	4,11	5,64	6,93

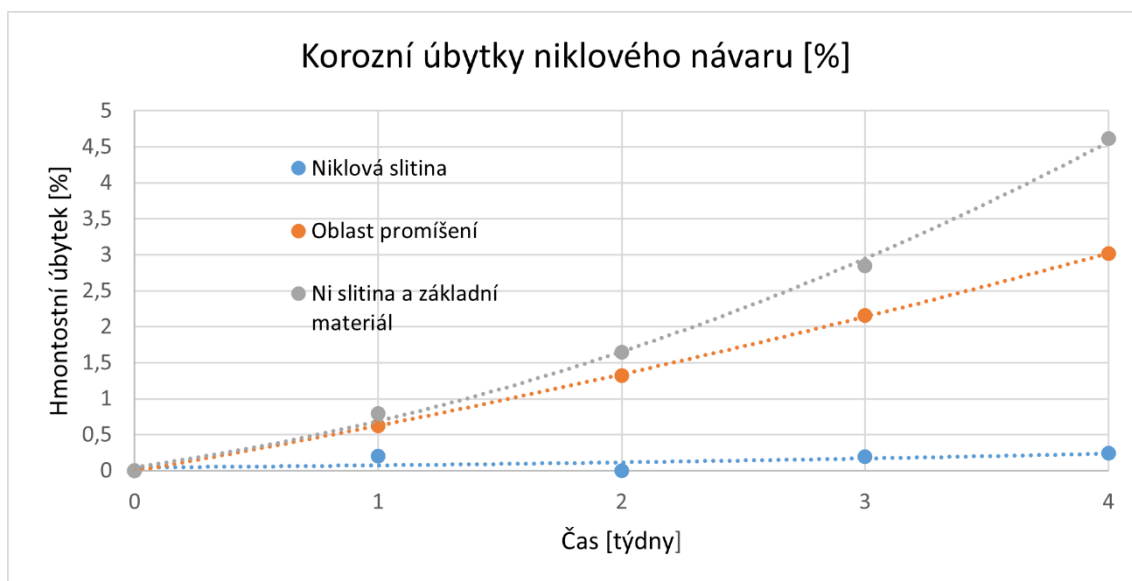
Tab. 21 Konečné hmotnosti niklových vzorků po jednotlivých týdnech.

Materiál	Hmotnost vzorku z niklové slitiny [g]	Hmotnost vzorku s oblastí promísení [g]	Hmotnost vzorku se základním materiálem [g]
Po 1. týdnu (168 hod)	4,91	4,78	7,50
Po 2. týdnu (336 hod)	4,47	6,70	7,16
Po 3. týdnu (504 hod)	5,07	6,34	7,16
Po 4. týdnu (672 hod)	4,10	5,47	6,61

Tab. 22 Konečné korozní úbytky niklových vzorků po jednotlivých týdnech.

Materiál	Korozní úbytek vzorku z niklové slitiny [%]	Korozní úbytek vzorku s oblastí promísení [%]	Korozní úbytek vzorku se základním materiálem [%]
Po 1. týdnu (168 hod)	0,20	0,62	0,79
Po 2. týdnu (336 hod)	0	1,33	1,65
Po 3. týdnu (504 hod)	0,20	2,16	2,85
Po 4. týdnu (672 hod)	0,24	3,01	4,62

Z tabulek je patrné, že ke korozním úbytkům došlo víceméně pouze v případech, kde byl přítomen základní materiál (uhlíková ocel). Zatímco u vzorků, obsahující pouze niklovou slitinu byly korozní úbytky nulové nebo zanedbatelně malé. Tento fakt potvrzuje také graf na obr. 44. Jsou zde závislosti hmotnostního úbytku (v procentech) na čase, po který byly vzorky ponechány v solné komoře.



Obr. 44 Závislost korozních úbytků na čase u niklové slitiny.

Obdobně proběhlo vyhodnocení manganové slitiny 18.8. Mn. Vstupní hodnoty hmotnosti jednotlivých vzorků jsou v tab. 23. Hmotnost vzorků po daných časech v solné komoře jsou zaneseny do tab. 24. Výsledný úbytek hmotnosti jednotlivých vzorečků ze slitiny 18.8. Mn vyjádřený v procentech je potom patrný z tab. 25.

Tab. 23 Vstupní hmotnosti vzorků slitiny 18.8. Mn.

Materiál	Hmotnost vzorku z manganové slitiny [g]	Hmotnost vzorku s oblastí promísení [g]	Hmotnost vzorku se základním materiálem [g]
Vzorky pro 1. týden	8,32	12,09	11,09
Vzorky pro 2. týden	6,87	8,17	11,51
Vzorky pro 3. týden	6,76	8,41	11,53
Vzorky pro 4. týden	7,83	9,5	10,55

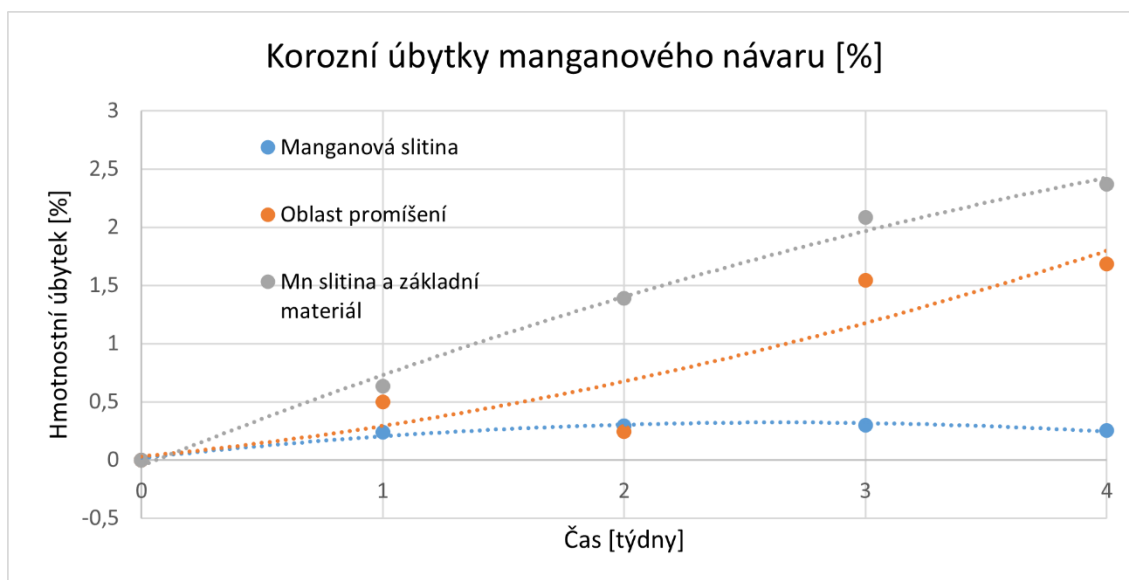
Tab. 24 Konečné hmotnosti vzorků slitiny 18.8. Mn po jednotlivých týdnech.

Materiál	Hmotnost vzorku z manganové slitiny [g]	Hmotnost vzorku s oblastí promísení [g]	Hmotnost vzorku se základním materiálem [g]
Po 1. týdnu (168 hod)	8,3	12,03	11,02
Po 2. týdnu (336 hod)	6,85	8,15	11,35
Po 3. týdnu (504 hod)	6,74	8,28	11,29
Po 4. týdnu (672 hod)	7,81	9,34	10,3

Tab. 25 Konečné korozní úbytky vzorků slitiny 18.8. Mn po jednotlivých týdnech.

Materiál	Korozní úbytek vzorku z manganové slitiny [%]	Korozní úbytek vzorku s oblastí promíšení [%]	Korozní úbytek vzorku se základním materiálem [%]
Po 1. týdnu (168 hod)	0,24	0,50	0,63
Po 2. týdnu (336 hod)	0,29	0,24	1,39
Po 3. týdnu (504 hod)	0,30	1,55	2,08
Po 4. týdnu (672 hod)	0,26	1,68	2,37

Stejně jako u niklové slitiny došlo i u manganové slitiny k výraznějším korozním úbytkům pouze u vzorků obsahujících základní materiál. Nicméně na čisté manganové slitině došlo také ke korozním úbytkům, které ale obdobně jako u niklu dosahovaly zanedbatelných hodnot. Všechny dosažené výsledky korozních úbytků manganové slitiny jsou vloženy do grafu na obr. 45.



Obr. 45 Závislost korozních úbytků na čase u manganové slitiny 18.8. Mn.

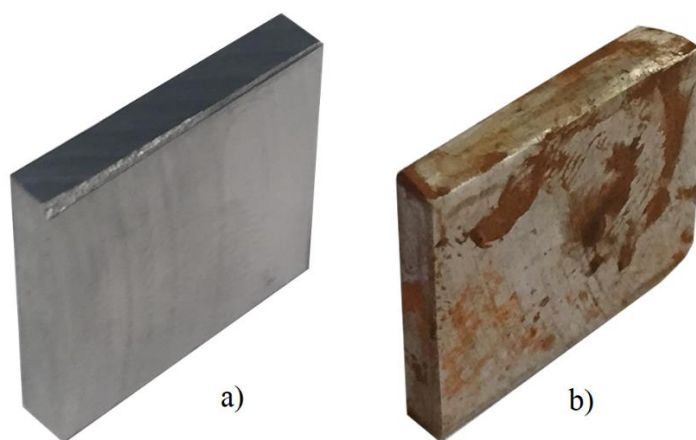
Pokud srovnáme výsledky korozních úbytků v solné komoře pro niklové a manganové slitiny, je zřejmé, že u vzorků čisté niklové slitiny došlo k nulovým či zanedbatelným úbytkům. Hmotnostní úbytky se pohybovaly ve všech případech nejvýše v hodnotách 0,01 g. Po bližším ohledání vzorků byly pozorovány malé zkorodované částice na povrchu, což byly nejspíše zbytky částic či karbidů, které zde zůstali po odběru vzorků. Je pravděpodobné, že zmíněný korozní úbytek byl zapříčiněn právě těmito částicemi. Lze tedy potvrdit fakt, že slitina Inconel 625 je vhodnou aplikací do agresivních prostředí.

U manganových slitin došlo také k úbytkům v řádech setin gramů. Po uplynutí doby dvou týdnů (336 hodinách) v solné komoře došlo u vzorků čisté manganové slitiny ke koroznímu úbytku 0,02 g. Hodnota úbytku, se ovšem po dobu následujících týdnů neměnila. Můžeme tedy konstatovat, že u vzorků nejspíše došlo k vytvoření pasivační vrstvy, která chránila materiál před další korozí a nedocházelo ke zvyšování korozního úbytku.

Z dosažených výsledků lze vyvodit, že slitiny na bázi niklu jsou korozně odolnější než slitiny manganové. Nicméně na základě provedené zkoušky můžeme říct, že obě posuzované slitiny

jsou vhodné pro práci v agresivních prostředích. Na vzorcích z niklové slitiny nebyli ani po čtyřech týdnech detekovány známky koroze, zatímco u manganových slitin došlo k vytvoření tenkého korozního filmu na povrchu vzorku. Tuto skutečnost můžeme pozorovat na obr. 46, kde je vizuální srovnání niklových obr. 46 a) a manganových obr. 46 b) vzorků po třech týdnech v solné komoře.

Nutno ale podotknout, že z dosažených výsledků nelze vyvodit obecný závěr, jelikož můžeme jen těžko posoudit chování daných materiálů v agresivních prostředích. Do problematiky totiž vstupuje více faktorů, jako je např. typ agresivního prostředí, tlaky, teploty atd. Ve Venturiho trubici, dochází k poklesu tlaku a navýšení rychlosti měřeného média. Z těchto důvodů dochází v této části ke zvýšenému otěru, který by mohl u manganové slitiny způsobit obroušení pasivační vrstvy, což by mohlo mít za následek další korozi a postupné odebrání návarového kovu.



Obr. 46 Vzorek niklové a) a manganové b) slitiny po 3 týdnech v solné komoře.

### 3.4 Zkouška chemické koroze

Navazujícím experimentem na korozní odolnost manganového a niklového návaru byla zkouška materiálů v chemicky agresivním prostředí. Zkouška byla realizována v prostorách FSI. Při provedení experimentu bylo přihlédnuto k normě ASTM G48-11(2015). Experiment se od normy odklání zejména v rozměrech zkoušených vzorků, nicméně korozní časy, koncentrace, teploty a čištění proběhlo v souladu s normou. [68]

Pro zkoušku chemické koroze byly použity vzorky čistých manganových a niklových návarů. Chemické složení manganového návaru je v tab. 3, složení niklového návaru potom v tab. 13. Přibližné rozměry vzorků byly 15 x 15 x 2 mm. Místo odběru vzorků na bázi manganu i niklu je stejné jako u zkoušky koroze v solné mlze a je vyznačeno na obr. 39 písmenem (a).

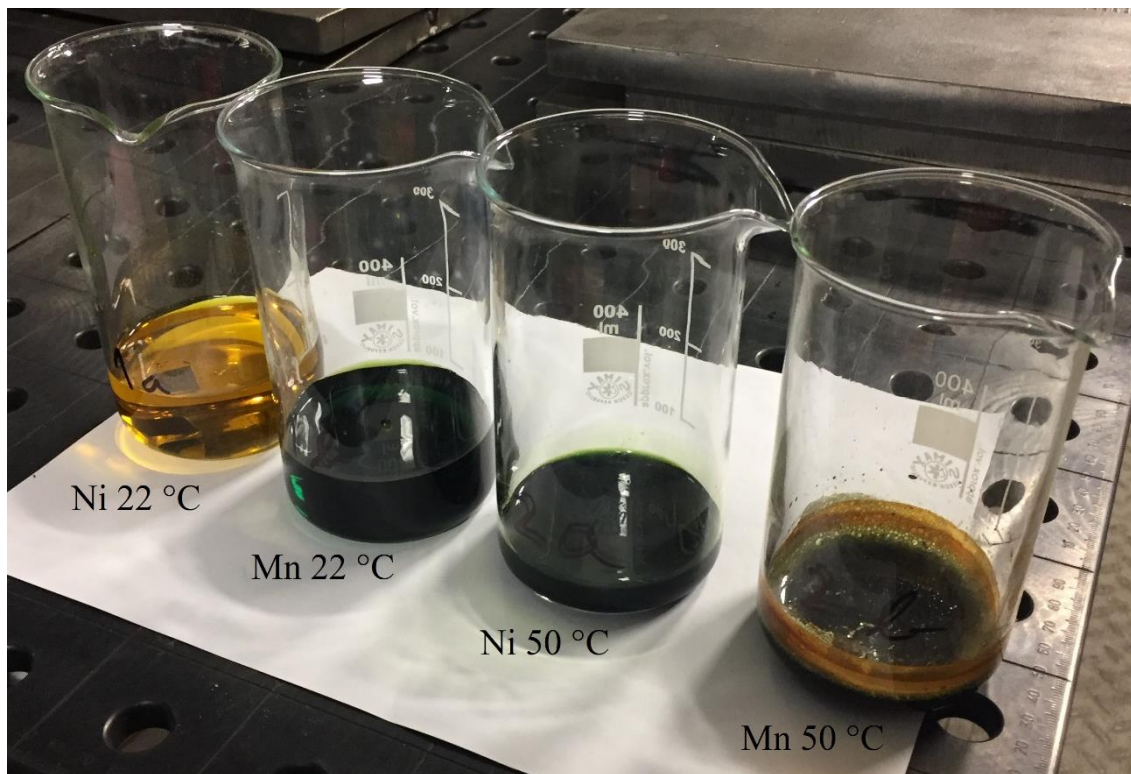
V experimentu byly použity 2 manganové a 2 niklové vzorky. Odebrané vzorky byly předem zváženy na přesné váze Kern ABS na čtyři desetinná místa. Vzorky byly označeny a vloženy návarem vzhůru do kádinek s leptacím roztokem chloridu železitého ( $\text{FeCl}_3$ ) o objemu 100 ml a koncentraci 10 %. Kádinky se vzorky byly přikryty pro minimalizaci úniku výparů.

Vzorky v roztocích byly rozděleny do dvou skupin. První skupina, obsahující jeden vzorek manganové a jeden niklové slitiny, byla ponechána na vzduchu, zatímco druhá skupina byla vložena do pece zahřáté na 50 °C. Obě skupiny byly následně ponechány v roztocích po dobu 72 hodin.

Po uplynutí 72 hodin byly vzorky v roztocích seřazeny pro vizuální porovnání, viz obr. 47. První dvě kádinky se vzorky byly ponechány při pokojové teplotě, zatímco zbývající dvojice



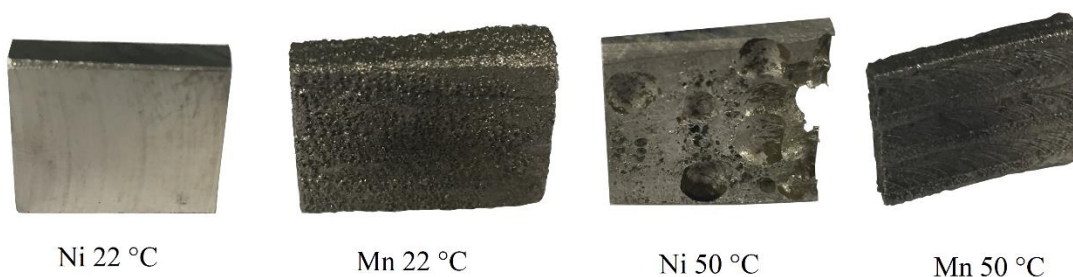
kádinek byla ponechána v peci při teplotě 50 °C. U kádinek ponechaných v peci je patrné snížení hladiny roztoku způsobené zvýšenou intenzitou odpařování při vyšší teplotě. Je zřetelné, že u niklové slitiny za pokojové teploty nedošlo k výraznějším korozním reakcím, zatímco u slitiny 18.8. Mn ano. Zvýšení teploty mělo za následek podpoření agresivity roztoku, což způsobilo korozní reakci obou slitin.



Obr. 47 Vzorky Ni a Mn slitin po 72 hodinách v roztoku chloridu železitého.

Jednotlivé vzorky byly postupně vyjmuty z leptacího roztoku a očištěny v acetonu. Vzorky byly osušeny a mechanicky očištěny ocelovým kartáčem pro odstranění zbytků koroze. Následoval oplach vodou a lihem. V závěrečné fázi byly vzorky vysušeny.

Po očištění a usušení byly vzorky postaveny vedle sebe pro vizuální porovnání. Na obr. 48 jsou seřazeny jednotlivé vzorky manganových a niklových návarů korodované za různých teplot. Kromě vzorku niklové slitiny za pokojové teploty došlo u všech ostatních k výrazné vizuální i hmotnostní změně. U vzorků manganové slitiny při 22 °C došlo ke zhrubnutí povrchu v důsledku vytvoření důlkové koroze. Za zvýšené teploty byl u obou slitin znatelný zvýšený úbytek materiálu. Na povrchu vzorku niklové slitiny došlo k vytvoření důlkové koroze. Podobně tomu bylo i u manganové slitiny při teplotě 50 °C. Znatelným rozdílem bylo rozmístění a velikost důlků. Na vzorku niklové slitiny byly důlky rozmístěny nahodile a dosahovali větších rozměrů ve srovnání se slitinou 18.8. Mn. Důlková koroze na vzorku slitiny 18.8. Mn byla co do velikosti znatelně menší, ale pokrývala celý povrch.



Obr. 48 Porovnání Ni a Mn vzorků po 72 hodinách v roztoku chloridu železitého.

Experiment byl zopakován pro dosažení průkaznějších výsledků. Vstupní hodnoty jednotlivých vzorků při různých teplotách byly zprůměrovány a zaneseny do tab. 26, výstupní jsou v tab. 27. V tab. 28 jsou vypočteny hodnoty hmotnostních úbytků v procentech. Pro vizuální srovnání je přiložen graf na obr. 49, kde jsou slitiny při různých teplotách seřazeny dle hmotnostních úbytků sestupně od největších po nejmenší.

Tab. 26 Průměrné vstupní hmotnosti vzorků pro chemickou korozi.

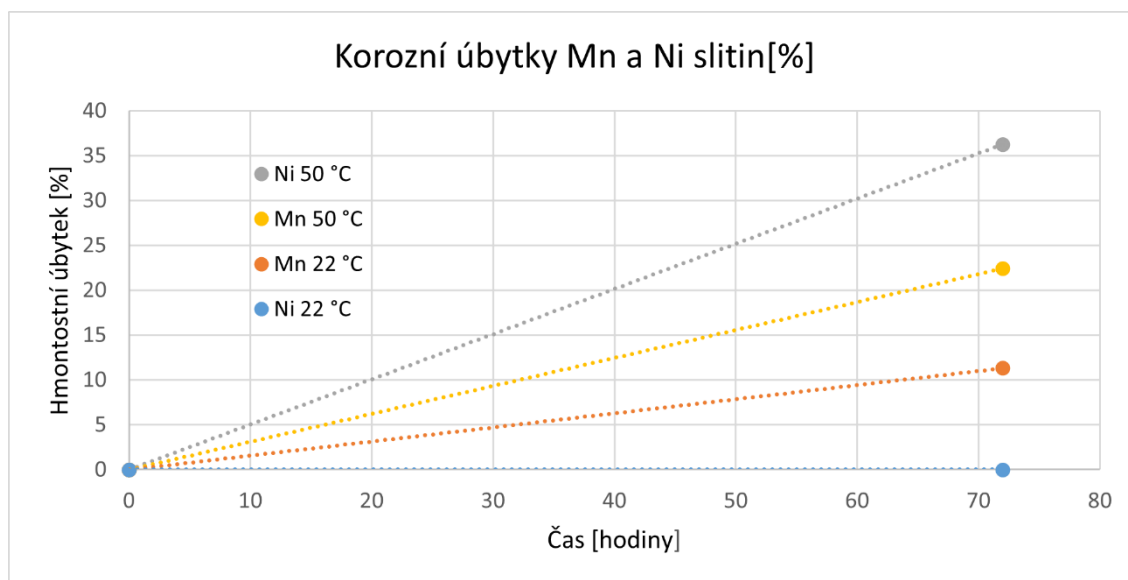
Materiál / Teplota	Niklová slitina při 22 °C	Manganová slitina při 22 °C	Niklová slitina při 50 °C	Manganová slitina při 50 °C
Průměrná hmotnost vzorků [g]	3,8514	7,1724	5,6284	5,9853

Tab. 27 Průměrné konečné hmotnosti vzorků pro chemickou korozi.

Materiál / Teplota	Niklová slitina při 22 °C	Manganová slitina při 22 °C	Niklová slitina při 50 °C	Manganová slitina při 50 °C
Průměrná hmotnost vzorků po 72 h [g]	3,8491	6,3605	3,5871	4,6433

Tab. 28 Průměrné korozní úbytky vzorků pro chemickou korozi.

Materiál / Teplota	Niklová slitina při 22 °C	Manganová slitina při 22 °C	Niklová slitina při 50 °C	Manganová slitina při 50 °C
Průměrný hmotnostní úbytek po 72 h [%]	0,06	11,32	36,27	22,42



Obr. 49 Korozní úbytky slitin Ni a Mn po 72 hodinách.

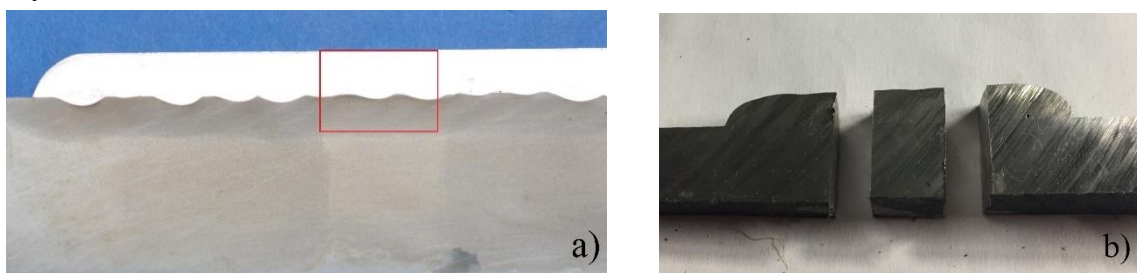
Při porovnávání výsledků zkoušky chemické koroze dospějeme k závěru, že při pokojové teplotě jsou výrazně lepší slitiny na bázi niklu, jelikož jejich korozní úbytky se pohybují v řádech setin procent. Zatímco hmotnostní úbytky slitiny 18.8. Mn se pohybují kolem 11 %. Po zvýšení teploty na 50 °C nastala situace opačná a u slitiny niklu se objevila výrazná důlková koroze doprovázená extrémními hmotnostními úbytky kolem 36 %. Slitina 18.8. Mn si za zvýšené teploty vedla lépe, nicméně korozní úbytky se pohybovaly kolem 22 %. Také velikost

důlků na povrchu materiálu nedosahovala tak velkých rozměrů, jako bylo dosaženo u slitiny niklu. Lze tedy říct, že vhodnějším materiálem do chemicky agresivních prostředí za pokojové teploty je slitina Inconel 625. Na základě provedeného experimentu se při zvýšených teplotách jeví jako vhodnější použít slitinu třídy 18.8. Mn.

Nicméně v dané aplikaci nebude měřicím členem proudit chemicky agresivní látka, ale i tak experiment poskytuje náhled na odolnost zkoumaných materiálů proti chemické korozi za normální, či zvýšené teploty. Ovšem, aby byla zkouška průkaznější bylo by vhodné postupovat dle normy ASTM G48-11(2015), což z důvodu vyhodnocení návaru nebylo možné. Významnou roli hraje také proudění agresivního média a lze tedy jen těžko určit chování materiálu v provozu, obdobně jako u zkoušky koroze v solné mlze. Pro tento druh měření by bylo vhodné sledovat měřicí členy zařazené do provozu po několik let a po demontáži porovnat úbytky či opotřebení po daném čase. [68]

### 3.5 Vyhodnocení mikrostruktury a mikrotvrdosti

Kromě vyhodnocení makrostruktury návaru proběhlo také vyhodnocení mikrostruktury. Pozorované vzorky byly odebrány z oblasti návaru a základního materiálu jak z manganové, tak niklové slitiny. Přesné místo odběru vzorku slitiny 18.8. Mn je zobrazeno na obr. 50 a) a pro niklovou slitinu Inconel 625 na obr. 50 b). Dále byly odebrány kousky materiálu ze vzorků ponechaných v solné komoře po dobu čtyř týdnů. Byl opět odebrán vzorek manganové i niklové slitiny. Na vzorcích byla snaha nalézt mezikrystalickou korozi na níž jsou korozivzdorné oceli náchylné.



Obr. 50 Místo odběru Mn slitiny a), Ni slitiny b).

Po odebrání byly vzorky zalisovány do tablet na zařízení Metkon Ecompress 100. V první řadě byly vzorky umístěny pozorovanou plochou na spodní válec lisovacího zařízení. Ve druhé fázi došlo k přidání lisovacího pojiva LevoFast, což je melaninový materiál se skelným a minerálním plnivem určený pro zalévání za tepla. Po přidání pojiva byl přístroj uzavřen horním lisovacím válcem a natlakován na tlak 250 bar. Následoval ohřev na teplotu 190 °C, při níž došlo ke spojení materiálů. Závěrem proběhla fáze chlazení, následovalo vyjmutí a očištění vzorku od nečistot a otřepů pojiva.

Zalisované a očištěné vzorky byly připraveny na broušení a leštění, které proběhlo na zařízení Struers LaboPol-5. Při broušení bylo použito zrnitostí od #80 až 1200. Následovala operace leštění kotoučem s označením DAC, přičemž bylo využito brusiva o velikosti 3 μm na bázi diamantové suspenze rozpuštěné ve vodném roztoku.

Leštěné vzorky byly leptány leptadlem Nital 3 a oblast návaru leptadlem Kalling No.2. Po naleptání byly vzorky připraveny pro pozorování pod mikroskopem Neophot 32. Byla provedena série fotografií při různých zvětšení. Pozorována byla zejména oblast promísení základního a návarového kovu. U vzorků, které byly ponechány po dobu čtyř týdnů v solné komoře, byla snaha nalézt mezikrystalickou korozi na okrajích vzorků, protože povrch materiálu byl vystaven agresivnímu prostředí.

Nejprve proběhlo vyhodnocování mikrostruktury předělu mezi základním a návarovým kovem u slitiny 18.8. Mn. Struktura návarového a základního kovu spolu s oblastí promísení je patrná

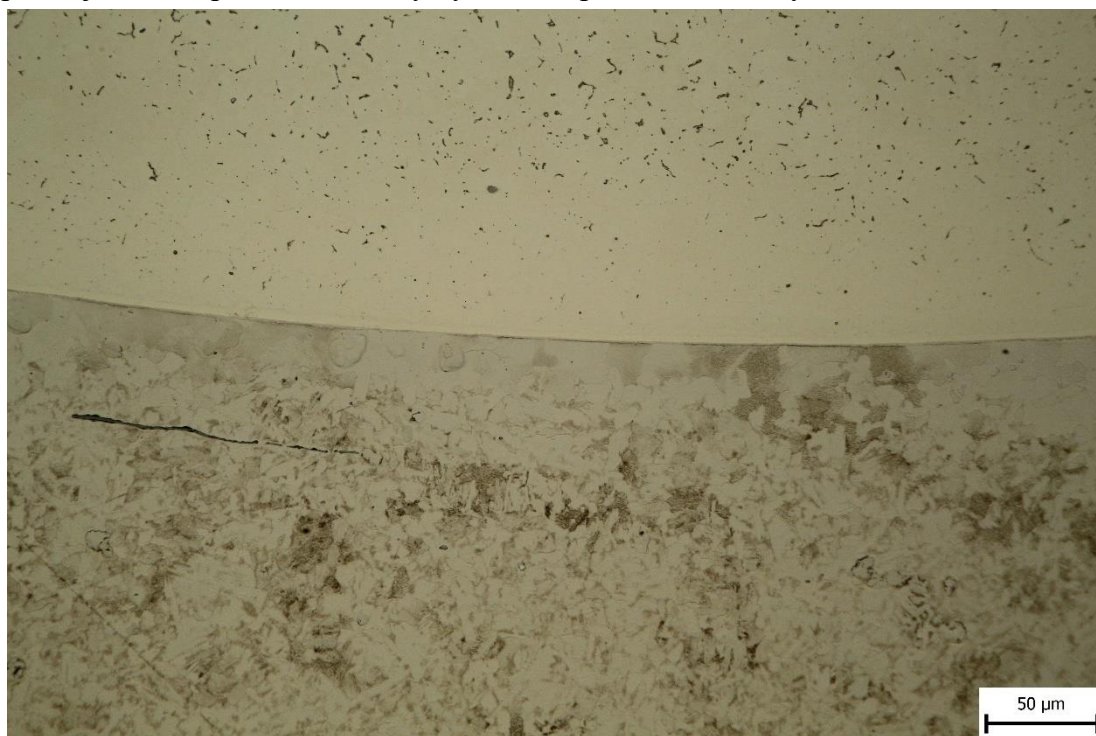


z obr. 51. V základním materiálu jsou viditelná zrna perlitu a feritu. Na některých místech jsou také pozorovatelné vměstky, které jsou rozválcovány procesem tváření polotovaru trubky.



Obr. 51 Mikrostruktura oblasti promísení slitiny 18.8. Mn při původním zvětšení 100 x.

Pro podrobnější náhled byl pořízen snímek ze stejné oblasti při větším zvětšení, viz obr. 52. Na obrázku je dobře patrné zhrubnutí zrn základního materiálu v důsledku působení tepla při navařování. Lze také pozorovat austenitickou matici návarového kovu. Tmavé částice v austenitické matici jsou nejspíše karbidy chromu, které se vyloučily na hranicích zrn. Avšak pro přesnější určení původu částic by bylo nutné provést chemický rozbor.



Obr. 52 Mikrostruktura oblasti promísení slitiny 18.8. Mn při původním zvětšení 400 x.



Pro srovnání byl pořízen snímek mikrostruktury niklové slitiny Inconel 625. Fotografie byla opět vytvořena v oblasti promísení základního s návarovým kovem, viz obr. 53. Ve struktuře základního kovu jsou patrná zrna perlitu a feritu, která jsou v oblasti promísení mírně hrubší, než ve zbytku základního materiálu.



Obr. 53 Mikrostruktura oblasti promísení slitiny Inconel 625 při původním zvětšení 200 x.

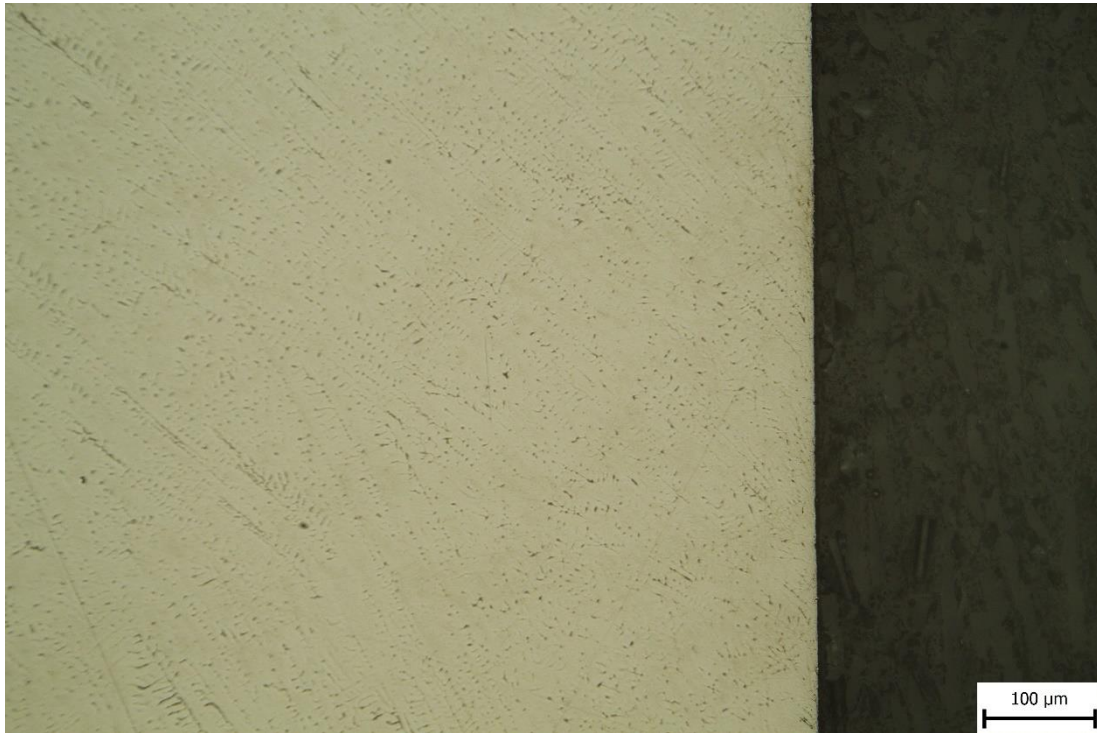
Pro odhalení případného vzniku mezikrystalické koroze byly pořízeny snímky krajních částí zkoumaných vzorků. Na obr. 54 je patrná hrana návarového kovu niklové slitiny. Na obrázku je vidět dendritická struktura bez náznaku mezikrystalické koroze.



Obr. 54 Mikrostruktura povrchu slitiny Inconel 625 při původním zvětšení 200 x.

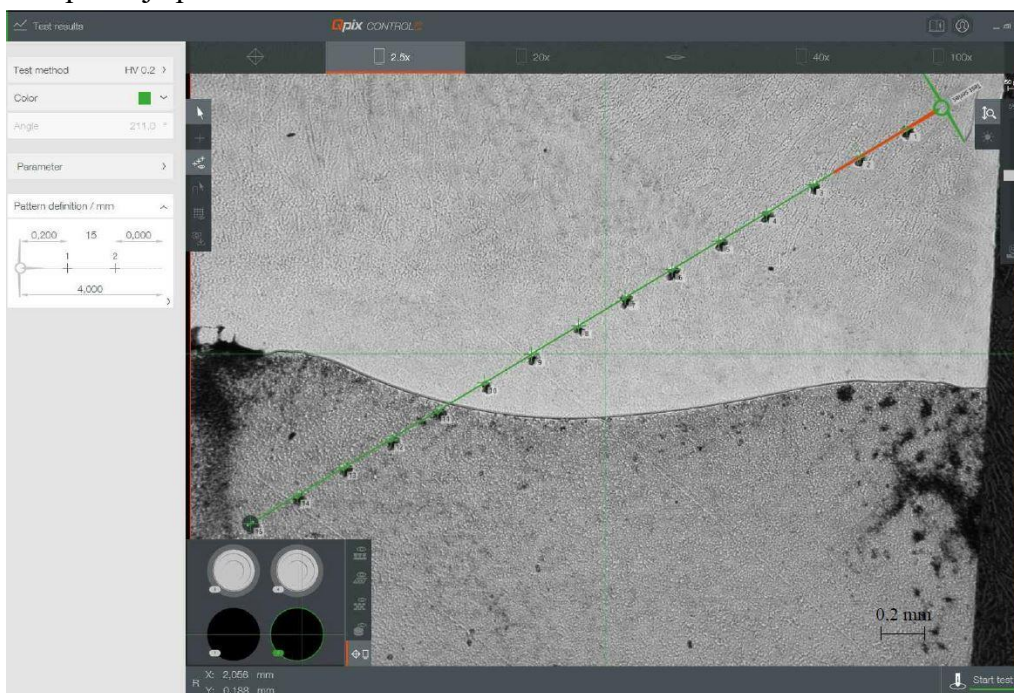


Na obr. 55 je zobrazena hrana návarového kovu slitiny 18.8. Mn. Ani u této slitiny nebyla nalezena jediná známka mezikrystalické koroze. Na základě provedené zkoušky korozní odolnosti v solné komoře lze říci, že oba materiály jsou vůči mezikrystalické korozi odolné.



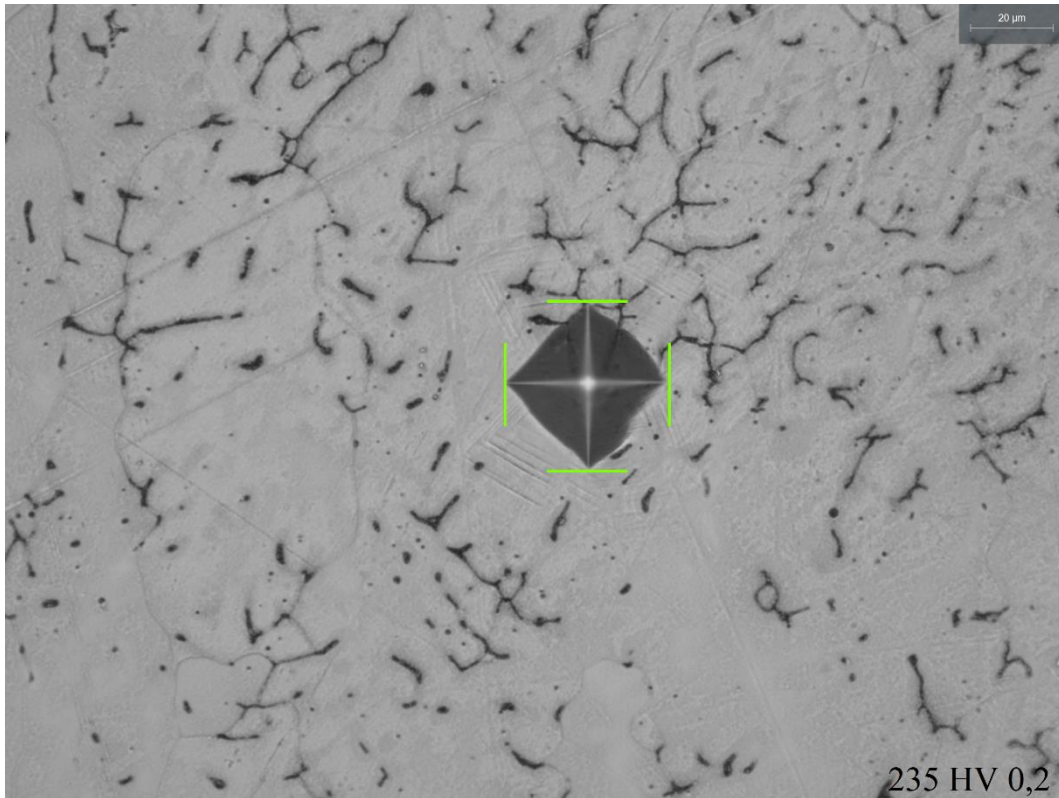
Obr. 55 Mikrostruktura povrchu slitiny 18.8. Mn při původním zvětšení 200 x.

Pro zjištění možného zpevnění slitiny 18.8. Mn a případných změn tvrdosti v oblasti tepelně ovlivněné zóny, byla provedena zkouška měření mikrotvrdomosti. Rozsah experimentu byl stanoven pouze na manganovou slitinu. Z toho důvodu, že u slitiny niklu nebylo předpokládáno zpevnění návarového kovu. Pro měření byl použit vzorek, na kterém byla vyhodnocována mikrostruktura. Zalisovaný a vyleštěný vzorek byl vložen do mikrotvrdoměru Qness Q10 A. Rozložení vpichů je patrné z obr. 56.

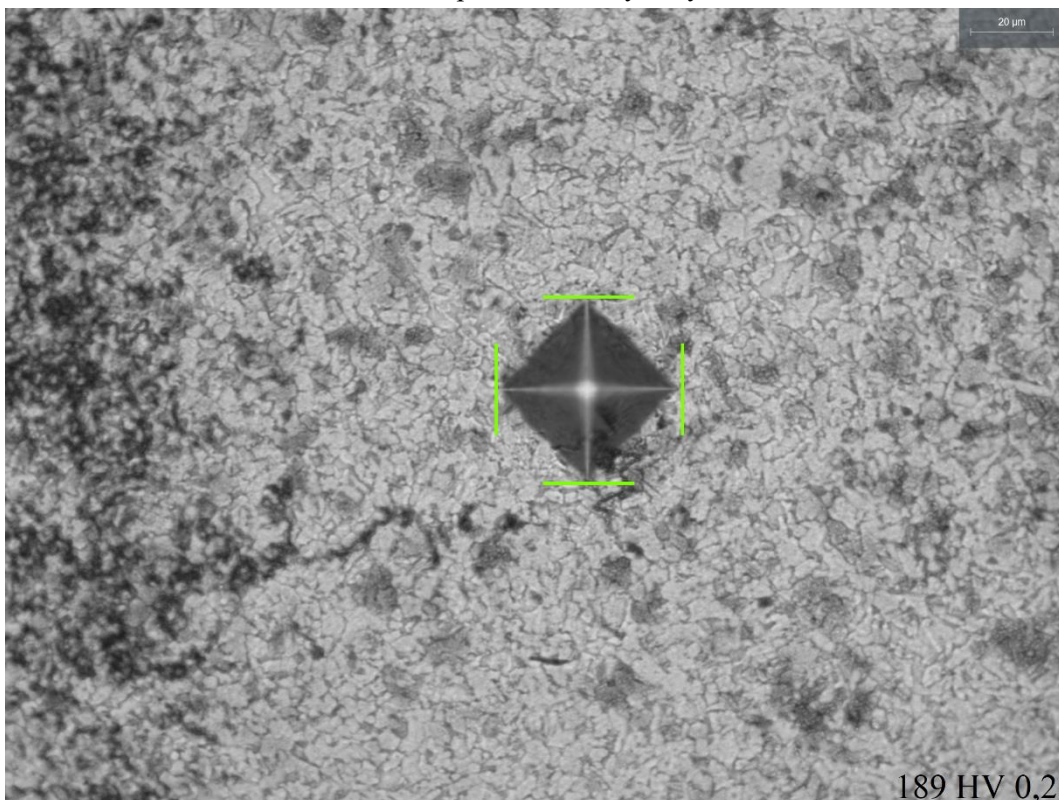


Obr. 56 Rozložení vpichů pro měření mikrotvrdomosti.

Z obrázku je patrné, že byla vedena trajektorie patnácti vpichů na délce 4 mm. Vzdálenost mezi vpichy činila cca 0,25 mm. Série byla vedena pod úhlem zhruba 30°, aby při měření mikrotvrlosti byly zachyceny všechny oblasti, tj. návarového kovu, oblasti tepelně ovlivněné zóny a základního kovu. Použité zatížení pro vyhodnocení bylo HV 0,2. Příklad vpichu do slitiny 18.8. Mn je na obr. 57. Na obr. 58 je zobrazen vpich do základního materiálu.

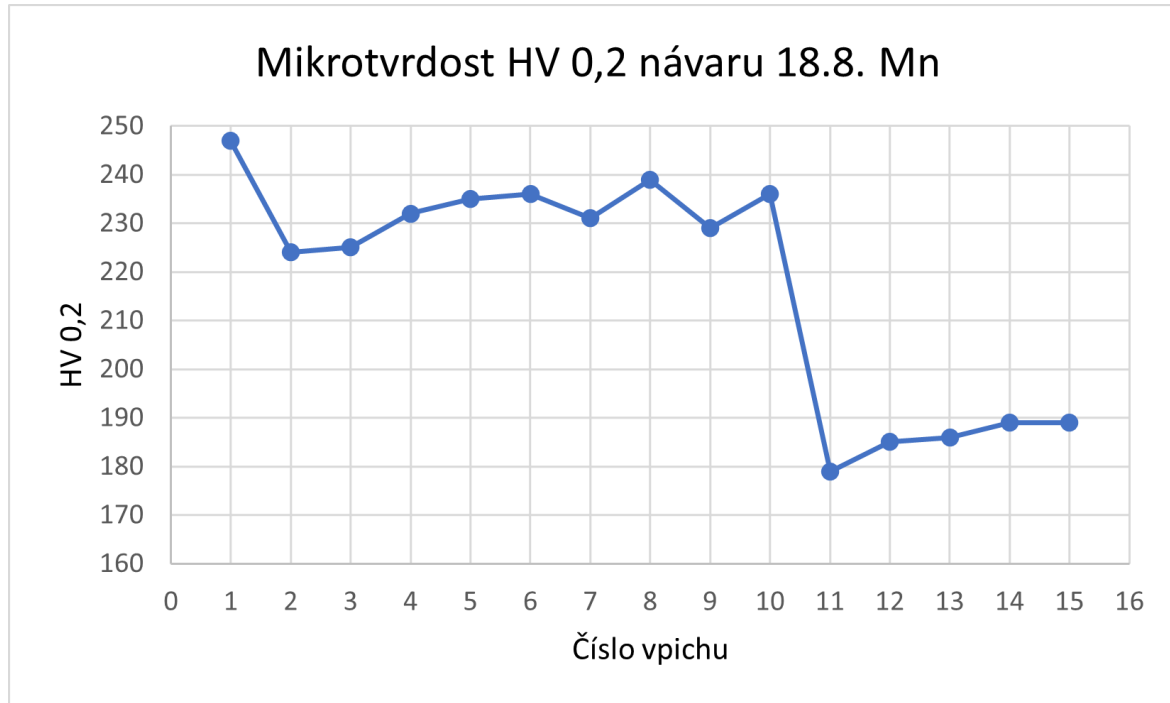


Obr. 57 Ukázka vpichu do slitiny třídy 18.8. Mn.



Obr. 58 Ukázka vpichu do základního materiálu.

Při podrobnějším pohledu na obr. 57 si lze povšimnout zvrásnění povrchu v okolí vpichu. S největší pravděpodobností se jedná o plastickou deformaci, která byla způsobena nejspíše zpevněním austenitické matrice. Na základě rozměrů vtisku byly přepočteny hodnoty výsledné tvrdosti pro jednotlivé vpichy pomocí softwaru Qpix Control. Výsledek zkoušky je patrný z grafu na obr. 59.



Obr. 59 Naměřené hodnoty mikrotvrdości.

Na grafu lze pozorovat přechod z návarového kovu do tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu. Průměrná hodnota mikrotvrdości slitiny 18.8. Mn se pohybuje kolem hodnoty 233 HV 0,2. Hodnota v tepelně ovlivněné zóně základního materiálu klesla na hodnotu 179 HV 0,2 a postupně narůstala do hodnoty 189 HV 0,2, což je mikrotvrdość základního materiálu mimo tepelně ovlivněnou oblast. Mírný pokles tvrdosti základního materiálu v této oblasti byl nejspíše způsoben vyžiháním při samotném procesu navařování. Z grafu také vyplývá, že oblasti změny mechanických vlastností základního materiálu je velmi malá a na základě zkoušky mikrotvrdości ji lze stanovit přibližně na 0,4 mm.

Závěrem zkoušky lze říci, že u manganové slitiny nedošlo k výraznějšímu zpevnění austenitické matrice, protože hodnoty zpevněného materiálu dosahují násobně vyšších tvrdostí, jak udává literatura [4]. Nicméně k jistému zpevnění došlo, což dokazuje plastická deformace vzniklá v okolí vpichu. Na samotný výsledek má ovšem vliv více faktorů. Obsah manganu se pohybuje kolem 7 %, což nemusí být dostatečné pro vyvolání zpevnění. Dále nemůžeme srovnávat hodnoty mikrotvrdości a makrotvrdości, jelikož hodnoty se řádově liší. Je třeba také brát v potaz, že hodnota zatížení nemusela být dostatečná pro vyvolání výraznějšího zpevnění manganové slitiny. [4]

Navařené vzorky s odladěnými parametry byly pro kontrolu zaslány do laboratoří TUV NORD Czech, s.r.o. Zpráva o provedených zkouškách spolu s fotodokumentací je v příloze 2. Dle provedených zkoušek byl provedený dvouvrstvý návar slitiny třídy 18.8. Mn shledán jako vyhovující. Z těchto důvodů byla vyhotovena předvýrobní specifikace postupu navařování (pWPS), který nalezneme v příloze 3.



## ZÁVĚR

Byla provedena literární rešerše na oblast navařování manganových slitin. Porovnány byly jednotlivé technologie, z nichž se jeví jako nejvhodnější navařování plazmou s přídavným materiálem ve formě prášku (metoda 152). Metoda je produktivní a při procesu nedochází k výraznějšímu promísení základního a návarového materiálu. Použitým základním materiálem byla uhlíková ocel, která je vhodná pro navařování a svařování. Při procesu navařování tedy není třeba využít zvláštních postupů. U manganových slitin je postupováno stejně, jako při navařování austenitických ocelí s určitými výjimkami. Významný vliv mají legující prvky, které přímo ovlivňují samotný proces a výsledné vlastnosti návaru, kterým jsou např. tvrdost, korozní odolnost, houževnatost atd.

V experimentální části byly provedeny celkově 3 sady zkušebních návarů, z nichž každá sada obsahovala jednovrstvý a dvouvrstvý návar slitiny třídy 18.8. Mn. Pro první sadu byly zvoleny dané parametry, které vycházely z doporučení výrobce přídavného materiálu. Při volbě parametrů bylo také přihlédnuto k parametrům navařování používaných pro niklové slitiny. V první sadě návarů byly v řezu detekovány vady pomocí vizuální, penetrační a prozařovací zkoušky. Zjištěné vady byly zapříčiněny především nedostatečným vysušením přídavného materiálu ve formě prášku a nevhodně volenými parametry navařování. Ve druhé sadě byl oproti první sadě prášek dostatečně přesušen a byl snížen přísun prášku, což mělo za následek snížení výšky navařeného kovu ze zhruba 5 mm na 4 mm a došlo k vytvoření vyhovujícího jednovrstvého návaru bez vnitřních či povrchových vad. Ve druhé vrstvě došlo k neprůvarům, proto byla provedena třetí sada návarů. Zde došlo k mírnému navýšení výkonu, čímž bylo dosaženo kvalitní návarové plochy bez vnitřních vad. Parametry procesu byly odladěny a budou použity spolupracující firmou pro kvalifikaci WPQR.

Pro všechny sady byly nejprve provedeny vizuální a penetrační zkoušky, které by odhalily vzniklé vady. U první sady návarů a pro dvouvrstvý odladěný návar ze třetí sady byla vypočtena hodnota zředění. V první sadě činila hodnota zředění jednovrstvého návaru 6,16 %, převýšení obrobenej vrstvy se pohybovalo kolem 5,1 mm a šířka tepelně ovlivněné oblasti zhruba 3,8 mm. U dvouvrstvého návaru bylo zředění 1,13 %, převýšení osoustružené vrstvy asi 10,5 mm a šířka tepelně ovlivněné oblasti cca 2,9 mm. Ve třetí sadě pro odladěný dvouvrstvý návar byla vypočtena hodnota zředění dvouvrstvého návaru 6,74 %, převýšení neobrobeneho povrchu návaru činilo zhruba 7,8 mm a šířka tepelně ovlivněné oblasti byla stanovena kolem 4,8 mm.

Na základně zkoušky korozní odolnosti v solné mlze lze konstatovat, že jak slitina třídy 18.8. Mn, tak porovnávaná niklová slitina Inconel 625 jsou v tomto prostředí korozně odolné. U zkoušky chemické koroze byly hmotnostní úbytky v řádech desítek procent u obou materiálů. Za pokojové teploty se jeví jako odolnější slitina Inconel 625, kde byly zanedbatelné úbytky, zatímco u slitiny 18.8. Mn byl naměřen úbytek 11,3 %. Za teploty 50 °C byla situace opačná, hmotnostní úbytek niklové slitiny činil 36,3 %, zatímco slitiny manganu 22,4 %. Avšak z provedených zkoušek nelze vyvodit konkrétní závěry, jelikož ve Venturiho trubici kromě agresivního média působí také vysoké tlaky a teploty. Proto lze jen těžko posoudit chování daných materiálů v provozu.

Při zkoumání mikrostruktury nebyla nalezena mezikrystalická koroze. Výsledná mikrotvrdost slitiny 18.8. Mn se pohybovala kolem hodnoty 233 HV 0,2. Materiál nevykazoval známky výraznějšího zpevnění. V základním materiálu nedošlo k významné změně mechanických vlastností v důsledku tepelného ovlivnění.

Plazmovým automatem lze navařovat Venturiho trubice široké škály vnitřních průměrů a délek. Nicméně firma zvažuje využití technologie TIG, i na úkor snížené produktivity, z důvodu snížené spotřeby přídavného materiálu a vytvoření dostatečné tloušťky vrstvy předepsané zákazníkem. Oproti niklovým slitinám se manganová slitina 18.8. Mn svými vlastnosti a nižší cenou zdá být vhodná pro navařování Venturiho trubice.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Průmyslové potrubní rozvody. *Mariánskohorská a.s.* [online]. Ostrava, 2020 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://marianskohorska.cz/prumyslove-potrubni-rozvody/>
  2. What's the best way to measure pipeline flow?. *KSB Inc.* [online]. 2020 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://giw.ksb.com/blog/whats-the-best-way-to-measure-pipeline-flow>
  3. ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 447 s. : il. ; 23 cm. ISBN 80-7300-156-X.
  4. FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. Brno: CERM, 1996, 261 s. : obr., tabulky, grafy. ISBN 80-85867-95-8.
  5. Venturi tube. *Seiko flowcontrol* [online]. Stockerau, c2014 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.seiko-flowcontrol.com/venturi-tube.html>
  6. Klasická Venturiho trubice. *Mattech s.r.o.* [online]. Ostrava, 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://mattech.cz/cz/vyrobky/dyzy-a-venturiho-trubice/item/klasicka-venturiho-trubice.html>
  7. GAĞOL, Michał, Andrzej PRZYJAZNY a Grzegorz BOCZKAJ. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review. *Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland 1996)* [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2018, **338**, 599-627 [cit. 2023-03-06]. ISSN 1385-8947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2018.01.049
  8. RAUT-JADHAV, Sunita, Daulat SAINI, Shirish SONAWANE a Aniruddha PANDIT. Effect of process intensifying parameters on the hydrodynamic cavitation based degradation of commercial pesticide (methomyl) in the aqueous solution. *Ultrasonics sonochemistry* [online]. AMSTERDAM: Elsevier B.V, 2016, **28**, 283-293 [cit. 2023-03-06]. ISSN 1350-4177. Dostupné z: doi:10.1016/j.ultsonch.2015.08.004
  9. LÖBL, Karel. *Navarování*. Praha: SNTL, 1961, 132 stran : ilustrace, grafy.
  10. CHEN, Baiyang, Peihu GAO, Bo ZHANG, et al. Wear Properties of Iron-Based Alloy Coatings Prepared by Plasma Transfer Arc Cladding. *Coatings (Basel)* [online]. Basel: MDPI, 2022, **12**(2), 243 [cit. 2023-03-06]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings12020243
  11. ČSN EN ISO 4063. *Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
  12. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. : il. ISBN 80-85771-81-0.
  13. *Plazmové svařování (navarování) - 15* [online]. In: . 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/1807039-Plazmove-svarovani-navarovani-15.html>
  14. Svařování plazmovým obloukem. In: *ČSÚ s.r.o.* [online]. 2016 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8914220-Svarovani-plazmovym-obloukem.html>
  15. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II část svařování*. 1. Brno, 2006.
  16. DÍAZ, Víctor Vergara. *Hardfacing by Plasma Transferred Arc Process*. In: . IntechOpen, 2011. ISBN 9789533076423. Dostupné z: doi:10.5772/28802
  17. HLAVATÝ, Ivo. Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu WIG (TIG) - 141. In: *Teorie a technologie svařování* [online]. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011, s. 262 [cit. 2023-03-06]. ISBN 978-80-248-2414-7. Dostupné z: <http://staryweb.ivohlavaty.cz/2009Svarovani/09-141.pdf>
-



- 
18. BALEJ, Zdeněk, Vladimír KUDĚLKA a Jan OPLETAL. *Učebnice pro základní kurz svařování ZK 141 8: obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu vysokolegovaných austenitických ocelí*. 4. vydání. Ostrava: ZEROSS - svářečské nakladatelství, 2018, 164 stran : ilustrace ; 21 cm. ISBN 978-80-85771-16-9.
  19. ALLFORD, Dan a Dave HEBBLE. Could GTAW hot-wire go mainstream?. *The fabricator* [online]. 2019 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/arcwelding/could-gtaw-hot-wire-go-mainstream>
  20. PAI, Aravinda, Irappa SOGALAD, Prabhat KUMAR, BASAVARAJAPPA a SURESHA. Impact properties of modified 9Cr 1Mo steel welds: Comparison between cold wire and hot wire gas tungsten arc welding processes. *The International journal of pressure vessels and piping* [online]. Elsevier, 2022, **198**, 104672 [cit. 2023-03-06]. ISSN 0308-0161. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijvp.2022.104672
  21. MORAVEC, Jaromír. *Otázka B14 - Svařování pod tavidlem a svařování elektrostruskové* [online]. In: . [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: [https://elearning.tul.cz/pluginfile.php/297066/mod\\_folder/content/0/B14\\_Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD%20pod%20tavidlem%20a%20elektrostruskov%C3%A9.pdf?forcedownload=1](https://elearning.tul.cz/pluginfile.php/297066/mod_folder/content/0/B14_Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD%20pod%20tavidlem%20a%20elektrostruskov%C3%A9.pdf?forcedownload=1)
  22. RAO, Venkata a Vivek KALYANKAR. Experimental investigation on submerged arc welding of Cr–Mo–V steel. *International journal of advanced manufacturing technology* [online]. London: Springer London, 2013, **69**(1-4), 93-106 [cit. 2023-03-06]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-013-5007-9
  23. BARTOŠ, Jaroslav. *Základní kurz svařování metodou 111 1.1: (ruční svařování elektrickým obloukem, obalenou elektrodou nelegovaných a nízkolegovaných ocelí) se souborem testových otázek*. 5. vydání. Ostrava: Zeross, 2018, 150 stran : ilustrace, grafy. ISBN 978-80-85771-15-2.
  24. HLAVATÝ, Ivo. Ruční obloukové svařování obalovanou elektrodou - 111. In: *Teorie a technologie svařování* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011 [cit. 2023-03-06]. ISBN 978-80-248-2414-7. Dostupné z: <http://staryweb.ivohlavaty.cz/2009Svarovani/05-111.pdf>
  25. Základní princip laseru. In: *LAO* [online]. Praha, 2013 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
  26. 3D tisk. In: *3D wiser* [online]. Praha, 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/3d-tiskarny/kovy/meltio/>
  27. LI, Gang, Maolong ZHANG, Jian HUANG, Zhiyuan SUN a Yixiong WU. A comparative study on microstructure and properties of Inconel 52M overlays deposited by laser beam and GTA cladding. *International journal of advanced manufacturing technology* [online]. London: Springer London, 2015, **81**(1-4), 103-112 [cit. 2023-03-06]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-7198-8
  28. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. I. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, xii, 516 s. : il. ISBN 80-7204-283-1.
  29. KATO, Tetsuo, Shoichi FUKUI, Masakuni FUJIKURA a Kiyohito ISHIDA. Structural Stability and Mechanical Properties of Fe-Mn-Cr Alloys. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan* [online]. 1976, (16), 12 [cit. 2023-03-06]. ISSN 1881-1183. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.16.673>
-

- 
30. ALLEN, Michael a Bruce BOARDMAN. *ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys* [online]. 2005 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://dl.asminternational.org/handbooks/edited-volume/16/Properties-and-Selection-Irons-Steels-and-High>
  31. ZELLAGUI, Redouane, Larbi HEMMOUCHE a Hamida BOUCHAFAA. Effect of Heat Treatments on the Microstructure, Mechanical, Wear and Corrosion Resistance of Casted Hadfield Steel. *International journal of metalcasting* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2022, **16**(4), 2050-2064 [cit. 2023-03-06]. ISSN 1939-5981. Dostupné z: doi:10.1007/s40962-021-00751-z
  32. ZHANG, Fucheng. Micro-mechanism of rolling contact fatigue in Hadfield steel crossing. *International journal of fatigue* [online]. OXFORD: Elsevier, 2012, **44**, 273-278 [cit. 2023-03-06]. ISSN 0142-1123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2012.04.010
  33. ČÍHAL, Vladimír. *Mezikrystalová koroze ocelí a slitin*. 2. přep. a dopl. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1978, 406 s. : obr., čb. fot., tabulky, grafy.
  34. PRADHAN, Sharat Kumar, Prasanta BHUYAN a MANDAL. Individual and synergistic influences of microstructural features on intergranular corrosion behavior in extra-low carbon type 304L austenitic stainless steel. *Corrosion science* [online]. OXFORD: Elsevier, 2018, **139**, 319-332 [cit. 2023-02-01]. ISSN 0010-938X. Dostupné z: doi:10.1016/j.corsci.2018.05.014
  35. GAVRILJUK, Valentine a Andry TYSHCHENKO. Corrosion-resistant analogue of Hadfield steel. *Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing* [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2006, **420**(1-2), 47-54 [cit. 2023-03-06]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2006.01.066
  36. BERNS, Hans, Nilofar NABIRAN a Laís MUJICA. High-Interstitial Stainless Austenitic Steel Castings. *Steel research international* [online]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2013, **84**(2), 119-128 [cit. 2023-03-06]. ISSN 1611-3683. Dostupné z: doi:10.1002/srin.201100332
  37. MUJICA RONCERY, Laís, Sebastian WEBER a Werner THEISEN. Mechanical Properties of (20-30)Mn12Cr(0.56-0.7)CN Corrosion Resistant Austenitic TWIP Steels. *Steel research international* [online]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2012, **83**(4), 307-314 [cit. 2023-03-06]. ISSN 1611-3683. Dostupné z: doi:10.1002/srin.201100316
  38. MAGHAWRY, Mahmoud Mohamed, Morsy Ahmed MORSY a Mohamed EL FAWKHRY. *Weldability of conventional high manganese steel and ladle treatment one* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://steel-grips.com/articles/2018/sg18001.pdf>
  39. VASELIN, Michael. *Welding of austenitic manganese steel* [online]. 1978 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/1978052.pdf>
  40. SCHMIDOVÁ, Eva, Ivo HLAVATY a Petr HANUS. *The weldability of the steel with high manganese* [online]. 2016 [cit. 2023-03-06]. ISSN 1330-3651. Dostupné z: doi:10.17559/TV-20150105134929
  41. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svařečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-85771-85-3.
  42. BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svařečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2000, 213 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-85771-72-1.
-

- 
43. KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. : obr., tabulky, grafy. ISBN 978-80-7204-591-4.
  44. ČSN EN ISO 6520-1. *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
  45. ČSN EN ISO 15614-7. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 7: Navařování*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.
  46. KOPEC, Bernard, Josef NEUGEBAUER a Pavel MAZAL. *Výrobní technologie a typické vady výrobků (Basic): studijní příručka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2020, 213 stran : ilustrace (převážně barevné). ISBN 978-80-214-5878-9.
  47. ČSN EN ISO/IEC 17025. *Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
  48. ČSN EN ISO 17637. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
  49. Měrka. In: *Defroz s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <http://www.defroz.cz/vt-vizualni-zkouska.html>
  50. Digitální měrka. In: *Gamalux s.r.o.* [online]. Plzeň: Xcreative - webdesign, 2017 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.gamalux.cz/pouzivane-metody/vizualni-kontrola/>
  51. Kapilární jev. In: *Eduportál* [online]. Plzeň: Techmania Science Center, 2007 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/strukturalatek/povrch-kapaliny/kapilarni-jevy>
  52. ČSN EN ISO 3452-1. *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení kapilární metodou - Část 1: Obecné zásady*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
  53. Fluorescent. In: *AQGNDT* [online]. Ohio: Advanced Quality Group, 2021 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://aqgndt.com/how-does-fluorescent-penetrant-inspection-work/>
  54. ČSN EN ISO 17636-1. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení - Část 1: Metody rentgenového a gama záření využívající film*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2023.
  55. ČSN EN 13068-3. *Nedestruktivní zkoušení - Radioskopické zkoušení - Část 3: Všeobecné zásady pro radioskopické zkoušení kovových materiálů rentgenovým zářením a zářením gama*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
  56. MOLLÍKOVÁ, Eva. *Zkoušení materiálů a výrobků* [online]. In: . [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: [http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/index.html?fbclid=IwAR04Ad5kWOBhyuUqaIjbpCdRHG70aI3vreMz1\\_qb0cx7jJwZjADNA7DEyA4](http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/index.html?fbclid=IwAR04Ad5kWOBhyuUqaIjbpCdRHG70aI3vreMz1_qb0cx7jJwZjADNA7DEyA4)
  57. ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2011.
  58. VODÁREK, Vlastimil. *METODY STUDIA STRUKTURY* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/MSS/Metody%20studia%20struktury.pdf>
  59. Schéma přípravy. In: *Metalografie I* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Metalografie%20I.pdf?redirected>
  60. ČSN EN ISO 17639. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2022.
-

61. ŠTORKÁN, Zdeněk. Svar. In: *Konstrukce* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
  62. OPERATING INSTRUCTIONS Corrosion diagnostic instrument. In: *John Godrich* [online]. Ludlow, 2022 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: [https://assets.fishersci.com/TFS Assets/CCG/EU/Liebisch/manuals/LIB012\\_EN%20MODE%20OP%20CORROSION%20TEST%20CHAMBER.pdf](https://assets.fishersci.com/TFS Assets/CCG/EU/Liebisch/manuals/LIB012_EN%20MODE%20OP%20CORROSION%20TEST%20CHAMBER.pdf)
  63. ČSN EN ISO 9227. *Korozní zkoušky v umělých atmosférách - Zkoušky solnou mlhou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2017.
  64. PPC 250 PTM. *KSK s.r.o.* [online]. Česká Třebová: Omega web czech, 2023 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.kskct.cz/cs/navarovani/plazmove-navarovaci-automaty/ppc-250-ptm>
  65. SA 600. *KSK s.r.o.* [online]. Česká Třebová: Omega web czech, 2023 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.kskct.cz/cs/svarovani/svarovaci-automaty/sa-600>
  66. Tetrix 300 comfort TM, Tetrix 400-2 comfort TM: operating instructions [online]. Mündersbach: EWM, 2014 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.ewm-sales.com/upload/099-000099-EW501.pdf>
  67. LAUŠ, Lukáš. *Optimalizace parametrů navařování niklovou slitinou* [online]. Brno, 2022 [cit. 2023-05-020]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139671>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marian Sigmund.
  68. ASTM G48-11. *Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution*. 100 Barr Harbor Drive: ASTM International, 2015.
-



---

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK****Symbole**

Označení	Legenda	Jednotka
$C_e$	uhlíkový ekvivalent	[-]
$\sigma$	fáze sigma	[-]
Z	zředění	[%]
$S_z$	plocha závaru	[mm <sup>2</sup> ]
$S_n$	plocha navařeného kovu	[mm <sup>2</sup> ]
$R_m$	mez pevnosti	[MPa]
$R_{t0,5}$	smluvní mez kluzu určená z celkové deformace	[MPa]
A	tažnost	[%]
$\lambda$	vlnová délka	[ $\mu$ m]

**Zkratky**

Označení	Legenda
WPQR	Welding procedure qualification record (záznam postupu svařování)
RTG	rentgenové záření

---

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výkres sestavy navařované Venturiho trubice  
Příloha 2 Zkoušky v laboratořích TÜV NORD Czech, s.r.o.  
Příloha 3 Předvýrobní specifikace postupu navařování
-





TÜVNORD

TÜV NORD Czech, s.r.o.  
Laboratoře a zkušební Brno  
Zkušební laboratoř č. 1060 akreditovaná ČIA  
podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018  
Olomoucká 7/9  
618 00 BRNO

Datum: Date:	04.05.2023	Strana: Seite: Page:	1/2
Protokol č.: Protokol-Nr.: Report No.:	518/2023	Revize: Revision: Revision:	1

## PROTOKOL O ZKOUŠCE Prüfprotokoll / Test Report

Vzorek dodán dne: Probe eingeliefert am: The sample arrived on:	24.04.2023	Datum ukončení zkoušky: Datum der Beendigung der Prüfung: Date of ending of the test:	03.05.2023
Zákazník: Kunde / Customer:	SEIKO Flowcontrol, spol. s r.o., Blatnice pod Svatým Antonínkem 866, 696 71 Blatnice pod Svatým Antonínkem		
Vzorek: Probe / Sample:	21EB025-2 – korozivzdorný návar vnitřní - dvouvrstvý / corrosion-resistant coating internal - double layered; trubka / tube: Ø 323,3 x 32 mm; materiál / material: SA-106 C; tavba / heat: 11867; návar v tloušťce 3,0 mm od hranice natavení základního materiálu – chemický rozbor / 3,0 mm thick weld deposit from the melting point of the base material – chemical analysis; metoda svařování / welding method: 152 / PTA (PAW); svařovací materiál / welding material: DEW A 7 CN-P; poloha svařování / welding position: PA - rotační / rotated; objednávka zákazníka č. / customer order No.: 300230106		
Zkušební metoda - druh zkoušení / Prüfverfahren - Prüfungsart / Test method - Type of testing:	LPP 6 – Stanovení prvků metodou AES s jiskrovým výbojem Oceli / Determination of elements by AES with spark discharge Steel (ASTM E415, ASTM E1086) LPP 14 – Metalografické zkoušky svarových spojů / Metallographic tests of weld joints (ČSN EN ISO 17639) LPP 21-3 – Zkouška tvrdosti dle Vickerse / Vickers hardness test (ČSN EN ISO 6507-1, ČSN EN ISO 9015-1)		

Ing. Kateřina Hrubá  
Vedoucí Laboratoří a zkušeben Brno  
Leiterin des Laboratorien und Prüfstellen Brunn  
Head of Laboratories and Testing Laboratories Brno  
Tel.: +420 602 318 970



### Prohlášení - Erklärung - Statement:

- Výsledky zkoušek uvedených v tomto protokolu se týkají pouze zkoušených předmětů, tak jak byly přijaty.  
Die in diesem Protokoll aufgeführten Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände, wie erhalten wurden.  
Test results mentioned in this report refer to the tested specimens only, as received.
- Bez písemného souhlasu zkušební laboratoře se nesmí protokol reprodukovat jinak, než celý.  
Eine auszugsweise Vervielfältigung dieses Protokolls ist ohne schriftliche Genehmigung der Prüfstelle nicht gestattet.  
The report shall not be reproduced without the prior written permission of the testing laboratory.
- V případě, že není v protokolu uvedena nejistota měření, je k dispozici ve zkušební laboratoři.  
Wenn die Messunsicherheit nicht im Protokoll angegeben ist, ist sie im Prüflabor erhältlich.  
If the measurement uncertainty is not listed in the report, it is available in the testing laboratory.

T:\Protokoly\Protokoly 2023\518 SEIKO Flowcontrol\_rev. 1.doc



Strana: 2/2  
Seite:  
Page:

Protokol č.: 518/2023  
Protokoll Nr.:  
Report No.:

Revize: 1  
Revision:  
Revision:

**Chemický rozbor / Chemical analysis**

Zkušební vzorek / test sample	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	P (%)	S (%)	Fe (%) zbytek / rest
21EB025-2 Návar / weld deposit	0,11	0,80	6,26	17,8	8,77	0,014	0,003	65,9

Poznámka: revize 1 - doplnění místa analýzy pro chemický rozbor  
Note: revision 1 - supplementing the analysis site for chemical analysis

Vedoucí Laboratoře analytické chemie: Mgr. Veronika Hrušková  
Head of Analytical chemistry laboratory  
Tel.: +420 545 110 125

**Metalografie / Metallography**

**Makrostruktura / Macrostructure** (ČSN EN ISO 17639)

**Vzorek 1 / Sample 1**

Kontrola / Examination – ISO 17639 – A – E – SA-106 C / DEW A 7 CN-P, HNO<sub>3</sub> HCl

Vady dle ČSN EN ISO 17639 tabulka 1, nebyly zjištěny, obr. 1.

Defects according to ČSN EN ISO 17639 table 1, were no detected, fig. 1.

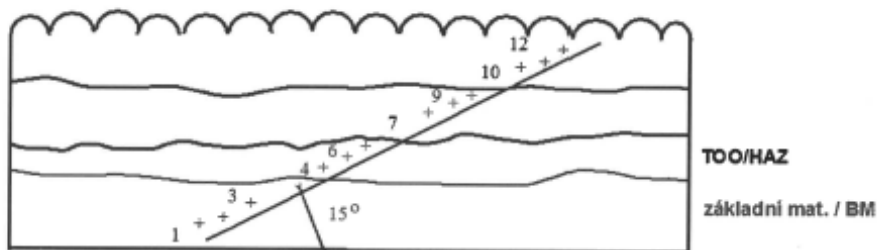
Příloha – 1 strana fotodokumentace  
Annex – 1 photodocumentation page

Vedoucí Metalografické laboratoře: Ing. Pavel Šohaj Ph.D.  
Head of Metallographic laboratory  
Tel.: +420 545 110 132

**Mechanické zkoušky / Mechanical tests**

**Průběh tvrdosti HV 10 / Hardness course HV 10**

ČSN EN ISO 6507-1, ČSN EN ISO 9015-1, \*ČSN EN ISO 15614-7 článek / article 7.4.3



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	151	160	158	165	165	171	217	203	198	189	190	189

\*mimo rozsah akreditace  
\*outside the scope of the accreditation

Vedoucí Mechanické zkušebny: Ing. Lukáš Čenek  
Head of Mechanical testing laboratory  
Tel.: +420 545 110 131

1/1


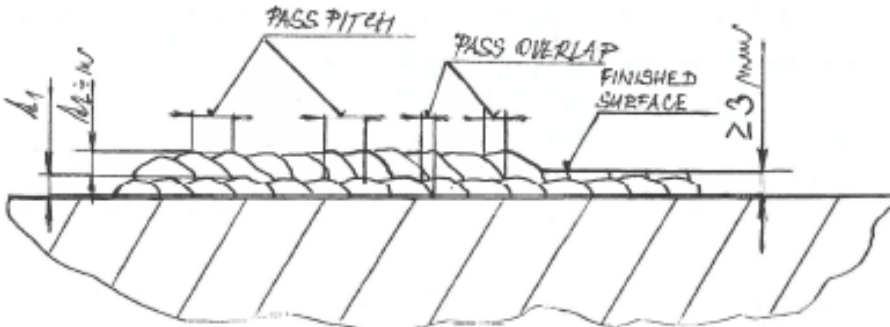
Protokol č.: 518/2023  
Protokoll-Nr.:  
Report No.:



Revize: 1  
Revision:  
Revision:

Příloha – Fotodokumentace  
Annex – Photodocumentation



Obr. 1  
Fig. 1  
Vz. 1  
Fig. 1  
1,8 : 1  
HNO<sub>3</sub> HCl

		<b>Preliminary WELDING PROCEDURE SPECIFICATION SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ EN ISO 15609-1</b>		No.: 21EB025-3 Rev.: 00 Datum: 09-May-2023 Page: 1/2		
Manufacturer / Výrobce		SEIKO Flowcontrol spol. s r.o.				
WPQR. No. / WPQR číslo		-				
Acceptance specification / Přejímací předpis		EN ISO 15614-7				
Welding process / Metoda svařování		EN ISO 4063 – 152 , fully mechanized / plně mechanizovaný				
Parent Material / Základní materiál						
Material Group / Materiálová skupina (ISO TR 15608)		1.2	Designation / Označení		SA-106 C	
Thickness / Tloušťka		T ≥ 25 mm		Deposited metal thickness / Tloušťka nav. kovu		t ≥ 3,0 mm
				Layer thickness / Tloušťka vrstvy		t = 2,5 + 4,5 mm
Welding consumables / Přídavný materiál						
Trade name / Značka			Classification / Klasifikace			
DEW A 7 CN-P			n.a. ( 18 8 Mn )			
A	Filler metal product form / Druh přídavného materiálu		Participle size / Zrnitost		Powder type / Typ prášku	Re-drying / Sušení
	powder / prášek		50 + 150 µm		homogenous / homogenní	100°C / 1h
Joint type and weld type / Druh spoje a druh svaru			corrosion resistant weld metal overlay / korozivzdorný návar			
Weld ends preparation method / Způsob přípravy svarových hran			machining / obrábění , grinding / broušení			
Joint design / Návrh spoje						
						
Welding position / Poloha svařování		PA				
Preheating / Předehřev		≥ 50 °C				
		Oven / pec , Electro resistant mat / žihačí koberec , Flame / plamen				
Interpass temperature / Mezihozenková teplota		≤ 300 °C				
Preheat maintenance / Dohřev		-				

		<b>Preliminary WELDING PROCEDURE SPECIFICATION SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ EN ISO 15609-1</b>			No.: <b>21EB025-3</b> Rev.: <b>00</b> Datum: <b>09-May-2023</b> Page: <b>1/2</b>					
Specific to welding process / Specifické údaje pro proces										
Tungsten electrode / Wolfram. elektroda	ø 4,0 mm / WC 20		Delivery method of filler material / Způsob dodávání příd. materiálu	through torch / přes hořák						
Torch orifice diameter / Velikost otvoru dýzy hořáku	ø 4 mm		Transfer mode / Přenosový režim	transfareable						
Additional filler mat. / Doplňkový příd. mat.	None / žádný		Electrode to Work distance / Vzdálenost elektroda - svarek	7 - 12 mm						
Oscilation / Rozkyv	No / ne		-							
Shielding gas / Ochranný plyn	EN ISO 14175 – 11 / Ar 99,996%		Flow rate / Průtok	790 – 810 l/h						
Plasma arc gas / Plazmový plyn	EN ISO 14175 – 11 / Ar 99,996%		Flow rate / Průtok	175 – 185 l/h						
Powder metal feed gas / Pinicí plyn	EN ISO 14175 – 11 / Ar 99,996%		Flow rate / Průtok	125 – 135 l/h						
Backing gas / Ochrana kořene	-		Flow rate / Průtok	-						
<p>Prior to the start of welding the welded parts has to be dry and a distance of 50mm from the weld place shall be thoroughly cleaned of any contaminants (e.g. oil, grease, and NDE materials) which may adversely affect the weld quality.</p> <p>Před zahájením svařování musí být svařované části suché a plocha do vzdálenosti 50 mm od místa svařování musí být důkladně zbavena všech nečistot (stopy koroze, olejů, mastnoty, obráběcích emulzí, NDE materiálů, barev atd.).</p>										
Welding parameters / Parametry svařování / Schweißparameter										
Weld pass / Housenka	Filler metal / Přídavný materiál size [µm]	Process / Metoda	Current / Proud [A]	Voltage / Napětí [V]	Current type / polarity Druh proudu / polarita	Travel speed / Rychlost svařování [cm/min]	Pass pitch / Stoupání housenky [mm]	Powder feed / Podávání prášku [g/min]	Heat input / Vnesené teplo [kJ/cm]	
1 <sup>st</sup> layer	A 50 - 150	152	190 - 210	23 - 27	DC / -	14 – 17	4,1 – 4,6	17 – 19	9 – 14	
other layer (≥ 1)	A 50 - 150	152	190 - 210	23 - 27	DC / -	14 – 17	4,1 – 4,6	17 – 19	9 – 14	
Post weld heat treatment (PWHT) / Tepelné zpracování (TZ) / Wärmebehandlung (WBH)							NONE / NE			
Remarks / Poznámka							Peening not allowed / Temování není dovoleno			
Issued / Vypracoval  Date - Sign / Datum - Podpis /			Checked / Kontroloval  Date - Sign / Datum - Podpis			Inspection Agency / Přijímací organizace  Date - Sign / Datum - Podpis				