

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

POROVNÁVÁNÍ VLASTNOSTÍ OCELOVÝCH TYČÍ S355J2 A S355NL PO
SVAŘOVÁNÍ

AUTOR PRÁCE: HNILICA MARTIN

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. ING. LADISLAV KOLAŘÍK, Ph.D., IWE

PRAHA 2020



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hnilica** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **458406**
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
 Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
 Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
 Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Porovnání vlastností ocelových tyčí S355J2 a S355NL po svařování

Název bakalářské práce anglicky:

The properties comparison of S355J2 and S355NL steel bars after welding

Pokyny pro vypracování:

Rozbor problematiky výroby ocelových tyčí větších průměrů z konstrukční oceli S355 – porovnání jakostí J2 a NL
 Popis svařitelnosti konstrukčních ocelí a způsoby jejího hodnocení
 Návrh experimentu pro ověření svařitelnosti
 Vyhodnocení výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Janovec, J., Pilous, V.: Použití ocelí normalizačně tepelně zpracovaných S355NL a termomechanicky zpracovaných S355ML, Konstrukce, 11/2011
- [2] ČSN EN 10 025-3: Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část3: Technické dodací podmínky pro normalizačně žíhané/ normalizačně válcované svařitelné jemnozrné konstrukční oceli, UNMZ, 2005
- [3] Kolařík, L. a kolektiv: Konstrukce a navrhování svarových spojů, Učební texty pro IWE/IWT, ČVUT v Praze, Praha, 2017
- [4] Chábera, J.: Porovnání vlastností oceli S355J2 a 3555NL po svařování, Bakalářská práce, FS, ČVUT v Praze, Praha, 2019

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

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

Ing. Luboš Procházka, Bohdan Bolzano s.r.o.

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

10. 7. 2020
Datum převzetí zadání

[Signature]
Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím podkladů uvedených v příloženém seznamu.

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

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Název práce: Porovnání vlastností ocelových tyčí S355J2 a S355NL po svařování

Jméno autora: Martin Hnilica

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Zadavatel tématu: Ústav strojírenské technologie

Rok vyhotovení: 2019/2020

Bakalářská práce se zabývá porovnáním vlastností konstrukčních ocelí S355J2 a S355NL po svařování. V práci jsou popsány vybrané stavy ocelí a jejich značení, problematika svařitelnosti a metody kontroly a zkoušení svarových spojů. Provedený experiment zahrnuje přípravu zkušebních vzorků a jejich vyhodnocení ke zjištění vlastností, kterých se dosáhne svařovacím procesem.

Klíčová slova: Konstrukční oceli, Obloukové svařování, Svařitelnost, Vlastnosti ocelí

Počet stran: 78

Počet obrázků: 49

Počet tabulek: 16

Počet příloh: 2

Annotation

Name of thesis: The properties comparison of S355J2 and S355NL steel bars after welding

Author of thesis: Martin Hnilica

Supervisor of thesis: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Submitter of thesis: Department of Manufacturing Technology

Academic year: 2019/2020

Bachelor thesis focuses on properties of structural steel grades S355J2 and S355NL after welding. Thesis describes said steel grades, their weldability and also methods used for testing welded joints. Thesis experiment includes welding of selected steel grades, preparation of test samples and their evaluation.

Keywords: Arc welding, Steel properties, Structural steel, Weldability

Number of pages: 78

Number of images: 49

Number of tables: 16

Number of attachments: 2

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE za jeho cenné rady, připomínky, a zvláště za trpělivost a čas, který mi věnoval. Dále doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE, Ing. Břetislavu Machkovi a Václavu Michalcovi za jejich asistenci při provedení praktické části práce.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Konstrukční oceli.....	10
2.1	Nelegované konstrukční oceli	12
2.2	Normalizačně žíhané/válcované konstrukční oceli.....	13
2.3	Termomechanicky válcované konstrukční oceli	14
3	Svažitelnost jemnozrnných ocelí.....	14
3.1	Uhlíkový ekvivalent	19
3.2	Teplota předehřevu.....	21
3.3	Doba ochlazování	25
4	Praskavost materiálu	27
4.1	Trhliny za tepla	27
4.2	Trhliny za studena	29
5	Obloukové svařování metodou MAG	31
5.1	Přídavný materiál	32
5.2	Ochranné plyny	33
5.3	Zdroje svařovacího proudu	34
6	Kontrola a zkoušení svarů.....	34
6.1	Metalografická analýza	36
6.2	Zkoušky tvrdosti	36
6.2.1	Zkouška tvrdosti dle Brinella.....	37
6.2.2	Zkouška tvrdosti dle Vickerse	39
6.2.3	Zkouška tvrdosti dle Rockwella.....	41
7	Praktická část	43

7.1	Příprava vzorků.....	44
7.1.1	Podmínky svařování oceli S355J2	45
7.1.2	Podmínky svařování oceli S355NL	48
7.1.3	Postup svařování.....	52
7.1.4	Metalografická příprava vzorků.....	57
7.2	Vyhodnocení mikrostruktury	61
7.3	Zkouška tvrdosti	66
8	Závěr	72
9	Zdroje	73
10	Použité normativní dokumenty	75
11	Seznam příloh	78

Seznam použitých zkratek

MAG (metoda 135)	Metal active gas (Svařování odtavující se elektrodou v atmosféře aktivního plynu)
MIG (metoda 131)	Metal inert gas (Svařování odtavující se elektrodou v atmosféře inertního plynu)
ZM	Základní materiál
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
SK	Svarový kov

1 Úvod

V dnešní době je standardním materiálem pro svařované nosné konstrukce ocel S355, která se dodává v různých stavech podle způsobu jejich zpracování při výrobě. Svařováním těchto ocelí se výsledné vlastnosti mohou lišit, což je klíčové při volbě vhodného typu oceli s požadovanými mechanickými vlastnostmi, které jsou kladeny na konstrukci, resp. svarový spoj. V úvahu je nutno brát i ekonomické hledisko.

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáním vlastností vybraných stavů konstrukčních ocelí a vlivy, které ovlivňují jejich svařitelnost jako např. tloušťka svařovaného materiálu, chemické složení aj. Zejména vlivem vneseného tepla při procesu svařování může dojít k ovlivnění struktury, nárůstu tvrdosti, poklesu meze kluzu nebo výskytu necelistvostí typu trhlin a jiných vad svarového spoje. Proto byl proveden experiment, jehož cílem je ověřit a porovnat vlastnosti, popř. výhody a přednosti ocelí S355J2 a S355NL. Použitým polotovarem byly tyče průměru 150 mm, které poskytla firma Bohdan Bolzano s.r.o. Materiál vzorků svarových spojů byl odebrán právě z těchto tyčí velkého průměru.

Je nutno zmínit, že práce byla řešena v období pandemie COVIDu-19, kdy platila omezení pohybu osob na akademické půdě. To zahrnovalo i laboratoře strojní fakulty, ČVUT v Praze, což ovlivnilo řešení praktické části bakalářské práce, a tak byly z časových důvodů provedeny pouze základní zkoušky svarových spojů. V rámci experimentu byly vyrobeny a svařeny zkušební vzorky podle odpovídajících norem, které byly vyhodnoceny pomocí základních metalografických analýz a zkoušek tvrdosti.

Dále jsou v práci popsány základní pojmy, nezbytné k pochopení dané problematiky a také metody, které se v praktické části použijí pro přípravu zkušebních vzorků a jejich vyhodnocení.

2 Konstrukční oceli

Nejrozšířenějším výchozím materiálem ve strojním průmyslu pro konstrukce, jejich součásti a součásti strojů menších tlouštěk je konstrukční ocel. Díky předepsaným minimálním hodnotám mechanických vlastností jsou převážně používány pro konstrukce namáhané staticky a dynamicky k zajištění vhodné bezpečnosti. Uplatnění nacházejí i v oblastech svařování, protože svým složením a použitou technologií výroby vykazují vhodnou svařitelnost o které je více pojednáno v kapitole 3.

Oceli pro svařované nosné konstrukce se volí na základě chemického složení, fyzikálních, mechanických a jiných vlastností tak, aby byly ve shodě s požadovanými vlastnostmi kladenými na svarový spoj. Dodávají se v následujících stavech podle jejich zpracování při výrobě [1]:

- nelegované válcované za tepla
- jemnozrnné normalizačně žíhané nebo normalizačně válcované za tepla
- termomechanicky válcované

Jeden ze způsobů značení ocelí je stanoven normou **ČSN EN 10027-1 – Systémy označování ocelí, Část 1: Systém zkráceného označování – Základní symboly**, podle které se ocelím přiřadí značka udávající oblast použití v kombinaci s hodnotou charakteristické mechanické vlastnosti, tj. minimální hodnoty meze kluzu v $N \cdot mm^{-2}$. [1]

Přehled symbolů specifikující použití ocelí:

- S – oceli pro konstrukce a všeobecné použití,
- P – oceli pro tlakové nádoby,
- L – oceli na potrubí,
- E – oceli na strojní součásti,
- B – oceli na výztuž do betonu,
- Y – oceli pro předpínací výztuž do betonu,
- R – oceli na kolejnice,
- D – ploché výrobky k tváření za studena,
- H – ploché výrobky z ocelí s vyšší mezí kluzu k tváření za studena,

- T – pocínované výrobky,
- M – plechy a pásy pro elektrotechniku

Za základní značkou s číselnou hodnotou minimální meze kluzu se dále uvádí přídatný symbol jakostního stupně vyjadřující minimální hodnotu nárazové práce při zkoušce rázem v ohybu viz tab. 2.1. [1]

Tabulka 2.1 Přehled přídatných symbolů při značení ocelí [1]

Nárazová práce	Zkušební teplota [°C]						
	+20	0	-20	-30	-40	-50	-60
27 J	JR	JO	J2	J3	J4	J5	J6
40 J	KR	KO	K2	K3	K4	K5	K6
60 J	LR	LO	L2	L3	L4	L5	L6

K upřesnění způsobu výroby ocelí se používá doplňkového přídatného symbolu za základní značkou [1]:

- G1 – neuklidněná ocel,
- G2 – neuklidněná ocel není dovolena,
- G3, resp. G4 – stav podle volby výrobcem např. normalizačně žíhané a plně uklidněné (obsahující prvky dostatečně vázající dusík),
- A – precipitační vytvrzení,
- C – vhodnost k tváření za studena,
- W – odolnost proti atmosférické korozi,
- N – normalizační žíhání nebo normalizační válcování,
- M – termomechanické válcování,
- NT – normalizační žíhání a popouštění,
- L – zaručená minimální hodnota nárazové práce při -50 °C,
- Q – zušlechtěná ocel (kalená a popouštěná).

Jakékoliv další přídatné symboly blíže specifikující tepelné zpracování jsou uvedeny na konci značky se znaménkem +, např. [1]:

- +AR – válcovaný (bez zvláštních podmínek na válcování nebo tepelné zpracování),
- +C – zpevněný zpracováním za studena,
- +M – termomechanicky tvářený,

- +N – normalizačně žíhaný nebo normalizačně válcovaný,
- +NT – normalizačně žíhaný a popuštěný,
- +Q – kalený,
- +QT – zušlechtěný,
- +SR – žíhaný ke snížení pnutí,
- +T – popuštěný,
- +U – nezpracovaný.

Pro účely svařování, převážně při stanovování rozsahů platností kvalifikací, se oceli rozdělují do jednotlivých skupin podle směrnice **TNI CEN ISO/TR 15608 Svařování – Směrnice pro zařazení kovových materiálů do skupin**, na základě obsahu prvků použitých k vytvoření slitiny nebo zaručené meze kluzu v $N \cdot mm^{-2}$ [1].

2.1 Nelegované konstrukční oceli

Tyto oceli se dodávají podle **ČSN EN 10025-1,2 – Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí, Část 1 – Všeobecné technické dodací podmínky (Část 2 – Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli)**, spadají sem oceli S235, S275, S355, S450, aj. v jakostních stupních JR, JO, J2 a K2 (tab. 2.1). Jakostní stupeň je volen na základě nejnižší provozní teploty konstrukce. [1]

Podle TNI CEN ISO/TR 15608 se řadí do skupiny 1, podskupina 1.2 jako oceli se zaručenou mezí kluzu $275 N \cdot mm^2 < R_{eH} \leq 360 N \cdot mm^2$.

Norma ČSN EN 10025-2 uvádí stavy dodávek nelegovaných konstrukčních ocelí:

- a) Válcovaný (as-rolled) – válcování za tepla bez jakéhokoliv dalšího zpracování, značeno +AR
- b) Normalizačně válcovaný (normalizing rolling) – válcování s konečnou deformací v určité teplotní oblasti (teplota $A_{c3} + 50 \text{ °C}$), výsledný stav materiálu odpovídá normalizačnímu žíhání se shodnými mechanickými vlastnostmi, značeno +N

Nežádoucí vlastností konstrukčních ocelí je pokles pevnostních charakteristik v závislosti na rostoucí tloušťce použitého materiálu. To je patrné z následující tabulky 2.2 pro vybrané pevnosti třídy ocelí. [1]

Tabulka 2.2 Hodnoty meze kluzu R_e a meze pevnosti R_m podle tloušťky [1]

Pevnostní třída oceli	Tloušťka t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 < t \leq 100$ mm	
	R_e [$N \cdot mm^{-2}$]	R_m [$N \cdot mm^{-2}$]	R_e [$N \cdot mm^{-2}$]	R_m [$N \cdot mm^{-2}$]
S235	235	360	215	340
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	490

Pevností třída S355 navíc vykazuje vyšší obsah uhlíku, který může mít za následek tvorbu trhlin za studena při svařování větších tlouštěk. Tomu je možné předejít následujícími způsoby [2]:

- Snížit obsah difuzního vodíku ve svarovém kovu
- Předehřevem potlačit vznik zakalené struktury
- Potlačit tahová napětí svarového spoje vhodným postupem svařování

2.2 Normalizačně žíhané/válcované konstrukční oceli

Svařitelné jemnozrnné konstrukční oceli podle **ČSN EN ISO 10025-3 – Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 3 - Technické dodací podmínky pro normalizačně žíhané/normalizačně válcované svařitelné jemnozrnné konstrukční oceli**, jsou určené pro svařované konstrukce namáhané za nízkých teplot. Jemnozrnné feriticko-perlitické struktury se docílí normalizačním žíháním nebo obdobným normalizačním válcováním popsáním v kapitole 2.1. Velikost feritického zrna musí být ≥ 6 podle **ČSN EN ISO 643 – Ocel – Mikrografické stanovení zdánlivé velikosti zrn**.

Podle TNI CEN ISO/TR 15608 se řadí do skupiny 1, podskupina 1.3 jako normalizované jemnozrnné oceli se zaručenou mezí kluzu $R_{eH} > 360 N \cdot mm^2$.

Norma ČSN EN ISO 10025-3 určuje oceli S275, S355, S420 a S460, které mohou být dodány v následujících jakostech:

- N - s min. hodnotami nárazové práce do -20 °C
- NL – s min. hodnotami nárazové práce do -50 °C

2.3 Termomechanicky válcované konstrukční oceli

Oceli termomechanicky válcované podle **ČSN EN ISO 10025-4 – Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 4 - Technické dodací podmínky pro termomechanicky válcované svařitelné jemnozrnné konstrukční oceli**, jsou vyráběny tzv. řízeným válcováním s konečnou deformací v teplotní oblasti 1 200 °C až $A_{c3} - 40$ °C. Vzniklá jemnozrnná struktura v kombinaci s chemickým složením oceli snižuje náchylnost ke křehkému lomu a uhlíkový ekvivalent čímž podporuje svařitelnost. [1]

Podle TNI CEN ISO/TR 15608 se řadí do skupiny 2, podskupina 2.1 jako termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli a lité oceli se zaručenou mezí kluzu $360 \text{ N}\cdot\text{mm}^2 < R_{eH} \leq 460 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$.

Norma ČSN EN ISO 10025-4 uvádí oceli S275, S355, S420 a S460 v dodávaných jakostech [1]:

- a) M – s min. hodnotami nárazové práce do -20 °C
- b) ML – s min. hodnotami nárazové práce do -50 °C

Z hlediska svařování termomechanicky zpracovaných ocelí je nevýhodou jejich možné odpevnění v tepelně ovlivněné oblasti, protože norma upozorňuje, že u těchto ocelí může dojít k poklesu pevnostních vlastností při ohřevu nad teplotu 560 °C. [2]

3 Svařitelnost jemnozrnných ocelí

Svařitelnost je charakteristika materiálu vyjadřující jeho vhodnost ke svařování, tj. k vytvoření svarového spoje určité kvality. Ověření se provádí na základě chemického složení pomocí tzv. uhlíkového ekvivalentu, tím se určí, zda je materiál svařitelný, podmíněně svařitelný či obtížně svařitelný. Dalšími významnými faktory ovlivňující svařitelnost jsou např. tloušťka materiálu, obsah vodíku ve svarovém kovu, tepelný příkon a stavy napjatosti při svařování. Všechny vlivy jsou jednotlivě popsány v následujících podkapitolách.

Při navrhování svarového spoje jsou hlavními výpočtovými kritérii pevnostní charakteristiky, nejčastěji mez kluzu. Znalost vztahů mezi těmito vlastnostmi a

strukturou umožní zvýšení pevnosti při zachování dobré houževnatosti. Jemnozrnné oceli je možné zpevnit následujícími způsoby [4]:

- a) Substitučním a intersticiálním zpevněním
- b) Precipitačním zpevněním
- c) Zjemněním zrna

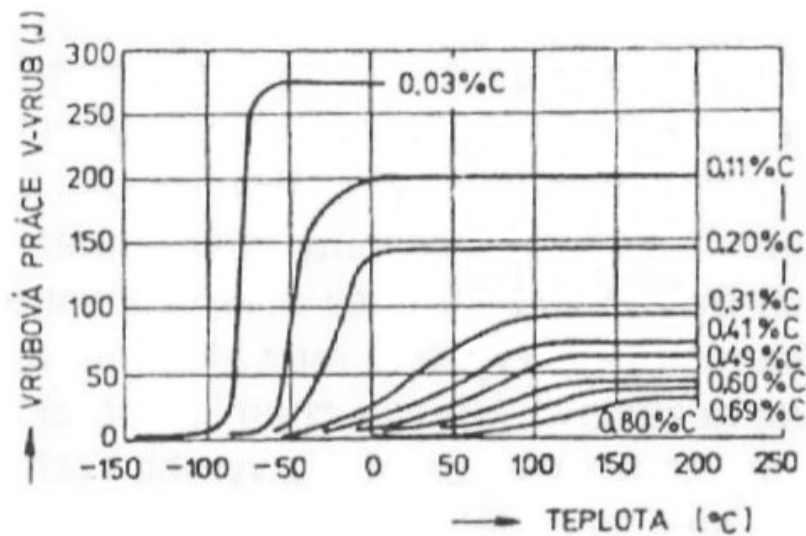
Oceli s feriticko-perlitickou strukturou mají obvykle obsah uhlíku nižší než 0,2 hm. % a jsou tak vhodné ke svařování. Vhodným legováním a tepelným zpracováním lze zvýšit mez kluzu až na 550 MPa. Jakékoliv další zvyšování je ekonomicky nevýhodné, protože by náklady legovacích prvků neodpovídaly dodatečnému zvýšení mechanických vlastností. [5]

Svarové spoje jemnozrnných ocelí se po svaření žíhají ke snížení vnitřního pnutí. Žíhací teploty se pohybují v rozmezí 560 až 600 °C, aby se dosáhlo optimálních pevnostních a plastických vlastností. Vyšší teploty by u precipitačně zpevněných materiálů způsobily zkřehnutí materiálu vznikem nevyhovující karbo-nitridické fáze, tento jev se označuje jako tzv. popouštěcí křehkost. [6]

Substituční a intersticiální zpevnění feritu

Uhlík

Uhlík je schopný substitučního zpevnění feritu, nicméně zvyšování jeho obsahu u ocelí vede k posunutí přechodové teploty k vyšším hodnotám (viz. obr. 3.1), čímž dojde ke ztrátě houževnatosti při nízkých teplotách a zhoršení svařitelnosti. [5]

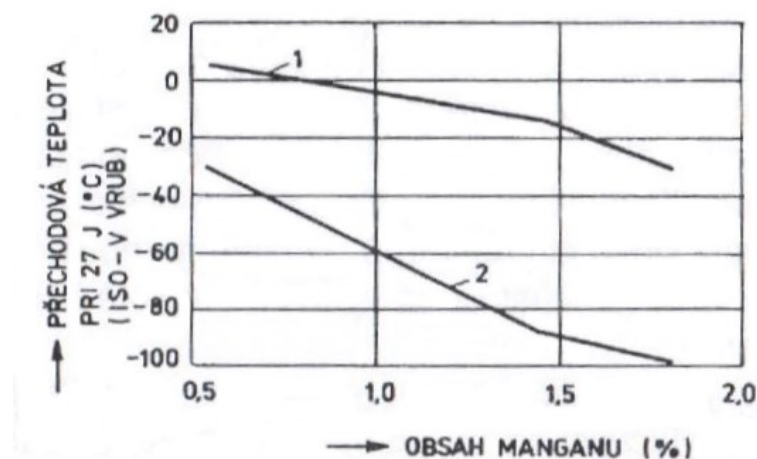


Obrázek 3.1 Vliv uhlíku na nárazovou práci a přechodovou teplotu ocelí s feriticko-perlitickou matricí [5]

Mangan

Mangan zvyšuje mez kluzu přibližně o 5 MPa za každých 0,1% Mn, při obsahu 0,5 až 1,5% Mn. Výhodami je posun přechodové teploty k nižším hodnotám (viz obr. 3.2), snadná dostupnost a relativně nízké náklady. [5]

Je rafinačním prvkem ocelí, protože umožňuje odstranění některých jejich nečistot. Například je na sebe schopný vázat síru v podobě sulfidu MnS, čímž snižuje náchylnost ke vzniku trhlin za tepla (viz kapitola 3.4). [4]



Obrázek 3.2 Vliv manganu na přechodovou teplotu normalizačně žíhané oceli [5];
1 – hrubozrnná ocel, 2 – jemnozrnná ocel

Křemík

Zvyšuje pevnost feritu ocelí s nízkým obsahem uhlíku. Při obsahu Si nad 0,7 hm. % dochází k zdatelnému poklesu vrubové houževnatosti, nad 1,0 hm. % má negativní vliv na trhliny za tepla a při nedostatku (pod 0,1 hm. %) je ocel neuklidněná. [4,5]

Nikl

Je nejvýznamnější austenitotvorným prvkem. Zvyšuje mez kluzu zjemněním lamel perlitu, posouvá přechodovou teplotu k nižším hodnotám a rozpuštěním ve feritu zvyšuje houževnatost. Vlivem těchto účinků mají oceli s obsahem 0,5% Ni po normalizačním žíhání zvýšenou mez kluzu při zachování dobré houževnatosti. [5]

Precipitační zpevnění

Mikrolegováním ocelí prvky Al, Ti, Nb a V se přispívá ke vzniku jemnozrnné struktury a zvýšení pevnosti, a to tím, že tvoří s uhlíkem a dusíkem jemné karbidy, nitridy a karbonitridy. Tyto precipitáty deformují krystalovou mřížku a brání pohybu dislokací a růstu zrna. Protože pevnost materiálu je dána jako odpor proti pohybu dislokací, dojde tímto způsobem ke zvýšení meze kluzu. [5]

Mikrolegováním se rozumí dodávání přídavných prvků, při celkovém obsahu menším než 0,15 hm. %, ke zlepšení vlastností materiálu.

Niob

Přísadou niobu se zvyšuje mez kluzu, avšak i přechodová teplota. Proto oceli legované niobem mohou zaznamenávat zkřehnutí v tepelně ovlivněné oblasti svaru, které lze kompenzovat úpravou podmínek svařování. Obsah niobu bývá 0,02 až 0,06 hm. %. [4,5]

Hliník

V ocelích má silné desoxidační a denitridační účinky. U uklidněných ocelí se doporučuje min. 0,02 hm. %. Během řízeného válcování zabraňuje růstu zrn při rekrytalizaci. [6]

Titan a Vanad

Obdobně jako niob snižují přísady titanu a vanadu mechanické vlastnosti svařitelných ocelí s feriticko-perlitickou matricí. Obsah titanu bývá kolem 0,08 hm. %, vanadu pak 0,1 hm. %. [5]

Zjemnění zrna

Zrno lze zjemnit přísadou prvků Al, Ti, Nb, V, Ta a Zr v kombinaci s vhodným tepelným zpracováním, a to normalizačním žháním či snížením dovalcovací teploty na 550 °C, čím se dosáhne jehlicového feritu s menší velikostí zrna a vyšší pevností. Velikost zrna má vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti ocelí v základním stavu i při tepelném zpracování, protože hranice zrn jsou překážkou pro pohyb dislokací. Tento vliv vyjadřuje Hall-Petchův vztah (viz 3.1) [4,5]:

$$R_e = R_0 + k \cdot d^{-1/2} \text{ [MPa]} \quad 3.1$$

kde značí:

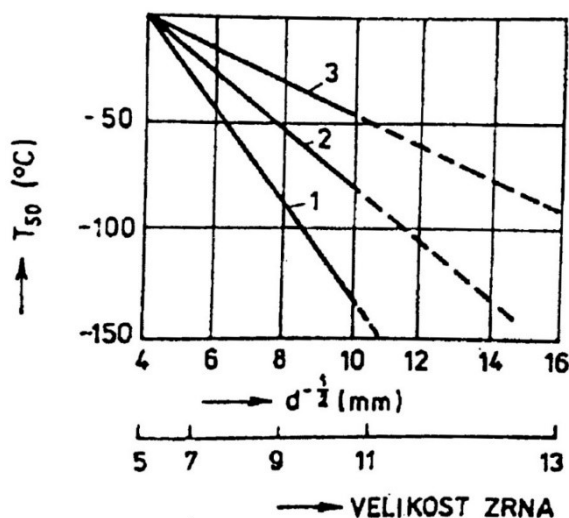
R_e ... mez kluzu [MPa]

R_0 ... třecí napětí potřebné k pohybu dislokací [MPa]

k ... konstanta závislá na smykovém napětím potřebném k uvolnění dislokací [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$]

d ... střední průměr zrna [mm]

Zjemněním zrna se snižuje přechodová teplota a tím roste mez kluzu, která u jemnozrnných ocelí závisí i na obsahu perlitu v matrici. Lze říci, že čím více bude perlitu v matrici, tím musí být jemnější zrno pro zvýšení meze kluzu. Tato skutečnost je uvedena na obr. 3.3. [5]



Obrázek 3.3 Vliv velikosti zrna na přechodovou teplotu feriticko-perlitických ocelí [5];
1 – 5% perlitu v matrici, 2 – 10% perlitu v matrici, 3 – 20% perlitu v matrici

Velikost zrna má také vliv na nežádoucí vytvrzení nízkouhlíkových ocelí, tj. stárnutí. Menší zrna znamenají větší plochu hranic zrn vztaženou na jednotku objemu, čímž se potlačí účinky stárnutí po rychlém ochlazení oceli z teplot A_1 a následném ohřevu na 250 °C. [4]

3.1 Uhlíkový ekvivalent

Pro účely svařování se vhodnost ocelí posuzuje pomocí uhlíkového ekvivalentu, který se použije k navržení vhodných podmínek svařování např. teploty přehřevu (viz kapitola 3.3). Uhlíkový ekvivalent je empirickou hodnotou, která vztahuje kombinovaný účinek vybraných legujících prvků oceli k ekvivalentnímu obsahu uhlíku. Vztahů pro výpočet uhlíkového ekvivalentu existuje mnoho a závisí na chemickém složení, které je vymezeno obsahy jednotlivých prvků. [6,7]

Základní vzorec platí pro oceli s obsahem uhlíku do 0,22 hm. %, vyhovující ekvivalentní obsah uhlíku je $C_e \leq 0,50$ [6]:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot d \text{ [%]} \quad 3.2$$

kde značí:

d ... tloušťku plechu [mm]

Vztah platí do obsahu prvků: C = 0,22 hm. %, Mn = 1,6 hm. %, Cr = 1 hm. %, Ni = 3,0 hm. %, V = 0,14 hm. %, Cu = 0,30 hm. %

Mezinárodní svářečský institut IIW/IIS uvádí vzorec pro oceli s obsahem C > 0,18 hm. % [6]:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} [\%] \quad 3.3$$

Tento vztah se používá při stanovení uhlíkového ekvivalentu podle normy ČSN EN 1011-2 metody AC.2, která je vhodná pro nelegované jemnozrnné a nízkolegované oceli podle ČSN EN 10025-2 a pro skupiny materiálů 1.1 a 1.2 podle TNI CEN ISO/TR 15608. Ekvivalent CEV zdůrazňuje obsah slitinových prvků, obsah difuzního vodíku a kombinovanou tloušťku. [2]

Metoda BC.3 podle normy ČSN EN 1011-2 uvádí vzorec pro eliminaci studeného praskání mikrolegovaných jemnozrnných ocelí (oceli normy ČSN EN 10025-3):

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} [\%] \quad 3.4$$

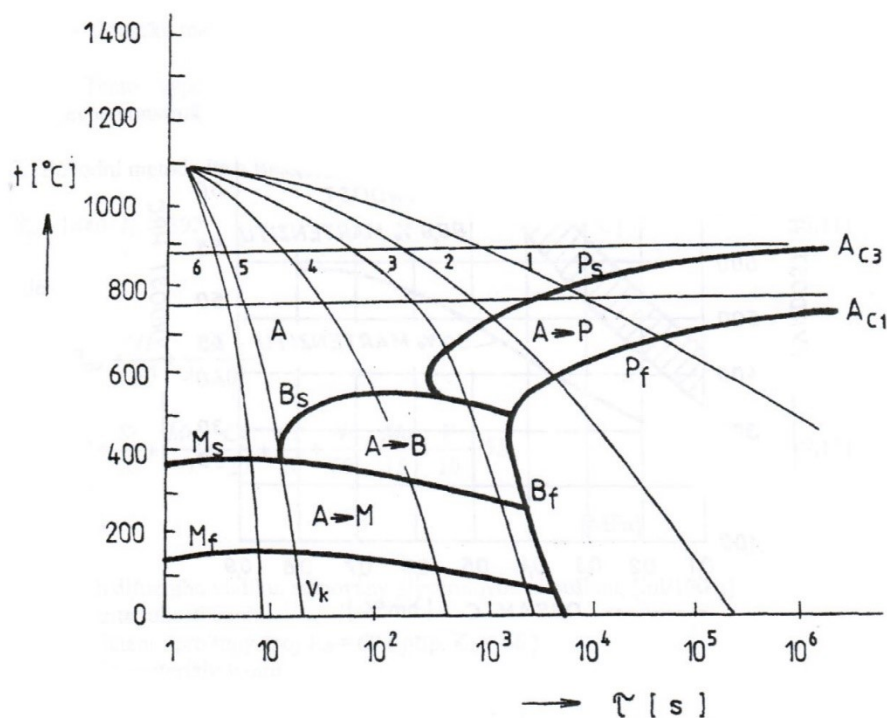
Rozdíly oproti ekvivalentu CEV jsou takové, že ekvivalent CET zdůrazňuje obsah uhlíku, difuzního vodíku a reálné tloušťky. Na základě ekvivalentu CET se stanovuje teplota přehřevu podle, které se řídí ochlazovací doba $t_{8/5}$ jenž určuje výslednou strukturu v TOO. [2]

Platí pro obsahy prvků:

C	0,05 až 0,25 hm. %	Nb	max. 0,06 hm. %
Si	max. 0,80 hm. %	Ni	max. 2,50 hm. %
Mn	0,5 až 1,90 hm. %	Ti	max. 0,12 hm. %
Cr	max. 1,50 hm. %	V	max. 0,18 hm. %
Cu	max. 0,70 hm. %	B	max 0,005 hm. %
Mo	max. 0,75 hm. %		

3.2 Teplota předehřevu

Svařováním se v oblasti svarové lázně (z které po ztuhnutí vznikne vlastní svar = svarový kov) dosahuje vysokých teplot, což může mít za následek vznik martenzitických a bainitických struktur. Tyto struktury jsou pro svarové spoje nežádoucí, protože dosahují vysokých tvrdostí a křehkosti. Ke stanovení struktur vzniklých po ochlazení se používá ARA diagramů (anizotermický rozpad austenitu), kde lze pozorovat počátky a konce strukturních přeměn v závislosti na rychlosti ochlazení.



Obrázek 3.4 Diagram anizotermického rozpadu austenitu [6]

K řízení ochlazovací rychlosti při svařování se běžně užívá teploty předehřevu, kterou se zajistí plynulé ochlazení austenitu a vzniku vyhovující struktury v oblasti svaru. [6]

Podobně jako u uhlíkového ekvivalentu existuje i pro teplotu předehřevu mnoho způsobů výpočtu pro různé skupiny ocelí:

Výpočet dle Séferiána pro uhlíkové a nízkolegované oceli, obsah C > 0,10 hm. % [6]:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad 3.5$$

$$C_p = C_c + C_s \quad 3.6$$

$$C_c = \frac{360C + 40(Mn + Cr) + 20Ni + 28Mo}{360} \quad 3.7$$

$$C_s = 0,005 \cdot d \cdot C_c \quad 3.8$$

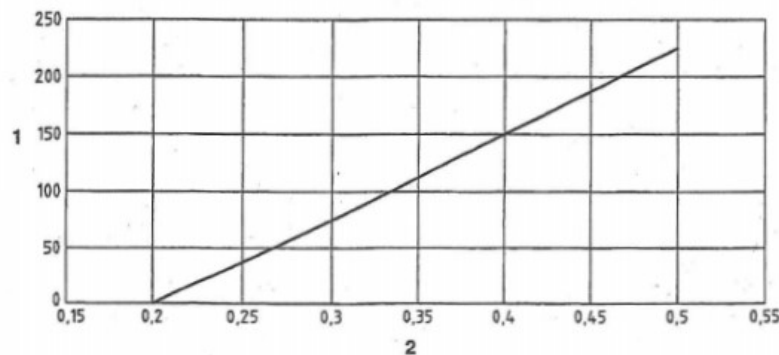
kde značí:

d ... tloušťku materiálu [mm]

Norma **ČSN EN 1011-2 – Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí**, uvádí vztahy pro stanovení teploty předehřevu jemnozrnných ocelí podle jednotlivých vlivů:

Vliv chemického složení

Norma ČSN EN 1011-2 uvádí lineární závislost mezi uhlíkovým ekvivalentem CET a teplotou předehřevu T_p na obr. 3.5.

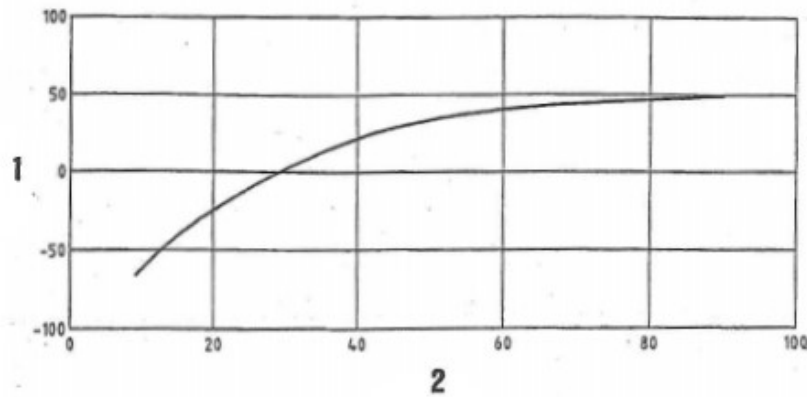


Obrázek 3.5 Závislost teploty předehřevu na uhlíkovém ekvivalentu CET; 1 – T_p [°C], 2 – CET [%]

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \text{ [°C]} \quad 3.9$$

Vliv svařované tloušťky

Na obr. 3.6 lze vidět, že s rostoucí tloušťkou plechu bude růst použitá teplota předehřevu, avšak přibližně od tloušťky 60 mm už tento růst není tak znatelný.



Obrázek 3.6 Závislost teploty předehřevu na tloušťce materiálu; 1 - T_p [°C], 2 - tloušťka plechu [mm]

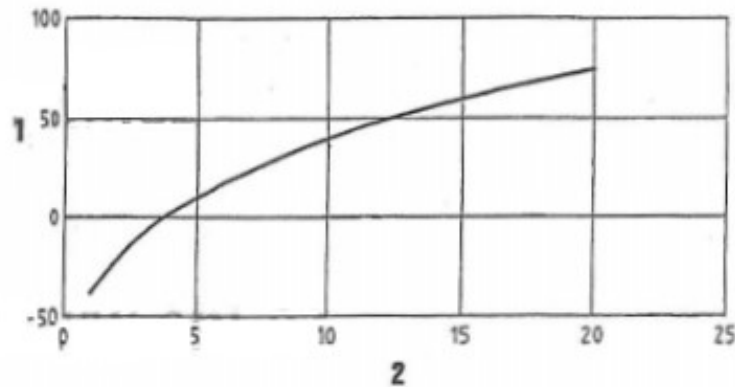
$$T_{pd} = 160 \tanh\left(\frac{d}{35} - 110\right) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad 3.10$$

kde značí:

d ... tloušťku plechu [mm]

Vliv obsahu vodíku

Teplota předehřevu roste s obsahem vodíku ve svarovém kovu viz obr. 3.7, jehož účinek je výraznější při nižších koncentracích.



Obrázek 3.7 Závislost teploty předehřevu na obsahu vodíku; 1 - T_p [°C], 2 - obsah vodíku HD [ml/100g]

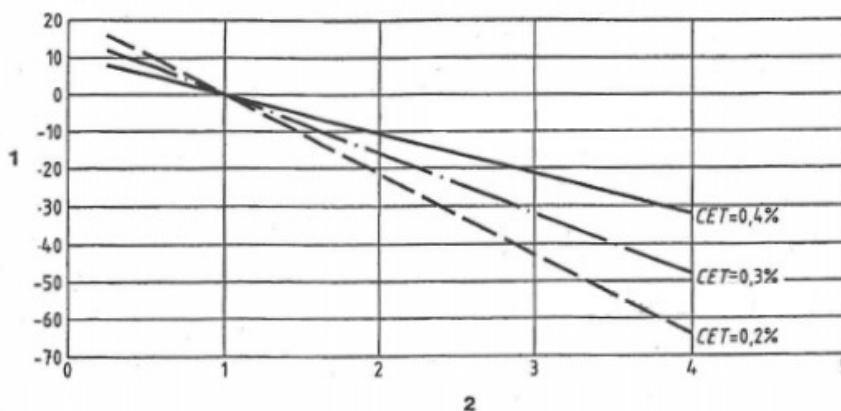
$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 \text{ [°C]} \quad 3.11$$

kde značí:

HD ... obsah vodíku [ml/100 g]

Vliv tepelného příkonu svařování

Vyšší hodnoty svařovacího příkonu dovolují snížit teplotu předehřevu, jak lze vidět na obr. 3.8. Z obrázku je dále patrný i vliv obsahu legur.



Obrázek 3.8 Závislost teploty předehřevu na příkonu svařování; 1 - T_p [°C], 2 - Q [kJ·mm⁻¹]

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \text{ [°C]} \quad 3.12$$

Tepelný příkon je počítán ze vztahu:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} [kJ \cdot mm^{-1}] \quad 3.13$$

kde značí:

U ... napětí na oblouku [V]

I ... svařovací proud [A]

v ... rychlost svařování [mm·⁻¹]

k ... koeficient účinnost metody svařování (pro MAG – 0,8)

Výsledná teplota předeřevu

Při respektování jednotlivých vlivů lze teplotu předeřevu určit kombinovaným vztahem:

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328 [^{\circ}C] \quad 3.14$$

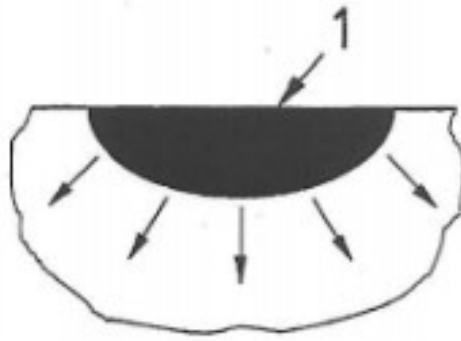
3.3 Doba ochlazování

Ochlazovací rychlost má významný vliv na výslednou strukturu, a tudíž i mechanické vlastnosti svarového spoje, jak bylo popsáno v předchozí kapitole. Pro vyjádření teplotního cyklu svařování se používá doba ochlazování $t_{8/5}$, která vyjadřuje čas během něhož projde tepelně ovlivněná oblast teplotami od 800 do 500 °C.

Norma ČSN EN 1011-2 uvádí vztahy pro výpočet doby ochlazování pro nelegované a nízkolegované oceli:

Trojrozměrný tepelný tok

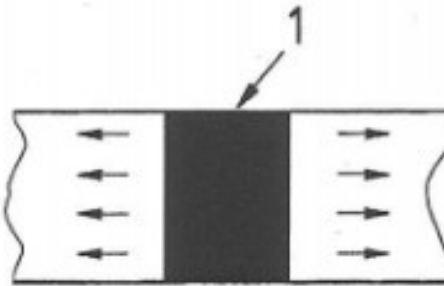
Nastává v případě svařování plechů větších tloušťek, kde samotná tloušťka neovlivňuje dobu ochlazování (viz obr. 3.9).



Obrázek 3.9 Schéma trojrozměrného toku; 1 - svarová housenka

$$t_{8/5} = (6700 - 5T_0) \cdot Q \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \cdot F_3 \quad 3.15$$

Dvojrzměrný tepelný tok



Obrázek 3.10 Schéma dvojrzměrného toku; 1 - svarová housenka

Při svařování relativně tenkých plechů dochází k dvojrzměrnému tepelnému toku, kdy tloušťka plechu má podstatný vliv na dobu ochlazování (viz obr. 3.10).

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3T_0) \cdot 10^5 \cdot \frac{Q^2}{d^2} \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \cdot F_2 \quad 3.16$$

kde značí:

T_0 ... teplotu plechu při svařování (např. T_p)

Q ... tepelný příkon dle vztahu 3.13

F_3 ... faktor svarového spoje při trojrozměrném odvodu tepla (pro tupý svar 0,9)

F_2 ... faktor svarového spoje při dvojrozměrném odvodu tepla (pro tupý svar 0,9)

Podle uvedených rovnic se vypočte doba ochlazování a v úvahu se bere delší hodnota doby $t_{8/5}$. [4]

Kromě výpočtu lze dobu ochlazování stanovit i pomocí diagramů uvedených v normě ČSN EN 1011-2 pro předepsané příkony nebo měřit termočlánkem.

4 Praskavost materiálu

Při tavném svařování může ve vzniklém spoji vlivem vnitřních napětí, přítomností vměstků nebo špatným postupem svařování dojít ke vzniku křehkých lomů. Nejzávažnějším typem vad svarových spojů jsou trhliny, které se dělí podle charakteru jejich vzniku na [1,6]:

- Trhliny za tepla
- Trhliny za studena
- Žíhací trhliny
- Lamelární trhliny

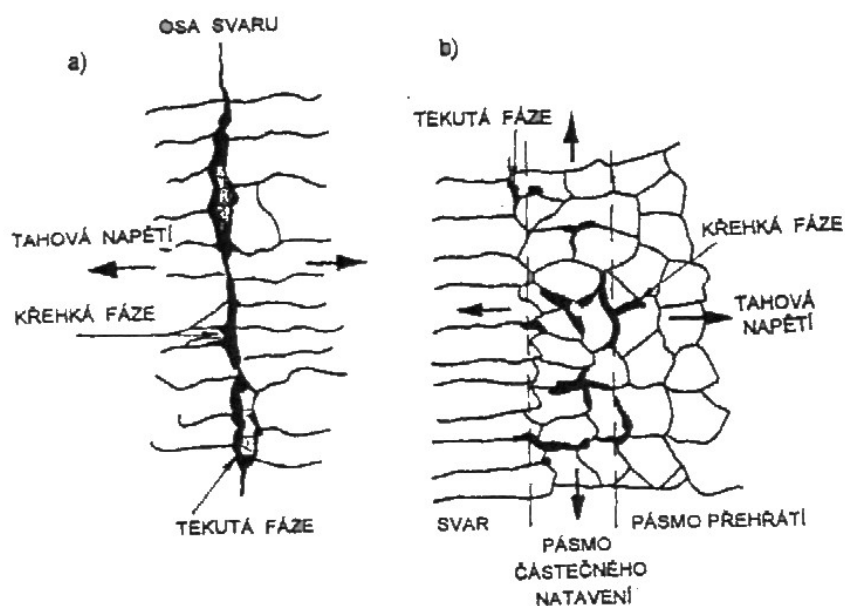
U ocelí, kterými se zabývá bakalářská práce jsou nejčastější právě první dva typy, které jsou blíže popsány v následujících podkapitolách.

Pro minimalizaci vzniku trhlín existuje řada opatření. Tou nejúčinnější je aplikace předeřevu, čímž se prodlouží doba ochlazování a umožní se dosažení rovnovážných strukturních složek ocelí.

4.1 Trhliny za tepla

Při ochlazování svarového spoje za vysokých teplot, tj. při překročení teploty solidu může ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti dojít ke vzniku trhlín. Dělí se podle povahy jejich vzniku na [6]:

- Krystalizační – vznikají mezi tuhnoucími krystaly ve svarovém kovu v důsledku snížení tažnosti okolo teploty solidu
- Likvační – vznikají v tepelně ovlivněné oblasti, nebo ve svarovém kovu při vícevrstevném svařování
- Polygonizační – vznikají poklesem tažnosti vlivem zbytkových pnutí při teplotách rekrytalizace



Obrázek 4.1 Příklady krystalizačních (a) a likvačních trhlin (b) [6]

Prvky S, P, B, Nb, Ti a Si vytvářejí v kombinaci s železem či niklem nízkotavitelná eutektika např. FeS ($T_s = 988 \text{ °C}$) nebo Fe₃P ($T_s = 1048 \text{ °C}$), která mají za následek vznik trhlin. Proto se doporučuje obsah S a P menší než 0,02 hm. %. Dále lze přísadou manganu vázat síru ve formě sulfidů MnS ($T_s = 1610 \text{ °C}$), které mají vyšší teplotu tavení než sulfidy železa, doporučený poměr $\frac{Mn}{S} > 3$. [6]

Náchylnost ocelí ke vzniku trhlin za tepla je možné ověřit na základě obsahu prvků dle vztahu H.C.S (Hot Cracking Sensitivity = citlivost na praskání za tepla) a U.C.S (Units of Crack Susceptibility = míra citlivosti na praskání za tepla) [6]:

$$H.C.S = \frac{C \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \cdot 10^3}{3Mn + Cr + Mo + V} [\%] \quad 4.1$$

Nelegované oceli jsou náchylné na trhliny za tepla pokud $H.C.S > 4$, nízkolegované pokud $H.C.S > 1,6$. [6]

$$U.C.S = 230C + 190S + 75P + 45Nb - 12,3Si - 5,4Mn - 1 [\%] \quad 4.2$$

Oceli s hodnotou $U.C.S < 10$ vykazují dobrou odolnost proti vzniku trhlin za tepla, naopak oceli s $U.C.S > 30$ jsou náchylné ke vzniku těchto trhlin. [9]

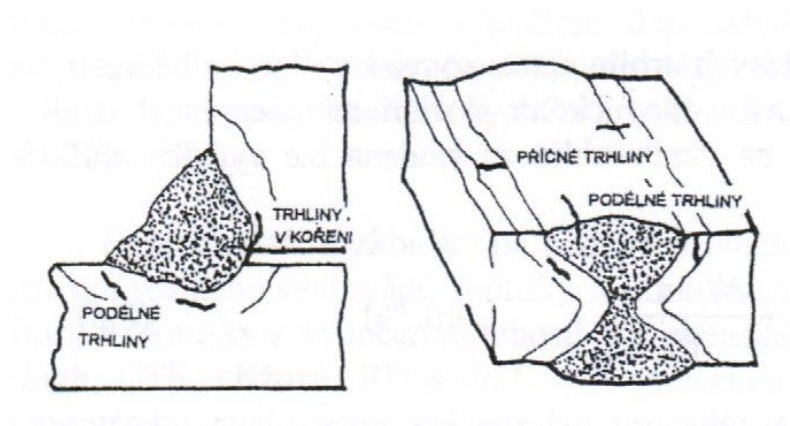
Vznik trhlin za tepla je možné omezit [6]:

- Snížením měrného příkonu svařování – tím se sníží množství vneseného tepla, natavené fáze a růst zrna
- Potlačení deformací a napětí vhodným postupem svařování a předehřevem
- Použitím přídatných materiálů vysoké čistoty

4.2 Trhliny za studena

Studené trhliny svarového spoje vznikají při nízkých teplotách přibližně kolem 200 °C. Trhliny jsou transkrystalické povahy tzn. lom probíhá přes zrna, jejich povrch je lesklý a neoxidovaný. Příčinou studených trhlin bývá [6]:

- Přítomnost vodíku ve svarovém spoji
- Vznik struktury citlivé na vodík
- Účinek vnitřních pnutí



Obrázek 4.2 Příklady trhlin za studena [6]

Náchylnost ocelí ke vzniku trhlin za studena se vyjadřuje uhlíkovým ekvivalentem I_W/I_S podle vzorce 3.4. [6]

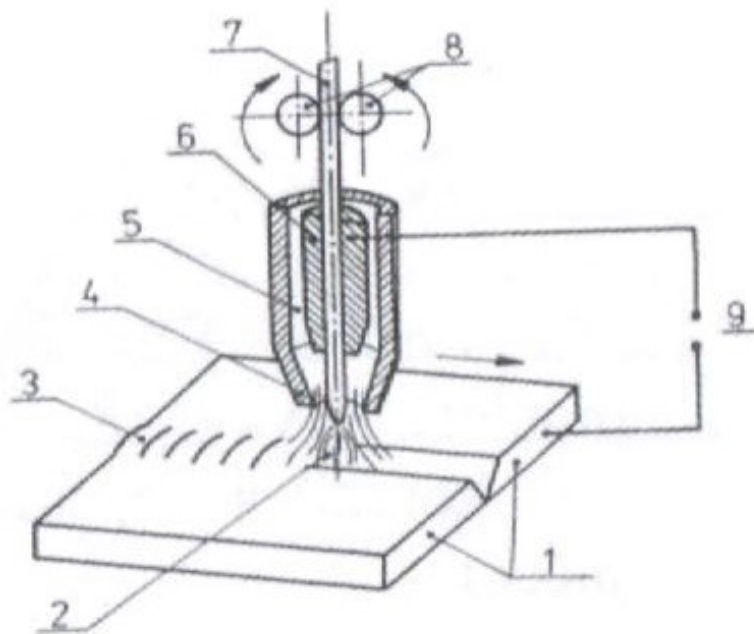
Maximální hodnoty uhlíkového ekvivalentu pro jmenovité tloušťky materiálu ocelí jsou uvedeny v jejich příslušných normách.

Studeným trhlinám lze přecházet [6]:

- Omezením přístupu vodíku
- Použitím předeřevu a popř. dohřevu ovlivnit ochlazování
- Vhodným postupem svařování omezit vznik zbytkových napětí

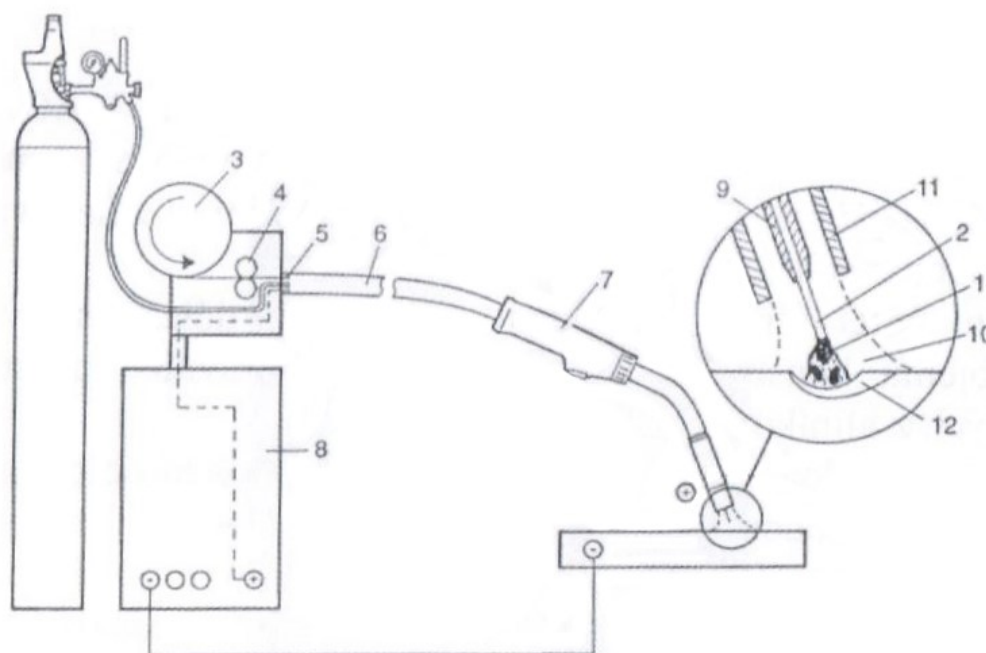
5 Obloukové svařování metodou MAG

Celosvětově nejrozšířenějším způsobem svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí je metoda MAG (Metal Active Gas). Podle normy **ČSN EN ISO 4063 – Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování**, se značí metoda MAG číselnou značkou 135. Princip spočívá v hoření elektrického oblouku mezi tavící se elektrodou a základním materiálem v atmosféře ochranného aktivního plynu (viz obr. 5.1). Obdobou je metoda MIG, která je s metodou MAG totožná s tím rozdílem, že při svařování používá inertních plynů, které se neúčastní chemických reakcí v elektrickém oblouku. Této metody se nejvíce využívá při svařování hliníku a jeho slitin. [12]



Obrázek 5.1 Schéma principu MIG/MAG svařování [12]; 1 – svařovaný materiál, 2 – elektrický oblouk, 3 – svar, 4 – plynová hubice, 5 – ochranný plyn, 6 – kontaktní průvlek (špička), 7 – přídavný drát, 8 – podávací kladky, 9 – zdroj proudu

Přídavný materiál ve formě drátu je přiváděn hořákem pomocí podávacích kladek a napájen elektrickým proudem. Obecně platí, že s rostoucí rychlostí podávání drátu roste hodnota svařovacího proudu a tím i výkon natavení. Tyto parametry spolu s typem použitého ochranného plynu mají vliv na způsob přenosu kovu do svarové lázně. Schéma svařovacího zařízení lze vidět na obr. 5.2. [12]



Obrázek 5.2 Schéma svařovacího zařízení [12]; 1 – elektrický oblouk, 2 – drátová elektroda, 3 – zásobník drátu, 4 – podávací kladky, 5 – rychloupínací spojka, 6 – hořákový kabel, 7 – svařovací hořák, 8 – zdroj svařovacího proudu, 9 – kontaktní svařovací průvlak, 10 – ochranný plyn, 11 – plynová tryska, 12 – svarová lázeň

Dosahované teploty při MAG svařování bývají 1 700 °C až 2 500 °C pro teplotu kapek, 1 600 °C až 2 100 °C pro teplotu lázně v závislosti na parametrech svařování a chemickém složení a 7 000 °C až 15 000 °C pro maximální teplotu elektrického oblouku. [12]

Z tohoto faktu je zřejmé, že při svařování větších tloušťek bude svařovaná oblast dosahovat obrovských teplot, což bude mít za následek ovlivnění struktury svarového kovu. Proto je nutné dbát na navržení vhodných teplotních cyklů, podmínek svařování a popř. tepelného zpracování.

5.1 Příkladný materiál

Při svařování metodou MAG se užívá odtavující se elektrody, která kromě vedení elektrického proudu potřebného k zapálení oblouku plní i další funkce. Tou nejdůležitější je doplňování objemu kovu do svarové lázně, což umožňuje dosáhnout požadovaného

tvaru vzniklého svaru. Dále dodává jak prvky, které vlivem svařování snížily svou koncentraci, tak i legovací a dezoxidační přísady. [12]

Hlavní zásadou při volbě správného přídatného materiálu je zajištění stejné nebo vyšší pevnosti a kvality svarového kovu oproti základnímu materiálu. Aby bylo možné tuto zásadu dodržet je nutné znát vlastnosti základního materiálu, parametry svařování a provozní podmínky vzniklé konstrukce. [12]

Přídavné materiály mají podobu plných či plněných drátových elektrod o stanoveném průměru, běžně dodávaných v cívkách dané hmotnosti. Jejich způsob označování a klasifikace pro svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí je uveden v normách **ČSN EN ISO 14341** – *Svařovací materiály – Drátové elektrody pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí v ochranném plynu a jejich svarové kovy – Klasifikace*, pro plné drátové elektrody a **ČSN EN ISO 17632** – *Svařovací materiály – Plněné elektrody pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí s ochranou plynu a bez ochrany plynu – Klasifikace*, pro plněné elektrody.

5.2 Ochranné plyny

Pro MAG svařování se používají ochranné aktivní plyny, které se účastní chemických reakcí v elektrickém oblouku a reagují s taveninou. Ovlivňují některé parametry svařování, kvalitu a vlastnosti vzniklého svarového spoje. Norma **ČSN EN ISO 14175** – *Svařovací materiály – Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*, rozděluje ochranné plyny do následujících skupin [12]:

- M – oxidační (Ar + CO₂, Ar + CO₂ + O₂, Ar + CO₂ + He + O₂)
- C – vysoce oxidační (CO₂, CO₂ + O₂)
- R – redukční (Ar + H₂, N₂ + H₂)
- I – inertní (Ar, He, Ar + He)
- F – nereagující (N₂)

Metoda MAG využívá plynů skupiny M a C, přičemž v dnešní době nejběžnějším plynem bývá směs Ar + CO₂ v poměru 82:18. [12]

5.3 Zdroje svařovacího proudu

K zapálení elektrického oblouku je potřeba vhodného zdroje proudu a napětí odpovídající statické charakteristice, tj. závislosti svorkového napětí zdroje na odebraném proudu, použité metody svařování. Pro metodu MAG je tato závislost charakteristická s konstantním napětím obr. 5.3. [12]



Obrázek 5.3 Charakteristika s konstantním napětím (plochá) [12]

Při této charakteristice používají zdroje tzv. samoregulaci svařovacích parametrů tj. změn proudů a napětí, což umožňuje zvýšit hodnotu proudu a tím i odtavovací rychlost elektrody při konstantním napětí a rychlosti podávání drátu došlo-li by k poklesu odporu vlivem zkrácení elektrického oblouku. Samoregulace funguje i v opačném případě při prodloužení oblouku. [12]

Podle druhu proudu rozlišujeme zdroje střídavé a stejnosměrné, podle způsobu konstrukce pak rotační a nerotační. Zdroje proudu pro metody obloukového svařování se řídí normou **ČSN EN IEC 60974-1 – Zařízení pro obloukové svařování – Část 1: Zdroje svařovacího proudu**, která stanovuje obecné, bezpečnostní a provozní požadavky zdrojů. [12]

6 Kontrola a zkoušení svarů

Ověření svarových spojů obloukových metod svařování se řídí normou **ČSN EN ISO 15614-1 – Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška**

postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu. Tato norma stanovuje normalizované zkušební kusy, způsoby jejich kontroly a také rozsahy kvalifikace svařovacích postupů.

Neodpovídá-li dostatečně svařovaný výrobek normalizovanému zkušebnímu kusu svými rozměry, pak je nutné řídit se normou **ČSN EN ISO 15613 – Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Kvalifikace na základě předvýrobní zkoušky svařování**, která specifikuje požadavky na zvláštní zkušební kusy. Kvalifikace postupu se poté realizuje na reálném výrobku.

„Příprava a svařování zkušebních kusů musí být provedeny za obvyklých podmínek výrobního svařování. Tvary a rozměry zkušebního kusu musí napodobovat skutečné podmínky svařování konstrukce. Zahrnuje to polohy při svařování a jiné podstatné náležitosti, např. podmínky namáhání, tepelné vlivy, omezený přístup, stav svarových hran.“ (ČSN EN ISO 15613 – Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Kvalifikace na základě předvýrobní zkoušky svařování, 2005).

Norma **ČSN EN ISO 15614-1** rozeznává dvě úrovně kontroly a zkoušení zkušebních kusů. Kvalifikuje-li se zkušební kus na úroveň 2, pak je kvalifikován i na úroveň 1, ale ne naopak.

Tabulka 6.1 Přehled kontrol a zkoušek svarových spojů dle normy ČSN EN ISO 15614-1

Úroveň 1	Úroveň 2
<ul style="list-style-type: none"> • Vizuelní kontrola • Příčná zkouška tahem • Příčná zkouška ohybem 	<ul style="list-style-type: none"> • Vizuelní kontrola • Radiografické nebo ultrazvukové zkoušení • Zkouška na povrchové trhliny • Příčná zkouška tahem • Příčná zkouška ohybem • Zkouška rázem v ohybu • Zkouška tvrdosti • Makroskopická kontrola

V rámci bakalářské práce se po konzultaci s vedoucím navrhly vzorky pro posouzení kvality a rozdílů mezi jednotlivými jakostmi oceli. Posouzení bylo realizováno pomocí vizuelní kontroly, metalografické analýzy a zkoušky tvrdosti.

6.1 Metalografická analýza

K pozorování struktury kovů se běžně používá světelná mikroskopie, která umožňuje hodnocení jednotlivých strukturních složek, trhlin, pórů a jiných vad. To je výhodné právě při ověřování kvality svarových spojů. [14]

Abychom mohli pozorovat strukturu materiálu, je nutné zajistit dokonalou přípravu metalografických vzorků. To obnáší jejich odebrání (obvykle příčně přes svarový spoj) bez tepelného ovlivnění, které by mohlo pozorovanou strukturu znehodnotit. Dále se vzorky zafixují zpravidla zalitím či zalisováním do pryskyřice popř. jiné speciální lisovací hmoty. Následuje broušení a posléze leštění, čímž se dosáhne velmi kvalitního povrchu s minimem nerovností, jehož pozorováním můžeme hodnotit strukturní vměstky či trhliny. [14]

Vyvolání struktury se dosáhne naleptáním leštěného povrchu vhodným leptadlem. Pro nízkolegované oceli jím je nejčastěji Nital, což je roztok kyseliny dusičné v ethanolu. Pozorováním takto zpracovaného povrchu materiálu lze hodnotit nejen strukturní složky a vady, ale také velikost zrna, podíl jednotlivých fází apod. [14]

Norma **ČSN EN ISO 17639** – *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*, uvádí postupy, zkušební vzorky a cíle kontroly svarů.

6.2 Zkoušky tvrdosti

Vnikací zkoušky jsou v technické praxi nejčastěji používanou metodou ke zjištění tvrdosti. Výhodou těchto nedestruktivních zkoušek je jejich nízká časová náročnost, cena a možnost provedení na konečné části výrobku.

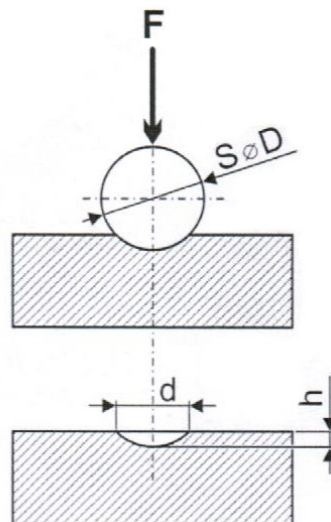
Tvrdotí se rozumí odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa a je ovlivněna mnoha faktory. Mezi ty nejhlavnějšími patří [13,14]:

- mikrostruktura zkoušeného materiálu
- elastické a plastické vlastnosti materiálu
- teplota, při níž probíhá zkouška
- typ indentoru
- velikost a doba působení zatěžovací síly

Princip těchto zkoušek spočívá ve vlačování vnikacího tělesa, tj. indentoru do povrchu zkušební tělesa, v němž se vytvoří vtisk. Typ indentoru, velikost zatěžujících sil a způsob vyhodnocení vtisku se liší podle použité metody. Pro zajištění správnosti měření musí být povrch zkušební tělesa hladký, rovný, dokonale očištěný od cizích látek a osa indentoru musí být kolmá s rovinou zkušební plochy tělesa. [13,14]

6.2.1 Zkouška tvrdosti dle Brinella

Při zkoušce tvrdosti dle Brinella se do povrchu zkušební materiálu vlačuje tvrdokovová kulička, která je zatížena známou silou viz obr. 6.1. [14]



Obrázek 6.1 Schéma zkoušky dle Brinella s označením parametrů [14]

Ze vzniklého vtisku se po odlehčení nejprve změří střední průměr vtisku d a poté se podle vzorce 6.1 vypočte hodnota tvrdosti jako poměr zatěžovací síly a plochy vtisku.

[14]

$$HBW = 0,102 \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad 6.1$$

kde značí:

HBW ... tvrdost dle Brinella

F ... zkušební zatížení [N]

D ... průměr kuličky [mm]

d ... střední průměr vtisku [mm]

Příklad značení tvrdosti dle Brinella je uveden v tabulce 6.2.

Tabulka 6.2 Značení tvrdosti při zkoušce dle Brinella [14]

X HBY D/F/t
Přehled parametrů:
X – naměřená hodnota tvrdosti HB
Y – materiál použitého indentoru (S = kalená ocelová kulička, W = tvrdokovová kulička)
D – průměr kuličky v milimetrech, není-li uvedeno jinak, pak byla použita kulička o standardním průměru 10 mm
F – zatěžovací síla v kilopondech
t – doba působení zatížení v sekundách, není-li uvedeno jinak, pak byla použita standardní doba 10-15 s

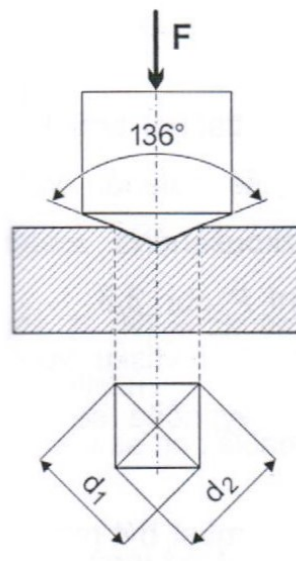
Příklad: Tvrdost dle Brinella 600 naměřená kuličkou z tvrdokovu o průměru 1 mm, zatěžovací síla 30 kp s dobou zatížení 20s [14]:

600 HBW 1/30/20

Norma **ČSN EN ISO 6506-1** – *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella, Část 1: Zkušební metoda*, uvádí veškeré specifikace zkušebních zařízení, těles a postupu pro danou metodu zkoušení tvrdosti pro kovové materiály.

6.2.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Tato metoda je svým průběhem velmi podobná zkoušce tvrdosti dle Brinella. Indentorem je pravidelný čtyřboký jehlan z diamantu s vrcholovým úhlem 136° . Působením zkušebního zatížení se na povrchu zkušebního tělesa vytvoří vtisk ze kterého se změří délky úhlopříček d_1 a d_2 (obr. 6.2), a ty se použijí k výpočtu jejich aritmetického průměru. Tyto úhlopříčky se měří s přesností na tisíce milimetrů. [14]



Obrázek 6.2 Schéma zkoušky dle Vickerse s označením parametrů [14]

Tvrdot materialu se určí ze vztahu 6.2 poměrem zatěžovací síly a plochy vtisku. [14]

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad 6.2$$

kde značí:

HV ... tvrdost dle Vickerse

F ... zkušební zatížení [N]

d ... aritmetický průměr délek úhlopříček [mm]

Příklad značení tvrdosti dle Vickerse je uveden v tabulce 6.3.

Tabulka 6.3 Značení tvrdosti při zkoušce dle Vickerse [14]

X HV F/t
Přehled parametrů:
X – naměřená hodnota tvrdosti HV
F – zatěžovací síla v kilopondech
t – doba působení zatížení v sekundách, není-li uvedeno jinak, pak byla použita standardní doba 10-15 s

Příklad: Tvrdost dle Vickerse 640, zatěžovací síla 1 kp s dobou zatížení 20s [14]:

640 HV 1/20

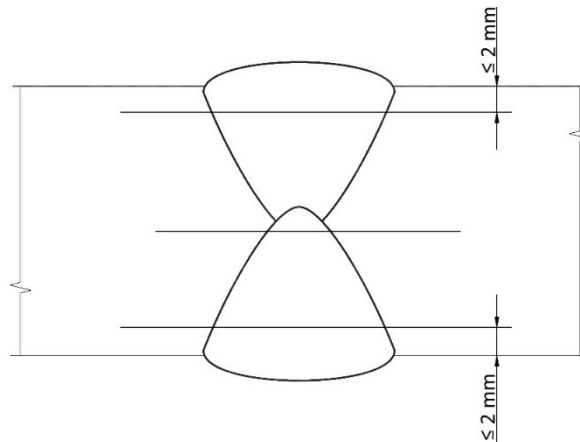
Specifikace metody dle Vickerse jsou dány normou **ČSN EN ISO 6507-1 - Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse, Část 1: Zkušební metoda**, pro různé rozsahy zkušebního zatížení kovových materiálů uvedené v tabulce 6.4. Zároveň stanovuje přípravu zkušebních vzorků, které mají být odebrány tak, aniž by došlo k metalurgickému ovlivnění zkoušeného povrchu.

Tabulka 6.4 Rozsahy zkušebního zatížení dle normy ČSN EN ISO 6507-1

Rozsahy zkušebního zatížení F [N]	Značka tvrdosti	Význam
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti podle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až < HV 5	Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení
$0,009\ 807 \leq F < 1,961$	HV 0,001 až < HV 0,2	Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse

Pro hodnocení tvrdosti svarových spojů dle Vickerse se užívá normy **ČSN EN ISO 9015-1 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti – Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním**, která udává zkušební postupy a příklady vhodného umístění vtisků. Měření se musí provést tak, aby se mohl vyhodnotit průběh tvrdosti ve svarovém kovu, tepelně ovlivněných oblastech a

základním materiálu. Pro oboustranné V svary ocelí je příklad umístění řad vtisků zobrazen na obr. 6.3.



Obrázek 6.3 Oboustranný jedno- a vícehouseskový svar dle normy ČSN EN ISO 9015-1

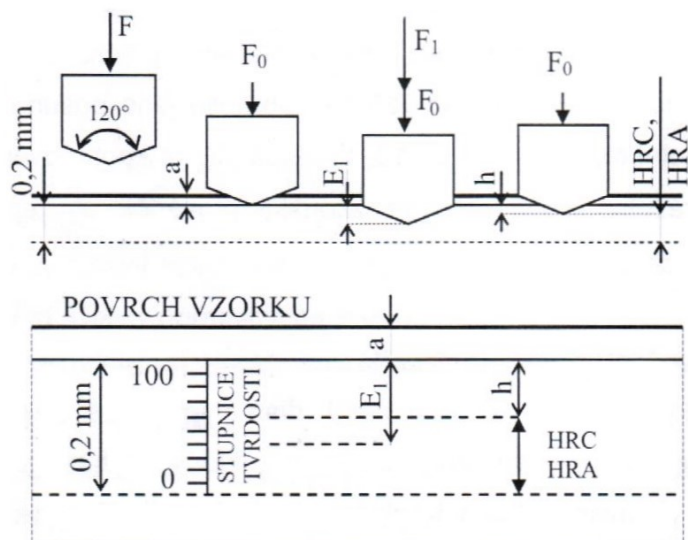
6.2.3 Zkouška tvrdosti dle Rockwella

Zkouška tvrdosti dle Rockwella se oproti již dvěma zmíněným metodám liší ve vyhodnocení a především ve způsobu zatížení vnikacího tělíska, které je realizováno tak, aby byl vyloučen vliv povrchové vrstvy materiálu viz obr. 6.4. [14]

Norma **ČSN EN ISO 6508-1** *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Část 1: Zkušební metoda*, specifikuje zkušební stroje, tělesa a postup zkoušky pro kovové materiály. Dále uvádí 15 základních stupnic, které se liší v typu vnikacího tělíska a zatěžujících sil. Přehled nejčastěji používaných tří typů stupnic lze vidět na tabulce 6.5. [14]

Tabulka 6.5 Přehled vybraných stupnic dle Rockwella [14]

Stupnice tvrdosti dle Rockwella	Značka tvrdosti	Typ vnikacího tělíska	Předběžné zkušební zatížení F_0 [N]	Přídavné zkušební zatížení F_1 [N]	Celkové zkušební zatížení F [N]	Oblast použití (tvrdost dle Rockwella)
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20 – 88 HRA
B	HRB	Kulička 1,587 mm	98,07	882,6	980,7	20 – 100 HRB
C	HRC	Diamantový kužel	98,07	1 373	1 471	20 – 70 HRC



Obrázek 6.4 Schéma zatěžování a stanovení tvrdosti dle Rockwella (stupnice A,C) [14]

7 Praktická část

V praktické části bakalářské práce byly porovnány vlastnosti vybraných stavů konstrukčních ocelí S355 – tedy jakostí J2 a NL, větších tloušťek po svařování. Tomu předcházela příprava vzorků a jejich svarových ploch k vytvoření tupého spoje konkrétně oboustranného V svaru. Po svaření byly vzorky naděleny tak, aby bylo možné provést jejich kontrolu, která sestávala z metalografické analýzy a zkoušky tvrdosti.

Tato práce navazuje na bakalářskou práci *Chábera, J.: Porovnání vlastností ocelí S355J2 a S355NL po svařování, Bakalářská práce, FS, ČVUT v Praze, Praha, 2019*, s cílem ověřit vlastnosti stejných stavů ocelí, avšak z polotovarů odebraných z tyčí větších průměrů. V předchozí práci byly svařovány zkušební tyče o průměru 40 mm. Zde byly dodány tyče o průměru 150 mm. Z důvodu porovnatelnosti výsledků s předchozí prací, a protože se takové svary v technické praxi tolik nevyskytují, byly z těchto tyčí odebrány, kolmo na osu tyče, vzorky o tloušťce 40 mm. Pro samotné svařování byly použity stejné podmínky svařování pro obě jakosti ocelí.

Podmínky svařování byly navíc pro každý stav ověřeny na základě jejich chemického složení uvedeného v inspekčních certifikátech typu 3.1 dle **ČSN EN 10204** *Kovové výrobky – Druhy dokumentů kontroly*, viz příloha p1 a p2.

7.1 Příprava vzorků

Poskytnutý materiál ve formě tyčí o průměru 150 mm byl nařezán na gravitační pásové pile BOMAR Ergonomic 275.230 DG na dílce o tloušťce 40 mm.

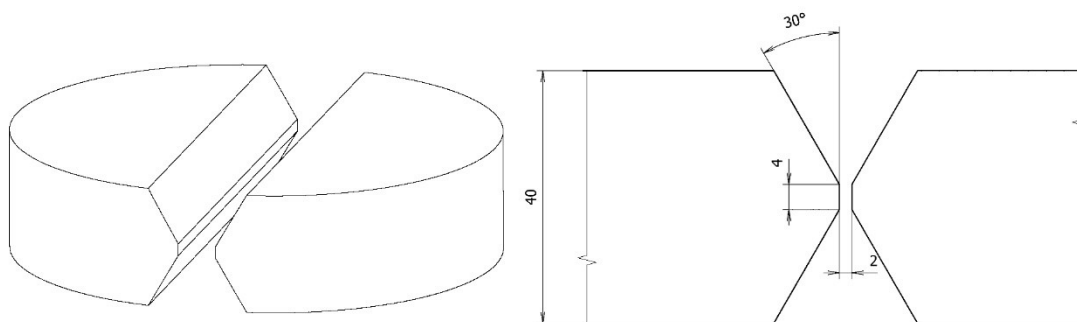


Obrázek 7.1 Dělení materiálu



Obrázek 7.2 Příprava svarových ploch

Ty byly dále naděleny na polovinu a na vzniklých rovných plochách byly obrobeny svarové plochy s úhlem zkosení 30° a šířkou otupení 4 mm.



Obrázek 7.3 Schéma zkušebních vzorků s detailem svarových ploch

Na základě chemického složení ocelí získaného z inspekčních certifikátů a vzorců uvedených v kapitole 3 byla ověřena svařitelnost a teplota předehřevu, tyto hodnoty jsou nezbytné ke stanovení vhodných podmínek svařování.

7.1.1 Podmínky svařování oceli S355J2

Chemické složení

Tabulka 7.1 Chemické složení oceli S355J2+AR

	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni
Hm. %	0,16	1,45	0,166	0,012	0,013	0,03	0,03	0,01
	Mo	V	Sn	As	Ti	Al	Nb	N
Hm. %	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,028	0,001	0,0067

Uhlíkový ekvivalent CEV

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

$$CEV = 0,16 + \frac{1,45}{6} + \frac{0,03 + 0,003 + 0,001}{5} + \frac{0,01 + 0,03}{15}$$

$$CEV = 0,41 \%$$

Norma ČSN EN ISO 10025-2 udává maximální hodnotu CEV = 0,47 % při použití materiálu oceli S355J2 tloušťky 40 mm. Podle výpočtu tedy není nutné použití předehřevu.

Uhlíkový ekvivalent CET

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

$$CET = C + \frac{1,45 + 0,003}{10} + \frac{0,03 + 0,03}{20} + \frac{0,01}{40}$$

$$CET = 0,31\%$$

Norma ČSN EN 1011-2 uvádí maximální hodnotu CET = 0,26 % při použití materiálu tloušťky 40 mm. Podle výpočtu je nutné použití předehřevu.

Vzhledem k předchozím výsledkům byla dále vypočítána doporučená teplota předehřevu pomocí několika způsobů z důvodu možnosti provedení srovnání výpočtu dle jednotlivých vztahů. Nejprve byl použit obecný vzorec pro výpočet teploty předehřevu dle Séferiána a poté výpočet doporučený normou ČSN EN 1011-2, který byl vyvinut speciálně pro jemnozrné oceli.

Teplota předehřevu dle Séferiána

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

$$C_c = \frac{360 \cdot 0,16 + 40(1,45 + 0,03) + 20 \cdot 0,01 + 28 \cdot 0,003}{360}$$

$$C_c = 0,325\ 233$$

$$C_s = 0,005 \cdot d \cdot C_c$$

$$C_s = 0,005 \cdot 40 \cdot 0,325\ 233$$

$$C_s = 0,065\ 047$$

$$C_p = C_c + C_s$$

$$C_p = 0,325\ 233 + 0,065\ 047$$

$$C_p = 0,390\ 280$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25}$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{0,390\ 280 - 0,25}$$

$$T_p = 131,1\ ^\circ\text{C}$$

Teplota předehřevu dle ČSN EN 1011-2, metoda B

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

$$Q = 0,8 \cdot \frac{150 \cdot 19,3}{4} \cdot 10^{-3}$$

$$Q = 0,579\ \text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328$$

$$T_p = 697 \cdot 0,31 + 160 \cdot \tanh\left(\frac{40}{35}\right) + 62 \cdot 5^{0,35} + (53 \cdot 0,31 - 32) \cdot 0,579 - 328$$

$$T_p = 117,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výpočet teploty předehřevu vyšel 131 resp. 117 °C, což je relativně nízká hodnota vzhledem k nejčastěji volené teplotě předehřevu 150 °C. Výpočtový vztah dle doporučení ČSN EN 1011-2, který je pro daný materiál vhodnější, má hodnotu nižší. Proto byla vzhledem k velké tloušťce zkušebního kusu zvolena teplota předehřevu $T_p = 125 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Náchylnost vzniku trhlin za tepla

Protože v rámci experimentu bude tvořen vícevrstvý svar, byla ověřena i náchylnost na vznik trhlin za tepla. K tomu byly použity dva základní výpočetní způsoby, tj. parametry H.C.S a U.C.S, které vycházejí z normy ČSN EN 1011-2 a jejich bližší popis je uveden v kapitole 4.1.

$$H.C.S = \frac{C \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \cdot 10^3}{3Mn + Cr + Mo + V}$$

$$H.C.S = \frac{0,16 \cdot \left(0,013 + 0,012 + \frac{0,166}{25} + \frac{0,01}{100} \right) \cdot 10^3}{3 \cdot 1,45 + 0,03 + 0,003 + 0,001}$$

$$H.C.S = 1,16 \%$$

Pro konstrukční nelegované oceli je kritická hodnota $\geq 4\%$ (pro nízkolegované $\geq 1,6\%$). V tomto případě je výpočet vyhovující a materiál dle parametru H.C.S nevykazuje zvýšenou citlivost na trhliny za tepla.

Pro další ověření byl použit parametr U.C.S, který vychází z normy ČSN EN 1011-2:

$$U.C.S = 230 \cdot C + 190 \cdot S + 75 \cdot P + 45 \cdot Nb - 12,3 \cdot Si - 5,4 \cdot Mn - 1$$

$$U.C.S = 230 \cdot 0,16 + 190 \cdot 0,013 + 75 \cdot 0,012 + 45 \cdot 0,001 - 12,3 \cdot 0,166 - 5,4 \cdot 1,45 - 1$$

$$U.C.S = 29,3 \%$$

Materiály s hodnotou parametru menší než 10 vykazují vysokou odolnost svarového kovu proti vzniku trhlin za tepla. Naopak pokud je hodnota parametru větší než 30, pak vykazuje nízkou odolnost. Vzhledem k tomu, že se výpočet dle uvedeného vztahu vyšel 29,3 %, pak lze předpokládat možné problémy se vznikem trhlin za tepla. Proto je vhodné snížit celkový tepelný příkon do materiálu předepsáním teploty interpass. Ta byla pro experiment volena $T_i = 200 \text{ }^\circ\text{C}$.

7.1.2 Podmínky svařování oceli S355NL

Chemické složení

Tabulka 7.2 Chemické složení oceli S355NL

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
Hm. %	0,18	1,24	0,24	0,015	0,009	0,15	0,12	0,18
	Mo	V	Al	Ti	Nb	Sn		
Hm. %	0,04	0,003	0,028	0,002	0,001	0,013		

Uhlíkový ekvivalent CEV

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

$$CEV = 0,18 + \frac{1,24}{6} + \frac{0,15 + 0,04 + 0,003}{5} + \frac{0,12 + 0,18}{15}$$

$$CEV = 0,45 \%$$

Norma ČSN EN ISO 10025-2 udává maximální hodnotu CEV = 0,43 % při použití materiálu oceli S355NL tloušťky 40 mm. Podle výpočtu je tedy nutné použití přehřevu.

Uhlíkový ekvivalent CET

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

$$CET = C + \frac{1,24 + 0,04}{10} + \frac{0,15 + 0,18}{20} + \frac{0,12}{40}$$

$$CET = 0,33 \%$$

Norma ČSN EN 1011-2 uvádí maximální hodnotu CET = 0,26 % při použití materiálu tloušťky 40 mm. Podle výpočtu je nutné použití předehřevu.

V následující části byla na základě předchozích výsledků vypočítána doporučená teplota předehřevu, obdobně jako u oceli S355J2.

Teplota předehřevu dle Séferiána

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

$$C_c = \frac{360 \cdot 0,18 + 40(1,24 + 0,15) + 20 \cdot 0,12 + 28 \cdot 0,04}{360}$$

$$C_c = 0,344 \ 222$$

$$C_s = 0,005 \cdot d \cdot C_c$$

$$C_s = 0,005 \cdot 40 \cdot 0,325 \ 233$$

$$C_s = 0,068 \ 844$$

$$C_p = C_c + C_s$$

$$C_p = 0,344 \ 222 + 0,068 \ 844$$

$$C_p = 0,413 \ 066$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25}$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{0,413\ 066 - 0,25}$$

$$T_p = 141,3\ ^\circ\text{C}$$

Teplota předehřevu dle ČSN EN 1011-2, metoda B

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

$$Q = 0,8 \cdot \frac{150 \cdot 19,3}{4} \cdot 10^{-3}$$

$$Q = 0,579\ \text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328$$

$$T_p = 697 \cdot 0,33 + 160 \cdot \tanh\left(\frac{40}{35}\right) + 62 \cdot 5^{0,35} + (53 \cdot 0,33 - 32) \cdot 0,579 - 328$$

$$T_p = 131,2\ ^\circ\text{C}$$

Výpočtem teploty předehřevu bylo získáno hodnot 141 a 131 °C, kde teplota podle výpočtového vztahu normy ČSN EN 1011-2 má nižší hodnotu. Pro experiment byla zvolena stejná hodnota teploty předehřevu $T_p = 125\ ^\circ\text{C}$ stejně jako pro ocel S355J2.

Náchylnost vzniku trhlin za tepla

Ověření náchylnosti na vznik trhlin za tepla bylo provedeno obdobně jako u předchozí oceli parametry H.C.S a U.C.S dle normy ČSN EN 1011-2.

$$H.C.S = \frac{C \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \cdot 10^3}{3Mn + Cr + Mo + V}$$

$$H.C.S = \frac{0,18 \cdot \left(0,009 + 0,015 + \frac{0,24}{25} + \frac{0,12}{100} \right) \cdot 10^3}{3 \cdot 1,24 + 0,15 + 0,04 + 0,003}$$

$$H.C.S = 1,6\ \%$$

Kritérium parametru H.C.S pro nízkolegované oceli je $\geq 1,6$ %. V tomto případě materiál vykazuje zvýšenou citlivost na trhliny za tepla.

$$U.C.S = 230 \cdot C + 190 \cdot S + 75 \cdot P + 45 \cdot Nb - 12,3 \cdot Si - 5,4 \cdot Mn - 1$$

$$U.C.S = 230 \cdot 0,18 + 190 \cdot 0,009 + 75 \cdot 0,015 + 45 \cdot 0,001 - 12,3 \cdot 0,24 - 5,4 \cdot 1,24 - 1$$

$$U.C.S = 33,6 \%$$

Hodnota parametru U.C.S oceli S355NL překračuje hodnotu 30 a vykazuje tak nízkou odolnost proti vzniku trhlin za tepla.

Na základě obou vypočtených parametrů je vhodné snížit tepelný příkon svařování a předepsat teplotu interpass. Ta byla zvolena stejně jako u oceli S355, tj. $T_i = 200$ °C.

7.1.3 Postup svařování

Použitá zařízení

Pro svaření obou vzorků ocelí byl použito invertorového svařovacího přístroje EMW Phoenix 405 pro MIG/MAG svařování (viz obr. 7.4), ochranného plynu skupiny M21 dle ČSN EN ISO 14175 tj. směs Ar + CO₂ (poměr 82:18) a poměděného přídavného materiálu EN 440 G3Si1 (ESAB OK Autorod 12.51) s průměrem 1,0 mm. Teploty v průběhu svařování byly měřeny digitálním teploměrem GTH 1160 NiCr-Ni v souladu s normou ČSN EN ISO 13916 (viz obr. 7.5). Předehřev byl realizován kyslíko-acetylenovým hořákem pomocí standardní soupravy pro svařování plamenem.



Obrázek 7.4 Svařovací zdroj EMW
Phoenix Puls 405



Obrázek 7.5 Digitální teploměr GTH 1160
NiCr-Ni

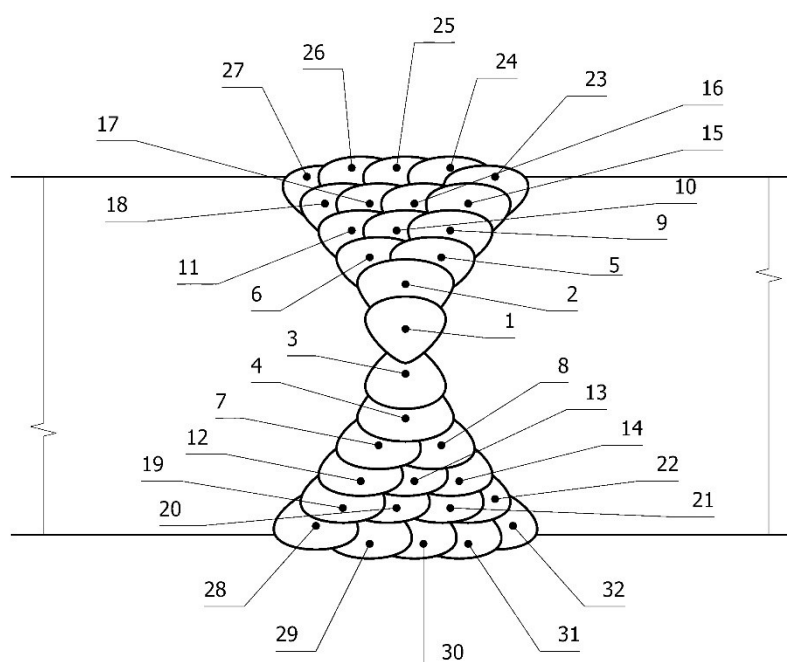
Tabulka 7.3 Technická data svařovacího zdroje EMW uvedená výrobcem

Provedení	Phoenix 405 Progress puls MM TDM
Rozsah nastavení svařovacího proudu	5 A - 400 A
Dovolené zatížení 40 °C	/
	/
	400 A / 100 %
Napětí naprázdno	80 V
Síťové napětí	3 x 400 V
Tolerance	-25 % až +20 %
Síťová frekvence	50 Hz / 60 Hz
Doporučený výkon generátoru	23.2 kVA
Hmotnost	41 kg

Svařovací parametry

Oba vzorky ocelí byly svařeny stejným postupem, jak je znázorněno na obr. 7.6 tzn. celkem 32 svařovými housenkami v 10 vrstvách, jejichž pořadí odpovídá číselnému značení na obrázku.

Použité parametry svařování byly následující: pro kořenovou vrstvu, tj. svařové housenky č.1 a č.3 byl použit proud o velikost 150 A a napětí 19,3 V. Ostatní výplňové a krycí svařové housenky byly vytvořeny při proudu 192 A a napětí 23,2 V. Teplota přehřevu byla stanovena 125 °C a teplota interpass 200 °C (viz kap. 7.1.1 a 7.1.2).



Obrázek 7.6 Schéma kladení svařových housenek

Svařování bylo provedeno poloautomatickým způsobem s pomocí svářeče kvalifikovaným dle normy ČSN EN ISO 9606-1. Rychlost svařování byla dopočítána z naměřeného času svařování a známé délky svaru. Jednotlivé hodnoty měřené při procesu svařování ocelí jsou zaznamenány v tab. 7.4 (pro ocel S355J2, svařovaná délka $l=128,1$ mm) a tab. 7.5 (pro ocel S355NL, svařovaná délka $l=127,0$ mm). Pro výpočet vneseného tepla bylo použito vztahu 3.13 v kapitole 3.2 (koeficient účinnosti metody svařování $k = 0,8$).

Tabulka 7.4 Hodnoty svařování oceli S355J2

Pořadí svaru	Čas t [s]	Rychlost svařování v [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	Vnesené teplo Q [$\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$]
1	31,97	4,01	0,614
2	29,60	4,33	0,875
3	33,18	3,86	0,637
4	31,25	4,10	0,924
5	12,85	9,97	0,380
6	18,40	6,96	0,544
7	17,25	7,43	0,510
8	18,18	7,05	0,537
9	15,71	8,15	0,464
10	13,77	9,30	0,407
11	15,34	8,35	0,453
12	17,86	7,17	0,528
13	16,72	7,66	0,494
14	18,49	6,93	0,547
15	27,50	4,66	0,813
16	18,78	6,82	0,555
17	14,88	8,61	0,440
18	14,81	8,65	0,438
19	15,58	8,22	0,460
20	14,86	8,62	0,439
21	13,73	9,33	0,406
22	13,48	9,50	0,398
23	14,78	8,67	0,437
24	15,71	8,15	0,464
25	16,43	7,80	0,486
26	18,17	7,05	0,537
27	19,41	6,60	0,574
28	20,51	6,25	0,606

29	19,85	6,45	0,587
30	19,95	6,42	0,590
31	20,21	6,34	0,597
32	10,48	12,22	0,310

Doba ochlazování S355J2

Správnost návrhu svařovacích parametrů byla ověřena výpočtem doby ochlazování, která byla provedena podle vzorců pro trojrozměrný tepelný tok dle normy ČSN EN 1011-2:

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

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot 200) \cdot 0,533 \cdot \left(\frac{1}{500 - 200} - \frac{1}{800 - 200} \right) \cdot 0,9$$

$$t_{8/5} = 4,56 \text{ s}$$

Na základě uvedeného výpočtu byla pro ocel S355J2 stanovena doba ochlazování 4,56 s. Při výpočtu se použilo průměrné hodnoty svařovacího příkonu $Q = 0,533 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ z tab. 7.4 a teploty plechu při svařování $T_0 = T_i = 200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabulka 7.5 Hodnoty svařování ocelí S355NL

Pořadí svaru	Čas t [s]	Rychlost svařování v [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	Vnesené teplo Q [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$]
1	32,40	3,92	0,628
2	32,90	3,86	0,981
3	27,62	4,60	0,535
4	31,50	4,03	0,939
5	18,03	7,04	0,538
6	18,87	6,73	0,563
7	17,71	7,17	0,528
8	19,01	6,68	0,567
9	24,20	5,25	0,721
10	16,75	7,58	0,499
11	19,50	6,51	0,581
12	18,06	7,03	0,538
13	16,81	7,56	0,501
14	17,73	7,16	0,529
15	14,35	8,85	0,428

16	13,10	9,69	0,391
17	13,03	9,75	0,388
18	14,41	8,81	0,430
19	18,51	6,86	0,552
20	14,41	8,81	0,430
21	16,13	7,87	0,481
22	15,38	80,26	0,459
23	17,08	7,44	0,509
24	18,47	6,88	0,551
25	18,65	6,81	0,556
26	17,65	7,20	0,526
27	19,15	6,63	0,571
28	19,11	6,65	0,570
29	20,91	6,07	0,623
30	18,85	6,74	0,562
31	14,90	8,52	0,444
32	17,01	7,47	0,507

Doba ochlazování S355NL

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

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot 200) \cdot 0,551 \cdot \left(\frac{1}{500 - 200} - \frac{1}{800 - 200} \right) \cdot 0,9$$

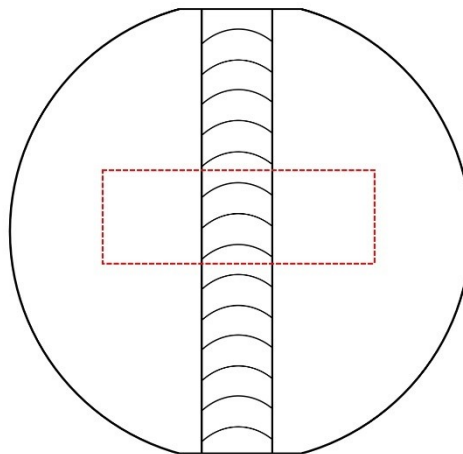
$$t_{8/5} = 4,71 \text{ s}$$

Na základě uvedeného výpočtů byla pro ocel S355NL stanovena doba ochlazování 4,71 s. Při výpočtu se použilo průměrné hodnoty svařovacího příkonu $Q = 0,551 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ z tab. 7.5 a teploty plechu při svařování $T_0 = T_i = 200 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obrázek 7.7 Svařenec

Po svaření byly vzorky ponechány na vzduchu do úplného vychladnutí, než z nich byly odebrány menší vzorky pro metalografickou analýzu. Způsob odběru vzorků je možné vidět na obr. 7.8.



Obrázek 7.8 Schéma odběru vzorků - příčně na vzniklý svar

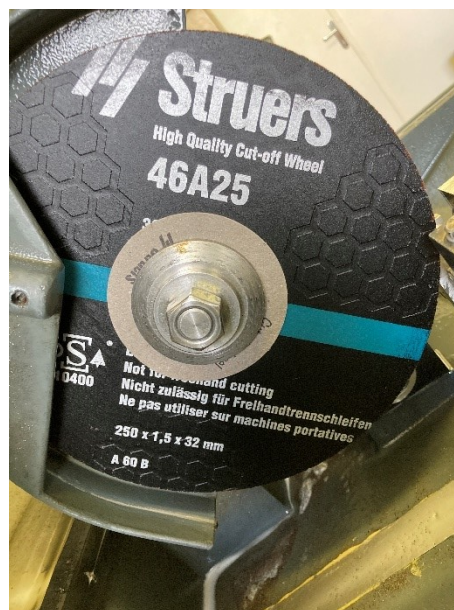
7.1.4 Metalografická příprava vzorků

Pro přípravu metalografických výbrusů byla použita přesná metalografická pila Struers Labotom-3 (viz obr. 7.9) s dělicím kotoučem Struers 46A25 (viz obr. 7.10) a chlazením. Tím bylo zamezeno tepelného ovlivnění materiálu při řezání. Celkem byly

vytvořeny 4 vzorky. Dva pro vyhodnocení makrostruktury a zkoušky tvrdosti pro každý typ oceli. A dále dva pro vyhodnocení mikrostruktury, opět oba typy ocelí.

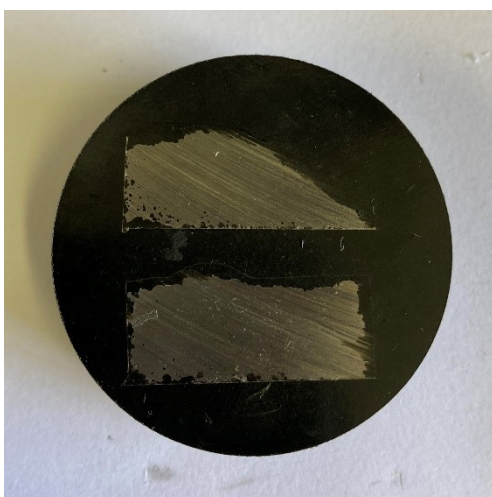


Obrázek 7.9 Pila Struers Labotom-3



Obrázek 7.10 Dělicí kotouč Struers 46A25

Vzorky určené k vyhodnocení mikrostruktury byly po nadělení zalisovány do černé zalévací pryskyřice Struers MultiFast pomocí metalografického lisu Struers CitoPress-1. Lisování proběhlo při teplotě 180 °C a tlaku 250 barů po dobu 4,5 minut s následným ochlazením po dobu 3,5 minuty. Takto zpracované vzorky lze vidět na obr. 7.11 a 7.12.



Obrázek 7.11 Zalisované vzorky



Obrázek 7.12 Označení vzorků

Následujícím krokem byla příprava povrchu, která sestávala z broušení, leštění a finálního leptání k vyvolání struktury. Použitým zařízením byla metalografická leštička

Buehler Phoenix Beta Grinder/Polisher s automatickou hlavou Buehler Vector Power Head (obr. 7.13).



Obrázek 7.13 Bruska/leštička Buehler Phoenix Beta

Broušením a posléze i leštěním se odstraní stopy po přechozích operacích. Jednotlivé brusné operace vzorků jsou uvedeny v tab. 7.6. Vzorky pro hodnocení makrostruktury a zkoušky tvrdosti byly broušeny ručně, zalisované pak automaticky s přítlakem 30 N.

Tabulka 7.6 Parametry broušení

Číslo operace	Brusný papír	Rychlost [ot·mm ⁻¹]	Doba broušení [min]	Suspenze
1	SiC 120	300	3	Voda
2	SiC 500	300	3	Voda
3	SiC 1200	300	3	Voda
4	SiC 2000	300	3	Voda

Pro leštění byly použity leštící plátina a emulze, čímž se dosáhlo velmi kvalitního povrchu. Mezi jednotlivými operacemi byl proveden oplach a na závěr byly vzorky usušeny proudem vzduchu. Přehled leštících operací je uveden v tab. 7.7.

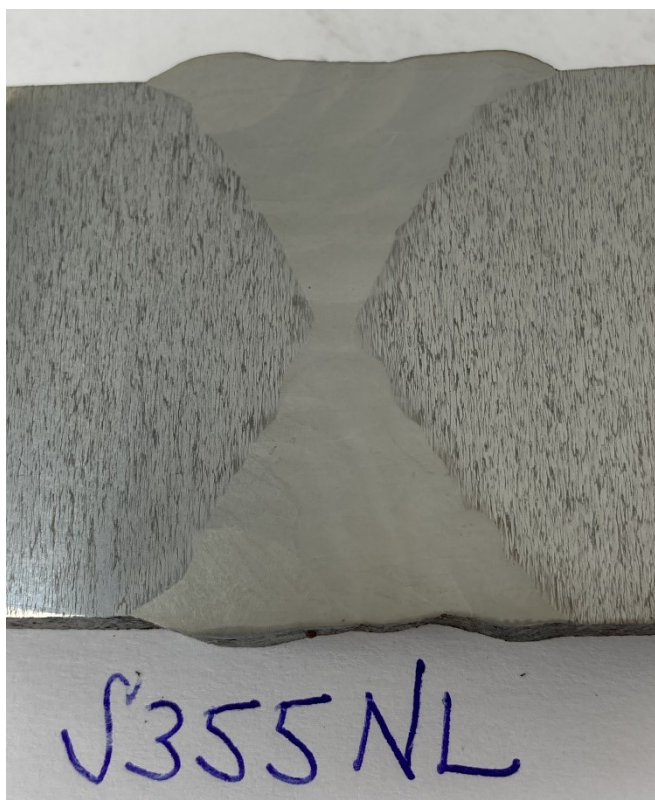
Tabulka 7.7 Parametry leštění

Číslo operace	Leštící plátno	Rychlost [ot·mm ⁻¹]	Doba broušení [min]	Suspenze
1	MD DAC	100	1	Diamant monokrystal 1μm
2	MD Plus	100	5	MasterPrep Al ₂ O ₃ 0,05μm

Posléze byly vzorky naleptány 2 % roztokem kyseliny dusičné v ethanolu tzv. nital. Poté byly vzorky opláchnuty destilovanou vodou a usušeny proudem horkého vzduchu. Hotové vzorky a jejich makrostrukturu lze vidět na obr. 7.14 a 7.15.



Obrázek 7.14 Snímek makrostruktury oceli S355J2



Obrázek 7.15 Snímek makrostruktury oceli S355NL

7.2 Vyhodnocení mikrostruktury

Základní materiál v jakosti J2 je tvořen, v porovnání s jakostí NL, poměrně hrubozrnnou feriticko-perlitickou strukturou s patrnou řádkovitostí vlivem plastické deformace viz obr. 7.16.

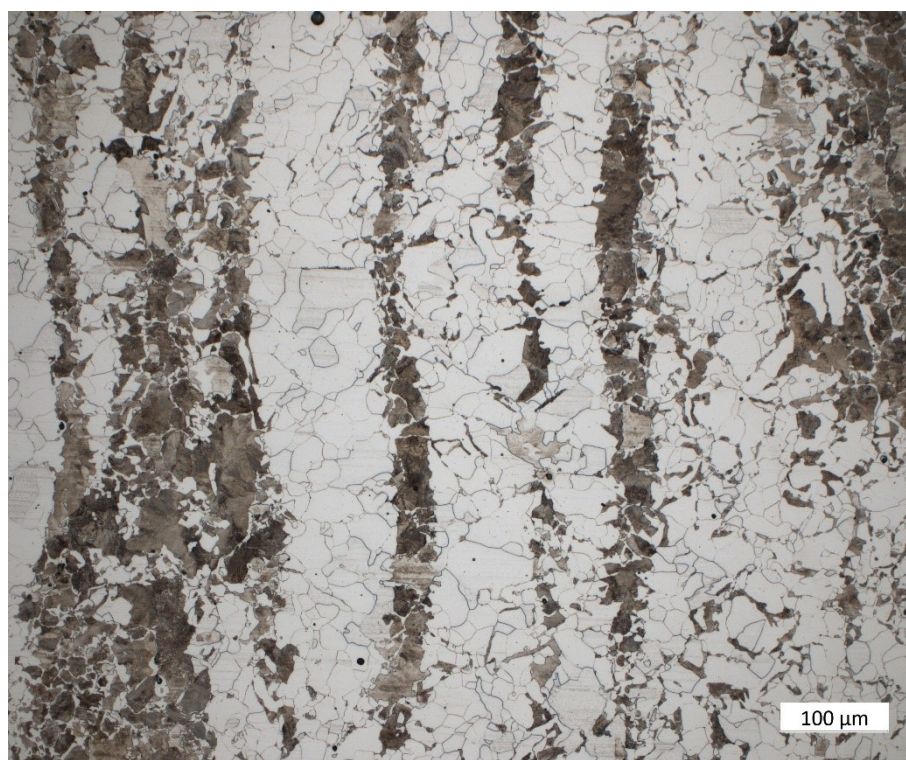
V případě jakosti NL je základní materiál také tvořen feriticko-perlitickou strukturou, která je ovšem značně jemnozrnější viz obr. 7.17. To odpovídá i vyšším mechanickým vlastnostem jako např. vrubové houževnatosti. Řádkovitost po tváření je v tomto případě výraznější.

Struktura po obou stranách hrany natavení je u obou jakostí velmi podobná, u jakosti NL je přeci jen jemnozrnější viz obr. 7.20 a 7.21. V TOO je v oblasti přehřátí zhrublé zrna oproti zbytku TOO. Ve svarovém kovu jsou charakteristicky orientovaná zrna ve směru gradientu teploty při tuhnutí.

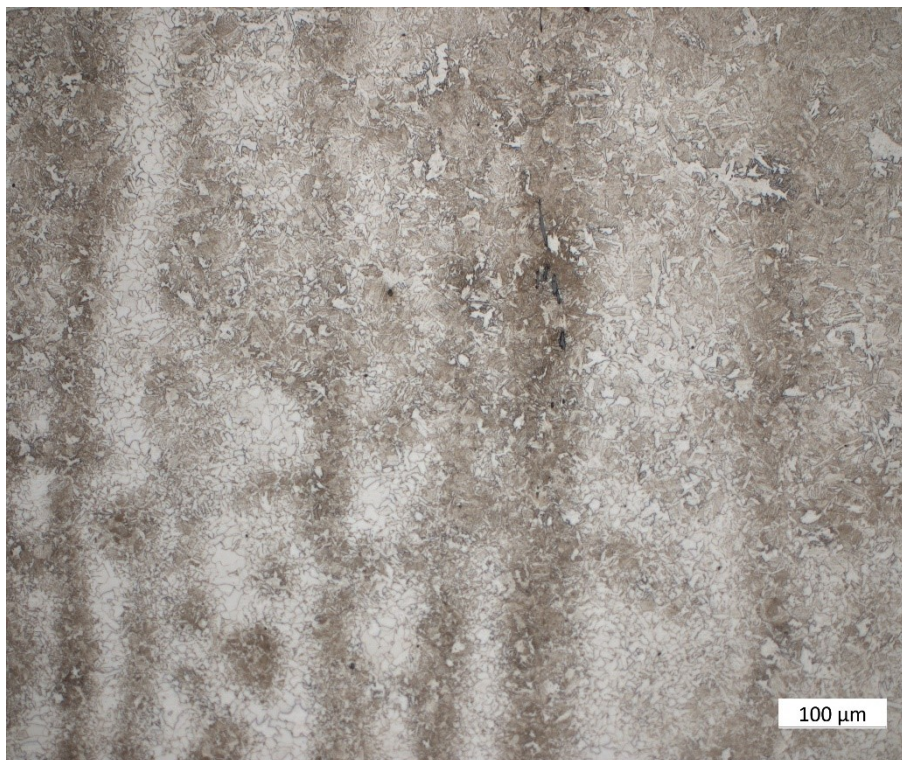
Mikrostruktura svarového kovu je u obou jakostí stejná viz obr. 7.22 a 7.23. Jakost ZM zde nemá výrazný vliv, jelikož struktura SK je dána především přídavným materiálem.



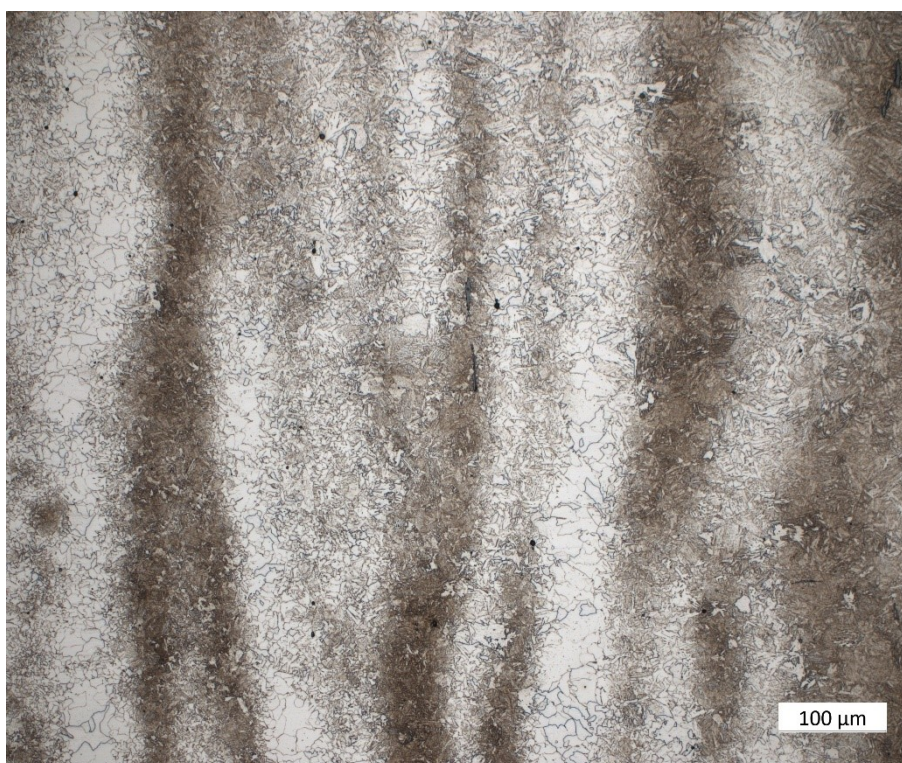
Obrázek 7.16 Mikrostruktura J2 - ZM



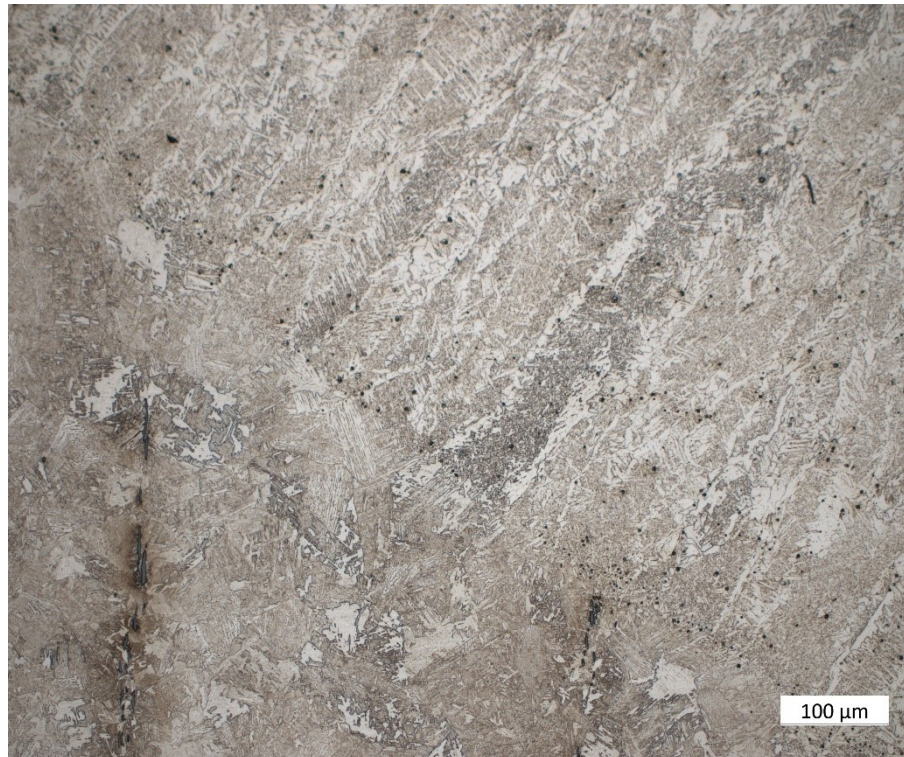
Obrázek 7.17 Mikrostruktura NL – ZM



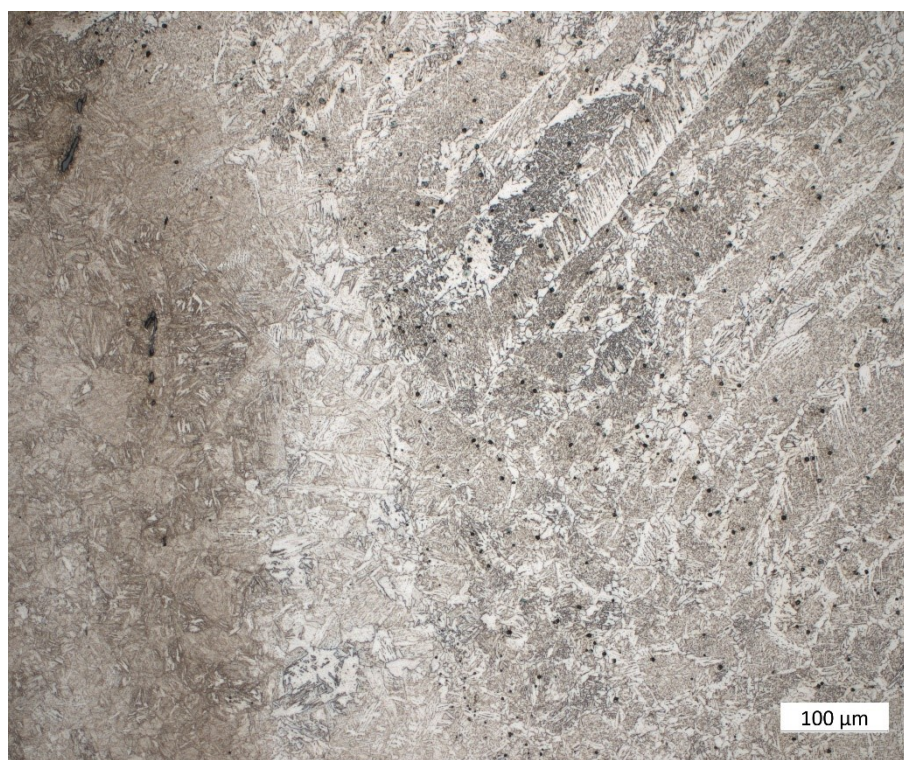
Obrázek 7.18 Mikrostruktura J2 – TOO



Obrázek 7.19 Mikrostruktura NL – TOO



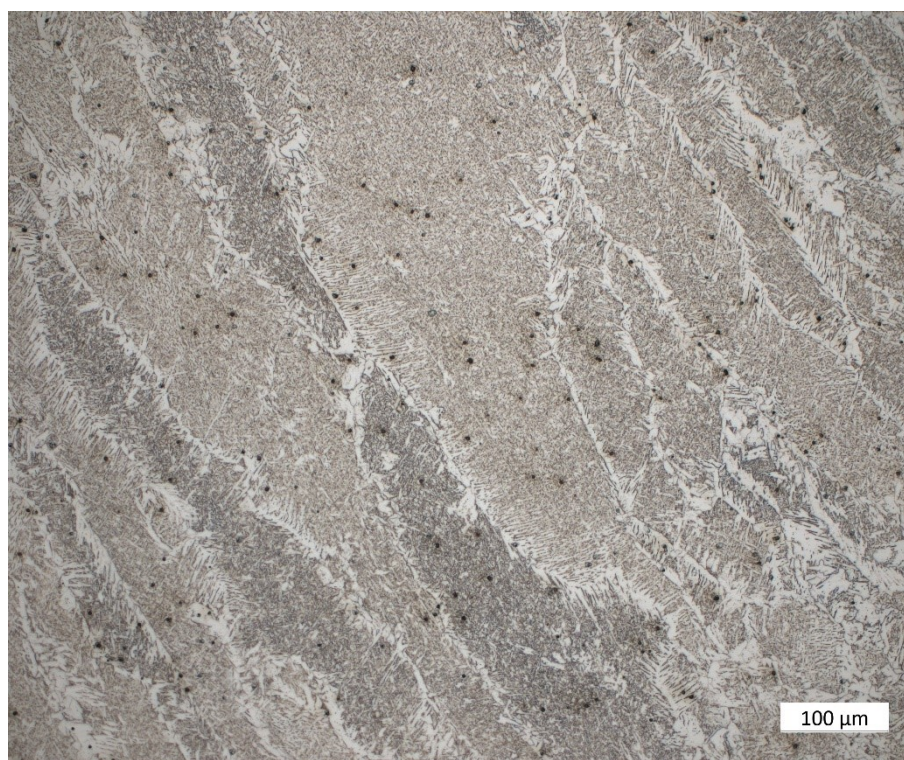
Obrázek 7.20 Mikrostruktura J2 - přechod TOO-SK



Obrázek 7.21 Mikrostruktura NL - přechod TOO-SK



Obrázek 7.22 Mikrostruktura J2 – SK



Obrázek 7.23 Mikrostruktura NL - SK

7.3 Zkouška tvrdosti

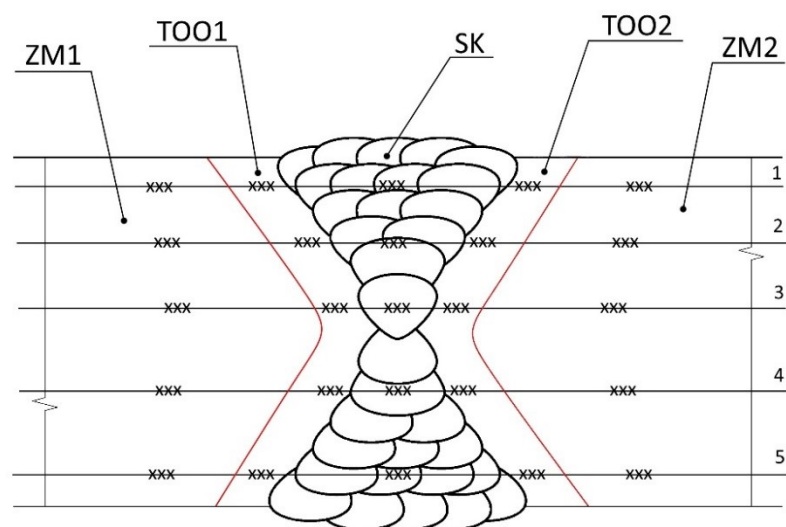
Použitým zařízením pro měření tvrdosti dle Vickerse byl tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104 (viz obr. 7.24) s velikostí použitého zkušebního zatížení 1 kp a dobou zatížení 12 s, tj. HV1.



Obrázek 7.24 Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104

Při měření byly pomocí mikroskopu měřeny délky úhlopříček, podle nichž pak tvrdoměr vypočítával hodnoty tvrdosti HV1. Princip zkoušky tvrdosti dle Vickerse je popsán v kapitole 6.2.2.

Měření bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN ISO 9015-2 a jeho schéma lze vidět na obr. 7.25, kde jsou označeny měřené oblasti a řady vtisků.



Obrázek 7.25 Schéma průběhu měření tvrdosti

V každé oblasti byly provedeny 3 vtisky při dodržení stanovené vzdálenosti mezi jednotlivými vpichy dle ČSN EN ISO 9015-2 ze kterých byl vypočten jejich aritmetický průměr. Všechny zaznamenané hodnoty jsou uvedeny v tab. 7.8. a 7.9.

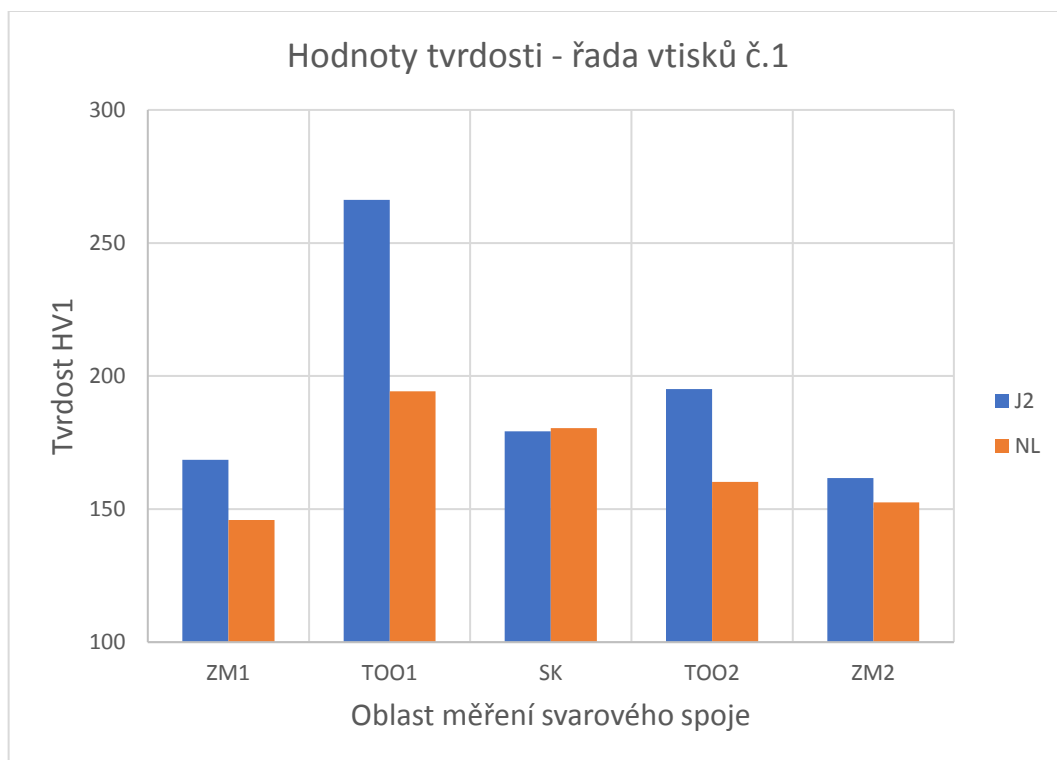
Řady vtisků č.1 a č.5 byly provedeny ve vzdálenosti 2 mm od povrchu, řady vtisků č.2 a č.4, pak ve vzdálenosti 10 mm od povrchu a řada vtisků č.3 vedená kořenem svaru byla ve vzdálenosti 20 mm od povrchu,

Tabulka 7.8 Hodnoty tvrdosti pro ocel S355J2

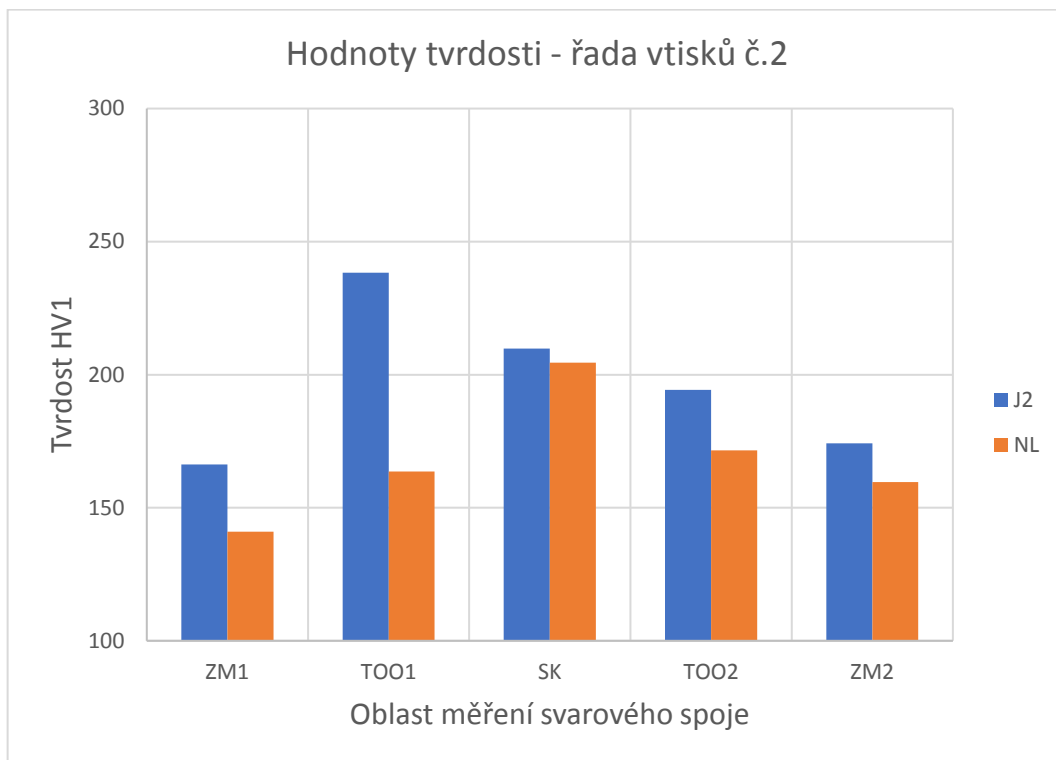
Měřená oblast	Řada vtisků									
	1		2		3		4		5	
ZM1	164,0	168,5	165,0	166,3	158,7	175,7	172,4	167,8	169,7	166,0
	168,3		169,5		178,2		164,1		167,1	
	173,1		164,4		190,2		166,9		161,1	
TOO1	260,6	266,2	219,6	238,3	186,7	222,6	203,1	227,7	198,9	223,9
	217,0		231,5		239,5		232,0		232,2	
	321,1		263,8		241,7		248,1		240,6	
SK	175,8	179,2	205,5	209,8	239,2	238,1	234,6	236,1	194,1	197,2
	178,8		207,9		237,0		243,6		198,1	
	182,9		216,0		238,1		230,0		199,5	
TOO2	209,9	195,1	211,9	194,3	300,5	237,1	213,7	195,8	201,8	188,5
	185,6		186,0		230,0		186,0		177,4	
	189,8		184,9		180,7		187,7		186,2	
ZM2	181,8	161,7	171,4	174,2	193,1	176,7	170,8	162,7	176,8	179,5
	146,9		176,3		157,7		175,1		189,4	
	156,4		174,8		179,3		142,3		172,3	

Tabulka 7.9 Hodnoty tvrdosti pro ocel S355NL

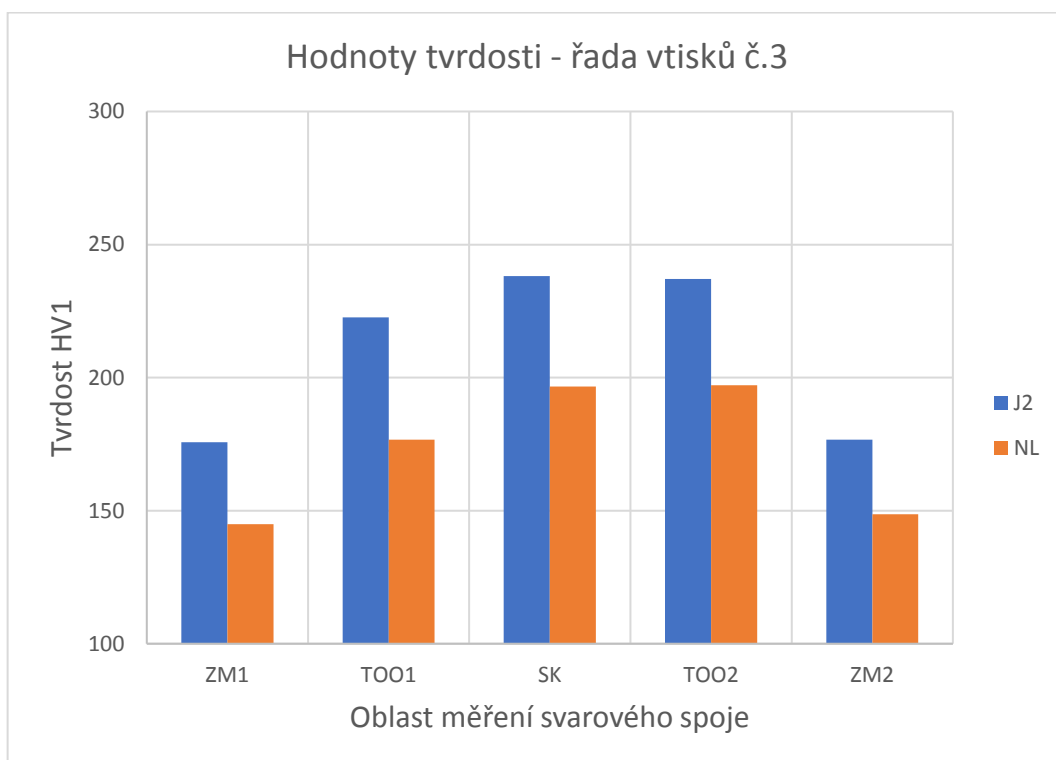
Měřená oblast	Řada vtisků									
	1		2		3		4		5	
ZM1	146,1	145,9	138,6	141,0	141,9	144,9	132,7	136,7	130,8	147,3
	128,8		135,1		148,2		140,5		162,1	
	162,9		149,2		144,5		136,9		149,0	
TOO1	188,6	194,3	155,4	163,6	171,9	176,7	144,8	168,8	175,5	169,6
	199,5		159,6		182,7		187,7		166,9	
	194,9		175,8		175,6		173,8		166,5	
SK	177,4	180,4	206,8	204,5	153,3	196,6	206,3	208,1	150,9	174,2
	162,9		202,5		217,2		205,5		184,5	
	200,8		204,2		219,3		212,6		187,1	
TOO2	154,4	160,2	166,1	171,5	239,5	197,1	173,1	166,2	173,3	172,2
	162,3		162,3		184,3		163,2		173,6	
	164,0		186,0		167,4		162,4		169,8	
ZM2	144,0	152,5	149,4	159,6	159,0	148,7	129,2	140,3	133,7	145,2
	153,0		173,4		134,3		157,5		156,2	
	160,5		156,1		152,8		134,3		145,7	



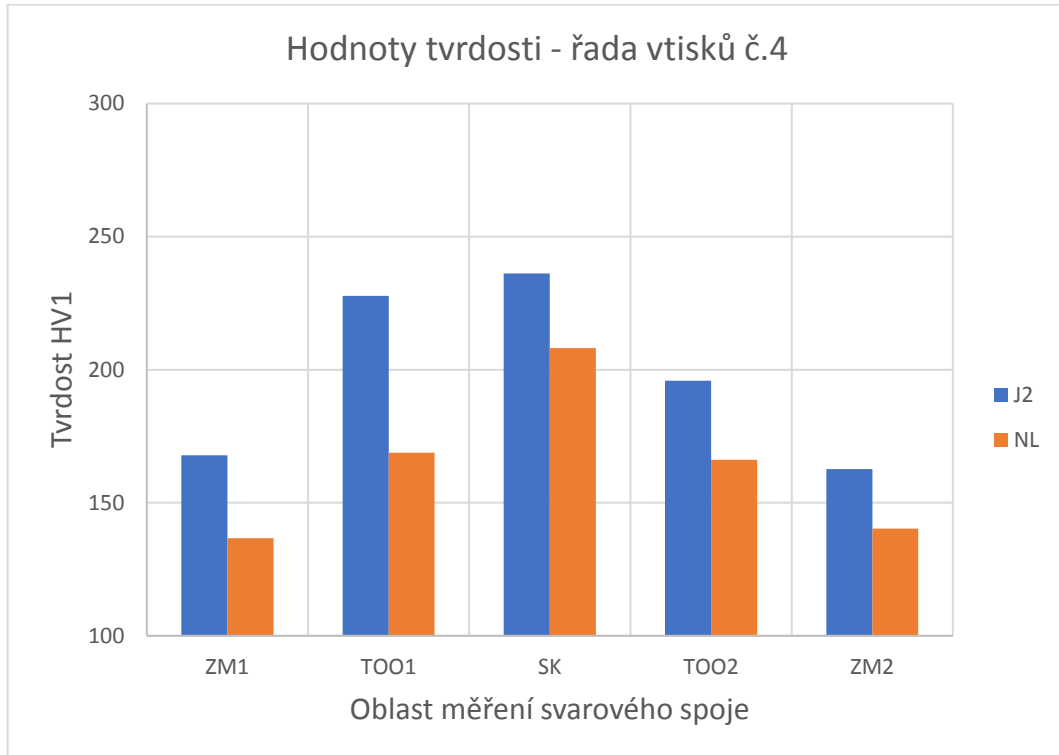
Graf 7.1 Průběh tvrdostí HV1 řady vtisků č.1



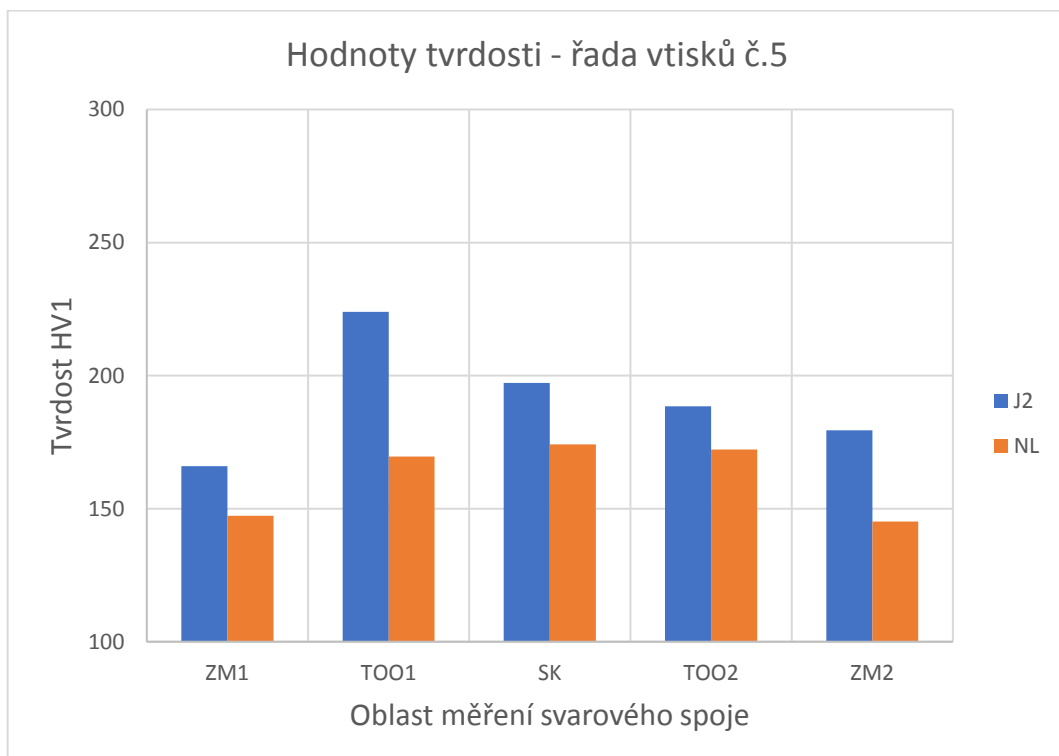
Graf 7.2 Průběh tvrdostí HV1 řady vtisků č.2



Graf 7.3 Průběh tvrdostí HV1 řady vtisků č.3



Graf 7.4 Průběh tvrdostí HV1 řady vtisků č.4



Graf 7.5 Průběh tvrdostí HV1 řady vtisků č.5

Žádná z hodnot uvedená v tabulkách 7.8 a 7.9 nepřesáhla mezní hodnotu tvrdosti 350 HV a jsou tak vyhovující podle ČSN EN ISO 15614-1. Zvolený způsob svařování je proto vyhovující a získané výsledky jsou použitelné. Na grafech lze pozorovat jasný trend. Tvrdost od základního materiálu směrem ke svarovému kovu roste, kde dosahuje nejvyšších hodnot tvrdosti.

Z uvedených grafů je dále patrné, že ocel jakosti J2 dosahuje vyšších hodnot tvrdosti, což ale může být způsobeno vlivem použitého zatížení indentoru. Jakost J2 má oproti jakosti NL hrubozrnější strukturu, a tak se při provedení vpichu přímo do perlitu projeví tvrdost obsaženého cementitu. U jemnozrnější struktury se vpichem zasáhne částečně perlit a také ferit, jehož tvrdost je výrazně nižší. To je i příčinou náhlých výkyvů, jak lze vidět např. na grafu 7.1, kde průměrná hodnota tvrdosti v TOO1 oceli jakosti J2 dosahuje hodnoty 266,2 HV1. Eliminace tohoto nepříznivého vlivu by byla možná použitím většího zatížení např. HV10.

8 Závěr

Teoretické část práce se zabývala rozdělením konstrukčních ocelí a problematikou svažitelnosti jemnozrnných konstrukčních ocelí. Dále byl uveden stručný popis necelistvostí svarů, použité metody svařování a také metod kontroly svarových spojů.

V praktické části byla ověřena svažitelnost dvou zkoumaných jakostí jedné z nejpoužívanějších konstrukčních ocelí (S355J2+AR a S355NL) podle vztahů uvedených v kapitole 3 a 4. Vzorky o tloušťce 40 mm, odebrané z tyčových polotovarů větších rozměrů, tj. průměru 150 mm byly použity ke svaření dvou zkušebních vzorků obloukovou metodou svařování tavící se elektrodou v ochranném aktivním plynu.

Vytvořené svarové spoje byly vyhodnoceny z hlediska strukturního a i z hlediska mechanických zkoušek. Vzorky byly použity k přípravě metalografických výbrusů k vyhodnocení makro a mikrostruktury a také průběhu mikrotvrdosti svarovým spojem.

Vyhodnocením provedených zkoušek lze říci, že za dodržení vhodného teplotního režimu svařování ($T_p = 125\text{ °C}$, $T_i = 200\text{ °C}$, $t_{8/5} = 5\text{ s}$) jsou oba materiály dobře svažitelné za vzniku kvalitního svarového spoje a vyhovují kvalifikaci svarových spojů, jak je uvedeno v normě ČSN EN ISO 15614-1. Hodnoty tvrdosti byly zaznamenány v jednotlivých tabulkách (viz kapitola 7.3) a pro lepší přehlednost z nich byly sestrojeny grafické průběhy. Z nich je patrné, že při měření se zatížením HV1 dosahuje ocel S355J2+AR v oblasti svarového spoje vyšších tvrdostí než ocel S355NL.

Pro detailnější rozbor vlastností ocelí by bylo vhodné provedení dalších mechanických zkoušek, a to např. zkoušky tahem, zkoušky tvrdosti při zatížení HV10 a zejména zkoušky rázem v ohybu, kde by ocel jakosti NL měla dosahovat nárazové práce 27 J při pracovní teplotě -50 °C .

9 Zdroje

- [1] KOLARÍK, Ladislav a kolektiv autorů. *Konstrukce a navrhování svarových spojů: učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2017. ISBN 978-80-01-06315-6.
- [2] PILOUS, Václav. Volba konstrukčních ocelí pro stavební svařované konstrukce podle významu označení. *Konstrukce* [online]. 2013 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/volba-konstrukcnich-oceli-pro-stavebni-svarovane-konstrukce-podle-vyznamu-oznaceni/>
- [3] PILOUS, Václav a Jiří JANOVEC. Použití ocelí normalizačně tepelně zpracovaných S355NL a termomechanicky zpracovaných S355ML. *Konstrukce* [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/pouziti-oceli-normalizacne-tepelne-zpracovanych-s355nl-a-termomechanicky-zpracovanych-s355ml/>
- [4] PILOUS, Václav a kolektiv autorů. *Vysokopevné Mikrolegované Jemnozrnné oceli a jejich svařitelnost*. Plzeň, Vodní stavby a.s., 1999.
- [5] FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8.
- [6] Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
- [7] Carbon Equivalent [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://www.leonghuat.com/articles/carbon%20equivalent.htm>
- [8] Svařitelnost některých technických materiálů a volba přídatných materiálů [online]. ESAB [cit. 2020-08-06]. Dostupné z:

http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/N1_svaritelnost_materiálu_ESAB.pdf

- [9] Ekvivalent uhlíku CET. *Techportal* [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCyd9d4JCL8DCdYqYzdXTICOIQ
- [10] ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001. ISBN 08-717-0382-3.
- [11] Defects: Solidification cracking [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/defects-solidification-cracking-044>
- [12] DOLEJSKÝ, Tomáš. *Základní kurz svařování MIG/MAG – se souborem testových otázek*. Vyd. 4. Ostrava: ZEROSS, 2015. ISBN 80-86698-28-9.
- [13] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05527-4.
- [14] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.

10 Použité normativní dokumenty

- ČSN EN 10027-1. *Systémy označování ocelí – Část 1: Stavba značek oceli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017
- TNI CEN ISO/TR 15608. *Svařování – Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008
- ČSN EN 10025-1. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 1: Všeobecné technické dodací podmínky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005
- ČSN EN 10025-2. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020
- ČSN EN 10025-3. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 3: Technické dodací podmínky pro normalizačně žíhané/normalizačně válcované svařitelné jemnozrné konstrukční oceli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020
- ČSN EN 10025-4. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 4: Technické dodací podmínky pro termomechanicky válcované svařitelné jemnozrné konstrukční oceli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020
- ČSN EN ISO 643. *Ocel – Mikrografické stanovení zdánlivé velikosti zrn*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020
- ČSN EN ISO 4063. *Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011
- ČSN EN ISO 14341. *Svařovací materiály – Drátové elektrody pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrných ocelí v ochranném plynu a jejich svarové kovy - Klasifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011

- ČSN EN ISO 17632. *Svařovací materiály – Plněné elektrody pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí s ochranou plynu a bez ochrany plynu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019
- ČSN EN ISO 14175. *Svařovací materiály – Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- ČSN EN IEC 60974-1. *Zařízení pro obloukové svařování – Část 1: Zdroje svařovacího proudu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013
- ČSN EN 1011-2. *Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002
- ČSN EN ISO 15613. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Kvalifikace na základě předvýrobní zkoušky svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2005
- ČSN EN ISO 15614-1. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování oceli a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Český normalizační institut, 2018
- ČSN EN ISO 17639. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Český normalizační institut, 2014
- ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2015
- ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2018
- ČSN EN ISO 6508-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2017

- ČSN EN 10204. *Kovové výrobky – Druhy dokumentů kontroly*. Praha: Český normalizační institut, 2005
- ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti – Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. Praha: Český normalizační institut, 2011
- ČSN EN ISO 9015-2. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti – Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů*. Praha: Český normalizační institut, 2018

11 Seznam příloh

- [p1] Inspekční certifikát oceli S355J2+AR
- [p2] Inspekční certifikát oceli S355NL