



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE PARAMETRŮ NAVAŘOVÁNÍ NIKLOVOU SLITINOU

NICKEL ALLOY OVERLAY WELDING PARAMETERS OPTIMALIZATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Lauš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marian Sigmund, Ph.D., IWE

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Lukáš Lauš**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Marian Sigmund, Ph.D., IWE**
Akademický rok: 2021/22

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:

Optimalizace parametrů navařování niklovou slitinou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o odladění a nastavení konkrétních parametrů navařování danou technologií niklové slitiny na předem definovanou součást. Niklové slitiny se obecně navařují na součásti z uhlíkových a nízkolegovaných konstrukčních ocelí hlavně z důvodu vysoké korozní odolnosti i s ohledem na vysoké provozní teploty a tlaky. Požadavky konstrukce jsou v dané tloušťce definovaného návaru (počtech navařených vrstev) zajistit tyto odolnosti s ohledem na materiálové vlastnosti návaru. Cílem této diplomové práce bude odladit parametry navařování plazmou, niklové slitiny 625 s požadavkem u konkrétního navařovaného dílu zajistit požadovanou kvalitu a korozní odolnost provedeného návaru dle požadavku spolupracující firmy.

Cíle diplomové práce:

Vypracovat literární rešerši vhodných technologií navařování niklových slitin.

Teorie svařitelnosti niklových slitin.

Volba a odladování parametrů navařování plazmou niklovou slitinou 625.

Procesní a kvalitativní vyhodnocení provedeného návaru.

Zhodnotit vhodnost navařování plazmou niklovou slitinou pro zvolenou součást.

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 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá volbou a optimalizací parametrů navařování válcového hrdla Venturiho trubice. Trubice je vyrobena z uhlíkové oceli ASME SA-106 Grade C. Válcové hrdlo se navařuje metodou PTA. Přídavný materiál je prášek niklové slitiny Inconel 625. Návary jsou navařovány bez rozkyvu. Požadavkem bylo dosáhnout navýšení maximálního možného hmotnostního průtoku prášku spolu s dalšími parametry a získat tak maximální výkon navaření. Návary byly kontrolovány vizuální a kapilární zkouškou. Z návarů se připravily metalografické výbrusy. Hodnotila se hodnota zředění, výška převýšení a šířka tepelně ovlivněné oblasti. Dosažené výsledky jsou porovnány s parametry úspěšně používanými spolupracující firmou.

Klíčová slova

navarování, PTA, Inconel 625, Venturiho trubice

ABSTRACT

The aim of these master's thesis is to choose and optimize parameters of the Venturi tube throat weld cladding. The Venturi tube is made from carbon steel ASME SA-106 Grade C. The weld cladding is performed by plasma transferred arc welding. The throat is weld overlaid with nickel base powder Inconel 625. The overlays are made without oscilation. The main requirement was to find a maximum possible powder feed rate and others welding parameters to develop maximum welding speed and productivity on automat. Visual and penetrant testing on the overlays were performed. Metalographic samples were prepared. On the samples was measured dilution, overlay thickness and width of the heat affected zone. Results are compared with parameters succesfully used in the cooperating company.

Key words

weld overlay cladding, PAW, Inconel 625, Venturi tube

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LAUŠ, Lukáš. *Optimalizace parametrů navařování niklovou slitinou* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-02]. 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.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Optimalizace parametrů navařování niklovou slitinou vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně, 20. 5. 2022

Místo, datum

Lukáš Lauš

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Marianu Sigmundovi, Ph.D., 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 poskytnuté rady, firemní podklady a materiály nezbytné pro vypracování diplomové práce. Děkuji také své rodině za podporu během studia.

OBSAH

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 NAVAŘOVÁNÍ NIKLOVÝCH SLITIN.....	13
2.1 Metody navařování niklových slitin.....	14
2.2 Navařování metodou 141 horký drát.....	19
2.2.1 Zapalování oblouku a ohřev přídavného materiálu	20
2.2.2 Ochranné plyny.....	21
2.3 Navařování metodou 152	22
2.3.1 Parametry navařování	24
2.3.2 Vliv parametrů navařování	25
2.3.3 Zředění.....	25
2.3.4 Výroba prášků.....	26
2.4 Nedestruktivní metody zkoušení svarů	28
2.4.1 Vady ve svarech.....	28
2.4.2 Vizualní zkouška	29
2.4.3 Kapilární zkouška	30
3 TEORIE SVAŘITELNOSTI.....	36
3.1 Nikl a niklové slitiny	36
3.1.1 Inconel 625	38
3.1.2 Svařitelnost niklu a niklových slitin	40
3.2 Svařitelnost uhlíkových ocelí	41
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	42
4.1 Volba a optimalizace parametrů navařování	44
4.2 Vyhodnocení návarů.....	46
4.2.1 Návar 1	49
4.2.2 Návar 2	50
4.2.3 Návar 3	51
4.2.4 Návar 4	53
4.3 Porovnání výsledků se spolupracující firmou	55
4.4 Shrnutí	56
ZÁVĚR.....	57
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	58
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	63
SEZNAM PŘÍLOH.....	64

ÚVOD

Koroze kovových výrobků snižuje jejich pevnost, zhoršuje kvalitu povrchu a způsobuje jejich vyřazení z provozu. Jedním ze způsobů ochrany výrobků proti korozi je navařování. Díky navařování se nové díly nemusí celé vyrábět z drahých materiálů. Části dílů, které nejsou v kontaktu s korozním prostředím jsou vyrobeny z levnějších materiálů jako např. nelegované a nízkolegované oceli. Ostatní části jsou navařeny materiály, které odolávají nepříznivým podmínkám okolí. Mezi často používané materiály používané k navařování patří niklové slitiny a austenitické oceli. Navařování se využívá např. v petrochemickém a chemickém průmyslu a energetice. Navařují se např. vnitřní stěny tlakových nádob a vysokotlakých potrubí (obr. 1). [1; 2; 3]

Teplota tavení niklu je 1453 °C, mez pevnosti je 460 MPa a mez kluzu 150 MPa. Díky kubické plošně středěné mřížce (FCC) je houževnatý a dosahuje tažnosti kolem 50 %. Do teploty 253 °C je magnetický. Mezi další vlastnosti patří odolnost proti korozi a oxidaci. Používá se jako legující prvek do ocelí, k výrobě slitin niklu, k výrobě baterií a ke galvanickému pokovování. Výrobky, ve kterých se vyskytuje, nalézají uplatnění např. v potravinářském, chemickém, petrochemickém průmyslu, elektronice a energetice. [1; 4]



Obr. 1 Typické použití navařovaných součástí pro vysokotlaké potrubí a tlakové nádoby [5; 6].

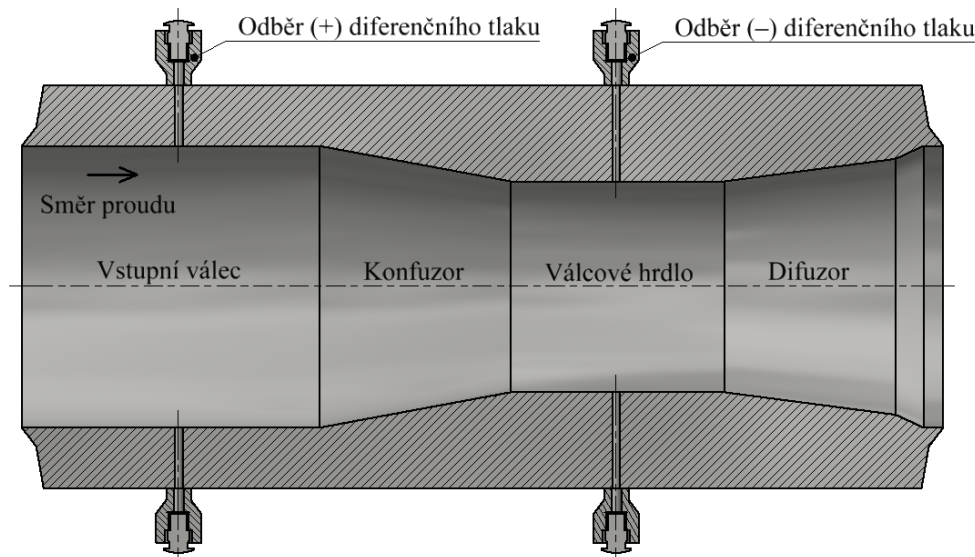
1 ROZBOR ZADÁNÍ

Diplomová práce je řešena ve spolupráci s firmou SEIKO Flowcontrol, spol. s r. o., sídlící v Blatnici pod Svatým Antonínkem. Firma se zabývá převážně výrobou měřících členů do potrubí používaném v petrochemickém, chemickém a energetickém průmyslu. Jedním z vyráběných měřících členů je i zadaná Venturiho trubice, u níž se má optimalizovat proces navarování.

Venturiho trubice se používá k měření průtoku kapaliny nebo plynu. Ve dvou místech se snímá tlak proudící kapaliny. Průtok se získá řešením rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice. Měření se řídí normou ISO 5167-4. [7; 8]

Menší průměry Venturiho trubice se vyrábí obráběním, větší se zakružují z ocelového plechu. S potrubím se spojuje přírubou nebo svarovým spojem. K výrobě se často používají uhlíkové, korozivzdorné a žárovečné oceli. Venturiho trubice (obr. 2) se skládá ze čtyř částí [9]:

- vstupní válec s odběrem (+) diferenčního tlaku,
- kuželovitý konfuzor s vrcholovým úhlem 21° ,
- válcové hrdlo s odběrem (-) diferenčního tlaku (délka hrdla odpovídá průměr hrdla),
- kuželovitý difuzor s vrcholovým úhlem $7-15^\circ$.



Obr. 2 Řez modelem sestavy řešené Venturiho trubice s popisem částí.

Do vstupního válce proudí kapalina neznámou rychlostí a je v něm měřen její tlak. Kapalína dále proudí do vstupního kuželovitého konfuzoru, kde dojde k navýšení její rychlosti a zároveň snížení tlaku. Ve válcovém hrdle se měří tlak. Za válcovým hrdlem kapalína vstupuje do výstupního kuželovitého difuzoru, ve kterém se snižuje její rychlost a zvyšuje tlak. Vlivem ztrát je však výstupní tlak menší než vstupní. Porovnáním naměřených tlaků se dopočítá rychlost kapaliny při vstupu do Venturiho trubice. Vynásobením rychlosti kapaliny a průřezu vstupního válce se získá objemový průtok. Hmotnostní průtok se získá vynásobením objemového průtoku a hustoty. [7]

Venturiho trubice se nezanáší sedimenty a je vhodná pro měření tekutin o nízkém i vysokém tlaku. Její výhodou je, že vyžaduje pouze krátké úseky přímého potrubí pro připojení. Může se instalovat do vodorovného i svislého potrubí. Ztráta tlaku ve Venturiho trubici je 4–20 % z měřeného diferenčního tlaku. Nepřesnost měření nekalibrované Venturiho trubice je 1,5–3 %. [8; 9]

Zákazník požaduje, aby se pro zvýšení odolnosti proti korozi válcové hrdlo Venturiho trubice navařilo práškem niklové slitiny DEW-Nibasit 625-P/LFe. Chemické složení prášku je uvedeno v tab. 1. Certifikát od výrobce je uveden v příloze 1. Prášek je navařován metodou 152.

Tab. 1 Chemické složení niklového prášku DEW-Nibasit 625-P/LFe.

Množství prvku												
C	Mo	Fe	Mn	Cr	Si	Nb	O	N	Al	Ti	Ni	
hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %
<0,03	8,1	0,7	0,3	20,7	0,6	3,3	0,06	0,07	<0,1	<0,1	zbytek	

Venturiho trubice je vyrobena z uhlíkové oceli ASME SA-106 Grade C (nejbližší evropský ekvivalent je P265GH dle normy ČSN EN 10216-2+A1). Před navařováním je nutné vytvořit kvalifikaci postupu (PQR) dle normy ASME BPVC, Section IX. Před vlastní kvalifikací PQR se však musí zjistit parametry, pro které bude kvalifikována. Nejprve se bude navařovat série zkušebních návarů s různými parametry navařování. Nejvhodnější parametry budou poté doporučeny ke kvalifikování PQR. Trubka použitá k navařování zkušebních návarů měla vnější průměr 323,80 mm a tloušťku stěny 9,53 mm. Chemické složení trubky je uvedeno v tab. 2. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 3. Certifikát trubky je v příloze 2.

Tab. 2 Chemické složení trubky z oceli ASME SA-106 Grade C použité pro zkušební návary.

Množství prvku													
C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Al	Nb	N
hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %
0,19	1,02	0,23	0,013	0,005	0,05	0,03	0,05	0,010	0,003	0,001	0,024	0,001	0,005

Tab. 3 Mechanické vlastnosti trubky z oceli ASME SA-106 Grade C použité pro zkušební návary.

Mechanické vlastnosti					
Mez kluzu R_{eH}	Mez pevnosti R_m	Tažnost A_5	Nárazová práce KV_2 (0 °C)	Nárazová práce KV_2 (-46 °C)	HBW
MPa	MPa	%	J	J	-
367	510	33,1	113	55	149

Řešená Venturiho trubice slouží k měření průtoku přehřáté páry. Teplota přehřáté páry je 300 °C a její tlak 10 MPa. Návar válcového hrdla je oranžově označen na výřezu z výkresu sestavy na obr. 3. Výkres sestavy je uveden jako příloha 3. Délka Venturiho trubice je 930±4 mm a vnější průměr 406,4 mm. Navařená vrstva niklové slitiny 625 má tloušťku 12-15 mm. Polotovarem je bezešvá trubka.

Pro doplnění je zde uveden celý technologický postup výroby Venturiho trubice. Začíná se nařezáním trubky na požadované rozměry. Následně je vnitřní část trubky nahrubována a tím je válcové hrdlo připraveno pro návar. Válcové hrdlo se navaří niklovou slitinou 625 a poté se obrobí vnitřní část trubky na hotovo. Dále jsou obráběny ostatní rozměry dle dokumentace včetně svarových úkosů. Vnitřní plocha návaru je vizuálně zkontrolována a je na ní provedena kapilární zkouška. Jsou měřeny vnitřní průměry D a d20 (označeny žlutě na obr. 3), které jsou důležité pro správné měření průtoku. Vyvrtají se díry odběrů tlaku. Dále se na Venturiho trubici přivaří vývody tlakové difference, případně se Venturiho trubice svaří s dalšími částmi potrubí. Celá sestava se vyžihá v peci. Nakonec jsou provedeny nedestruktivní zkoušky svarů a tlaková zkouška. V tomto případě se provádí tlaková zkouška dle normy ASME B31.3.

2 NAVAŘOVÁNÍ NIKLOVÝCH SLITIN

Navarování je spojování návarového kovu s povrchem základního kovu pomocí různých technologií svařování. Většinou se používají metody 1 (obloukové metody). V současnosti je velká pozornost věnována navařování pomocí metody 141 (obloukové navařování wolframovou elektrodou v inertním plynu), metody 52 (laserové navařování) a metody 152 (plazmové navařování s přídavkem prášku). Navařování se používá ke zlepšení vlastností dílů např. v chemickém a petrochemickém průmyslu, těžebním průmyslu, letectví, námořním průmyslu, zemědělství, potravinářském průmyslu a energetickém průmyslu. [10; 11; 12]

Návarový kov se navařuje na povrch základního kovu v jedné nebo několika vrstvách a povrch základního kovu tím získá požadované vlastnosti. Navařují se jak opotřebované součásti za účelem jejich renovace, tak součásti nové. Renovace opotřebovaných součástí navařením prodlužuje jejich životnost a může snížit čas odstávky zařízení a také potřebné náklady, které by byly nutné k výrobě nové součásti. Navařování nových součástí je výhodné z toho hlediska, že drahý návarový kov je pouze v malém množství na povrchu a zbytek součásti může být vyroben z levnějších materiálů. Tím lze snížit cenu dílu až o 80 % v porovnání s cenou dílu vyrobeného z návarového materiálu. [10; 13; 14]

Norma ČSN EN ISO 15614-7 rozlišuje dva druhy návarů. Prvním z nich je korozivzdorný návar a druhým je tvrdonávar. Definuje také pojmy polštářování a opravné navařování. [15] Podle literatury se navařování obecně používá k [16]:

- navařování korozivzdorného návaru,
- navařování tvrdonávaru,
- polštářování,
- opravnému navařování.

Korozivzdorné návary slouží k ochraně součásti proti korozi. K těmto účelům se na součásti navařují různé druhy austenitických a feriticko-martenzitických ocelí nebo slitiny na bázi niklu. Většinou se navařují na součásti z uhlíkových ocelí. Rozměry korozivzdorných návarů se obvykle upravují obráběním. Mezi typické navařované součásti patří např. vnitřní části potrubí a příslušenství pro jeho spojování, tepelné výměníky, částí turbín pro výrobu elektřiny, trupy lodí a ponorek. [11; 17; 18]

Navařená vrstva o vysoké hodnotě tvrdosti, která je odolná vůči opotřebení jako je např. abraze, adheze, eroze nebo kavitace, se nazývá tvrdonávar. Na povrch součásti se za těmito účely navařují slitiny na bázi železa, niklu, kobaltu, mědi a karbidů. Tvrdonávary se navařují na součásti např. z nelegovaných nebo nízkolegovaných ocelí, manganových austenitických ocelí a nástrojových ocelí. Tvrdonávary jsou velmi často neobrobitelné a jejich rozměry se mohou upravit pouze broušením. Pnutí v návaru při chladnutí také může způsobit jeho popraskání, které ale většinou nemá vliv na jeho funkci. Mezi typické aplikace tvrdonávarů patří např. návary na omílací bubny, kužele drtičů, nástroje pro stříhání za studena i za tepla, kovací zápustky, transportní šneky, zuby radlic a kolejnic. [16; 13]

Tvrdonávary se také používají při renovacích součástí. Před navařením tvrdonávaru však musí dojít k obnově rozměrů opotřebovaného dílu. K tomuto účelu se používají přídavné materiály o podobném chemickém složení jako je chemické složení součásti, nebo se k obnově využije střídavé navařování vrstev tažného a tvrdého materiálu. [13]

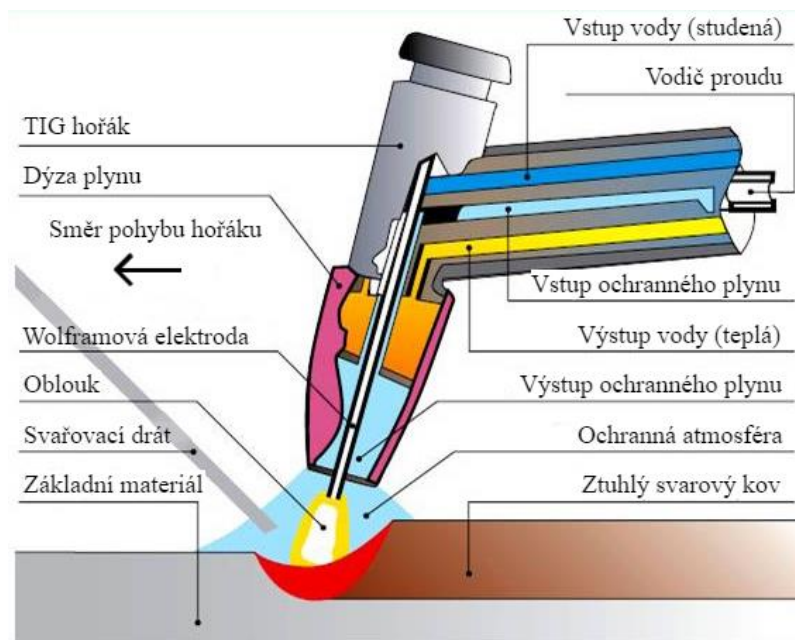
V některých případech je vhodné před navařováním opatřit povrch součásti mezivrstvou, která má jiné chemické složení než návar a navařovaná součást. Jedná se o tzv. polštářování. Hlavním úkolem mezivrstvy je zajištění kvalitního spojení mezi základním a navařovaným materiálem. Mezi některé její další funkce patří minimalizace svařovacích napětí, minimalizace promísení,

zabránění vzniku vodíkem indukovaných prasklin v podnávarových vrstvách předeřtých dílů nebo zabránění šíření trhlin z navařené vrstvy do základního materiálu. [11; 13]

2.1 Metody navařování niklových slitin

Při volbě metody výroby korozivzdorné vrstvy je nutné vzít v úvahu různé faktory (např. aplikaci součásti, kvalitu vrstvy, rozměry součásti, cenu výroby). Obloukové metody svařování mohou být z tohoto hlediska vhodnou kombinací produktivity, kvality a ceny. Takto vytvořené návary mají se základním materiálem metalurgické spojení s velmi dobrou pevností. Lze s nimi navařovat v různých polohách a navařované součásti mohou mít složité tvary. Na druhou stranu je jejich častou nevýhodou velká hodnota zředění. [18; 19; 20] Mezi používané tavné metody navařování niklových slitin patří:

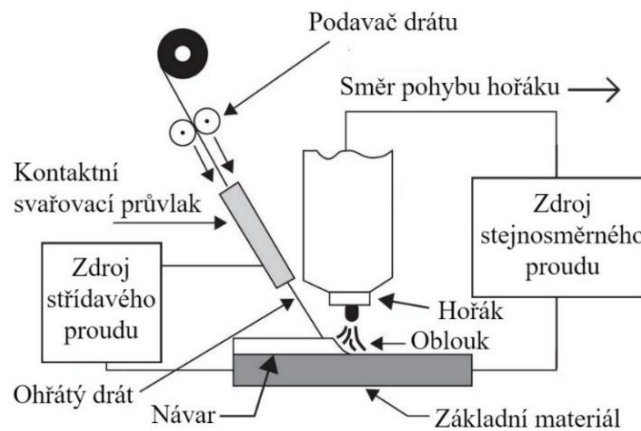
- Metoda 141 studený drát (obloukové navařování wolframovou elektrodou v inertním plynu se studeným drátem) – Metoda 141 studený drát generuje teplo hořením oblouku mezi wolframovou netavící se elektrodou a základním materiálem. Elektroda a svarová lázeň je chráněna inertním plynem (Ar, He) nebo jejich kombinací. Čistota plynu je minimálně 99,995 %. Přídavný materiál je drát, který se do oblouku podává ručně nebo automaticky pomocí podavače. Drát se většinou podává zepředu do oblasti začátku svarové lázně. Schéma metody je zobrazeno na obr. 4. Výhody této metody jsou nízká hodnota zředění, vysoká kvalita návaru, flexibilita, možnost navařování ve všech polohách a možnost nezávislého ovládní wolframové elektrody a drátu. Nevýhodami jsou nízký výkon navařování a nutnost použití vyšších proudů v porovnání s metodou 141 horký drát. [21; 22; 23; 12]



Obr. 4 Princip metody 141 studený drát [24].

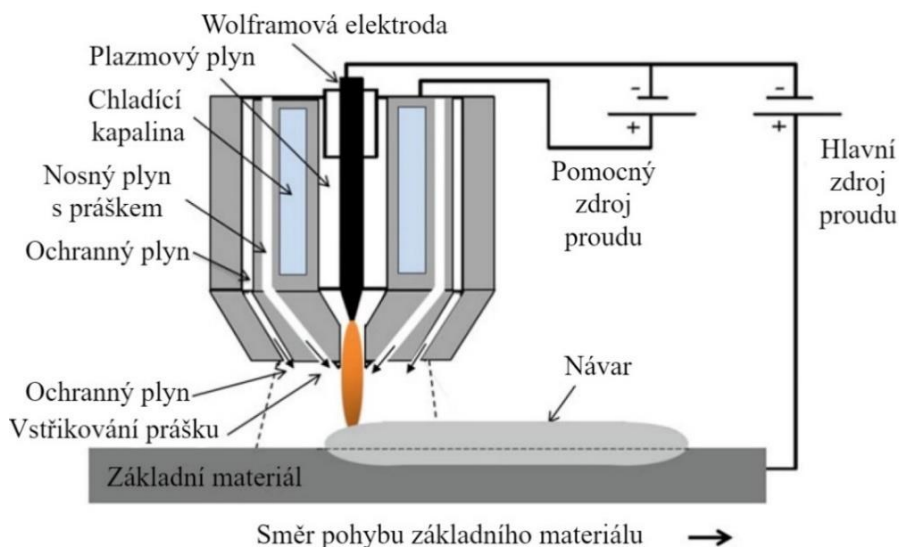
- Metoda 141 horký drát (obloukové navařování wolframovou elektrodou v inertním plynu s horkým drátem) – Metoda 141 horký drát (obr. 5) má stejně jako metoda 141 studený drát hlavní oblouk hořící mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Přídavný materiál ve formě drátu je však většinou odporově ohříván v oblasti mezi kontaktním průvlakem a svarovou lázní. K ohřevu drátu slouží druhý nezávislý zdroj proudu. Drát se obvykle ohřívá střídavým proudem. Může se použít i konstantní stejnosměrný proud. Pro hoření oblouku se často používá zdroj se stejnosměrným proudem. Drát je ohříván na teplotu blízkou teplotě tavení a díky tomu

minimálně ochlazuje svarovou lázeň. Do svarové lázně je drát podáván zezadu nebo z boku. Drát musí být do svarové lázně podáván konstantní rychlostí a z tohoto důvodu je metoda plně automatizována. Výhody oproti metodě 141 studený drát jsou vyšší výkon navaření a možnost dosažení nižších hodnot zředění. [25; 12]



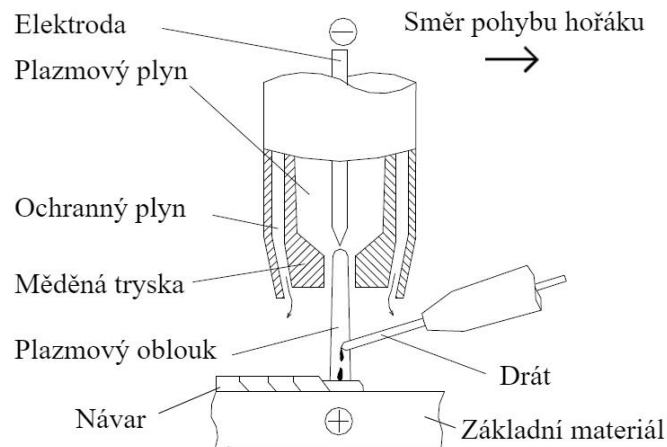
Obr. 5 Princip metody 141 horký drát [25].

- Metoda 152 (plazmové navařování s přidavkem prášku) – Metoda 152 (obr. 6) používá dva nezávislé zdroje proudu. Nejprve se spustí přívod plazmového plynu a následně dojde k zapálení pilotního oblouku mezi wolframovou elektrodou a vodou chlazenou měděnou tryskou. Pilotní oblouk ionizuje plyn v oblasti mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Při navařování dále pilotní oblouk slouží ke stabilizaci práškem ochlazovaného hlavního oblouku a také napomáhá udržovat zvolené rozměry návaru. Poté dojde k zapálení hlavního oblouku mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Oblouk je zužován měděnou tryskou. Dopravním plynem je do něj přiváděn prášek (ze dvou nebo více otvorů umístěných v blízkosti otvoru měděné trysky), který se v něm úplně nebo částečně nataví a vytvoří metalurgické spojení s natavenou povrchovou vrstvou základního materiálu. Plazma a svarová lázeň je chráněna proudem ochranného plynu. Základní materiál je většinou zapojen jako anoda. Když se zapojí jako katoda, zmenší se vnesené teplo a čistí se povrch. Výkon navaření je většinou 3–10 kg/h, může ale být až 20 kg/h. Návary mají zředění pod 7 %. Výhody metody 152 jsou vysoký výkon navaření, dobrá kontrolovatelnost procesu a velmi dobrá kvalita návaru. [26; 12]



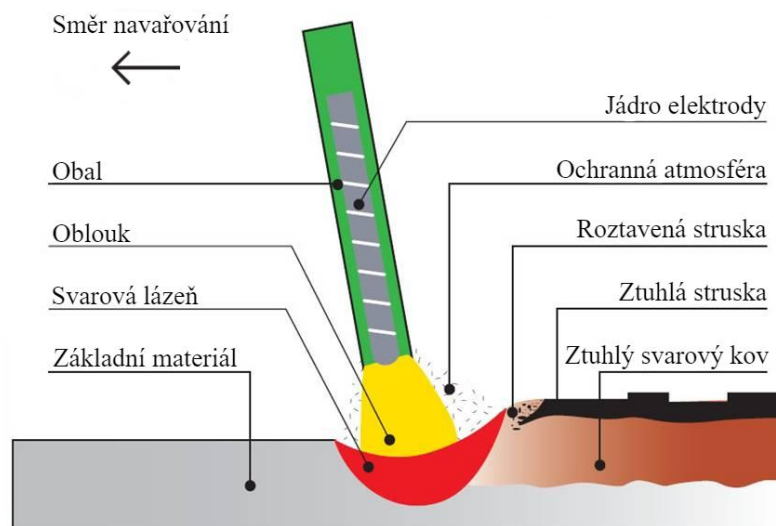
Obr. 6 Princip metody 152 [26].

- Metoda 153 (plazmové navařování s přeneseným plazmovým obloukem) – Metoda 153 (obr. 7) je obdoba metody 152. Rozdíl je v podobě přídavného materiálu. Metoda 153 používá jako přídavný materiál drát. Dalším rozdílem je, že hořák je uzpůsoben pouze pro plazmový a ochranný plyn. Oproti metodě 152 má metoda 153 vyšší zředění. [27; 12]



Obr. 7 Princip metody 153 [27].

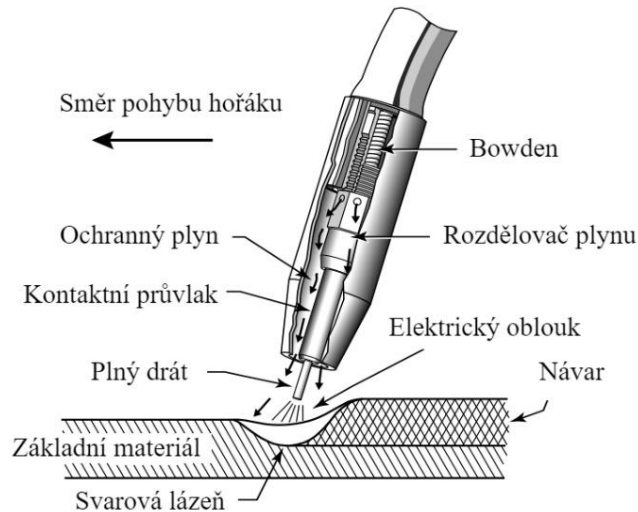
- Metoda 111 (ruční obloukové navařování obalenou elektrodou) – Metoda 111 má elektrický oblouk hořící mezi obalenou elektrodou a základním materiálem. Schéma metody je zobrazeno na obr. 8. Obal elektrody chrání svarovou lázeň, napomáhá zapalování oblouku, vytváří strusku na povrchu návaru a může také dotovat svarovou lázeň legujícími prvky. Metoda 111 se používá pro navařování ploch nevhodných pro automatizaci (malé rozměry, nepravidelnost, špatná dostupnost). Výhodou je jednoduchost zařízení a snadná manipulace. Nevýhodou je nízký výkon navaření a nutnost odstraňování strusky před navařením další vrstvy. [3; 12]



Obr. 8 Princip metody 111 [24].

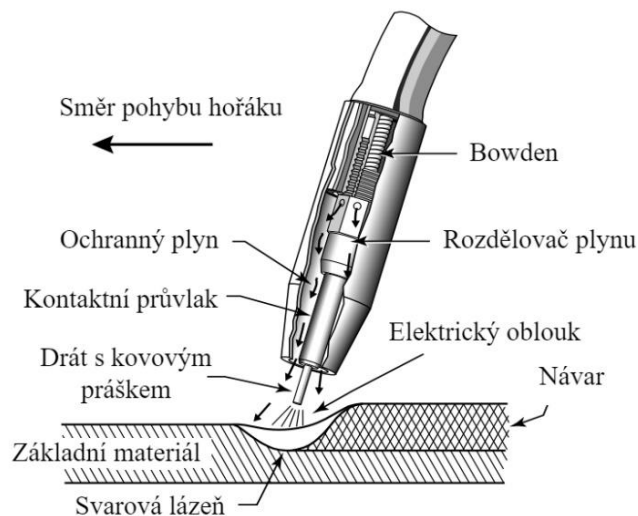
- Metoda 131/135 (obloukové navařování tavící se elektrodou v inertním/aktivním plynu) – Metoda 131/135 má oblouk hořící mezi tavnou elektrodou a základním materiálem. Schéma metody je zobrazeno na obr. 9. Svarová lázeň je chráněna ochranným plynem (inertním v případě metody 131 a aktivním v případě metody 135).

Volbou ochranného plynu, napětí, proudu, chemického složení elektrody a jejího výletu je možné měnit způsob přenosu svarového kovu. Pro navařování se používá impulzní nebo sprchový přenos. Průměr drátu 1,6 mm je preferovaný pro navařování sprchovým přenosem. Sprchový přenos lze použít pouze pro navařování v poloze PA. Impulzní přenos většinou používá průměr drátu 1,2 mm a lze s ním navařovat ve všech polohách. Dosahuje však nižšího výkonu navaření než impulzní přenos. Výhodami metody 131/135 jsou vysoká rychlost navařování, jednoduchost automatizace, dobrý přenos svarového kovu a návary bez strusky. Návary dosahují vysoké kvality a metoda 131/135 je považována za jednu z nejlepších metod navařování elektrickým obloukem z hlediska produktivity a ceny. [20; 3; 12]



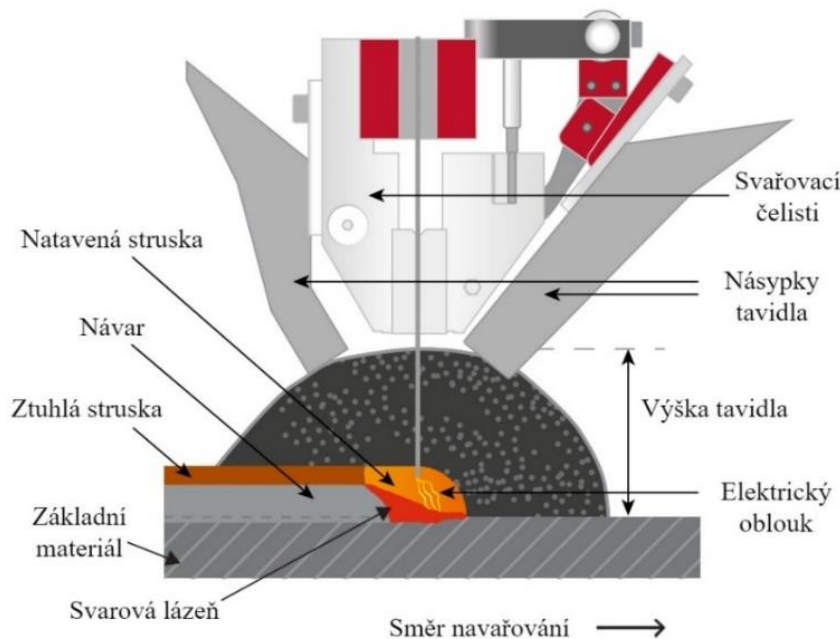
Obr. 9 Princip metody 131/135 [28].

- Metoda 138 (obloukové navařování plněnou elektrodou s kovovým práškem v aktivním plynu) – Metoda 138 je obdoba metody 131/135. Jako přídavný materiál používá drát plněný kovovým práškem. Schéma metody je zobrazeno na obr. 10. Díky drátu plněnému práškem má metoda 138 široké rozmezí dosažitelného chemického složení návaru. Používá se zdroj stejnosměrného proudu a nejčastější typy přenosu svarového kovu jsou zkratový a sprchový. Mezi výhody metody 138 patří vysoký výkon navaření a nízké vnesené teplo. [29; 12]



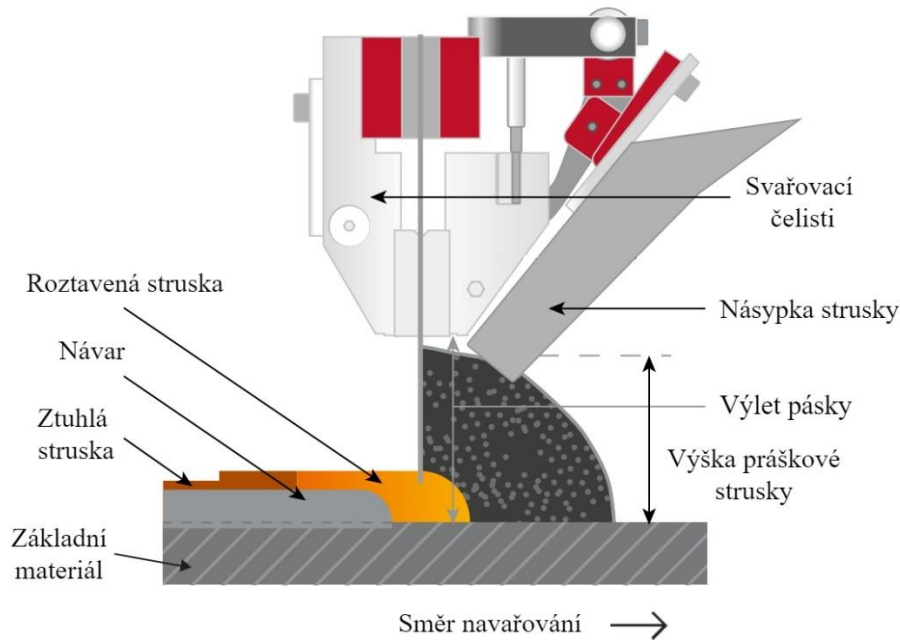
Obr. 10 Princip metody 138 [28].

- Metoda 121/122/125 (navařování pod tavidlem drátovou/páskovou/plněnou elektrodou) – Metoda 121/122/125 využívá ke generování tepla hoření elektrického oblouku mezi elektrodou ve formě drátu nebo pásky a základním materiálem. Schéma metody je na obr. 11. Ochranu elektrického oblouku a svarové lázně zajišťuje sypké tavidlo. Hořící oblouk je obklopen parami kovu a strusky, které tvoří tzv. kavernu. Díky intenzivní difuzi a promíchávání natavené strusky se svarovou lázní, vzniká návar s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Navařování drátem dosahuje dobrých výsledků při průměru drátu 1,6 mm. Obvyklá tloušťka pásek je 0,5 mm a šířka 30, 60 nebo 90 mm. Navařování pod tavidlem má o 35–50 % vyšší výkon navaření než metoda 131/135. Většinou se navařují 2–3 vrstvy. Používá se pro navařování rozměrných dílů s jednoduchou geometrií. Nevýhodou je možnost navařování pouze v poloze PA a nutnost odstraňování strusky na povrchu návaru. [30; 3; 31; 12]



Obr. 11 Princip metody 121/122/125 [32].

- Metoda 721 (elektrostruskové navařování s páskovou elektrodou) – Metoda 721 je podobná metodě 121/122/125. Schéma metody je na obr. 12. Na rozdíl od metody 121/122/125 však nepoužívá k vývinu tepla elektrický oblouk. Elektrický oblouk se používá pouze v počátku k natavení strusky. Teplo je dále generováno Jouleovým odporovým teplem při průchodu proudu přes roztavenou elektricky vodivou strusku (teplota roztavené strusky je kolem 2300 °C). Sypká struska je ke svarové lázni přiváděna zepředu. Elektrody jsou ve formě pásky. Obvyklá tloušťka pásek je 0,5 mm a šířka 30 nebo 60 mm. Navařování je možné pouze v poloze PA. Díky vysoké produktivitě se metoda 721 většinou používá k navařování rozměrných a tlustostěnných výrobků, jako jsou např. vnitřní stěny potrubí velkých průměr. Výkon navaření metody 721 je o 60–80 % vyšší než výkon navaření metody 121/122/125 při poloviční hodnotě zředění (10–15 %). Díky nízké hodnotě zředění lze v některých případech navařovat pouze jednu vrstvu. Nevýhodou je tvorba strusky na návaru a nutnost jejího odstranění. [30; 33; 12]



Obr. 12 Princip metody 721 [32].

Zadaná Venturiho trubice je vhodná pro navařování automatizovaným procesem. Faktory důležité při výběru metody jsou výkon navaření, zředění a dosažení předepsaných parametrů návaru. Jako optimální metody se jeví metoda 141 horký drát, metoda 152, metoda 131/135 a metoda 138. Metody 121/122/125 a 721 nejsou vhodné vzhledem k rozměrům navařované součásti. Společnost SEIKO Flowcontrol, spol. s.r.o., je vybavena zařízeními pro navařování metodou 141 horký drát a metodou 152. [30]

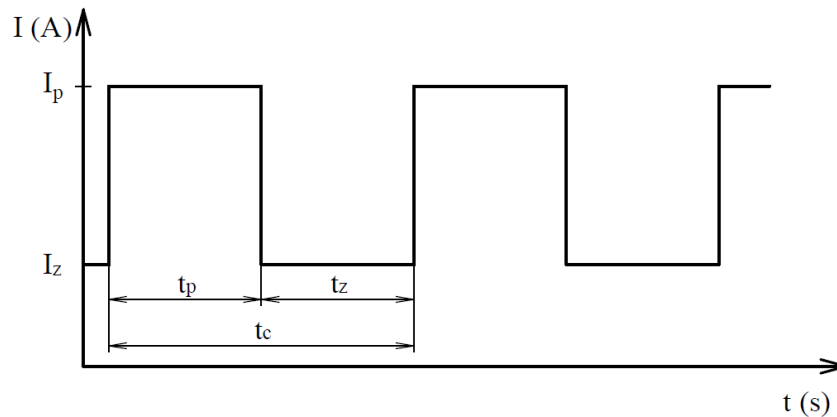
2.2 Navařování metodou 141 horký drát

Návary vytvořené metodou 141 horký drát mají nízkou hodnotu zředění a vysokou kvalitu. Metoda 141 horký drát zvládá navařovat součásti ve všech polohách. Další výhodou je samostatné ovládání oblouku a podávaného drátu. Proudění na oblouku se pohybuje v rozmezí 80-450 A. Při navařování složitějších tvarů je výkon navařování 1–2 kg/h, při použití dvou hořáků až 3 kg/h. Hořák se dvěma elektrodami dosahuje výkonu navaření 6 kg/h. [21; 34]

Společnost SEIKO Flowcontrol, spol. s.r.o. disponuje zařízením pro navařování metodou 141 horký drát. Tato metoda však pro navařování Venturiho trubice zvolena nebyla. Důvodem bylo, že metoda 152 dosahuje nižších hodnot zředění a vyšších výkonů navaření.

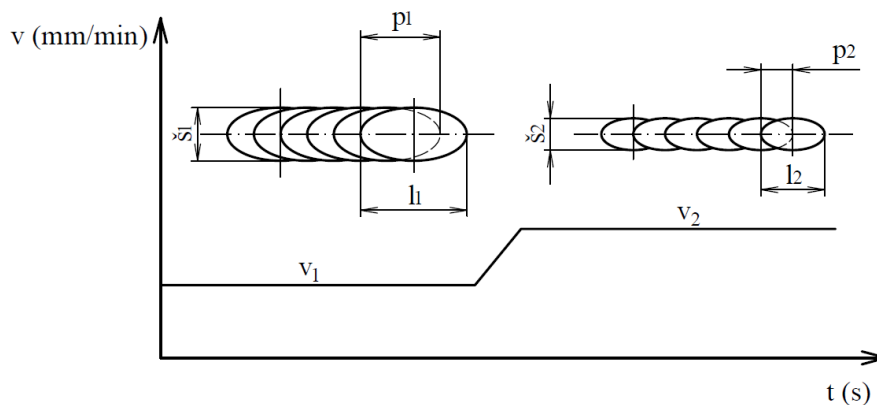
Pro navařování se používá stejnosměrný konstantní nebo impulsní proud. Ve většině případů je elektroda zapojena jako katoda. Konstantní proud vytváří velkou svarovou lázeň a z tohoto důvodu je obvykle využíván pro navařování v polohách PA a PB. Impulsní proud se používá pro navařování v ostatních polohách. [34]

Impulsní proud je složen ze dvou hodnot proudů (obr. 13). Vyšší hodnota je impulsní proud I_p a doba jeho trvání se označuje tp . Nižší hodnota je základní proud I_z a doba jeho trvání se označuje tz . Součet časů tz a tp udává celkový čas cyklu tc . I_p a I_z se vzájemně střídají v závislosti na frekvenci. V době trvání I_p dochází k tavení základního a přídavného materiálu. Svarová lázeň zvětšuje svoje rozměry. Rozměry svarové lázně jsou určeny velikostí I_p a tp . V době trvání I_z naopak dochází ke zmenšování rozměrů svarové lázně. I_z slouží k udržení ionizace oblasti oblouku. Pokud je tz dvojnásobkem tp dojde k úplnému ztuhnutí svarové lázně. Impulsy proudu mohou mít různé tvary např. pravoúhlý, sinusový, lichoběžníkový. [23]



Obr. 13 Průběh pravoúhlého impulzního proudu [23].

Zvýšením rychlosti pohybu hořáku dochází ke zmenšení šířky \bar{s} a délky l jednotlivých návarů (obr. 14). Dochází také ke zmenšení překrytí návarů p mezi jednotlivými impulsy. Velikost p má přímý vliv na velikost zředění. Vyšší hodnota p znamená, že se taví větší oblast předešlé housenky a menší oblast základního materiálu, čímž se snižuje zředění. [34]



Obr. 14 Změna rozměrů návaru při změně rychlosti pohybu hořáku [34].

2.2.1 Zapalování oblouku a ohřev přídavného materiálu

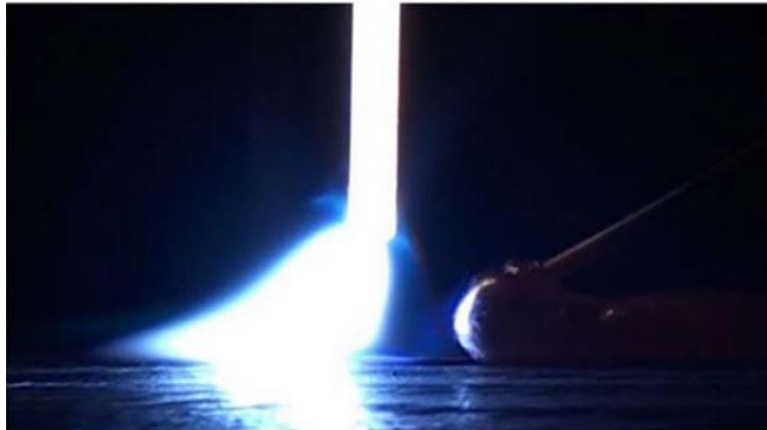
U metody 141 horký drát je oblouk zapalován dvěma způsoby. Prvním způsobem je zapalování pomocí vysokofrekvenčního ionizátoru. Druhým způsobem je dotykové zapalování. Vysokofrekvenční ionizátor vytvoří jiskrový výboj mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Výboj ionizuje tuto oblast a přejde v elektrický oblouk. Při stabilizaci oblouku se vysokofrekvenční ionizátor vypne. K vytvoření jiskry se používá napětí 8–15 kV s frekvencí 50 Hz. [23; 34]

Druhým způsobem zapalování je dotykové zapalování. Při dotyku elektrody s povrchem základního materiálu je proud nízký (maximálně 10 A) a ohřívá se pouze hrot elektrody. Oddalováním elektrody se proud zvyšuje a následně dojde k zapálení oblouku. Při zapalování oblouku jsou současně řízeny a kontrolovány svařovací parametry. [23]

Nejjednodušším a nejpoužívanějším způsobem ohřevu přídavného drátu je pomocí odporového tepla. Ke generování tepla se používá stejnosměrný nebo střídavý proud. K ohřevu drátu se může použít také impulsní proud. [35]

Stejný proud způsobuje velké foukání oblouku (obr. 15). Podle polarity drátu se k němu elektrický oblouk přitahuje nebo je od něj odpuzován. Většinou je snaha foukání oblouku minimalizovat. Jedním ze způsobů minimalizace foukání oblouku je použití střídavého proudu.

Foukání oblouku při stejnosměrném proudu se ale může využít např. ke zvýšení výkonu navaření a snížení zředění. [35; 36]



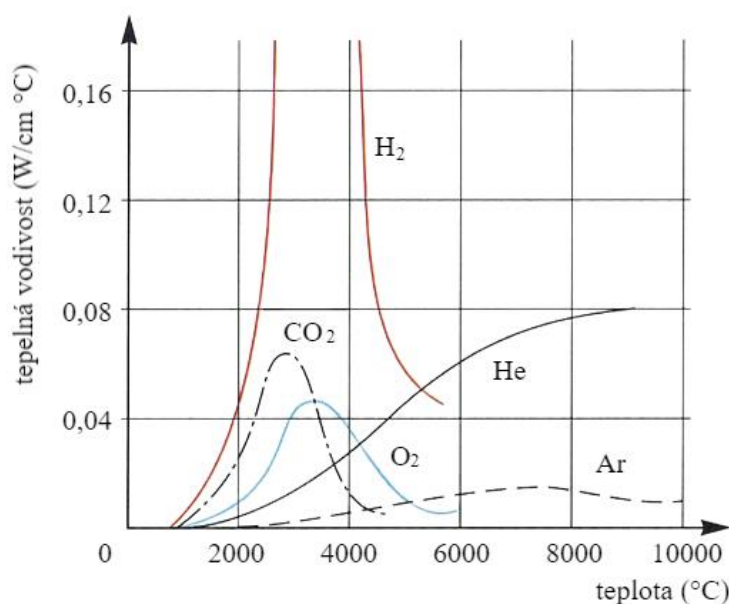
Obr. 15 Foukání oblouku při zapojení drátu na kladný pól zdroje stejnosměrného proudu [35].

2.2.2 Ochranné plyny

K ochranně svarové lázně a elektrody většinou slouží Ar nebo He. Používají se buď čisté nebo ve směsi. Někdy se používá také směs Ar a H_2 . [34]

Argon je nejčastěji používaným ochranným plynem. Patří mezi inertní plyny a nevytváří sloučeniny s ostatními prvky. Jeho hustota je 1,4 x vyšší než hustota vzduchu. Zajišťuje velmi dobrou ochranu před okolní atmosférou. Díky nízkému ionizačnímu potenciálu (15,8 eV) se v něm dobře zapaluje oblouk. Oblouk je stabilní i při větší délce. Běžně používaná čistota je 99,995 %. Dají se s ním navařovat všechny svařitelné materiály. [23]

Helium má hustotu asi 7,3 x nižší než vzduch. Proto se k ochraně svarové lázně musí používat vyšší průtoky než u argonu. Dalším rozdílem oproti argonu je vyšší ionizační potenciál (24,6 eV) a vyšší tepelná vodivost (obr. 16). Díky tomu se při navařování směsí argonu a helia dosahuje vyššího závaru a rychlostí navařování. Běžná čistota helia je 99,996 %. Nedostatkem je špatné zapalování oblouku a jeho nestabilita při větší délce. Oblouk se většinou zapaluje argonem a po jeho zapálení se do hořáku přivede helium. [23]

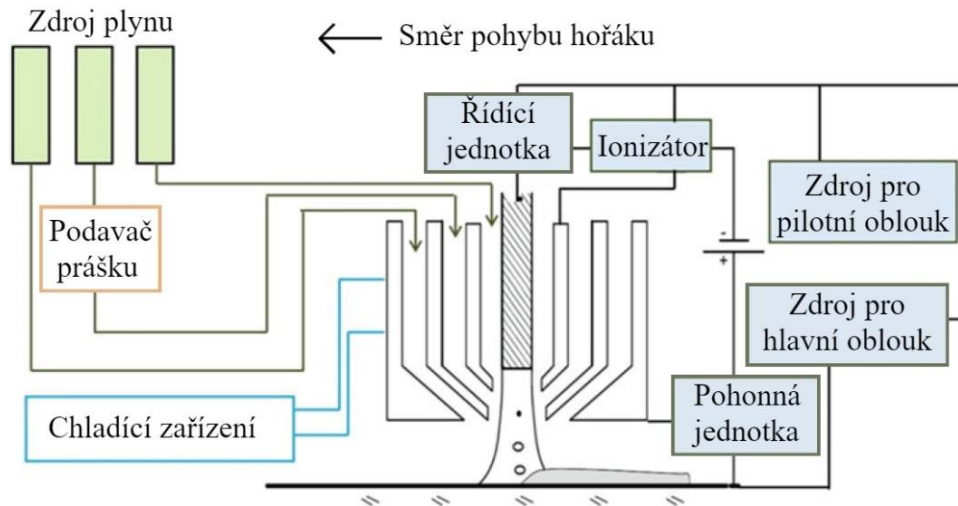


Obr. 16 Tepelná vodivost ochranných plynů [23].

2.3 Navařování metodou 152

Metodou 152 je možné navařovat součásti malých rozměrů s požadavkem na minimální vnesené teplo ale také rozměrné součásti, u nichž je požadavek na vysoký výkon navaření. Metoda 152 je schopna vytvořit návary o tloušťce až 20 mm s dobrým metalurgickým spojením se základním materiálem. Schéma zařízení pro navařování metodou 152 je na obr. 17. Zařízení se skládá z [26]:

- plazmového hořáku,
- zdroje plynu (plazmového, dopravního a ochranného),
- podavače prášku,
- chladicího zařízení,
- zdroje proudu pro pilotní a hlavní oblouk,
- vysokofrekvenčního ionizátoru,
- pohonné jednotky a oscilátoru plazmového hořáku,
- upínače součásti,
- řídicí a kontrolní jednotky.



Obr. 17 Schéma zařízení pro navařování metodou 152 [26].

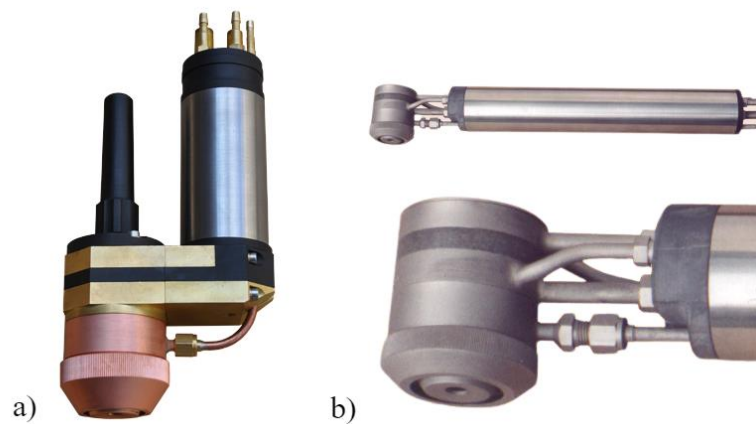
Uvnitř plazmového hořáku je wolframová elektroda obsahující 2 % ThO₂. Obvyklý průměr elektrody je 6–8 mm. Elektroda je uložena v měděné vodou chlazené trysce. Tryska slouží jako anoda pro zapálení pilotního oblouku. Na výstupu se tryska zužuje (výstupní průměr je obvykle 2–4 mm) a díky tomu zvyšuje hustotu vystupující plazmy. Osa trysky a osa elektrody musí být co nejvíce rovnoběžné. Vychýlení os vede k nestabilnímu hoření oblouku, nerovnoměrnému tavení prášku, špatné kontrole vneseného tepla do základního materiálu a ke snížení životnosti elektrody. Jako plazmový plyn se většinou používá Ar nebo směs Ar-He. [26]

Obvykle se používají dva nezávislé zdroje stejnosměrného proudu s napětím naprázdno menším než 100 V. Jeden zdroj se používá pro hoření pilotního oblouku, druhý se používá pro hoření hlavního oblouku. Pilotní oblouk je zapalován vysokofrekvenčním ionizátorem. [26]

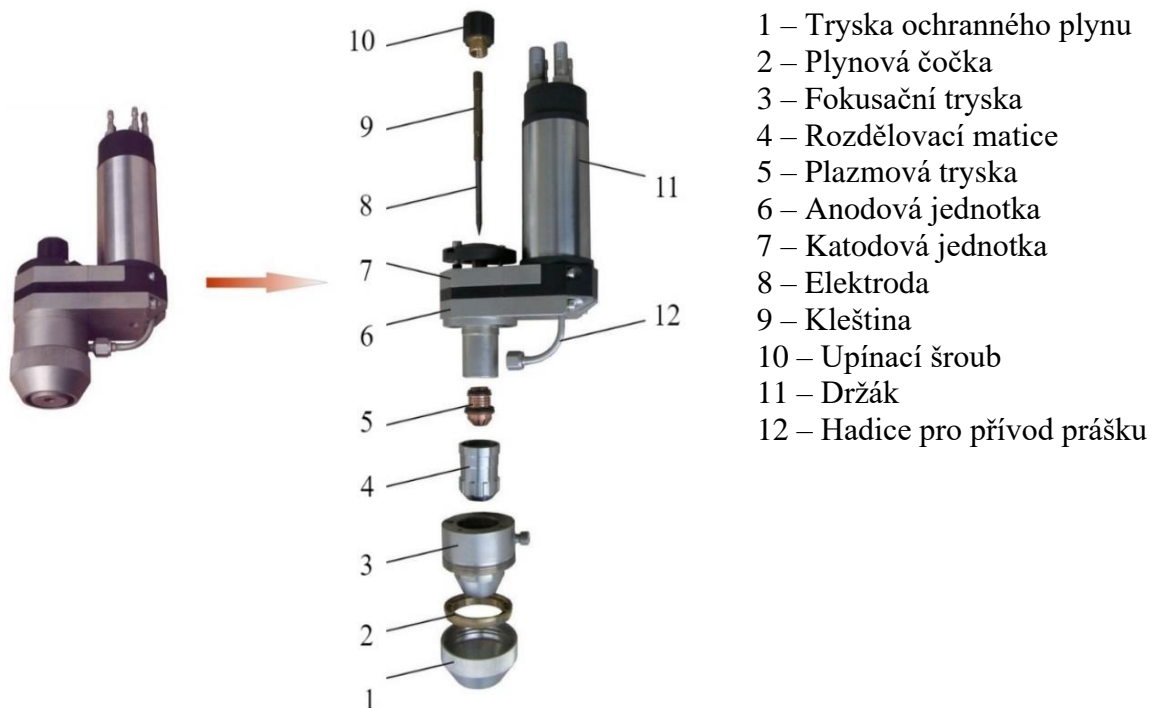
Plazmový hořák je chlazen přívodem vody. Obvykle je přiváděna pod tlakem 0,45–0,6 MPa s průtokem 6–8 l/min. K proudění vody se používají vysokotlaké zařízení pracující s uzavřeným oběhem. [26]

Prášek je přiváděn třemi způsoby. Podle konstrukce plazmového hořáku je buď přiváděn přímo do plazmového oblouku, ve kterém se plně nataví, nebo je přiváděn do vnějších částí plazmy, ve které se nataví pouze částečně. Prášek může být také podáván do tavné lázně vytvořené plazmovým obloukem. Různé typy hořáků jsou zobrazeny na obr. 18. Konstrukce hořáku je

zobrazena na obr. 19. Dopravní plyn je čistý Ar nebo Ar s několika procenty H₂. Jako ochranný plyn se používá čistý Ar nebo Ar s 5–7 % H₂. Spotřeba ochranného plynu je několikrát vyšší než plazmového plynu. [26]



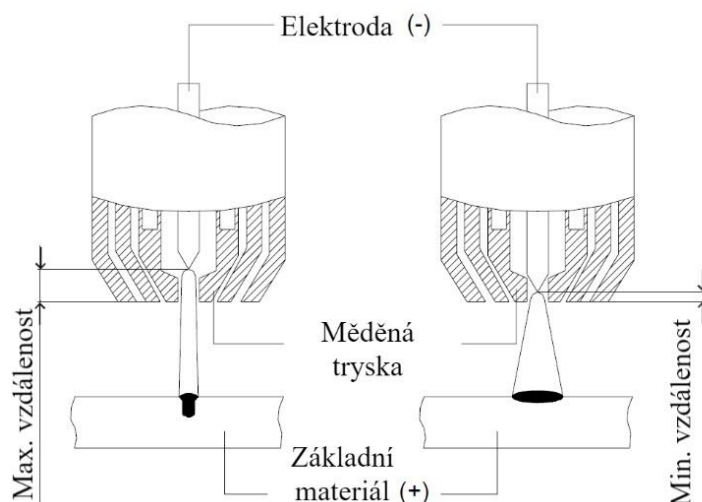
Obr. 18 Plazmový hořák a) pro navařování vnějších ploch, b) pro navařování vnitřních ploch [37; 38].



Obr. 19 Části plazmového hořáku pro navařování vnějších ploch [37].

U plazmového hořáku se může měnit vzdálenost mezi špičkou elektrody a koncem plazmového hořáku (obr. 20). Menší vzdálenost špičky elektrody a konce plazmového hořáku způsobuje větší šířku a kuželovitost plazmového oblouku. Tím dochází ke zvětšení ohřívané plochy na povrchu základního materiálu a ke zmenšení závaru. [27]

Výstupní průměr měděné trysky ovlivňuje hodnotu proudu plazmového oblouku. Čím menší je tento průměr, tím větší má plazmový oblouk teplotu. Zvýšení teploty snižuje proud na oblouku. Zároveň se při použití hořáku s malým výstupním průměrem trysky a velkou vzdáleností mezi špičkou elektrody a koncem plazmového hořáku dosáhne plazmového oblouku s vysokou hustotou energie. Zvětšuje se také závar oblouku. [27]



Obr. 20 Vliv vzdálenosti špičky elektrody od konce hořáku na tvar plazmového oblouku a velikost zředění [39].

2.3.1 Parametry navařování

Podle volby druhu zařízení pro navařování metodou 152 je možné navařovat malé díly s omezeným množstvím vneseného tepla, ale také navařovat rozměrné součásti s velmi dobrým výkonem navaření. Parametry různých druhů zařízení používaných pro navařování metodou 152 jsou zobrazeny v tab. 4. Tyto parametry a druh navařovaného materiálu ovlivňují dosažitelné vlastnosti návaru. Běžně dosažitelné parametry při navařování jsou [26]:

- tloušťka jedné vrstvy 0,5–6 mm,
- šířka návaru 2–40 mm (většinou 10 mm),
- tloušťka konečného návaru 20 mm
- efektivita využití prášku 95–98 %,
- zředění mezi 5–7 % (lze očekávat vyšší zředění při tloušťce vrstvy pod 1 mm).

Tab. 4 Přehled parametrů pro různé druhy navařování [26].

Parametr	Jednotky	Mikro navařování	Běžný výkon navařování	Vysoký výkon navařování
Proud pilotního oblouku	A	-	50–100	50–100
Napětí pilotního oblouku	V	-	40	40
Proud hlavního oblouku	A	5–50	100–300	200–400
Napětí hlavního oblouku	V	20	40	40
Průměr trysky	mm	1–2	2–4	2–4
Vzdálenost mezi špičkou hořáku a základním materiálem	mm	5–10	10–20	15–20
Průtok plazmového plynu	l·min ⁻¹	0,4–1,4	2–10	3–10
Druh plazmového plynu	-	Ar	Ar, směs Ar a He	Ar, směs Ar a He
Průtok ochranného plynu	l·min ⁻¹	10–24	10–40	10–50
Druh ochranného plynu	-	Ar, Ar + 5–7 % H ₂	Ar, Ar + 5–7 % H ₂	Ar + 5–7 % H ₂
Průtok dopravního plynu	l·min ⁻¹	1–3,5	1–20	5–20
Druh dopravního plynu	-	Ar	Ar, Ar + 5–7 % H ₂	Ar, Ar + 5–7 % H ₂
Průtok prášku	kg·h ⁻¹	0,1–2	2–10	10–20
Velikost částic prášku	μm	20–100	60–200	60–200
Rychlost pohybu hořáku	mm·s ⁻¹	2–3,5	1–2	1–4
Frekvence oscilace hořáku	Hz	-	0,5	0,3–1,0
Amplituda oscilace	mm	-	10–20	20–40

2.3.2 Vliv parametrů navařování

Návary musí odpovídat požadavkům příslušných norem a požadavkům zákazníka, který může normou kladené požadavky ještě zpřísnit. Výrobce je na jedné straně omezen těmito požadavky, ale na straně druhé musí vyrábět součásti s co nejvyšší efektivitou a s nízkými výrobními náklady. Některými z často optimalizovaných parametrů jsou [26]:

- rozměry návaru (výška, šířka),
- výkon navaření,
- zředění,
- adheze,
- tvrdost.

Přídavný materiál z velké části ovlivňuje vlastnosti navařené vrstvy. Jeho volba je pouze jedním z kroků, které umožní splnit požadavky kladené na návar. Po zvolení přídavného materiálu je nutné zvolit a optimalizovat parametry navařování. Každý parametr navařování má jiný vliv na proces navařování a samotný návar. [26] V praxi má na vlastnosti návaru největší vliv:

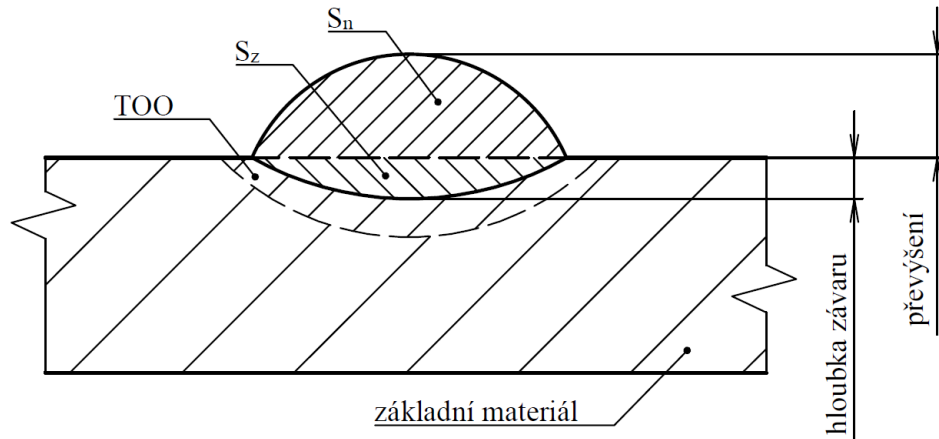
- Velikost proudu hlavního oblouku – Proud hlavního oblouku ovlivňuje parametry jako jsou vnesené teplo do základního materiálu, průměr a rychlost plazmy, ohřev prášku a intenzita promíchávání tavné lázně. Při zvýšení proudu dojde kvůli změně těchto parametrů k nárůstu zředění, pevnosti spoje mezi návarem a základním materiálem, šířky návaru, účinnosti využití prášku a poklesne porozita návaru. Zvýšení proudu však na druhé straně snižuje tloušťku návaru a může způsobit pokles jeho výsledné tvrdosti. [26]
- Rychlost pohybu hořáku – Rychlost pohybu hořáku ovlivňuje zředění a rozměry návaru. Zředění se obecně s klesající rychlostí zvyšuje. Hořák může také vykonávat oscilační pohyb. [26]
- Vzdálenost hořáku od základního materiálu – Vzdálenost hořáku od základního materiálu má vliv na zředění a intenzitu promíchávání svarové lázně. S rostoucí vzdáleností se zředění obecně snižuje. Snížení zředění je způsobeno poklesem rychlosti plazmového plynu. Při rostoucí vzdálenosti oblouku a konstantní hodnotě proudu dochází k nárůstu napětí na oblouku. Nárůst napětí má za následek zvýšení vneseného tepla do substrátu. [26]
- Průtok plazmového plynu – Průtok plazmového plynu má vliv na rozměry návaru a zředění. S rostoucí velikostí průtoku plazmového plynu zředění narůstá. Zvyšuje se také šířka a rychlost plazmy. [26; 27]
- Množství podávaného prášku – Množství podávaného prášku ovlivňuje zředění, rozměry návaru a účinnost využití prášku. Zvýšení podávaného množství prášku obecně vede ke snížení zředění a zvýšení tloušťky návaru. Přílišné množství prášku však snižuje účinnost využití prášku a může dojít k nedostatečnému spojení návaru se základním materiálem (odloupnutí návaru). [26]

2.3.3 Zředění

Stejně jako při svařování dochází při navařování ke zředění svarového kovu základním materiálem a ke vzniku tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Části návaru potřebné pro výpočet zředění jsou zobrazeny na obr. 21. Zředění Z lze vypočítat jako [23]:

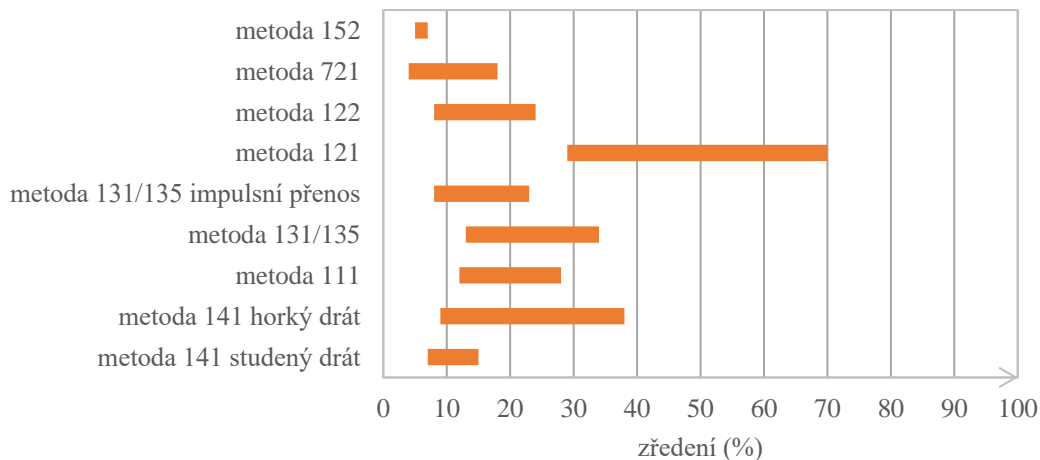
$$Z = \frac{S_z}{S_n + S_z} \cdot 100, \quad (2.1)$$

kde: S_n - plocha navařeného kovu [mm²]
 S_z - plocha závaru [mm²]



Obr. 21 Zředění návarového kovu základním materiálem [23].

Zředění mění chemické složení návaru a ten ztrácí požadované vlastnosti. Čím vyšší je hodnota zředění, tím vyšší je počet vrstev, které se musí navařit. Z toho důvodu je nutné držet hodnotu zředění co nejnižší. Každá metoda svařování má jiný rozsah hodnot zředění (obr. 22), a proto jiný počet vrstev nutných k dosažení zadaného zředění. [13; 18]



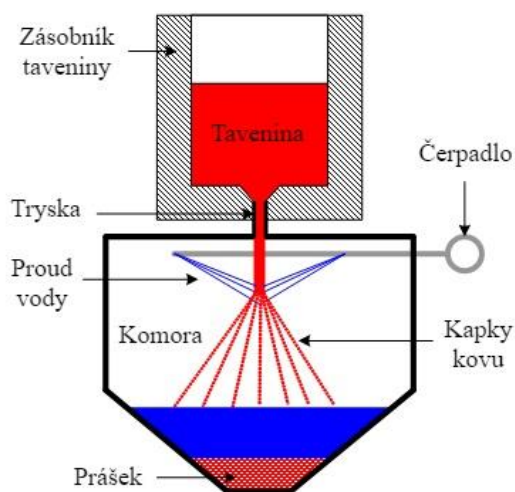
Obr. 22 Přehled obvyklých hodnot zředění různých metod navařování [18; 26; 14].

2.3.4 Výroba prášků

Niklové prášky pro navařování se nejčastěji vyrábí atomizací vodou nebo plynem. Obsah oxidů v prášku je pod 0,1 % jejich hmotnosti. Pro metodu 152 jsou vhodné prášky s velikostí zrn 45–150 μm. [40] Základní charakteristiky zmíněných metod atomizace jsou:

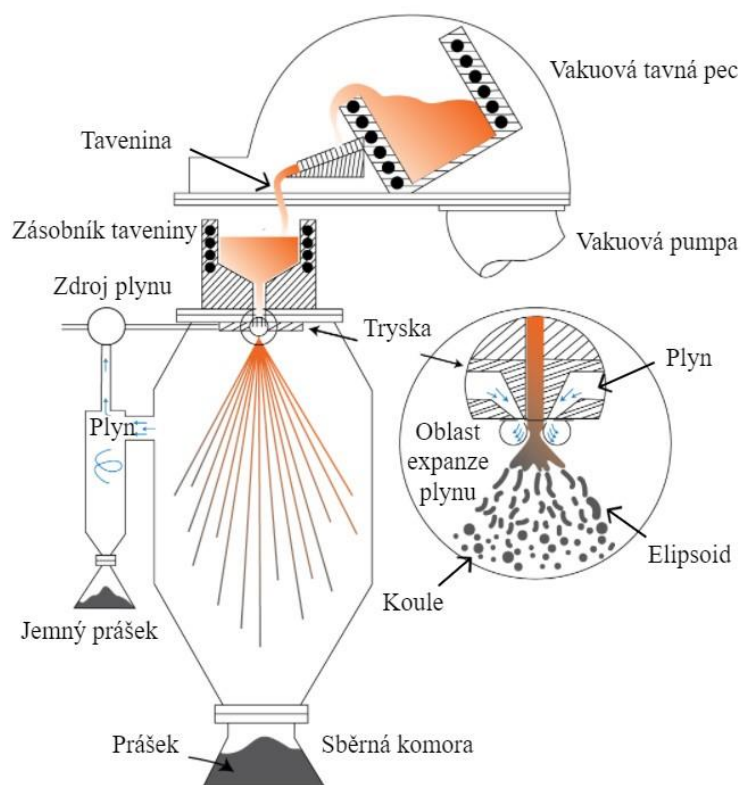
- Atomizace vodou – Atomizace vodou je rozptýlení proudu taveniny proudem vody. Jedná se o levnou a výkonnou metodu výroby prášků. Produkce prášku jedinou tryskou může být až 500 kg/min. Na druhou stranu mají zrna prášku obecně nepravidelný tvar. Další nevýhodou je tvorba většího množství oxidů na povrchu zrn (většinou 1000–4000 ppm) v porovnání s plynem atomizovanými prášky (většinou 100–1000 ppm).

Proto se tvorba oxidů omezuje např. přidáním inhibitorů nebo alkoholu a deionizací vody. Schéma zařízení pro atomizaci vodou je na obr. 23. [40]



Obr. 23 Schéma vodního atomizéru [41].

- Atomizace plynem – Atomizace plynem je rozptýlení proudu taveniny proudem plynu s vysokou rychlostí. Používané plyny jsou vzduch, N_2 , He a Ar. Atomizace plynem je méně výkonná než při použití vody. Výkon jedné trysky je 1–90 kg/min. Výhodou této metody je, že při použití inertních plynů obsahují prášky malé množství oxidů. Zařízení mají poměrně značnou spotřebu atomizačních plynů. Proto se inertní plyny z atomizační komory odvádí a znovu používají. Schéma zařízení je na obr. 24. Zrna mají většinou sférický tvar, v některých případech se jejich tvar může zplošťovat. [40]



Obr. 24 Schéma plynového atomizéru [42].

2.4 Nedestruktivní metody zkoušení svarů

Metody NDT slouží k ověření, jestli je zkoušená součást bez vad. Avšak žádná z metod NDT neodhalí všechny vady vyskytující se v součásti. Některé metody jsou vhodné k odhalení vad na povrchu (např. vizuální a penetrační metody), jiné metody jsou zase vhodné k odhalení vnitřních vad (např. radiologické metody). Při volbě metody NDT musí být také brán v úvahu materiál součásti, její rozměry a druh zkoumaných vad. Pro úplné ověření, jestli součást neobsahuje vady, musí být tedy vždy provedeno několik různých zkoušek. [43]

Výhodou metod NDT je, že jejich provedením není funkce ani kvalita součásti nijak ovlivněna. Díky tomu mohou díly dále plnit svůj původní účel. Navíc mohou být zkoušky prováděny v kterékoli části výrobního postupu. Mohou být také kontrolovány již namontované součásti. [43; 44]

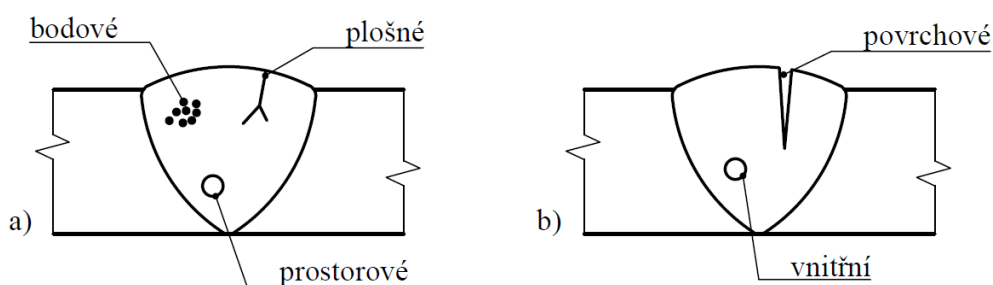
Další pohled na metody NDT je věnován hlavně testování svarů (návarů) a oblastí ovlivněných svarovým procesem. Mezi metody používané ke zjištění vad ve svarech patří [44]:

- vizuální – zjišťování povrchových vad,
- penetrační – zjišťování povrchových vad,
- magnetické práškové – zjišťování povrchových vad,
- vířivými proudy – zjišťování povrchových vad,
- radiologické – zjišťování vnitřních vad,
- ultrazvukové – zjišťování vnitřních vad.

NDT provádí na výrobcích kvalifikovaný pracovník s platným certifikátem. Existují tři stupně kvalifikace a certifikace. Dosažený stupeň určuje, které činnosti může pracovník vykonávat. Pracovník při získávání certifikátu absoluuje školení zakončené zkouškami, které prověří jeho dosažené teoretické a praktické znalosti. Získaná certifikace opravňuje pracovníka provádět NDT pouze pro danou metodu. Pro každou další metodu NDT musí vykonat nové školení. [44]

2.4.1 Vady ve svarech

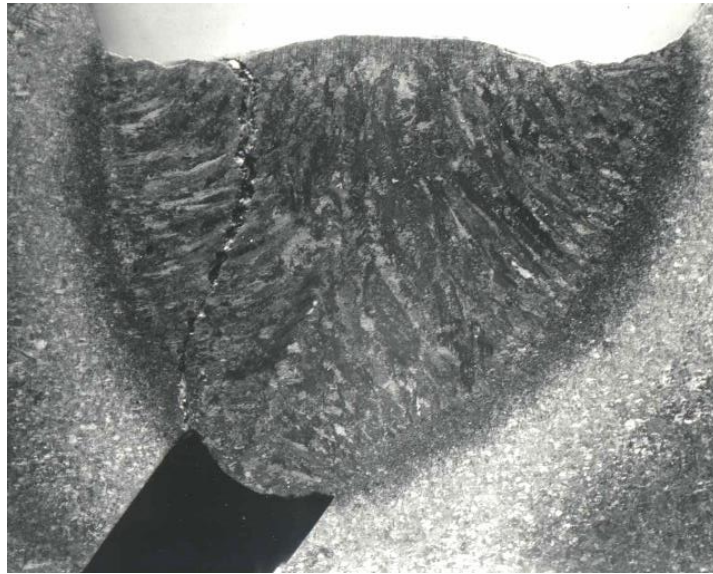
Vady ve svarech a návarech mají nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti svařované součásti. Jsou koncentrátoři napětí. Snižují mez únavy a mohou způsobit vznik křehkého lomu. Z hlediska tvaru se vady rozdělují na bodové (např. mikropóry, sférické vměstky), plošné (např. trhliny, studené spoje) a prostorové (např. plynové dutiny, staženiny). Z hlediska místa výskytu se rozdělují na povrchové a vnitřní. Rozdělení vad je zobrazeno na obr. 25. [44]



Obr. 25 Rozdělení vad ve svaru a) podle tvaru, b) podle oblasti výskytu [44].

Svary by ideálně neměli obsahovat žádné vady, ale ne vždy je tohoto stavu dosaženo. Výskyt a druh vad je limitován funkcí, konstrukcí a způsobem namáhání dané součásti, případně typem svaru. Pohlíží se na ně z hlediska druhu, velikosti a četnosti. Součást nejvíce oslabuje vada s největším vrubovým účinkem. Přípustné vady jsou určeny kritériem přípustnosti dané normy pro použití nebo výrobkovou normou a měly by být definovány konstruktérem. Pokud nejsou, jsou definovány technologem nebo kvalitou inženýrem v technologickém postupu nebo v plánu

kvality. Příkladem nepřijatelné vady je horká (obr. 26) nebo studená trhlinka (obr. 27). Druhy vzniklých vad záleží na materiálu a metodě svařování. [44]



Obr. 26 Horká trhlinka [45].



Obr. 27 Studená trhlinka [45].

Vady vzniklé ve svarech tavných metod svařování jsou klasifikovány v normě ČSN EN ISO 6052-1. Norma vady rozděluje do šesti základních skupin. Názvy skupin a jejich čísla jsou [46]:

- trhliny (1),
- dutiny (2),
- pevné vměstky (3),
- studené spoje a neprůvazy (4),
- vady tvaru a rozměru (5),
- různé vady (6).

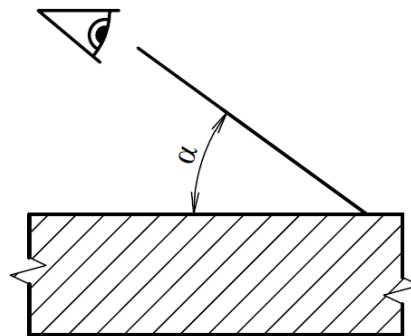
2.4.2 Vizuální zkouška

Svary a návary mohou být na součásti kontrolovány pomocí vizuální kontroly přímo nebo nepřímo. Přímá znamená, že nedojde k přerušení optické dráhy mezi okem pozorovatele a kontrolovanou plochou. Běžně se vykonává pouhým okem bez použití pomůcek. Pokud je problém rozhodnout, zda se jedná o vadu, používá se ke zvětšení obrazu lupa. Mezi další používané pomůcky patří např. zrcadlo, endoskop nebo přístroje s optickými vlákny. [43]

Nepřímé metody jsou metody, u kterých dojde k přerušení optické dráhy mezi okem pozorovatele a kontrolovanou plochou. Používají se ke kontrole nedostupných míst (např. vnitřní svary tlakových nádob, návary na vnitřním průměru potrubí). Další oblastí použití je kontrola svarů v prostředí nebezpečném pro operátora. K získání obrazu, videa nebo snímků se používají např. videoskopy nebo roboti. [43]

Pracovník při vizuální kontrole svarů kontroluje povrch svaru nebo návaru, kořen svaru a TOO i s okolním základním materiálem. Podle dostupnosti je použita přímá nebo nepřímá metoda. Při přímé vizuální kontrole svarů musí být dodrženy tyto parametry [43]:

- vzdálenost pozorování < 600 mm,
- úhel pozorování $\alpha > 30^\circ$ (obr. 28),
- intenzita osvětlení 350–500 lx,
- zvětšení lupy 2–5x (pokud použita).



Obr. 28 Úhel pozorování α [43].

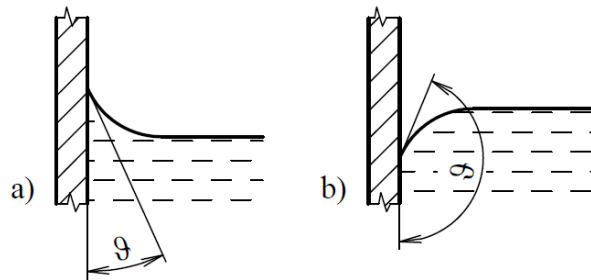
Výhodou vizuální zkoušky je, že může být snadno použita před, během i po svařování. Před svařováním se kontroluje např. čistota svařovacích ploch a správné sestavení dílů do přípravku pro svařování. Během svařování se kontroluje např. dostatečné natavení svařového a základního materiálu, nebo jestli parametry svaru odpovídají specifikaci postupu svařování. Po svařování se kontroluje např. přítomnost vad, kvalita povrchu svarů a kvalita odstranění strusky. Provedením úspěšné vizuální zkoušky je součást připravena pro vykonání kontroly další metodou NDT. [43; 44]

2.4.3 Kapilární zkouška

Kapilární zkouška funguje na principu vztlínání penetrantu z vady na povrchu, do které předtím zatekl. Povrch je nejprve odmaštěn. Poté je na povrch nanesen penetrant, který zateče do povrchových vad. Následně je penetrant odstraněn a na povrch je nanasena vývojka. Vztlínání penetrantu vytvoří ve vývojce indikace. Vyhodnocení je vizuální. [43] Využívá se kapilárních vlastností kapalin, mezi které patří:

- Povrchové napětí – Povrchové napětí je vyvoláno nerovností sil působících na fázovém rozhraní mezi kapalinou a okolním prostředím. V kapalině na sebe molekuly působí stejně velkými přitažlivými silami, takže jsou síly v rovnováze. Na povrchu však molekuly okolního prostředí (vzduchu) působí na molekuly kapaliny menšími silami než molekuly kapaliny. Molekuly kapaliny na povrchu jsou do kapaliny vtahovány. Počet povrchových molekul je vlivem povrchového napětí minimalizován a kapalina se snaží mít co nejmenší povrch. [43]
- Krajový úhel – Krajový úhel ϑ je úhel mezi povrchem kapaliny a stěnou nádoby. Závisí na rozdílu povrchových napětí mezi stěnou a vzduchem a mezi stěnou a kapalinou. Rozdíl těchto povrchových napětí se nazývá adhezní konstanta. Kladná adhezní konstanta vytváří ostrý krajový úhel mezi povrchem kapaliny a stěnou nádoby. Kapalina

stěnu smáčí (obr. 29 a). Záporná adhezní konstanta vytváří tupý krajový úhel mezi povrchem kapaliny a stěnou nádoby. Kapalina stěnu nesmáčí (obr. 29 b). Detekční kapaliny by měly povrch smáčet co nejvíce. Drsnost povrchu zlepšuje smáčivost. [43]



Obr. 29 a) kapalina smáčí stěnu nádoby, b) kapalina nesmáčí stěnu nádoby [44].

- Kapilární elevace – Kapilární elevace je vztlínání penetrantu z vady. Vztlínají kapaliny s ostrým krajovým úhlem. [44]
- Kinematická viskozita – Kinematická viskozita ν je podíl dynamické viskozity η a hustoty kapaliny ρ . Při vysoké viskozitě kapalina vniká do vad a vztlíná z nich pomalu. Při nízké viskozitě zase zanechává na povrchu příliš slabou vrstvu. Penetranty tedy musí mít určitou hodnotu viskozity. S růstem teploty klesá. Pokles je kolem 2 % při nárůstu teploty o 1 °C. [43]

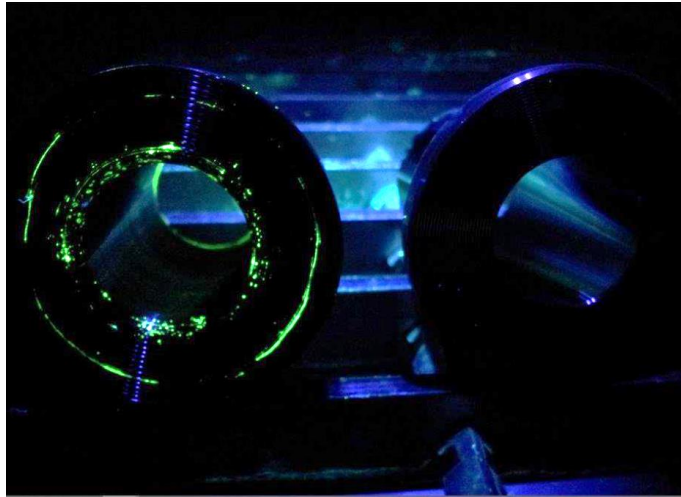
Penetranty by měly mít optimální poměr mezi povrchovým napětím, viskozitou a krajovým úhlem. Obecně se požaduje vysoká hodnota povrchového napětí, nízká viskozita a malý krajový úhel. Díky tomu bude penetrant snadno zatékat do povrchových vad a opět z nich vztlínat. [43]

Kapilární zkouška slouží ke kontrole, zda se na povrchu nevyskytují vady. Není schopna indikovat vnitřní vady, které nevystupují na povrch. Používá se k testování kovových i nekovových materiálů. Spolehlivě indikuje vady jako např. trhliny nebo studené spoje, ze kterých se dá penetrant obtížně vymýt. Z tohoto důvodu není vhodná pro indikaci mělkých rozsáhlých vad na povrchu. Také není vhodná k testování pórovitých materiálů. Kapilární metody se rozdělují na [43]:

- metodu barevné indikace (obr. 30) – indikace viditelná v denním nebo umělém bílém světle,
- metodu fluorescenční (obr. 31) – indikace viditelná v ultrafialovém záření,
- metodu dvouúčelovou – kombinace předchozích, záleží na zvoleném osvětlení.



Obr. 30 Metoda barevné indikace [47].



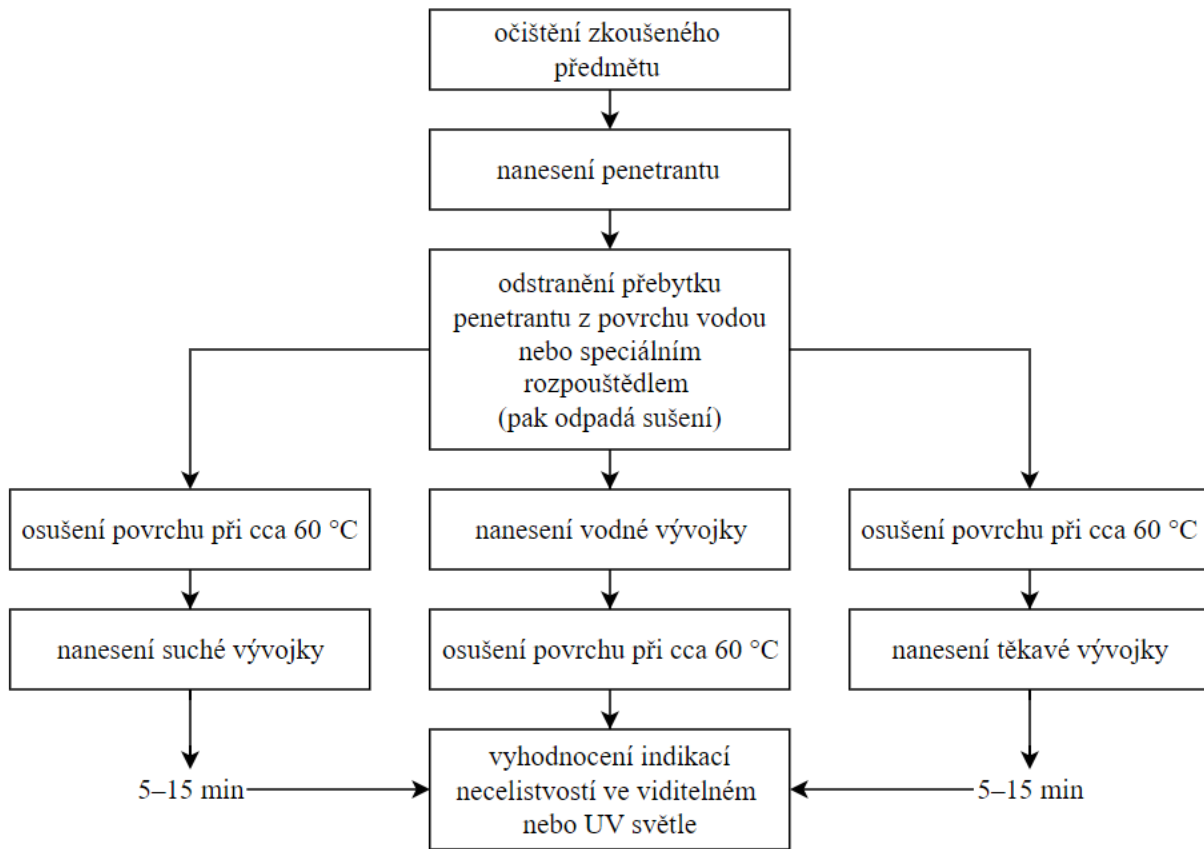
Obr. 31 Metoda fluorescenční [47].

Kapilární prostředky se používají na přípravu povrchu a k vyvolání indikace. Měly by být všechny od jednoho výrobce. [43] Rozdělují se na:

- Penetranty – Penetranty jsou kapaliny, jejichž účelem je vniknout do povrchových vad a poté z nich opět vzlínat. Při odstraňování přebytku penetrantu z povrchu nesmí dojít k jejich vymytí. Jsou vyrobeny z ropných produktů a organických rozpouštědel. Mají intenzivní červenou barvu nebo obsahují luminosfór. Některé jsou smytelné vodou. Mohou obsahovat emulgátory, nebo jsou emulgovány až po uplynutí penetračního času. Penetranty by měly mít dobrou penetrační schopnost, nízkou těkavost, bod vzplanutí vyšší než 50 °C, být chemicky netečné a být nejedovaté. Zároveň nosné médium musí dobře rozpouštět luminosfór nebo barvivo. [43]
- Vývojky – Vývojky slouží k vytvoření a indikaci povrchových vad. Napomáhají vzlínání penetrantu a jsou na povrch nanášeny po odstranění jeho přebytečného množství. Vývojky jsou vyrobeny z prášku bílé barvy, vyráběného např. z oxidu zinečnatého, oxidu hořečnatého, uhličitanu hořečnatého nebo uhličitanu vápenatého. Vývojky pro barevné indikace by měly dobře maskovat povrch podkladu. Fluorescenční vývojky povrch maskovat nemusí. Aplikují se jako [43]:
 - suché – na povrch se naprašují vzduchem nebo jiným hnacím plynem,
 - mokré těkavé – prášek je rozptýlen v těkavém rozpouštědle a na povrch se nanáší např. sprejem,
 - mokré vodné – prášek je rozptýlen ve vodě, která často také obsahuje smáčedla a retardéry, a na povrch je nanesen ponorem předmětu.
- Odmašťovače – Odmašťovače slouží k odmaštění povrchu před aplikací penetrantu. Často se používají organická rozpouštědla jako např. benzin a aceton. Mohou se použít také anorganické látky jako např. naředěný hydroxid sodný nebo draselný. [43]
- Čističe – Čističe slouží k odstranění přebytečného penetrantu. Jsou tvořeny organickým rozpouštědlem. Většinou obsahují také emulgátory. [43]
- Emulgátory – Emulgátory napomáhají odstraňování přebytku penetrantu. Dělí se na lipofilní a hydrofilní. Lipofilní se rozpouštějí v tucích a v odpadních vodách nejsou biologicky odbouratelné. Hydrofilní jsou rozpustné ve vodě a v odpadních vodách jsou biologicky odbouratelné. [43]

Příprava povrchu pro kapilární zkoušku se skládá z několika operací. Schéma normálního nebo emulgačního postupu je zobrazeno na obr. 32. [43] Jednotlivé operace jsou:

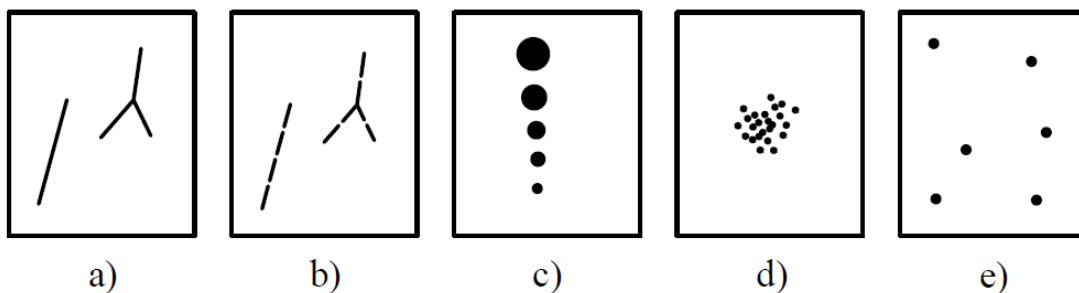
- Příprava povrchu – Příprava povrchu znamená očištění nečistot, olejů a mastnoty z povrchu a nečelivostí na povrchu zkoušené součásti. Provádí se většinou organickými rozpouštědly (např. aceton, benzin). Silně znečištěné povrchy se čistí roztoky kyselin nebo hydroxidů. Součást je možné také umístit do par rozpouštědla. Příprava povrchu kartáčováním, otřením, broušením nebo otryskáním se nedoporučuje. Povrch je po této přípravě špatně očištěn a může dojít k uzavření nečelivostí na povrchu nečistotami. Po očištění se povrch osuší. [43]
- Nanesení detekční kapaliny – Nanesení detekční kapaliny je možné ponořením součásti do penetrační lázně, nátěrem štětcem, poléváním nebo nástřikem např. vzduchovou pistolí. Penetrační kapalina musí být na povrchu určitou dobu (obvykle 5–20 min). Delší čas je potřebný pro detekci jemných vad. Penetrační čas lze snížit ohřátím detekční kapaliny, ohřátím zkoušeného výrobku, snížením atmosférického tlaku nebo vibracemi. Délka penetračního času je ovlivněna [43]:
 - druhem detekční kapaliny,
 - teplotou zkoušení,
 - jakostí zkoušeného povrchu,
 - charakterem zjišťovaných vad,
 - požadovanou citlivostí.
- Odstranění přebytku detekční kapaliny – Odstranění přebytku detekční kapaliny se provádí mechanicky, pomocí rozpouštědel, emulgačním způsobem nebo postemulgačním způsobem. Důležité je, aby nedošlo k vymytí zateklého penetrantu z nečelivostí na povrchu. [43]
- Vyvolání – Vyvolání indikací se provádí suchou nebo mokrou vývojkou. Suchá vývojka se používá především pro fluorescenční metodu. Vývojka se na povrch ručně zaprašuje, nanáší vzduchovou pistolí nebo se využívají nádrže, kde je vývojka nadlehčována prouděním vzduchu a součást se do ní ponoří. Mokrý vývojka se častěji používá pro barevnou metodu. Je ve formě suspenze ve vodě nebo v těkavé kapalině. Nanáší se ponorem nebo nástřikem. [43]
- Vyhodnocení výsledků zkoušky – Vyhodnocení výsledků zkoušky se provádí vizuálně. Je náročné na zrak a je doporučeno, aby pracovník prováděl vyhodnocování celkem maximálně 4 h během jedné směny (po 2 h je krátká přestávka). Výsledky vyhodnocení závisí na zkušenostech pracovníka a jeho důkladnosti. Barevné indikace se vyhodnocují pod bílým světlem o intenzitě ≥ 500 luxů. K osvětlení předmětu se často používají zářivky. Fluorescenční indikace se vyhodnocují v zatemněném prostoru při osvětlení předmětu černým světlem ultrafialovou lampou. Intenzita černého světla by měla být minimálně $\geq 500 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ pro indikaci velkých vad a $\geq 1000 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ pro indikaci malých vad. Pracovník by měl po celou dobu být v zatemněné komoře. Navíc před vyhodnocováním musí počkat obvykle 5–15 min, než se oko adaptuje na tyto podmínky. Povrch se hodnotí 2x. Nejdříve se hodnotí velké vady, které by po delším čase byly špatně identifikovatelné. Po určité době se hodnotí jemné indikace. Vyhodnocení se provádí bez pomůcek nebo se používá lupa s přiblížením 2–6x. Vyhodnocení slouží převážně k vyhodnocení stavu předmětu a zjištěné indikace nejsou zaznamenávány. Pokud je požadavek je zaznamenat, používá se k tomuto účelu jejich vyfotografování. [43]



Obr. 32 Schéma normálního nebo emulgačního postupu [43].

Různé vady na součásti mají různý vzhled indikací. Může také dojít ke vzniku falešných indikací. Vznikají např. při špatném očištění povrchu součásti od penetrační kapaliny nebo jsou způsobeny částicemi a vlákny, které na povrchu ulpěly. Podle vzhledu se indikace rozdělují na (obr. 33) [43]:

- souvislé liniové indikace (trhliny, studené spoje)
- přerušované liniové indikace (trhliny, studené spoje)
- okrouhlé indikace (plynové dutiny, vměstky)
- tečkovité indikace (porezita materiálu, řediny)
- rozptýlené indikace (jemná porezita, jemné mikrostaženiny)



Obr. 33 Rozdělení indikací kapilární zkoušky podle vzhledu a) souvislé liniové indikace, b) přerušované liniové indikace, c) okrouhlé indikace, d) tečkovité indikace, e) rozptýlené indikace [43].

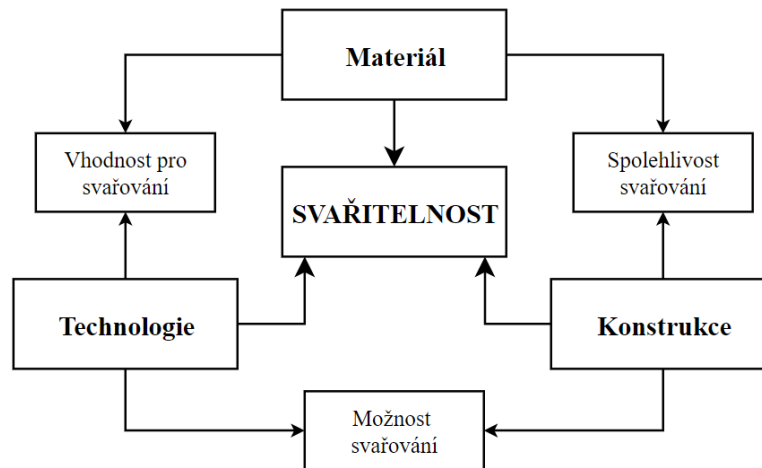
Ke zjištění citlivosti detekčních prostředků není dostačující znát jeho fyzikální vlastnosti. Citlivost detekčních prostředků se u kapilární metody testuje měrkami nebo porovnáním určité vlastnosti s vlastnostmi již používaného prostředku. Měrky se rozdělují na [43]:

- Měrky s umělou necelistvostí – Měrky s umělou necelistvostí jsou výhodné z toho hlediska, že poskytují dobrou reprodukovatelnost zkoušek a mají delší dobu použitelnosti než měrky s přirozenou necelistvostí. Rozměry necelistvosti jsou známy. Jejich nevýhodou je, že necelistvost neodpovídá skutečným necelistvostem. Mezi některé používané umělé měrky patří [43]:
 - americká zkušební měrka,
 - měrka IIW,
 - měrka VÖEST,
 - kuželová měrka.
- Měrky s přirozenou necelistvostí – Měrky s přirozenou necelistvostí jsou výhodné, protože necelistvosti odpovídají skutečným vadám. Nevýhodou je jejich omezená doba použitelnosti (30–50x). Mezi používané měrky s přirozenou necelistvostí patří [43]:
 - hliníková měrka,
 - ohybová měrka,
 - chromová měrka.

3 TEORIE SVAŘITELNOSTI

Svařitelnost je komplexní pojem. Vytvořený svarový spoj musí být bez defektů a současně umožnit, aby svařenec vykonával svojí funkci. Na svařitelnost se pohlíží z hlediska použitých materiálů, konstrukce svarového spoje a technologie použité pro vytvoření svarového spoje (obr. 34). Materiál, který je pro určitý typ svarového spoje svařitelný danou technologií, může při svařování jinou technologií obsahovat vady. Špatně svařitelný materiál je materiál, který je možné svařovat pouze omezeným množstvím technologií a při dodržení různých omezení (např. typ svarového spoje, předehřev, tepelné zpracování po svařování). Opakem je dobře svařitelný materiál. Nevhodně zvolená technologie nebo konstrukce pro vybraný materiál vede ke vzniku vad jako jsou např. studené trhliny, horké trhliny, pórovitost svarového kovu, a vysoká tvrdost TOO. [48; 49]

Z pohledu použitého svařovaného kovu má na jeho svařitelnost vliv např. chemické složení, teplota tavení, koeficient tepelné roztažnosti, tepelná a elektrická vodivost, množství defektů ve struktuře a kvalita povrchu. Z pohledu technologie má na svařitelnost vliv např. použitý ochranný plyn, předehřev, teplota interpass, tepelné zpracování po svařování, technika svařování, množství vneseného tepla. Další podkapitoly jsou věnovány pohledu na svařitelnost hlavně z hlediska materiálu případně technologie svařování. [49]



Obr. 34 Faktory ovlivňující svařitelnost [48].

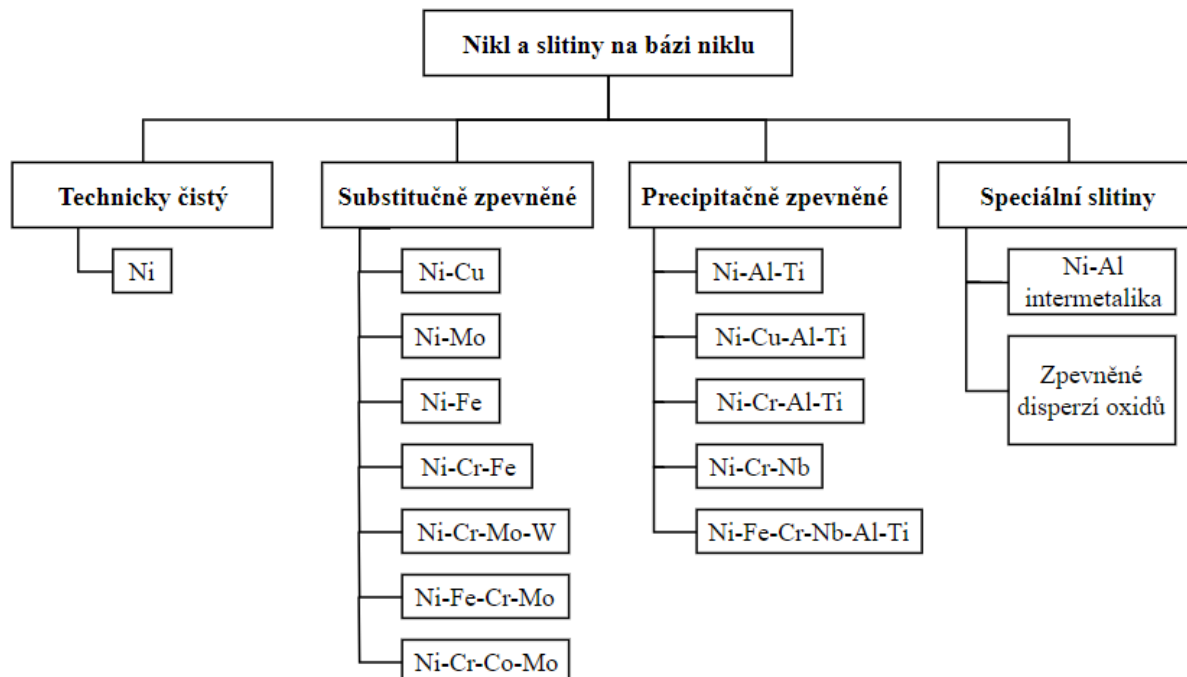
3.1 Nikl a niklové slitiny

Nikl je feromagnetický kov s mřížkou FCC. Teplota tavení niklu je 1453 °C, mez pevnosti 460 MPa, mez kluzu 150 MPa a tažnost kolem 50 %. Vyznačuje se výbornou odolností proti atmosférické korozi. Většinou se používá jako legující prvek do ocelí. Slitiny niklu jsou významné díky svojí odolnosti proti korozi, opalu a díky svojí žárovevnosti. Další vlastnosti slitin niklu jsou vysoký elektrický odpor, vysoká pevnost a houževnatost. Využití niklu v průmyslu je zobrazeno v tab. 5. [1; 50]

Tab. 5 Použití niklu v roce 2020 [51].

Použití	Spotřebované množství	Podíl
	10 ⁶ kg	%
Korozivzdorné oceli	1779	73
Baterie	211	9
Legované oceli	131	5
Galvanické pokovování	127	5
Niklové slitiny	124	5
Jiné	69	3

Niklové slitiny se většinou označují podle obchodního názvu nebo čísla slitiny, které jim dal původní výrobce. Obecně se rozdělují podle chemického složení (obr. 35). Pro svařování lze nikl a niklové slitiny rozdělit dle směrnice TNI CEN ISO/TR 15608 (tab. 6). [52; 53]



Obr. 35 Rozdělení niklu a slitin niklu dle chemického složení [52].

Substitučně zpevněné slitiny niklu dosahují zvýšení pevnosti přidáním prvků jako např. Cr, Fe, Mo, W, Cu do tuhého roztoku. Mohou se v nich tvořit různé karbidy. Mezi nejčastěji se vyskytující patří karbidy chromu $M_{23}C_6$. Jejich tvorba může způsobit mezikristalickou korozi pod napětím. Proto se substitučně zpevněné slitiny většinou dodávají ve stavu po rozpouštěcím žihání. Některé slitiny pracující za vyšších teplot mohou být dodávány po vystárnutí, při kterém dojde k vyrovnání obsahu chromu mezi maticí a oblastmi kolem karbidů ochuzenými o chrom. Substitučně zpevněné slitiny se používají pro výrobu dílů s vynikající odolností proti korozi do teplot 800 °C (někdy až 1200 °C) a dobrou pevností (R_m 485–830 MPa, $R_{p0,2}$ 275–450 MPa). Díky FCC mřížce mají slitiny dobrou pevnost a houževnatost i za kriogenních teplot. Používají se např. v chemickém, energetickém a petrochemickém průmyslu. [52]

Tab. 6 Rozdělení niklu a slitin niklu do skupin dle směrnice TNI CEN ISO/TR 15608 [53].

Skupina	Druh niklu a slitin niklu
41	Čistý nikl
42	Slitiny niklu a mědi (Ni-Cu) s $Ni \geq 45 \%$, $Cu \geq 10 \%$
43	Slitiny niklu a chromu (Ni-Cr-Fe-Mo) s $Ni \geq 40 \%$
44	Slitiny niklu a molybdenu (Ni-Mo) s $Ni \geq 45 \%$, $Mo \leq 32 \%$
45	Slitiny niklu, železa a chromu (Ni-Fe-Cr) s $Ni \geq 31 \%$
46	Slitiny niklu, chromu a kobaltu (Ni-Cr-Co) s $Ni \geq 45 \%$, $Co \geq 10 \%$
47	Slitiny niklu, železa, chromu a mědi (Ni-Fe-Cr-Cu) s $Ni \geq 45 \%$
48	Slitiny niklu, železa a kobaltu (Ni-Fe-Co-Cr-Mo-Cu) s $31 \% \leq Ni \leq 45 \%$ a $Fe \geq 20 \%$

Precipitačně zpevněné slitiny jsou zpevněny hlavně precipitáty prvků Al, Ti a Nb. Tyto prvky tvoří precipitáty Ni_3Al , Ni_3Ti , $Ni_3(Ti, Al)$ a Ni_3Nb . Precipitačně zpevněné slitiny obsahují také další prvky jako např. Cr, Co, Fe, Mo, B, které substitučně zpevňují tuhý roztok, zvyšují korozivzdornost, odolnost proti oxidaci a odolnost proti tečení za vysokých teplot. Tyto slitiny

mají vynikající pevnost (R_m až 1380 MPa, $R_{p0,2}$ až 1035 MPa) a odolnost proti korozi za vysokých teplot. Řadí se mezi superslitiny a používají se k výrobě částí leteckých motorů. [52]

Mezi speciální slitiny patří niklové slitiny zpevněné disperzí oxidů (většinou Y_2O_3) a niklové slitiny na bázi NiAl a Ni_3Al . Mají dobrou odolnost proti korozi a tečení za vysokých teplot. Disponují také dobrým poměrem pevnosti ku hmotnosti. Díky tomu je jim věnována velká pozornost v leteckém průmyslu pro výrobu turbín motorů. [52]

Výhodou prášků je jejich prakticky neomezené chemické složení. Prášek použitý pro návar je od výrobce Deutsche Edelstahlwerke. Další niklové prášky pro metodu 152 od tohoto výrobce jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Niklové prášky vhodné pro navařování metodou 152 a jejich chemické složení (výrobce Deutsche Edelstahlwerke) [54].

Označení	Typ slitiny	Typické množství prvku									
		C	Si	Cr	Mo	Co	W	Fe	B	Jiné	Ni
		hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %
Niborit 20-P	-	0,05	3,0	-	-	-	-	2,5	2,0	-	zb.
Niborit 4-P	Alloy 40	0,3	3,5	8,0	-	-	-	3,0	1,6	-	zb.
Niborit 45-P	Alloy 45	0,4	3,5	9,0	-	-	-	3,0	2,0	-	zb.
Niborit 5-P	Alloy 50	0,6	3,8	11,0	-	-	-	4,0	2,5	-	zb.
SZW 5029	Alloy 56	0,6	4,0	12,5	-	-	-	4,0	2,8	-	zb.
Niborit 6-P	Alloy 60	0,8	4,3	16,0	-	-	-	4,5	3,5	-	zb.
Niborit 7-P	Alloy M 16C	0,50	3,7	17,0	4,5	-	-	2,0	3,8	Cu 2	zb.
Niborit Al 0,8-P	-	0,3	3,1	4,2	-	-	-	1,0	0,8	Al 1,2	zb.
Niborit Al 1-P	-	0,2	2,7	6,5	-	-	-	2,0	1,1	Al 1,2	zb.
Nibasit C-276-P	Alloy C-276	<0,02	-	16,0	15,5	0,7	3,5	6,0	-	V 0,2	zb.
Nibasit 625-P	Alloy IN 625	<0,05	-	22,0	9,0	-	-	4,0	-	Nb 3,6	zb.
Nibasit T7-P	Alloy T700	<0,08	3,4	15,5	32,0	0,8	-	1,0	-	-	zb.
NiCr70Nb-P	Nicro 82	<0,03	0,3	20,0	-	-	-	<1,5	-	Mn 3 Nb 2,5	zb.
Nibasit P 60-P	Alloy Ni 60	0,55	3,2	17,5	-	-	-	17,0	-	-	zb.

3.1.1 Inconel 625

Inconel 625 je slitina na bázi Cr-Ni s přidavkem dalších prvků (zejména Nb a Mo). Rozsah jeho chemického složení je uvedeno v tab. 8. Díky vyššímu obsahu Nb je možné ho precipitačně zpevnit. V tuhém roztoku se také mohou vyskytovat karbidy typu MC, M_6C a $M_{23}C_6$. Díly z něj vyrobené se do teploty 650 °C používají ve stavu po rozpouštěcím žíhání, tváření za tepla nebo za studena. Pro teploty nad 650 °C jsou díly upraveny rozpouštěcím žíháním nebo vytvrzením. Mechanické vlastnosti polotovarů po různém tepelném zpracování jsou zobrazeny v tab. 9. [55; 56]

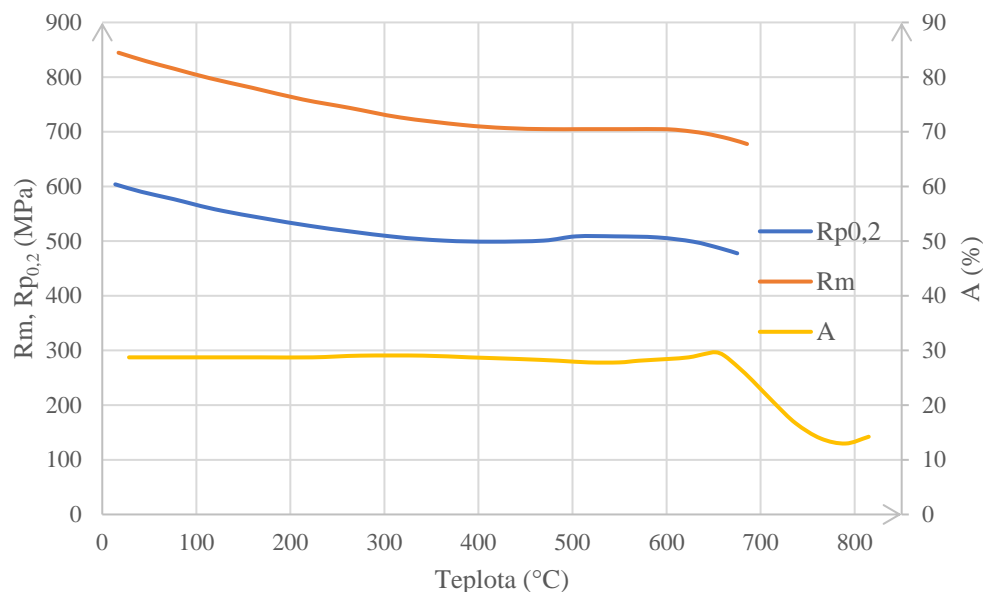
Tab. 8 Chemické složení Inconelu 625 [56].

Limit	Množství prvku												
	C	Mo	Fe	Mn	Cr	Si	Nb + Ta	P	S	Al	Ti	Ni	Co
	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %
min.	-	8,0	-	-	20,0	-	3,15	-	-	-	-	58,0	-
max.	0,10	10,0	5,0	0,50	23,0	0,50	4,15	0,015	0,015	0,40	0,40	-	1,0

Tab. 9 Mechanické vlastnosti polotovarů z Inconelu 625 za pokojové teploty (platí pro díly do průměru nebo tloušťky 100 mm) [56].

Polotovar	Tepelné zpracování	Mez pevnosti R_m MPa	Mez kluzu $R_{p0,2}$ MPa	Tažnost A %	Kontrakce Z %	Tvrdość dle Brinella -
tyč, plech $t \geq 6$ mm	-	827–1103	414–758	30–60	40–60	175–240
tyč, plech $t \geq 6$ mm	žiháno	827–1034	414–655	30–60	40–60	145–220
tyč, plech $t \geq 6$ mm	vytvrzeno	724–896	290–414	40–65	60–90	116–194
plech $t < 6$ mm	žiháno	827–1034	414–621	30–55	-	145–240
trubka	žiháno	827–965	414–517	30–55	-	-
trubka	vytvrzeno	689–827	276–414	40–60	-	-

Inconel 625 se používá za pokojových i zvýšených teplot (až do 980 °C). Díky FCC mřížce je vhodný také pro kryogenní teploty, protože má dostatečnou pevnost, houževnatost a velikost nárazové práce. Mezi jeho přednosti patří odolnost proti korozi ve sladké i slané vodě a odolnost proti některým kyselinám (např. HNO_3 , HCl). Velmi významné je jeho použití při vyšších teplotách, při kterých má vysokou pevnost, odolnost proti tečení a odolnost proti oxidaci. Při svařování není náchylný na horké trhliny a jeho svařitelnost je považována za velmi dobrou. Charakteristiky svarového kovu zjištěné při tahové zkoušce jsou uvedeny na obr. 36. [55; 56]



Obr. 36 Mechanické vlastnosti svarového kovu z Inconelu 625 pro různé teploty (svařovali se vyžihané plechy Inconelu 625 o tloušťce 12,7 mm metodou 141 studený drát) [56].

Mezi hlavní oblasti, ve kterých je využito jeho vlastností, patří letecký, energetický, jaderný, chemický průmysl a výroba dílů do mořské vody. Používá se na výrobu např. lopatek lodních šroubů, částí lodí a ponorek, částí leteckých motorů, potrubí, tepelných výměníků a destilačních kolon. [56]

3.1.2 Svařitelnost niklu a niklových slitin

Svařitelnost většiny niklových slitin je velmi podobná jako svařitelnost technického niklu. Obecně způsobují problémy při svařování prvky, které jsou v niklu velmi málo rozpustné nebo úplně nerozpustné (S, C, Pb). Stabilita hoření oblouku je ovlivněna vrstvou oxidů vznikající při legování slitin chromem. [1] Největší nebezpečí při svařování niklu a niklových slitin jsou:

- Porozita – Porozita je způsobena špatně očištěným povrchem obsahujícím oxidy a H_2 . Z tohoto důvodu je důležité důkladné očištění svarových ploch před svařováním. Je rovněž důležité zajistit dostatečnou ochranu svaru a svarové lázně, protože porozitu způsobují také vzdušný O_2 a N_2 . Dalším opatřením k zajištění svaru bez porozity je použití přídatného materiálu legovaného Al a Ti, které na sebe vážou kyslík. [57]
- Oxidické vměstky – Oxidické vměstky jsou způsobeny oxidy na povrchu, které se při svařování nerozpustily. Oxidy se z povrchu nedají odstranit ocelovým kartáčem ale pouze broušením nebo obráběním. [57]
- Horké trhliny – Horké trhliny jsou způsobeny např. sírou a fosforem. Síra způsobuje vznik horkých trhlin ve svarovém kovu i v TOO. Tvoří s niklem eutektikum, které má teplotu tavení $644\text{ }^\circ\text{C}$. Při tuhnutí je eutektikum vytlačeno na hranice zrn. Zabránit vzniku eutektika s niklem ve svarovém kovu lze přidáním Mg do přídatného materiálu. Tím dojde k vytvoření MgS s vyšší teplotou tavení. Zamezit vzniku horkých trhlin v TOO lze svařováním s nízkým vneseným teplem, bez přehřevu a teplotou interpass max. $150\text{ }^\circ\text{C}$. Díky tomu nedojde k přílišnému zhrubnutí zrn. [1; 58]
- Studené trhliny – Studené trhliny jsou způsobeny uhlíkem. Vznikají ve svarovém kovu. Maximální rozpustnost uhlíku v niklu v tuhém stavu je $0,2\text{ hm. }%$. Rychlé ochlazení svarové lázně při vyšším obsahu uhlíku zapříčiní přesycení tuhého roztoku. Součásti pracujících při vyšších teplotách (obvykle $300\text{--}750\text{ }^\circ\text{C}$) jsou poté náchylné k precipitaci grafitu. Při svařování technického niklu je obsah uhlíku limitován $0,2\text{ hm. }%$. Ve slitinách je precipitace grafitu omezena vytvořením karbidů se substitučními prvky jako je např. Ti nebo Nb. [1]

Substitučně zpevněné slitiny se většinou svařují po rozpouštěcím žíhání. Jejich svařitelnost je dobrá. Lze je svařovat většinou tavných metod svařování. Tepelné zpracování po svařování je nutné pouze v případech nárůstu tvrdosti TOO. [1; 57]

Precipitačně zpevněné slitiny se většinou také svařují ve stavu po rozpouštěcím žíhání. Pevnost těchto slitin je dosažena tepelným zpracováním po svařování (rozpouštěcí žíhání, vytvrzování). U některých slitin však při tepelném zpracování po svařování hrozí vznik trhlin. Precipitačně zpevněné slitiny a slitiny s významným podílem plastické deformace musí být svařovány metodami s minimálním vneseným teplem, protože u nich jinak dochází k degradaci požadovaných vlastností. Tepelné ovlivnění lze snížit také odvodem vneseného tepla z místa svaru do podložek. [1; 57]

Niklové slitiny se svařují bez přehřevu. Teplota interpass je obvykle $150\text{ }^\circ\text{C}$. Svarové plochy musí být precizně očištěny. Svařování většinou nesnižuje korozní odolnost. V některých případech (při provozu dochází ke kontaktu např. s $NaOH$ nebo HF) je však vhodné zařadit po svařování žíhání na snížení pnutí, aby nedošlo ke vzniku koroze za napětí. [57; 58]

3.2 Svařitelnost uhlíkových ocelí

U uhlíkových ocelí existuje nebezpečí vzniku trhlin v TOO. Trhliny jsou způsobeny uhlíkem, který zvyšuje tvrdost TOO a snižuje plasticitu. Při vysoké rychlosti ochlazování dochází k přeměně přesyceného tuhého roztoku austenitu na martenzit. Maximální tvrdost TOO je stanovena na 350 HV. Tato tvrdost odpovídá 50 % martenzitu ve struktuře při obsahu uhlíku 0,25 hm.%. Omezit martenzit ve struktuře lze např. předehřevem. Jedním ze způsobů zjištění, jestli je požadován předehřev, je výpočet uhlíkového ekvivalentu. Existuje mnoho vztahů pro jeho výpočet. Jedna z používaných rovnic pro výpočet uhlíkového ekvivalentu C_e je [1]:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot s, \quad (3.1)$$

kde: s - tloušťka materiálu [mm]

Rovnice 3.1 je vhodná pro oceli obsahující maximálně 0,22 hm. % C, 1,6 hm. % Mn, 1,0 hm. % Cr, 3,0 hm. % Ni, 0,14 hm. % V a 0,30 hm. % Cu. Pro $C_e \leq 0,50$ není nutný předehřev. V opačném případě je nutné stanovit hodnotu předehřevu. Předehřev je také nutné použít pokud $C > 0,25$ hm. % nebo $s > 25$ mm. [1; 48]

Existuje mnoho vztahů pro výpočet teploty předehřevu. Jedním z nich je výpočet dle Séferiána, který se používá pro uhlíkové a nízkolegované oceli, často pro žárupevné konstrukční oceli s obsahem $C > 0,10$ hm. %. Výpočet předehřevu T_p dle Séferiána je [1]:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25}, \quad (3.2)$$

kde: C_p - dáno vztahem:

$$C_p = C_c + C_s, \quad (3.3)$$

kde: C_c - dáno vztahem:

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360}, \quad (3.4)$$

C_s - dáno vztahem:

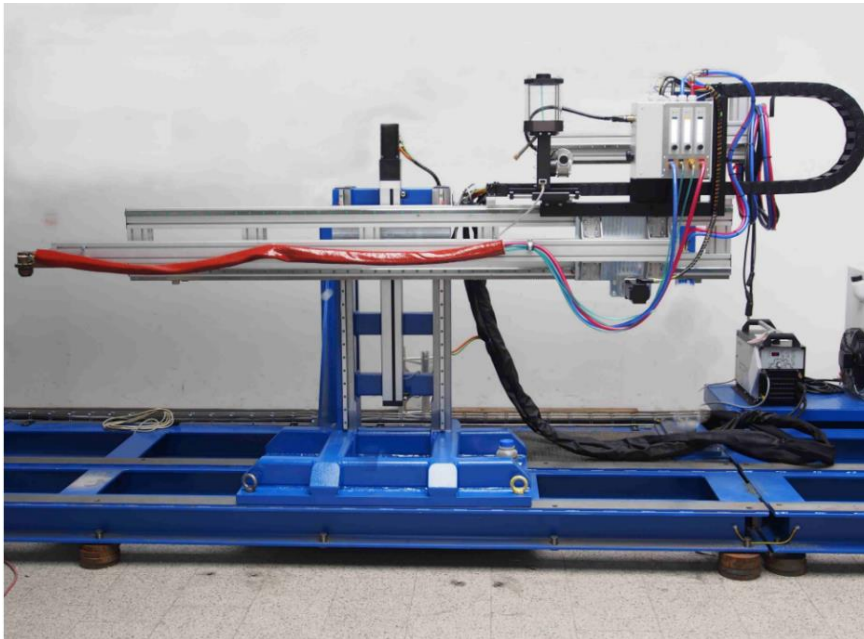
$$C_s = 0,005 \cdot s \cdot C_c, \quad (3.5)$$

Teplota interpass je maximální teplota svarového kovu před navařením další vrstvy návaru. Při překročení této teploty dochází ke zhoršení mechanických vlastností. U austenitických ocelí překročení teploty interpass vede ke zhoršení korozní odolnosti. U uhlíkových feritických ocelí je teplota interpass většinou stejná jako teplota předehřevu. [59]

Při navařování konstrukčních ocelí korozivzdorným přídavným materiálem mohou vznikat podnávarové trhliny. TOO původních vrstev návaru je tepelně ovlivněna novou (vedlejší) vrstvou. Toto tepelné ovlivnění způsobí vznik trhlin v hrubozrnné struktuře TOO původní vrstvy. Vzniku podnávarových trhlin lze předcházet vysokofrekvenčním indukčním žíháním první vrstvy návaru. Žíhat lze také v peci nebo elektrickým odporem. Další možností je navařovat dvouvrstvý návar s dostatečným vyžíháním první vrstvy druhou vrstvou. [1]

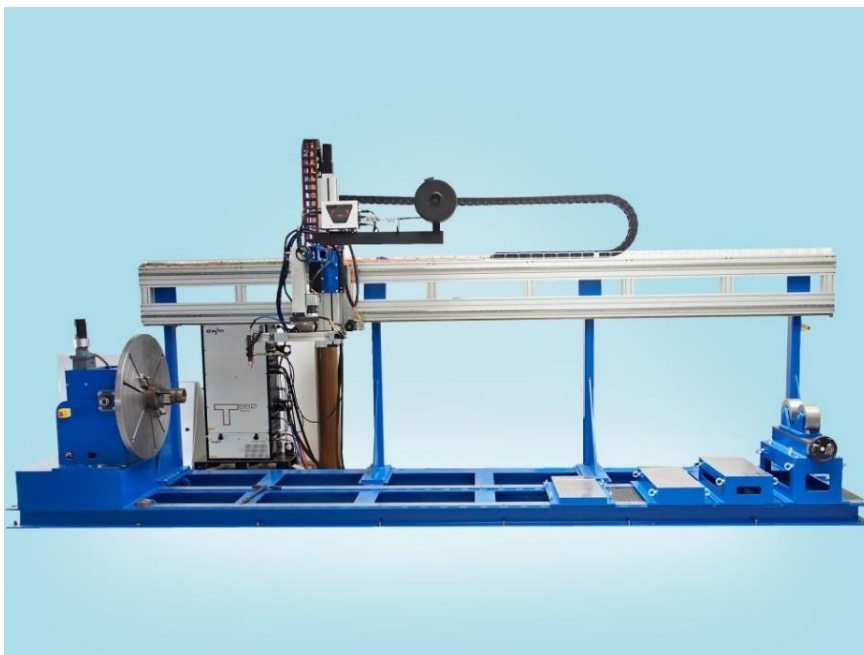
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Zkušební návary se navařovaly pomocí plazmového navařovacího modulu PPC 250 SA 600 pro navařování metodou 152 od firmy KSK, s. r. o., (obr. 37). Přednostně je navržen pro automatické navařování vnějších a vnitřních ploch rotačních dílů. Délka ramene mu umožňuje navařovat díly o délce až 2000 mm. Jako ochranný, plazmový i dopravní plyn používá Ar o minimální čistotě 99,96 %. Chlazení hořáku je zajištěno průtokem demineralizované vody. [60]



Obr. 37 Plazmový navařovací modul PPC 250 SA 600 [60].

Modul je namontován na svařovacím automatu SA 600 taktéž od firmy KSK, s. r. o., (obr. 38). Svařovací automat disponuje sklopným a kladkovým polohovadlem. V řešeném případě se pro upnutí a rotační pohyb navařovaných trubek používalo pouze sklopné polohovadlo. [61]



Obr. 38 Svařovací automat SA 600 [61].

Použitý zdroj proudu byl Tetrax 300 Comfort od společnosti EWM. Zdroj je určený pro svařování stejnosměrným proudem metodou 141. Lze s ním také svařovat metodou 111. Parametry zdroje jsou uvedeny v tab. 10. [62]

Tab. 10 Parametry zdroje Tetrax 300 Comfort [62].

Parametr	Hodnota
Rozsah svařovacího proudu	5–300 A
Rozsah svařovacího napětí pro metodu 141	10,2–22,0 V
Rozsah svařovacího napětí pro metodu 111	20,2–32,0 V
Svařovací proud při 25 °C	300 A (DZ = 80 %) 270 A (DZ = 100 %)
Svařovací proud při 40 °C	300 A (DZ = 60 %) 250 A (DZ = 100 %)
Dovolené zatížení	10 min
Napětí naprázdno	98 V
Síťové napětí (tolerance)	3 x 400 A (-25–20 %)
Síťová frekvence	50–60 Hz
Síťové jištění	3 x 16 A
Maximální příkon pro metodu 141	8,3 kVA
Maximální příkon pro metodu 111	12,0 kVA
Doporučený výkon generátoru	16,4 kVA
Účinnost	0,99
Okolní teplota	–25–40 °C
Chlazení	větrák (vzduch)
Rozměry (délka x šířka x výška)	590 x 230 x 380 mm
Hmotnost	29 kg

Trubky se navařovaly hořákem PHP 250 V (obr. 39). Hořák je určen pro navařování vnitřních válcových ploch od průměru 170 mm. Je možné s ním navařovat všechny typy slitin. Parametry hořáku jsou uvedeny v tab. 11. [60]



Obr. 39 Plazmový hořák PHP 250 V.

Tab. 11 Parametry hořáku PHP 250 V [60].

Parametr	Hodnota
Svařovací proud	200 A při DZ = 100 % 250 A při DZ = 60 %
Plazmový plyn	Ar (min. čistota 99,96 %)
Spotřeba plazmového plynu	2–5 l·min ⁻¹
Ochranný plyn	Ar (min. čistota 99,96 %)
Spotřeba ochranného plynu	8–15 l·min ⁻¹
Dopravní plyn	Ar (min. čistota 99,96 %)
Spotřeba dopravního plynu	2–5 l·min ⁻¹
Chlazení	průtokem demineralizované vody
Anoda	výměnná (chlazená vodou)
Materiál katody	wolfram thoriovaný
Rozměry katody	Ø 4 mm, délka 95 mm
Přídavný materiál	prášek (zrnitost 50–200 µm)

4.1 Volba a optimalizace parametrů navařování

Celkově se navařovalo pět jednovrstvých návarů, u kterých se měnila velikost proudu, velikost hmotnostního průtoku prášku, velikost obvodové rychlosti, překrytí housenek a stoupání, viz tab. 12. Napětí se měnilo automaticky. Housenky byly navařovány bez rozkyvu a byly za sebe skládány bez šroubovice. U každého návaru bylo navařeno nejméně šest housenek. Vzdálenost hlavy hořáku od základního materiálu byla 10 mm. Navařovaná trubka byla obrobena na vnitřní průměr 306,4 mm, takže tloušťka navařované stěny byla 8,7 mm. Průtok plazmového plynu byl 180 l·h⁻¹, ochranného 800 l·h⁻¹ a dopravního 130 l·h⁻¹.

Tab. 12 Parametry navařování pro jednotlivé návary.

Návar	Parametr					
	Proud	Napětí	Průtok prášku	Obvodová rychlost	Překrytí	Stoupání
	A	V	g·min ⁻¹	mm·s ⁻¹	mm	mm
1	170	22,1	14	2,6	3,4	4,5
2	170	22,6	19	2,6	3,5	4,4
3	180	23,2	21	2,4	3,5	5,0
4	200	24,6	25	2,4	3,5	5,7
5	200	25,0	30	2,4	3,4	5,4

Prvotní parametry byly zvoleny dle zkušeností prodejce plazmového automatu (firma KSK, s. r. o.). Navařily se s nimi návary 1 a 2. Ve firmě se na návarech provedly vizuální a kapilární zkoušky dle normy ASME BPVC, Section IX. Trubky se dále podélně rozřízly na pásové pile chlazené vodou. Na řezech byly také provedeny vizuální a kapilární zkoušky. Všechny NDT byly vyhovující. Proto byly dále navařeny návary 3–5. Cílem bylo nalézt maximální možné množství hmotnostního průtoku prášku.

Tabulka QW/QB-422 v normě ASME BPVC, Section IX, řadí kovové a nekovové materiály do skupiny dle tzv. P-no. Zadaný materiál trubky SA-106 Grade C patří dle této tabulky při použití ke svařování do skupiny P-no. 1. Jak bylo dříve zmíněno, nejlepší parametry navařování budou doporučeny ke kvalifikaci PQR pro navaření Venturiho trubice. Venturiho trubice je dle výkresové dokumentace kvalifikována výrobní normou ASME B31.3. Dle tab. 13 z této normy je pro skupinu materiálů P-no. 1 o tloušťce stěny $s \leq 25$ mm minimální teplota předehřevu 10 °C. Tloušťka stěny trubky pro zkušební návary splňuje tuto podmínku. Návary se tedy navařovali bez předehřevu. [63; 64]

Přesto je zde pro doplnění uveden výpočet uhlíkového ekvivalentu C_e dle vztahu 3.1 a výpočet teploty předehřevu T_p dle vztahu 3.2. Uhlíkový ekvivalent C_e je:

$$\begin{aligned} C_e &= C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot s = \\ &= 0,19 + \frac{1,02}{6} + \frac{0,05}{5} + \frac{0,03}{15} + \frac{0,010}{4} + \frac{0,05}{13} + \frac{0,013}{2} + 0,0024 \cdot 8,7 = 0,41 \end{aligned}$$

Vypočítaný uhlíkový ekvivalent splňuje podmínku $C_e \leq 0,50$. Jsou také splněny i ostatní podmínky z kapitoly 3.2, které jsou $C \leq 0,25$ hm. % a $s \leq 25$ mm. Díky tomu by nebylo nutné základní materiál předehřívát. Pokud by se materiál předehřívát, teplota předehřevu T_p by byla:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} = 350 \cdot \sqrt{0,325 - 0,25} = 95,9 \text{ } ^\circ\text{C} \approx 96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_p = C_c + C_s = 0,311 + 0,014 = 0,325$$

$$\begin{aligned} C_c &= \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} = \\ &= \frac{360 \cdot 0,19 + 40 \cdot (1,02 + 0,05) + 20 \cdot 0,03 + 28 \cdot 0,010}{360} = 0,311 \end{aligned}$$

$$C_s = 0,005 \cdot s \cdot C_c = 0,005 \cdot 8,7 \cdot 0,311 = 0,014$$

Tab. 13 Teploty předehřevu pro materiály skupiny P-no. 1 dle normy ASME B31.3 [63].

P-no. základního materiálu	Označení základního materiálu	Tloušťka stěny silnějšího materiálu mm	Další omezení	Minimální teplota předehřevu $^\circ\text{C}$
1	Uhlíková ocel	≤ 25	-	10
		> 25	hm. % C $\leq 0,30$	10
		> 25	hm. % C $> 0,30$	95

Další z parametrů sledovaný při navařování byl tepelný příkon. Hodnoty tepelného příkonu pro navařování 1–5 jsou uvedeny v tab. 14. Je zřejmé, že s rostoucím hmotnostním průtokem prášku narůstá také potřebný tepelný příkon. Výpočet tepelného příkonu Q_1 pro navař číslo 1 je [64]:

$$Q_1 = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot 60}{v_1} = \frac{22,1 \cdot 170 \cdot 60}{156} = 1445 \text{ J} \approx 1,45 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (4.1)$$

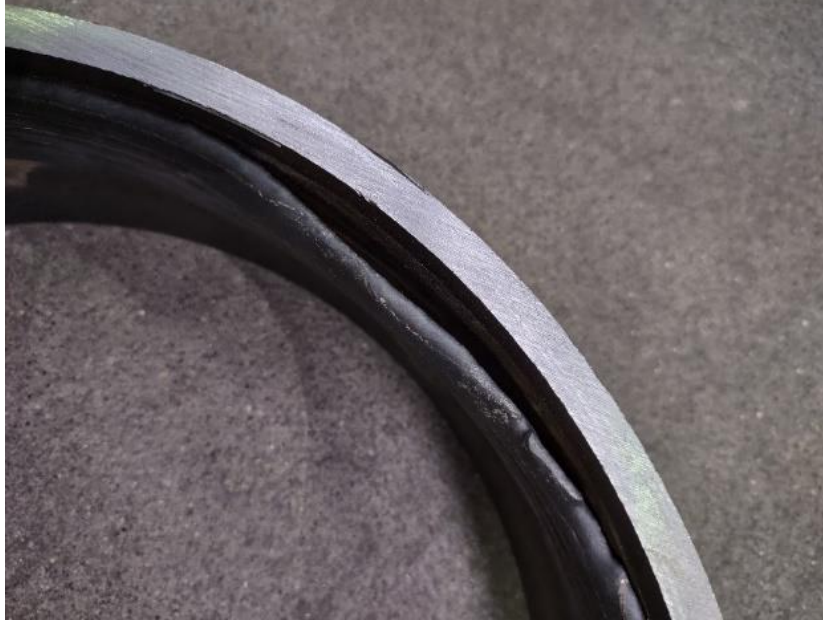
kde: U - svařovací napětí [V]
 I - svařovací proud [A]
 v - svařovací rychlost [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]

Tab. 14 Tepelný příkon při navařování.

Návař	Tepelný příkon Q $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$
1	1,45
2	1,48
3	1,74
4	2,05
5	2,08

4.2 Vyhodnocení návarů

Návar 5 nevytvořil v některých místech dostatečné metalurgické spojení se základním materiálem (obr. 40). To je způsobeno příliš velkým hmotnostním průtokem prášku pro daný proud a obvodovou rychlost. Návary 1–4 vytvořily dostatečné metalurgické spojení se základním materiálem. Jsou podrobeny další kontrole.



Obr. 40 Odloupenutí návaru číslo 5 od základního materiálu.

Na trubkách s návary 3 a 4 byly ve firmě provedeny vizuální a kapilární zkoušky dle normy ASME BPVC, Section IX. Trubky byly poté podélně rozřezány na pásové pile chlazené vodou. Na řezech byly také provedeny vizuální a kapilární zkoušky. Nařezané části trubek s návary 1–4 byly převezeny na Fakultu strojního inženýrství. Nejprve se na návarech provedla vizuální zkouška. Dále se na povrchu návarů (obr. 41) i na jejich řezech (obr. 42) provedla kapilární zkouška. Odmaštění ploch a smytí penetrantu se provedlo sprejem CRC Crick 110. Plochy se penetrovaly červeným vodou smytlým penetrantem Diffu-therm a k vyvolání indikací se použila vývojka Diffutherm na bázi rozpouštědla. Poté se návary očistily a z částí navařených trubek se vyřízly vzorky 1–4 na metalografické pile Struers Labotom-5. Vyříznuté vzorky 1–4 jsou zobrazeny na obr. 43. Vzorky byly dále ručně vybroušeny na metalografické brusce s vodním chlazením. Broušení proběhlo na brusných papírech se zrnitostmi P 80, P 180, P 400, P 600, P 800 a P 1200. Vybroušené vzorky se naleptaly pomocí 5% roztoku Nitalu. Z naleptaných vzorků byly fotoaparát s makro objektivem pořízeny snímky. Vzorky byly také pozorovány a nafoceny pod mikroskopem s kalibrovaným měřítkem.

Na fotkách pořízených fotoaparát s makro objektivem se měřila velikost zředění, velikost TOO a výška převýšení. Nejprve se nafotily snímky vzorků bez etalonu (obr. 44 a). Poté byly se stejnou ostroty nafoceny vzorky s etalonem (obr. 44 b). Etalon slouží k přepočtu rozměrů na fotce na skutečné rozměry. Rozměry byly přepočteny na skutečné pomocí programu AutoCAD. Pro vzorek 3 byla odchylka rozměrů Δu_3 mezi snímkem bez etalonu a s etalonem:

$$\Delta u_3 = \left(1 - \frac{46,36}{48,07}\right) \cdot 100 = 3,56 \%$$

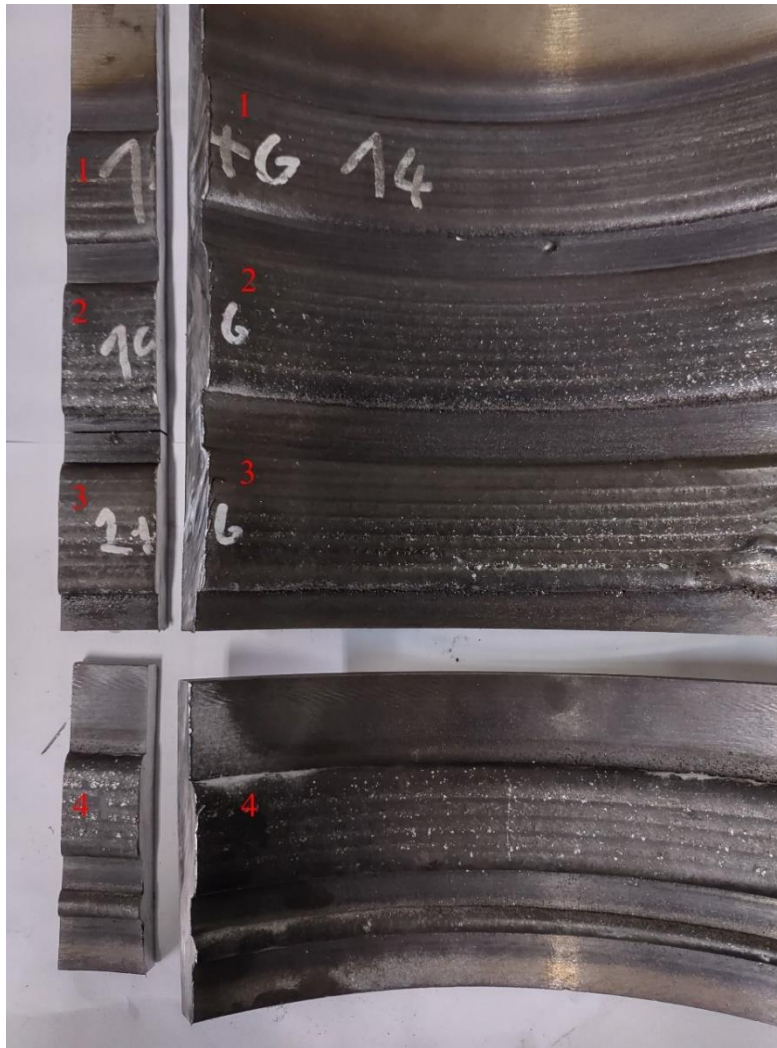


Obr. 41 Kapilární zkouška návaru 4.

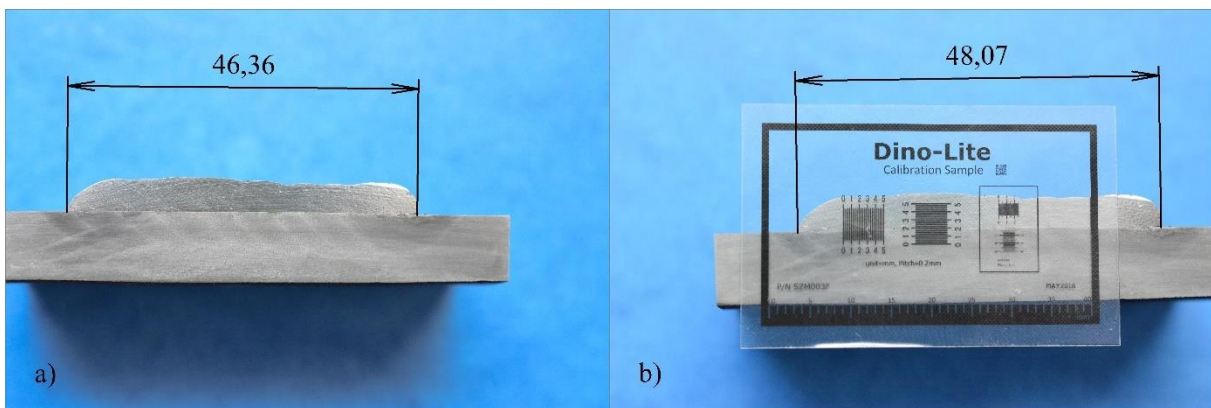


Obr. 42 Kapilární zkouška na řezu trubky s návarem 4.

U ostatních vzorků byly hodnoty odchylky Δu také kolem 3,5 %. Pro účely porovnání velikosti zředění a velikosti TOO mezi vzorky a zjištění výšky převýšení je odchylka rozměrů přibližně 3,5 % přijatelná.



Obr. 43 Návary 1–4 s odříznutými vzorky 1–4.



Obr. 44 Vzorek 3 a) bez etalonu, b) s etanolem.

Dále jsou již uvedeny snímky jednotlivých návarů se zakótovanými rozměry a vyznačenými oblastmi, které jsou důležité pro výpočet zředění. Zředění návarů je počítáno dle vztahu 2.1. Pro ukázkou je zde uveden výpočet zředění Z_1 návaru 1:

$$Z_1 = \frac{S_{z1}}{S_{n1} + S_{z1}} \cdot 100 = \frac{127,4}{127,4 + 9,3} = 6,8 \%$$

4.2.1 Návar 1

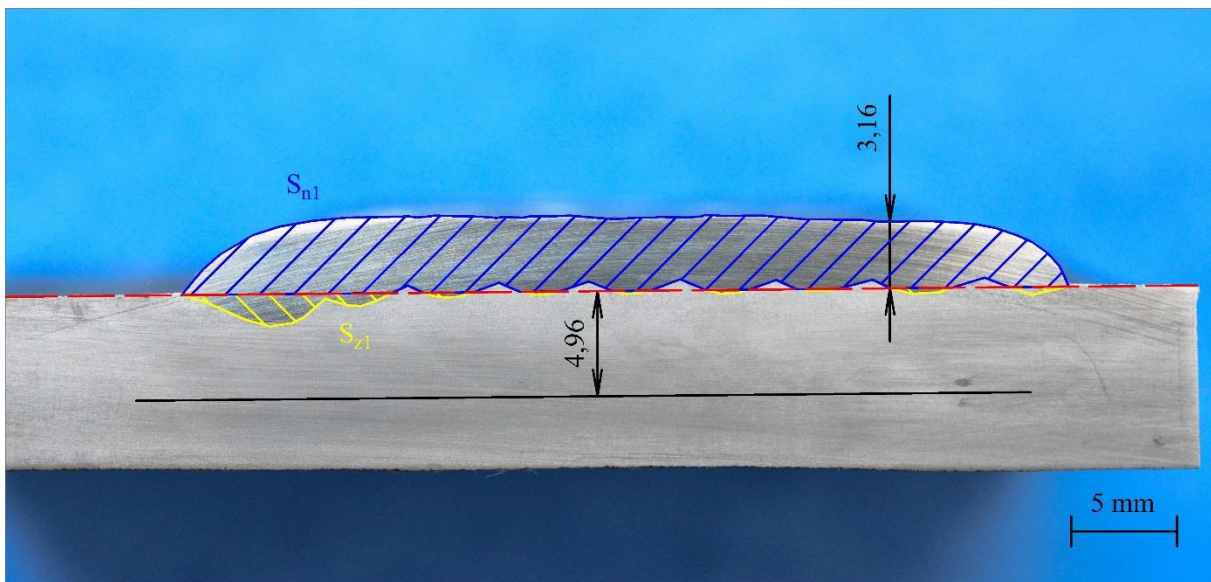
Návar 1 nevykazoval při vizuálních ani kapilárních zkouškách žádné vady. Makro snímek návaru 1 je na obr. 45. Zředění je kolem 7 %, převýšení je přibližně 3,2 mm a šířka TOO je kolem 5 mm (obr. 46). Přesné rozměry jsou uvedeny v tab. 15.

Tab. 15 Parametry návaru 1.

S_{n1} mm ²	S_{z1} mm ²	Z_1 %	Převýšení mm	Šířka TOO mm
127,4	9,3	6,8	3,16	4,96



Obr. 45 Návar 1.



Obr. 46 Návar 1 s rozměry a vyznačenými oblastmi pro výpočet zředění.

4.2.2 Návar 2

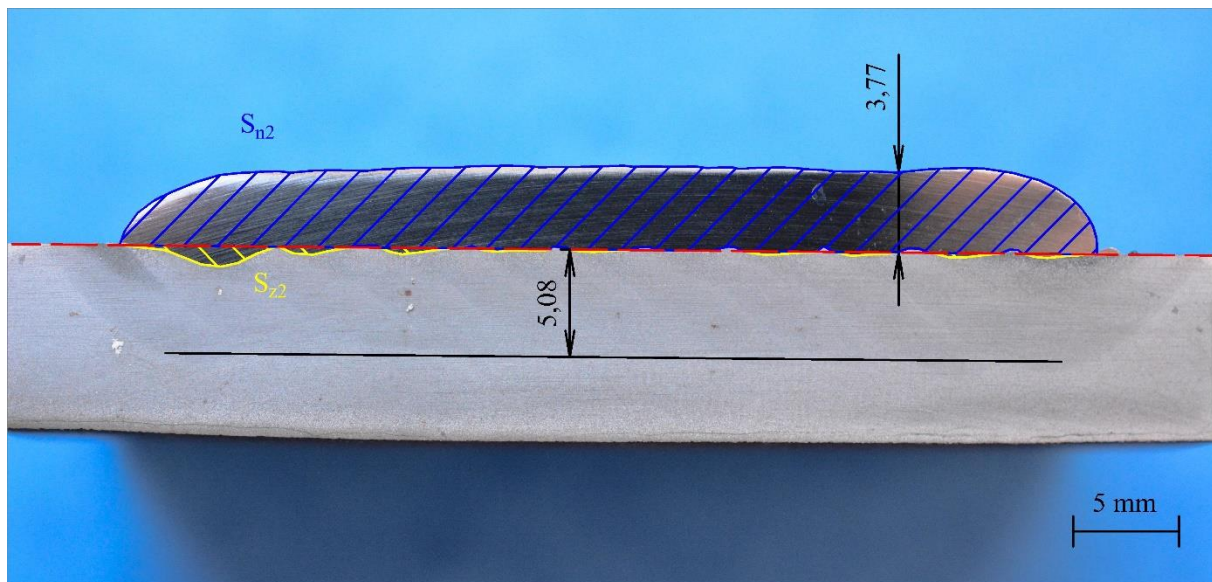
Návar 2 nevykazoval při vizuálních ani kapilárních zkouškách žádné vady. Makro snímek návaru 2 je na obr. 47. Zředění je kolem 4 %, převýšení je přibližně 3,8 mm a šířka TOO je 5,1 mm (obr. 48). Přesné rozměry jsou uvedeny v tab. 16.

Tab. 16 Parametry návaru 2.

S_{n2} mm ²	S_{z2} mm ²	Z_2 %	Převýšení mm	Šířka TOO mm
164,7	6,4	3,7	3,77	5,08



Obr. 47 Návar 2.



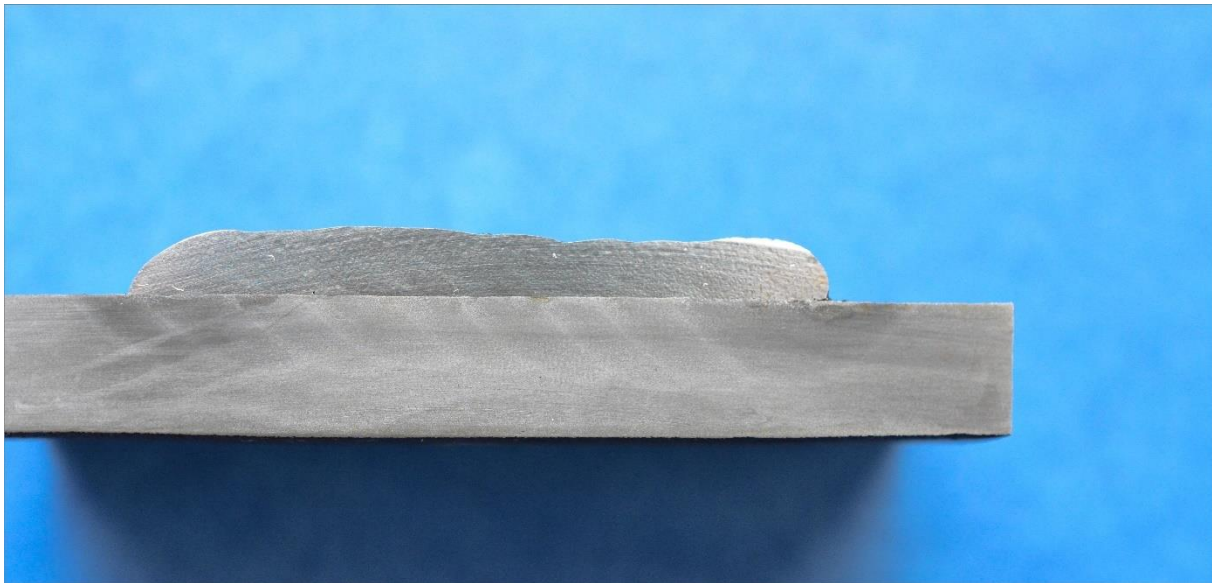
Obr. 48 Návar 2 s rozměry a vyznačenými oblastmi pro výpočet zředění.

4.2.3 Návar 3

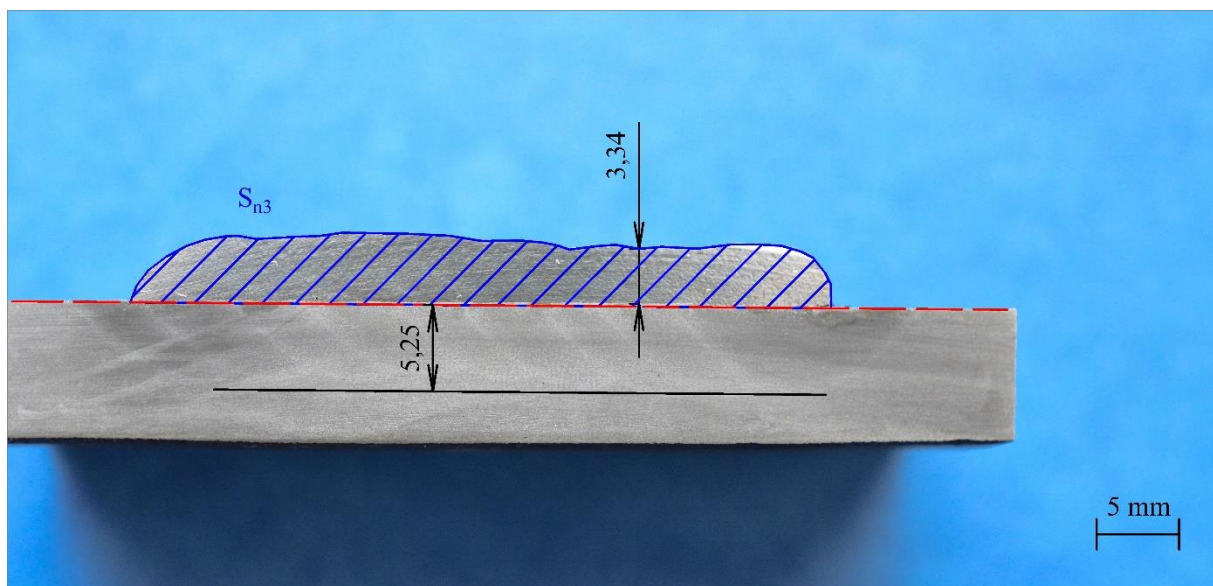
Návar 3 nevykazoval při vizuální ani kapilární zkoušce povrchu žádné vady. Na řezu návaru indikovala vizuální i kapilární zkouška vady. Podle kapilární zkoušky se jednalo o okrouhlé indikace. Makro snímek návaru 3 je na obr. 49. Návar 3 nemá prakticky žádné zředění se základním materiálem, převýšení je přibližně 3,5 mm a šířka TOO je kolem 5,3 mm (obr. 50). Přesné rozměry jsou uvedeny v tab. 17. Dle normy ČSN EN ISO 6520-1 se v návaru vyskytují vady 4011 (studený spoj na svarové ploše) a 4012 (studený spoj mezi housenkami). Vady jsou zobrazeny na obr. 51 a obr. 52. [46]

Tab. 17 Parametry návaru 3.

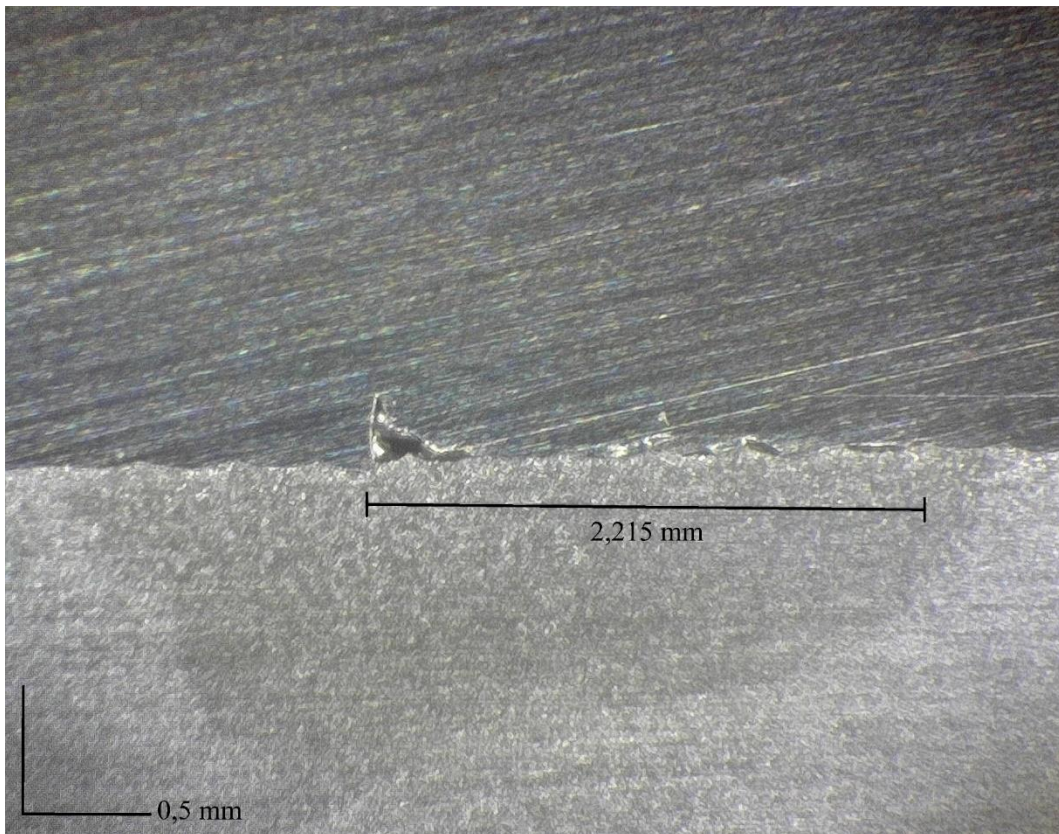
S_{n3} mm ²	S_{z3} mm ²	Z_3 %	Převýšení mm	Šířka TOO mm
158,7	nelze určit	nelze určit	3,34	5,25



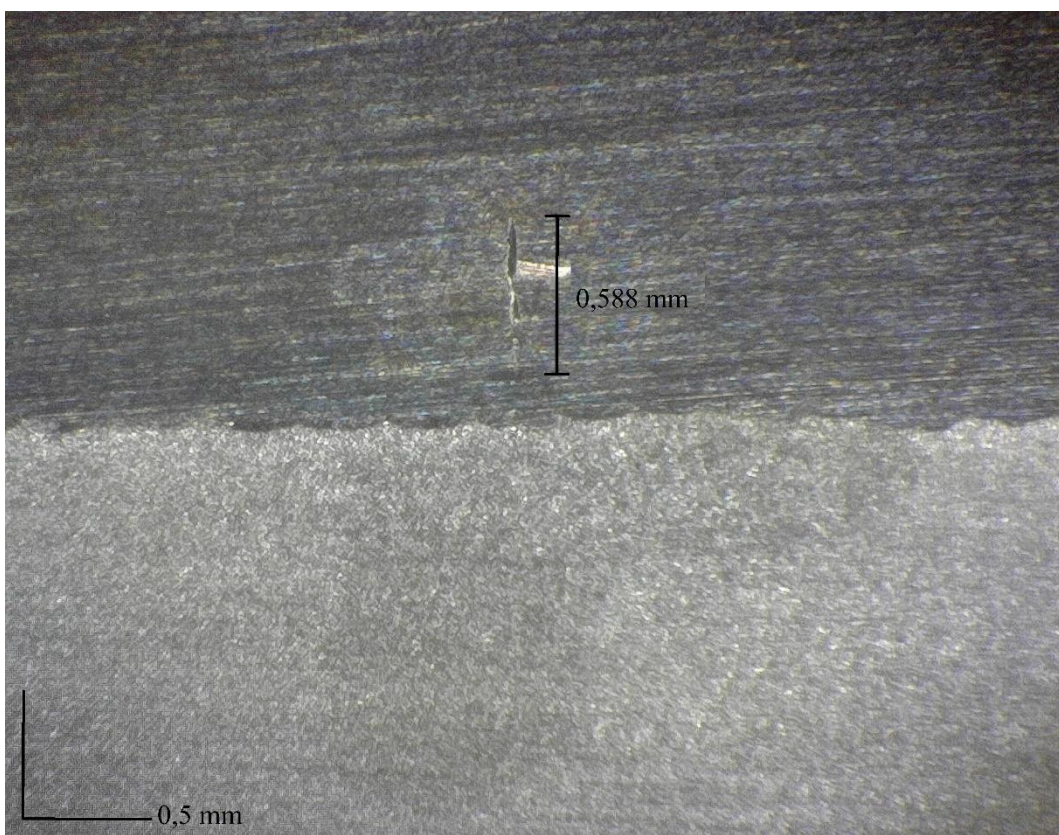
Obr. 49 Návar 3.



Obr. 50 Návar 3 s rozměry a vyznačenými oblastmi pro výpočet zředění.



Obr. 51 Studený spoj na svarové ploše u návaru 3.



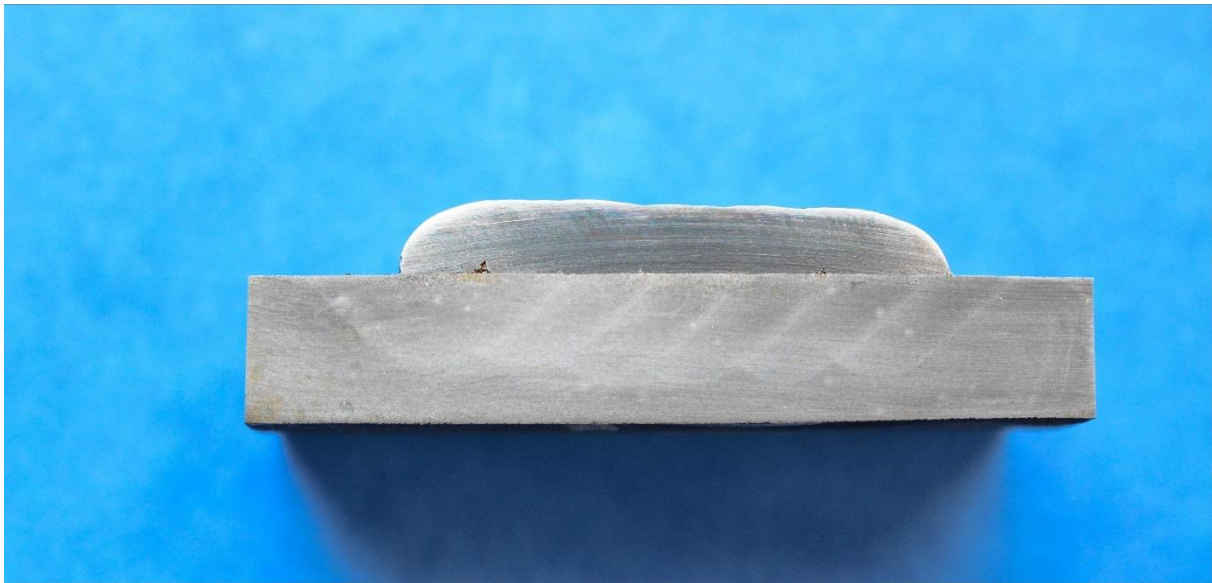
Obr. 52 Studený spoj mezi housenkami u návaru 3.

4.2.4 Návar 4

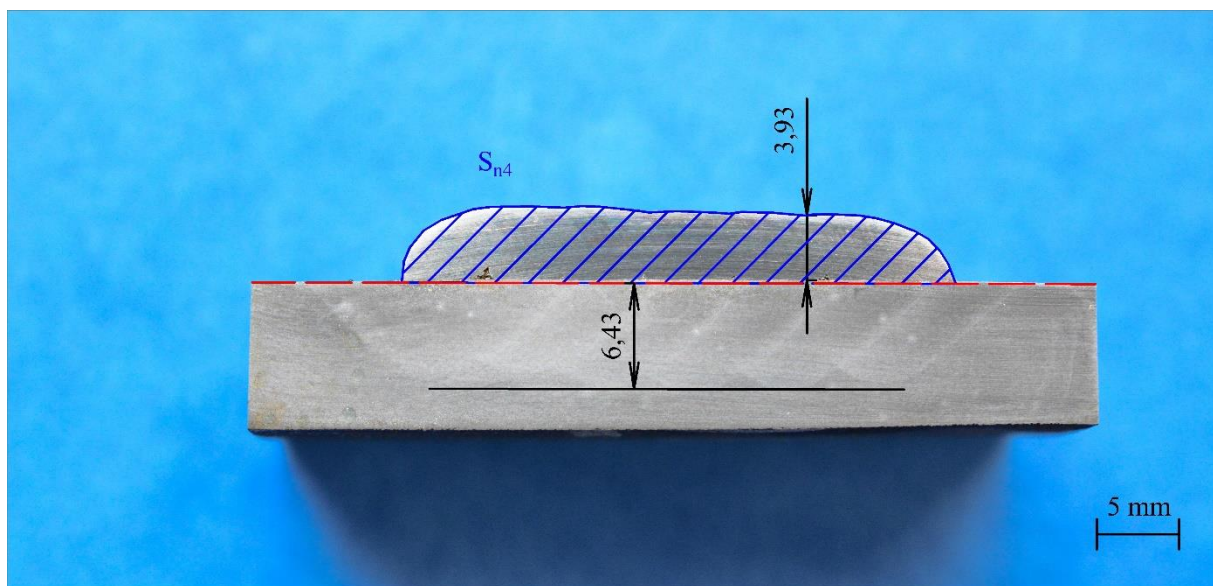
Návar 4 nevykazoval při vizuální ani kapilární zkoušce povrchu žádné vady. Na řezu návaru indikovala vizuální i kapilární zkouška vady. Podle kapilární zkoušky se jednalo o okrouhlé indikace. Makro snímek návaru 4 je na obr. 53. Návar 4 nemá stejně jako návar 3 prakticky žádné zředění se základním materiálem, převýšení je přibližně 4 mm a šířka TOO kolem 6,5 mm (obr. 54). Přesné rozměry jsou uvedeny v tab. 18. Dle normy ČSN EN ISO 6520-1 se v návaru vyskytuje vada 4011 (studený spoj na svarové ploše). Vada je zobrazena na obr. 55 a obr. 56. [46]

Tab. 18 Parametry návaru 4.

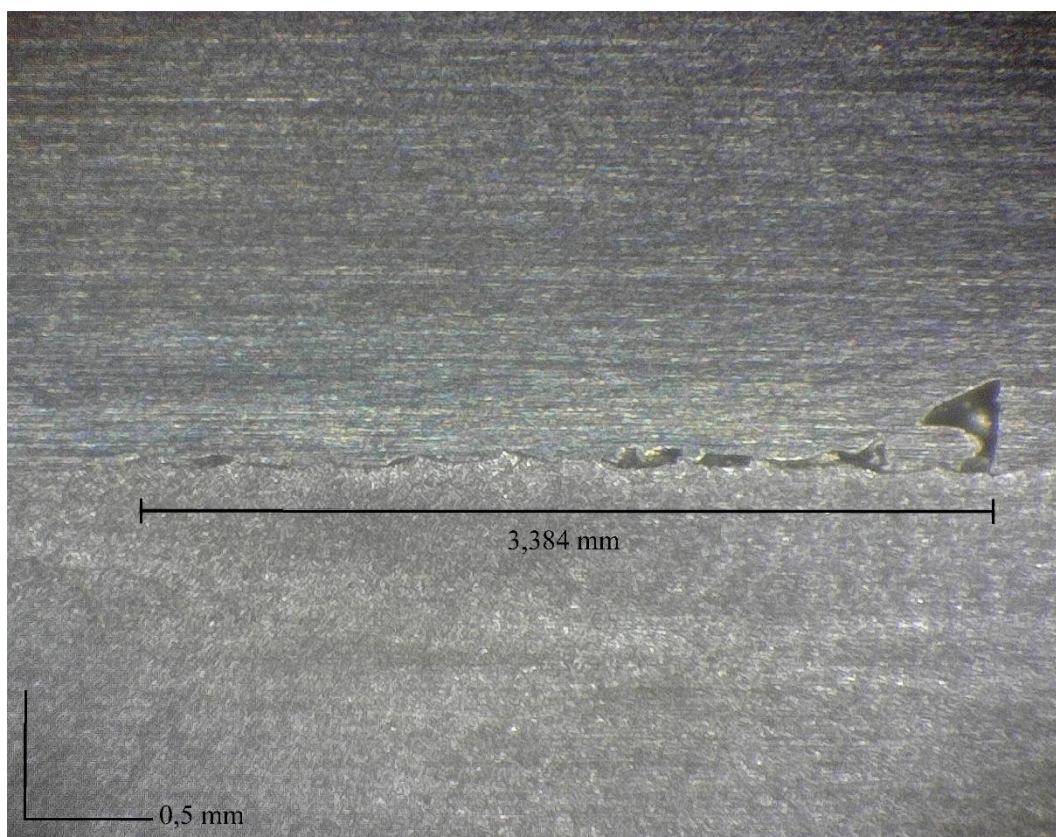
S_{n4} mm ²	S_{z4} mm ²	Z_4 %	Převýšení mm	Šířka TOO mm
136,2	nelze určit	nelze určit	3,93	6,43



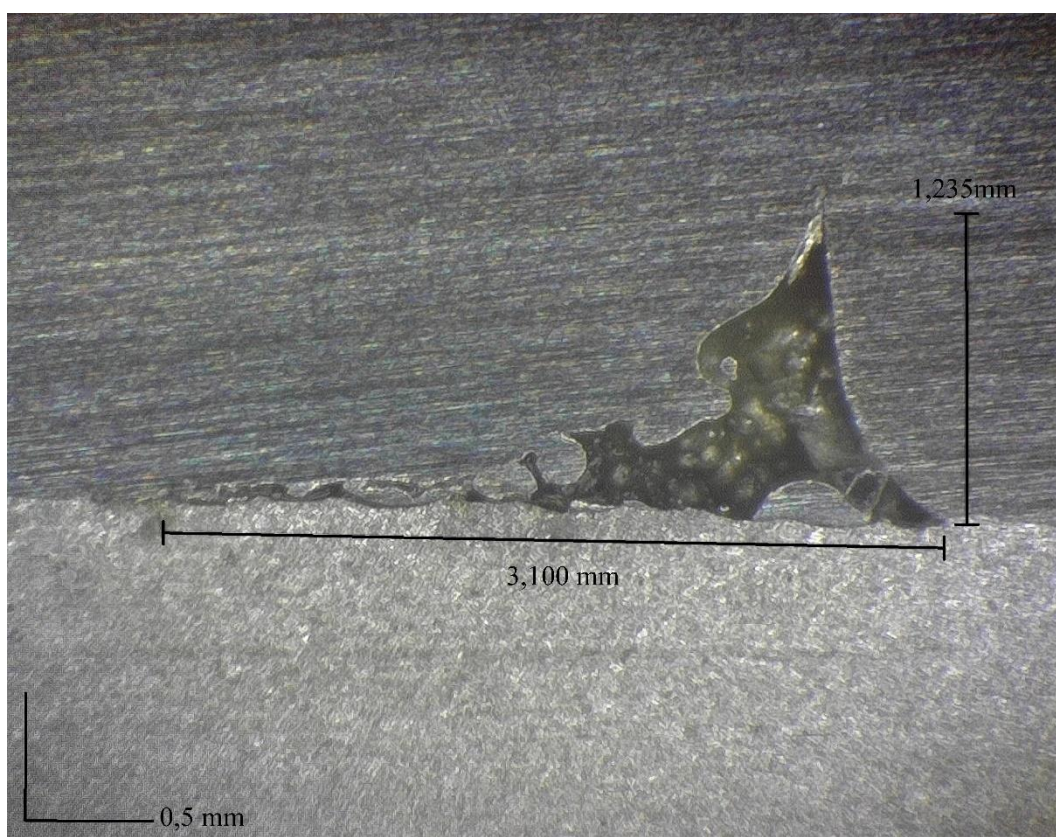
Obr. 53 Návar 4.



Obr. 54 Návar 4 s rozměry a vyznačenými oblastmi pro výpočet zředění.



Obr. 55 Studený spoj na svarové ploše u návaru 4.



Obr. 56 Studený spoj na svarové ploše u návaru 4.

4.3 Porovnání výsledků se spolupracující firmou

Firma již v minulosti úspěšně kvalifikovala PQR se stejným přídavným a základním materiálem, jako řeší diplomová práce. Jedná se o PQR P1-CRO-05, která je uvedena v příloze 4. Průtok prášku byl $26 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ a velikost stoupání 4,7 mm. Porovnání všech parametrů mezi návary 1–5 a návarem v PQR P1-CRO-05 je uvedeno v tab. 19. Výsledky zjištěné v diplomové práci odpovídají domněnce firmy, že při velikosti stoupání nad 5 mm se u návarů objevují studené spoje.

Tab. 19 Porovnání parametrů zkušebních návarů a kvalifikovaného návaru.

Návar	Proud A	Napětí V	Parametr			
			Průtok prášku $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$	Obvodová rychlost $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	Překrytí mm	Stoupání mm
1	170	22,1	14	2,6	3,4	4,5
2	170	22,6	19	2,6	3,5	4,4
3	180	23,2	21	2,4	3,5	5,0
4	200	24,6	25	2,4	3,5	5,7
5	200	25,0	30	2,4	3,4	5,4
PQR	189-199	23,2-25	26	2,6	3,7	4,7

Trubka použitá k navařování kvalifikačního návarů měla vnější průměr 273 mm a tloušťku stěny 25,4 mm. Vnitřní průměr byl obroben na 223 mm, takže tloušťka navařované stěny byla 25 mm. Chemické složení trubky je uvedeno v tab. 20. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 21. Certifikát trubky je v příloze 5.

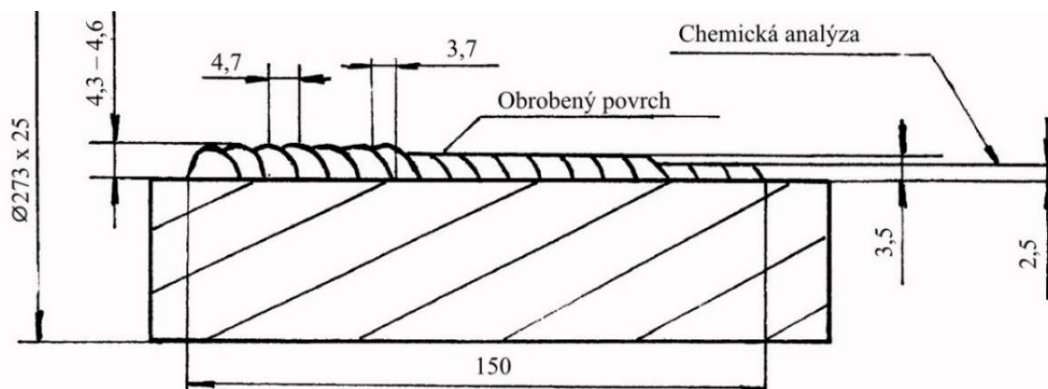
Tab. 20 Chemické složení trubky z oceli ASME SA-106 Grade C použité pro kvalifikaci návaru v PQR P1-CRO-05.

Množství prvku												
C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Nb	N
hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %
0,178	0,232	0,94	0,013	0,0022	0,019	0,029	0,074	0,048	0,019	0,004	0,001	0,0046

Tab. 21 Mechanické vlastnosti trubky z oceli ASME SA-106 Grade C použité pro kvalifikaci návaru v PQR P1-CRO-05.

Mechanické vlastnosti		
Mez kluzu $R_{p0,2}$	Mez pevnosti R_m	Tažnost $A_{2'}$
MPa	MPa	%
280	488	37,5

Kvalifikovaný návar měl šířku 150 mm. Velikost převýšení byla 4,3–4,6 mm, stoupání 4,7 mm a velikost překrytí sousedních návarů 3,7 mm, viz obr. 57.



Obr. 57 Kvalifikovaný návar.

PQR P1-CRO-05 byla kvalifikována pro minimální tloušťka návaru 2,5 mm. Podle požadavku zákazníka nesmělo v této tloušťce chemické složení přesáhnout 10 hm. % Fe. Požadavek byl splněn, viz tab. 22.

Tab. 22 Chemické složení návaru kvalifikovaného v PQR P1-CRO-05 v různých tloušťkách.

Tloušťka návaru mm	Množství prvku									
	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Cu	Fe	Mo	Nb
hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %
2,5	0,022	0,56	0,32	0,002	21,2	63,1	0,035	3,41	8,28	3,01
3,5	0,021	0,56	0,32	0,00	21,3	63,0	0,033	3,41	8,28	3,00

4.4 Shrnutí

Nejprve byly navařeny návary 1 a 2 s parametry doporučenými dodavatelem plazmového automatu. Návar 1 měl zředění 6,8 % a návar 2 měl zředění 3,7 %. Oba návary neobsahovaly vady. Spolupracující firma chtěla nalézt parametry pro navařování, které umožní maximalizovat hmotnostní průtok prášku. Proto byly navařeny návary 3–5, u kterých se navýšila hodnota proudu a hmotnostního průtoku prášku. U návarů se také měnily hodnoty překrytí a stoupání jednotlivých housenek. Obvodová rychlost trubky se neměnila. Návary 3 a 4 neměli prakticky žádné zředění se základním materiálem a obsahovaly vady. Návar 5 se v některých místech odloupl od základního materiálu.

ZÁVĚR

Celkově bylo navařeno pět zkušebních návarů. Nejprve byly navařeny návary 1 a 2 s parametry doporučenými dle zkušeností firmy, která je dodavatelem plazmového automatu. Na návarech byly ve firmě provedeny vizuální a kapilární zkoušky. Návary byly bez vad, a proto byly dále navařeny návary 3–5. Spolupracující firma chtěla nalézt parametry pro navařování, které umožní maximalizovat hmotnostní průtok prášku. Návary 3–5 byly tedy navařeny s vyšším hmotnostním průtokem prášku než návary 1 a 2. Došlo také ke změně dalších parametrů. Návar 5 se odloupl od základního materiálu. Vizuální a penetrační zkoušky na návarech 3 a 4 neobjevily vady. Při provedení těchto zkoušek na řezu však byly vady indikovány. Z návarů 1–4 byly dále vyhotoveny výbrusy, u nichž byla hodnocena jejich makrostruktura. Návary 3 a 4 obsahovaly studené spoje na svarové ploše a mezi housenkami.

Pro kvalifikaci PQR by mohly být doporučeny parametry, kterými byly navařeny návary 1 a 2. Návar 1 byl navařován s hmotnostním průtokem prášku $14 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ a návar 2 byl navařován s hmotnostním průtokem prášku $19 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$. Návar 1 měl zředění 6,8 %, velikost převýšení návaru kolem 3,2 mm a šířku TOO 5 mm. Návar 2 měl zředění 3,7 %, velikost převýšení návaru kolem 3,8 mm a šířku TOO 5,1 mm. Požadavek firmy splňuje návar 2. Návar 2 by také mohl splnit požadavek zákazníka. Zákazník požadoval, aby v tloušťce návaru 2,5 mm byl maximální obsah Fe 10 hm. %. Návar 2 je tedy doporučen pro kvalifikaci postupu PQR. Před kvalifikací by se mělo ověřit chemické složení návaru v tloušťce 2,5 mm, aby kvalifikace PQR proběhla úspěšně.

Firma již v minulosti úspěšně kvalifikovala návar s hmotnostním průtokem prášku $26 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$. Dodavatel stroje dokonce uvádí, že by bylo teoreticky možné dosáhnout hmotnostního průtoku $35\text{--}40 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$. V minulosti kvalifikovaný průtok prášku je vyšší než u návaru 2. Nepodařilo se tedy splnit požadavek firmy a nalézt parametry, které umožní navýšit dosavadní maximální výkon navařování.

Domněnka firmy byla, že při hodnotě stoupání $\geq 5,0 \text{ mm}$ se v návarech vyskytují studené spoje. Návary 3–5 mají hodnotu stoupání $\geq 5,0 \text{ mm}$ a ve všech byly studené spoje. Výsledky zkušebních návarů tedy odpovídají domněnce firmy, ale její platnost by však bylo nutné ověřit navařováním dalších návarů s různými parametry. Cílem by bylo ověřit vliv stoupání na vlastnosti návaru a také určit vliv ostatních parametrů.

Návar 3 má hmotnostní průtok $21 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$, obvodovou rychlost $2,4 \text{ mm s}^{-1}$, překrytí housenek 3,5 mm a stoupání 5,0 mm. V minulosti kvalifikovaný návar má hmotnostní průtok $26 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$, obvodovou rychlost $2,6 \text{ mm s}^{-1}$, překrytí housenek 3,7 mm a stoupání 4,7 mm. Je také navařován s vyšší hodnotou proudu, což je dáno vyšším hmotnostním průtokem prášku. Návary mají kromě hmotnostního průtoku prášku podobné parametry navařování. Návar 3 je navařován s nižší rychlostí pohybu hořáku, na trubku s menší tloušťkou stěny a s nižším hmotnostním průtokem prášku. Přesto se v něm vyskytují studené spoje. Z tohoto důvodu je doporučeno, aby byl v minulosti kvalifikovaný návar kvalifikován znovu.

Použitý plazmový navařovací automat je vyroben pro navařování vnějších a vnitřních ploch rotačních dílů. Prášky pro navařování mají sice obecně vysoké pořizovací náklady, ale při vhodně zvolených parametrech mají navařené vrstvy vysokou kvalitu a nízké zředění. To potvrzuje i splnění požadavků zákazníka na chemické složení návaru v tloušťce 2,5 mm. V minulosti kvalifikovaným návar obsahoval v této tloušťce 3,41 hm. % Fe. Parametry v kvalifikaci PQR P1-CRO-05 byly již použity pro navaření pěti různých Venturiho trubic. Nejmenší navařovaný vnitřní průměr byl 125 mm a největší navařovaný vnitřní průměr byl 510 mm. Největší navařovaná délka byla 1100 mm. Metoda 152 je tedy vhodná pro navařování zadané Venturiho trubice.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [65]

1. FOLDYNA, Václav. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2. upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-85-3.
2. Pipe cladding methods: choosing a weld overlay process. In: *Arc machines* [online]. Panorama City, c2022, 21 April 2020 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://resources.arcmachines.com/pipe-cladding-methods-choosing-a-weld-overlay-process-ami/>
3. AVERY, Richard E. *Guidelines for the welded fabrication of nickel alloys for corrosion-resistant service* [online]. Second edition. Nickel institute, 2018 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: https://nickelinstitute.org/media/3708/11012_guidelines-for-the-welded-fabrication-of-nickel-alloys-for-corrosion-resistant-service_revised.pdf
4. Properties of nickel. In: *Nickel institute* [online]. Toronto, c2022 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/properties-of-nickel/>
5. High pressure pipe fabrication services. In: *STI Group* [online]. Bridge city, c2018, 30 January 2018 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://setxind.com/fabrication/high-pressure-pipe-fabrication-services/>
6. Pressure vessels. *Agarwal tanks* [online]. Vadodara ,c2019 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.agarwaltanks.com/pressure-vessels.php>
7. Venturimeter working principle. In: *Chemical engineering world* [online]. 22 May 2020 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://chemicalengineeringworld.com/venturimeter-working-principle/>
8. Venturi tube. *Seiko flowcontrol* [online]. Stockerau, c2014 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.seiko-flowcontrol.com/venturi-tube.html>
9. Klasická Venturiho trubice. In: *Mattech* [online]. Ostrava, c2022 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://mattech.cz/produkty/klasicka-venturiho-trubice-152/>
10. RANJAN, Rajeev a Anil KUMAR DAS. Protection from corrosion and wear by different weld cladding techniques: A review. *Materials today: proceedings* [online]. Elsevier, 2022, **57**, 1687–1693 [cit. 2022-02-24]. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.12.329
11. SAHA, Manas a Santanu DAS. A review on different cladding techniques employed to resist corrosion. *Journal of the association of engineers, India* [online]. 2016, **86**(1–2), 51–63 [cit. 2022-02-17]. ISSN 0368-1106. Dostupné z: doi:10.22485/jaei/2016/v86/i1-2/119847
12. ČSN EN ISO 4063. *Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
13. *Opravy a údržba* [online]. 6. aktualizované vydání. Vamberk: ESAB, 2011 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <http://products.esab.com/ESABImages/prirucka%206%20vydani%202011.pdf>
14. KUBÍČEK, Jaroslav. *Renovace* [online prezentace]. Brno: VUT-FSI, 2018 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu_renovace_a_povrchove_upravy_renovace_2018_kubicek.pdf

15. ČSN EN ISO 15614-7. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování – Část 7: Navařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
16. *ASM handbook. Volume 6, Welding, brazing, and soldering*. 6th print. Materials Park: ASM International, 2003, xvi, 1299 s. : il, čb. fot. ISBN 0-87170-382-3.
17. ALVARÃES, Camila P., Carlos F. J. JORGE, Luís F. G. de SOUZA, Leonardo S. ARAÚJO, Matheus C. MENDES a Humberto N. FARNEZE. Microstructure and corrosion properties of single layer Inconel 625 weld cladding obtained by the electroslag welding process. *Journal of materials research and technology* [online]. Elsevier B.V, 2020, **9**(6), 16146–16158 [cit. 2022-02-17]. ISSN 2238-7854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2020.11.048
18. VOLPI, Adriano a Gianluca SERRA. Weld overlay of highly corrosion resistant nickel chromium molybdenum alloys, UNS N06059, on low alloy equipment operating at high temperature. In: *ASME 2018 symposium on elevated temperature application of materials for fossil, nuclear, and petrochemical industries* [online]. American society of mechanical engineers, 2018 [cit. 2022-02-21]. ISBN 978-0-7918-4076-4. Dostupné z: doi:10.1115/ETAM2018-6715
19. GONZAGA, Rodrigo S., Francisco W. C. FARIAS a João da C. PAYÃO FILHO. Microstructural characterization of the transition zone between a C–Mn steel pipe and a 70%Ni30%Cu alloy cladding welded by HW-GTAW. *The International journal of pressure vessels and piping* [online]. Elsevier Ltd, 2021, **192** [cit. 2022-02-20]. ISSN 0308-0161. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpvp.2021.104433
20. VERMA, Anup K. a Santanu DAS. A brief overview on cladding techniques with a reference to weld cladding using gas metal arc welding. *Reason: a technical magazine* [online]. 2011, **10**, 45–48 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: doi:10.21843/reas/2011/45-48/108212
21. The Inconel cladding process: what you need to know. In: *Arc machines* [online]. Panorama City, c2022, 30 june 2020 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://resources.arcmachines.com/the-inconel-cladding-process-what-you-need-to-know-ami/>
22. SILWAL, Bishal, James WALKER a Daniel WEST. Hot-wire GTAW cladding: inconel 625 on 347 stainless steel. *International journal of advanced manufacturing technology* [online]. London: Springer, 2019, **102**(9–12), 3839–3848 [cit. 2022-02-20]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-019-03448-0
23. AMBROŽ, Oldřich, Bohuslav KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
24. HLAVATÝ, Ivo. *Teorie a technologie svařování* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011, 262 s. [cit. 2022-03-04]. ISBN 978-80-248-2414-7. Dostupné z: <http://staryweb.ivohlavaty.cz/2009Svarovani/indexs.htm>
25. ALLFORD, Dan a Dave HEBBLE. Could GTAW hot-wire go mainstream?. *The Fabricator* [online]. 2019, **49**(5), 68–71 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/arcwelding/could-gtaw-hot-wire-go-mainstream>
26. BOULOS, Maher I., Pierre L. FAUCHAIS a Joachim V. R. HEBERLEIN. *Thermal spray fundamentals* [online]. Second edition. Cham: Springer, 2021, [cit. 2022-03-06]. ISBN 978-3-030-70672-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-70672-2

-
27. VERGARA DÍAZ, Victor M., Jair C. DUTRA a Ana S. C. D'OLIVEIRA. Hardfacing by plasma transferred arc process. SUDNIK, Wladislav, ed. *Arc welding* [online]. London: Intechopen, 2011 [cit. 2022-03-21]. ISBN 978-953-51-6083-0. Dostupné z: doi:10.5772/28802
 28. NADZAM, Jeff, ed. *Gas metal arc welding: product and procedure selection* [online]. Cleveland: Lincoln electric, 2014 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWire-s-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf
 29. Metal-cored arc welding overview. In: *Weldinginfo* [online]. c2022 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.weldinginfo.org/welding-processes/metal-cored-arc-welding-overview/>
 30. *Strip cladding: technical handbook* [online]. ESAB, 2014 [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: <https://assets.esab.com/assetbank-esab/action/viewAsset?id=12687&index=34&total=1000&view=viewSearchItem>
 31. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie 2 část svařování: díl 1 – základní metody tavného svařování* [online]. Brno, 2006 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_svarovani_tavne_kubicek.pdf
 32. *The new dimension in strip cladding* [online]. Lincoln electric [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: https://www.lincolnelectric.com/assets/EU/EN/STRIP_CLADDING_ENG.pdf
 33. NIRAJ, Thakare a Ram YADAV. Electro Slag Strip Cladding Process. *International journal of modern engineering research* [online]. 2014, 4(7), 60–64 [cit. 2022-02-22]. ISSN 2249-6645. Dostupné z: https://www.ijmer.com/papers/Vol4_Issue7/Version-4/IJMER-47046064.pdf
 34. *Automated TIG weld overlay cladding* [online]. Updated edition. Nantes: Polysoude, 2016 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: https://static1.squarespace.com/static/54becf2ae4b09fae314e6e56/t/5b734a5a0ebbe8fc09c9f120/1534282339389/DOC_Clad ding_Handbook_EN.pdf
 35. OLIVARES, Erick A. G. a Victor M. VERGARA DÍAZ. Study of the hot-wire TIG process with AISI-316L filler material, analysing the effect of magnetic arc blow on the dilution of the weld bead. *Welding international* [online]. Taylor & Francis, 2018, 32(2), 139–148 [cit. 2022-03-19]. ISSN 0950-7116. Dostupné z: doi:10.1080/09507116.2017.1347327
 36. LUCAS, W. *TIG and plasma welding* [online]. Cambridge (UK): Woodhead publishing, 1990 [cit. 2022-03-19]. ISBN 978-1-85573-005-2. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9781855730052/tig-and-plasma-welding>
 37. PP-6-01. In: *Plasma-master* [online]. Kyjev, c2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: http://testsite.pwi-scientists.com/eng/products/surfacing_plasmatrons/PP-6-01
 38. PP-12-01. In: *Plasma-master* [online]. Kyjev, c2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: http://testsite.pwi-scientists.com/eng/products/surfacing_plasmatrons/PP-12-01
 39. VERGARA DÍAZ, Victor M. *Inovação do equipamento e avaliação do processo plasma de arco transferido alimentado com pó (PTAP) para soldagem fora de posição* [online]. Florianópolis, 2005 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <http://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102282>. Disertační práce. Universidade federal de Santa Catarina, Centro tecnológico.
-

-
40. NEIKOV, Oleg D., Stanislav S. NABOYCHENKO a Goron DOWSON, ed. *Handbook of non-ferrous metal powders* [online]. Oxford: Elsevier, 2009 [cit. 2022-03-21]. Materials Science 2009. ISBN 978-1-85617-422-0. Dostupné z: doi:10.1016/B978-1-85617-422-0.X0001-8
 41. KOPELIOVICH, Dmitri. Powder preparation. In: *SubsTech* [online]. 2012 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=powder_preparation
 42. MIM materials. *Metal Injection Molding Association* [online]. Princeton, c2022 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://mimaweb.org/DesignCenter/MaterialsRange.aspx>
 43. KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
 44. BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2000. Svařování. ISBN 80-85771-72-1.
 45. BARTÁK, Jiří. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. In: *Česká svářečská společnost ANB* [online]. Praha, 1. 3. 2012 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: [http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384#:~:text=Podle%20polohy%20vad%20ve%20svaru,p%C3%B3ry%2C%20vm%C4%9Bstky%2C%20sta%C5%BEeniny\).&text=Vady%20typu%20trhlin%20se%20mohou,hork%C3%A9%20trhliny](http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384#:~:text=Podle%20polohy%20vad%20ve%20svaru,p%C3%B3ry%2C%20vm%C4%9Bstky%2C%20sta%C5%BEeniny).&text=Vady%20typu%20trhlin%20se%20mohou,hork%C3%A9%20trhliny)
 46. ČSN EN ISO 6520-1. *Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 1: Tavné svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
 47. How liquid penetrant inspection (PT) works. In: *Penflex* [online]. Gilbertsville [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.penflex.com/how-liquid-penetrant-inspection-pt-works/>
 48. JULIŠ, Martin. *Svařitelnost ocelí: HMT – strojírenské materiály a tepelné zpracování, přednáška č. 6* [online prezentace]. Brno, 2021 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: E-learningový systém Moodle VUT
 49. Weldability in welding. In: *The process piping* [online]. 2. 1. 2018 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.theprocesspiping.com/weldability-welding/>
 50. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
 51. *Enabling the transition to a greener world: annual report 2020* [online]. Norilsk: Norinickel, 2021 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: https://ar2020.nornickel.com/download/full-reports/ar_en_annual-report_spreads_nornickel_2020.pdf
 52. DUPONT, John N., John C. LIPPOLD a Samuel D. KISER. *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys* [online]. Hoboken: Wiley, 2009 [cit. 2022-03-29]. ISBN 978-1-118-21003-1. Dostupné z: https://sv.20file.org/up1/1068_0.pdf
 53. Skupiny základních materiálů dle ISO/TR 15608. *Svarinfo* [online]. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=skupiny15608#vrsek>.
 54. *Metal powder and continuous cast rods* [online]. Krefeld: Deutsche edelstahlwerke, 2011 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Broschueren/051_DEW_Metallpulver_GB.pdf
-

-
55. SHOEMAKER, Lewis E. Alloys 625 and 725: trends in properties and applications. In: LORIA, E. A, ed. *Superalloys 718, 625, 706 and derivatives* [online]. Warrendale: The Minerals, Metals & Materials , 2005, s. 409–418 [cit. 2022-04-18]. ISBN 978-0-87339-602-8. Dostupné z: https://www.tms.org/Superalloys/10.7449/2005/Superalloys_2005_409_418.pdf
 56. *Inconel alloy 625* [online]. Special metals, 2013 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf>
 57. Weldability of materials - nickel and nickel alloys. In: *TWI* [online]. Cambridge, c2022, 2015 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/weldability-of-materials-nickel-and-nickel-alloys-022>
 58. HÖFER, Manfred. *Svařování niklu a slitin na bázi niklu* [online prezentace]. Böhler Schweißtechnik Austria, 59 s. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.kskct.cz/images/katalog/dokumenty-ostatni/dokumentace/Ni%20slitiny%20BW%20%C4%8Desky.pdf>
 59. SIGMUND, Marian. *Teplotně-deformační cyklus, možnosti jeho ovlivňování, teplotní výpočty: přednáška č. 4* [online prezentace]. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie, 2020 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: E-lerningový systém Moodle VUT
 60. KRŠKA, Zdeněk, Stanislav ŠEVČÍK a Lenka ŠEVČÍKOVÁ. *Plazmový navařovací modul PPC 250 SA 600: pro navařování metodou PTA* [online]. Česká Třebová: KSK, 2019 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: Poskytnuto firmou SEIKO Flowcontrol, spol. s r.o.
 61. SA 600. In: *KSK: Česká Třebová* [online]. Česká Třebová, c2022 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.kskct.cz/cs/svarovani/svarovaci-automaty/sa-600>
 62. *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>
 63. ASME B31.3-2018. *Process piping: ASME code for pressure piping, B31*. New York: The American society of mechanical engineers, 2019. ISBN 978-0-7918-7226-0.
 64. ASME BPVC.IX-2019. *2019 ASME Boiler and pressure vessel code: An international code*. New York: The American society of mechanical engineers, 2019. ISBN 978-0-7918-7290-1.
 65. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz/>
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A ₂ "	tažnost	[%]
A ₅	tažnost	[%]
C _e	uhlíkový ekvivalent	[-]
D	vnitřní průměr vstupního válce	[mm]
d ₂₀	vnitřní průměr válcového hrdla	[mm]
HBW	tvrdost dle Brinella	[-]
I	svařovací proud	[A]
I _p	impulsní proud	[A]
I _z	základní proud	[A]
KV ₂	nárazová práce pro zkušební tyč s V-vrubem při použití břitu o poloměru 2 mm	[J]
l	délka návaru	[mm]
p	překrytí návarů	[mm]
Q	tepelný příkon	[J·mm ⁻¹]
R _{eH}	horní mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
s	tloušťka materiálu	[mm]
S _n	plocha navařeného kovu	[mm ²]
S _z	plocha závaru	[mm ²]
š	šířka návaru	[mm]
t _c	celkový čas cyklu	[s]
t _p	doba trvání impulsního proudu	[s]
T _p	teplota předehřevu	[°C]
t _z	doba trvání základního proudu	[s]
U	svařovací napětí	[V]
v	svařovací rychlost	[mm·min ⁻¹]
Z	zředění	[%]
Δu	odchylka rozměrů	[%]
η	dynamická viskozita	[Pa·s]
ν	kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]
ϑ	krajový úhel	[°]

Zkratky

Označení	Legenda
DZ	dovolené zatížení
FCC	kubická plošně středěná mřížka
hm. %	hmotnostní procenta
NDT	nedestruktivní zkoušení
PA	poloha vodorovná shora
PB	poloha vodorovná šikmo shora
P-no.	číslo skupiny základního materiálu pro určení teploty předehřevu
PQR	kvalifikace postupu
TOO	tepelně ovlivněná oblast

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Certifikát niklového prášku DEW-Nibasit 625-P/LFe
- Příloha 2 Certifikát trubky použité pro zkušební návary
- Příloha 3 Výkres sestavy Venturiho trubice
- Příloha 4 PQR P1-CRO-05
- Příloha 5 Certifikát trubky použité ke kvalifikaci PQR P1-CRO-05

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE



Sonderwerkstoffe

Oberschlesienstr. 16
 47807 Krefeld - Germany
 Telefon: (siehe Sachbearbeiter)
 Telefax: (02151) 3633 3877
 email: sales@ferro-titanit.com

Seite/page 1 von/of 1

Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG - 47803 Krefeld - Germany

KSK s.r.o.
 Podbranska
 CZ 560 02 Ceska Trebova

Zeugnis/Warenbegleitschein-Nr. - Inspection certificate/Delivery note no. 56630/1		Datum - Date 27.08.19
Abteilung VSO	Sachbearbeiter - Telephone Benedikt Siebel 02151/36332054	Kunden-Nr. - Customer's index 866478
Ihre Bestellung - Your order 752190033/2019-06-27		Auftrag-Nr. - Order No 4930771/1

Abnahmeprüfzeugnis nach EN 10204-3.1
 Inspection certificate EN 10204-3.1

Gegenstand Product	Prüfgegenstand/Test object Anforderungen/Requirements	Kennzeichnung/Verpackung Marking/package	Charge/Gewicht kg Heat no./weight kg
DEW-Nibasit 625-P/LFe 4697.68 63-200 µm 5 kg Plastikflaschen	Metallpulver DEW Standardprodukt	DEW-Ni-Basis-P Körnung/grain size -1000 µm	257873 500 kg

Chemische Analyse/Chemical analysis: (Masseprozent, percent by mass)

Charge Heat No.	C %	Mo %	Fe %	Mn %	Cr %	Si %	Nb %	O %	N %	Al %	Ti %	Ni %
257873	<0,03	8,1	0,7	0,3	20,7	0,6	3,3	0,06	0,07	<0,1	<0,1	Balance

Siebanalyse/Sieve analysis:

Charge Heat No.	<53 µm %	53-63 µm %	63-80 µm %	80-100 µm %	100-125 µm %	125-160 µm %	160-200 µm %	>200 µm %
257873	0,0	2,8	30,9	24,6	22,6	14,8	4,1	0,0

Sonstige Eigenschaften/Other characteristics:

Charge Heat No.	Fließverhalten (s/50g) Flow rate (s/50g)	Schüttdichte (g/cm³) Apparent density (g/cm³)
257873	16,4	4,50

Dieses Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist ohne persönliche Unterschrift gültig.
 This document has been computer generated and is valid without signing.

Der Abnahmebeauftragte/Authorized representative
 Sinan Turan

Es wird bestätigt, dass die Lieferung geprüft wurde und den Vereinbarungen bei der Bestellannahme entspricht.
 We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order contract.

Ende des Dokuments / End of document



TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY
MORAVIA STEEL

A03 Document No. - Číslo dokumentu:
A 2018/09/004570-JAN

Sheet - List : 1 / 5



1814979

A01, A05
Manufacturer: TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s. /Průmyslová 1000 /Staré Město /739 61 Třinec /Czech Republic
Production mill : VT - VALCOVNA TRUB / Výstavní 1132 / 706 02 Ostrava - Vítkovice / Czech Republic

A07 Purchaser's order No.: Číslo objednávky :	A08 Works order No./ Contract No.: Zakázka/ Kontrakt :	A06 Consignee: Příjemce:	
303160020	9700260615 0041504511 / 155	SEIKO Flowcontrol, spol. s r.o. 696 71 Blatnice pod Svatým Antonínkem 866 Česká republika	
A10 Advice-Note No. - Avízo :			
A02 Type of Inspection document -Druh dokumentu kontroly: Inspection certificate 3.1 - Inspekční certifikát 3.1, EN 10204:2004			
B01, B09-B11 Product, product dimensions, specification Výrobek, rozměry výrobku, specifikace	B08, B13 Quantity Množství	B02.1 Steel designation Označení oceli	B02.2 Product / Dimensional standard Materiálová/ Rozměrová norma
Seamless Steel Tubes Hot Rolled Trubky ocelové bezešvé válcované za tepla 323,80 x 9,53 mm	6 pcs/ks 40,210 mtrs/m 3038 kgs/kg	Gr.B Gr.B Gr.C Gr.C P265GH/TC2	ASTM A106/A106M 11/2015 ASME SA106/SA106M 07/2015 ASTM A106/A106M 11/2015 ASME SA106/SA106M 07/2015 EN 10216-2 12/2013 ----- ASME B36.10 08/2015
B04 Product delivery condition - stav výrobku při dodání: normalized-normalizovaný			
B03 Supplementary requirements - Doplnující požadavky :			
ASME SA106/SA106M SECTION II, Part A 2015 EDITION AD 2000-Merkblatt W4 PED 2014/68/EU Manufacturer declares that is certified according to Article 4.3, Annex I of Directive 2014/68/EU and according to AD 2000-Merkblatt W0 by the notified body TÜV NORD reg. No. 0045 for grades stated in Annex to certificates No. 07/202/9190/WZ/0812/16 and 07/203/9190/WP/0812/16. Certificates are valid until September 2019. Výrobce prohlašuje, že je certifikován podle bodu 4.3 Přílohy I Směrnice 2014/68/EU a podle AD 2000-Merkblatt W0 od jmenovaného místa TÜV NORD reg. č. 0045 pro jakosti uvedené v Příloze k certifikátům č. 07/202/9190/WZ/0812/16 a 07/203/9190/WP/0812/16. Certifikáty jsou platné do září 2019. Plain square cut ends Hladké kolmo uřezané konce			

Z02 Confirmed - potvrdil: Marla Uhrová, Ing.,
Head of Attestation, Releasing and External inspection VT, Independent authorized agent
Vedoucí Atestace, tvořování a přejímky VT, nezávislý oprávněný zástupce



TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s.
Průmyslová 1000, Staré Město
739 61 Třinec 139

Z02

Ostrava-Vítkovice :
12.09.2018

tel.: 00420/59/560/2160

Z03 Independent authorized agent
Nezávislý oprávněný zástupce



TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY
MORAVIA STEEL

A03 Document No. - Číslo dokumentu:
A 2018/09/004570-JAN

Sheet - List : 2 / 5

A01, A05
Manufacturer: TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s. /Průmyslová 1000 /Staré Město /739 61 Třinec /Czech Republic
Production mill : VT - VALCOVNA TRUB / Výtavní 1132 / 706 02 Ostrava - Vítkovice / Czech Republic

Requirements - Předpis :							
B07.1 Heat No. Číslo tavby	B07.2 Specimen No. Číslo zkoušky	C10* Specimen shape Tvar vzorku	C11 Yield Strength Mez kluzu R _{0,5} MPa	C12 Tensile Strength Pevnost v tahu R _m MPa	C13 Elongation Tažnost Z %	C14 Reduction of area Kontrakce Z %	
			min 275	485-570	min 30		
		C02 Specimen direction: Směr vzorku : L		C03 Test temperature(*C): Zkušební teplota(*C): +21		C15 Test method: Zkušební metoda: ASTM A370	
T17588	46951/P	P	354	513	40,5	-	
T17592	46952/P	P	354	510	36,6	-	
B07.1 Heat No. Číslo tavby	B07.2 Specimen No. Číslo zkoušky	C10* Specimen shape Tvar vzorku	C11 Yield Strength Mez kluzu R _{eH} MPa	C12 Tensile Strength Pevnost v tahu R _m MPa	C13 Elongation Tažnost A5 %	C14 Reduction of area Kontrakce Z %	
			min 275	485-570	min 23		
		C02 Specimen direction: Směr vzorku : L		C03 Test temperature(*C): Zkušební teplota(*C): +21		C15 Test method: Zkušební metoda: ENISO 6892-1 A2	
T17588	46951/P	P	372	511	29,9	-	
T17588	46953/P	P	364	506	34,0	-	
T17592	46952/P	P	367	510	33,1	-	
* P - Flat specimen - Ploché vzorek K - Round specimen - Kruhový vzorek							
B07.1 Heat No. Číslo tavby	B07.2 Specimen No. Číslo zkoušky	C40 Impact test Nárazová práce KV2 J		C44 Lateral expandit Boční šíření mm	C45 Shear fracture area Oblast houževnatého lomu %		
		C41 7,5x10 mm					
		C02 Specimen direction: Směr vzorku : T		C03 Test temperature(*C): Zkušební teplota(*C): 0		C46 Test method: Zkušební metoda: ISO 148-1	
		C42 Individual values Jednotlivé hodnoty	C43 Mean value Střední hodnota	C44.1 Individual values Jednotlivé hodnoty	C44.2 Mean value Střední hodnota	C45.1 Individual values Jednotlivé hodnoty	C45.2 Mean value Střední hodnota
T17588	46951/P	80 83 77	80				
T17588	46953/P	87 77 90	85				
T17592	46952/P	104 117 118	113				

Z02 Confirmed - potvrdit: Marta Uhrová, Ing.,
Head of Attestation, Releasing and External inspection VT, Independent authorized agent
Vedoucí Atestace, uvolňování a přejímky VT, nezávislý oprávněný zástupce



TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s.
Průmyslová 1000, Staré Město
739 61 Třinec 131

Z02

Ostrava-Vítkovice :
12.09.2018

tel.: 00420/59/560/2160

Z03 Independent authorized agent
Nezávislý oprávněný zástupce



TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY
MORAVIA STEEL

A83 Document No. - číslo dokumentu:
A 2018/09/004570-JAN

Sheet - List : 3 / 5

A01, A05

Manufacturer: TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s. /Průmyslová 1000 /Staré Město /739 61 Třinec /Czech Republic
Production mill: VT - VALCOVNA TRUB / Vystavní 1132 / 706 02 Ostrava - Vítkovice / Czech Republic

B07.1 Heat No. Číslo tavby	B07.2 Specimen No. Číslo zkoušky	C40 Impact test Nárazová práce KV2 J		C44 Lateral expandit Boční šíření mm		C45 Shear fracture area Oblast houževnatého lomu %											
		C41 7,5x10 mm															
		C02 Specimen direction: Směr vzorku : T		C03 Test temperature(°C): Zkušební teplota(°C): -46		C46 Test method: Zkušební metoda: ISO 148-1											
		C42 Individual values Jednotlivé hodnoty	C43 Mean value Střední hodnota	C44.1 Individual values Jednotlivé hodnoty	C44.2 Mean value Střední hodnota	C45.1 Individual values Jednotlivé hodnoty	C45.2 Mean value Střední hodnota										
T17588	46951/P	42 40 44	42														
T17592	46952/P	62 49 55	55														
B07.1 Heat No. Číslo tavby	B07.2 Specimen No. Číslo zkoušky	C30 Hardness Tvrdost HBW ISO 15156-2:2015, NACE MR0175-2015 max 237															
		C33 Test method: Zkušební metoda: ISO 6506-1															
		C31 Individual values Jednotlivé hodnoty	C32 Mean value Střední hodnota														
T17588	46951/P	152 150 152	151														
T17592	46952/P	150 148 148	149														
C70 Steelmaking process - Způsob výroby oceli: Basic oxygen furnace-Kyslíkový konvertor Not vacuum degassed-Nevakuováno																	
C71-C92 Heat chemical analysis In % - Tavební chemická analýza v % :																	
B07.1 Heat No. Číslo tavby	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Al	Nb	N			
T17588	0,19	1,04	0,24	0,011	0,007	0,03	0,02	0,04	0,007	0,003	0,001	0,025	0,001	0,0047			
T17592	0,19	1,02	0,23	0,013	0,005	0,05	0,03	0,05	0,010	0,003	0,001	0,024	0,001	0,0043			
C50, D01, D02-D50, D51 Other requirements - Další požadavky:																	
Visual and dimensional inspection Vizuální a rozměrová kontrola																- satisfactory - vyhověla	
Flattening test Zkouška smáčknutím						ASTM A 530 ENISO 8492										- satisfactory - vyhověla	

Z02 Confirmed - potvrdil: Marta Uhrová, Ing.,
Head of Attestation, Releasing and External inspection VT, Independent authorized agent
Vedoucí Atelace, uvolňování a přejímky VT, nezávislý oprávněný zástupce



TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s.
Průmyslová 1000 Staré Město
739 61 Třinec 131

Z02

Ostrava-Vítkovice :
12.09.2018

tel.: 00420/59/560/2160

Z03 Independent authorized agent
Nezávislý oprávněný zástupce



TRINECKÉ ŽELEZÁRNY
MORAVIA STEEL

A03 Document No. - číslo dokumentu:
 A 2018/09/004570-JAN

Sheet - List : 4/ 5

A01, A05

Manufacturer: TRINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s. /Průmyslová 1000 /Staré Město /739 61 Třinec /Czech Republic
 Production mill : VT - VALCOVNA TRUB / Vystavní 1132 / 706 02 Ostrava - Vítkovice / Czech Republic

Test on tightness by NDT Zkouška nepropustnosti nedestruktivní metodou	ASTM E570;ENISO 10893-1 (10,0 MPa)	- satisfactory - vyhověla
Ultrasonic testing Zkouška ultrazvukem	ENISO 10893-10 U2/C, L ASTM E213 5% L	- satisfactory - vyhověla
Test of identity Zkouška totožnosti	VN 015038	- satisfactory - vyhověla

B06 Marking of the product-Značení výrobku:

Hardstamping - Ražení:

-Manufacturer's logo/ASTM/ASME A/SA 106/106MIGr.B/CIEN 10216-2ITC2IP265GHIHeat number/Inspector's symbol/
 Tube number/INDEI/Length/12/STDI/Weight
 -Logo/ASTM/ASME A/SA 106/106MIGr.B/CIEN 10216-2ITC2IP265GHITAVBAI/ZN.ZKOUŠEJÍCÍ/HOI
 Č.trubky/INDEI/Délka/12/STDI/Hmotnost

B15 Supplementary information-Doplňující údaje:

Heat No. - Tavba: T17588

Tube No. - Číslo trubek: 46951A,46951B,46953A,46953B

Heat No. - Tavba: T17592

Tube No. - Číslo trubek: 46952A,46952B

The Mass Activity value of Ionizing Radiation in the Heat Analysis doesn't exceed 100 Bq/kg.

Hodnota hmotnostní aktivity ionizujícího záření v tavební analýze nepřesahuje 100 Bq/kg.

Width of gauge length of the tension test specimen at a room temperature - 38,1 mm /ASTM A370/.

Šířka měřené délky zkušebního vzorku pro tahovou zkoušku za pokojové teploty - 38,1 mm /ASTM A370/.

Steel fully killed

Plně uhlídněná ocel

Z02 Confirmed - potvrdil: Marfa Uřová, Ing.,
 Head of Attestation, Releasing and External inspection VT, Independent authorized agent
 Vedoucí Atestace, uvolňování a přejímky VT, nezávislý oprávněný zástupce



TRINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s.
 Průmyslová 1000, Staré Město
 739 61 Třinec 131

Z02

Ostrava-Vítkovice :
 12.09.2018

tel : 00420/59/5802160

Z03 Independent authorized agent
 Nezávislý oprávněný zástupce



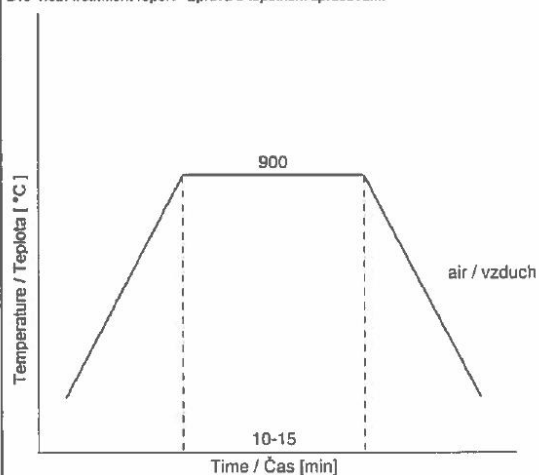
TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY
MORAVIA STEEL

A03 Document No. - číslo dokumentu:
A 2018/09/004570-JAN

Sheet - List : 5/ 5

A01, A05
Manufacturer: TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s. /Průmyslová 1000 /Staré Město /739 61 Třinec /Czech Republic
Production mill : VT - VALCOVNA TRUB / Vystavní 1132 / 706 02 Ostrava - Vítkovice / Czech Republic

B16 Heat treatment report - Zpráva o tepelném zpracování:



Z01
ALL PRODUCTS MEET REQUIREMENTS OF ABOVE MENTIONED STANDARDS AND REQUIREMENTS SPECIFIED IN ORDER. THE DECLARATION IS ISSUED UNDER THE SOLE RESPONSIBILITY OF THE SUPPLIER.
VŠECHNY VÝROBKY ODPOVÍDAJÍ VÝŠE UVEDENÝM NORMATM A POŽADAVKŮM V OBJEDNÁVCE.
PROHLÁŠENÍ JE VYDÁVÁNO VYLUČNĚ NA VLASTNÍ ODPOVĚDNOST DODAVATELE.

A04 Manufacturer's mark - Značka výrobce:



Z06
Electronical version of this document is protected by the electronical signature according to Regulation (EU) No. 910/2014.
Elektronická verze tohoto dokumentu je chráněna elektronickým podpisem v souladu s nařízením EU č. 910/2014

Z02 Confirmed - potvrdil: Marta Uhrová, Ing.,
Head of Attestation, Releasing and External inspection VT, Independent authorized agent
Vedoucí Atestace, uvolňování a přejímky VT, nezávislý oprávněný zástupce




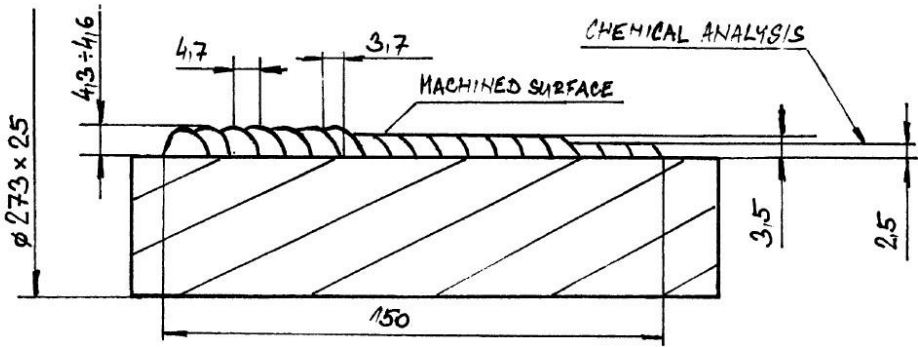
TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s.
Průmyslová 1000, Staré Město
739 61 Třinec 139


Z02

Ostrava-Vítkovice :
12.09.2018

tel. : 00420/59/580/2160

Z03 Independent authorized agent
Nezávislý oprávněný zástupce

		Procedure Qualification Record (PQR) Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Record Actual Variables Used to Weld Test Coupon Corrosion –Resistant Overlay (CRO): QW-214		PQR: P1-CRO-05 Page: 1 of 2 Date: 1. Nov. 2019	
General Information					
Date PQR was welded, No of Test:			09. Oct. 2019, 19EB027-9		
pWPS No.			19EB027-9		
Welding process(es):			PAW (152 / PTA)		
Types (Manual/Machine/Automatic/Semi Auto):			automatic		
QW-402 Joints					
Joint Design:		inside one layer corrosion resistant overlay		Qualified overlay thickness: t = 2.5 mm	
Weld preparation method:		machining and grinding		Overlay thickness (after machining): 3,5 mm	
Pass pitch:	4,7 mm	Pass overlap:	3,7 mm	Overlay thickness (as welded): 4,3 + 4,6 mm	
					
QW-403 Base Metals			QW-404 Filler Metals		
Material Spec.:	SA-106		Weld Metal Analysis A No.:	n. a. (non ferrous alloy)	
Type or Grade:	C		Filler metal product form:	powder	
P No.:	1		Participle size:	63 + 200 µm	
Group No.:	2		Powder type:	homogenous	
Thickness of coupon:	T = 25 mm		Powder brand name:	DEW NIBASIT 625-P/LFe (charge: 257873)	
Diameter of coupon:	D = 273 mm		Powder feed rate:	26 g/min	
Other:	charge: 214681		QW-406 Preheating		
QW-405 Position			Preheat Temp.: 65°C		
Position of Groove:	1G rot		Interpass Temp.: 279°C		
Weld Progression (Uphill, Downhill):	n. a.		QW-408 Gas		
QW-407 PWHT			Plasma arc gas: Argon 4.6 (99,996%), 180 l/h		
Heating Rate:	67°C/h to 590°C, 43°C/h to 610°C		Powder metal feed gas: Argon 4.6 (99,996%), 130 l/h		
Temperature Range:	(610,5 + 618,5)°C		Shielding gas: Argon 4.6 (99,996%), 800 l/h		
Holding Time:	39 min		Other: -		
Cooling Rate:	61°C/h to 499°C, 30+62°C/h to 279°C		QW-410 Technique		
QW-409 Electrical Characteristics			Cleaning/Gaughing: grinding, brushing		
Current :	DC		Oscillation: n. a.		
Polarity:	(-)		Travel Speed: 15,6 cm/min		
Amps.:	189 + 199 A		Multipass or Single pass (per side): single		
Voltage:	23,2 + 25,0 V		Single or Multiple Electrodes: single		
Heat input:	17,56 + 18,50 kJ/min		Transfre mode: transfereable		
Tungsten Electrode Size and Type	Ø 4,0 mm, 2% thoriated		Delivery method of filler material: through the torch		
Other:	-		Torch orifice diameter: 4 mm		
			Peening: not allowed		

	Procedure Qualification Record (PQR) Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Record Actual Variables Used to Weld Test Coupon Corrosion –Resistant Overlay (CRO): QW-214	PQR: P1-CRO-05 Page: 2 of 2 Date: 1. Nov. 2019
---	---	---

Guided Bend Tests (QW160)							
Figure No.: QW 462.5(c)							
Specification		Dimensions (W x Y), [mm]	Plunger diameter [mm]	Supports span [mm]	Bend angle [°]	Test Temperature	Result (QW 163)
SBB-1	Side Bend	28 x 10	40	63	180	22°C	without defects
SBB-2	Side Bend	28 x 10	40	63	180	22°C	without defects
SBB-3	Side Bend	28 x 10	40	63	180	22°C	without defects
SBB-4	Side Bend	28 x 10	40	63	180	22°C	without defects


Toughness Test (QW170)												
Specimen No.	Dimensions [mm]	Notch Location	Notch Type	Test Temperature	Impact Values [J]				Lateral Expansion [mm]			
					36	33	36	ø 35	-	-	-	-
1	10,0 x 10,0	Fusion line	Charpy V	-50°C	36	33	36	ø 35	-	-	-	-

Other Tests

VT-test : satisfactory, PT-test : satisfactory (QW-195), RT-test : satisfactory,
 Macrostructure section: satisfactory
 Ferrite content: (0,25 + 0,8)%, ø 0,43%
 Corrosion test:
 ASTM G48 method A: (22°C / 24 h) – mass loss 0,000 g/cm², no pitting
 ASTM A262 practise E – satisfactory
 Chemical analysis (QW-462.5a):


Weld deposit / [%]	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Cu	Fe	Mo	Nb
t = 2,5 mm	0,022	0,56	0,32	0,002	21,2	63,1	0,035	3,41	8,28	3,01
t = 3,5 mm	0,021	0,56	0,32	0,00	21,3	63,0	0,033	3,41	8,28	3,00

Hardness Test (HV10):



1 (BM)	2 (BM)	3 (BM)	4 (HAZ)	5 (HAZ)	6 (HAZ)	7 (overlay)	8 (overlay)	9 (overlay)
134	134	137	158	163	168	274	268	256

Miroslav MATOVIČ David HÁBL	-	S 40 S 42
Welder's Name	Clock No.	Stamp No.

1284A/2019, 1284C/2019	- 1. 11. 2019	 11-239 Ing. Michal STÁNEC
Laboratory Test No.	Date	Signature

We certify that the statements in this record are correct and that the test welds were prepared, welded and tested in accordance with the requirements of Section IX of the ASME Code.

(A03)

04/ 828/0000000/00/01/00/1 (A02) ERTEILER: SIEHE UNTEN

ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1-B NACH EN 10204: 1991 + A1.1995	Blatt/ Page 12524 / 4
Zur Lieferanzugs-Nr. To delivery note no. A l'avis d'expédition	Datum Date 21.06.05
(A09) 41/ 77/0061	

(A06)

V&M VALLOUREC & MANNESMANN TUBES
 V & M DEUTSCHLAND GmbH • Postfach 30 02 30 • D-40445 Düsseldorf

(A08)

WMD Auftrags-Nr.
 WMD order no.
 No. de commande WMD

(A07)

Kunden-Bestell-Nr.
 Customer order no.
 No. de commande client

(A09)

Bestimmungsland
 Destination
 Pays de destination

(A10)

Merkmal-Nr.
 Feature no.
 No. de caractéristique



(A01)

Lieferwerk
 Shipyard
 Usine expéditrice

(B01 - B04)

RATH

(B11 - B13)

NAHTLOSE STAHLROHRE, WARMGEFERTIGT #
 ASME SA 106, EDITION 2001 # ASME SA 530 M, EDITION 2001 /
 ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, SECTION II, PART A,
 EDITION 2001, ADDENDA 2003 / ASTM A 106 - 02 A /
 ASTM A 530 M - 04 / NACE STANDARD MR 0175-2003, ABSATZ 3.2 #
 GRADE B / GRADE C # AUSSENDURCHMESSERTOLERANZ + 1,000
 /- 1,000 % # HL 10000 - 11800 MM #
 ENDEN GLATT, SENKRECHT ZUR ROHRACHSE ABGESCHNITTEN, GRATFREI
 # INNEN OHNE ROSTSCHUTZ # AUSSEN KLARLACK
 WARMSTRECKGRENZE GEM. ASTM A 520-97, TABELLE I UND ASME
 BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, SECTION II, PART D,
 TABELLE VI, EDITION 98 WERDEN GEWAHRLEISTET

Pos.	Lief.	Abmessung / Positionstext	Stück	Kg	Gesamtlänge in m
1	Teil	A.DURCHM. WANDDICKE 273 X 25,4 IDENT-NR. 44383841 ROHRE LOSE	8	14.200	92,64

(B14)

SEIKO
 reg. no.: M401

829



VALLOUREC & MANNESMANN TUBES

VMD-Nr./No	877/5104 1	Nr./No	12524	Blatt/Page	2 / 4
Runden-Nr./Purchaser no./Sheet No	278/45779229				

Ergebnisse der Schmelzen (S1- und Kontrollanalyse (K) Z

(808) (C71 - C92)

SCHMELZEN-NR.	ERSCHM.-ART	C	SI	MN	P	S	AL	CU	CR	NI	MO	V
MINIMUM			0,100	0,29	0,035	0,0100		0,400	0,400	0,400	0,150	0,080
MAXIMUM			0,220	1,35	0,014	0,0020		0,020	0,060	0,040	0,010	<0,004
214256	S	OXYGEN	0,170	0,94	0,012	0,0010	0,025	0,020	0,051	0,036	0,008	0,003
K			0,163	0,91	0,012	0,0010	0,026	0,018	0,052	0,037	0,010	0,004
K			0,156	0,92	0,012	0,0009	0,026	0,019	0,052	0,037	0,010	0,004
214681	S	OXYGEN	0,170	0,94	0,016	0,0010	0,020	0,030	0,070	0,040	0,010	<0,004
K			0,178	0,94	0,013	0,0022	0,019	0,029	0,074	0,048	0,019	0,004
K			0,168	0,94	0,014	0,0017	0,018	0,029	0,074	0,047	0,018	0,004

CAE1 EF1

SCHMELZEN-NR.	ERSCHM.-ART	NB	N
MINIMUM			
MAXIMUM			
214256	S	OXYGEN	0,020
K			0,001
K			0,001
214681	S	OXYGEN	0,001
K			0,001
K			0,001

MN CR+MO+V NI+CU

CAE1 = C + --- + ----- + ----- EF1 = CR + MO + NI + CU + V

6 5 15

KONTROLLANALYSE JE SCHMELZE UND ABMESSUNG

Ergebnisse des Zuckerversuchs

(808) Probennummer	Schmelzennummer	(C10) Probenabmessung	(C02) Probenrichtung	(C01) Probenort	(C03) Prüftemperatur	(C11) Streck-/Dehngrenze	(C12) Zugfestigkeit	(C13) Dehnung (%)	Rp/ Rm	Z
MINIMUM										
3257N	214256	12,40	21 längs	RT	RT	275	485	22,0	0,65	
3455	214681	12,50	21 längs	RT	RT	321	497	35,5	0,57	
						280	488	37,5		

Schlüsselhinweise zum Zuckerversuch

PROBENFORM : 21 RUNDPROBE

WARMSTRECKGRENZE (OHNE NACHWEIS) GEMÄSS TABELLE Y-1

SECTION II D - ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE

830



VALLOUREC & MANNESMANN TUBES

V&M-Nr./No	877/5104 1	Nr./No	12524	Blatt/Pag.	3 / 4
Kunden-Nr./Přidělovací no./Client No	278/45779229				

Sonstige Vertriebsbestandteile

OHNE ZUSATZPRUEFUNG

Sonstige Prüffeststellungen (D01 - 099)

- WAERMEBEHANDLUNG: NORMALISIEREND ENDGEWALZT >850 GRAD C/LUFT
- INNENDRUCKVERSUCH MIT WASSER 190 BAR (1BAR=100KPA),
- HALTEZEIT 5 SEC.: BESTANDEN
- RINGFALTVERSUCH: BESTANDEN (C50)
- BESICHTIGUNG UND MASSKONTROLLE: BESTANDEN (D01)
- HAERTEPRUEFUNG: HRC MAX. 22

Kennzeichnung der Erzeugnisse (B06 - B07)

BEIDSEITIG STAHLGESTEMPELT
 ABGERUNDETE STEMPEL
 V&M41
 LIEFERBED./SPEZIFIKATION SAL06/A106
 B / C
 SCHMELZEN-NR.
 KWP IN BAR 190
 273 X 25,4
 OD 1%
 WA
 BEIDSEITIG SCHABLONIERT
 ROHREINZELLAENGE M
 ROHREINZELGEWICHT KG
 EINSEITIG SCHABLONIERT
 LFD. ROHR-NR.
 VALLOUREC & MANNESMANN
 FARBRING BEIDSEITIG
 ROT
 WEISS

KLAPPERRANGABEN IM ZEUGNIS ENTSPRECHEN DER KENNZEICHNUNG NACH EN 168-06.

HERSTELLERKENNZEICHEN (A04)

STEMPEL DES ANNAHMEBEAUFTRAGTEN (Z02)

DIE GELIEFERTEN ERZEUGNISSE STIMMEN MIT DEN ANFORDERUNGEN DES AUFTRAGES ÜBEREIN

(A05) V & M DEUTSCHLAND GMBH, WERK RATH, ABNAHME STOPFENSTRASSE
 40435 DUSSELDORF, POSTFACH 330230
 (Z01) GEZ. WARTEN, WERKSACHVERSTÄENDIGER
 DUSSELDORF, DEN 21.06.2005, TELEFON: +49(0)2119603954
 TELEFAX: +49(0)2119602216
 E-MAIL: WERNER.WARTEN@VMTUBES.DE

Dieses Zeugnis bzw. diese Bescheinigung wurde mit Hilfe der EDV
 erstellt und ist ohne Unterschrift gültig. Veränderungen sowie
 Verwendung für andere Erzeugnisse werden als Urkundenfälschung und
 Betrug strafrechtlich verfolgt.