ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA
STROJNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

ŠTĚPÁN
JEŽEK

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Nemám žádný závažný důvod proti užití školního díla ve smyslu §60 Zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: …… *…….*

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. K. Kovandovi IWE a konzultantovi Ing. J. Brabcovi IWE za velkou podporu při studiu odborných záležitostí a vytváření této práce. Dále bych rád poděkoval svým rodičům za jejich podporu při mém dosavadním studiu.

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou kvalifikace postupu svařování konstrukčních ocelí se zvýšenou mezí kluzu. Kvalifikace postupu svařování byla provedena podle normy ČSN EN ISO 15614-1-A2. V teoretické části je popsána problematika rozdělení ocelí, metod zvyšování pevnosti ocelí a popsána problematika svařitelnosti, technologie svařování a kvalifikace postupu svařování. Praktická část práce se zabývá vytvořením nového a náhradního vzorku pro dosažení platných kvalifikací postupu svařování ve společnosti Schäfer – Menk s.r.o. dle předem definovaných požadavků.

This thesis relates with welding procedure qualification record for steels with increased yield strength. Welding procedure qualification record follow standard ČSN EN ISO 15614-1-A2. In theoretical part of this thesis is described steel division, methods for increasing of yield strength, weldability, welding technology and welding procedure qualification record. In practical part is described creation of new and alternative welding samples for achieving of valid welding procedure qualification records according to Schäfer – Menk s.r.o. company requests.

Obsah

1. Úvod ... 8
1.1. Představení společnosti ... 8
1.2. Cíl práce ... 10
2. Popis a charakteristika ocelí ... 11
2.1. Dělení ocelí ... 11
2.1.1. Nelegované oceli ... 12
2.1.2. Korozivzdorné oceli ... 12
2.1.3. Legované oceli ... 13
2.2. Označování ocelí dle ČSN EN 10027-1 ... 13
2.3. Metody zvyšování pevnosti slitin železa ... 14
2.3.1. Mechanizmy plastické deformace ... 15
2.3.2. Legování ... 15
2.3.3. Zpevnění hranicemi zrn ... 16
2.3.4. Deformační zpevnění ... 17
2.3.5. Precipitační zpevnění ... 17
2.3.6. Transformační zpevnění ... 17
2.4. Výroba ocelí ... 18
3. Teorie spojování materiálu ... 19
3.1. MIG / MAG ... 19
3.1.1. Princip metody MIG ... 19
3.1.2. Princip metody MAG ... 20
3.1.3. Přenos kovu ... 20
3.1.4. Přídavné materiály ... 20
3.1.5. Ochranné plyny ... 21
3.2. TIG ... 21
3.2.1. Princip metody ... 21
3.2.2. Přídavný materiál ... 22
3.2.3. Netavící se elektroda ... 22
3.2.4. Ochranné plyny ... 22
3.3. SAW ... 23
3.3.1. Princip metody ... 23
3.4.1. Materiály pro svařování ... 24
4. Svařitelnost ... 25

4.1. Teplotně-časový cyklus ... 25
4.1.1. Popis teplotního cyklu ... 25
4.1.2. Výpočet teplotního cyklu ... 26
4.2. Uhlíkový ekvivalent ... 28
4.3. Tepelný příkon ... 29
4.4. Tepelně ovlivněná oblast ... 30
4.4.1. Velikost tepelně ovlivněné oblasti ... 31
4.5. Houževnatost a tvrdost tepelně ovlivněné oblasti ... 32
4.6. Předehřev materiálu ... 34
4.7. Teplota interpass ... 34
4.8. Vady svarových spojů ... 35
4.9. Metody kontroly svarových spojů ... 35
4.9.1. Kvalifikace dle ČSN EN ISO 9712 ... 35
4.9.2. Nedestruktivní testování (defektoskopie) ... 37
4.9.3. Destruktivní testování ... 37
4.10. Kvalifikace postupu svařování (WPQR) ... 37
5. Praktická část ... 40
5.1. Kvalifikace postupu svařování koutového svaru S355NL ... 40
5.1.1. Zadané požadavky ... 40
5.1.2. Základní materiál ... 40
5.1.3. Návrh svařence pro WPQR ... 41
5.1.4. Návrh pWPS pro WPQR ... 41
5.1.5. Svařování zkušebního kusu ... 41
5.1.6. Předepsané kontroly svaru dle ČSN 15614-1 ... 43
5.1.7. Kvalifikace postupu svařování ... 49
5.2. Kvalifikace postupu svařování svaru S960QL ... 49
5.2.1. Základní materiál ... 50
5.2.2. Návrh pWPS pro nový vzorek ... 51
5.2.3. Sledování tepelného cyklu ... 54
5.2.4. Ověření vhodnosti parametrů ... 54
5.2.5. Svařování vzorku pro WPQR ... 55
5.2.6. Získávání dat pomocí termočlánků ... 57
5.2.7. Naměřené hodnoty ... 58
5.2.8. Porovnání naměřených dat s WeldCalc ... 59
5.2.9. Opakování zkoušky ohybem ... 59

6. Závěr 61
7. Zdroje 62

Seznam zkratek

DP – diplomová práce

WPQR – Welding procedure qualification rekord (kvalifikace postupu svařování)

pWPS – Preliminary Welding procedure specification (Předběžná specifikace svařovacího procesu)

WPS – Welding procedure specification (specifikace svařovacího procesu)

MAG (metoda 135) – Metal active gas (Svařování odtavující se elektrodou v aktivním plynu)

MIG (metoda 131) – Metal inert gas (Svařování odtavující se elektrodou v inertním plynu)

TIG (metoda 141) – Tungsten inert gas (Svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu)

SAW (metoda 121) – Submerged arc welding (Svařování pod tavidlem)

1. Úvod

Diplomová práce se zabývá problematikou kvalifikace postupu svařování (WPQR) konstrukčních ocelí se zvýšenou mezí kluzu a jejich svařitelností.

Svařování kovových materiálů je speciální proces, obsahující mnoho faktorů ovlivňující kvalitu spoje. V případě porušení spoje při používání součásti může dojít k poškození či zničení výrobku nebo ke zranění osob. Těmto situacím se snaží dodavatelé i odběratelé svařenců vyhnout a z tohoto důvodu došlo k vytvoření nadnárodních normativů, které specifikují požadavky na jakost při svařování (např. EN ISO 3834-2, ČSN EN 1090-2, ČSN EN 15085, DIN 18800).

Diplomová práce byla řešena ve spolupráci s firmou Schäfer – Menk s.r.o., kde každý svařenec, dodaný zákazníkovi, musí být kvalifikován postupem svařování WPQR, který zaručuje jeho integritu a vlastnosti svarového spoje.

V diplomové práci se řešila kvalifikace postupu svařování pro dva rozdílné materiály, pro materiál S355NL a S960QL. Cílem získávání kvalifikace pro S355NL bylo získání WPQR dle požadavků společnosti Schäfer – Menk s.r.o. . Pro materiál S960QL bylo cílem nalezení vhodné úpravy procesu svařování, který zajistí získání vzorku o vlastnostech požadovaných normou pro získání platné kvalifikace postupu svařování za průběžného sledování parametru $t_{8/5}$ při procesu svařování.

Kvalifikace postupu svařování byla prováděna podle normy ČSN EN ISO 15614-1-A2:2004/A2:2012 Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu.

Veškeré svařovací procesy byly uskutečněny ve výrobních prostorách společnosti Schäfer-Menk s.r.o., vyhodnocení nedestruktivních zkoušek jakosti svaru bylo provedeno akreditovanou zkušební organizací GSI-SLV Praha a GSI-SLV Halle (Německo), destruktivní zkoušky byly provedeny společností SVUM s.r.o. a GSI-SLV Halle (Německo).

1.1. Představení společnosti

„Společnost Schäfer – Menk s.r.o. je zahraniční společnost s výrobními závody v Praze a Dýšině u Plzně. Zabývá se výrobou technologicky náročných svařovaných konstrukcí, svařenců pro důlní techniku, komponentů pro autojeřáby, transformátorových nádob a rámů pro transportní techniku. Veškerá produkce firmy je exportována do zemí celého světa. Výchozím materiálem pro výrobu je ocel různých jakostí od S235 do S1200QL. Dále firma svařuje nerezavějící materiály, hliníkové slitiny a měď. Ve firmě se svařuje jak manuálně, tak s využitím automatů a robotů. Používané metody pro výrobu jsou 135, 138, 131, 141, 121, 783“ [1].

Příkladem výrobků vytvářených ve společnosti jsou teleskopická ramena autojeřábů a rámy nakladačů viz Obrázek 1.

Obrázek 1: Výrobek společnosti [1]

1.2. Cíl práce

Diplomová práce se zabývá dvěma cíli. Prvním cílem je úspěšná kvalifikace typového svarového spoje pro materiál S355NL pro použití v drážním průmyslu. Druhým cílem je nalezení nápravného řešení k zajištění kvalifikace svařování materiálu S960QL pro robotické svařování a měření teplotně-časového cyklu. Cílem měření je vyhodnocení hodnot času t8/5 v průběhu svařovacího procesu a porovnání naměřených výrobních hodnot s doporučenými hodnotami od dodavatele a předepsanými hodnotami od zákazníka. Naměřené časy mají vliv na kvalitu a pevnostní charakteristiky svaru.

V této práci byl navržen svar pro kvalifikaci postupu svařování dle normy ČSN EN ISO 15614-1-A2, která se použije v reálném provozu společnosti.

Úkoly v praktické části diplomové práce:

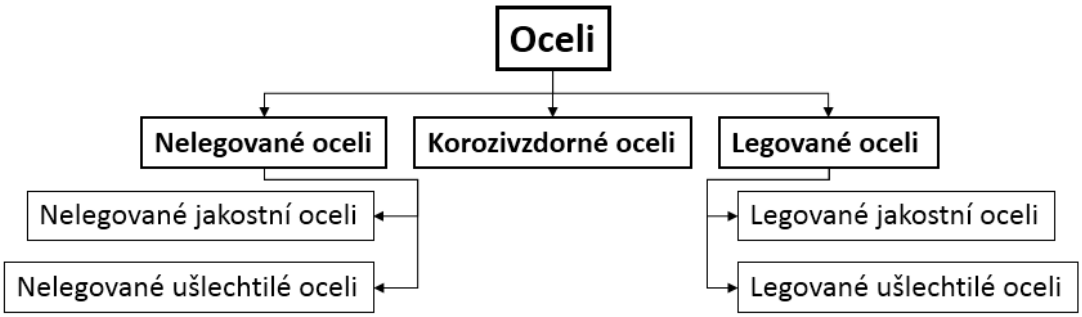
- Kvalifikace postupu svařování koutového svaru S355NL
  - Návrh svařence pro WPQR dle zadání a ČSN EN ISO 15614-1-A2
  - Návrh pWPS pro WPQR
  - Hodnocení zkušebního kusu dle požadavků ČSN EN ISO 15614-1-A2
  - Vypracování WPQR od zkušební organizace
  - Vypracování WPS pro potřeby výroby společnosti
- Vytvoření náhradního vzorku pro kvalifikaci postupu svařování materiálu S960QL
  - Návrh pWPS pro nový vzorek
  - Sledování tepelného cyklu pomocí termočlánků
  - Porovnání naměřených dat s programem WeldCalc a požadavky zákazníka
  - Vyhodnocení v laboratoři GSI-SLV Halle

2. Popis a charakteristika ocelí

„Ocel je materiál, jehož hmotnostní podíl železa je větší než kteréhokoli jiného prvku, obsah uhlíku je všeobecně menší než 2 % a obsahuje další prvky. Omezený počet chromových ocelí může obsahovat více než 2% uhlíku, ale 2% je obvyklá hranice mezi ocelí a litinou“ [2]. Ocel je velmi důležitým konstrukčním materiálem ve strojírenské praxi, ocel totiž může vykazovat jak vysokou tvrdost a pevnost, tak může i vykazovat vysoce tvárné vlastnosti.

2.1. Dělení ocelí

Oceli jsou rozděleny do skupin jakostí dle ČSN EN 10020. Hlavními skupinami jsou nelegované oceli, korozivzdorné oceli a legované oceli viz Obrázek 2.



Obrázek 2: Dělení ocelí dle ČSN EN 10020

Hranici mezi nelegovanými a legovanými ocelemi definuje Tabulka 1, která obsahuje mezní maximální hodnoty obsahu jednotlivých slitinových prvků při rozboru tavby.

Tabulka 1: Mezní hodnoty pro nelegované a legované oceli [2]

Prvek	Mezní hodnoty [% hm.]	Prvek	Mezní hodnoty [% hm.]
Al - hliník	0,30	Nb - niob	0,06
B - bor	0,0008	Ni - nikl	0,30
Bi - bismut	0,10	Pb - olovo	0,40
Co - kobalt	0,30	Se - selen	0,10
Cr - chrom	0,30	Si - křemík	0,60
Cu - měď	0,40	Te - telur	0,10
La - lanhanidy	0,10	Ti - titan	0,05
Mn - mangan	1,65	V - vanad	0,10
Mo - molybden	0,08	W - wolfram	0,30
Zr - zirkon	0,05	C, P, S, N	0,10

Ocel hodnotíme dle normy na výrobek nebo podle technických dodacích podmínek. V případě uvedení pouze maximálních obsahů prvků se počítá se 70 % uvedené hodnoty.

2.1.1. Nelegované oceli

Ocel je nelegovaná právě tehdy, pokud u ní není dosažena žádná z mezních hodnot v tabulce 1. Aby tyto oceli měli zaručenou svařitelnost, musí obsahovat maximální obsahy prvků uvedených v Tabulce 2.

Tabulka 2: Mezní hodnoty legujících prvků pro zaručenou svařitelnost ocelí [2]

Prvek	Mezní hodnoty [% hm.]	Prvek	Mezní hodnoty [% hm.]
Cr - chrom	0,50	Ni - nikl	0,50
Cu - měď	0,50	Ti - titan	0,12
Mn - mangan	1,80	V - vanad	0,12
Mo - molybden	0,10	Zr - zirkon	0,12
Nb - niob	0,08		

a) Nelegované jakostní oceli

Nelegované jakostní oceli jsou oceli, pro které jsou požadovány všeobecně stanovené požadavky, např. houževnatost, velikost zrna, tvařitelnost.

b) Nelegované ušlechtilé oceli

Nelegované ušlechtilé oceli jsou oceli, které mají vyšší stupeň čistoty než jakostní oceli, zejména s ohledem na obsah nekovových vměstků. Většinou jsou určeny pro zušlechťování nebo povrchové kalení a vyznačují se tím, že rovnoměrněji reagují na toto tepelné zpracování.

Řízením chemického složení a zvláštní pečlivostí při výrobě a kontrole zajištují ušlechtilé oceli zlepšené vlastnosti, které odpovídají zpřísněným požadavkům. Požadované užitné vlastnosti, které jsou všeobecně v kombinaci v úzce vymezených hranicích prvků, zahrnují vysoké nebo zúžené hodnoty meze kluzu nebo prokalitelnosti, někdy spojené s vhodností k tváření za studena a svařitelností nebo houževnatostí.

2.1.2. Korozivzdorné oceli

Korozivzdorné oceli jsou oceli s obsahem chromu minimálně 10,5 % a obsahem uhlíku max. 1,2 %. [2]

Tyto oceli rozdělujeme:

a) Podle obsahu niklu

- S obsahem niklu nižším než 2,5 %
- S obsahem niklu 2,5 % nebo vyšším

b) Podle základních vlastností

- Korozivzdorné
- Žáruvzdorné
- Žárupevné

2.1.3. Legované oceli

Legované oceli jsou oceli, které neodpovídají definici pro korozivzdorné oceli a je u nich dosažena alespoň jedna mezní hodnota podle Tabulky 1.

a) Legované jakostní oceli

Legované jakostní oceli jsou oceli, pro které jsou požadovány všeobecně stanovené požadavky, např. houževnatost, velikost zrna, tvařitelnost apod. Legované oceli nejsou všeobecně určeny pro zušlechťování a povrchové kalení. Tyto oceli rozdělujeme do dalších skupin.

- Svařitelné jemnozrnné konstrukční oceli, včetně ocelí pro tlakové nádoby,
- Legované oceli na kolejnice, štětovnice a důlní výztuže
- Legované oceli na ploché výrobky válcované za tepla nebo za studena pro náročné použití tvářením za studena
- Oceli legované, u nichž měď je jediným legujícím prvkem
- Legované oceli pro elektrotechniku

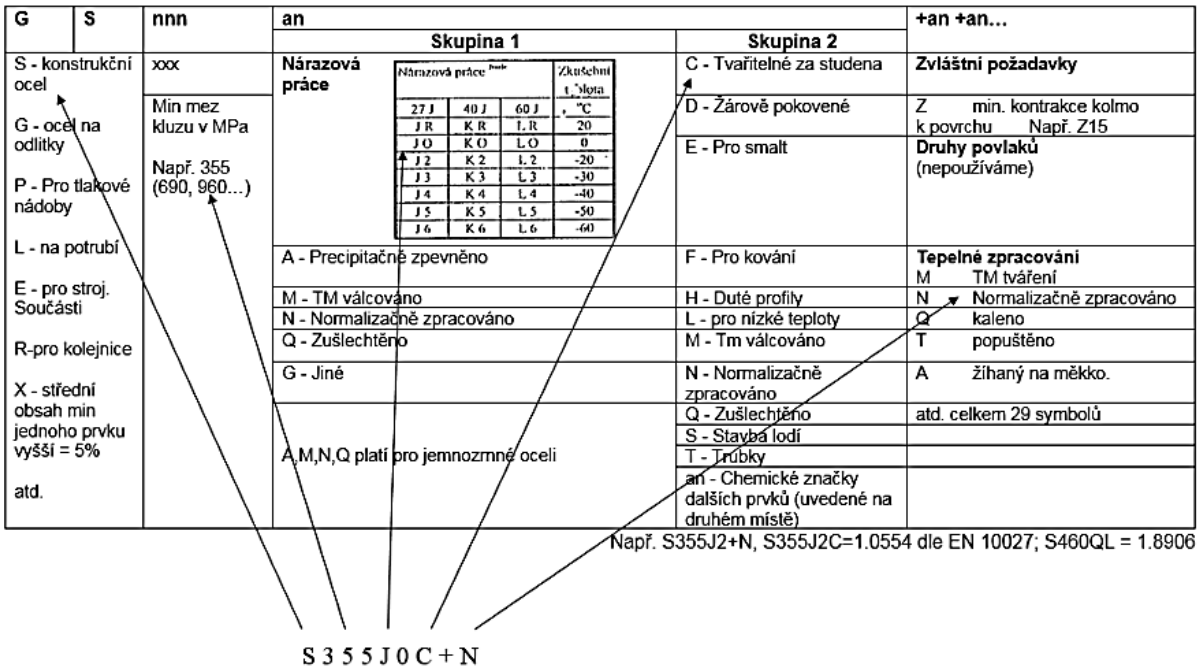
b) Legované ušlechtilé oceli

Tato skupina obsahuje jiné oceli než korozivzdorné a je charakterizována přesnou kontrolou chemického složení a zvláštními výrobními a zkušebními podmínkami za účelem zlepšení vlastností.

Legované jakostní oceli jsou ostatní legované oceli, které nejsou definované ve skupině legované jakostní oceli. Legované ušlechtilé oceli zahrnují konstrukční oceli, legované oceli pro tlakové nádoby a zařízení, oceli pro valivá ložiska, nástrojové oceli, rychlořezné oceli a oceli se zvláštními fyzikálními vlastnostmi.

2.2. Označování ocelí dle ČSN EN 10027-1

Tato práce se zabývá pouze značením ocelí dle ČSN EN 10027-1, toto značení se používá ve společnosti, se kterou spolupracuji na vytváření diplomové práce. Po rozklíčování značky materiálu bude jasné, že toto značení jasně definuje všechny informace důležité pro specifikaci materiálu. Označení je vytvořené na základně mechanických a fyzikálních vlastností materiálu viz Obrázek 3.



Obrázek 3: Značení ocelí dle ČSN EN 10027-1

2.3. Metody zvyšování pevnosti slitin železa

Hlavním prvkem, který ovlivňuje konečné vlastnosti materiálu je uhlík. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku roste pevnost a tvrdost materiálu, avšak výrazně klesá houževnatost a přechodová teplota mezi křehkým a houževnatým lomem se posouvá do oblasti kladných teplot, což je pro konstrukční oceli nepřijatelné. Proto pro zvýšení pevnosti železných slitin používáme více postupů než přidávání uhlíku. [3]

Pro zlepšení mechanických vlastností materiálu využíváme několika postupů, nikdy ale nevyužíváme pouze jeden způsob zvyšování pevnosti, vždy se používá kombinace. Mezi metody zvýšení pevnosti patří: legování, zpevnění hranicemi zrn, deformační, precipitační a transformační zpevnění.

Při návrhu materiálu při konstrukci výrobku je důležité, aby při využívání součásti nedocházelo ke vzniku napětí převyšující mez kluzu zvoleného materiálu. Po překročení meze kluzu dochází v součásti k plastické deformaci a tím k trvalé změně tvaru součásti. Tato deformace může omezit či zamezit další využití výrobku, a proto při volbě materiálu konstrukce volíme takový materiál, který zaručí dostatečnou pevnost.

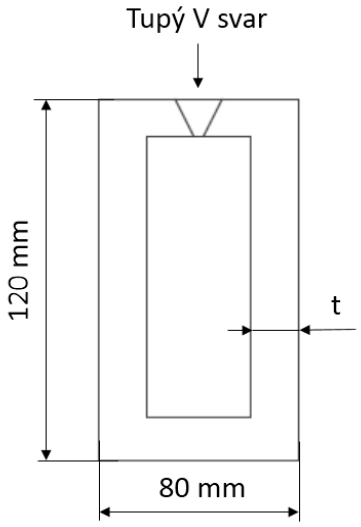
Při známém napětí lze pro zvolenou konstrukci použít buď materiál s nižší pevností a použít větší průřez, nebo mohu jít cestou použití ocelí s vyšší pevností a tím redukovat potřebný průřez a tím i celkovou hmotnost výrobku. Redukce váhy ovlivňuje použitelnost, manipulaci, a další faktory, které ovlivňují náklady na výrobu a využití součásti.

V současné době je snaha o redukci celkové váhy výrobku, a proto se začaly používat konstrukční oceli se zvýšenou mezí kluzu. Při použití oceli s vyšší pevností dojde k výrazným úsporám základního materiálu, času potřebného ke svařování součásti, k omezení množství přeneseného svarového kovu, deformacím, času na dělení materiálu, a především hmotnosti výrobků.

V tabulce 3 jsou uvedeny tři druhy ocelí o různých mezích kluzu, které by bylo možné zvolit jako základní materiál obdélníkového průřezu, který je spojen v horní části tupým V svarem viz Obrázek 4, který je zatížen vnějším zatížením 50 kN.

Tabulka 3: Porovnání materiálů o různých pevnostech [3]

Zvolený materiál pro kontrukci		S355J2C	Alform700M	Alform960 x-treme
Mez kluzu Re	[MPa]	355	700	960
Tloušťka plechu t	[mm]	15	6	4
Objem svarového kovu	[%]	100	16	7
čas laserového řezání	[%]	100	40	27
Hmotnost součásti	[%]	100	44	30



Obrázek 4: Obdélníkový průřez s naznačeným tupým V svarem

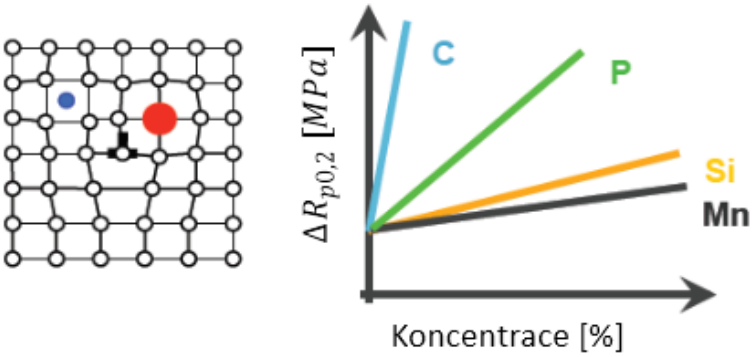
V Tabulce 3 si můžeme všimnout, že při použití oceli s vyšší pevností dochází k razantní redukci potřebné tloušťky materiálu, snížení potřebného množství svarového kovu, potřebného času na dělení materiálu a také k výrazné úspoře na celkové hmotnosti součásti. Všechny tyto hodnoty potvrzují výhodnost využívání ocelí vyšších pevností.

2.3.1. Mechanizmy plastické deformace

Plastická deformace probíhá skluzem dislokací a dvojčatěním. K dvojčatění dochází pouze při velmi velké rychlosti deformace a nízkých teplotách, proto je skluz dislokací majoritním mechanizmem plastické deformace. Hlavní myšlenkou zvyšování meze kluzu souvisí se zamezením pohybu dislokací. [4]

2.3.2. Legování

Při legování dochází buď ke vzniku substitučního tuhého roztoku, kde legující prvek nahradí v krystalické mřížce atom původního prvku nebo ke vzniku intersticiálního tuhého roztoku, kde atom příměsi zůstane uvězněn v krystalické mřížce, viz levá část Obrázku 5, a tím dojde k elastické deformaci mřížky. Tato deformace vytvoří energetické pole v okolí substitučního nebo intersticiálního bodu a tím i ztíží průchod dislokace krystalickou mřížkou v okolí bodu. [4]

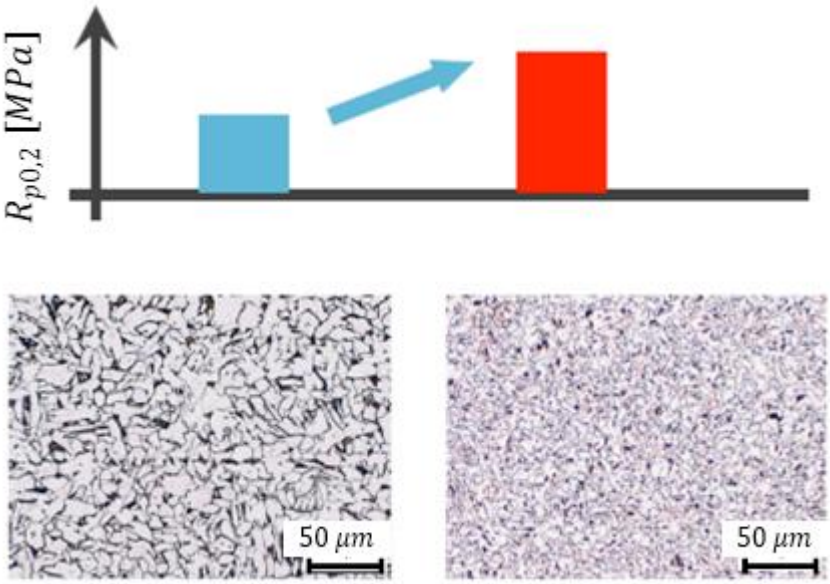


Obrázek 5: Vliv legujících prvků [4]

V pravé části Obrázku 5 si můžeme všimnout, že různé prvky a jejich koncentrace ovlivňují nárůst meze kluzu jinak. Největší vliv na nárůst pevnosti má uhlík, avšak zvyšování uhlíku výrazně negativně ovlivňuje jak mechanické vlastnosti materiálu (rázovou houževnatost), tak technologické vlastnosti materiálu (svařitelnost). [4]

2.3.3. Zpevnění hranicemi zrn

Zpevnění hranicemi zrn je nejvýhodnější zvyšování meze kluzu pro konstrukční materiály. Zvýšením počtu zrn dojde jak ke zvýšení meze kluzu, tak ke snížení přechodové teploty ke křehkému lomu a tím i k vyšší houževnatosti za nižších teplot. Na Obrázku 6 si můžeme všimnout nárůstu meze kluzu se zjemněním materiálové struktury. Modrý sloupec znázorňuje společně se snímkem mikrostruktury pod ním hrubou strukturu materiálu, červený sloupec se snímkem strukturu jemnozrnnou. [4]



Obrázek 4: Zpevnění hranicemi zrn [3]

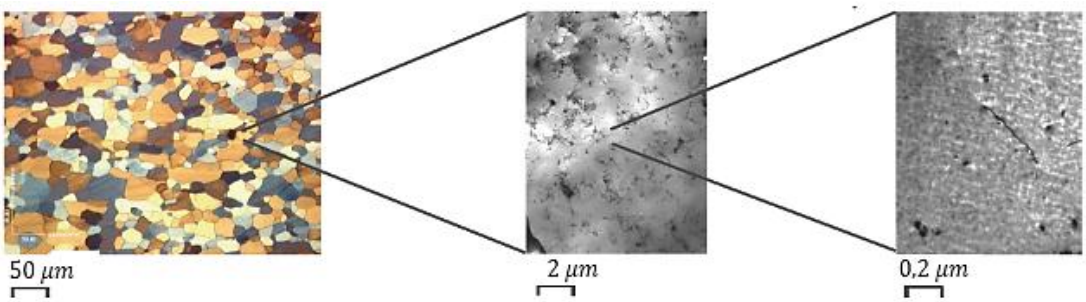
Hranice zrna je nepropustná překážka pro pohyb dislokace, a proto se zvýšením počtu hranic dojde k výraznému omezení pohybu dislokací. Jemnozrnná struktura se vyrábí pomocí řízeného válcování, kde dochází k tváření při dynamické rekrystalizaci a tím i ke zjemnění zrna.

2.3.4. Deformační zpevnění

Plastická deformace začne tehdy, pokud v nějakém skluzovém systému uvnitř krystalické mřížky je v důsledku namáhání smykové napětí větší než kritické napětí pro skluz dislokace. Proto deformačním zpevněním při deformaci uvádíme v pohyb systémy s nejnižším kritickým smykovým napětím, a proto při dalším zatížení musíme zatížit součást vyšším napětím, abychom vyvolali dostatečné kritické skluzové napětí. V průběhu deformace dochází ke vzniku dalších dislokací, které se protínají s dalšími dislokacemi a tím vytváří dislokační sítě, které také zvyšují kritické skluzové napětí. V důsledku vzniku dislokací a hromadění dislokací na hranicích zrn dochází při válcování za vyšších teplot (T = 0,35 Tt [K]) k dynamické rekrystalizaci a tím ke zjemnění zrna. Tento typ zpevnění je část přírůstku zpevnění při termo-mechanickém zpevňování. [4]

2.3.5. Precipitační zpevnění

Precipitace je vylučování fází s omezenou rozpustností závislé na teplotě v železe. Při dosažení nízkých teplot (150 °C) začne docházet k vylučování karbidů a nitridů uvnitř zrn a tím k vytváření překážek pro průchod dislokací. Podle částice je průchod dislokací precipitátem buď dán mechanizmem podle Friedela nebo Orowana. Precipitáty mohou také vytvářet Frank-Readův zdroj dislokací, který při plastické deformaci zvyšuje hustotu dislokací a tím kladně přispívá k zamezení jejich pohybu. Na Obrázku 7 si můžeme všimnout snímků struktury při různých zvětšeních s vyloučenými černými karbidy. [4]



Obrázek 7: Precipitát v zrnu [4]

Precipitace je buď přirozená a probíhá za pokojových teplot, nebo může také probíhat uměle při popouštění. Je potřeba brát v úvahu tvar a velikost precipitátu. V případě ostrého tvaru či velké velikosti může precipitát působit jako vrub a tím celkovou pevnost součásti snížit. [4]

2.3.6. Transformační zpevnění

Transformační zpevnění je zpevnění materiálu vytvořením nerovnovážné struktury z důvodu ochlazení materiálu větší než kritickou rychlostí ochlazování. Nerovnovážnou strukturou může být horní bainit, dolní bainit či martenzit. [4]

Mechanické vlastnosti výsledného produktu závisí hlavně na typu výsledné struktury. V případě vytvoření bainitu dojde ke zvýšení pevnosti materiálu, avšak hodnoty rázové houževnatosti zůstávají vysoké. V případě vytvoření martenzitické struktury dojde k výraznému zvýšení tvrdosti a pevnosti, avšak současně k výraznému snížení rázové houževnatosti. V případě kalení na martenzit musí po kalení přijít nízko či vysokoteplotní popouštění, což výrazně zvyšuje délku výroby materiálu a tím i zvyšuje výrobní náklady. [4]

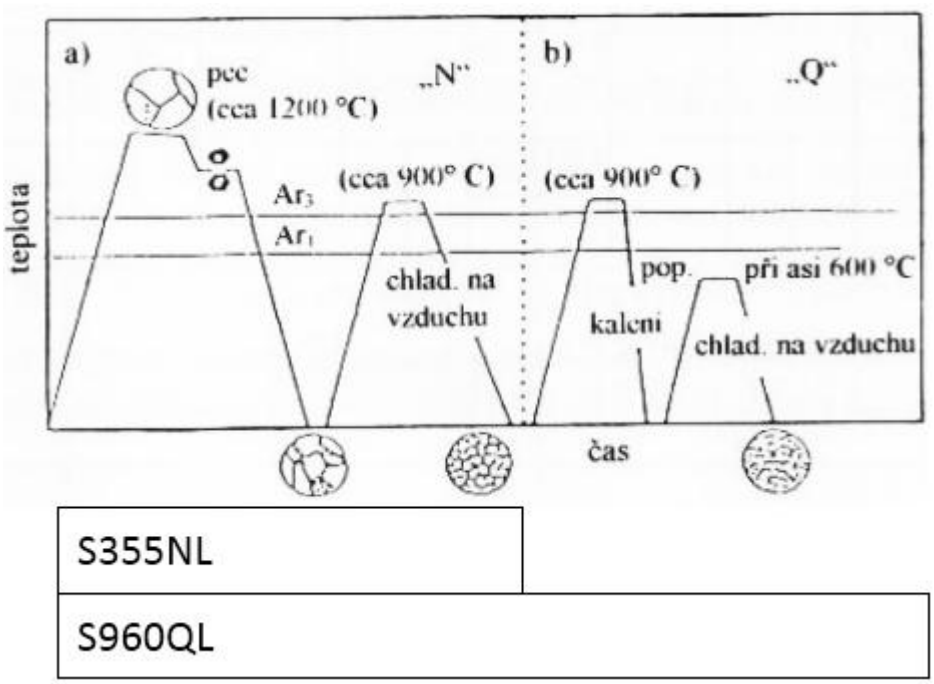
Pro vysokopevnostní konstrukční materiály je nejvýhodnější strukturou dolní bainit, který vykazuje vysoké hodnoty pevnosti a také vysoké hodnoty rázové houževnatosti. Tuto strukturu obsahuje také S960QL – Weldox 960.

2.4. Výroba ocelí

Oceli se vyrábějí pomocí řízeného válcování. V průběhu válcování za tepla lze za pomoci řízené deformace dosáhnout velmi jemného zrna. Po ukončení řízeného válcování může ještě dojít k normalizačnímu žíhání či ještě následnému zušlechtění a popuštění.

Tímto způsobem lze dosáhnout jemnozrnné svařitelné oceli se zvýšenou pevností.

Zadaný materiál S355NL byl řízeně normalizačně válcován, materiál S960QL byl po válcování ještě zušlechtěn viz Obrázek 8.



Obrázek 8: Výroba oceli řízeným válcováním [5]

3. Teorie spojování materiálu

V praxi je potřeba vytvářet nerozebíratelné spoje z kovových materiálů. Z toho důvodu používáme technologii svařování.

Svařování lze rozdělit na dvě základní skupiny dle mechanizmu vzniku spoje, a to na svařování tlakové a svařování tavné.

U tlakového svařování dochází ke vzniku spoje za působení tlakové síly. Mezi tyto způsoby patří svařování bodové, švové, lemové, třecí, difúzní apod.

V případě tavného svařování dojde z důvodu působení intenzivního zdroje tepla k natavení základního a přídavného materiálu, vytvoření svarové lázně a po vychladnutí k vytvoření pevného nerozebíratelného spoje.

Mezi tavné způsoby svařování se řadí technologie:

- Obloukového svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (MAG - 135)
- Obloukového svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (MIG - 131)
- Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (TIG - 141)
- Svařování pod tavidlem (SAW - 121)
- Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (MMA - 111)

Všechny názvy a čísla metod svařování jsou uvedeny v normě EN ISO 4063.

3.1. MIG / MAG

Svařování v ochranných atmosférách tavící se elektrodou nachází široké uplatnění při výrobě a opravě technického zařízení. Svařování MAG se používá hlavně pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí a svařování MIG pro vysokolegované oceli a neželezné kovy.

Tyto metody lze snadno zefektivnit zavedením automatizace procesu, který má kladný vliv na jakost výsledného svařence, hygienu pracovního prostředí a zlepšení pracovních podmínek.

Přednosti metody MIG/MAG před ostatními metodami tavného svařování jsou:

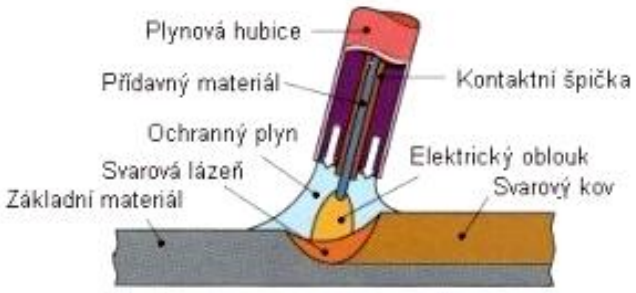
a) Vysoká produktivita a hospodárnost svařování
b) Možnost svařování ve více polohách
c) Vhodné pro ruční, mechanizované i automatizované procesy
d) Možnost svařování širokého spektra materiálů
e) Příznivé vlastnosti vytvořených svarových spojů
f) Nízké investiční náklady na realizaci metody

3.1.1. Princip metody MIG

Zdrojem tepla při svařování je elektrický oblouk, který hoří mezi koncem tavící se elektrody (drátem) a základním materiálem, v prostředí inertního (netečného) plynu argonu, helia, jejich směsí nebo případně směsi argonu a vodíku. Tavná svarová lázeň a její nejbližší okolí (TOO) je chráněno před nepříznivým vlivem okolní atmosféry (hlavně kyslíku a dusíku). [6] Schéma metody viz Obrázek 9.

3.1.2. Princip metody MAG

Tepelný příkon pro svařování zajišťuje elektrický oblouk, který hoří mezi koncem tavící se elektrody (přídavný materiál ve formě drátu) *a základním materiálem, v prostředí aktivního (reagujícího) plynu (oxidu uhličitého – CO_2, Ar + CO_2, Ar + CO_2 + O_2). Schéma metody je uvedeno na Obrázku 9. Z důvodu jedno komponentního, případně více komponentního plynu se bude v závislosti na charakteru plynu měnit i chemické složení svarového kovu, zejména obsah C, Mn, Si prvků a tím i jeho mechanické vlastnosti. Použitím směsných (více komponentních) plynů se podařilo podstatně zlepšit formování svaru, zvýšit stabilitu hoření oblouku a snížit rozstřik kovu.* [6]



Obrázek 9. Schéma metody MIG/MAG [7]

3.1.3. Přenos kovu

V závislosti na použitých parametrech svařovacího procesu dosáhneme rozdílného přenosu kovu z odtavující se elektrody do svarové lázně. Všechny typy přenosu kovu závisí na vzájemném poměru a vzájemné velikosti svařovacího napětí a svařovacího proudu. Dále také závisí na použitém typu, průměru elektrody a použitém ochranném plynu.

Přenos kovu může být realizován:

a) Zkratovým obloukem
b) Pulzním obloukem
c) Sprchovým obloukem
d) Rotujícím obloukem
e) Jejich kombinacemi

3.1.4. Přídavné materiály

Pro metodu MIG/MAG se jako přídavné materiály používají plné nebo plněné elektrody vhodného chemického složení a o požadovaných mechanických vlastnostech. Dodávají se navinuté na cívkách ve vhodných obalech, aby nedošlo ke znehodnocení či poškození.

Přídavné materiály plní tyto funkce:

a) Doplňování kovu do svarové lázně
b) Náhrada vypálených prvků
c) Dodávání legujících a dezoxidačních přísad
d) Vytváří funkční část svařovacího obvodu

Pro svařování ocelí metodou MAG se používají přídavné materiály, které obsahují zvýšený obsah manganu a křemíku z důvodu silnější dezoxidace lázně.

3.1.5. Ochranné plyny

Použití ochranných plynů má tyto funkce:

a) Ochrana svarové lázně před působením vnější atmosféry (oxidace, naplynění)
b) Zlepšení podmínek pro snadné zapálení a stabilní hoření elektrického oblouku

Ochranné plyny také výrazně ovlivňují:

a) Tepelný výkon oblouku
b) Přenos kovu
c) Geometrii svaru
d) Hospodárnost a produktivita procesu
e) Výsledné vlastnosti svarového spoje

3.2. TIG

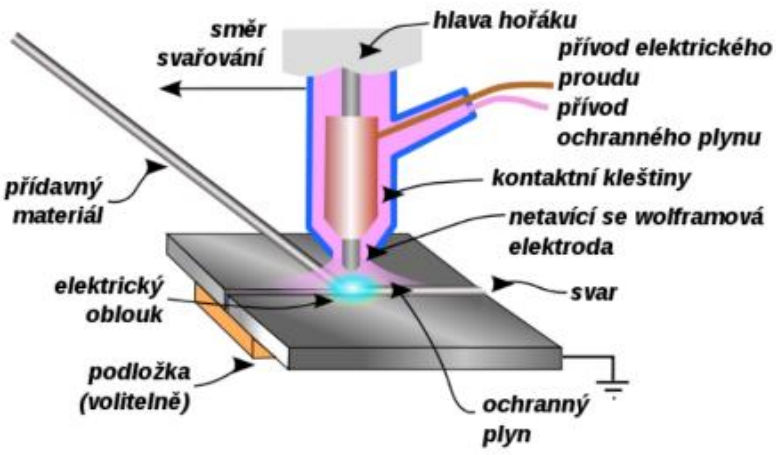
Tato metoda se používá na svařování neželezných kovů, nelegovaných, nízkolegovaných, legovaných a vysokolegovaných ocelí, a to jak pro automatové tak i ruční svařování.

Výhody této technologie oproti jiným jsou:

a) Ochrana svarové lázně proti působení vnější atmosféry
b) Zlepšení hygieny prostředí
c) Vhodnost na svařování tenkých matriálů a menších svarů bez nutnosti čištění a oprav
d) Pro vysoké požadavky na vzhled svarů
e) Možnost automatizace a robotizace
f) Možnost svařovat ve všech polohách
g) Eliminace studených spojů

3.2.1. Princip metody

Princip technologie TIG spočívá ve vzniku a hoření elektrického oblouku mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem, přičemž je svarová lázeň, elektroda a nejbližší okolí svaru chráněno interním plynem před účinky okolní atmosféry. Netavící se elektroda je čistě wolframová nebo s aktivující přísadou a jako ochranný inertní plyn se používá argon, helium, případně jejich směsi. [6] Schéma principu metody TIG viz Obrázek 10.



Obrázek 10: Schéma metody TIG [9]

3.2.2. Přídavný materiál

Jako přídavný materiál se používá drát kruhového průřezu a potřebné jakosti. Volba přídavné materiálu závisí na chemickém složení, mechanických vlastnostech základního materiálu a na požadovaných vlastnostech spoje. Svarový spoj musí mít vždy lepší mechanické vlastnosti než základní materiál. Dráty musí být uskladněny v suchém prostředí v originálních obalech.

3.2.3. Netavící se elektroda

Netavící se elektrody používané při této metodě jsou tyče malých průměrů (0,5 – 10 mm), které jsou vyrobeny z čistého wolframu nebo z wolframu obohaceného o oxidy, které zvyšují emisi elektronů z elektrody (ZrO_2, ThO_2, LaO_2, CeO_2), tím zlepšují zapálení a stabilizaci elektrického oblouku. Oxidy také zvyšují celkovou životnost elektrody. Wolfram se využívá z důvodu vysoké teploty tavení T_t = 3400 °C.

Povrch broušených elektrod musí být čistý, kovově lesklý, bez trhlin a rýh. Volba typu elektrody závisí na druhu použitého proudu a oblasti použití.

3.2.4. Ochranné plyny

Pro ochranou atmosféru se používají nejčastěji Argon (Ar) a Helium (He) o různých vzájemných poměrech a různých čistotách.

Argon je nejčastěji používaný plyn, je těžší než vzduch, má malou tepelnou vodivost a nízkou ionizační energii, takže usnadňuje zapálení a stabilizaci hoření elektrického oblouku. Používá se argon o různých čistotách (99,7 – 99,999%), nečistoty v plynu jsou dusík, kyslík, vodík a vlhkost. Každá z těchto nechtěných příměsí ovlivňuje vzhled a výsledné vlastnosti svaru.

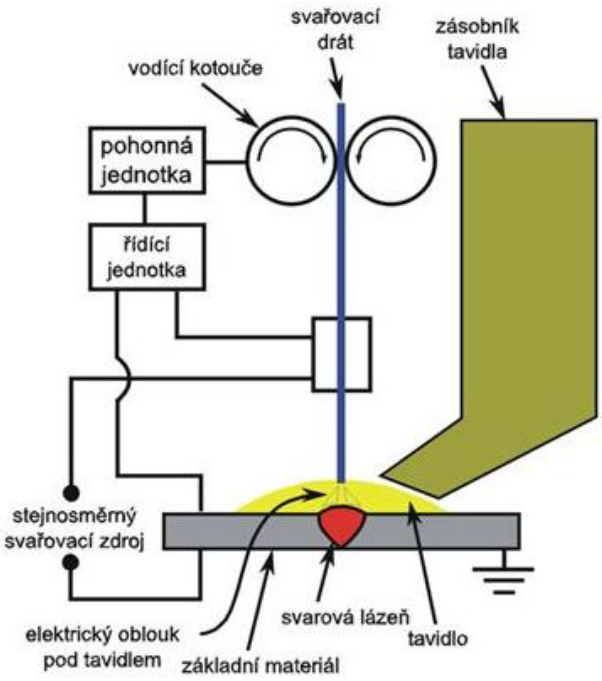
Helium je lehčí než vzduch, což negativně ovlivňuje ochranu svarové lázně. Dále má nízkou ionizační schopnost, a proto vyžaduje vyšší napětí na vytvoření oblouku než argon. Poskytuje ale vysoký tepelný výkon a tím i zvyšuje produktivitu procesu. Helium se využívá v čistotách (99,996 – 99,999%) a jako jednosložkový ochranný plyn se používá velmi omezeně, při většině aplikací se používá ve směsi s argonem.

3.3. SAW

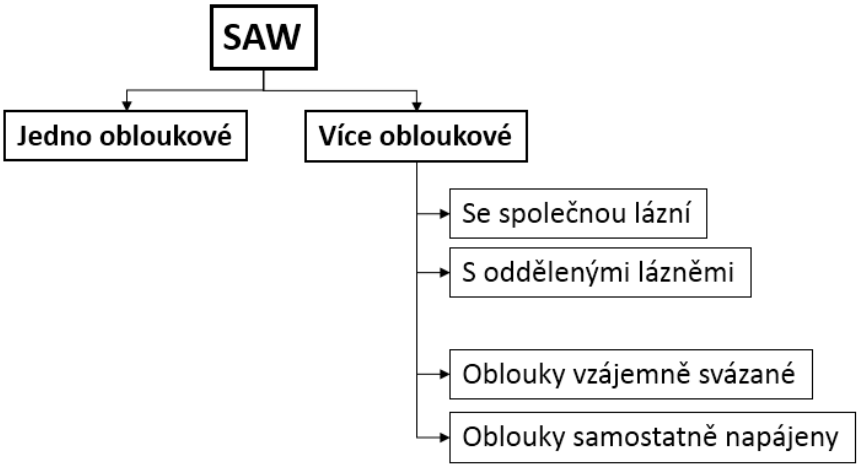
Svařování pod tavidlem představuje jednu z nejrozšířenějších metod využívaných pro mechanizované způsoby svařování. Využívá se především pro větší svařované tloušťky, pro svařování dlouhých a nepřerušovaných svarů a dále při svařování obvodových svarů u větších průměrů. [5]

3.3.1. Princip metody

Svařování pod tavidlem je elektrický obloukový proces, při kterém elektrický oblouk hoří pod vrstvou tavidla a postupným tuhnutím roztavené kovové lázně dochází ke spojení svařovaných dílů viz Obrázek 11. V důsledku hoření oblouku dochází k tavení tavidla a vzniklé plyny chrání svarovou lázeň před okolní atmosférou. Způsoby svařování pod tavidlem můžeme dělit dle Obrázku 12.



Obrázek 11: Svařování pod tavidlem [10]



Obrázek 12: Způsoby svařování pod tavidlem

Svařování pod tavidlem má tyto výhody:

a) Zvýšení produktivity práce až 10násobně proti ručnímu svařování
b) Zvýšení kvality svaru

A tyto nevýhody:

a) Vyšší požadavky na přípravu a montáž ke svařování
b) Není možnost přímého sledování svarové lázně (okamžitá korekce)

3.4.1. Materiály pro svařování

Materiály pro svařování jsou tavidla, svařovací dráty a páskové elektrody. Tyto materiály mají výrazný vliv na celkový výsledek procesu. Kombinace přídavných svařovacích materiálů musí být volena tak, aby se dosáhlo optimálního složení svarového kovu, které se bude blížit co nejvíce k chemickému složení základního materiálu.

Jako svařovací dráty používáme buď za studena tažený drát s lesklým povrchem nebo plněné elektrody. Pomocí plněné elektrody lze výrazně ovlivnit chemické složení svarové lázně.

4. Svařitelnost

Svařitelnost je schopnost materiálu vytvořit svarový spoj o požadovaných vlastnostech. Svařitelnost úzce souvisí se svařovaným materiálem, použitou technologií a konstrukcí svarového spoje.

V dalších částech kapitoly je pojednáno o množství vlivů, které výrazně ovlivňují svařitelnost a výslednou kvalitu svarového spoje.

4.1. Teplotně-časový cyklus

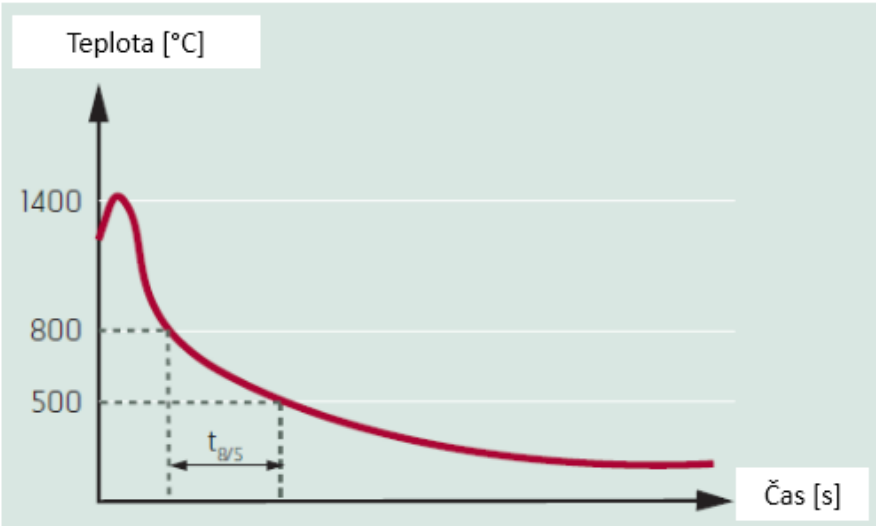
Proces svařování vystavuje svar a jeho okolí lokálnímu tepelnému zpracování a z toho důvodu spoj a jeho okolí obsahuje různou krystalickou strukturu a dosahuje jiných mechanických vlastností než neovlivněný základní materiál.

Na mechanické vlastnosti svarového spoje mají významný vliv teplotně-časové cykly při svařování, které jsou ovlivňovány především tloušťkou materiálu, typem svaru, tepelným příkonem (parametry svařování), metodou svařování a teplotou předehřevu.

4.1.1. Popis teplotního cyklu

Teplotní cyklus lze hodnotit pomocí parametru $t_{8/5}$, který představuje dobu ochlazení svarového spoje z 800 °C na 500°C.

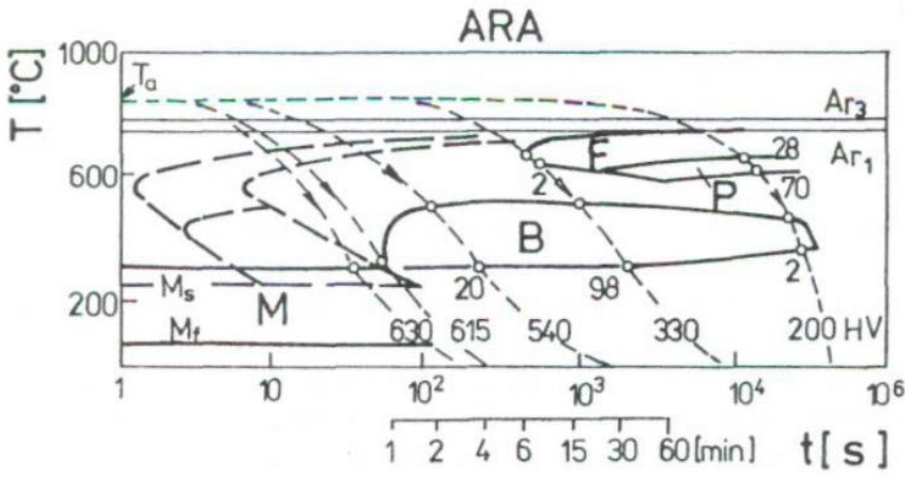
Křivka chladnutí svarového spoje s naznačeným $t_{8/5}$ viz Obrázek 13.



Obrázek 13: definice $t_{8/5}$ [11]

Pomocí tohoto parametru je možné vyhodnotit možnou přítomnost křehké zákalné struktury. V případě velmi krátké doby ochlazení může ve svarovém spoji vzniknout martenzitická struktura viz Obrázek 14, který je u svarových spojů nežádoucí, právě z důvodu nevyhovujících mechanických vlastností a možnosti vzniku prasklin za studena.

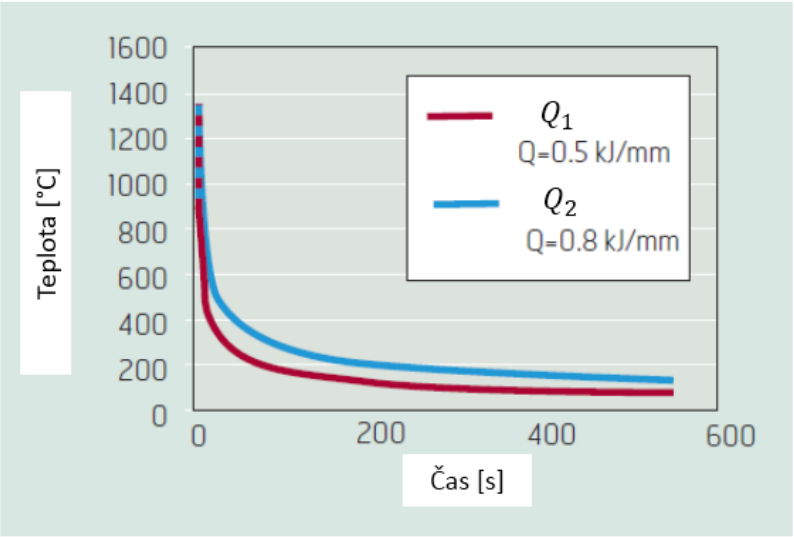
Na Obrázku 15 je plnými čarami vyznačen ARA diagram pro legovanou podeutektoidní ocel a čárkovanými čarami eutektoridní uhlíková ocel. Z odlišných tvarů lze usoudit, že legovaní má výrazný vliv na kinetiku krystalické transformace.



Obrázek 14: ARA diagram [12]

V případě optimalizace procesu z důvodu dosažení požadovaného $t_{8/5}$ např. dodavatel základních materiálů SSAB doporučuje výsledný $t_{8/5}$ pouze počítat, přímé měření je obtížné a je zdrojem mnoha problémů, které mohou ovlivnit naměřenou hodnotu.

Na Obrázku 15 je znázorněn vliv použitého tepelného příkonu na průběh teplotního cyklu svaru pro tupý V svar plechu o tloušťce 5 mm, vytvořený technologii MAG bez předehřevu. Můžeme si všimnout, že pokud je zvýšen tepelný příkon, tak se prodluží teplotní cyklus svaru.

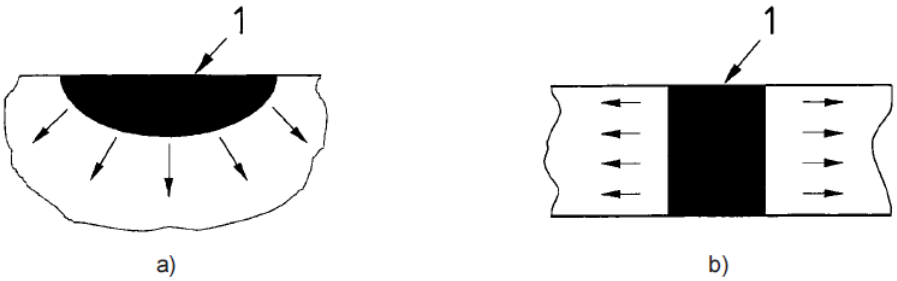


Obrázek 15: Vliv tepelného příkonu na teplotní cyklus [11]

4.1.2. Výpočet teplotního cyklu

Pro výpočet doby $t_{8/5}$ pro oceli značky Weldox doporučuje dodavatel oceli SSAB použít výpočetní program WeldCalc, kterým se budu zabývat v praktické části.

Čas $t_{8/5}$ lze ale také určit dle normy ČSN EN 1011-2. Při výpočtu dle normy je nejprve potřeba určit, zda v průběhu vytváření svarového spoje jde o dvou anebo třírozměrný tepelný tok viz Obrázek 16.



Legenda

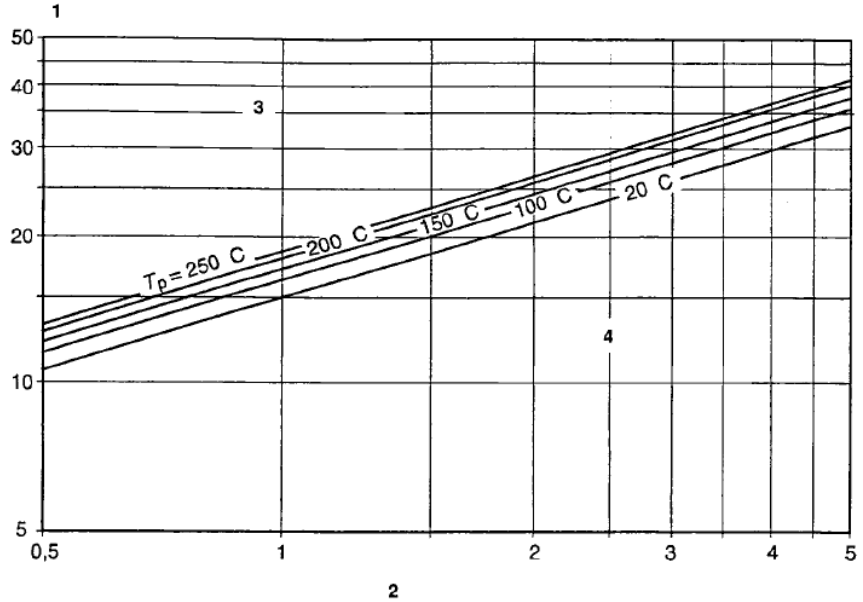
1 Svarová housenka

a) Trojrozměrný tepelný tok
Relativně tlustý plech; tloušťka plechu neovlivňuje dobu ochlazování

b) Dvojrozměrný tepelný tok
Relativně tenký plech; tloušťka plechu má rozhodující vliv na dobu ochlazování

Obrázek 16. Druhy tepelných toků [13]

Dvourozměrný tepelný tok se vykytuje u menších tlouštěk materiálu a hodnota času $t_{8/5}$ je závislá také na tloušťce základního materiálu. V případě třírozměrného toku, který se vyskytuje u větších tlouštěk materiálů, $t_{8/5}$ již není závislá na tloušťce materiálu. Dalším vlivem je tepelný příkon procesu a použitá teplota předehřevu. Vzájemnou závislost pro určení typu toku viz Obrázek 17:

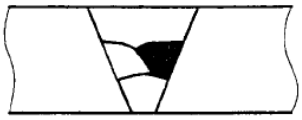
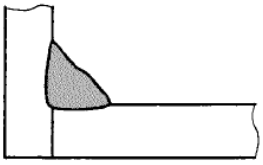
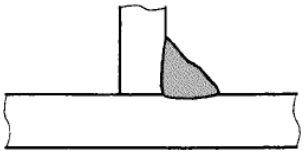


Legenda

1 Přechodová tloušťka d_t (mm)
2 Tepelný příkon (kJ/mm)
3 Trojrozměrný tepelný tok
4 Dvojrozměrný tepelný tok

Obrázek 17: Diagram pro určení typu tepelného toku [12]

Po určení typu tepelného toku je potřeba určit ještě tvarový součinitel svaru, který později využijeme do vzorce pro výpočet doby $t_{8/5}$. Norma ČSN EN 1011-2 uvádí pouze čtyři typy svarů, avšak s rozdílnými součiniteli pro dvou a tří rozměrný tok viz Obrázek 18.

Tvar svaru		Součinitel tvaru F_2 dvojrozměmý tepelný tok	Součinitel tvaru F_3 trojrozměrný tepelný tok
Svarová housenka na plechu		1,0	1,0
Mezi housenkami u tupých svarů		0,9	0,9
Jednovrstvý koutový svar na koutovém spoji		0,9 až 0,67	0,67
Jednovrstvý koutový svar na T-spoji		0,45 až 0,67	0,67

Obrázek 18: tvarový součinitel svaru [12]

Po určení typu tepelného toku a svarového součinitele lze vypočítat přibližnou hodnotu t8/5 pomocí vztahů uvedených ve výše zmíněné normě.

Vztahy pro výpočet $t_{8/5}$ pro:

a) Trojrozměrný tepelný tok

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot T_0) \cdot Q \cdot \left(\frac{1}{500-T_0} - \frac{1}{800-T_0}\right) \cdot F_3$$

b) Dvourozměrný tepelný tok

$$t_{8/5} = (4300 - 4{,}3 \cdot T_0) \cdot 10^2 \cdot \frac{Q^2}{d^2} \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0}^{\ 2} - \frac{1}{800 - T_0}^{\ 2}\right) \cdot F_2$$

Kde Q [kJ/mm] je tepelný příkon, T_0 [°C] je teplota předehřevu, d [mm] je tloušťka materiálu a F_i [/] je zvolený tvarový součinitel.

Dobu ochlazování $t_{8/5}$ pro definovaný příkon nebo příkon pro definovaný $t_{8/5}$ můžeme určit dle diagramů uvedených v normě ČSN EN 1011-2. Tyto digramy jsou platné pro svarovou housenku na plechu a v případě jiných typů svarů, je potřebovat počítat se součinitelem tvaru. Diagramy vychází z výše uvedených výpočetních vztahů pro určení doby ochlazování.

4.2. Uhlíkový ekvivalent

Hranice zaručené svařitelnosti bývá uváděna jako 0,2 hm. % C v základním materiálu pro nelegované oceli. Větší obsah uhlíku zvyšuje náchylnost ke vzniku trhlin za studena. K hodnocení svařitelnosti pro oceli s různým chemickým složením se používá tzv. uhlíkový ekvivalent. Vzorců pro výpočet uhlíkového ekvivalentu je více, například CE, CET, CEV, každý z nich je definován pro jiný typ oceli. V závislosti na použitém vzorci pro výpočet má na hodnotu uhlíkového ekvivalentu vliv také tloušťka základního materiálu.

Normy ČSN EN 10025-3 a ČSN EN 10025-6+A1, které definují vlastnosti ocelí, použitých pro tuto diplomovou práci, uvádí požadavek na hodnotu CEV (Maximální hodnota uhlíkového ekvivalentu stanovená z rozboru tavby). Z tohoto důvodu je uveden pouze výpočet uhlíkového ekvivalentu CEV dle ČSN EN 10025-1.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{6} + \frac{Cu+Ni}{15} \ [\%]$$

Hodnota uhlíkového ekvivalentu pro zadanou ocel S355NL musí být dle ČSN10025-3 nižší než CEV = 0,43 a pro ocel S960QL musí být dle ČSN10025 – 6 nižší než CEV = 0,82.

4.3. Tepelný příkon

Tepelný příkon (Q [kJ /mm]) je specifikován ČSN EN 1011-1 a specifikuje teplo vnesené do materiálu při jednom průchodu svařovacího hořákem. Definuje množství tepla na jednotku délky svaru.

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \ [\frac{kJ}{mm}]$$

Kde :

- Q - tepelný příkon [kJ/mm]
- k – tepelná účinnost metody [/]
- U – napětí oblouku, měřené co možno nejblíže oblouku [V]
- I – svařovací proud [I]
- v – rychlost svařování [mm/s]

Z uvedeného vztahu je zřejmé, že tepelný příkon je technologický parametr a nezávisí na svařovaném materiálu. Tepelný příkon ovlivňuje zvolená metoda svařování, pracovní parametry a rychlost svařování.

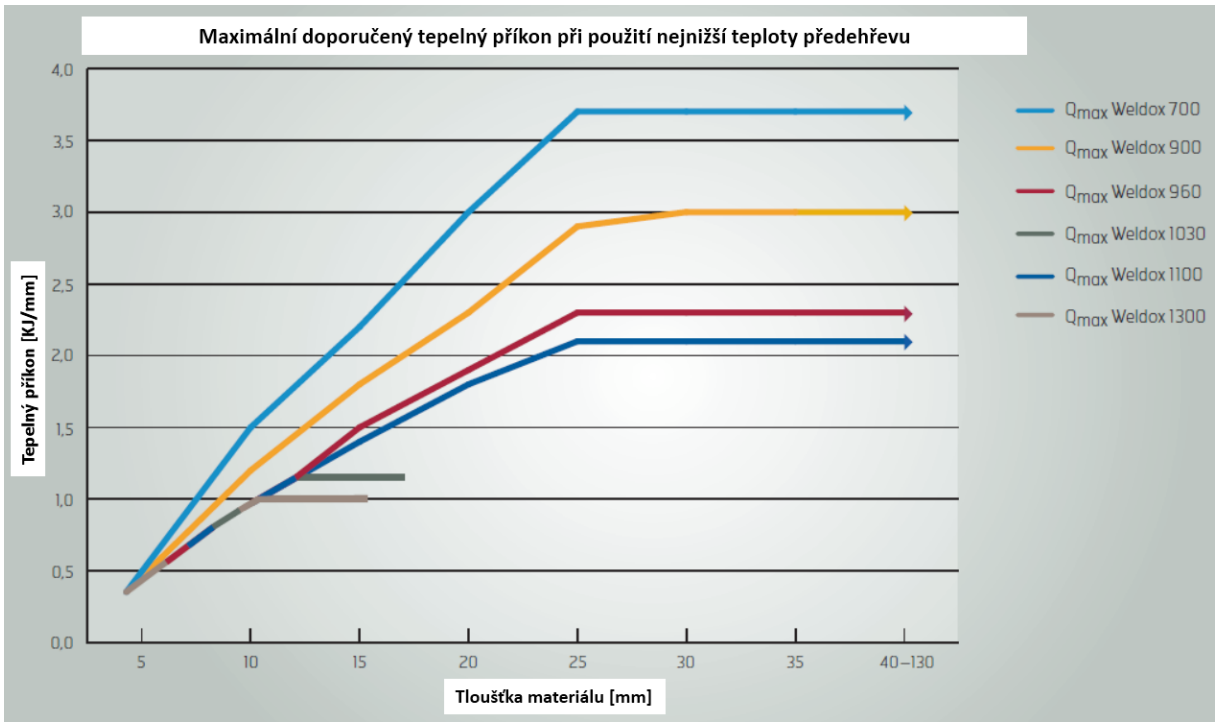
Znalost hodnoty tepelného příkonu společně s uhlíkovým ekvivalentem je velmi důležitá pro volbu teploty předehřevu.

Přehled tepelných účinností pro jednotlivé metody svařování uvádím v Tabulce 1.

Tabulka 1: Přehled účinností jednotlivých metod svařování [13]

Číslo metody	Metoda svařování	*k*
12	svařování pod tavidlem	1,0
111	ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	0,8
131	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu; MIG svařování	0,8
135	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu; MAG svařování	0,8
114	obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu	0,8
136	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,8
137	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,8
141	obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu; TIG svařování	0,6
15	plazmové svařování	0,6

Při svařování jemnozrnných ocelí vyšších pevností je dodavatelem ocelí definován maximální tepelný příkon při svařování pro zachování mechanických vlastností. Jako příklad uvádím doporučení dodavatele SSAB pro svařování ocele značky Weldox, viz Obrázek 19.



Obrázek 19: Maximální doporučený tepelný příkon [11]

Na obrázku si můžeme všimnout, že oceli vyšších pevností se musí svařovat nižším tepelným příkonem z důvodu snahy o minimální negativní ovlivnění materiálu v tepelně ovlivněné oblasti a pro dosažení požadované hodnoty času t8/5.

4.4. Tepelně ovlivněná oblast

Tepelně ovlivněná oblast (TOO) začíná na hranici svarového kovu, kde dojde jen k částečnému natavení základního materiálu, viz Obrázek 21.

Svařovací proces ovlivňuje různě rozdílné části základního materiálu v závislosti na vzdálenosti od svarového kovu, každá z částí TOO podstupuje rozdílné tepelné ovlivnění. Z toho důvodu svarový kov vykazuje rozdílné mechanické vlastnosti a obsahuje rozdílnou strukturu v příčném průřezu spojem.

TOO může být rozdělena do oblastí v závislosti na podobnosti struktury a dosahovaných mechanických vlastnostech. Těmito oblastmi jsou:

a) Přehřátá oblast – začíná na hraně svarového kovu, kde dochází k ohřevu základního materiálu na rozmezí teplot 1 500 – 1 100°C a tím i k vytvoření podmínek pro růst austenitického zrna. Vhodným chemickým složením materiálu může dojít k vytvoření karbidů stabilních za vysokých teplot (mikrolegované oceli - Al, Nb, Ti), které mohou zabraňovat migraci hranice zrna a tím i zamezit výraznému zvětšení zrna. Velikost zrna oceli se může zvětšit 5 – 15x oproti základnímu neovlivněnému materiálu, což výrazně ovlivní pevnost a houževnatost oblasti. Z toho důvodu tato oblast vykazuje nejnižší houževnatost z celého spoje. Oblast jde zúžit použitím nižšího tepelného příkonu. [10]

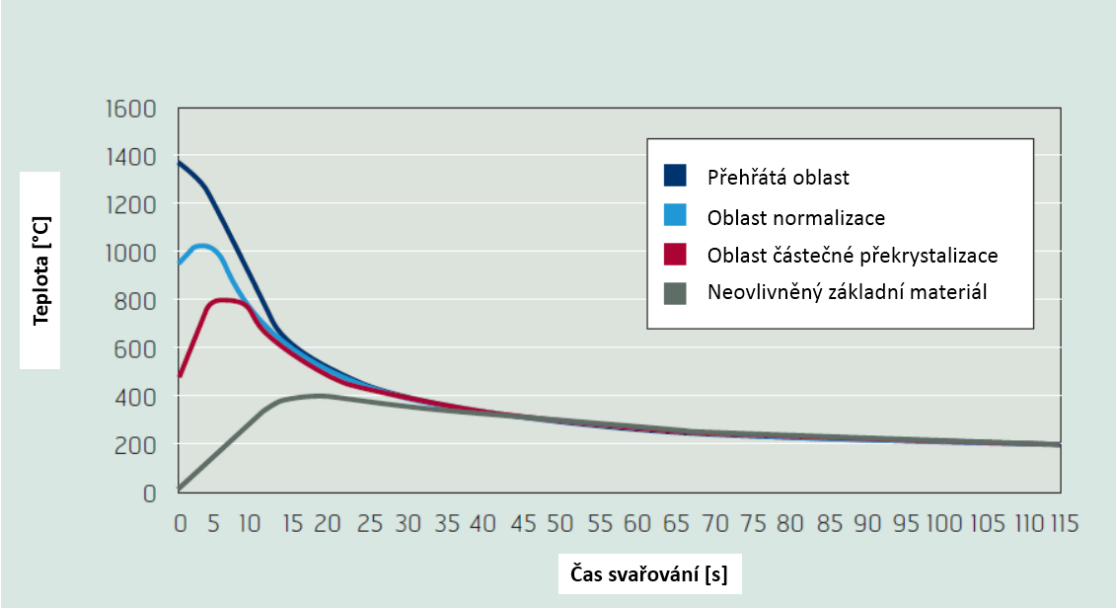
b) Oblast normalizace – tato oblast navazuje na přehřátou oblast, v této oblasti došlo k ohřátí materiálu na teploty mezi 1 100 – 900 °C a tím ke krystalické transformaci a ke vzniku symetrické jemnozrnné struktury – normalizačnímu žíhání. Tato oblast má nejlepší houževnatost z celého svarového celku.[10]

c) Oblast částečné překrystalizace – v této oblasti došlo k částečné fázové transformaci a tím i k částečnému normalizačnímu žíhání.[10]

d) Vyžíhaná oblast – v oblasti došlo k žíhání ke snížení pnutí, vykazuje dobré únavové vlastnosti.[10]

e) Neovlivněný základní materiál – oblast není ovlivněna svařovacím procesem.

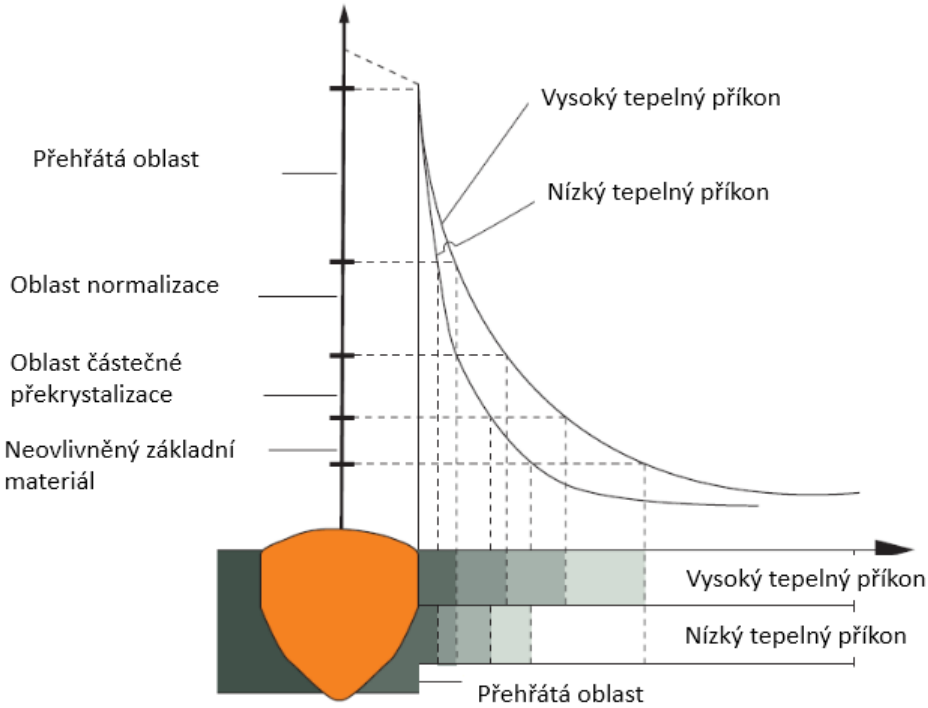
Tepelně ovlivněná oblast je rozdílná pro dvourozměrný a třírozměrný tepelný tok. Ke třírozměrnému tepelnému toku dochází při svařování větších tlouštěk materiálu - při vícevrstvém svaru. Při tomto typu svaru dochází při průchodu hořáku při umístění další svarové housenky k vyžíhání předešlých housenek. Každá z tepelně ovlivněných oblastí má svůj teplotní cyklus. Příklad cyklů pro jednotlivé oblasti je uveden na Obrázku 20.



Obrázek 20: Teplotní cyklus částí TOO [11]

4.4.1. Velikost tepelně ovlivněné oblasti

Velikost tepelně ovlivněné závisí na použitém tepelném příkonu, předehřevu, metodě svařování, podmínkách svařování a na fyzikálních vlastnostech základního materiálu. Jako příklad uvádím velikost tepelně ovlivněné oblasti v závislosti na tepelném příkonu, viz Obrázek 23.



Obrázek 21: Vliv tepelného příkonu na velikost TOO [11]

Z obrázku 21 můžeme vyčíst, že s vyšším použitým tepelným příkonem se velikost TOO zvětšuje.

4.5. Houževnatost a tvrdost tepelně ovlivněné oblasti

U ocelí může v závislosti na chemickém složení a na teplotním cyklu dojít k vytvoření zákalné struktury a tím i ke zvýšení náchylnosti k prasklinám za studena. Výsledná tvrdost a houževnatost svarového spoje úzce souvisí s hodnotou $t_{8/5}$.

Doporučené rozpětí $t_{8/5}$ je dáno dodavatelem základního materiálu a případně může být zúženo interními předpisy či požadavky zákazníka. Obvyklá hodnota $t_{8/5}$ se pohybuje mezi 10 s a 25 s. Výsledná doba $t_{8/5}$ závisí hlavně na přechodové tloušťce, tepelném příkonu a teplotě předehřevu. Pro ocel třídy značky Weldox 960 výrobce doporučuje čas $t_{8/5}$ v rozmezí 5-15 s viz Obrázek 22.

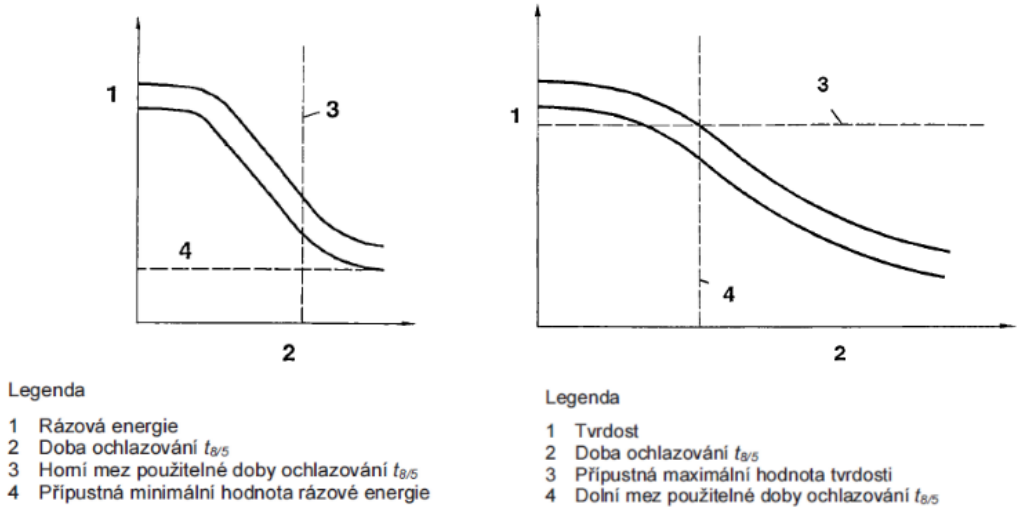
Třída oceli	Doporučená hodnota t8/5
Weldox 700	5-25 s
Weldox 900	5-20 s
Weldox 960 - Weldox 1300	5-15 s

Obrázek 22: Doporučení hodnota $t_{8/5}$ [11]

Doba ochlazení mezi těmito teplotami je velmi důležitá kvůli zachování dostatečných mechanických vlastností spoje a pro zamezení vzniku nežádoucích porušení celistvosti spoje.

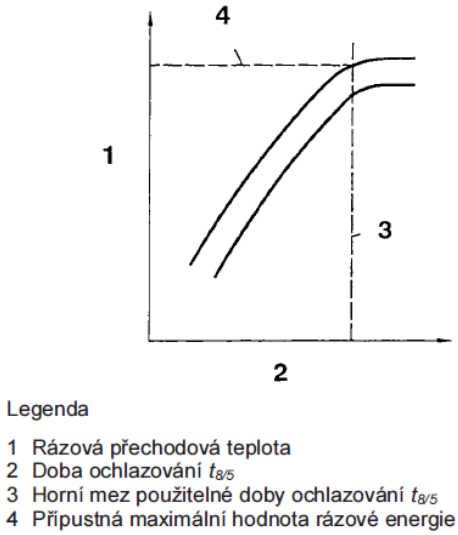
Při velmi krátké době $t_{8/5}$ může dojít ve svarovém spoji ke vzniku zákalných struktur a tím i k výraznému poklusu houževnatosti svarového materiálu viz levá část Obrázku 23.

Pokles houževnatosti svaru je nepřijatelný. Svarový spoj musí vykazovat lepší mechanické vlastnosti než základní materiál neovlivněný svařovacím procesem. V případě tvorby martenzitu v oblasti svarového spoje dochází ke vzniku výrazného vnitřního pnutí a společně s obsahem vodíku ve struktuře materiálu může dojít k napětí, které přesahuje pevnost materiálu a může dojít k vodíkovému praskání – praskání za studena. V souvislosti se vznikem martenzitu ve svarovém spoji výrazně stoupne tvrdost, viz pravá část Obrázku 25.



Obrázek 23: Vliv $t_{8/5}$ na houževnatost a tvrdost spoje [13]

Při velmi dlouhé době $t_{8/5}$ může dojít v tepelně ovlivněné oblasti k výraznému růstu austenitického zrna a tím po ochlazení k celkovému zhrubnutí zrna, k výrazné ztrátě pevnosti, houževnatosti a růstu tranzitní teploty viz Obrázek 24.



Obrázek 24: Vliv $t_{8/5}$ na přechodovou teplotu [13]

Z uvedených závislostí je zřejmé, že čas $t_{8/5}$ je důležitý parametr pro hodnocení kvality svarového spoje a úzce souvisí s výslednými vlastnostmi spoje.

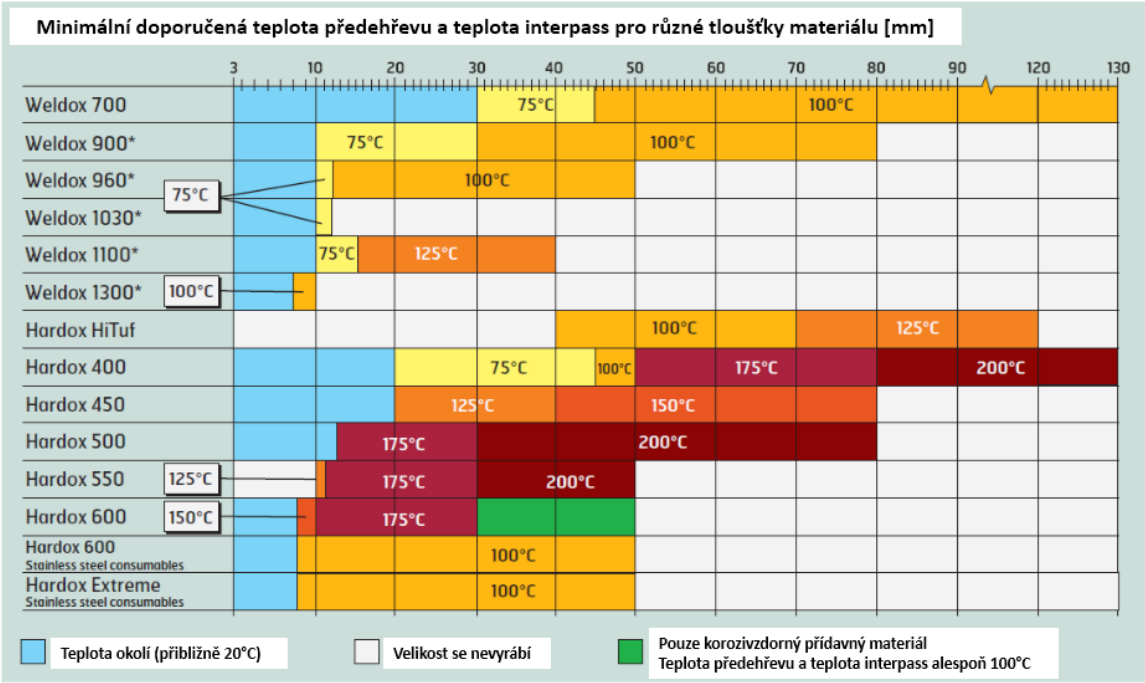
4.6. Předehřev materiálu

Z důvodu eliminace vzniku trhlin za studena (vodíkové praskání) a ovlivnění času $t_{8/5}$ se provádí předehřev materiálu před svařovacím procesem. Předehřev má zajistit snížení rychlosti ochlazování svarové lázně a také podporuje difúzi vodíku ze svarového spoje do atmosféry.

Difuze je exponenciálně závislá na teplotě, a proto udržení vyšší teploty svarového spoje má pozitivní dopady na obsah atomárního vodíku.

Teplota předehřevu se volí dle uhlíkového ekvivalentu, tloušťky materiálu, použitého tepelného příkonu a zkušeností.

Doporučené teploty předehřevu jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 1011-2, dále jsou doporučeny výrobcem základního materiálu nebo jsou specifikovány zákazníkem. Jako příklad uvádím doporučené hodnoty předehřevu pro oceli značky Weldox a Hardox od výrobce SSAB viz Obrázek 25.



Obrázek 25: Doporučené hodnoty předehřevu [11]

Při předehřevu je důležité dosáhnout přesné teploty předehřevu. Pokud je teplota předehřevu příliš vysoká, může dojít k výraznému nárůstu $t_{8/5}$ a tím také k negativnímu ovlivnění mechanických vlastností.

4.7. Teplota interpass

Teplota interpass je teplota svařovaného materiálu na začátku pokládání další svarové housenky při vícevrstvém svařování. Tato teplota by neměla být nižší než teplota předehřevu.

Hodnota teploty interpass také výrazně ovlivňuje výslednou hodnotu času $t_{8/5}$. Při využití vyšší hodnoty interpass, stačí pro dosažení požadované hodnoty $t_{8/5}$ použít nižší tepelný příkon.

4.8. Vady svarových spojů

Chyby svarových spojů jsou definovány v normě ČSN EN ISO 5817.

Účelem této mezinárodní normy je definovat rozměry typických vad, které lze očekávat v běžné výrobě.

Tato mezinárodní norma určuje stupně kvality podle vad svarových spojů zhotovených tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) pro všechny druhy ocelí, niklu, titanu a jejich slitiny. Platí pro tloušťky materiálu větší než 0,5 mm. Zahrnuje plně provařené tupé svary a veškeré koutové svary. Zásady této mezinárodní normy lze také použít pro částečně provařené tupé svary.

*Norma uvádí tři stupně kvality, označené **B, C a D**, aby bylo možné použití pro širokou řadu svařovaných výrobků. Stupeň kvality **B** odpovídá nejvyššímu požadavku na kvalitu zhotoveného svaru.*

Při volbě stupně kvality pro jakékoliv použití se musí vzít v úvahu konstrukční důvody, navazující postupy (např. povrchová úprava), druhy namáhání (např. statické, dynamické), provozní podmínky (např. teplota, prostředí) a důsledky vad. Velmi důležité jsou také ekonomické faktory, které musí zahrnovat nejen náklady na svařování, ale také na kontroly, zkoušky a opravy. [15]

Pro kvalifikaci postupu svařování je potřeba, aby vzorek splnil požadavky stupně kvality B, proto dle ČSN EN ISO 5817 nesmí obsahovat trhliny, kráterové trhliny, povrchový pór, kráterovou staženinu, studený spoj, neprovařený kořen, souvislý zápal, vruby v kořeni, přetečení, proláklinu, hubený kořen, vadné napojení svaru, podkročení a překročení velikosti svaru.

4.9. Metody kontroly svarových spojů

Po vytvoření svarového spoje je velmi důležité provést kontrolu celistvosti svaru, chyb svaru a mechanických vlastností. Pro tyto kontroly existuje několik metod, vybrané metody uvedené v této práci se týkají vyhodnocení svaru v praktické části. Všechny metody kontroly svarů jsou detailně popsány v normě ČSN EN ISO 17 635.

Základní dělení metod kontroly svarových spojů je na kontroly nedestruktivní a kontroly destruktivní.

Pro provádění jakýchkoli kontrol svarových spojů je potřeba využít proškolený a certifikovaný personál. Tyto požadavky jsou popsány v normě ČSN EN ISO 9712.

4.9.1. Kvalifikace dle ČSN EN ISO 9712

Tato norma rozlišuje tři kvalifikační stupně. Každý stupeň kvalifikace opravňuje k jiným úkonům v rámci nedestruktivního testování. Stupně jsou určeny takto:

a) Stupeň 1

Osoba certifikovaná ve stupni 1 má prokázat odbornou způsobilost k provádění NDT metod podle písemných instrukcí a pod dohledem pracovníka certifikovaného ve stupni 2 nebo stupni 3.

V rozsahu odborné způsobilosti, definované v certifikátu, může pracovník certifikovaný ve stupni 1 pověřen zaměstnavatelem v souladu s NDT instrukcemi k:

- *Nastavení NDT zařízení.*
- *Provádění zkoušení.*

- *Zaznamenávání a klasifikování výsledků těchto zkoušek na základě písemných kritérií.*
- *Podávání zprávy o výsledcích.*

Pracovník certifikovaný ve stupni 1 nesmí být odpovědný za výběr zkušební metody nebo techniky, ani za interpretaci výsledků zkoušky. [16]

b) Stupeň 2

V rozsahu odborné způsobilosti, definované v certifikátu, může být pracovník certifikovaný ve stupni 2 pověřen zaměstnavatelem k:

- *Volbě NDT techniky pro zkoušení, která má být použita.*
- *Definování omezení při použití zkušební metody.*
- *Převádění NDT pravidel, norem, specifikací a postupů do NDT instrukcí .přizpůsobených aktuálním pracovním podmínkám.*
- *Nastavení a ověření nastavení zařízení.*
- *Provádění a dohledu nad zkouškami.*
- *Interpretace a vyhodnocení výsledků podle použitých norem, pravidel, specifikací nebo postupů.*
- *Provádění a dohledu všech činností ve stupni 2 nebo nižším než ve stupni 2.*
- *Poskytnutí vedení pro pracovníky ve stupni 2 nebo ve stupni nižším než ve stupni 2.*
- *Podávání zpráv o výsledcích NDT.* [16]

c) Stupeň 3

Osoba certifikovaná ve stupni 3 má odbornou způsobilost k provádění a řízení NDT činností pro které je certifikována. Pracovníci ve stupni 3 mají prokázat:

a) *Odbornou způsobilost vyhodnocovat a interpretovat výsledky podle platných norem, pravidel a specifikací.*
b) *Dostatečné praktické znalosti o používaných materiálech, výrobě, procesech a výrobkových technologií při volbě NDT metod, při určování NDT techniky a napomáhat při stanovení kritérií přípustnosti v případě, kdy nejsou jiné k dispozici.*
c) *Obecné znalosti o NDT metodách.*

V rámci rozsahu odborné způsobilosti stanovené v certifikátu, může být pracovník s certifikací stupně 3 pověřen k:

- *Převzetí plné odpovědnosti za zkušební zařízení nebo zkušební středisko a zaměstnance.*
- *Vypracování, přezkoumání formální a technické správnosti a validaci NDT instrukcí a postupů.*
- *Interpretaci norem, pravidel, specifikací a postupů.*
- *Určování konkrétních zkušebních metod, postupů a NDT instrukcí, které mají být použity.*

- *Provádění a dohlížení na všechny úkoly ve všech stupních.*
- *Poskytování vedení pracovníků NDT ve všech stupních.* [16]

Pro získání kvalifikace musí žadatelé splnit všechny podmínky specifikované v normě ČSN EN ISO 9712 a doložit výsledky oční lékařské prohlídky.

4.9.2. Nedestruktivní testování (defektoskopie)

Při nedestruktivním testování svarových spojů (NDT) nedochází k narušení celistvosti či ovlivnění vlastností spoje a materiálu a náklady na jejich provedení jsou relativně nízké. Tyto metody jsou vhodné na kontrolu spojů ve výrobě, neboť ihned po ukončení zkoušky je výrobek schopný provozu. Norma ČSN EN ISO 9712 rozděluje metody NDT viz Tabulka 2.

Tabulka 2: NDT metody a jejich značení [16]

NDT metoda	Zkratka
Zkoušení magnetické	MT
Zkoušení kapilární	PT
Zkoušení radiografické	RT
Zkoušení ultrazvukem	UT
Zkoušení vizuální	VT

4.9.3. Destruktivní testování

V průběhu destruktivního testování dochází k nevratnému poškození součásti, pomocí destruktivního testování se zjišťují mechanické vlastnosti výrobku a případné necelistvosti v průřezu svaru.

Mezi destruktivní testování patří zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu, zkouška ohybová, hodnocení průběhu tvrdosti a kontrola makrostruktury.

4.10. Kvalifikace postupu svařování (WPQR)

Při výrobě svařenců, kterými se zabývá diplomová práce je nutné před začátkem dodávání finálních výrobků zákazníkovi kvalifikovat svařovací proces. Po získání kvalifikace je výrobce oprávněn a otestován k výrobě svařenců, které jsou v rozsahu získané kvalifikace. Kvalifikací svařovacího procesu výrobce dokazuje schopnost vytvářet svarové spoje o požadovaných vlastnostech a o určité kvalitě provedení.

Pro kvalifikaci svařovacích postupu se využívá několik norem (např. ČSN EN ISO 15613, ČSN EN ISO 15614-1-A2, ČSN EN ISO 9018). Kvalifikace provedená podle uvedených norem musí zaručit dostatečnou kvalitu a bezpečnost svarových spojů a tím předejít případné nehodě či porušení celistvosti způsobené jednou z chyb svarového spoje. V diplomové práci se zabývám kvalifikací postupu svařování podle normy ČSN EN ISO 15614-1-A2.

Normy definují rozsahy kvalifikace pro jednotlivé typy svarů, a proto je potřeba při vytváření nové WPQR myslet na získaný rozsah viz Tabulka 3 a tím i snížení celkového množství nutných WPQR. Rozsahy kvalifikace jsou určeny rozměry, typem svaru, polohou, jakostí základního a přídavného materiálu a metodou svaření svařence.

Tupé svary

Rozměry v mm

Tloušťka zkušebního kusu t	Rozsah kvalifikace	
	Jednou housenkou	Více housenkami
$t \leq 3$	$0{,}7t$ až $1{,}3t$	$0{,}7t$ až $2t$
$3 < t \leq 12$	$0{,}5t$ (3 min.) až $1{,}3t$[a]	3 až $2t$[a]
$12 < t \leq 100$	$0{,}5t$ až $1{,}1t$	$0{,}5t$ až $2t$
$t > 100$	Není použitelná	50 až $2t$

[a] Pokud nebyly prováděny žádné zkoušky rázem v ohybu a byly stanoveny požadavky na nárazovou práci, platí jako horní mez kvalifikace 12 mm.

Koutové svary

Rozměry v mm

Tloušťka zkušebního kusu t	Rozsah kvalifikace		
	Tloušťka materiálu	Velikost koutového svaru	
		Jednou housenkou	Více housenkami
$t \leq 3$	$0{,}7t$ až $2t$	$0{,}75a$ až $1{,}5a$	Bez omezení
$3 < t < 30$	$0{,}5t$ (3 min.) až $1{,}2t$	$0{,}75a$ až $1{,}5a$	Bez omezení
$t \geq 30$	≥ 5	[a]	Bez omezení

POZNÁMKA 1 a je nejmenší nosný průřez svaru použitý na zkušebním kusu

POZNÁMKA 2 Tam, kde je koutový svar kvalifikován zkouškou tupého svaru, vychází rozsah kvalifikace velikosti koutového svaru z tloušťky navařeného svarového kovu.

[a] pouze pro speciální použití. Každá velikost koutového svaru musí být zkoušena samostatně zkouškou postupu svařování.

Svařování trubek

Rozměry v mm

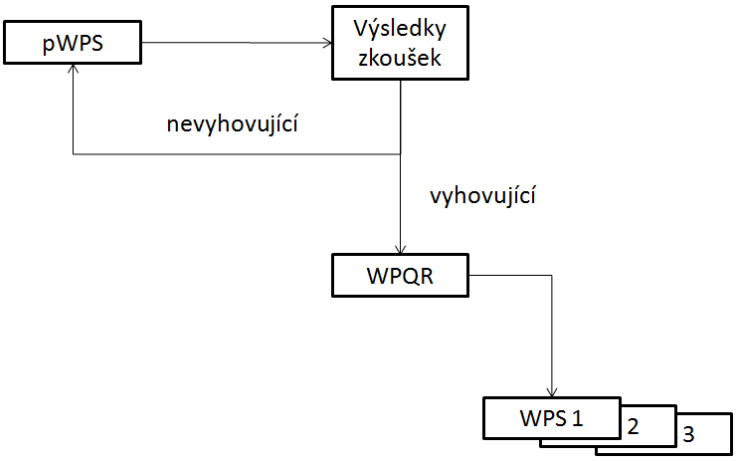
Průměr zkušebního kusu D [a], mm	Rozsah kvalifikace
$D \leq 25$	$0{,}5D$ až $2D$
$D > 25$	$\geq 0{,}5D$ (25 mm min.)

POZNÁMKA Pro konstrukční duté profily je D rozměr kratší strany.

[a] D je vnější průměr trubky nebo vnější průměr trubky odbočky.

Tabulka 3: Rozsahy kvalifikací pro jednotlivé typy svarů [17]

Kvalifikace postupu svařování dle normy se skládá z návrhu postupu svařování pWPS, svaření vzorového kusu zvoleného dle rozsahů normy ČSN EN ISO 15614-1-A2, za přítomnosti třetí nezávislé strany a následného vyhodnocení svarového spoje opět třetí nezávislou stranou. Po kladném vyhodnocení vzorku zkoušky postupu svařování lze na základě WPQR vytvořit pracovní instrukce pro svařování WPS viz Obrázek 26.



Obrázek 26: Schéma kvalifikace postupu svařování [6]

V případě, že zkušební vzorek nevyhoví všem požadavkům na kvalitu definovaných v ČSN EN ISO 15614-1-A2, je potřeba vytvořit nový vzorek, který již bude mít požadované vlastnosti. Kvalifikaci postupu svařování nelze získat bez splnění všech požadavků normy viz Tabulka 4.

Tabulka 4: Požadavky pro kvalifikaci postupu svařování [17]

Zkušební kus	Druh zkoušky	Rozsah zkoušení	Poznámka
Tupý spoj s plným průvarem – obrázek 1 a obrázek 2	Vizuální kontrola	100 %	-
	Radiografická nebo ultrazvuková zkouška	100 %	a
	Zkouška na povrchové trhliny	100 %	b
	Příčná zkouška tahem	2 vzorky	-
	Příčná zkouška lámavosti	4 vzorky	c
	Zkouška rázem v ohybu	2 sady	d
	Zkouška tvrdosti	požadována	e
	Kontrola makrostruktury	1 vzorek	-
T-spoj s plným průvarem – obrázek 3	Vizuální kontrola	100%	f
	Zkouška na povrchové trhliny	100%	b a f
	Radiografická nebo ultrazvuková	100%	a,f a g
Přípoj odbočky s plným průvarem obrázek 4	Zkouška tvrdosti	požadována	e a f
	Kontrola makrostruktury	2 vzorky	f
Koutové svary – obrázek 3 a obrázek 4	Vizuální kontrola	100%	f
	Zkouška na povrchové trhliny	100%	b a f
	Zkouška tvrdosti	požadována	e a f
	Kontrola makrostruktury	2 vzorky	f

[a] Ultrazvuková zkouška nemusí být použita pro $t < 8$ mm a pro materiály skupin 8, 10, 41 až 48

[b] Kapilární zkouška nebo magnetická prášková zkouška. Pro nemagnetické materiály kapilární zkouška.

[c] Pro zkoušky lámavosti, viz 7.4.3

[d] Jedna sada ve svarovém kovu a jedna sada v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) pro materiály s tloušťkou ≥ 12 mm, které mají stanoveny rázové vlastnosti. Výrobkové normy mohou požadovat zkoušky rázem v ohybu při tloušťkách pod 12 mm. Zkušební teplota musí být určena výrobcem s ohledem na použití nebo výrobkovou normu, ale nesmí být nižší než je stanovena pro základní materiál. Pro dodatečné zkoušky viz 7.4.5.

[e] Není požadována pro základní materiály: podskupina 1.1 a skupiny 8, 41 až 48

[f] Zkoušky neposkytují podrobné údaje o mechanických vlastnostech spoje. Kde však jsou tyto vlastnosti důležité pro použití, musí být získány doplňkovou kvalifikací, například kvalifikací tupého svaru.

[g] Pro vnější průměr ≤ 50 mm není ultrazvuková zkouška požadována.

Pro vnější průměr > 50 mm a tam, kde není technicky možné provést ultrazvukovou zkoušku, musí být provedena radiografická zkouška za předpokladu, že takové uspořádání spoje poskytne smysluplné výsledky.

5. Praktická část

5.1. Kvalifikace postupu svařování koutového svaru S355NL

5.1.1. Zadané požadavky

Společnost Schäfer – Menk s.r.o. požadovala kvalifikaci postupu svařování dle ČSN EN ISO 15614-1-A2 pro jednovrstvý koutový svar na přírubě materiálu S355NL s následnou platnou kvalifikací pro co největší rozsah tlouštěk materiálů, avšak začínající na tloušťce t = 3 mm a velikostí koutového svaru a3 mm.

5.1.2. Základní materiál

Základním materiálem plechu byl S355NL. Z rozboru tavby č. 22723 je uvedeno chemické složení viz Tabulka 5 a mechanické vlastnosti viz Tabulka 6.

Tabulka 5: Chemické složení S355NL

Chemické složení - S355NL													
C [max %]	Mn [max %]	Si [max %]	P [max %]	S [max %]	Cu [max %]	Ni [max %]	Cr [max %]	Mo [max %]	V [max %]	Ti [max %]	Al [max %]	N [max %]	Nb [max %]
0,17	1,42	0,36	0,013	0,003	0,01	0,05	0,02	0,01	0,005	0,003	0,037	0,004	0,036

Tabulka 6: Mechanické vlastnosti S355NL

Mechanické vlastnosti - S355NL				
Tloušťka t [mm]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A5 [%]	Rázová houževnatost při -50°C [J]
12	430	560	31,9	175

Základním materiálem trubky byl P355NL1. Z rozboru tavby č. 197335 je uvedeno chemické složení viz Tabulka 7 a mechanické vlastnosti viz Tabulka 8.

Tabulka 7: Chemické složení P355NL1

Chemické složení - P355NL1													
C [max %]	Mn [max %]	Si [max %]	P [max %]	S [max %]	Cu [max %]	Ni [max %]	Cr [max %]	Mo [max %]	V [max %]	Ti [max %]	Al [max %]	N [max %]	Nb [max %]
0,12	1,34	0,32	0,009	0,001	0,06	0,11	0,09	0,04	0,056	0,018	0,032	0,010	0,025

Tabulka 8: Mechanické vlastnosti P355NL1

Mechanické vlastnosti - P355NL1				
Tloušťka t [mm]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A5 [%]	Rázová houževnatost při -50°C [J]
4,6	415	531,5	31	48

Pro kontrolu, zda základní materiály – plech a trubka – splňují požadavky normy ČSN EN 10025-3, byly použity inspekční certifikáty 3.1. dle normy ČSN EN 10204 dodané společně s materiálem. Norma ČSN EN 10025-3, definuje pro materiál výrobku požadované chemické složení, mechanické vlastnosti a stav materiálu.

Inspekční certifikáty potvrdily správnost základního materiálu a lze jej použít pro vytvoření vzorku pro WPQR. Oba certifikáty jsou přiloženy jako Příloha 1 a Příloha 2 této práce.

5.1.3. Návrh svařence pro WPQR

Zkušební kus byl volen podle požadavků společnosti a předepsaných rozsahů kvalifikací uvedených v normě ČSN EN ISO 15614-1-A2 viz Tabulka 9.

Tabulka 9: Rozsahy kvalifikací [17]

Rozměry v mm

Tloušťka zkušebního kusu *t*	Rozsah kvalifikace		
	Tloušťka materiálu	Velikost koutového svaru	
		Jednou housenkou	Více housenkami
$t \leq 3$	0,7*t* až 2*t*	0,75*a* až 1,5*a*	Bez omezení
$3 < t < 30$	0,5*t* (3 min.) až 2*t*	0,75*a* až 1,5*a*	Bez omezení
$t \geq 30$	≥ 5	[a]	Bez omezení
POZNÁMKA 1 *a* je nejmenší nosný průřez svaru použitý na zkušebním kusu POZNÁMKA 2 Tam, kde je koutový svar kvalifikován zkouškou tupého svaru, vychází rozsah kvalifikace velikosti koutového svaru z tloušťky navařeného svarového kovu.			
[a] pouze pro speciální použití. Každá velikost koutového svaru musí být zkoušena samostatně zkouškou postupu svařování.			

Dle výše uvedených rozsahů a materiálových možností společnosti byl pro zkušební kus zvolen plech z materiálu S355NL o tloušťce t = 12 mm a trubka P355NL1 o průměru D = 33,7 mm a tloušťce t = 4,5 mm. Zvolil jsem velikost svaru a = 4 mm.

Při těchto zvolených parametrech svařence dosáhneme, po splnění všech požadavků, kvalifikaci pro rozsahy velikostí viz Tabulka 10.

Tabulka 10: Získaný rozsah kvalifikace

Rozsah kvalifikace			
Tloušťka materiálu	Průměr trubky [mm]	Velikost koutového svaru a [mm]	
		Jednou housenkou	Více housenkami
$2{,}25 \leq t_1 \leq 9$; $6 \leq t_2 \leq 24$	≥ 500	3 - 6	

5.1.4. Návrh pWPS pro WPQR

Koutový svar na trubce byl proveden dle Přílohy 3 - $pWPS_1$. Před začátkem svařování byly vytvořeny dva stehy v ose svařované trubky. Koutový svar byl proveden na dvě svarové housenky z důvodu snazšího přístupu pro svářeče a odstranění nutnosti rotovat se svařencem v průběhu svařování. Před položením druhé svarové housenky byly zbroušeny konce první housenky pro snazší napojení svaru, eliminaci studených spojů v napojení, či neprůvarů. Svar byl proveden bez předehřevu.

5.1.5. Svařování zkušebního kusu

Svařování bylo uskutečněno ve výrobních prostorách společnosti Schäfer – Menk s.r.o. za přítomnosti zkušebního komisaře, zastupující GSI-SLV Praha s.r.o. jako třetí stranu nutnou k získání WPQR. Před vytvořením stehů byly svařované části upnuty ke stolu. Stehy byly poté umístěny symetricky do osy svaru pro minimalizaci deformací viz Obrázek 27.

Obrázek 27: Příprava svaru

Okraje svarové housenky před položením další housenky byly zbroušeny, svarové housenky byly položeny bez předehřevu a kontroly teploty interpass. Zbroušené konce první housenky a výsledný svařený vzorek viz Obrázek 28.

Obrázek 28: Zbroušené hrany a hotový vzorek

5.1.6. Předepsané kontroly svaru dle ČSN 15614-1

Dle Tabulky 11 musí být na zkušebním svařenci vykonány tyto kontroly:

- Vizuální kontrola
- Zkouška na povrchové trhliny
- Zkouška tvrdosti dle Vickerse HV10
- Kontrola makrostruktury

Tabulka 11: Požadavky pro kvalifikaci postupu svařování [17]

Zkušební kus	Druh zkoušky	Rozsah zkoušení	Poznámka
Tupý spoj s plným průvarem – obrázek 1 a obrázek 2	Vizuální kontrola	100 %	-
	Radiografická nebo ultrazvuková zkouška	100 %	a
	Zkouška na povrchové trhliny	100 %	b
	Příčná zkouška tahem	2 vzorky	-
	Příčná zkouška lámavosti	4 vzorky	c
	Zkouška rázem v ohybu	2 sady	d
	Zkouška tvrdosti	požadována	e
	Kontrola makrostruktury	1 vzorek	-
T-spoj s plným průvarem – obrázek 3	Vizuální kontrola	100%	f
	Zkouška na povrchové trhliny	100%	b a f
	Radiografická nebo ultrazvuková	100%	a,f a g
Přípoj odbočky s plným průvarem obrázek 4	Zkouška tvrdosti	požadována	e a f
	Kontrola makrostruktury	2 vzorky	f
Koutové svary – obrázek 3 a obrázek 4	Vizuální kontrola	100%	f
	Zkouška na povrchové trhliny	100%	b a f
	Zkouška tvrdosti	požadována	e a f
	Kontrola makrostruktury	2 vzorky	f

[a] Ultrazvuková zkouška nemusí být použita pro $t < 8$ mm a pro materiály skupin 8, 10, 41 až 48

[b] Kapilární zkouška nebo magnetická prášková zkouška. Pro nemagnetické materiály kapilární zkouška.

[c] Pro zkoušky lámavosti, viz 7.4.3

[d] Jedna sada ve svarovém kovu a jedna sada v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) pro materiály s tloušťkou ≥ 12 mm, které mají stanoveny rázové vlastnosti. Výrobkové normy mohou požadovat zkoušky rázem v ohybu při tloušťkách pod 12 mm. Zkušební teplota musí být určena výrobcem s ohledem na použití nebo výrobkovou normu, ale nesmí být nižší než je stanovena pro základní materiál. Pro dodatečné zkoušky viz 7.4.5.

[e] Není požadována pro základní materiály: podskupina 1.1 a skupiny 8, 41 až 48

[f] Zkoušky neposkytují podrobné údaje o mechanických vlastnostech spoje. Kde však jsou tyto vlastnosti důležité pro použití, musí být získány doplňkovou kvalifikací, například kvalifikací tupého svaru.

[g] Pro vnější průměr ≤ 50 mm není ultrazvuková zkouška požadována.

Pro vnější průměr > 50 mm a tam, kde není technicky možné provést ultrazvukovou zkoušku, musí být provedena radiografická zkouška za předpokladu, že takové uspořádání spoje poskytne smysluplné výsledky.

Výsledky kontrol musí splňovat požadavky pro stupeň kvality B definovaný v ČSN EN ISO 5817, kromě nadměrného převýšení koutového svaru a překročení velikosti koutového svaru, ty mohou být ve stupni jakosti C. [17]

a) Vizuální kontrola

Vizuální metoda byla provedenou přímou metodou – zrakem. V prostoru kontroly byla dosažena hodnota osvětlení 550 lux. Kontrola byla provedena dle ČSN EN ISO 17637 a vyhodnocena dle ČSN EN ISO 5817.

Při vizuální kontrole přípravy spoje byl zkontrolován typ a rozměry základního materiálu, příprava a očištění svarových ploch a správné sestavení svařovacího vzorku. Výsledek kontroly byl vyhovující.

Při vizuální kontrole během svařování bylo kontrolováno správné pokládání jednotlivých housenek, vytvoření správného napojení svarových housenek a správné natavení základního materiálu. Výsledek všech jednotlivých zkoušek byl pozitivní, a proto byl svařený vzorek označen jako vyhovující.

Vizuální kontrolou dokončeného svaru jsme se soustředili na kontrolu profilu, rozměrů a povrchu výsledného svarového spoje. Pro měření profilu a rozměrů svaru byla použita měrka svaru se třemi stupnicemi. Pomocí měřidla byla měřena velikost svaru, převýšení svaru a rovnoměrná šířka svaru po celé jeho délce viz Obrázek 29.

Obrázek 29: Použité měřidlo a kontrola rozměrů svaru

Pro kontrolu povrchu svaru byla použita kapesní svítilna, kontrola povrchu vyhověla všem požadavkům.

Výsledek vizuální kontroly svarového vzorku je součástí výsledné WPQR, přiložené jako Příloha 4.

b) Zkouška na povrchové trhliny

Zkouška na povrchové trhliny byla prováděna penetrační metodou dle normy ČSN EN ISO 3452-1 a hodnocena dle normy ČSN EN ISO 23277. Penetrační zkouška byla provedena zkušebním komisařem z GSI-SLV Praha s.r.o. Svařený vzorek musí splňovat požadavky stupně kvality B definovaného v ČSN EN ISO 5817. Dle tabulky v ČSN EN ISO 17635 musíme vyhodnocovat zkoušku ve stupni přípustnosti 2 X viz Tabulka 12.

Tabulka 12: Stupeň přípustnosti pro kapilární metodu [19]

Stupně kvality podle ISO 5817 nebo ISO 10042	Techniky zkoušení a třídy podle ISO 3452-1	Stupně přípustnosti podle ISO 23277
B	Třída není stanovena	2 X
C		2 X
D		3 X

Stupeň přípustnosti 2X znamená, že lineární indikace musí být menší jak 2 mm a nelineární musí mít menší průměr jak 6 mm.

Provedená kapilární zkouška byla třída II C e viz Tabulka 13.

Tabulka 13: Značení zkušebních prostředků [21]

Penetrant		Prostředek k odstranění přebytku penetrantu		Vývojka	
Typ	Označení	Metoda	Označení	Forma	Označení
I	Fluorescenční penetrant	A	Vodou smytelný	a	Suchý prášek
II	Barevný kontrastní penetrant	B	Postemulgační, lipofilní	b	Vodný roztok
III	Penetrant dvouúčelový (fluorescenční barevný kontrastní penetrant)	C	Odstranitelný rozpouštědlem [a]: – Třída 1, halogenový – Třída 2, nehalogenový – Třída 3, speciální aplikace	c	Vodná suspenze
		D	Postemulgační, hydrofilní	d	Na bázi rozpouštědla (bezvodá pro typ I)
		E	Odstranitelný vodou a rozpouštědlem	e	Na bázi rozpouštědla (bezvodá pro typ II a III)
				f	Speciální aplikace

Ve specifických případech je nezbytné použití prostředků pro kapilární zkoušku v souladu se zvláštními požadavky na hořlavost, obsah síry, halogenů a sodíku a dalších kontaminantů. Viz ISO 3452-2.

[a] Třída metody C není součástí označení.

Penetrační zkoušku jsme provedli po ochladnutí vzorku, norma požaduje zkoušení v rozsahu teplot 10–50°C. Před provedením kapilární zkoušky došlo k mechanickému očištění povrchu svaru a okolí. Po nanesení vývojky došlo k dodržení vyvíjecího času 15 minut dle požadavků normy.

Hodnocení svarového spoje dopadlo bez chyby, penetrační zkouška neodhalila žádné lineární ani nelineární indikace.

c) Zkouška tvrdosti HV10

Zkouška tvrdosti byla provedena ve společnosti SVÚM a.s. v Čelákovicích u Prahy. Zkouška tvrdosti byla provedena dle normy ČSN EN ISO 9015-1.

Naměřená hodnota nesmí pro splnění požadavků normy ČSN EN ISO 15614-1-A2 překročit hodnotu tvrdosti 380 HV.

Vzorek pro zkoušení tvrdosti byl připraven tak, že ze svařence byl vyříznut zkušební vzorek. Po vyříznutí zkušebního vzorku došlo k broušení povrchu vzorku, neboť broušení musí zaručit rovinnost ploch a hladký povrch, který je důležitý pro následná správná vyhodnocení. Po broušení musí být povrch kovově lesklý.

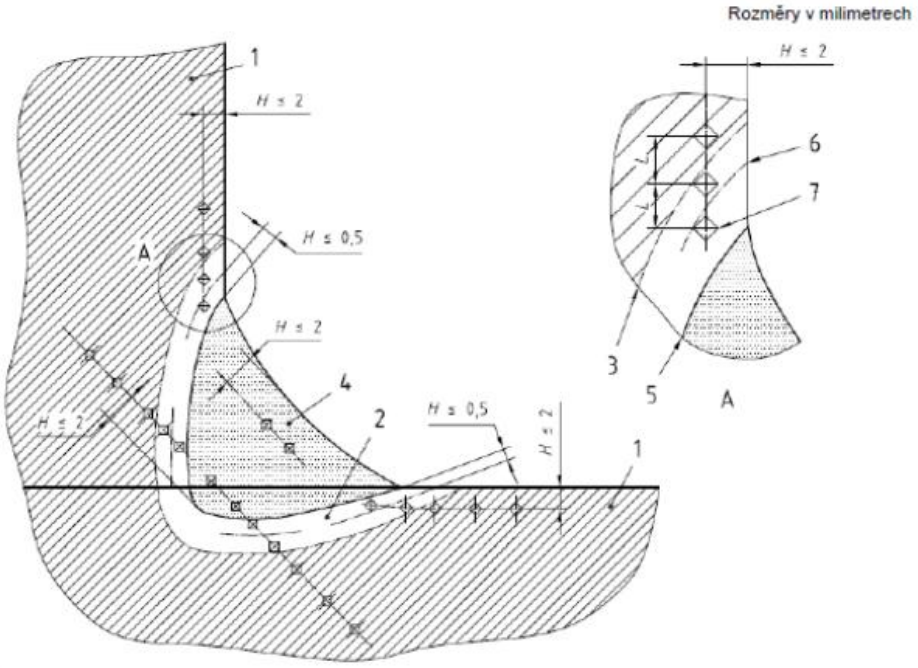
Před měřením tvrdosti musí být povrch vzorku naleptán kyselinou dusičnou, kvůli zvýraznění svarového kovu, tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu.

Na naleptaný vzorek byla vyznačená oblast pro měření tvrdosti, jejíž parametry jsou požadovány normou ČSN EN ISO 9015-1. Oblast pro měření musí být vzdálená 2 mm od povrchu a mimo kořen svaru.

Měření tvrdosti prováděl certifikovaný a proškolený zaměstnanec společnosti SVÚM a.s.. Teplota v laboratoři v průběhu měření byla 23 °C, což vyhovuje požadavkům normy. Měření bylo prováděno na zařízení Vickers limited HTM.

Umístění vtisků bylo provedeno přesně dle požadavků normy, viz Obrázek 30. Odečítání rozměrů uhlopříček vtisku probíhalo pomocí měřícího optického mikroskopu.

Byly umístěny dvě řady vpichů, jedna v krycí a jedna v kořenové vrstvě, pro hodnocení všech oblastí svaru a splnění požadavků normy.



Legenda

1 Základní materiál
2 Tepelně ovlivněná oblast
3 Hranice HAZ
4 Svarový kov
5 Linie natavení
6 Mezní hodnota vtisků rovnoběžně s linií natavení
7 První vtisk

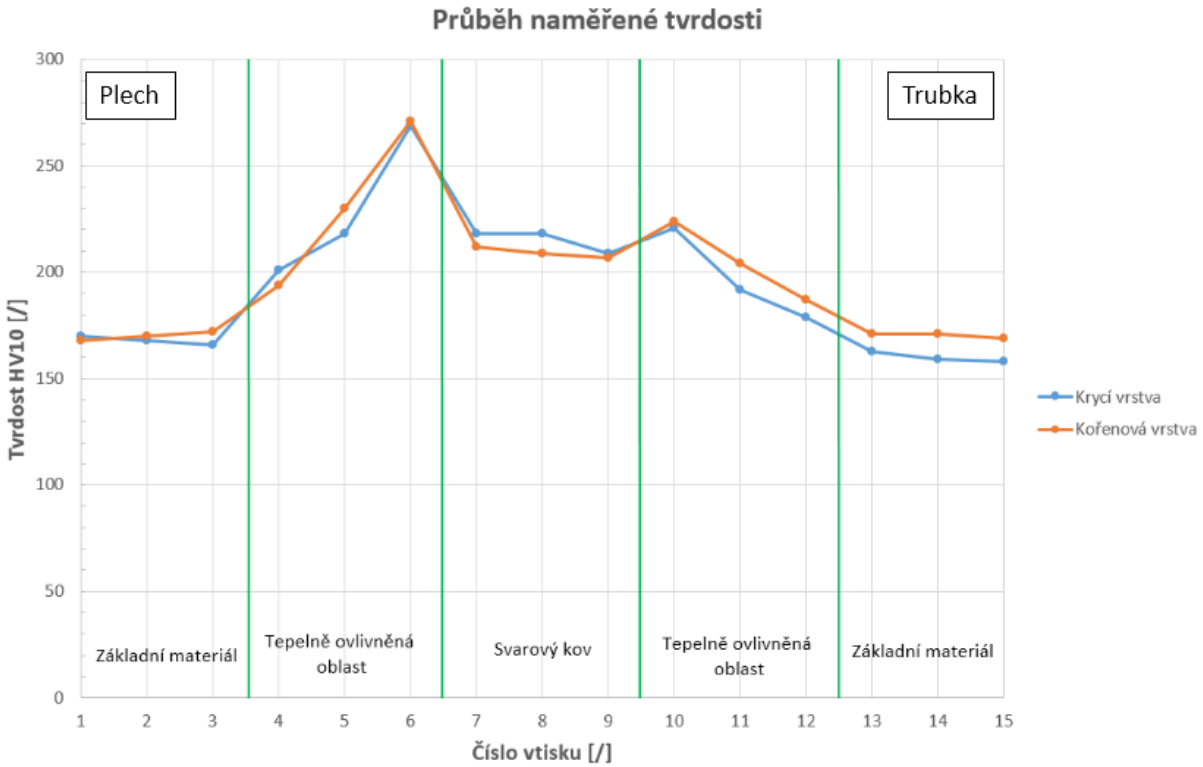
Obrázek 30: Požadavky normy pro umístění vpichů [22]

V Tabulce 14 jsou uvedeny naměřené hodnoty z výsledného protokolu dodanýnm společností SVÚM a.s. Výsledný prokotol je přiložen jako Příloha 4.

Tabulka 14: Naměřené hodnoty

Oblast vtisku	Krycí vrstva		Kořenová vrstva	
	Číslo vtisku	HV10	Číslo vtisku	HV10
Základní materiál	1	170	1	168
	2	168	2	170
	3	166	3	172
Tepelně ovlivněná oblast	4	201	4	194
	5	218	5	230
	6	269	6	271
Svarový kov	7	218	7	212
	8	218	8	209
	9	209	9	207
Tepelně ovlivněná oblast	10	221	10	224
	11	192	11	204
	12	179	12	187
Základní materiál	13	163	13	171
	14	159	14	171
	15	158	15	169

Z naměřených hodnot je pro názornost vytvořen Graf 1 znázorňující průběh tvrdosti v průřezu svarovým spojem.



Graf 1: Průběh naměřené tvrdosti

Maximální hodnota tvrdosti 270 HV byla naměřena na hranici svarového kovu u tlustšího materiálu v kořenové vrstvě. Tato hodnota tvrdosti je nižší než maximální hodnota (380 HV10) požadovaná norně 15614-1. Vzorek vyhověl požadavků normy.

Z výsledného grafu je viditelné maximum v tepelně ovlivněné oblasti u hranice svarového kovu. Toto maximum je výraznější u větší tloušťky základního materiálu. Větší tloušťka materiálu zvýšila odběr tepla z místa svaru a tím došlo k vyšší ochlazovací rychlosti, která ovlivnila výslednou hodnotu tvrdosti. Naměřené hodnoty se výrazně neliší v průřezu svaru.

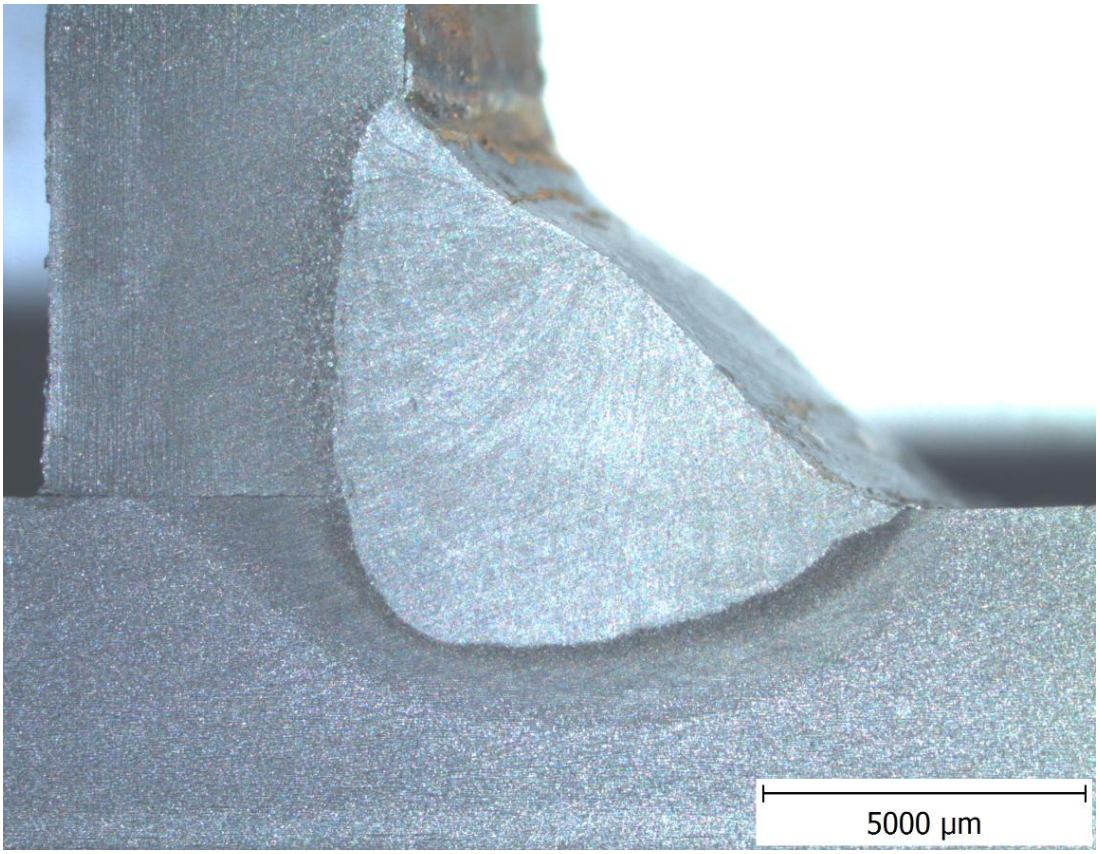
d) Kontrola makrostruktury

Kontrola makrostruktury byla provedena podle normy ČSN EN ISO 17639 a hodnocena dle normy ČSN EN ISO 5817. Kontrolu provedl certifikovaný a proškolený zaměstnanec společnosti SVÚM a.s..

Po změření průběhu tvrdosti došlo k dalšímu zbroušení kontrolní plochy vzorků pro odstranění vpichů. Pro hodnocení makrostruktury musí být povrch hladký a kovově lesklý.

Po zbroušení plochy došlo k naleptání oblasti celé plochy vzorku směsí 15 ml HNO_3 a 85 ml H_2O pro zvýraznění jednotlivých oblastí svarového spoje.

Pro vyhodnocení byl použit optický mikroskop Olympus SZ61 připojený k PC. Při kontrole vzorku nebyla nalezena žádná chyba viz Obrázek 31, a proto vzorek vyhověl požadavkům ČSN EN ISO 15614-1-A2.



Obrázek 31:Snímek pro hodnocení makrostruktury

Obrázky makrostruktury svarů obsahuje protokol dodaný společností SVÚM Praha a.s., přiložený jako Příloha 4.

5.1.7. Kvalifikace postupu svařování

Svařený vzorek pro kvalifikaci postupu svařování splnil všechny požadavky normy ČSN EN ISO 15614-1-A2 a úspěšně kvalifikoval svařovací proces koutových svarů v předepsaném rozsahu.

Získaný rozsah kvalifikace splňuje zadání společnosti Schäfer – Menk s.r.o. Na základě této WPQR byly již vytvořeny WPS pro svařování ve výrobě.

Platná WPQR je přiložena jako Příloha 5 této práce.

Platná WPS založená na řešené WPQR je přiložena jako Příloha 6 této práce

5.2. Kvalifikace postupu svařování svaru S960QL

Druhá polovina praktické části diplomové práce se zabývá vytvořením náhradního vzorku pro kvalifikaci postupu svařování pro tupý 1/2 V (HV) svar materiálů o tloušťkách t_1 = 6 a t_2 = 10 mm a měřením teplotního cyklu svařovacího procesu. Profil ½ V svaru byl vytvořen na základním materiálu o tloušťce t_1 = 6 mm. U předchozího vzorku byl nevyhovující výsledek zkoušky lámavosti, která je součástí škály mechanických zkoušek, požadovaných pro kvalifikaci dle ČSN EN ISO 15614-1-A2.

Zkouška ohybem byla nevyhovující z důvodu chyby v kořeni svaru, proto byla navržena změna procesu pro nový vzorek, která musí zaručit požadované vlastnosti spoje.

Měření tepelného cyklu probíhalo v druhém výrobním podniku společnosti Schäfer - Menk s.r.o. v Dýšině u Plzně. Interní pravidla a požadavky zákazníka požadují hodnotu $t_{8/5}$ u vysoko pevných jemnozrnných ocelí v rozmezí 6-12 vteřin.

Z důvodu vyšší pevnosti materiálu bylo velmi důležité pro vytvoření vyhovujícího spoje zachovat technologickou kázeň a svařování provést přesně dle doporučení výrobce materiálu a letitých zkušeností odborníků ze společnosti Schäfer – Menk s.r.o..

Svarový spoj byl proveden automatizovaně, svařovacím robotem Closs Kyrox 350 viz Obrázek 32, který disponoval tandemovým hořákem s vysokým svařovacím výkonem. Z důvodu vysokého svařovacího výkonu bylo nutné svarový spoj před svařovacím procesem podložit svarovými vrstvami dle $pWPS_2$ pro stabilizaci taveniny v kořeni svaru. Postup vytvoření svarového spoje je uveden $pWPS_2$.

Obrázek 32: Closs Kyrox 350

5.2.1. Základní materiál

Základním materiálem plechu byl S960QL, výrobcem označovaný jako Weldox 960, z rozboru tavby č.119814 pro t_1 = 6 mm je uvedeno chemické složení viz Tabulka 15 a mechanické vlastnosti viz Tabulka 16, pro t_2 = 10 mm je uvedeno chemické složení viz Tabulka 17 a mechanické vlastnosti viz Tabulka 18.

Tabulka 15: Chemické složení S960QL t_1 = 6 mm

Chemické složení - S960QL t_1 = 6 mm													
C [max %]	Mn [max %]	Si [max %]	P [max %]	S [max %]	Cu [max %]	Ni [max %]	Cr [max %]	Mo [max %]	V [max %]	Ti [max %]	Al [max %]	N [max %]	Nb [max %]
0,16	1,24	0,21	0,007	0,001	0,01	0,08	0,19	0,59	0,039	0,003	0,054	0,002	0,014

Tabulka 16: Mechanické vlastnosti S960QL t_1 = 6 mm

Mechanické vlastnosti - S960QL t_1 = 6 mm				
Tloušťka t [mm]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A5 [%]	Rázová houževnatost při -50°C [J]
6	1029	1050	15	57

Z rozboru tavby č. 119657 je uvedeno chemické složení viz Tabulka 17 a mechanické vlastnosti viz Tabulka 18.

Tabulka 17: Chemické složení S960QL t_2 = 10 mm

Chemické složení - S960QL t_2 = 10 mm													
C [max %]	Mn [max %]	Si [max %]	P [max %]	S [max %]	Cu [max %]	Ni [max %]	Cr [max %]	Mo [max %]	V [max %]	Ti [max %]	Al [max %]	N [max %]	Nb [max %]
0,17	1,24	0,22	0,008	0,001	0,01	0,06	0,20	0,59	0,041	0,003	0,055	0,002	0,160

Tabulka 18: Mechanické S960QL t_2 = 10 mm

Mechanické vlastnosti - S960QL t_2 = 10 mm				
Tloušťka t [mm]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A5 [%]	Rázová houževnatost při -50°C [J]
10	1027	1056	15	86

Pro kontrolu, zda základní materiál splňuje požadavky normy ČSN EN 10025-6 byl použit inspekční certifikát 3.1. dle normy ČSN EN 10204 dodaný společně s materiálem. Norma ČSN EN 10025-6, definuje pro materiál výrobku požadované chemické složení, mechanické vlastnosti a stav materiálu.

Inspekční certifikát potvrdil správnost základního materiálu a lze jej použít pro vytvoření vzorku pro WPQR. Oba certifikáty jsou přiloženy jako Příloha 7 této práce.

5.2.2. Návrh pWPS pro nový vzorek

Předchozí vzorek pro WPQR nevyhověl požadavkům normy ČSN EN ISO 15614-1-A2 pro zkoušku ohybem. Důvodem byla trhlina v kořenové vrstvě svaru viz Obrázek 33.

Obrázek 33: Nevyhovující vzorek s trhlinou v kořeni svaru

Po nevyhovujícím výsledku ohybové zkoušky vznikl předpoklad, že příčinou trhliny v kořeni svaru mohla být necelistvost v kořenové vrstvě svaru (studený spoj) způsobená lidským faktorem při svařování podložení nebo nízká pevnost použitého přídavného materiálu pro podložení svaru.

Pro dosažení vyhovujícího vzorku byly v procesu navrženy tyto změny:

- Zavedení automatizovaného svařování pro podložení svaru (svařovací traktor).
- Použití přídavného materiálu s vyšší pevností pro podložení svaru (z ED-SG3 na ED-FK 1000).
-

Porovnání přídavných materiálů viz Tabulka 19.

Tabulka 19: Porovnání přídavných materiálů [22, 23]

Porovnání přídavných materiálů							
Označení	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A5 [%]	Rázová houževnatost [J]	C [%]	Mn [%]	Si [%]
ED-SG3	490	590	27	90 (při -50°C)	0,08	1,70	0,85
ED-FK 1000	890	940	15	47 (při -60°C)	0,09	1,80	0,80

Použitou $pWPS_2$ pro svaření náhradního vzorku uvádím jako Obrázek 34.

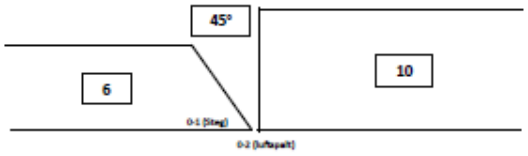
SCHÄFER MENK

Schäfer Menk s.r.o., Přeštínská 1415, 153 00, Praha 5 - Radotín

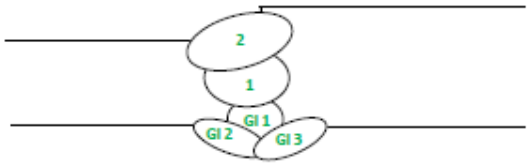
Schweißanweisung des Herstellers (pWPS) – 960 B 6 1.2 (R031-2015)
Postup svařování výrobce (pWPS)

Ort:	*Plzeň-Dýšina*	Místo:	Prüfer/Prüfstelle:	-	Zkušební organizace:
Schweißverfahren:	*MAG ROBOTER*	Metoda svařování:	Vorbereitung:	*Broušení* (Schleifen)	Příprava:
WPQR:	-	WPQR číslo:	Grundwerkstoff:	*S960QL* (ČSN EN 10025-6)	Základní materiál:
Hersteller:	*Schäfer Menk*	Výrobce:	Zusatzwerkstoff:	*ED FK 1000*	Přídavný materiál:
Schweißprozeß:	*135*	Metoda svařování:	Werkstoffdicke (in mm):	*6 + 10*	Tloušťka materiálu:
Nahtart:	*BW*	Druh svaru:	Schweißposition:	*PA + PA*	Poloha svařování:
Nahtvorbereitung:	*úkos (Fase)*	Příprava svaru:	Schweißer:	*Operator*	Svářeč:

Art der Schweißverbindung	Druh svarového spoje	Schweißfolge	HV6+Gl	Postup svařování



Luftspalt max. 0-2 mm (mezera) *Steghöhe max. 0-1 mm (otupení)*



Lage / Svar	Prozeß / Metoda	Drathdurchmesser [mm] / Průměr drátu [mm]	Drathvorschub [m/min] / Posuv drátu [m/min]	Strom [A] / Proud [A]	Spannung [V] / Napětí [V]	Stromart (Polarität) / Druh proudu (polarita)	Schweißgeschwindigkeit [cm/min] / Rychlost svařování [cm/min]	Vorwärmtemperatur [°C] / Teplota předehřevu [°C]	Wärmeeinbringung Q [kJ/cm] / Vnesené teplo Q [kJ/cm]	Zeit t 8/5 [s] / Čas t 8/5 [s]
Gl (protivrstva)	135	1.2	6	200	22	=/+	35,0	60/100.	6,0	8,0
1 (kořen)	135	1.2/1.2	7-8	240/226	26,5/27	=/+	117,0	90/110.	5,0	9,7-11,3
2 (krycí)	135	1.2/1.2	10-12	234/218	28,2/28,3	=/ +	110,0	80/110.	5,0	7,3-8,3

*ORIENTAČNÍ ŠÍŘKA HOUSENKY KOŘENOVÝCH VRSTEV **8-10 mm**; ORIENTAČNÍ ŠÍŘKA VÝPLŇOVÝCH A KRYCÍCH VRSTEV **10-12 mm***

Schweißzusatz (Norm):	*EN ISO 16834 - A – G89 6 M25 Mn4Ni2CrMo*	Svařovací přísady (norma):
Schweißzusatz (Art):	*ED FK 1000 (SG 890)*	Svařovací přísady (druh):
Hersteller:	*Fliess*	Výrobce:
Charge:	*873065*	Šarže:
Schutzgas:	*M 21 (18% CO_2; 82% Ar) (ČSN EN ISO 14175 – Corgon)*	Ochranná atmosféra:
Gasdurchflußmenge:	*Gl=15 l/ min; Tandem=25 l/min*	Průtok plynu:
Fugen; Unterlage:	-	Drážkování; podložení:
Vorwärmtemperatur:	*t1 = max. 60 °C; t2 = max. 100 °C*	Teplota předehřevu:
Zwischenlagentemperatur:	*110 °C*	Mezihousenková teplota:
Wärmenachbehandlung:	-	Tepelné zpracování po svařování:
Bemerkung:	*Tandem; protivrstva drátem ED FK 1000 (Gegenlage mit ED FK 1000)*	Poznámka:
Bemerkung:	*SSAB Programm; Geometrie: V-Joint*	Poznámka:

Hersteller: Schäfer-Menk, s.r.o. **Prüfer:**

P. VÁLA 14.10.2016 J. Brabec 14.10.2016

Name, Datum, Unterschrift Name, Datum, Unterschrift

Obrázek 34: $pWPS_2$

Z důvodu vysoké základní pevnosti svařovaného materiálu musíme před začátkem procesu dle doporučení dodavatele základního materiálu aplikovat předehřev.

5.2.3. Sledování tepelného cyklu

U vysoko pevných jemnozrnných ocelí je důležité hodnotit hodnotu $t_{8/5}$ dosahovanou v průběhu svařovacího procesu. Určení $t_{8/5}$ se ve společnosti Schäfer – Menk s.r.o. pro oceli s vyšší pevností než S690QL provádí standardně pomocí programu WeldCalc, který je od dodavatele materiálu SSAB a je jím pro nastavení procesu doporučen.

V průběhu vytváření opravného vzorku pro WPQR byl $t_{8/5}$ také měřen přímo pomocí termočlánků pro porovnání přímo naměřených dat s vypočtenou hodnotou. Toto přímé měření v průběhu svařování vzorku pro WPQR je požadováno zákazníkem.

5.2.4. Ověření vhodnosti parametrů

Před začátkem svařování bylo ověřeno, zda navržené parametry splňují interní požadavky na dosaženou hodnotu $t_{8/5}$ v průběhu svařování. Ověření bylo provedeno pomocí programu WeldCalc od dodavatele základního materiálu značky Weldox firmy SSAB

Tento program na základě svařovacích parametrů, geometrii svaru a tloušťky svařovaného materiálu výpočtem určí výslednou hodnotu $t_{8/5}$. V případě svařování ocelí značky Weldox je toto určení času $t_{8/5}$ dle doporučení dodavatele dostatečné pro vytvoření vyhovujícího spoje. Požadovaný rozsah $t_{8/5}$ je zúžen oproti doporučení výrobce plechů SSAB z 5-15s na 6-12s (požadavek zákazníka).

Výhodou tohoto softwaru je možnost predikce času ochlazování a možnost úpravy svařovacího procesu ještě před samotným svařováním a tím i minimalizace ztrát způsobených špatně nastaveným procesem.

Pro výpočet času $t_{8/5}$ byly použity hodnoty svařovacího procesu uvedeného v $pWPS_2$, byla použita průměrná teplota předehřevu 80 °C, průměrná hodnota napětí a součet proudů použitých pro vytvoření svarového spoje tandemovým hořákem, neboť software neumožnuje navolit takto speciální typ a provedení svaru. Hodnoty pro výpočet uvádím v Tabulce 19.

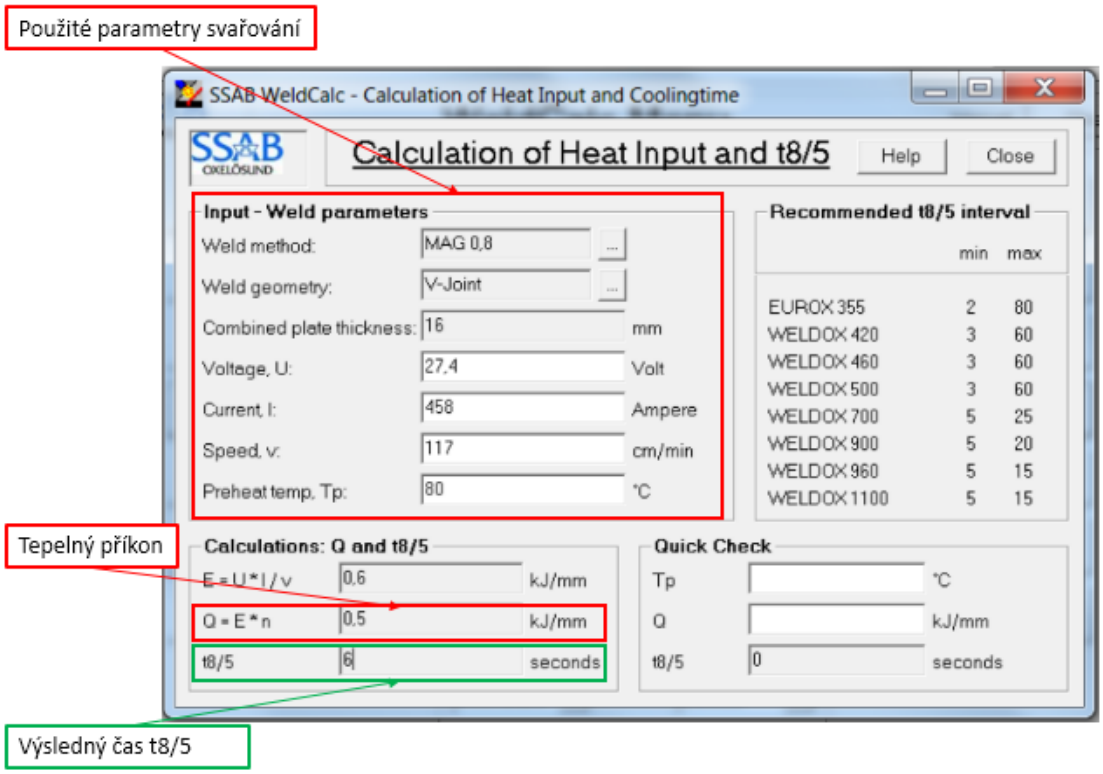
Tabulka 19: Hodnoty použité pro výpočet

Napětí drát 1 [V]	Napětí drát 2 [V]	Proud drát 1 [A]	Proud drát 2 [A]	Rychlost svařování [cm/min]	Teplota předehřevu [°C]
27,9	26,9	223	235	117	80

V programu SSAB WeldCalc musel být zvolen typ svaru, který se nejvíce podobá použité geometrii. Typ svaru půl V není v nabídce programu, proto byl pro výpočet použit svar typu V.

Dále musí být zvolena použitá metoda svařování. Dle této metody software zvolí koeficient účninnost svařování pro následný výpočet. Pro výpočet byla dle $pWPS_2$ zvolena technologie MAG, která má hodnotu účinnosti 0,8.

Po zadaní těchto pracovních paramerů software vypočte hodnotu $t_{8/5}$ viz Obrázek 35.



Obrázek 35: Výpočet $t_{8/5}$ pomocí WeldCalc

Při použití parametrů z $pWPS_2$ by hodnota $t_{8/5}$ v průběhu svařování měla dosahovat hodnoty 6 vteřin, což je na dolní hranici předepsaného rozmezí pro $t_{8/5}$. Tento proces je správně navržen a po tomto pozitivním ověření můžeme při stejných parametrech vytvořit svarový spoj.

5.2.5. Svařování vzorku pro WPQR

Vzorek pro WPQP byl svařen dle parametrů definovaných v $pWPS_2$, před svařováním vzorku byl svařen zkušební vzorek při totožných parametrech. Tento vzorek jsme mohli využít k optimalizaci svařovacího procesu, před vytvořením vzorku pro WPQR, pro dosažení požadovaných vlastností spoje a hodnot $t_{8/5}$.

a) Předehřev materiálu

Pro dosažení správné jakosti svaru, včetně požadavku na $t_{8/5}$ je velice důležité dodržení teploty předehřevu. Předehřev je důležitý pro vytvoření kvalitního svarového spoje bez vzniku svarových vad či nežádoucích zákalných struktur a k redukci obsahu vodíku v okolí svarového spoje. V tomto případě je pro tloušťku materiálu t_2 = 10 mm požadované předehřátí na min. 100 °C a max. na 120 °C. U tloušťky t_1 = 6 mm je nutné dodržet min. předehřev 60 °C. Důležitým aspektem je také správné měření teploty předhřevu a správný postup předehřívání dle instrukce Schäfer-Menk s.r.o.. Předehřev základního materiálu byl proveden ručně pomocí kyslíko-acetylenového hořáku viz Obrázek 36 z obou stran svařovaného materiálu.

Obrázek 36: Předehřev materiálu a svařovací traktor

Správná teplota předehřevu byla kontrolována termokřídami, které byly k dispozici pro teploty 75, 100, 150 °C viz Obrázek 37.

Obrázek 37: Použité termokřídy

Bylo důležité použít právě tyto křídy, protože při předehřevu materiálu je důležité homogenní teplotní pole v celém objemu materiálu a správná teplota. Případná nižší i vyšší teplota předehřevu může ovlivnit výslednou hodnotu $t_{8/5}$ a tím negativně ovlivnit vlastnosti svarového spoje a tím i celý výsledek vytvářené WPQR.

b) Podložení svaru

Podložení svaru bylo provedeno vícevrstvým svarovým spojem. Podložení bylo vytvořeno třemi housenkami, pokládanými přesně dle schématu uvedeného v $pWPS_2$.

Pro podložení byla zvolena technologie MAG za použití svařovacího traktoru viz Obrázek 36.

c) Vytvoření svarového spoje

Svarový spoj byl vytvořen automatizovaně robotem Closs Kyrox 350, za použití tandemového hořáku. Svar byl proveden na dva průchody svařovacím hořákem.

Před svařovacím procesem byl vybroušen kořen svaru do čista do hloubky 6 mm. V průběhu svařování vzorku byla před každou svarovou vrstvou kontrolována teplota interpass, teplota materiálu by měla dosahovat teploty 110°C. Pro svařování byly použity parametry, uvedené v $pWPS_2$.

5.2.6. Získávání dat pomocí termočlánků

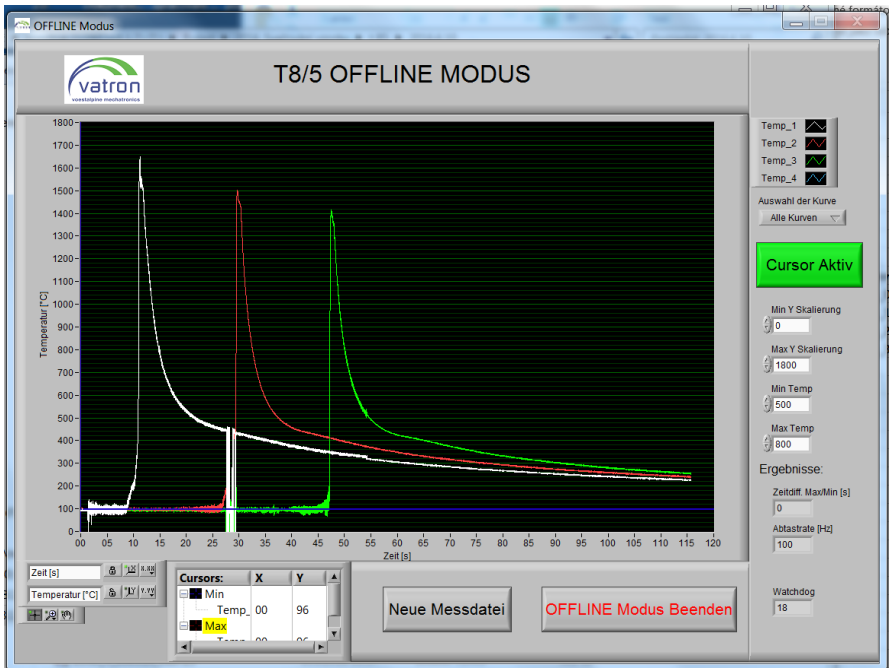
Získávání dat probíhalo pomocí měřicího přístroje National Instrumental pro měření $t_{8/5}$ s pomocí tří termočlánků. Naměřené hodnoty jsou vyhodnocovány softwarem Vatron-t85_Programm.

Umístění termočlánku do svarového kovu bylo provedeno vždy ve stejné vzdálenosti od začátku svařence viz Obrázek 38. Umístění do stejného místa bylo důležité pro zvýšení přesnosti při porovnání naměřených dat a provedení mechanických zkoušek v laboratoři. Minimální vzdálenost mezi termočlánky byla volena dle požadavků normy ČSN EN ISO 15614-1-A2.

Obrázek 38: Umístění termočlánků

Termočlánky se pro zjištění celého teplotního cyklu musí umístit do svarové lázně ihned za svařovací hořák. Z toho důvodu začne termočlánek měřit již teplotu taveniny a ve výsledných křivkách můžeme vidět průběh teplot svarového spoje od taveniny až po teploty základního materiálu v tepelně neovlivněné oblasti.

Výsledkem měření je křivka chladnutí, která má pro každý termočlánek jinou barvu viz Obrázek 39. Podle těchto naměřených dat vyhodnocovací software vyhodnotí výsledný čas $t_{8/5}$.



Obrázek 39: Křivky chladnutí

5.2.7. Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty času $t_{8/5}$, odečtené ze softwaru T8/5 ONLINE MODUS jsou uvedeny v Tabulce 20 a v Tabulce 21, které obsahují také hodnoty parametrů použitých při svařovacího procesu. Tabulka 20 se týká zkušebního kusu, Tabulka 21 uvádí hodnoty pro WPQR vzorek.

Tabulka 20: Vzorek k nastavení parametrů svařování

Vrstva	Napětí - drát 1 [V]	Proud - drát 1 [A]	Napětí - drát 2 [V]	Proud - drát 2 [A]	Rychlost svařování [cm/min]	Odečtené t8/5 [s]		
Podložení 1	21,6	150	-	-	32,9			
Podložení 2	21,6	190	-	-	33,5			
Podložení 3	21,6	190	-	-	35,4			
Vrstva 1	27,9	241	26,9	222	117	8,01	5,85	6,33
Vrstva 2	28,9	233	28	219	110	6,965	6,2	5,89

Tabulka 21: Vzorek použitý pro WPQR

Vrstva	Napětí - drát 1 [V]	Proud - drát 1 [A]	Napětí - drát 2 [V]	Proud - drát 2 [A]	Rychlost svařování [cm/min]	Odečtené t8/5 [s]		
Podložení 1	21,6	144	-	-	38			
Podložení 2	26,2	247	-	-	45			
Podložení 3	26,2	247	-	-	45			
Vrstva 1	27,9	223	26,9	235	117	8,01	6,01	6,33
Vrstva 2	28,9	230	29	230	110	6,95		

U naměřených hodnot si můžeme všimnout, že se nepodařilo naměřit všechny hodnoty $t_{8/5}$ při vytváření podložení svaru a při druhém průchodu svařovacího hořáku u vzorku pro WPQR se podařilo naměřit pouze část hodnot. Hodnoty nebyly naměřeny z důvodu

obtížného umístění sondy do svarové lázně (malá svarová lázeň, vyšší rychlost svařování, špatná přístupnost).

Při svařování vzorku pro nastavení parametrů svařování měřená hodnota času $t_{8/5}$ se snížila pod požadovanou minimální hodnotu 6 vteřin. Z toho důvodu jsme pro svařování vzorku pro WPQR použili větší proud na druhém drátu a tím zvýšili celkový tepelný příkon a v důsledku i dobu chladnutí $t_{8/5}$.

Hodnoty $t_{8/5}$ pro náhradní vzorek pro WPQR jsou všechny v předepsaném rozsahu.

5.2.8. Porovnání naměřených dat s WeldCalc

Pro porovnání s programem WeldCalc byly využity parametry pro první průchod tandemového hořáku. Pro tyto parametry máme přímo změřené hodnoty $t_{8/5}$ v průběhu celé délky svaru.

V Tabulce 22 si můžeme všimnout, že kromě hodnoty změřené termočnánkem na začátku svaru se hodnoty $t_{8/5}$ ustáleného procesu blíží teoretické vypočtené hodnotě.

Napětí drát 1 [V]	Napětí drát 2 [V]	Proud drát 1 [A]	Proud drát 2 [A]	Ø Napětí [V]	∑ Proudů [A]	Rychlost svařování [cm/min]	Ø Teplota předehřevu [°C]	Odečtené t8/5 [s]			WeldCalc t8/5 [s]
27,9	26,9	223	235	27,4	458	117	80	8,01	6,01	6,33	6

Tabulka 22: Porovnání s předchozím měřením

5.2.9. Opakování zkoušky ohybem

Po vytvoření nového svarového vzorku pro WPQR byl náhradní vzorek opět otestován dle požadavků ČSN EN ISO 15614-1-A2 společností GSI-SLV Halle. Tato německá společnost je požadavkem zákazníka.

Při opakované zkoušce ohybem náhradní kus vyhověl požadavkům normy ČSN EN ISO 15614-1-A2. Tento typ svaru splnil všechny požadavky normy a úspěšně kvalifikuje proces pro výrobu. Výsledek ohybové zkoušky z výsledného protokolu viz Obrázek 47.

3.8 Biegeversuch (DIN EN ISO 5173) - Ersatzprobe
Bending test (DIN EN ISO 5173) - additional sample

Probendicke in mm: 6,0
Sample thickness in mm
Biegedorndurchmesser in mm:.....9 x t
Bending mandrel diameter in mm

Anforderung: *Requirement*	180°						
Proben-bezeich-nung *Sample desig-nation*	**Biege-Winkel** *Bending angle* [°]	**Zugseite** *Tension side* (1)	**Biegedehnung** *Bending elongation*		**Bruch-Lage** *Position of rupture* (2)	**Befund** *Findings*	**Bemer kungen** *Remarks*
			BN [%]	**BN+G** [%]			
043-03E-61	180	TFBB	10	13	keine	o. B.	e
043-03E-62	180	TFBB	10	13	keine	o. B.	e
043-03E-63	180	TRBB	10	13	keine	o. B.	e
043-03E-64	180	TRBB	10	13	keine	o. B.	e

Anmerkungen: (1) **TFBB** – oberseitige Querbiegeprobe; **TRBB** - wurzelseitige Querbiegeprobe
Remarks: (1) *TFBB – top side transverse bending test; TRBB – root end transverse bending test*
SBB – Seitenbiegeprobe quer zur Stumpfnaht
SBB – Lateral bending test transverse to the butt weld
(2) **G** – unbeeinflusster Grundwerkstoff; **Ü** – Übergang / Wärmeeinflusszone; **S** – Schweißgut
(2) *G – non-affected base metal; Ü – transition/heat affected zone; S – welding material*

Obrázek 47: Výsledek opakované ohybové zkoušky

Na základě této WPQR mohou být vytvořeny WPS pro výrobní proces.

Pozitivní výsledek zkoušky ohybem je splněním zadání pro druhou sekci praktické části.

6. Závěr

Dosažením prvního cíle bylo navrhnutí koutového svaru mezi trubkou a plechem, který splnil všechny požadavky kvality, které vycházejí z normy ČSN EN ISO 15614-1-A2. Bylo dosaženo kvalifikace postupu svařování pro materiál S355NL v rozsahu požadovaným společností Schäfer – Menk s.r.o. Na základě získané WPQR vznikla WPS, které se využívá v reálném provozu společnosti k výrobě kolejových vozidel.

Dalším cílem byla úprava svařovacího procesu tupého ½ V svaru rozdílných tlouštěk pro dosažení náhradního vzorku, který splní všechny požadavky normy ČSN EN ISO 15614-1-A2 pro získání platné kvalifikace postupu svařování za současného přímého měření tepelného cyklu. Svařovaným materiálem byla vysokopevnostní jemnozrnná ocel S960QL a sledování teplotního cyklu v průběhu vytváření vzorku pro kvalifikaci postupu svařování je požadavek zákazníka společnosti Schäfer – Menk s.r.o..

Úpravami procesu bylo využití přídavného materiálu s vyšší pevností ED-FK 1000 pro podložení svaru a vytvoření podložení svaru pomocí svařovacího traktoru. Po úpravě procesu se podařilo vytvořit tupý svarový spoj o takových vlastnostech, že úspěšně vyhověl opakované ohybové zkoušce a úspěšně splnil všechny požadavky normy ČSN EN ISO 15614-1-A2.

Výsledky přímého měření teplotního cyklu pomocí termočlánků potvrdily hodnotu vypočtenou pomocí programu WeldCalc a společně potvrdily správné nastavení procesu pro dosažení požadovaného času ochlazování $t_{8/5}$. Výsledná hodnota $t_{8/5}$ zaručuje požadované mechanické vlastnosti, které dokazuje provedená zkouška ohybem a zajištuje požadavek zákazníka na rozsah $t_{8/5}$.

Na základě této WPQR se kvalifikují WPS pro svařování komponentů pro auto-jeřábovou techniku ve Společnosti Schäfer-Menk s.r.o. z vysokopevnostních jemnozrnných ocelí.

Vytyčené cíle diplomové práce byly splněny.

7. Zdroje

[1] Http://www.schmenk.cz/o-nas/. *Http://www.schmenk.cz/o-nas/* [online]. Praha: Schäfer-Menk, 2017 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://www.schmenk.cz/o-nas/

[2] *Definice a rozdělení ocelí*. 2. Praha: Český normalizační institut, 2001.

[3] KLEIN, M., M. SONNLEITNER a P. STIASZNY. *Alform x-treme innovation*. Voestalpine Stahl, 2012.

[4] Beneš L., Brabec J. Specifika a požadavky na kvalifikaci svařování jemnozrnných ocelí v auto-jeřábové technice, Praha: ČVUT v Praze a Schäfer-Menk s.r.o., 2017

[5] Václav Pilous a kolektiv autorů. Vysokopevné Mikrolegované Jemnozrnné oceli a jejich svařitelnost. Plzeň 1999.

[6] BARTÁK, Jiří, Václav PILOUS a Rudolf KOVAŘÍK. *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. Ostrava: ZEROSS, 2002. Svařování. ISBN 8085771977.

[7] Http://www.toolscomp.cz/soubory-ve-skladu/Technologie/Pohled_do_svarovani-MIG-MAG/MIG-MAG_obr1.2.jpg. *Http://www.toolscomp.cz/soubory-ve-skladu/Technologie/Pohled_do_svarovani-MIG-MAG/MIG-MAG_obr1.2.jpg* [online]. Praha: Toolscomp, 2017 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://www.toolscomp.cz/soubory-ve-skladu/Technologie/Pohled_do_svarovani-MIG-MAG/MIG-MAG_obr1.2.jpg

[8] Http://docplayer.cz/15362917-Konstrukce-svarovaciho-pripravku-design-of-welding-jig.html. *Http://docplayer.cz/15362917-Konstrukce-svarovaciho-pripravku-design-of-welding-jig.html* [online]. Praha: docplayer, 2017 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://docplayer.cz/15362917-Konstrukce-svarovaciho-pripravku-design-of-welding-jig.html

[9] Http://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-356/. *Http://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-356/* [online]. Praha: svarecky - elektrody, 2017 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-356/

[10]http://images.slideplayer.cz/11/3080120/slides/slide_3.jpg. *Http://images.slideplayer.cz/11/3080120/slides/slide_3.jpg* [online]. Praha: http://images.slideplayer.cz/11/3080120/slides/slide_3.jpg, 2017 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://images.slideplayer.cz/11/3080120/slides/slide_3.jpg

[11] STEMNE, [Daniel, Torbjörn NARSTRÖM a Bo-goljub HRNJEZ]. Welding handbook: a guide to better welding of Hardox and Weldox. Oxelösund: SSAB, 2010. ISBN 9789197857307 STEMNE, [Daniel, Torbjörn NARSTRÖM a Bogoljub HRNJEZ]. *Welding handbook: a guide to better welding of Hardox and Weldox*. Oxelösund: SSAB, 2010. ISBN 9789197857307

[12] MACEK, K. a kol. Nauka o materiálu cvičení. Praha: Vydavatelství ČVUT v Praze, 2007

[13] *ČSN EN 1011-2: Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2001.

[14] *ČSN EN 1011-1: Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování*. 1. Praha: Národní normalizační institut, 2009.

[15] *ČSN EN ISO 5817: Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (mimo elektronového a laserového svařování) - Určování stupňů jakosti*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2004.

[16] *ČSN EN ISO 9712: Nedestruktivní zkoušení - Kvalifikace a certifikace pracovníků NDT*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2013.

[17] ČSN EN ISO 15614-1-A2. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování: Část 1: Obloukové a plamenové svřování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2005.

[18] *ČSN EN ISO 17635: Nedestruktivní zkoušení svarů - Všeobecná pravidla pro kovové materiály*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2010.

[19] *ČSN EN ISO 23277: Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení svarů kapilární metodou - Stupně přípustnosti*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2016.

[20] *ČSN EN ISO 3452-1: Nedestruktivní zkoušení - Kapilární zkouška - Část 1: Obecné zásady*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2015.

[21] *ČSN EN ISO 9015-1: Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2011.

[22] *UltraMAG SG3* [online]. [cit. 2017-08-02]. Dostupné z: http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/ConsumableEU_MIGWires-ULTRAMAG-ULTRAMAGSG3/Ultramag-SG3-de.pdf

[23] *ED-FK 1000* [online]. [cit. 2017-08-02]. Dostupné z: http://www.harispal.pl/wp-content/uploads/2014/05/ED-FK-1000.pdf

[22] *ČSN EN 10025-3: Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 3: Technické dodací podmínky pro normalizačně žíhané/normalizačně válcované svařitelné jemnozrnné konstrukční oceli*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2005.

[23] *ČSN EN 10025-6: Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 6: Technické dodací podmínky na ploché výrobky s vyšší mezí kluzu po zušlechťování*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2005.

[24] *ČSN EN 10027-2: Systémy označování ocelí. Část 2: Systém číselného označování*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2016.

[25] JANOVEC, Jiří, Karel MACEK a Petr ZUNA. *Fyzikální metalurgie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 9788001029350.

[25] Firemní předpisy a standardy společnosti Schäfer-Menk s.r.o.

Seznam příloh

Příloha 1 – Inspekční certifikát S355NL

Příloha 2 - Inspekční certifikát P355NL1

Příloha 3 – Navrhnutá $pWPS_1$

Příloha 4 – Protokol SVÚM a.s.

Příloha 5 – Získaná WPQR

Příloha 6 – WPS založená na získané WPQR

Příloha 7 - Inspekční certifikát S960QL