

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ OCELÍ S355J2 A S355NL PO SVAŘOVÁNÍ
COMPARISON OF STEEL PROPERTIES S355J2 AND S355NL AFTER
WELDING

AUTOR: Jiří Chábera

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

PRAHA 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chábera** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **467440**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající 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 oceli S355J2 a S355NL po svařování

Název bakalářské práce anglicky:

Comparison of steel properties S355J2 and S355NL after welding

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popis problematiky jednotlivých typů jemnozrnných ocelí, jejich strukturních stavů a vlastností, včetně popisu značení (v návaznosti na ČSN EN normy)
- 2) Analýza svařitelnosti jemnozrnných ocelí – se zaměřením na oceli typu S355 v různých strukturních stavech
- 3) Návrh experimentu výroby svařovaných vzorků a jejich vyhodnocení z hlediska vlivu na strukturu a mech. vlastnosti
- 4) Vyhodnocení výsledků, Závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN 10 025-2: Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli, UNMZ, 2005
- [2] ČSN EN 10 025-3: Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 3: Technické dodací podmínky pro normalizačně žíhané/ normalizačně válcované svařitelné jemnozrnné konstrukční oceli, UNMZ, 2005
- [3] Kolařík, L. a kolektiv: Konstrukce a navrhování svarových spojů, ČVUT v Praze, Praha, 2017
- [4] Pilous, V.: Volba konstrukčních ocelí pro stavební svařované konstrukce podle významu označení, Konstrukce, 11/2013
- [5] Pilous, V.: Svařování jemnozrnných ocelí S355 N v ochranných plynech dráty OK AristoRod 12, Konstrukce, 12/2011
- [6] Janovec, J., Pilous, V.: Použití ocelí normalizačně tepelně zpracovaných S355NL a termomechanicky zpracovaných S355ML, Konstrukce, 11/2011

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: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**

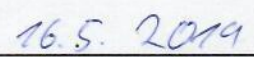

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



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.


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Název práce: Porovnání vlastností ocelí S355J2+AR a S355NL po svařování

Autor práce: Jiří Chábera

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

Ústav: 12133 Ústav strojírenské technologie

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

Universita: České vysoké učení technické

Školní rok: 2018/2019

Bakalářská práce se zaměřuje na porovnání vlastností ocelí S355J2+AR a S355NL vhodných pro svařování. V práci je popsána problematika svařitelnosti jemnozrnných a uhlíkových ocelí, a jejich značení a dělení dle evropských norem. Práce také popisuje základní druhy svařovacích procesů a jejich aplikace s ohledem na blíže zkoumané oceli. Dále práce obsahuje návrh, provedení a vyhodnocení experimentu pro zjištění ovlivnění jejich vlastností po svařování.

Klíčová slova: Jemnozrnná ocel, Uhlíková ocel, Svařitelnost, S355J2, S355NL, Svařování

Počet stran: 96

Počet obrázků: 64

Počet tabulek: 18

Počet příloh: 8

Annotation

Title of thesis:	Porovnání vlastností ocelí S355J2+AR a S355NL po svařování
Author of thesis:	Jiří Chábera
Thesis supervisor:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Institute:	12133 Ústav strojírenské technologie
Head of the institute:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
University:	České vysoké učení technické
School year:	2018/2019

Bachelor thesis focuses on steels S355J2+AR and S355NL and their properties after welding including comparison of said properties. Thesis contains description of problematics on the topic of weldability, labeling and division of fine grained steels according to european standards. Thesis also contains description of basic welding principles and their effects on steels S355J2+AR and S355NL. Final part of thesis includes design, execution and evaluation of experiment that tests properties after welding of steels in focus.

Keywords:	Fine grained steels, carbon steels, weldability, S355J2, S355NL, welding
Number of pages:	96
Number of images:	64
Number of tables:	18
Number of attachments:	8

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce
doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE. za odborné vedení, pomoc, užitečné rady a
cenné připomínky.

OBSAH

1. Úvod do tématiky bakalářské práce	9
2. Konstrukční oceli.....	10
2.1 Značení ocelí.....	10
2.2 Materiály konstrukčních ocelí a jejich zběžný popis.....	12
2.3 Značení jemnozrnných ocelí.....	15
2.3.1 Popis systému značení	17
3. Svařitelnost	20
3.2 Technologické a konstrukční vlivy na svařitelnost	22
3.2.1 Technologické ovlivnění	22
3.3 Svařitelnost uhlíkových ocelí	24
3.4 Vliv legujících prvků na svařitelnost ocelí	25
3.5 Svařitelnost jemnozrnných ocelí	27
3.6 Svařitelnost ocelí S355J2 a S355NL	29
3.6.1 Svařitelnost S355J2	29
3.6.2 Svařitelnost S355NL	30
4. Metodika zkoušení vlastností svarů.....	32
4.1 Vady ve svarech.....	32
4.2 Zkoušení svarových spojů	34
4.2.1 Vzorky a postupy pro zkoušky svarových spojů.....	34
4.2.2 Destruktivní zkoušky.....	36
4.2.3 Nedestruktivní zkoušky	41
5 Metody svařování	49
5.1 Metody svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách	50
6 Praktická část bakalářské práce	53
6.1 Příprava vzorků.....	53
6.2 Metalografická zkouška.....	54
6.3 Spektrální analýza.....	60
6.4 Zkouška tvrdosti	61
6.5 Příprava vzorků svarového spoje.....	66
6.6 Vyhodnocení zkoušek tvrdosti na svařených vzorcích.....	75
6.7 Vyhodnocení mikroskopických a makroskopických fotografií struktury a tepelné ovlivněné zóny.....	81
7 Závěr.....	86
7 Seznam zdrojů	87
Literatura	87
Internetové zdroje	89
Seznam obrázků.....	92
Seznam tabulek.....	94

Seznam použitých zkratk

TDP	Technické dodací podmínky
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
ZM	Základní materiál
SK	Svarový kov
VT	Visual test (Vizuální zkouška)
PT	Penetrant test (Penetrační zkouška)
MT	Magnetic test (Magnetická zkouška)
MIG	Metal inert gas (Kovový inertní plyn)
MAG	Metal active gas (Kovový aktivní plyn)
TIG	Tungsten inert gas (Wolframový inertní plyn)
WIG	Wolfram inert gas (Wolframový inertní plyn)

1. Úvod do tematiky bakalářské práce

Oceli jsou jedním z nejpoužívanějších materiálů ve strojírenství. Používají se ve všech odvětvích a v dnešní době neexistuje materiál, který by je mohl plnohodnotně nahradit. Oceli je možno dělit dle mnoha kritérií, ať už se jedná o jejich použití, fyzikální vlastnosti, technologické vlastnosti či chemické složení.

Pravděpodobně nejrozšířenějším a nejvíce používaným druhem ocelí jsou oceli konstrukční. Konstrukční oceli nacházejí své užití na mnoha místech a záleží hlavně na jejich složení, které upravuje jejich vlastnosti tak, aby nejvíce vyhovovaly konečné aplikaci daného materiálu.

V první části se bakalářská práce zabývá teoretickým rozdělením ocelí a podrobným popisem konstrukčních ocelí včetně prvků ovlivňujících jejich vlastnosti, související se svařováním. Další kapitolou práce je problematika svařitelnosti, seznámení s technologickými vlastnostmi a popisem faktorů, které je ovlivňují. Následuje popis zkoušek materiálu, které čtenáře seznámí s cílem a postupy při provádění kvalifikace svařovacích postupů. V poslední teoretické kapitole se bakalářská práce zabývá dělením metod svařování a popisem metod, využitých v praktické části.

V praktické části si bakalářská práce klade za cíl porovnat konstrukční oceli S355J2a S355NL, a to hlavně v oblasti jejich svařitelnosti. Pro práci byly vytvořeny zkušební vzorky z daných materiálů, které byly následně zkoušeny. Práce se zabývá jak mechanickými, tak strukturálními vlastnostmi uvedených ocelí po tvorbě svarového spoje. Součástí práce je i vyhodnocení, a to hlavně ekonomického pohledu na problematiku. Práce si tedy klade za cíl odpovědět na otázku, zda je ekonomicky výhodné koupit kvalitnější, ovšem dražší ocel, oproti méně kvalitní jakosti oceli.

2. Konstrukční oceli

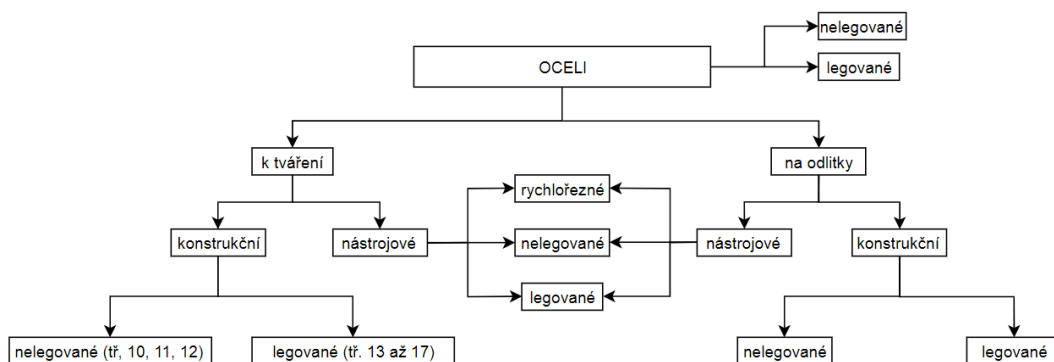
Konstrukční oceli jsou hojně rozšířeným materiálem ve strojírenství. Za pomoci legujících prvků a dodatečného tepelného zpracování jsme schopni získat ocel s přesnými požadovanými vlastnostmi. V dnešní době se na trhu nachází takový sortiment výrobců, který sice umožňuje velký výběr, ovšem podstatně ztěžuje orientaci při výběru vhodného dodavatele. Následující kapitola si klade za cíl seznámit čtenáře se základním rozdělením konstrukčních ocelí s bližším zaměřením na ocel S355J2 a S355NL.

2.1 Značení ocelí

Ocelí je mnoho druhů a je tedy zapotřebí je dělit do vhodně zvolených kategorií. Tyto kategorie závisí na způsobu výroby, aplikaci oceli (konstrukční nebo nástrojová), způsobu aplikace (oceli na odlitky, oceli k tváření), obsahu legujících prvků (vysocelegované, střednělegované, nelegované uhlíkové atd.), vhodnosti k následujícímu tepelnému nebo chemicko-tepelnému zpracování (cementační oceli, oceli k zušlechťování), konkrétnímu druhu použití (oceli na tlakové nádoby, oceli na kolejnice, oceli na pružiny, konstrukční oceli atd.).

Největším zástupcem ocelí na trhu jsou oceli k tváření a dle normy ČSN 42 0002 je dělíme do osmi dalších skupin. Zbytek ocelí v oběhu představují oceli na odlitky, jejichž složení je upravováno za účelem získání lepších technologických vlastností v oblasti slévárenství. [3]

V obrázku 1 je graficky znázorněno rozdělení ocelí dle způsobu použití. V současné době mají největší zastoupení na trhu oceli pro tváření, ty představují až 95 % z veškeré vyrobené oceli, přičemž většina těchto ocelí je právě konstrukční.



Obr. 1 Schéma rozdělení ocelí

Ocel, již se zabývá tato práce, je značena dle normy ČSN EN 10027-1 (*Systémy označování ocelí – Část 1: Stavba značek ocelí*), jejíž systém značení je popsán v následujících kapitolách. Je ovšem nutno zmínit, že v dnešní době se oceli značí dle různých norem a systémů. To, jaká norma se kde používá, určují vnitřní směrnice podniku. Při aplikaci daného značení rozhoduje většinou to, jaké informace je ze značení nutno vyčíst v daném oboru.

Starší český systém značení se řídí normou ČSN 42 0002 (*Číselné označování a rozdělení ocelí ke tváření*). Toto označení určuje základní druh ocelí za pomoci prvního dvojčíslí a význam ostatních číslic se mění s druhy ocelí. Tato norma byla sice zrušena v roce 2017, ale pro potřeby této bakalářské práce s pomocí tohoto označení bude v následující kapitole popsáno dělení konstrukčních ocelí. [3]

Aktuální značení v Evropě se řídí systémem označování dle ČSN EN, které dále dělí značení ocelí do dvou částí. Norma ČSN EN 10027-1 obsahuje systém zkráceného označování a norma ČSN EN 10027-2 obsahuje systém číselného označování. Aplikace tohoto označení je rozebrána v kapitole 2.3 (značení jemnozrnných ocelí). [3]

Další systémy značení vychází například z americké normy dle American Iron and Steel Institution (označované zkratkou AISI) a mnoho dalších. Tímto značením se z důvodu obsáhlosti tématu bakalářská práce zabývat nebude. [16]

Pro případ, kdy konstruktér či technolog potřebuje převést jeden druh normovaného označení na druhý, většina výrobců publikuje převodní tabulky (viz tab.1). Může ovšem nastat situace, kdy ocel nemá příslušný ekvivalent, pak neexistuje ani odlišné označení. Poté je zapotřebí najít co možná nejpodobnější ocel, na základě jejich vlastností a chemického složení, v původním či alternativním označení.

Tab. 1Převodní tabulka značení ocelí [10]

Značka oceli dle ČSN	Značka oceli dle EN nebo EN ISO	Číslo materiálu W.Nr.	Značka dle AISI	norma EN (DIN, SEW)	DIN
11109	-	1.0715	1213	-	9 SMn 28
10000	S185	1.0035	-	10025	St 33
10004	S185	1.0035	-	-	St 33-2
10216	-	1.0003	-	-	BSt 22/34 6U
10370	-	1.0036	-	-	USt 37-2
10420	-	1.0077	-	-	RSt 42-1
10420	-	1.0042	-	-	RSt 42-2
10420	-	1.0042	-	-	Ryt 42-2
10425	-	1.0433	-	-	bst 42/50 RU

2.2 Materiály konstrukčních ocelí a jejich zběžný popis

Vzhledem k přehlednosti značení ocelí dle normy ČSN 42 0002 bude tato norma použita k dělení materiálu v následující kapitole.

Oceli třídy 10

Tyto oceli se zpravidla dodávají ve formě válcovaných tyčí, plechů, pásů, drátů či výkovků nebo trubek. Většina těchto ocelí nemá zaručené chemické složení, pouze obsah síry a fosforu. Kvůli nezaručenému obsahu chemických prvků nejsou oceli vhodné k cementování ani jinému tepelnému zpracování. Často se tyto oceli ani tepelně neupravují, pouze pokud se jedná o velké polotovary, například plechy o velkých tloušťkách, pak se oceli normalizačně žihají. Své použití nacházejí například jako stavební roxory (betonářská výztuž) a jiné polotovary používané ve stavebnictví. [1]

Oceli třídy 11

Konstrukční oceli třídy 11 mají zaručený obsah uhlíku, který je určen jeho minimální a maximální hranicí obsahu. Přesto je u těchto ocelí stále nutno brát v potaz větší rozsahy v chemickém složení, a to hlavně u síry a fosforu. Oceli této třídy jsou hojně používány pro svařované nosné konstrukce, proto je u tohoto druhu oceli sledován hlavně obsah uhlíku, který dosahuje maximálních hodnot 0,25hm. %C. Oceli používané v nosných konstrukcích musí být kontrolovány na vrubovou houževnatost a mez únavy materiálu. Do třídy 11 dále patří oceli automatové, oceli k hlubokému tažení, oceli pro práci za nízkých teplot a oceli se sníženým sklonem ke stárnutí. Do této skupiny by se také řadily oceli S355J2 a S355NL.[1]

Oceli třídy 12

Jedná se o ušlechtilé uhlíkové oceli, které v porovnání s oceli tříd 10 a 11 mají zaručené kompletní chemické složení. Právě díky tomu jsou tyto oceli vhodné k dalšímu tepelnému zpracování, díky čemuž lze získat mnoho užitečných vlastností. Obsah uhlíku se pro jednotlivé oceli značně liší, vzhledem k jejich budoucímu tepelnému zpracování. Oceli určené k cementování mají obsah uhlíku v rozmezí 0,07–0,2 hm. % C. Oceli vhodné k zušlechťování mají obsah uhlíku v rozmezí 0,25–0,7 hm % C. Vzhledem k vlastnostem, které oceli získají tepelným zpracováním, se liší i jejich aplikace. Například oceli po cementování se používají jako čepy či jiné namáhané součásti. [1][i1]

Oceli třídy 13

Jedná se o nízkolegované konstrukční oceli na zušlechťování. Oceli mají obsah uhlíku pohybující se v rozmezí 0,14–0,44 hm. %C. Což umožňuje využít tepelné zpracování ke zlepšení mechanických vlastností, jako je vyšší pevnost, nebo použít ocel s vyšší houževnatostí a zaručenou svařitelností. Díky legování manganem se také zvyšuje prokalitelnost těchto ocelí s nežádoucím růstem austenitického zrna, což se řeší legováním vanadem. Z ocelí třídy 13 se vyrábí bezešvé trubky i tlakové nádoby, pružiny, kolejnice či svařovací dráty.[1]

Oceli třídy 14

Jedná se o konstrukční oceli, které jsou legovány hlavně chromem. Někteří zástupci této třídy dosahují zušlechtěním lepší odolnosti proti opotřebení a jsou schopny pracovat i za nižších teplot. Po chromu jsou tyto oceli často legovány manganem či křemíkem. Kombinace všech tří prvků (chromu, manganu, křemíku) a obsahu uhlíku, pohybujícím se okolo 0,3 hm. %C, dává vzniknout nízkolegovaným konstrukčním ocelím, které po zušlechtění dosahují pevností pohybujících se v rozmezí 1100–1800 MPa (čímž se řadí mezi oceli vysokopevnostní). Oceli této třídy nachází své uplatnění při výrobě valivých ložisek, ocelí vhodných pro cementování, ocelí pro tvorbu trvalých magnetů a ocelí na obruče a celá kola kolejových vozidel. [1][i2]

Oceli třídy 15

Jedná se o oceli konstrukční, které jsou vhodné pro zušlechťování a bývají legovány malým množstvím molybdenu a vanadu. Obsah uhlíku u těchto ocelí se pohybuje od 0,17–0,62 hm. %C. Do třídy 15 spadají oceli vhodné k nitridování, žárupevné oceli a svařitelné oceli se zvýšenou mezí kluzu. Tato třída nachází své uplatnění například jako válcovací stolice, ozubená kola a různé součásti motorových vozidel a letadel. [1]

Oceli třídy 16

Tato třída ocelí obsahuje konstrukční oceli, u nichž je často nejvýraznějším legujícím prvkem nikl, díky kterému si oceli zachovávají vysokou pevnost, ale hlavně si udrží svou houževnatost. Tyto oceli nachází své využití zejména tam, kde je zapotřebí vysoká houževnatost za záporných teplot. Obsah uhlíku u niklových ocelí dosahuje maximální hodnoty 0,5 hm. %C. Jako další legující prvky se využívají vanad, chrom či molybden, a to v různých kombinacích. Aplikace ocelí třídy 16 najdeme tam, kde jsou tlustostěnné výrobky, například u tlakových nádob a lahví, klikových hřídelí, či velmi namáhaných čepů. [1][2]

Oceli třídy 17

Třída oceli 17 je nejobsáhlejším zástupcem korozivzdorných ocelí. Toto prvenství jí zajišťuje legování chromem, a to v hodnotách pohybujících se nad 11 hm. %. Dalším charakteristickým znakem těchto ocelí je obsah uhlíku, pohybující se v rozmezích 0,15–1,05 hm. %. Tyto oceli jsou velmi tvrdé a při nízkém obsahu uhlíku i dobře svařitelné. Oceli třídy 17 nachází své využití všude tam, kde je agresivní korozní prostředí. Používají se pro tvorbu chirurgických nástrojů, armatur, přehříváčů vzduchu atd. [1] [i3]

2.3 Značení jemnozrnných ocelí

Ocel se dá označit za jemnozrnnou v případě, že se velikost zrna ve struktuře oceli je menší či rovna 6 dle obráceného číslování řídicího se normou EN ISO 643 (*Ocel - Mikrografické stanovení velikosti zrn*). Výroba těchto ocelí je náročnější na proces tvorby polotovarů i na přesnost při výrobě samotné oceli. Aby bylo možno vytvořit jemnozrnnou ocel musí mít tavba přesnější složení i více prvků se zaručeným obsahem v porovnání se standardní uhlíkovou ocelí. A proces výroby polotovarů je náročnější, jak časově, tak i vzhledem k samotnému provedení. Tyto oceli jsou dodávány v mnoha jakostech a následující kapitola se bude zabývat rozborem značení daných ocelí a popisem jejich vlastností. Tabulka 2 zobrazuje porovnání mezi čistotami normalizačně válcovaných či žíhaných ocelí s uhlíkovou ocelí S355J2. [i4][i5][i6]

Tab. 2 Porovnání chemického složení uhlíkové oceli a jemnozrnné konstrukční oceli [i6]

Označení	max. hm. % C	max. hm. % Si	hm. % Mn	max. % P	max. % S	max. % Nb	max. % V	min. % Al	max. % Ti	max. % Cr	max. % Ni	max. % Mo	max. % Cu	max. % N
S355N	0,2	0,5	1,65	0,025	0,02	0,05	0,12	0,02	0,05	0,3	0,5	0,1	0,55	0,015
S355NL	0,18	0,5	1,65	0,025	0,02	0,05	0,12	0,02	0,05	0,3	0,5	0,1	0,55	0,015
S355J2	0,23	0,6	1,7	0,035	0,035	0,05	0,13	-	0,05	-	-	-	0,55	-

Označení ocelí dle normy ČSN EN 10027-1 se dělí na dvě skupiny podle toho, na základě čeho jsou oceli rozlišovány. První skupina dělí oceli na základě jejich použití či mechanických nebo fyzikálních vlastností. Druhá skupina oceli dělí dle jejich chemického složení.

Tab. 3 Popis písemného označení vyskytujícího se u jemnozrnných ocelí

Označení	Význam	Příklad
M	Termomechanicky válcované oceli	S 420 M
ML	Termomechanicky válcované oceli pro práci za nízkých teplot	S 420 ML
N	Normalizačně žíhané nebo válcované oceli	S 355 N
NL	Normalizačně žíhané nebo válcované oceli pro práci za nízkých teplot	S 355 NL
MC	Termomechanicky válcované oceli se zvláštní tvařitelností za studena	S 315 MC
NC	Normalizačně žíhané nebo válcované oceli se zvláštní tvařitelností za studena	S 355 NC

Následující pojednání se bude zabývat normou ČSN EN 10027-1 při dělení dle první skupiny. Popis významů doplňujících písmen s uvedenými příklady jemnozrnných ocelí je uveden v tabulce 4. [12]

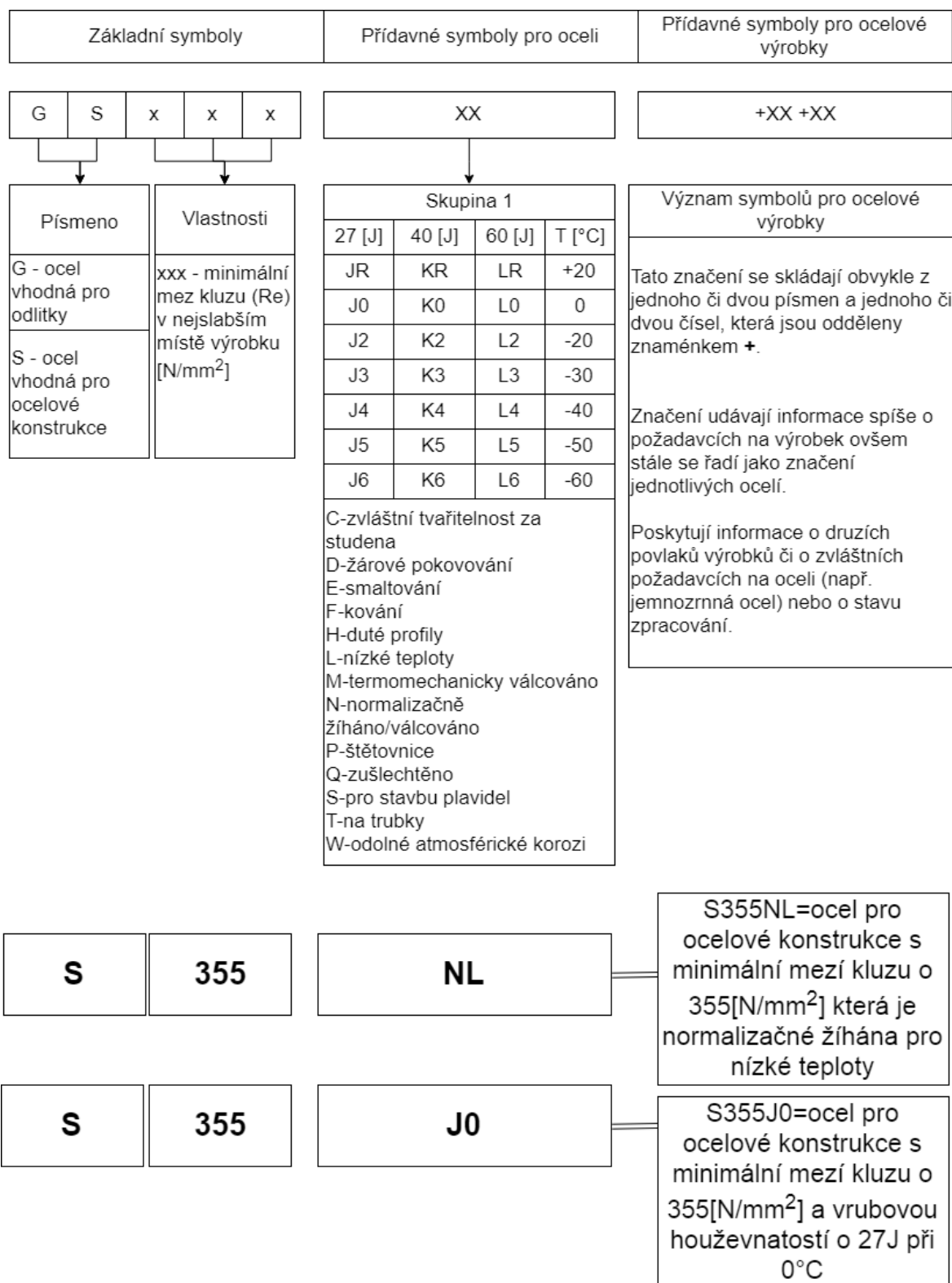
Tab. 4Systém označování jemnozrnných ocelí dle ČSN EN 10027-1

Skupina	Podskupina	Norma TDP CSN EN	Značení oceli	Skupina přídavného materiálu	Druh oceli	Možné varianty oceli
1	1,1	10113-3	S275	FM 1	Ocel se stanovenou mezí kluzu $Re \leq 275$ MPa	M ; ML
1	1,1	10149-3	S260	FM 1	Ocel se stanovenou mezí kluzu $Re \leq 275$ MPa	NC
1	1,2	10113-2	S355	FM 1	Ocel se stanovenou mezí kluzu 275 MPa $\leq Re \leq 360$ MPa	N ; NL
1	1,2	10113-3	S355	FM 1	Ocel se stanovenou mezí kluzu 275 MPa $\leq Re \leq 360$ MPa	M ; ML
1	1,2	10149-2	S315	FM 1	Ocel se stanovenou mezí kluzu 275 MPa $\leq Re \leq 360$ MPa	MC
1	1,2	10149-3	S355	FM 1	Ocel se stanovenou mezí kluzu 275 MPa $\leq Re \leq 360$ MPa	NC
1	1,3	10113-3	S460	FM 1	Normalizované jemnozrnné oceli se stanovenou mezí kluzu $Re > 360$ MPa	NL
1	1,3	10113-2	S420	FM 1	Normalizované jemnozrnné oceli se stanovenou mezí kluzu $Re > 360$ MPa	NC
1	1,3	10113-3	S420	FM 1	Normalizované jemnozrnné oceli se stanovenou mezí kluzu $Re > 360$ MPa	N
2	2,1	10113-3	S420 S460	FM 1	Termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli s mezí kluzu 275 MPa $\leq Re \leq 360$ MPa	M ; ML
2	2,1	10149-2	S500 S600 S650 S700	FM 2	Termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli s mezí kluzu $Re > 460$ MPa	MC

Tabulka 4 popisuje rozdělení ocelí do jednotlivých skupin na základě jejich svařitelnosti dle směrnice TNI CEN ISO/TR 15608, (*Svařování - Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin,*) tato směrnice nahrazuje od roku 2008 normu ČSN 05 0323. Dále je v ní také uvedeno dle jaké normy technických dodacích podmínek se musí jednotlivé druhy ocelí řídit, přičemž ocel S355J2 se řídí technickými dodacími podmínkami stanovenými normou ČSN EN 10025-2: 2005 (*Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*) a ocel s 355NL se řídí podmínkami danými normou ČSN EN 10025-3 (*Technické dodací podmínky pro normalizačně žíhané/normalizačně válcované svařitelné jemnozrnné konstrukční oceli*).

2.3.1 Popis systému značení

Na obrázku 2 je zobrazen princip značení ocelí dle normy ČSN EN 100072-1 včetně vysvětlení významu jednotlivých symbolů.



Obr. 2 Schéma popisující systém a význam jednotlivých symbolů při značení oceli dle normy ČSN EN 100072-1 [3]

2.4 Rozbor ocelí S355NL a S355J2

Obecně se oceli S355 dají zařadit ke konstrukčním ocelím třídy 11 (dle ČSN), ovšem oproti ostatním ocelím této třídy mají podstatně lepší mechanické vlastnosti. Právě jejich vyšší mez pevnosti umožňuje podstatné odlehčení konstrukcí tam, kde jsou oceli použity. Hodnotu meze kluzu zvyšují hlavně uhlík, mangan, křemík, měď a fosfor. Přičemž je nutno brát v potaz to, že obsah uhlíku nelze zvyšovat nad více jak 0,2%, kvůli zaručené svařitelnosti oceli. Ocel S355 se řadí mezi oceli feriticko-perlitické, přičemž obsah perlitu v matici se pohybuje v intervalu 5–10 hm %. [i4] [i5]

Oceli S355NL jsou nelegované, svařitelné, jemnozrnné a normalizačně žíhané oceli určené pro práci za nízkých teplot. Oceli jsou dodávány ve formě různých polotovarů (plechy, tyče, trubky apod.). Tato bakalářská práce je vytvořena ve spolupráci s firmou Bohdan Bolzano s.r.o., která se specializuje na dodávání především válcovaných tyčí v různých rozsazích průměru (proto v praktické části je řešeno porovnání různých jakostí oceli S355 ve formě tyčového materiálu). Právě válcování za tepla silně ovlivňuje strukturu a vlastnosti oceli. Ocel je válcována při teplotách 50°C nad teplotou A_3 a její dochlazení probíhá na vzduchu. Struktura oceli vzniká následkem válcování a pomalého ochlazení na vzduchu. Vzniká tak feriticko-perlitická struktura s pásy perlitu orientovanými ve směru válcování. Válcování také způsobuje relativně vysokou pevnost oceli, která je zapříčiněna vznikem substitučních a intersticiálních vad, hustotou dislokací a precipitačním zpevněním. [i5]

Ocel S355NL je možno označit za jemnozrnnou díky tomu, že se rozměry jejích zrn pohybují v rozsahu velikostí 8–15 μm . K růstu či hrubnutí zrn dochází následkem ohřevu struktury, a právě proto je nutno oceli legovat vhodnými prvky, které posouvají pásma teplot či změn struktury požadovaným směrem. Nejvhodnější prvek pro zabránění růstu zrn, aniž by došlo k přílišnému ovlivnění jiných vlastností oceli, je nikl. Ten se u oceli S355NL vyskytuje v množství 0,5 hm. % celkového obsahu (viz tabulka 2 a 5). [i4] [i5]

Ocel S355J2 je podobné jakosti jako ocel S355NL. Jedná se o nelegovanou jakostní konstrukční ocel používanou jak ve stavebnictví, tak ve strojírenském průmyslu. Hlavní rozdíl mezi S355J2+AR a S355NL je, že tato ocel není ve stavu po tepelném zpracování, ale v přirozeném (přírodním) stavu. A z hlediska chemického složení je rozdíl v počtu zaručených prvků určující čistotu oceli. Pro ocel S355NL je zaručený obsah celkem u 13 prvků, zatímco u oceli S355J2 se jedná o 9 prvků (viz tabulka 2 a 5).

Výsledkem přísnějších nároků je zaručení mechanických vlastností oceli S355NL za podstatně nižších teplot ovšem za cenu zvýšených nákladů a pracnosti výroby. [i4][i5]

Tab. 5 Chemické složení ocelí S355NL a S355J2

max. hm %	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Cu	N
S355NL	0,18	0,5	1,65	0,025	0,020	0,05	0,12	0,05	0,3	0,5	0,1	0,55	0,15
S355J2	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	0,05	0,13	0,05				0,55	

Hodnoty uvedené v tabulce 5 jsou převzaty ze stránek zadavatele práce (TDP) a byly ověřeny v praktické části bakalářské práce (kapitola Spektrální analýza) včetně míry do jaké je složení homogenní v celém průřezu polotovaru

Stejně jako sesterská ocel je i S355J2 svařitelná všemi známými druhy svařování. Komplikace mohou nastávat při svařování výrobků větších rozměrů, kde může docházet k výskytu trhlin. Toto riziko lze však u obou jakostí ocelí eliminovat vhodnou přípravou a správným nastavením podmínek svařování.

Tab. 6 Tabulka porovnávající mechanické vlastnosti obou ocelí [i17][i18]

Materiál	S355J2	S355NL
Nominální tloušťka [mm]	Mez kluzu Re [MPa]	
≤16	355	355
>40 ; 63≤	335	335
>80 ; 100≤	315	315
Nominální tloušťka [mm]	Mez pevnosti Rm [MPa]	
≤100		470 - 630
>100 ; 200≤		450 - 600
>200 ; 250≤		450 - 600
>3 ; ≤100	470 - 630	
>100 ; ≤125	450 - 600	
Nominální tloušťka [mm]	Minimální tažnost A [%]	
>3 ; ≤40	22	22
>63 ; ≤100	20	21
>100 ; ≤125	18	21
>200 ; ≤250		21
Teplota [°C]	Absorbovaná energie (zk. ráz v ohybu) [J]	
-50		27
-40		31
-30		40
-20	27	47
-10		51
0		55
20		63

3. Svařitelnost

Svařitelnost oceli je technologická vlastnost udávající informaci o tom, zda a popřípadě v jaké míře, je ocel vhodná ke svařování. Ačkoli ji v moderních normách téměř nenajdeme, je tato vlastnost stále aktuální (a v dokumentech kontroly bývá udáván alespoň tzv. uhlíkový ekvivalent, který je základním vyhodnocovacím kritériem svařitelnosti). Zda je ocel vhodná ke svařování se rozlišuje na základě změny vlastností materiálu po provedení svaru. Největší vliv na svařitelnost ocelí mají činitele jako chemické složení, způsob výroby oceli, zvolená technologie svařování a tepelné zpracování. Dalším faktorem, který má vliv při svařování, je tloušťka spojovaného materiálu. [i7]

Svařitelnost je tedy možné silně ovlivnit výše zmíněnými faktory a dalšími úpravami technologických a konstrukčních podmínek před, v průběhu a po provedení svaru. Svařitelnost kovových materiálu se od sebe může značně lišit a informaci o této vlastnosti najdeme v normách jakosti a materiálových listech pro daný materiál. Každý materiál má dva základní druhy svařitelnosti, které se pak dále dělí, jedná se o svařitelnost tavnou a svařitelnost tlakovou (podle toho, jakou metodu svařování použijeme). [i8] [i7]

3.1.2 Odporová svařitelnost

Jedná se o vlastnost materiálu vytvořit kvalitní spoj za pomoci odporového tepla a vyvinutého tlaku na spojované plochy. Svařování elektrickým odporem je nejpoužívanější způsob tlakového svařování. Často se vyjadřuje uhlíkovým ekvivalentem. [i7]

3.1.1 Tavná svařitelnost

Tavnou svařitelnost lze hodnotit podle ČSN 05 1309 (*Zváranie. Zvariteľnosť kovov a jej hodnotenie*), kde se dříve dělila na několik stupňů obtížnosti tvorby svaru, (viz. tabulka 8). Základním principem je tvorba svaru za pomoci vzniku tavné lázně. [i8]

Jak již bylo uvedeno dříve, od roku 1991 se však toto dělení v normách nevyskytuje, přestože se s ním lze v praxi stále setkat. V současné době se svařitelnost materiálů posuzuje na základě dvou hlavních ukazatelů. Prvním z nich je ukazatel celistvosti svaru, tento ukazatel je vyhodnocován na základě odolnosti materiálu proti vzniku trhlin, pórů a jiných ve svarovém spoji nepřipustných vad. Druhý ukazatel bere v potaz mechanické spoje ovlivněné procesem svařování. Dnes se tedy setkáme spíše s komplexním hodnocením svařitelnosti na základě normy ČSN 05 1309.

Tab. 7 Starší dělení svařitelnosti

I a - Svařitelnost zaručená	Výrobce oceli zaručuje svařitelnost při svařování do 0°C bez jakýchkoliv úprav či podmínek.
Ib - Svařitelnost zaručená podmíněná	Výrobce oceli zaručuje svařitelnost při dodržení daných technologických podmínek. Podmínky jsou uvedeny v dodacích podmínkách a normách pro danou ocel.
II - Svařitelnost dobrá	Oceli dobře svařitelné nemají výrobcem zaručenou svařitelnost. Ve většině případů ovšem tvoří svary s vyhovujícími vlastnostmi.
III - Svařitelnost obtížná	Oceli obtížně svařitelné nejsou ve většině případů schopny vytvořit svar požadované jakosti, a to ani při aplikaci technologických podmínek. Tyto oceli se doporučuje nesvařovat.

3.2 Technologické a konstrukční vlivy na svařitelnost

Kromě materiálových charakteristik jako je chemické složení, metalurgický způsob výroby či tepelné zpracování, je možné svařitelnost ovlivnit mnoha dalšími faktory. Svařitelnost daného spoje je možné ovlivnit jak technologicky, tak konstrukčně.

3.2.1 Technologické ovlivnění

Zahrnuje veškeré procesy nezasahující do změny konstrukce. Jedná se tedy o volbu vhodných parametrů a postupů pro tvorbu svarového spoje. Technologické faktory ovlivňující svařitelnost jsou zpracovány v následujících řádcích.

Volba vhodné metody svařování

Pro každý materiál je vhodná jiná metoda svařování. Například materiál, který nemusí být svařitelný metodou MIG, může být svařitelný elektronovým svazkem. Jde tedy především o kombinaci svařovacích parametrů, které ovlivňují tepelný příkon (teplo vnesené do základního materiálu během svařování).

Volba vhodného přídavného materiálu

Přídavný materiál se obecně volí stejného chemického složení, jako materiál základní (svařovaný). Ale v určitých případech může být výhodnější, když přídavný materiál není naprosto totožný, ovšem musí mít velmi podobné vlastnosti, a to jak mechanické, tak i chemické. V případě, že by tomu tak nebylo, byla by konstrukce nevhodná.

Volba vhodného tepelného příkonu

Právě nastavení vhodného tepelného příkonu nám udává míru prohřátí materiálu. Od míry prohřátí materiálu se odvíjí další požadavky, například na nutnost tepelného zpracování.

Volba vhodného svařovacího postupu

Nejobsáhlejší faktor, patří sem volba vhodné polohy a směru svařování, ale i nastavení svařovacích parametrů ovlivňujících tepelný příkon či stanovení počtu housenek na daný svar.

Volba vhodného tepelného zpracování

Nastávají případy, kdy jsme schopni vytvořit kvalitní svar, avšak s příliš vysokou křehkostí vzhledem ke vzniku nežádoucí struktury či příliš velkého vnitřního pnutí. V takových případech je zapotřebí volit vhodné tepelné zpracování, které eliminuje, nebo alespoň snižuje nežádoucí efekty svařování.

3.2.2 Konstrukční ovlivnění

Zahrnuje veškeré postupy ovlivňující konstrukci. Jedná se tedy o volbu vhodných konstrukčních úprav za účelem tvorby co nejvhodnějších podmínek, pro tvorbu svarového spoje.

Volba vhodné tloušťky materiálu

Konstruktér musí brát v úvahu tloušťku stěny svařovaných výrobků, protože čím větší je tloušťka svařence, tím větší je tepelně ovlivněná oblast, a tím většího rozptylu dosahují vlastnosti svařence.

Volba vhodného tvaru spoje

Každý druh svarového spoje má své výhody i nevýhody. Záleží tedy hlavně na tom, kde se svar nachází. Většinou se ovšem používají tupé svary, které jsou nejvhodnější pro většinu svarových spojů, případně svary koutové (které jsou obvykle neekonomičtější).

Volba vhodné přípravy svarových ploch

Aby měl svarový spoj maximální efektivitu svého využití, je nutné zvolit vhodnou úpravu svarových ploch. Mezi úpravy ploch se řadí odmaštění či volba vhodné kvality povrchu. Tyto parametry nám udávají normy, zejména u tupých svarových spojů je velmi důležitá příprava správné geometrie svarových ploch (úkosů) před vlastním svařováním.

Volba vhodné tuhosti svařované konstrukce

Umístěním svarů nesmí dojít k vzniku uzlů příliš velkého napětí v celé konstrukci. Svary by například měly být symetrické a neměly by být zbytečně předimenzované (záleží tedy i na správné volbě velikosti svaru).

Volba vhodného umístění svarových spojů

Konstruktér musí brát v úvahu například dostupnost místa svaru a polohu, ve které bude svar tvořen a mnoho dalších faktorů.

3.3 Svařitelnost uhlíkových ocelí

Charakteristickým rysem uhlíkových ocelí je obsah uhlíku, který největší měrou definuje jejich vlastnosti. Obecně platí, že se obsah uhlíku pohybuje od velmi nízkých hodnot až po 1,7 hm. % C, i když nad 1,3 hm. % C se dostává velmi zřídka. [3]

Právě uhlík má velký vliv na tepelně ovlivněnou oblast. Protože uhlík (C) je prvek, který zvyšuje prokalitelnost, a tak následkem velmi rychlého ohřevu (vlivem svařovacího procesu a posléze rychlým ochlazením) dochází ke vzniku martenzitické struktury, což má za následek velký vzrůst tvrdosti. Maximální hodnota tvrdosti, která je tolerována (pro tzv. zaručeně svařitelné oceli) je 350 HV (při 0,25 hm. % C, přičemž martenzit tvoří 50 % struktury). Při takovéto koncentraci se jedná o zakalenou ocel. Růst tvrdosti provází i nežádoucí růst křehkosti, který může mít za následek vznik trhlin. [3]

Pro zabránění vzniku příliš křehkého svaru slouží předehřev, který zpomalí proces ochlazování, díky čemuž není struktura tak nestabilní (nevznikne tak velké množství martenzitu). Ne všechny oceli mají dostatečný obsah uhlíku aby docházelo k těmto jevům a předehřev se tedy používá u ocelí podmínečně svařitelných, kam se řadí všechny oceli s obsahem $C > 0,25$ hm. %. [3]

Nezanedbatelným faktorem je také tloušťka svařovaného materiálu, výrobci zpravidla uvádějí, do jaké tloušťky je jejich ocel zaručeně svařitelná. Čím větší je tloušťka materiálu, tím rychlejší je proces ochlazování.

Tab. 8 Pásmo teplot předehřevu v korelaci s obsahem uhlíku u uhlíkových ocelí [3]

Obsah hm. % C	Pásmo teploty předehřevu [°C]
0,20 až 0,30	100 až 150
0,30 až 0,45	150 až 275
0,45 až 0,80	275 až 425

Předehřev je možné také suplovat zvýšením tepelného příkonu, kdy se sice zvětší tepelně ovlivněná oblast (TOO), avšak ochlazování svaru bude probíhat pomaleji a nedojde tedy k zakalení struktury. Tohoto procesu se dosahuje za pomoci elektrod o větších průměrech či technologie s větším tepelným příkonem na jednotku délky svaru.

3.4 Vliv legujících prvků na svařitelnost ocelí

V ocelích se mohou vyskytovat v určitém množství i další doprovodné a legující prvky. Dále bude popsán jejich vliv na svařitelnost:

Křemík (Si)

Křemík zaručuje zvýšení pevnosti feritu a v uhlíkových ocelích se vyskytuje v rozmezí 0,1–0,45 hm. %. Jeho hlavní přínos však spočívá v dezoxidaci a tvorbě uklidněné oceli. Neuklidněná ocel má podstatně větší riziko tvorby pórů.[1][3] Při zvýšeném množství (nad 1 hm. %) však křemík může podporovat vznik „trhlin za tepla“.

Mangan (Mn)

V uhlíkových nelegovaných ocelích se pohybuje v rozmezí od 0,3 do 1,7 hm. % a má podobné dezoxidační účinky jako křemík. Další z jeho pozitivních vlivů je růst pevnosti při zachování stejné plasticity.[1][3]

Fosfor (P)

Zvyšuje odolnost proti korozi, mez kluzu a mez pevnosti na úkor snížení plasticity. Způsobuje křehnutí feritu, což má za následek vznik křehkých lomů, a to i za vyšších teplot. V nelegovaných uhlíkových ocelích jeho obsah dosahuje max. 0,03 %. [1][3]

Síra (S)

Vyšší obsah síry a její afinita k železu může mít za následek vznik tzv. trhlin za tepla. K těm dochází následkem tuhnutí, kdy se síra koncentruje na hranicích primárních zrn a při ochlazování dochází k vzniku „trhlin za tepla“, vlivem rozdílných teplot tuhnutí. Tento jev eliminuje mangan, ke kterému má síra větší afinitu než k železu. U nelegovaných uhlíkových ocelí obsah dosahuje maximálně 0,03 hm. %. [1][3]

Dusík (N)

Jedná se o neoddělitelný odpadní prvek, který se v oceli vždy v nějakém množství vyskytuje. Obvykle se jeho obsah pohybuje okolo 0,04 hm. %. Zvyšuje tvrdost a pevnost a snižuje houževnatost. Jeho vlivem vznikají nitridy, které mají za následek stárnutí oceli. [1][3]

Vodík (H)

Vodík je nežádoucí prvek, který se do oceli dostává jak při výrobě, tak při svařování. Má za následek oduhličení svarového kovu, vznik pórů a specifických vad, které nazýváme rybí oka. Vodík se do materiálu dostane např. z navlhých obalů elektrod, tavidel a dalších přídavných materiálů, nedostatečně upraveného povrchu základních materiálů či z okolní vlhkosti. [1][3]

Hliník(Al)

Má silně denitridační a dezoxidační účinky. U uklidněných ocelí se pohybuje obsah nad hodnotou 0,02 hm. %. Oxidy a nitridy hliníku působí jako krystalizační zárodky. [1][3]

Měď (Cu)

Do materiálu se dostává recyklací šrotu při výrobě, a to v obsahu max. do 0,26 hm. %. Její vliv je považován za neškodný. [1][3]

3.5 Svařitelnost jemnozrnných ocelí

Obecně platí, že vlastnosti nelegovaných uhlíkových ocelí jsou určovány zejména obsahem uhlíku a manganu a jejich zpevnění vzniká následkem intersticiálních a substitučních mechanismů. Tento způsob se však dá nahradit jiným postupem, a to sice legováním materiálu v malých množstvích a následným řízeným válcováním a tepelným zpracováním. [3][i5]

Jemnozrnné oceli mohou být legovány hliníkem, titanem, vanadem či niobem. Mikrolegování oceli těmito prvky v kombinaci s řízeným válcováním a tepelným zpracováním má za následek vznik mikrolegované jemnozrnné struktury s výrazně lepšími mechanickými vlastnostmi, než jakých dosahujeme u běžných uhlíkových ocelí. Limitní hodnoty legur jsou uvedeny v tabulce 9.

Tab. 9 Limitní obsahy legur v jemnozrnných ocelích [3]

Prvek	Niob (Nb)	Titan (Ti)	Hliník (Al)	Vanad (V)
Obsah v % hm	max 0,04	max 0,15	min 0,015	max 0,1

Všechny výše jmenované prvky tvoří karbidy (s uhlíkem) a nitridy (s dusíkem), přičemž tyto dva prvky se v ocelích v určité míře vyskytují vždy. Vlivem precipitace karbidů (a nitridů) na hranicích zrn dochází k růstu meze pevnosti a meze elasticity. Další výhodou přítomností precipitátů na hranicích zrn je zabránění migrace hranic a tím pádem zabránění hrubnutí zrna při rekrystalizaci oceli. Vlivem tvorby karbidů dochází však k dalším pozitivním efektům. Vlivem větší afinity dusíku a prvků uvedených v tabulce 9 se snižuje šance na vznik nitridů železa, které mají za následek stárnutí ocelí a vlivem vazeb prvků na uhlík se snižuje uhlíkový ekvivalent, čímž dochází ke zlepšení svařitelnosti oceli. [3][i5]

Každý z precipitátů má svůj podíl při tvorbě polotovarů z jemnozrnných ocelí. Precipitáty hliníku a titanu zabraňují růstu zrn při rekrystalizaci, ke které při válcování za tepla musí dojít. V některých případech se k niobu přidává i molybden. Precipitáty niobu a molybdenu mají za následek snížení kinetiky rekrystalizace austenitu při rekrystalizaci během válcování. [3][i5]

Ke vzniku jemnozrnné struktury přispívá také způsob řízeného válcování, a to sice doválcovávání za snížených teplot. Doválcovávací teploty se pohybují okolo 550°C a válcování je doprovázeno vznikem struktury jehlicovitého feritu. [3][i5]

Samotná svařitelnost těchto ocelí se řídí podobnými pravidly jako u ocelí uhlíkových, ale s několika odchylkami. Hlavním faktorem je obsah uhlíku a tloušťka materiálu. Dále je nutno brát v potaz i růst zrn v tepelně ovlivněné oblasti, s čímž přichází zkřehnutí materiálu v oblasti svaru. Je tedy zapotřebí snažit se navrhnout svarové spoje tak, aby nebyl nutný předehřev a došlo k co nejmenšímu vnesení měrného tepla do svarové oblasti. Nevýhodou, kterou sebou přináší mikrolegování, je ovlivnění chování síry při svařování. Klade se tedy velký nárok na co nejmenší možný obsah síry v těchto ocelích. Vlivem přítomnosti mikrolegujících prvků dochází k neúplné vazbě síry na mangan a železo a může dojít ke vzniku sulfokarbidů a sulfonitridů, které zvyšují náchylnost na vznik trhlin za tepla. Dalším doporučením může být volba takové svařovací technologie, která má při procesu tvorby spoje co nejmenší náchylnost k mísení svarového kovu se základním materiálem. Vlivem velkého promíšení může dojít k přílišné precipitaci karbonitridů niobu, což má za následek zkřehnutí spoje. Většina jemnozrných ocelí je zaručeně svařitelná bez předehřevu do tlouštěk okolo 30 mm a samotný předehřev se pohybuje v nižších teplotních rozsazích než u uhlíkových ocelí. Teploty předehřevu se pohybují v rozmezí 100–150 °C a jsou nižší právě kvůli snížení riziku nežádoucího růstu zrn. [3][i5]

3.6 Svařitelnost ocelí S355J2 a S355NL

3.6.1 Svařitelnost S355J2

Při svařování uhlíkových konstrukčních ocelí se obecně za hranici zaručené svařitelnosti považují takové oceli, které mají obsah $C \leq 0,22$ % hm, a zároveň při tvorbě svaru nedojde k překročení tloušťky oceli přes 25 mm. [4]

Ocel S355J2 většinou, byť nepatrně, překračuje hranici obsahu 0,22 hm. % C (viz tabulka 10). Je tedy vždy nutné využití předehřevu. Teploty předehřevů se aplikují v rozmezí teplot 100 až 250 °C. Výši teploty předehřevu je možné stanovit mnoha vzorci, přičemž autor vzorce specifikuje, pro jakou skupinu oceli je možné daný vzorec aplikovat. [4] [i9]

Tab. 10 Přehled vlastností oceli S355J2 [i9]

Přehled vlastností oceli S355J2							1.0577	
Druh oceli	Nelegovaná jakostní konstrukční ocel							
TDP	ČSN EN 10025-2: 2005							
Dřívější označení	S355J2G4 podle EN 10025: 1990 +A1: 1993; St 52-3 N podle DIN 17100; 11 503 podle ČSN							
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C max. pro tloušťku v mm			Mn	Si	P	S	N
	≤ 16	>16≤40	>40 ¹⁾	max.	max.	max.	max.	max.
	0,20 ²⁾	0,20 ⁴⁾	0,22	1,60	0,55	0,025	0,025	-
Složení hotového výrobku	0,23 ⁵⁾	0,23 ⁴⁾	0,24	1,70	0,60	0,035	0,035	-

Další podmínkou vhodnosti oceli pro danou aplikaci je takzvaný uhlíkový ekvivalent. Ten se určuje za pomoci vztahu (1). Bere v potaz obsah uhlíku a dalších legujících prvků obsažených v oceli (v určitém poměru k uhlíku) včetně tloušťky svařovaných polotovarů. Je nutno dodat, že vzorců pro výpočet uhlíkových ekvivalentů je mnoho a jejich autoři specifikují pro jaké skupiny je daný postup aktuální. Lze použít např. výpočet dle vzorce:

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot t \quad (1)$$

Hodnota uhlíkového ekvivalentu pro zaručenou svařitelnost by neměla přesáhnout hodnotu 0,5 % a zároveň nesmí obsah uhlíku přesáhnout hranici 0,22 %. V případě, že ocel přesáhne hodnotu $C_{ekv} 0,50$ % může dojít k praskání za studena. [4]

Dnes se však nejvíce používají pro výpočet uhlíkového ekvivalentu dva vzorce: CEV – sestrojený podle IIW (mezinárodního institutu svařování) a CET (podle EN 1011). [i6]

Maximální hodnota CEV 3)	Pro výrobky jmenovité tloušťky v mm:			
	≤ 30	> 30 ≤ 40	> 40 ≤ 150	> 150 ≤ 250
	0,45	0,47	0,47	0,49 ⁷⁾

Obr. 3 Hodnoty uhlíkového ekvivalentu pro ocel S355J2 [i9]

Z hodnot uvedených v dokumentech kontroly výrobce vyplývá, že ocel S355J2 je tzv. podmíněně svařitelná. Byť hodnoty uhlíkových ekvivalentů jsou vyhovující, ocel přesahuje maximální hranici obsahu uhlíku. Ve všech případech a je tedy vhodné aplikovat předehřev. [4][i9]

3.6.2 Svařitelnost S355NL

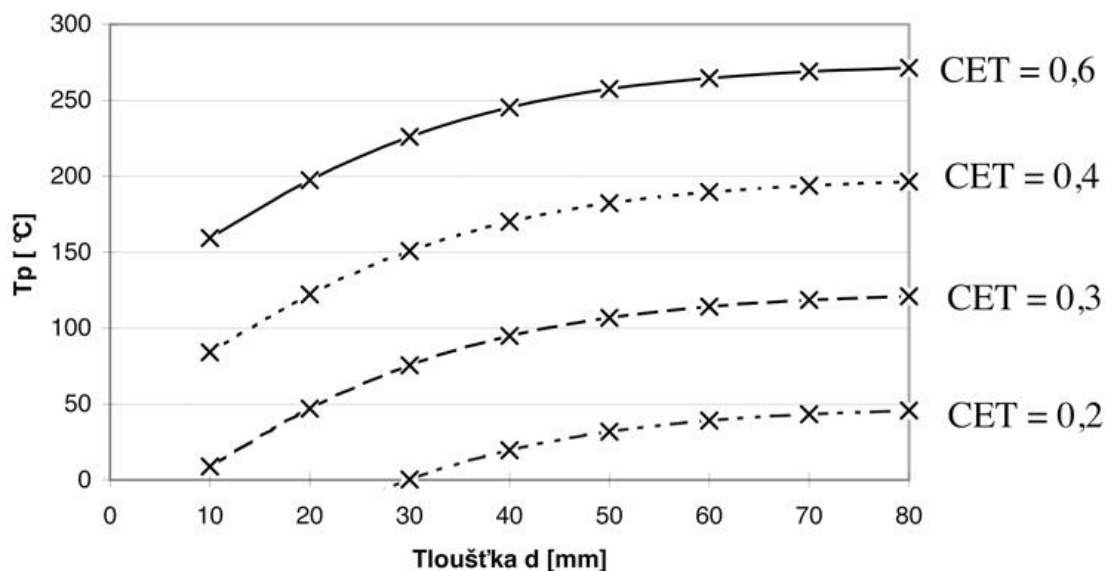
Svařitelnost oceli S355NL není obvykle, na rozdíl od oceli S355J2, limitována obsahem uhlíku, nýbrž hodnotou uhlíkového ekvivalentu. Hlavním faktorem stojícím za tímto tvrzením je obsah uhlíku, který se v oceli vyskytuje. Ten se dle doložených dokumentů kontroly pohybuje mezi 0,16 a 0,17 hm. %. [5]

Ověření z hlediska eliminace vodíkového praskání se uskutečňuje za pomoci vzorce 2 pro výpočet uhlíkového ekvivalentu. Výsledky musí splňovat stejné hodnoty jako v případě uhlíkových ocelí. [i4]

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (2)$$

Hodnoty uhlíkového ekvivalentu u oceli S355NL se dle doložených dokumentů kontroly pohybují v hodnotách od 0,4 % do hodnot 0,51 % u polotovarových tyčí o průměru 90 mm. Tyto hodnoty samozřejmě závisí na druhu výpočtu, který použijeme pro stanovení uhlíkového ekvivalentu. [5] [i4]

Svařovací postup se stanovuje na základě uhlíkového ekvivalentu doplněného o vliv tloušťky svařovaných polotovarů a tepelného příkonu. Samotný postup je popsán v normě ČSN EN 1011-2:2001 (Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů. Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí). Vliv jaký mají tyto faktory jsou rozebrány v předchozích kapitolách. [i4]



Obr. 4 Korelace uhlíkového ekvivalentu, teploty předehřevu a tloušťky svařovaných materiálů [i5]

Tab. 11 Hodnoty uhlíkových ekvivalentů jemnozrnných ocelí pro různé tloušťky [i6]

Tabulka 3 – Hodnoty ekvivalentů uhlíku CEV (CE) a CET podle chemického složení tavby (ČSN EN 10208) pro ocel válcovanou za tepla a normalizačně žíhanou (+N)							
Označení	Označení	Max. CEV	Max. CEV	Max. CEV	Max. CET	Max. CET	Max. CET
EN 10027-1	EN 10027-2	t (mm) ≤ 63	t (mm) > 63 ≤ 100	t (mm) > 100 ≤ 250	t (mm) ≤ 63	t (mm) > 63 ≤ 100	t (mm) > 100 ≤ 250
S275N	1.0490	0,40	0,40	0,42	0,36	0,37	0,39
S275NL	1.0491	0,40	0,40	0,42	0,35	0,36	0,38
S355N	1.0545	0,43	0,45	0,45	0,39	0,40	0,42
S355NL	1.0546	0,48	0,50	0,52	0,39	0,40	0,42
S420N	1.8902	0,48	0,50	0,52	0,39	0,40	0,42
S420NL	1.8912	0,48	0,50	0,52	0,38	0,40	0,42
S460N	1.8901	0,53	0,54	0,55	0,41	0,42	0,44
S460NL	1.8903	0,53	0,54	0,55	0,41	0,42	0,44

4. Metodika zkoušení vlastností svarů

Hodnocení svařitelnosti je poměrně komplexní záležitost, a uhlíkový ekvivalent je sice jednoduchý a rychlý, ovšem nezahrnuje veškeré faktory, které do tohoto procesu patří.

V současné době je tedy vhodné řídit se kvalifikací svařovacího postupu, který bere v potaz všechny vlivy tak, jak byly popsány v kapitole 3.2.

Kvalifikace svařovacích postupů pro jednotlivé metody, polohy a materiály jsou blíže popsány v kapitole 4.2.1.

Abychom mohli vyhodnotit celistvost svarových spojů, budou nejprve popsány vady, které se mohou vyskytovat ve svarových spojkách.

4.1 Vady ve svarech

Při tvorbě svaru může dojít ke vzniku vad. To však neznamená, že svarový spoj je automaticky nevyhovující. Každá vada má svou charakteristiku a míra tolerance závisí na aplikaci svaru. Schválit tedy lze pouze svary, které buď žádné vady neobsahují, či obsahují pouze takové vady, které nijak neovlivní jejich funkčnost (jsou tedy tzv. přípustné). Vada ve svarovém spoji může vzniknout z mnoha příčin, ať už se jedná o lidský faktor, či nehomogenitu svařovaného materiálu.

Vada často způsobuje koncentraci napětí, vlivem čehož dochází k podstatnému snížení meze únavy a obecně mají vady často negativní vliv na mechanické vlastnosti spoje. Právě vady můžou za určitých okolností být místem, kde dojde k tvorbě křehkého lomu, což je nejhorší možná varianta poškození, neboť se šíří rychle. Vady, které zvyšují riziko vzniku trhlin, mají největší vliv na bezpečnost svaru. [6]

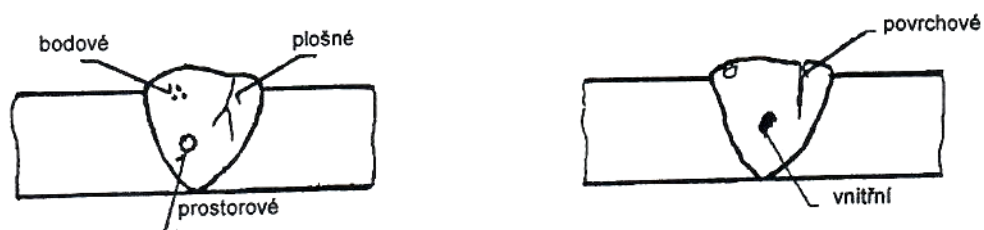
Toleranci vad uvnitř a na povrchu svaru určuje konstruktér, který na základě znalostí lomové mechaniky navrhuje spoj tak, aby byl dostatečně dimenzován pro svou aplikaci. Největší vliv na kvalitu má ovšem technolog. V případě, že je navrhnut vhodný postup a vhodná technologie, je možnost výskyt vad podstatně snížit. [6]

Zda svar vyhovuje, určuje pracovník technické kontroly s adekvátní kvalifikací a za pomoci aplikace specifických kontrolních metod.

Vady je možno dělit dle jejich geometrie či jejich umístění ve svarovém spoji a jsou normalizovány a charakterizovány pomocí normy ČSN ISO 6520 a základní hodnocení kritérií přípustnosti (a rozdělení svarů do různých stupňů kvality) je podle ČSN EN ISO 5817. [6]

Na základě geometrie se vady dělí na bodové (malé vměstky a póry), plošné (trhliny, studené spoje, neprůvazy) a prostorové (vměstky, bubliny, staženiny atd.). [6]

Na základě umístění ve svaru se vady dělí na povrchové a vnitřní. Povrchové vady jsou takové, které jsou viditelné na povrchu svaru, přestože jejich podstatná část může být ukryta hlouběji. Vnitřní vady na povrchu svaru nemají žádnou viditelnou část. [6]



Obr. 5 Grafické znázornění dělení vad [6]

4.2 Zkoušení svarových spojů

Zkoušky svarových spojů jsou nutné k ověření, zda svar vyhovuje všem podmínkám daným jeho aplikací. Zkoušky se provádí buď před započítím výroby, a to na vzorcích simulující budoucí zatížení svarů, nebo po či při tvorbě svarových spojů, pro ověření jejich kvality. Tyto zkoušky se často kombinují. [7]

Zkoušky dělíme na destruktivní a nedestruktivní, přičemž každá zkouška se řídí vlastní prováděcí a vyhodnocovací normou a má vlastní vypovídající hodnotu. Počet požadovaných zkoušek určuje konstruktér nebo pracovník svářečského dozoru (obvykle na základě požadavků při kvalifikaci svařovacího postupu), často je však možné najít doporučení pro daný výrobek. [7]

4.2.1 Vzorky a postupy pro zkoušky svarových spojů

Svarový spoj, který je nutno ověřit, musí mít zkušební vzorek vycházející z jeho aplikace, velikosti a druhu namáhání. Tyto vlastnosti a jejich specifika, stejně tak jako specifika pro navrhování zkoušek svářečů pro stanovení jejich kvalifikace a využívání daných technologií svařování, jsou normovány.

Norma popisující kvalifikaci postupu pro plamenné a obloukové svařování ocelí včetně obloukového svařování niklu a jeho slitin je ČSN EN ISO 15614-1. V rámci této normy jsou definovány veškeré požadavky na zkušební vzorky, jako je jejich umístění, počet, rozměry, směry válcování materiálu, a zkoušky, které jsou pro dané spoje nutné k ověření jejich nezávadnosti. Dále norma určuje postupy a zkoušky, které musí být svářeč schopen splnit, aby mohl dané svary provádět v praxi a rozsah jeho kvalifikace v případě úspěšného splnění svářečských zkoušek různých druhů. [14]

V případě zkušební vzorku natolik nestandardního, že normalizované vzorky (pro tupý, koutový svar nebo obvodový svar trubek, příp. připojení odbočky trubek) pro zkoušky dle normy ČSN EN ISO 15614 dostatečně nerepresentují daný spoj, je nutno dále postupovat dle normy ČSN EN ISO 15613. Tato norma udává postupy, na základě kterých jsou navrženy takové zkušební vzorky, které reprezentují zkoušený svar ve všech podstatných ohledech. [15]

Tato norma popisuje předběžná specifika postupu svařování na základě předvýrobních zkoušek svařování a je určena pro svařování typu obloukového, laserového, elektronového, plamenného, odporového a třecího svařování či přivařování svorníků. [15]

Tab. 12 Kvalifikační tabulka uvádějící jaké zkoušky je nutno splnit pro daný druh spoje [14]

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	
T-spoj s plným průvarem – obrázek 3	Kontrola makrostruktury	1 vzorek	-	
	Vizuální kontrola	100%	f	
	Zkouška na povrchové trhliny	100%	b a f	
	Radiografická nebo ultrazvuková	100%	a f a g	
	Připoj 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	

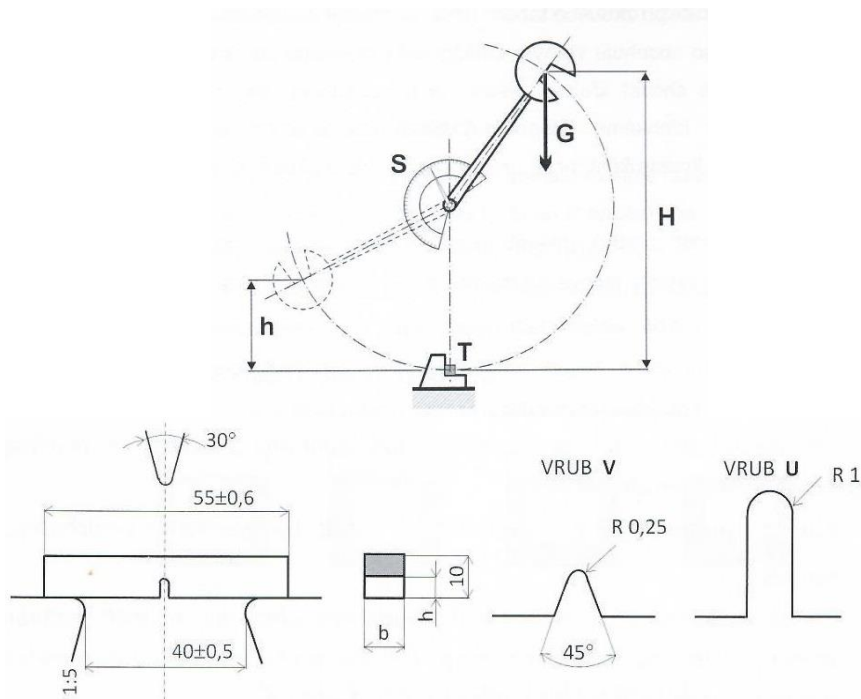
- ^a Ultrazvuková zkouška nemusí být použita pro $t < 8$ mm a pro materiály skupin 8, 10, 41 až 48
- ^b Kapilární zkouška nebo magnetická prášková zkouška. Pro nemagnetické materiály kapilární zkouška.
- ^c Pro zkoušky lámavosti, viz 7.4.3
- ^d Jedna sada ve svarovém kovu a jedna sada v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) pro materiály s tloušťkou ≥ 12 mm, které mají stanoveny rázové vlastnosti. Výrobní normy mohou požadovat zkoušky rázem v ohybu při tloušťkách pod 12 mm. Zkušební teplota musí být určena výrobcem s ohledem na použití nebo výrobní 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 větší průměr ≤ 50 mm není ultrazvuková zkouška požadována.
- Pro větší 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.

4.2.2 Destruktivní zkoušky

Destruktivní zkoušky jsou takové zkoušky, které mají za následek znehodnocení zkušební vzorku a svarového spoje. Dalším rozdílem oproti nedestruktivním zkouškám je to, že mnohdy není cílem zkoušky zjištění vady, ale zjištění mechanických vlastností vzorku či materiálu. Zkoušek existuje mnoho a tato bakalářská práce neobsahuje všechny, jsou zde však uvedeny nejběžnější druhy zkoušek.

Zkouška rázem v ohybu

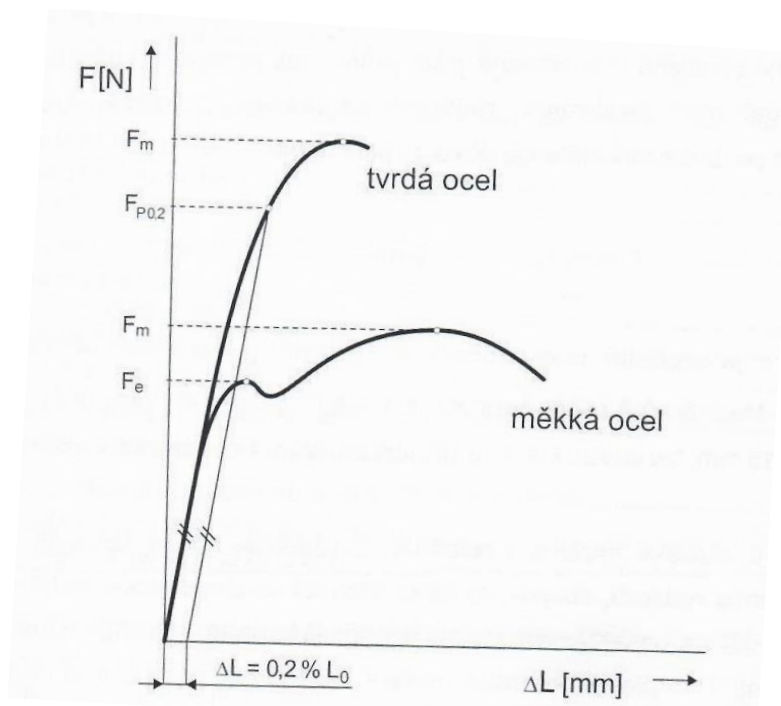
Principem zkoušky je přeražení zkušební vzorku a následné odečtení hodnoty vyvinuté nárazové práce potřebné k přeražení vzorku. Zkušební vzorek je ve formě tyče, na které se nachází vrub. Vruby mají tvar U nebo V na základě čehož se hodnota zkoušky uvádí jako KCU pro vrub průřezu U a KCV pro vrub průřezu V (viz obr. 8). Přeražení probíhá za pomoci Charpyho kladiva (viz obr. 8). Zkouška se provádí za různých teplot, proto se u některých ocelí setkáváme s označením J0, J2 či JR což je označení zaručující minimální hodnotu vrubové houževnatosti za různých teplot (viz tabulka č. 6). Zkouška je podrobně popsána normou ČSN EN 875 (*Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů - Zkoušky rázem v ohybu - Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení*) či ČSN EN 10045-1 (*Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho - Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby)*). [7][8]



Obr. 6 Princip a vzorek zkoušky rázem v ohybu [8]

Podélná a příčná zkouška tahem

V rámci této zkoušky je vytvořen vzorek ve formě válcové tyče odebrané buď podélně nebo častěji příčně ze svařovaného vzorku. Tato tyč je posléze umístěna do tahového stroje, který ji postupně zatěžuje, až dojde k jejímu porušení. Průběh zatížení a délková změna je zaznamenávána do grafu, který je výsledkem zkoušky tahem (viz obr.9). Tato zkouška je jednou z nejčastěji prováděných zkoušek, a to především proto, že na základě jejích výsledků je relativně snadné dopočtení dalších hodnot a mechanických vlastností. Zkouška standardně probíhá za pokojových teplot, je ale možno setkat se i s případy kdy je zkouška prováděna za budoucí pracovní teploty svaru. Zkouška je blíže popsána normou ČSN EN ISO 4136(*Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem*) a 5178(*Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Podélná zkouška tahem svarového kovu tavných svarových spojů*) či ČSN EN 10002-1(*Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty*). [7][8]



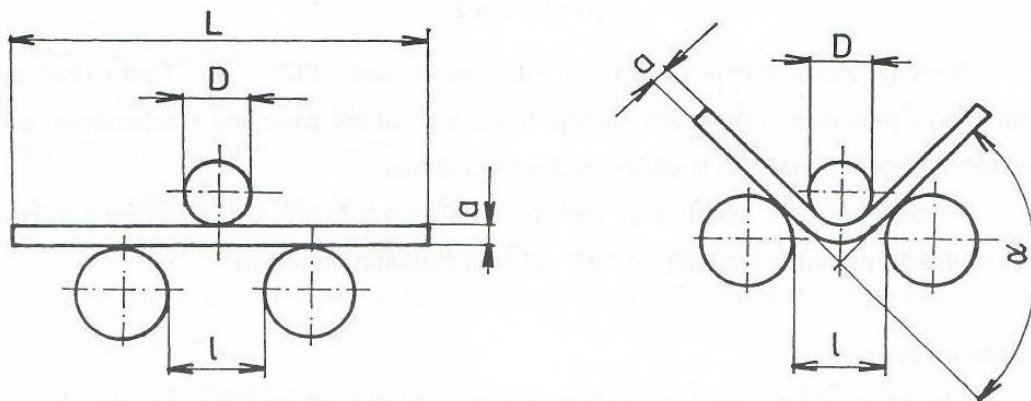
Obr. 7 Výstupní diagram zkoušky tahem pro měkkou a tvrdou ocel [8]

Zkouška ohybová

Při této zkoušce (dříve nazývána zkouškou lámavosti) je zkušební vzorek odebraný ze svarového spoje, plasticky deformován jednosměrným tříbodovým ohybem. Zkouška se provádí za využití ohýbacího trnu (viz obr. č. 9). Po provedení zkoušky se hodnotí všechny plochy zkušební tyče a vyhodnocují se případné vady. Zkouška je blíže specifikována normou ČSN EN ISO 5173 (*Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušky ohybem*). [7]

Tab. 13 Tabulka symbolů vyskytujících se při zkoušce ohybem [9]

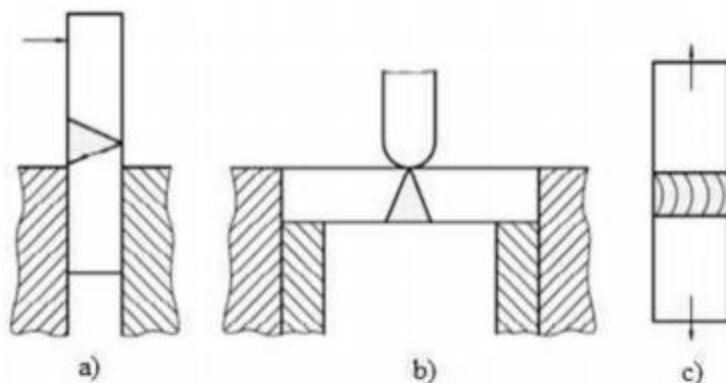
Používaný symbol	Význam označení	Jednotka
a	Tloušťka nebo průměr zkušebního tělesa (nebo průměr vepsané kružnice u mnohoúhelníkového průřezu)	mm
b	Šířka zkušebního tělesa	mm
L	Délka zkušebního tělesa	mm
l	Vzdálenost mezi podpěrami	mm
D	Průměr trnu	mm
α	Úhel	stupeň
r	Vnitřní poloměr ohnuté části zkušebního tělesa po ohýbání	mm



Obr. 8 Schéma principu ohybové zkoušky [9]

Zkouška rozlomením

Zkouška spočívá v rozlomení zkušební vzorku v místě svaru, a to tak, aby bylo možné pozorovat lomovou plochu. Nejčastěji bývá lom produktem dynamického či statického zatížení, méně často poté zatížením na krut. Pro snazší určení místa lomu je možno do vzorku zhotovit vrub. Zkoušku je možné provést jak na svarech s odstraněním převýšení, tak i na svarech bez jakéhokoliv opracování. Po rozlomení vzorku je vizuálně zkoumána plocha lomu a určena jakost na základě norem. Zkouška je blíže specifikována normou ČSN EN ISO 9017 (*Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkouška rozlomením*). [7]



Obr. 9 Schéma principu zkoušky rozlomením [10]

Makroskopická a mikroskopická kontrola svaru

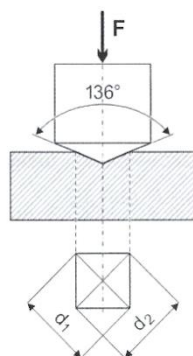
Principem této zkoušky je příčné rozříznutí a následné prohlížení vzorku se svarovým spojem. Vzorek může a nemusí být naleptán a kontrola může probíhat za pomoci mikroskopu (tzv. zkouška mikrostruktury), nebo bez něj (zk. makrostruktury). Cílem zkoušky je určení vnitřní struktury svaru a její kontrola. V návaznosti na tuto zkoušku je dále možno ze vzorku určit velikost zrna za pomoci zvětšení, mikroskopu a ověřených postupů. Tato zkouška je blíže specifikována normou ČSN EN ISO 17639 (*Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*). [7][8]

Zkoušky tvrdosti

Tvrdomost je mechanická vlastnost, a je definována jako odpor, který materiál klade proti vnikání cizího tělesa. Hlavními výhodami těchto zkoušek je jejich jednoduchost, rychlost a možnost provedení zkoušky již na hotovém výrobku. Zkoušky tvrdosti se dělí na základě několika kritérií. První kritérium je princip zkoušky (vrypové, vnikací, odrazové, kyvadlové), druhým kritériem je druh zatěžující síly (dynamické či statické) a posledním je velikost zatěžující síly (makrotvrdomost, mikrotvrdomost, nanotvrdomost)

V běžné praxi se nejčastěji setkáme se zkouškami statickými vnikacími. Hlavními zástupci těchto zkoušek jsou zkoušky dle Vickerse, Rockwella a Brinella. Princip těchto zkoušek je téměř identický, do vhodně připraveného povrchu (očistěný a orientování kolmo na osu vnikajícího tělesa) je vtlačováno těleso, které se nazývá indenter. Právě indenter, doba zatížení a jeho velikost od sebe jednotlivé metody odlišuje. Vzhledem k aplikaci zkoušky dle Vickerse v praktické části práce bude tato zkouška probrána detailněji.

Zkouška dle Vickerse spočívá ve vtlačení indentoru ve formě diamantového čtyřbokého jehlanu o vrcholovém úhlu 136° určitou silou do povrchu. Indenter je vtlačován za pomoci tvrdoměru. Po odlehčení jsou změřeny úhlopříčky vtisku zanechané na povrchu materiálu indentorem. Výsledná hodnota tvrdosti je následně odečtena z tabulek na základě aplikované síly a rozměrech úhlopříček. Zkouška tvrdosti dle Vickerse a postup při jejím vyhotovení je popsán normou ČSN EN ISO 6507-1 (*Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*).



Obr. 10 Schéma vtačování indentoru a vzniklých úhlopříček

Tab. 14 Tabulka rozdělení zkoušky na základě zatížení

Rozsahy zkušebního zatížení F [N]	Značka tvrdosti	Název
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti podle vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až < HV 5	Zkouška tvrdosti podle vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až < HV 0,2	Zkouška mikrotvrdomosti podle Vickerse

4.2.3 Nedestruktivní zkoušky

Nedestruktivní metody zkoušek jsou takové, po kterých zůstane výrobek či konstrukce plně funkční (nemusí se tedy odebírat speciální vzorky pro provedení zkoušek). Těmito zkouškami se posuzují tzv. charakteristiky celistvosti, tj. jestli jsou ve svarovém spoji přítomny vady (popsané v kapitole č. 4.1) a vyhodnocuje se jejich přípustnost. Metody kontroly se dělí podle toho, jaké typy vad lze jimi zjistit, ovšem přidává se ještě problematika netěsnosti výrobku či konstrukce.

K zjištění povrchových vad jsou užívány metody vizuální, penetrační, magnetické práškové a metoda vířivých proudů. Vnitřní vady jsou zjišťovány prozařovacími a ultrazvukovými metodami. [6]

Vizuální metoda VT

Jedná se o nejčastěji používanou kontrolu svarových spojů. Touto kontrolou je možno rychle a efektivně odhalit vady viditelné okem, které se ve svarovém spoji mohou vyskytovat. Tato metoda kontroly by měla být použita vždy a jako první v pořadí. Protože je obvykle nejrychlejší, nejjednodušší a nejlevnější. Nicméně nedává 100% jistotu toho, že se ve svarovém spoji nevyskytují vady (mohou tam být vady, které VT nedokáže detekovat díky své nízké citlivosti, nebo vnitřní vady). Proto bývá většinou následována dalšími nedestruktivními metodami kontroly (citlivějšími).

Dle použitých nástrojů se zkouška dělí na přímou a nepřímou metodu, přičemž při přímé metodě dochází k přímému pozorování zkoušené součásti (max. za použití lupy). Kontrolor musí mít dobrý stav zraku ověřený oftalmologem a také ověřenou intenzitu osvětlení prohlížené oblasti (o minimální hodnotě 500 luxů). Při nepřímé metodě jsou využívány různé optické nebo optoelektronické pomůcky, např. endoskopy, a pomocí nich



*Obr. 11 Endoskop sloužící k nepřímé vizuální kontrole
[i11]*

jsou kontrolovány svary na hůře dostupných místech, či na místech, které jsou škodlivé pro zdraví kontrolního pracovníka. Nález identifikuje konkrétní typy vad, takže kontrola je u VT obvykle spojena s měřením jejich velikosti (pomocí speciálních měrek) a vyhodnocení jejich přípustnosti. Vizuální metoda kontroly svarů je blíže popsána normou ČSN EN ISO 17367 (*Nedestruktivní zkoušení svarů – vizuální kontrola tavných svarů.*) [6]

Penetrační (kapilární) PT

Tato metoda zkoušení se omezuje pouze na vady povrchové a na místa, která jsou dobře přístupná (resp. vždy spojená s povrchem). Za pomoci penetrační metody jsme schopni také ověřit netěsnosti svarů menších rozměrů. Tato zkouška je detailně popsána v normách ČSN EN 571-1.

Podstatou zkoušky je aplikace detekční kapaliny (tzv. penetrantu) s hodnotou povrchového napětí pohybující se v intervalu 22 až 32 mN/m a dostatečnou viskozitou na povrch svaru. Po odstranění přebytečného penetrantu se za pomoci elevace docílí vztlínání pomocí kapilárního účinku a dojde k zviditelnění vady. Elevace je jev, který nastává při převaze adhezních sil v kapalině nad silami kohezními. Právě tento jev nám umožňuje provedení této zkoušky a nedojde-li k němu, nelze zkoušku provést. Dalším omezením zkoušky je teplota, za které je prováděna. Vlivem teploty dochází ke změnám viskozity a může dojít dokonce ke vzplanutí některých složek detekční kapaliny, proto je doporučený rozsah teplot v intervalu od 5 do 50°C. [6]

Na základě druhu použitého penetrantu se zkouška dělí na tři druhy, a to sice na metodu barevné indikace, metodu fluorescenční a metodu dvouúčelovou. Při metodě barevné indikace jsou vady viditelné díky velkému kontrastu penetrantu a jejímu podkladu a vyhodnocení probíhá ve viditelné části spektra záření. Metoda fluorescenční, jak již název napovídá, využívá fluorescenční kapalinu a UV záření o vlnové délce 320 až 400nm, díky němuž jsou vady viditelné. Metoda dvouúčelová využívá fluorescenční kapalinu, která zároveň plní funkci barviva jako u metody barevné indikace. [6]

Zkouška se provádí tak, že nejprve dojde k očištění a odmaštění povrchu, poté je nanesen penetrační prostředek a ponechá se cca 15 minut na jeho vstřebání (penetrant musí „zatéct“ do otevřených vad). Po uplynutí času je odstraněn přebytek penetrantu se zvýšenou pozorností, aby nedošlo k jeho vymytí z vad. K vyvolání vady slouží vývojky nanesené na penetrační vrstvu, které po určité době, která se odvíjí hlavně od velikosti vady, vadu zviditelní. Poslední částí je pak vizuální vyhodnocení pověřeným pracovníkem, přičemž se vyhodnocují indikace (lineární a nelineární), nikoli vady.[6] [i12]



Obr. 12 Vada zvýrazněná metodou barevné indikace [i12]

Metoda magnetická prášková (MT)

Metoda má stejné schopnosti odhalovat vady jako metoda kapilární, ovšem s výhodou toho, že magnetická metoda je schopna odhalit i vady blízko pod povrchem (tzv. podpovrchové vady). Metoda využívá změn magnetického pole v závislosti na struktuře a stavu zkoušeného materiálu. Změna magnetického pole součástí působí deformaci magnetického pole, následkem čehož dojde k hromadění feromagnetických částic, což vytvoří viditelnou indikaci po obrysu vady (ke zviditelnění rozptylových magnetických polí se používá feromagnetický kovový prášek). Je ovšem důležité mít na paměti, že vady, které jsou s magnetickým polem rovnoběžné, mohou být špatně viditelné, nebo také nemusí být viditelné vůbec. Nejzřetelnější vady jsou kolmé na magnetické pole, protože působí jeho narušení. [6]

Nevýhodou této metody je možnost zkoušet pouze feromagnetické materiály. Nelze tedy zkoušet ani materiály paramagnetické jako jsou různé slitiny či oceli austenitického typu. Další nevýhodou je nutnost poměrně kvalitního povrchu. [6]

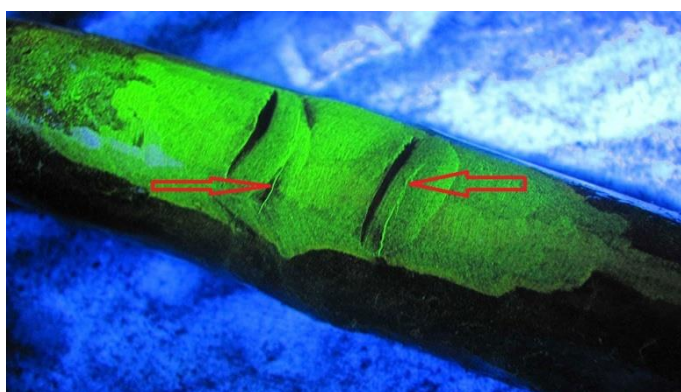
Pro provedení zkoušky je nejprve nutnost očistit povrch od okují, rzi, mastnoty, ostrých rohů. Dalším požadavkem je drsnost povrchu menší než $Ra\ 3,2\ \mu\text{m}$. Po úpravě povrchu

dojde k zmagnetizování součásti tak, aby magnetické pole bylo kolmo orientované na předpokládaný směr šíření vad.

Na základě způsobu magnetování je zkouška dělena na čtyři druhy, a to magnetování pólové, proudové, kombinované a impulsní. Magnetování pólové je pro tvorbu pole podélného, magnetování proudové pro tvorbu pole příčného či cirkulárního a magnetování kombinované je schopno vytvořit pole obojího druhu dle použitého typu proudu. Magnetování impulsní se používá hlavně pro zkoušení malých předmětů.

Dalším krokem je nanášení feromagnetického prášku či jeho směsi s kapalinou. Nanášení probíhá současně s magnetizováním součásti vyjma impulzního magnetování, při kterém aplikace probíhá po jeho ukončení. Lze použít i kovové prášky obalené fosforeskující látkou (tzv. fluorescenční metoda) a prohlížení pod UV zářením. Alternativu k feromagnetickým směsím tvoří elektroinduktivní snímače, které za pomoci rozptýlení magnetického pole a jeho vlivu na elektrické napětí vady registrují.

Při vyhodnocení této zkoušky je třeba brát ohled na možné nepravé indikace způsobené například náhlou změnu magnetických vlastností součásti vlivem předešlého zpracování. Po vyhodnocení vad je nutno předmět odmagnetovat. Pokud by k tomu nedošlo, mohlo by dojít k podstatnému urychlení opotřebení například na plochách, u kterých dochází ke tření. Odmagnetování probíhá za pomoci stejnosměrného magnetického pole a střídání směru jeho působení zároveň s jeho postupným snižováním až na nulovou hodnotu. Výrobky, které jsou po zkoušce zahřívány nad teplotu 700 °C není nutno odmagnetizovat. Tato metoda je detailně popsána v normě ČSN EN 1290. [6] [i13]



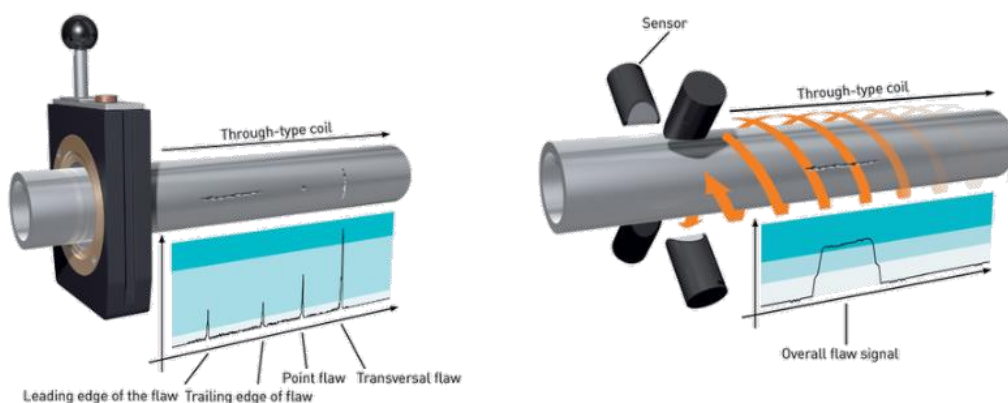
Obr. 13 Indikace trhliny při magnetické práškové zkoušce [i13]

Metoda vířivých proudů

Tato metoda využívá k odhalení vad střídavé magnetické pole a jeho změnu v závislosti na fyzikálních vlastnostech kontrolovaného výrobku. Uvnitř kontrolovaného předmětu je vytvářeno magnetické pole za pomoci cívky, kterou prochází proud. Toto pole o určité intenzitě a indukci tvoří v předmětu vířivé proudy, které mají za následek vznik vlastního magnetického pole o určité indukci. Následkem čehož je indukován proud, který je kolmý k magnetickému toku. Právě tento proud je nazýván vířivý. [6][i14]

Na základě vytvořeného magnetického pole vířivými proudy a jeho vlivu na základní magnetické pole tvořené cívkou jsme schopni získat údaje jako například elektrickou vodivost či magnetickou permeabilitu. Pokud v průběhu měření dojde ke kontaktu proudů s vadou, dojde k jejich porušení, sonda to zaznamená a posléze vyhodnotí. [6][i14]

Hlavní výhodou této metody je možnost rychlého měření prakticky všech elektricky vodivých materiálů a možnost automatizace tohoto procesu. Na základě manipulace frekvence magnetovaného proudu lze ovlivnit i hloubku, do jaké bude měření probíhat (hloubka klesá s rostoucí frekvencí). Ačkoliv metoda není tak přesná jako ostatní metody, její rychlost a možnost měření i vnitřních vad ji dnes řadí mezi čím dále více používanou. [6][i14]



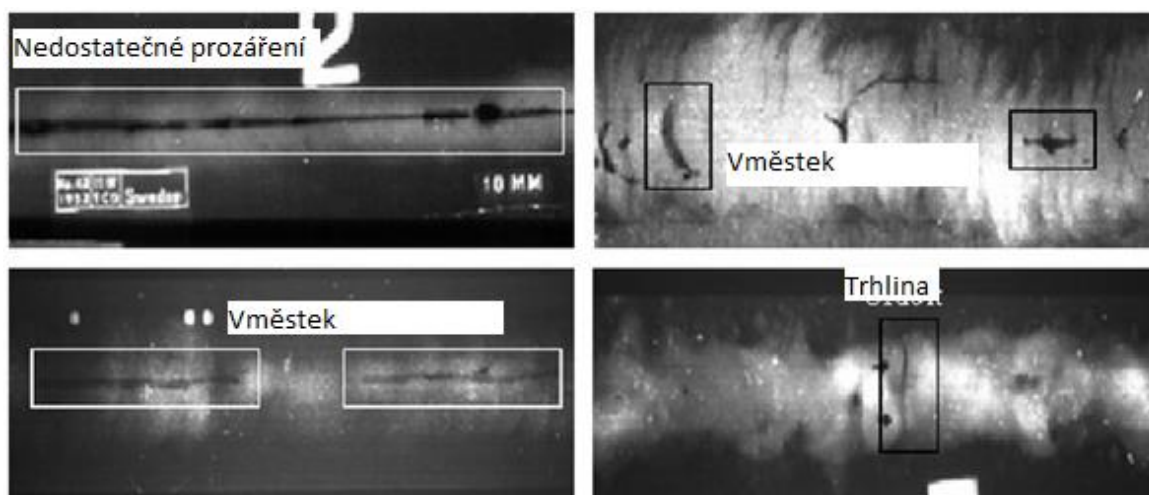
Obr. 14 Schéma metody vířivých proudů [i14]

Prozařovací metody

Prozařovací metody fungují na principu průchodu a interakci různých druhů elektromagnetického záření s materiálem. Obecně platí, že se zvětšující se tloušťkou materiálu intenzita prošlého záření klesá a je zachycena detektorem či jinou metodou. V místech, kde se struktura odlišuje (nebo vlivem vady), je intenzita záření jiná než ve zbytku materiálu. [6]

V závislosti na druhu použitého detektoru dělíme prozařovací metody na radioskopické, radiografické a radiometrické. Radioskopická metoda zobrazuje výsledky zkoušky téměř okamžitě, a to za pomoci buď fluorescenčního stínítka či rentgentelevizního systému. Radiografické metody zachycují expozici záření na speciální fotografický film, a to v podstatně lepším rozlišení než u metody radioskopické. Zkouška ovšem kvůli vyvolání filmu zabere více času než v případě radioskopické metody. Principem radiometrické zkoušky je zachycování prošlého záření za pomoci speciálních dozimetrů a používá se převážně k měření tloušťek či hustot materiálů. [6]

Při prozařovací metodě je nejprve nutno očistit povrch svaru, aby nedošlo ke kontaminaci obrazu, v případě nutnosti je i možno požadovat úpravu drsnosti povrchu. Dalším krokem je promyšlené uspořádání prozařovaného výrobku. Ten se prozařuje ideálně přes jednu stěnu, ovšem v případech, kdy je toto nerealizovatelné, je nutno prozařovat přes dvě stěny (např. u trubek). Směr svazku záření by měl ideálně směřovat kolmo na střed kontrolované oblasti, ovšem existují vady, které jsou více viditelné pod různými úhly. Po prozáření následuje proces určení jakosti radiogramu a provedení expozice. Závěrem je hodnocení vycházející z počtu a rozprostření vad po svaru. Svary jsou hodnoceny při kombinaci norem, ČSN EN ISO 17636 (*Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení*) a ČSN EN ISO 10675-1 (*Nedestruktivní zkoušení svarů – Kritéria přípustnosti pro radiografické zkoušení – Část 1: Ocel, nikl, titan a jejich slitiny*). [6]



Obr. 15 Příklady různých druhů vad zobrazených na radiodiagramu [i15]

Metody zkoušení ultrazvukem

Ultrazvukové zkoušení materiálu funguje na principu šíření akustických vln zkoušeným materiálem a záznamem změny jejich chování. K této změně dochází tam, kde se mění prostředí čili homogenita materiálu (např. v místech výskytu vad). Ultrazvukové zkoušení se obecně dělí na dvě metody, a to sice na metodu průchodovou a metodu odrazovou impulzovou. [6]

Metoda průchodová zaznamená úroveň ultrazvukové energie na vstupu a výstupu ze zkoušeného předmětu. Z toho vyplývá, že k měření je nutno použít dvě sondy, které jsou umístěny naproti sobě, a mezi nimi se nachází zkoušený předmět. Jedna sonda plní funkci vysílače a druhá plní funkci přijímače. Narazí-li akustická energie vyslaná vysílačem na zvýšení či snížení hustoty materiálu, dorazí k sondě jiná úroveň ultrazvukové energie než v případě homogenního materiálu. [6]

Metoda odrazová impulzová může fungovat jak v jednosondovém provozu (sonda je přijímač i vysílač), tak i v dvousondovém provozu. Při této metodě je ultrazvuková energie vysílána v krátkých impulsech, které se buď odrazí, nebo jsou přijaty přijímačem. Průběh vysílání je zobrazován na měřicím přístroji. Tato zkouška je nejobvyklejší a používá se u výrobku s tloušťkou materiálu více jak 10 mm. [6]

Pro provedení zkoušky je nutno očistit povrch od veškerých nečistot a zaručit drsnost povrchu pohybující se do $0,1 \times \lambda$ (kde λ je délka vlny ve vazebním prostředí). Další podmínkou je také určení povrchových vad některou z povrchových zkoušek. Pro správný průběh zkoušky je nutno vybrat vhodnou sondu, pokud možno s co nejvyšší frekvencí (vyšší frekvence znamená menší tzv. mrtvou zónu a lepší rozlišitelnost vad, ale je nutno brát v potaz její větší útlum materiálem, a tím snížený dosah). Orientace sondy by měla být taková, aby byly vlny vysílány, pokud možno kolmo na vady. Je důležité, aby se v kontrolní oblasti nacházel nejenom svarový materiál, ale i materiál svařované konstrukce. Vyhodnocování vad je v případě zkoušek ultrazvukem poměrně náročné. Vady se na přístroji objeví jako ultrazvukové echo, z čehož je možno relativně snadno určit, kde se vada nachází, ovšem její vlastnosti už se určují podstatně hůře. Vady se vyhodnocují buď na základě porovnání se svarovou měrkou nebo za pomoci vyhodnocovacích diagramů. [6]

Obecně jsou popisy jednotlivých metod ověřování kvality svarů značně zjednodušeny vzhledem k obsáhlosti daných témat. Bližší informace o jejich metodice a vyhodnocení je možno najít v příslušných normách uvedených na konci jednotlivých kapitol zkoušek.

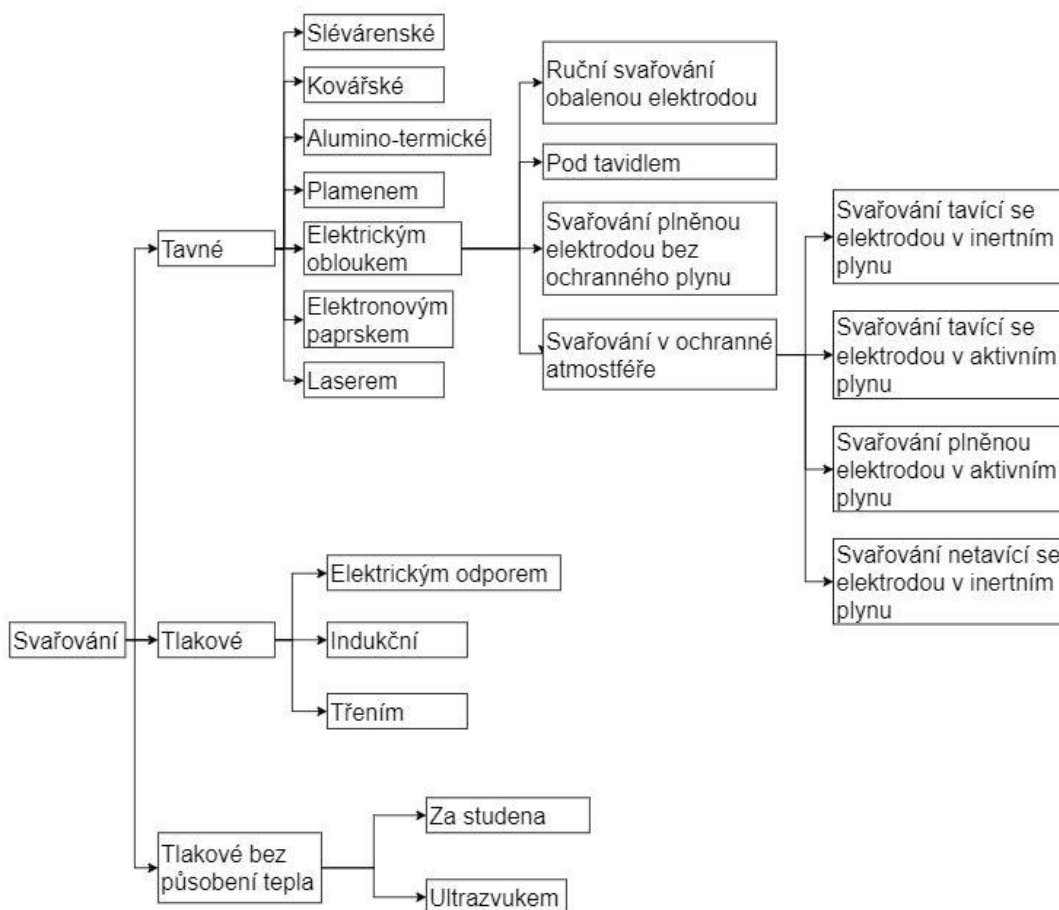
V případě zkoušek prozařováním, a hlavně zkoušek ultrazvukových, je norem velice mnoho a jejich problematika zvláště obsáhlá. S těmito zkouškami se lze povrchově nejlépe seznámit v normách ČSN EN ISO 16810 (*Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Obecné zásady*) a ČSN EN ISO 17636 (*Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení*)

Hodnoty, které jsou zjištěny jak při destruktivních, tak nedestruktivních zkouškách materiálů a svarů se dají porovnávat s dokumenty kontroly, které dodává výrobce či dodavatel daného materiálu. Tyto dokumenty dříve nazývané atesty obsahují informace a tavbě, složení, rozměrech a mohou obsahovat i popis mechanických vlastností daného polotovaru a materiálu. Tyto dokumenty se musí řídit příslušnými normami pro technické dodací podmínky.

5 Metody svařování

Svařování je proces, při kterém za pomoci tepla, tlaku či jejich kombinací, dojde k vytvoření nerozebíratelného spoje. Svarový spoj je možno vytvořit jak bez přídavného materiálu, tak s přídavným materiálem, který má podobné chemické složení jako materiál základní. Na základě působícího prvku, díky kterému dojde ke spojení materiálu, se svařování dělí na tavné, tlakové a svařování bez působení tepla.

Metod svařování je mnoho (viz obrázek 17). S ohledem na praktickou část bakalářské práce byly vytipovány metody MIG a WIG k bližšímu seznámení čtenáře s jejich problematikou, z nichž posléze byla aplikována pouze metoda MAG.



Obr. 16 Metody svařování a jejich dělení [11]

5.1 Metody svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách

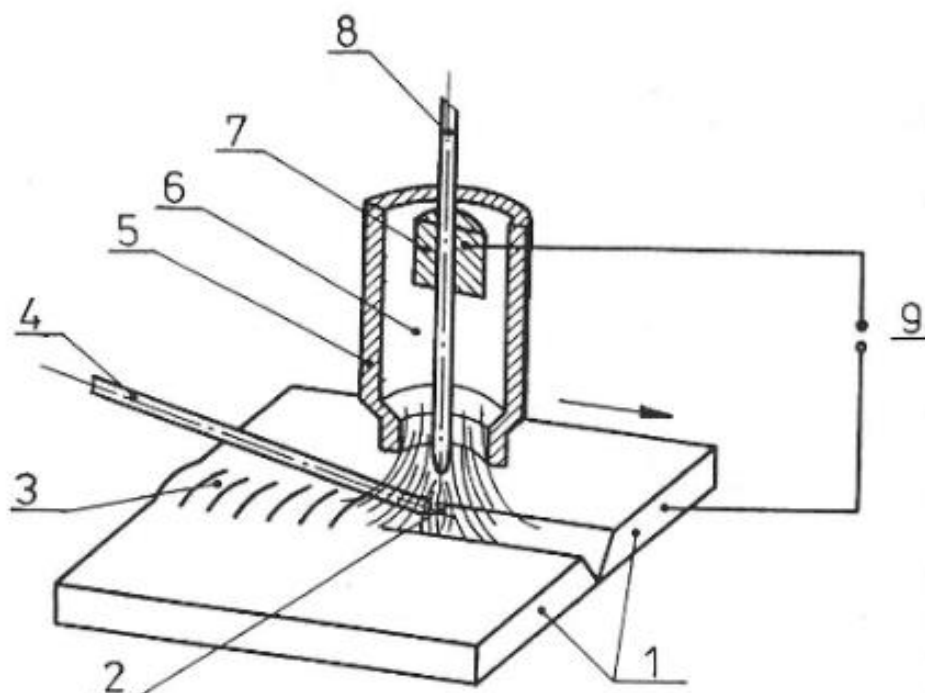
Při tvorbě svarového spoje je nutno chránit jak elektrický oblouk, tak svarovou lázeň. Toho se dosáhne za pomoci ochranné atmosféry. Zatímco elektrický oblouk hoří, je do jeho přímého okolí dopravován plyn, který zabraňuje přístupu okolní atmosféry, která může spoj ohrozit například přítomností kyslíku, vodíku a dusíku. Ochranné atmosféry se dělí na aktivní a inertní. Inertní atmosféra je taková, která nijak neovlivňuje svarový kov či lázeň. Aktivní je taková, která se svarovou lázní částečně chemicky reaguje.

Metoda WIG/TIG (Wolfram Inert Gas / Tungsten inert gas)

Tato metoda je dle normy ČSN EN ISO 4063 značena číselným kódem 141 a oblouk je při ní tvořen v prostoru mezi svařovaným materiálem a neodtavující se wolframovou elektrodou. Ochranná atmosféra je v tomto případě zajišťována inertním plynem s minimální čistotou 99,995 %. K tvorbě ochranné atmosféry je používán argon či hélium, popřípadě kombinace obou plynů. Přídavný materiál je ve formě drátu, který je do svarové lázně dodáván ručně, nebo automatickým podavačem schopným měnit rychlost jeho podávání. Princip této metody je znázorněn na obrázku 16. [11]

V závislosti na použitém druhu proudu se touto metodou dají svařovat různé materiály. V případě nastavení proudu stejnosměrného je metoda vhodná pro středně a vysocelegované oceli, nikl, měď a další materiály. Při nastavení proudu střídavého je metoda aplikována na hliník, hořčík a jejich slitiny. [11]

Díky použití inertního plynu vzniká čistý spoj bez strusky, který není nutno dále upravovat. Mezi další výhody se řadí vysoká stabilita oblouku a jeho operativnost v různých polohách. Naopak nevýhodou této metody je její malá produktivita z důvodu náročné metodiky tvorby spoje a náchylnost na vítr a jiné klimatické podmínky. Tato metoda nachází své využití tam, kde se svařují vysokolegované oceli pro různé aplikace či speciální slitiny hliníku, titanu apod., a to hlavně v dílenském prostředí.[11]



Obr. 17 Princip svařování metodou TIG [11]; 1 - Základní (tzn. svařovaný materiál); 2 - Elektrický oblouk; 3 - Svar; 4 - Příkladný materiál; 5 - Plynová trubice; 6 - Ochranný plyn; 7 - Kontaktní kleštiny; 8 - Wolframová elektroda; 9 - Zdroj proudu

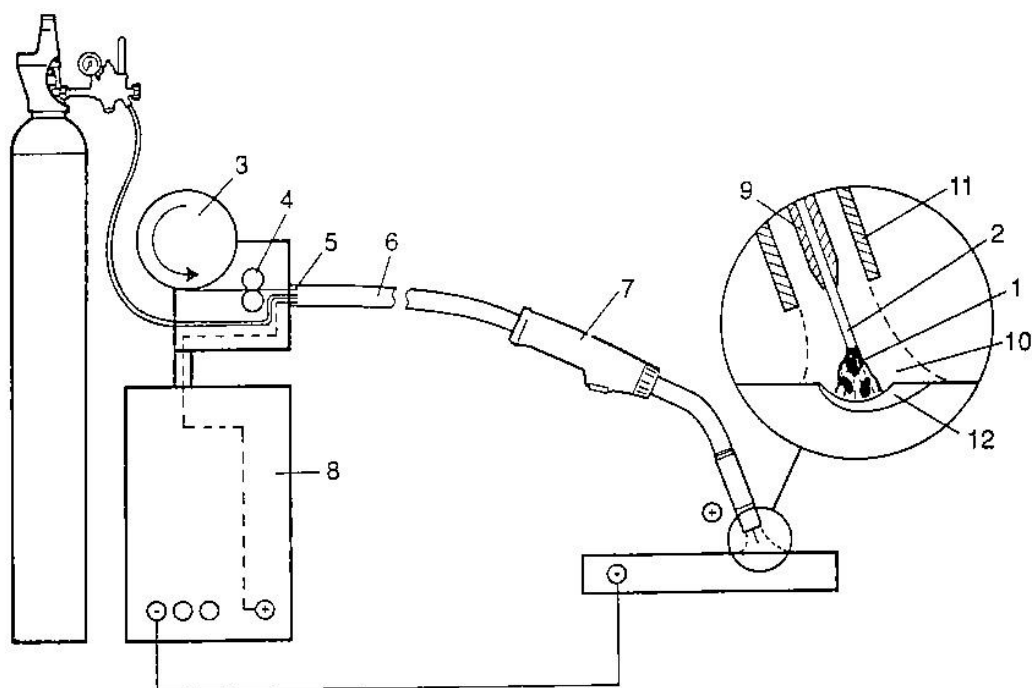
Metoda MIG a MAG (Metal inert gas, Metal active gas)

Jedná se o světově nejpoužívanější metodu svařování, přičemž metoda MAG je dle normy ČSN EN ISO 4063 značena číselným kódem 135 a metoda MIG 131. Za stále rostoucí mírou využití metody je její jednoduchost ve srovnání s ostatními metodami a široký výběr přídatných materiálů, který silně rozšiřuje možnosti aplikace těchto metod. Dále snadná možnost automatizace a velká produktivita při dostatečné kvalitě svarů. Metoda MAG nachází své využití všude tam, kde se svařují nelegované, nízkouhlíkové či nízkolegované oceli. Zatímco metoda MIG je aplikována tam, kde se svařují hliníkové slitiny. [11]

Metody fungují na principu tvorby elektrického oblouku mezi odtavující se elektrodou a svařovaným materiálem. Elektrodu (a zároveň přídatný materiál) tvoří drát, který se postupně odvíjí ze zásobníku a odtavuje do svarové lázně, čímž dochází k tvorbě svaru. Přídatný materiál je do místa svaru dodáván za pomoci systému kladek, který drát postupně odvíjí z cívek, ve kterých je dodáván (jedná se tedy i při použití ručního hořáku o poloautomatický proces svařování). Metoda MAG dosahuje proudové hustoty až 600 A/mm^2 s hodnotou svařovacích proudů pohybujících se od 30 A až do 800 A. Celý proces tvorby svaru je chráněn ochrannou atmosférou, která je do přímého okolí svaru dodávána plynovou hubicí. Atmosféra chrání svar je v případě metody MIG tvořena inertními plyny (argon, helium) a v případě metody MAG se jedná o plyny aktivní (oxid uhličitý, směs argon + oxid uhličitý/kyslík). Volba ochranného plynu má vliv na chemické reakce a

teplotní poměry v oblouku, druh přenosu kapek v oblouku, ale také rozstřík. Volba je však hlavně závislá na druhu materiálu, který je svařován. [11]

Mezi hlavní výhody metod MIG a MAG se řadí jednoduchost zapálení oblouku a vlastního svařování, minimální tvorba strusky (produktů dezoxidačních metalurgických reakcí), vysoká proudová hustota a vysoký výkon odtavení. Svařovací rychlosti těchto metod díky vysoké mechanizaci a automatizaci dosahují rychlosti až 150 cm/min. [11]



Obr. 18 Schéma principu metod MAG/MIG [13]; 1 - Elektrický oblouk; 2 - Drátová elektroda; 3 - Zásobník drátu; 4 - Podávací kladky; 5- Rychloupínací spojka; 6 - Hořákový kabel; 7 - Svařovací hořák; 8 - Zdroj proudu; 9 - Kontaktní průvlek; 10 - Ochranný plyn; 11 - Plynová trubice; 12 - Svarová lázeň

6. Praktická část bakalářské práce

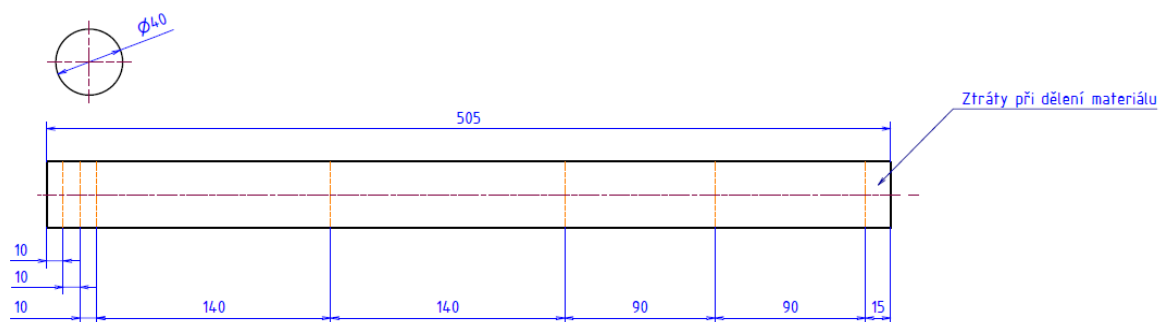
Praktická část bakalářské práce měla za cíl ověřit vlastnosti vybraných jakostí oceli S355J2 + AR a S355NL před a po svařování. Porovnat jejich vlastnosti před a po svařování s ohledem na jejich tvrdost a změnu struktury vlivem procesu svařování.

V rámci experimentální části bakalářské práce byly vytvořeny vzorky ze základního materiálu v obou zkoumaných jakostech oceli (tzn. S355J2+AR a S355NL) a ověřeny jejich vlastnosti. Dále byly navrženy a vytvořeny svarové spoje, ze kterých byly odebrány vzorky shodné orientace a rozměrů. Po odebrání byly vzorky zkoušeny stejnými zkouškami a jejich výsledky zaznamenány a porovnány. Druhy svarových spojů byly voleny tak, aby obsáhly nejběžnější možné typy svarových spojů (s ohledem na použitý tyčový polotovar). Metody hodnocení byly vybrány v souladu s ČSN EN ISO 15613 (*Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Kvalifikace na základě předvýrobní zkoušky svařování*) a vzhledem k omezenému množství zkušebnímu materiálu.

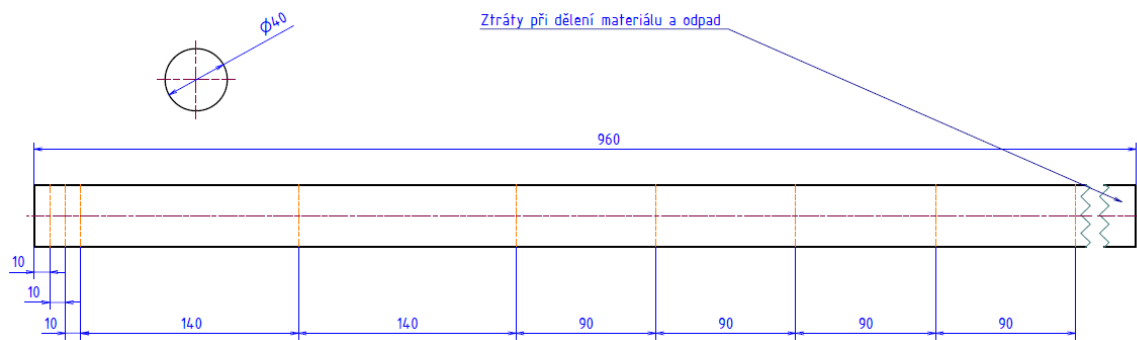
Následující podkapitoly podrobně popisují procesy přípravy vzorků, zkoušek a jejich vyhodnocování včetně strojů a nástrojů při nich použitých.

6.1 Příprava vzorků

Od zadavatele práce byl obdržen zkušební materiál ve formě plných tyčí. Tyč z oceli jakosti S355NL o délce 505 mm a tyč z oceli jakosti S355J2 o délce 960 mm. Tyto tyče byly řezány dle následujících schémat (viz obr. 19 a 20). Vzorky byly děleny na gravitační pásové pile chlazené BOMBAR Ergonomic 275.230 DG.



Obr. 19 Schéma dělení polotovarů na vzorky S355NL

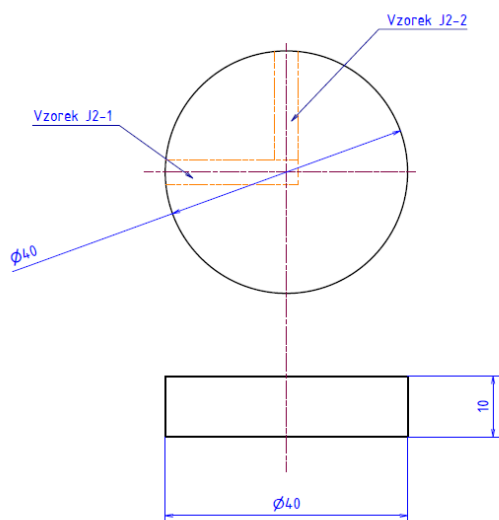


Obr. 20 Schéma dělení polotovaru na vzorky S355J2

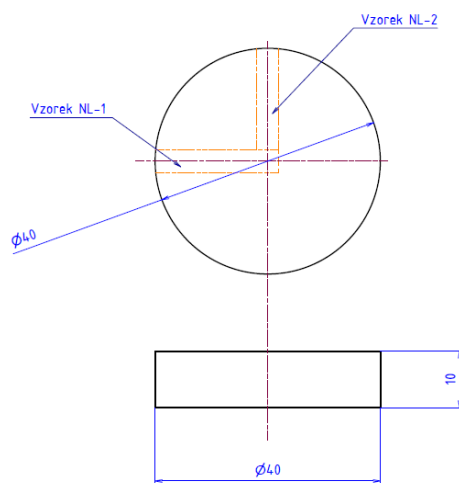
6.2 Metalografická zkouška

Příprava vzorků

Z naděleného základního materiálu znázorněného na obrázcích 19 a 20 byl materiál dále rozřezán na přesné metalografické pile (bez tepelného ovlivnění řezu) podle obrázku 21 a 22.



Obr. 22 Schéma dělení materiálu S355J2



Obr. 21 Schéma dělení materiálu S355NL

Dělení materiálu proběhlo na kotoučové metalografické pile StuersLabotom1, chlazené emulzí za použití dělicího kotouče Hexagonal 46A25, Ø250 mm x 1.5 mm x Ø32 mm.



Obr. 23 Upnutý vzorek před řezáním

Dalším krokem bylo zalisování nařezaných vzorků do zalévací hmoty společně s jejich označením. Zalévací hmota je dodávána ve formě granulátu. Konkrétně byl použit granulát Multifastod firmy Struers. Zapékání probíhá na metalografickém lisu Cito-Press 1 od firmy Struers.

Zapékání probíhá za působení tlaku o 250 barech a teplotě 180 °C. Tyto procesy probíhají po dobu 4 minut, po čemž následuje ochlazování po dobu 3,5 minuty. Po vyjmutí vzorku z lisu dostává zkušební vzorek hrubou finální podobu.



Obr. 24 Lis Cito-Press 1



Obr. 25 Zkušební vzorky a jejich označení po vyjmutí z lisu

Aby bylo možné strukturu vzorků pozorovat pod mikroskopem, je nutno dokonale očistit, obrousit a vyleštit zkoumanou plochu vzorku. Tento proces probíhá na metalografické brusce/leštičce Beta s automatickou hlavou Vectorod firmy Buehler.



Obr. 26 Bruska Buehler Beta

Proces broušení se skládá z několika fází, přičemž hlavní rozdíl mezi nimi je drsnost brusného papíru, který se používá, viz tabulka 15 postupu při broušení. Mezi každým krokem je nutno vzorek opláchnout vodou.

Tab. 15 Sled brusných operací

Fáze	Hrúbost zrn [jednotka]	Doba broušení [min]	Suspenze
I	180	2	Voda
II	1200	2	Voda
III	2000	2	Voda
IV	4000	2	Voda

Po broušení je nutno povrch leštit. Leštění probíhá na stejném stroji jako broušení (viz obrázek 26) a skládá se ze dvou fází. V obou fázích se používají textilní plátna různých druhů a směs různých brusných prostředků a suspenzí. Po leštění je nutno vzorek opláchnout vodou s jarem pro odstranění mastnoty.

Tab. 16 Sled leštících operací a prostředků

Fáze	Velikost zrn [μm]	Doba leštění [min]	Suspenze	Brusný prostředek
I	3	5,5	Meta di fluid	Diamant monokrystal
II	0,05	5,5	Destilovaná voda	Master prep



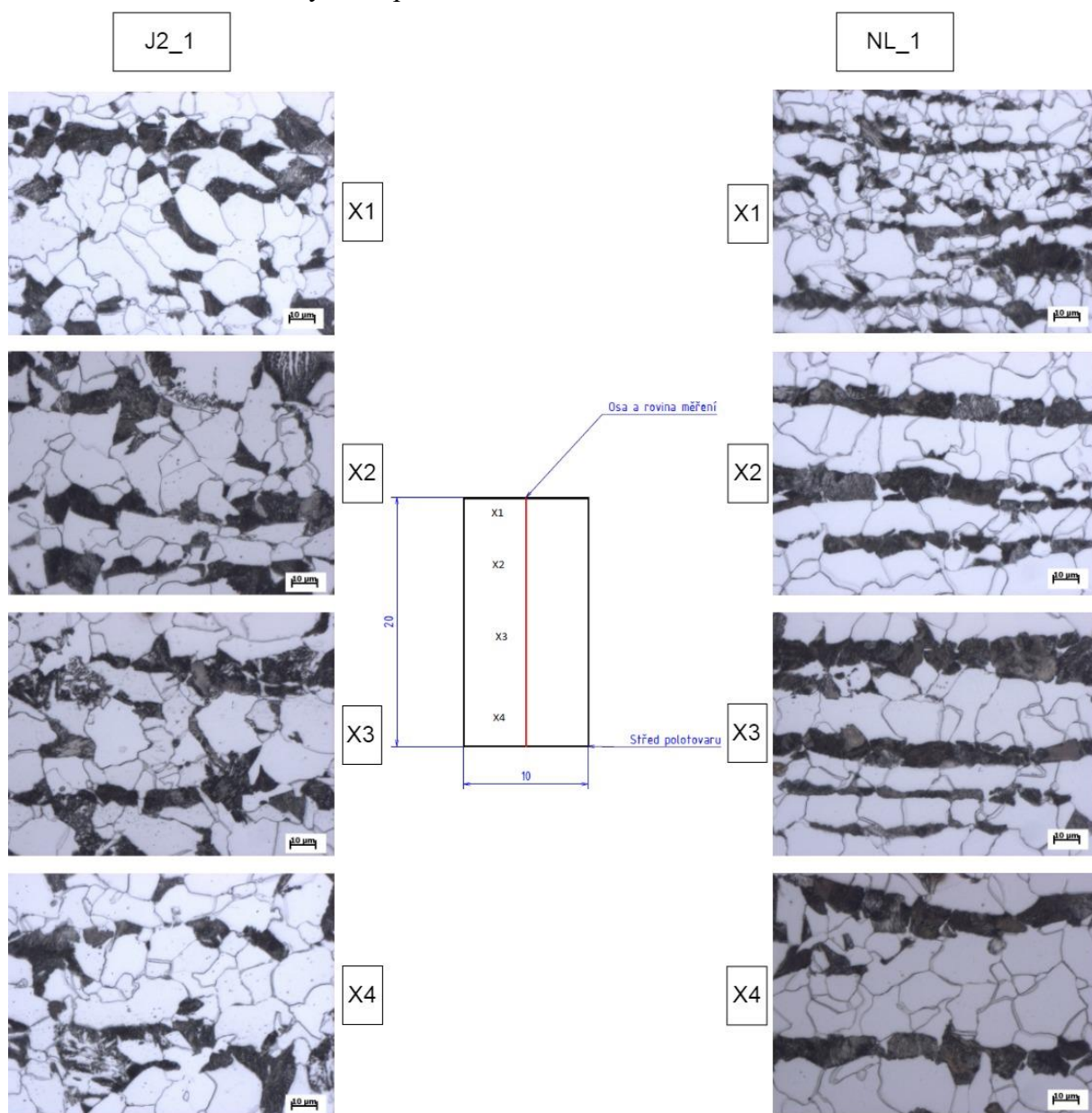
Obr. 27 Proces leštění

Poslední částí přípravy metalografických vzorků je jejich leptání. To slouží k vytvoření různých povrchových reliéfů. A to hlavně díky tomu, že různé strukturní složky se leptají různými rychlostmi. K leptání byl použit roztok s názvem Nital 2%, ten se skládá z kyseliny dusičné a ethanolu. Po leptání je vzorek opláchnut destilovanou vodou či lihem a usušen proudem horkého vzduchu.

Po tomto procesu je vzorek možno vložit pod světelný mikroskop a při dodržení předchozích postupů lze za jeho pomoci pozorovat strukturu. Ze struktury lze vyčíst velikost zrna, druhy strukturních složek, jejich četnost či tvar.

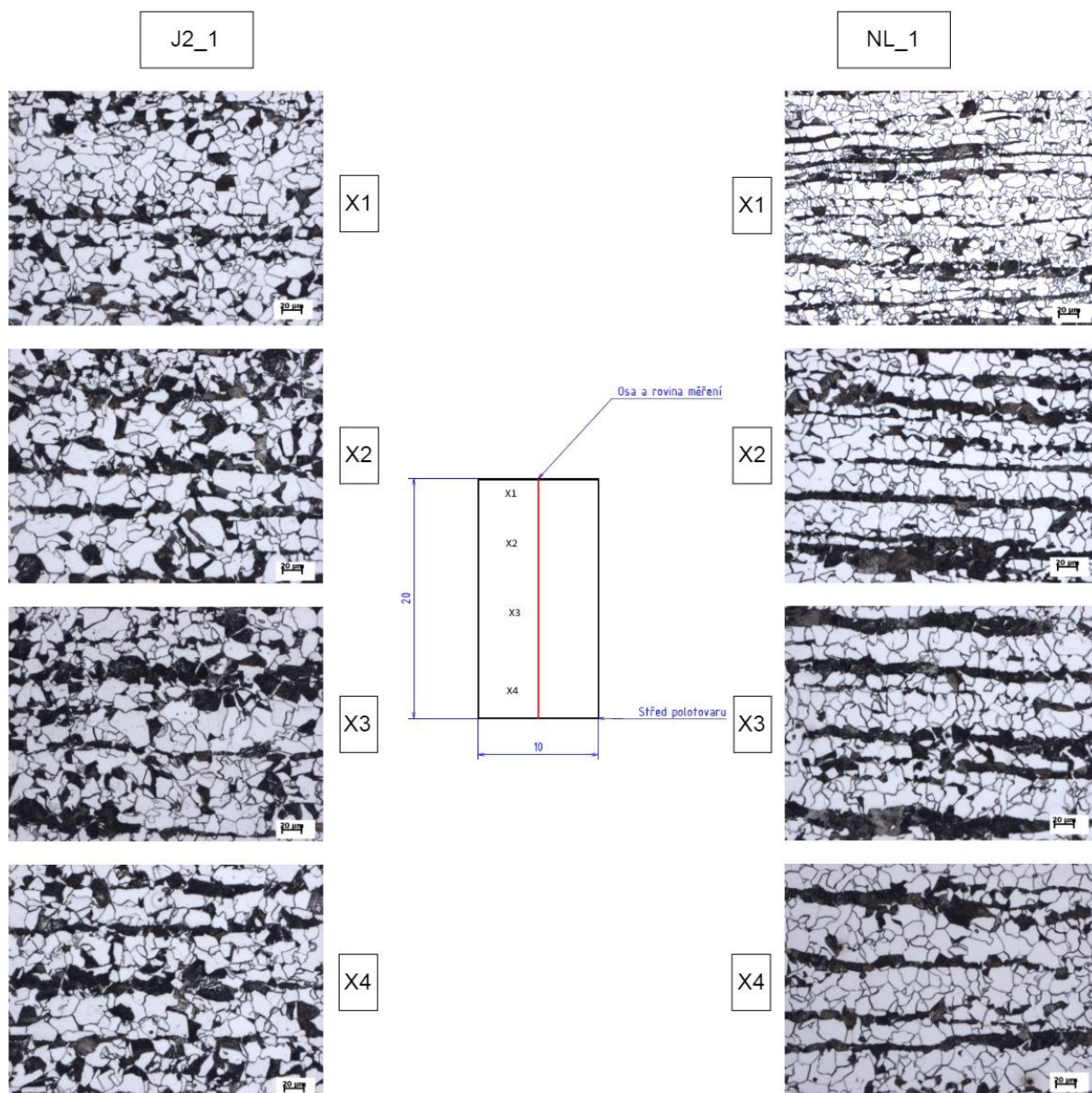
Mikrostruktura oceli S355NL

Porovnání mikrostruktury ocelí při zvětšení 500x



Obr. 28 Porovnání mikrostruktury vzorků

Srovnání mikrostruktury ocelí při zvětšení 200x



Obr. 29 Porovnání mikrostruktury vzorků

Na obrázcích 29 a 31 je jasně patrný rozdíl v menší pravidelnosti řádkování oceli S355J2 oproti oceli S355NL. Tento rozdíl je doprovázen i pouhým okem viditelnou vrstvou malých zrn na povrchu polotovaru z oceli S355NL (snímky X1 na obrázcích 28 a 39), tuto vrstvu na polotovarech z oceli S355J2 vlivem absence potřebných legujících prvků, tepelného zpracování a řízeného válcování nenajdeme. Vzorky J2_2 a NL_2 byly ofoceny stejným způsobem jako vzorky J2_1 a NL_1, avšak vzhledem k prakticky totožným zjištěním jsou uvedeny pouze formou přílohy (*příloha I snímky mikrostruktury J2_1, J2_2, NL_1, NL_2*)

6.3 Spektrální analýza

Spektrální analýza je rozbor chemického složení, tedy obsah jednotlivých prvků obsažených ve zkoumaném materiálu. V případě této bakalářské práce proběhla analýza na stolním jiskrovém optickém emisním spektrometru Q4 Tasman. Stroj je nejprve nutno zkalibrovat za pomoci kalibrů o určitém známém obsahu prvků. Kalibrace se skládá z několika "vyjiskření" kalibru a následném rozboru emise světla za pomoci čidel v ochranné atmosféře tvořené argonem. Po kalibraci stroje je nutnost minimálně 2 zkušebních měření, které slouží k ověření vhodného nastavení stroje. Po kalibraci a zkušebních měřeních byla provedena analýza vzorků. Měření bylo realizováno vždy ve dvou oblastech každého vzorku, po obvodu příčného řezu a v jeho středu. V obou případech bylo měření provedeno třikrát a aritmetický průměr je uveden v tabulce 23.

Tab. 17 Výsledky spektrální analýzy

S355J2 ø40 mm															
S355J2 ø40 mm	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	N	Mo	V	Ti	Nb	
	0.16	1.36	0.189	0.01	0.009	0.08	0.05	0.04	0.026	0.007	0.011	X	X	0.03	
S355J2 ø40 mm kraj	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	N	Mo	V	Ti	Nb	
	0.176	1.324	0.22	<0.005	<0.15	0.077	0.043	0.033	0.026	0.024	0.011	X	X	0.026	
S355J2 ø40 mm střed	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	N	Mo	V	Ti	Nb	
	0.171	1.326	0.215	<0.005	<0.15	0.076	0.042	0.031	0.025	0.021	<0.01	X	X	0.025	
S355NL ø40 mm															
S355NL ø40 mm	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	N	Mo	V	Ti	Nb	
	0.17	1.12	0.23	0.014	0.005	0.02	0.12	0.04	0.024	0.0051	0.011	0.017	0.0011	0.001	
S355NL ø40 mm kraj	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	N	Mo	V	Ti	Nb	
	0.181	1.098	0.245	0.0058	<0.15	0.021	0.111	0.027	0.023	<0.02	0.01	0.015	<0.001	<0.001	
S355NL ø40 mm střed	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	N	Mo	V	Ti	Nb	
	0.185	1.102	0.248	0.0057	<0.15	0.021	0.112	0.029	0.023	<0.02	<0.01	0.015	0.001	0.001	

Zpracovaná data se prakticky shodují s dodanými dokumenty kontroly, přičemž rozdíly v měření jsou zanedbatelné a byla tak potvrzena homogenita chemického složení vzhledem k průměru tyče.

Přestože je chemické složení homogenní po celém průřezu vzorku, to samé se nedá konstatovat o mechanických vlastnostech. Zatímco vzorky S355J2+AR nevykazují žádné anomálie, vzorky S355NL vykazují nehomogenní rozložení hodnot mikrotvrdosti v průřezu, viz kapitola 6.4.

Veškeré dokumenty z měření jsou zpracovány formou přílohy (*příloha VII spektrální analýza*).

6.4 Zkouška tvrdosti

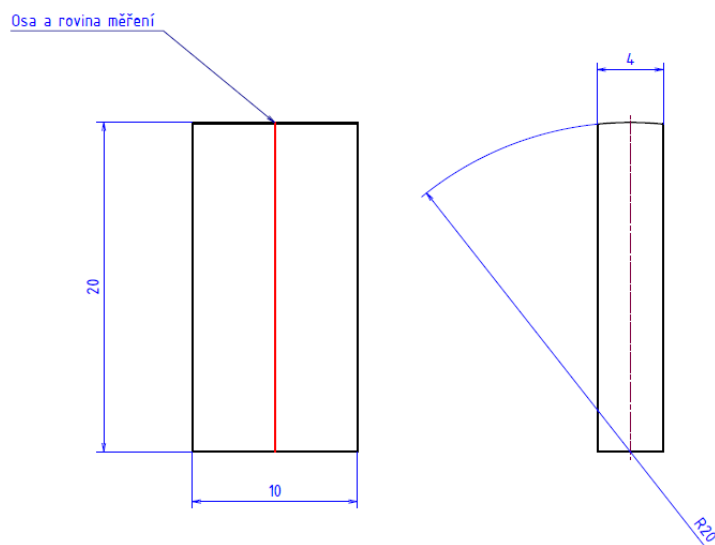
S ohledem na velikost a počet zkušebních vzorků, které byly pro experiment dostupné byla z mechanických vlastností ověřena pouze tvrdost. Abychom byli schopni rozlišit tvrdost v co nejlepším rozsahu a přesnosti v závislosti na zkoušené části polotovaru, bylo měření provedeno na mikrotvrdoměru. Bylo provedeno měření dle Vickerse, při kterém je indentorem čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° a zatěžující síla je 9,8 N při výdrži na tomto zatížení 10 s (tzn. HV1). Po provedení vtisku jsou změřeny úhlopříčky vtisku (v tab. 17 D1 a D2) a na základě tabulek je stanovena hodnota tvrdosti. Hodnoty tvrdosti byly měřeny na příčných řezech, a to v podélném i příčném směru, viz obr. 28.

Při tomto konkrétním měření byl použit mikrotvrdoměr firmy Buehlerindentamet 1000 (viz obrázek 30).

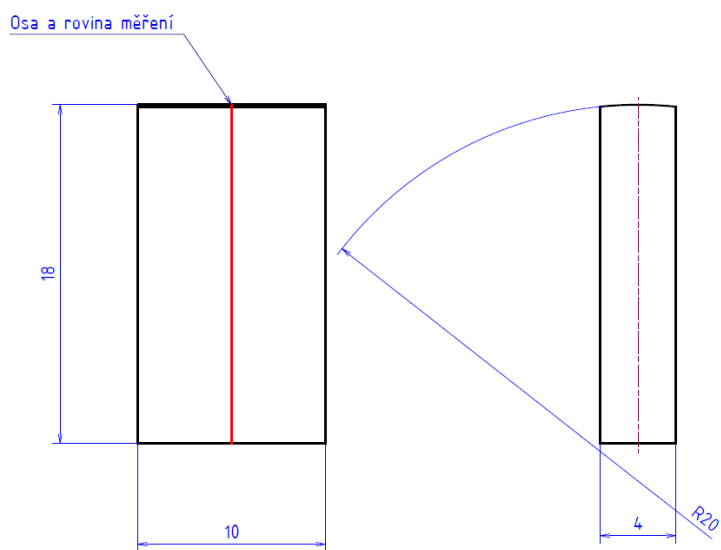


Obr. 30 Mikrotvrdoměr Buehlerindentamet 1000

Schéma umístění osy měření a její znázornění na zkušebních vzorcích je uvedeno na obrázcích 30 a 31. Tabulky měření jsou uvedeny formou přílohy (*příloha II tabulky tvrdost dle Vickerse J2_1, J2_2, NL_1, NL_2*).



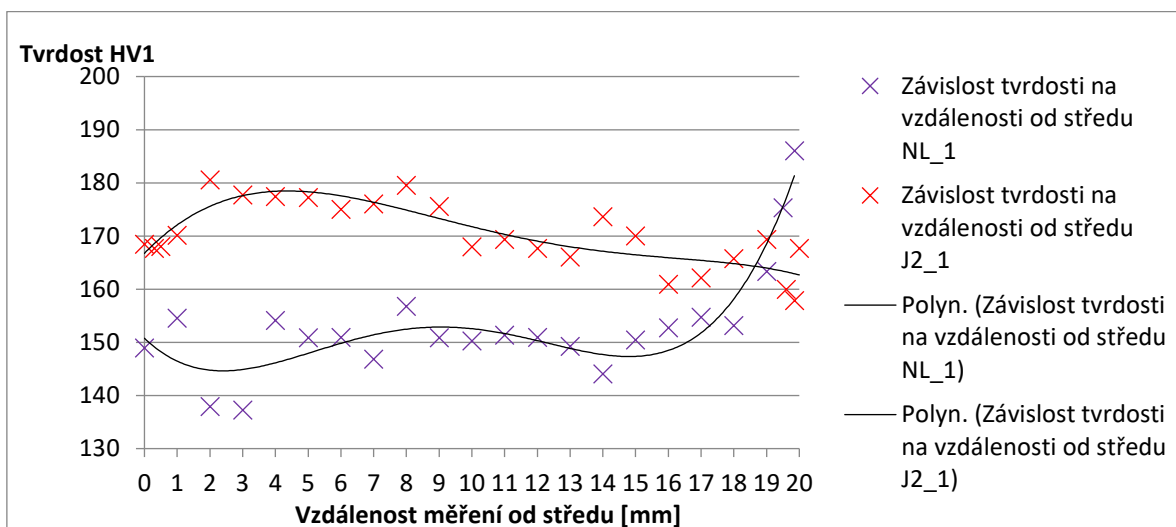
Obr. 31 Schéma umístění osy měření na vzorcích J2_1 a NL_1



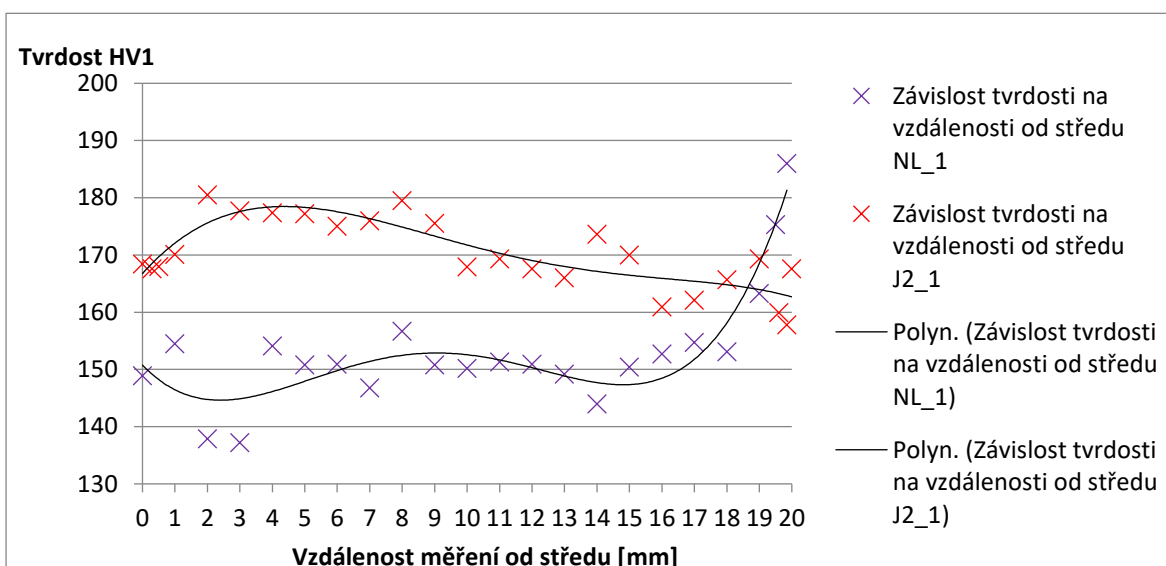
Obr. 32 Schéma umístění osy měření na vzorcích J2_2 a NL_2

Vyhodnocení výsledků měření tvrdosti

Po převedení dat do grafů a vytvoření rovnice trendu nám vychází odlišné vlastnosti obou ocelí.



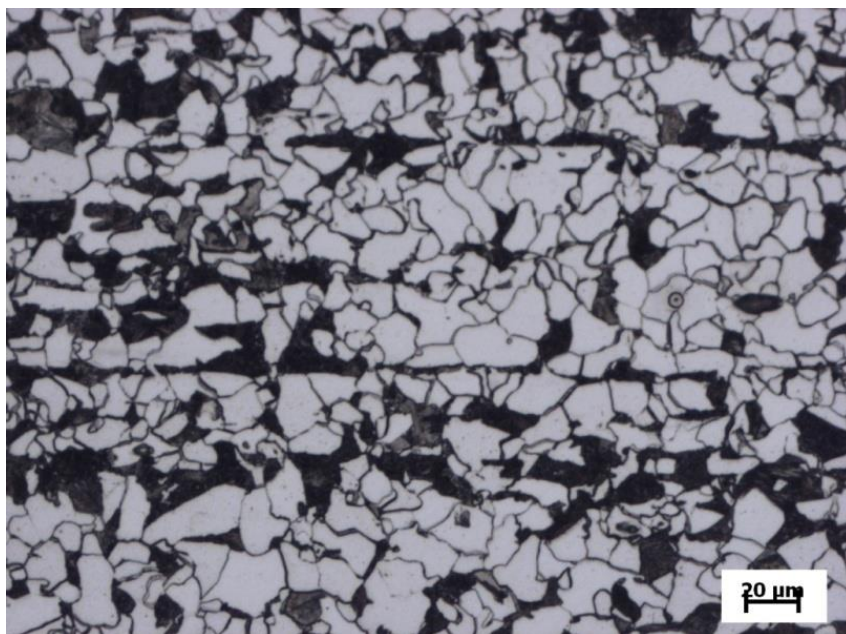
Obr. 33 Grafické znázornění hodnot tvrdosti v závislosti na vzdálenosti měření od středu polotovaru



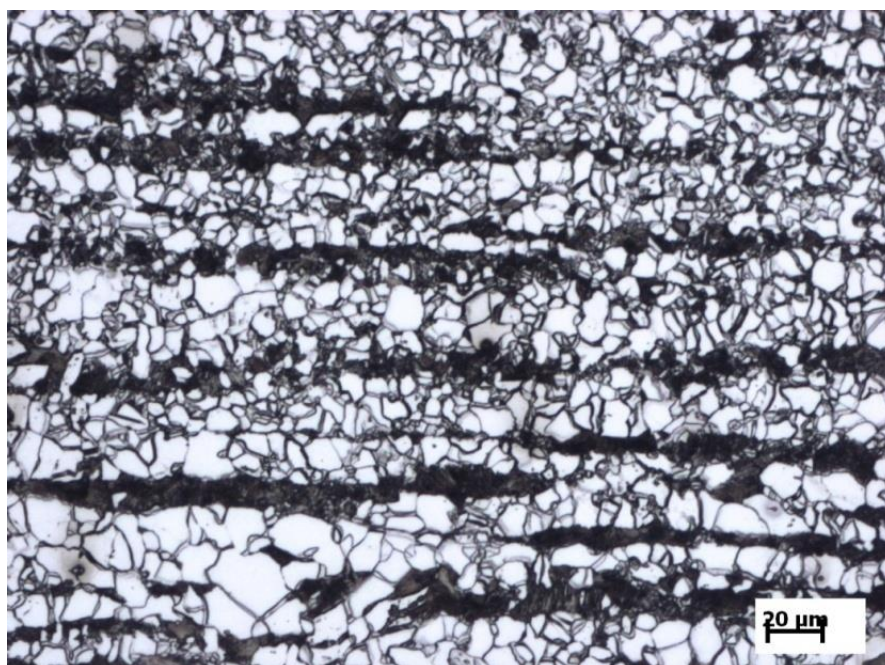
Obr. 34 Grafické znázornění hodnot tvrdosti v závislosti na vzdálenosti měření od středu polotovaru

Na grafech 34 a 35 je jasně viditelný rozdílný trend u obou ocelí. Ocel S355J2 má v případě vzorku J2_1 relativně konstantní vlastnosti po celém průřezu, zatímco ocel S355NL má v obou případech u kraje polotovaru velký nárůst tvrdosti. Zde je jasně zobrazena největší výhoda při aplikaci oceli S355NL, kterou je zachování houževnatosti jádra, a zároveň vysoká tvrdost povrchu.

Tento nárůst tvrdosti je způsoben jemnozrnnou strukturou nacházející se na povrchu polotovaru, která zasahuje cca 1 mm pod jeho povrch. Jemnozrnná vrstva je viditelná pouhým okem, avšak rozdílná velikost zrn je nejlépe viditelná na struktuře vzorku. Mikrostruktura je viditelná na obrázcích 36a 37 a ze snímků je dále patrna řádkovitost oceli. Tmavé řádky ve struktuře jsou tvořeny perlitem (světlá zrna = ferit) a válcováním tyče daným směrem.

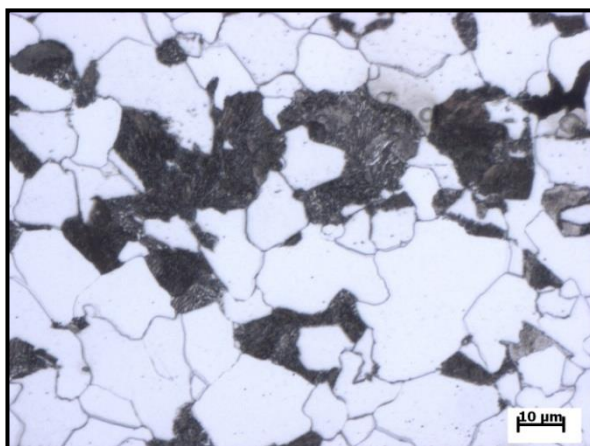


Obr. 36 Fotka mikrostruktury vzorku J2_1 při zvětšení 200x

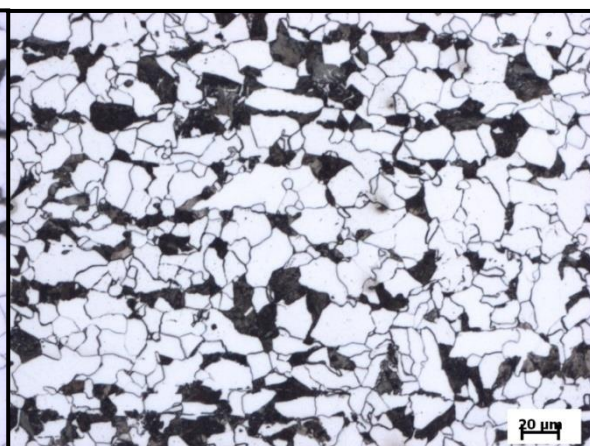


Obr. 35 Fotka mikrostruktury vzorku NL_1 při zvětšení 200x

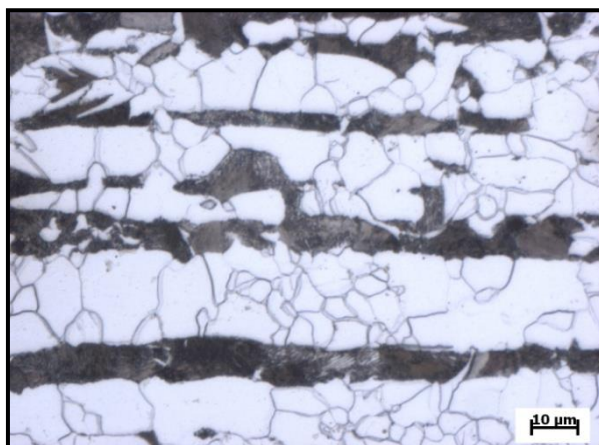
Vzorky J2_2 a NL_2 potvrzují výsledky předchozího měření. Stejně jako v případě vzorku NL_1 tak i vzorek NL_2 dosahuje silného nárůstu tvrdosti na okraji polotovaru. Rozdílná velikost zrn je viditelná na obrázcích 37, 38, 39, 40. Zvýšení tvrdosti ve středu vzorku J2_2 a J2_1 a její následné klesání může být způsobeno buď náhodným měřením pevnějších částic nebo větším obsahem perlitu a jeho širším rozprostřením pro matrici struktury viz obrázek 39 a 40.



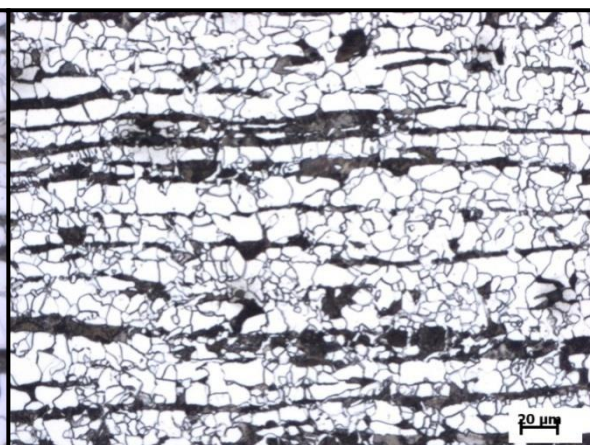
Obr. 40 Fotka mikrostruktury vzorku J2_2 při zvětšení 500x



Obr. 39 Fotka mikrostruktury vzorku J2_2 při zvětšení 200x



Obr. 38 Fotka mikrostruktury vzorku NL_2 při zvětšení 500x



Obr. 37 Fotka mikrostruktury vzorku NL_2 při zvětšení 200x

6.5 Příprava vzorků svarového spoje

V případě tvorby podmíněně svařitelného spoje je vhodné vypočítat základní hodnoty ukazatelů svařitelnosti a dodržet doporučené postupy tak, aby vytvořené svarové spoje byly vyhovující. Následující kapitola se bude věnovat návrhu vhodného svarového postupu.

Výpočet vhodných podmínek pro ocel S355J2 + AR

Stanovení uhlíkového ekvivalentu

$$CET = C + \frac{(Mn + Mo)}{10} + \frac{(Cr + Cu)}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (6.4)$$

$$CET = 0,16 + \frac{(1,36 + 0,011)}{10} + \frac{(0,05 + 0,08)}{20} + \frac{0,04}{40}$$

$$Cet = 0,3046$$

Limitní hodnota CET pro ocel S355J2 je 0,22. Na základě výpočtu hodnoty uhlíkového ekvivalentu je tedy doporučeno užití předehřevu.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (6.5)$$

$$CEV = 0,16 + \frac{1,36}{6} + \frac{0,05 + 0,011}{5} + \frac{0,04 + 0,08}{15}$$

$$CEV = 0,41$$

Limitní hodnota CEV je 0,47. Na základě výpočtu CEV není nutnost aplikace předehřevu.

Výpočet teploty předehřevu

$$Tp = 350 \cdot \sqrt{Cp - 0,25} \quad (6.6)$$

$$Cp = Cc + Cs \quad (6.7)$$

$$Cc = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \quad (6.8)$$

$$Cs = 0,005 \cdot s \cdot Cc \quad (6.9)$$

$$Cc = \frac{360 \cdot 0,16 + 40 \cdot (1,36 + 0,05) + 20 \cdot 0,04 + 28 \cdot 0,011}{360}$$

$$C_c = 0,320$$

$$C_s = 0,005 \cdot 40 \cdot 0,320$$

$$C_s = 0,064$$

$$C_p = 0,320 + 0,064$$

$$C_p = 0,384$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{0,384 - 0,25}$$

$$T_p = 128,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ověření k náchylnosti k praskání za tepla

$$U.C.S = 230 \cdot C + 190 \cdot S + 75 \cdot P + 45 \cdot Nb + 40 \cdot Ni + 12 \cdot Si + 5,4 \cdot Mn - 1 \quad (7)$$

$$U.C.S = 230 \cdot 0,16 + 190 \cdot 0,009 + 75 \cdot 0,01 + 40 \cdot 0,04 + 12 \cdot 0,189 + 5,4 \cdot 1,36 - 1$$

$$U.C.S = 48,032$$

$$H.C.S = \frac{C \cdot (S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100}) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V} \quad (7.1)$$

$$H.C.S = \frac{0,16 \cdot (0,009 + 0,01 + \frac{0,189}{25} + \frac{0,04}{100}) \cdot 10^3}{3 \cdot 1,36 + 0,05 + 0,011}$$

$$H.C.S = 0,9099$$

V případě, že je hodnota U.C.S větší než 30, je nutno stanovit teplotu interpass a dobu ochlazování. Ukazatel H.C.S nepřekračuje mezní hodnotu pro nízkoalokované oceli (1,6) čili není nutno stanovit teplotu interpass a dobu ochlazování.

Stanovení teploty interpass a doby ochlazení

Tyto hodnoty byly stanoveny na základě publikace [16] a konzultace s vedoucím práce.

$$T_i = 200^\circ\text{C}$$

$$t_{8/5} = 10$$

Výpočet vhodných podmínek pro ocel S355NL

Hodnoty obsahů legujících prvků do výpočtů jsou dosazeny z dokumentů kontroly dodaných zadavatelem, v bakalářské práci jsou uvedené formou přílohy (*příloha III Dokumenty kontroly*).

Výpočet uhlíkového ekvivalentu

Uhlíkový ekvivalent udává náchylnost materiálu k tvorbě trhlin za studena. V kapitole 3.4 a 3.5 jsou uvedeny důvody pro stanovení mezních hodnot, které musí materiál splňovat.

$$CET = C + \frac{(Mn + Mo)}{10} + \frac{(Cr + Cu)}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (6.4)$$

$$CET = 0,17 + \frac{(1,12 + 0,011)}{10} + \frac{(0,12 + 0,02)}{20} + \frac{0,04}{40}$$

$$CET = 0,2911$$

Limitní hodnota CET pro ocel S355NL je 0,22. Na základě výpočtu hodnoty uhlíkového ekvivalentu je tedy doporučeno užití předehřevu.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (6.5)$$

$$CEV = 0,17 + \frac{1,12}{6} + \frac{0,12 + 0,011 + 0,017}{5} + \frac{0,04 + 0,02}{15}$$

$$CEV = 0,41$$

Limitní hodnota CEV je 0,43. Na základě výpočtu CEV není nutnost aplikace předehřevu.

Výpočet teploty předehřevu

Teplota předehřevu snižuje teplotní rozdíl před a po tvorbě svaru, v místě spoje, a jeho přímém okolí, zpomaluje ochlazování a snižuje tak pnutí ve spoji. Pro výpočet teploty předehřevu byl použit základní (obecný) vztah podle Seferiána:

$$Tp = 350 \cdot \sqrt{Cp - 0,25} \quad (6.6)$$

$$Cp = Cc + Cs \quad (6.7)$$

$$Cc = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \quad (6.8)$$

$$C_s = 0,005 \cdot s \cdot C_c \quad (6.9)$$

$$C_c = \frac{360 \cdot 0,17 + 40 \cdot (1,12 + 0,12) + 20 \cdot 0,04 + 28 \cdot 0,011}{360}$$

$$C_c = 0,311$$

$$C_s = 0,005 \cdot 40 \cdot 0,311$$

$$C_s = 0,0622$$

$$C_p = 0,311 + 0,0622$$

$$C_p = 0,3732$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{0,3732 - 0,25}$$

$$T_p = 122,85^\circ\text{C}$$

Ověření k náchylnosti k vzniku trhlin za tepla

Náchylnost na vznik trhlin za tepla lze posoudit různými způsoby. Např. lze vypočítat parametry praskavosti U.C.S. (podle EN 1011) a H.C.S

$$UCS = 230 \cdot C + 190 \cdot S + 75 \cdot P + 45 \cdot Nb + 40 \cdot Ni + 12 \cdot Si + 5,4 \cdot Mn - 1 \quad (7)$$

$$UCS = 230 \cdot 0,17 + 190 \cdot 0,005 + 75 \cdot 0,014 + 45 \cdot 0,001 + 40 \cdot 0,04 + 12 \cdot 0,23 + 5,4 \cdot 1,12 - 1$$

$$UCS = 50,553$$

$$H.C.S = \frac{C \cdot (S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100}) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V} \quad (7.1)$$

$$H.C.S = \frac{0,17 \cdot (0,005 + 0,014 + \frac{0,23}{25} + \frac{0,04}{100}) \cdot 10^3}{3 \cdot 1,12 + 0,12 + 0,011 + 0,017}$$

$$H.C.S = 1,386$$

V případě, že je hodnota U.C.S. větší než 30, je nutno stanovit teplotu interpass a dobu ochlazování. Ukazatel H.C.S. nepřekračuje mezní hodnotu pro nízkoalokované oceli (1,6), čili není nutno stanovit teplotu interpass a dobu ochlazování. Ověření správnosti výpočtu a svařovacích parametrů proběhne výpočtem doby ochlazování $t_{8/5}$.

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot T_0) \cdot Q \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \cdot F_3 \quad (7.2)$$

Stanovení teploty interpass a doby ochlazení

Teplota interpass udává horní hranici teploty, která nesmí být překročena mezi jednotlivými vrstvami svaru. Doba ochlazování udává čas, během kterého musí být vzorku umožněno vychladnout z teploty 800°C na teplotu 500°C.

Tyto hodnoty byly stanoveny na základě publikace [16] a konzultace s vedoucím práce.

$$T_i = 200^\circ\text{C}$$

$$t_{8/5} = 10 \text{ s}$$

Na základě výpočtů vycházejících z obecných předpokladů pro svařování jemnozrnných ocelí a konzultace s vedoucím práce byly zvoleny následující parametry svařování aplikované u obou druhů materiálu.

Tab. 18 Tabulka stanovených hodnot pro tvorbu svarových spojů

Teplota předehřevu	125°C
Teplota interpass	200°C
Doba ochlazení $t_{8/5}$	10 s

Návrh svarových spojů

Pro experiment byly vybrány následující druhy svarových spojů:

- Oboustranný tupý V svar
- T-spoj s plným průvarem (oboustranný tupý ½ V svar)
- T-spoj s koutovým svarem

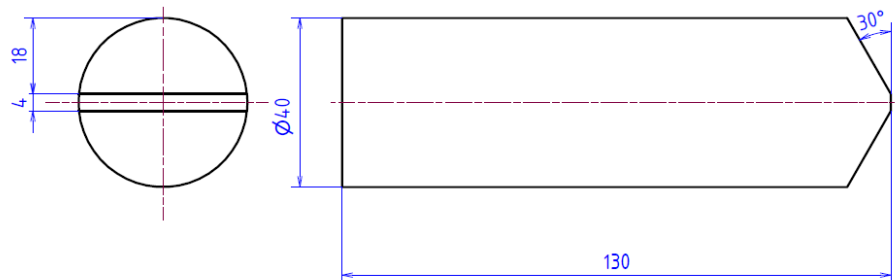
T-spoje byly přivařeny k desce o tloušťce 10 mm, z materiálu S355J2.

Úprava svarových ploch

Navržení svarových ploch bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN ISO 9692 a svary byly provedeny tak, aby odpovídaly normě ČSN EN ISO 15613 (v maximálním možném přiblížení normě, ovšem byla nutnost zkrátit délku zkušebních vzorků vzhledem k nedostatku materiálu).

Oboustranný tupý V svar

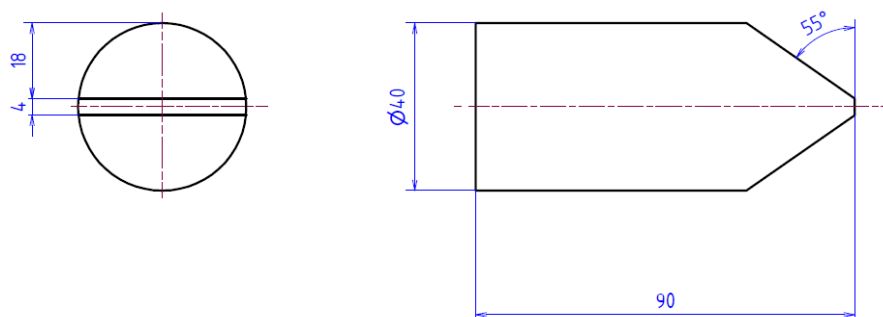
Tyto vzorky byly vytvořeny jeden od každé jakosti materiálu, podle nákresu na obr. 41.



Obr. 41 Skica svařovaného vzorku pro V svar

T-spoj s plným průvarem (oboustranný tupý $\frac{1}{2}$ V svar)

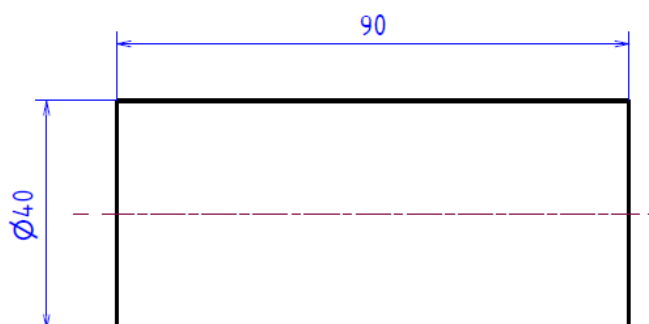
Tento vzorek byl vytvořen jeden pro každý druh materiálu, podle nákresu na obr. 42.



Obr. 42 Skica svařovaného vzorku pro tupý $\frac{1}{2}$ V svar

T-spoj s koutovým svarem

Tento vzorek byl vytvořen jeden pro každý druh materiálu, podle nákresu na obr. 43.

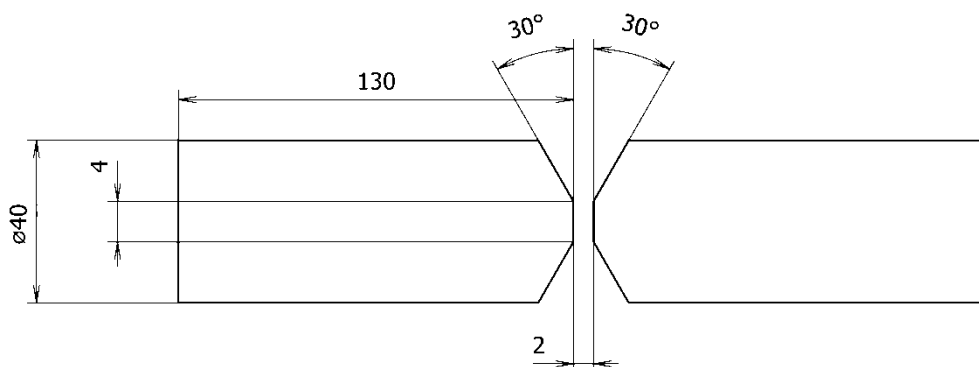


Obr. 43 Skica svařovaného vzorku pro tupý svar

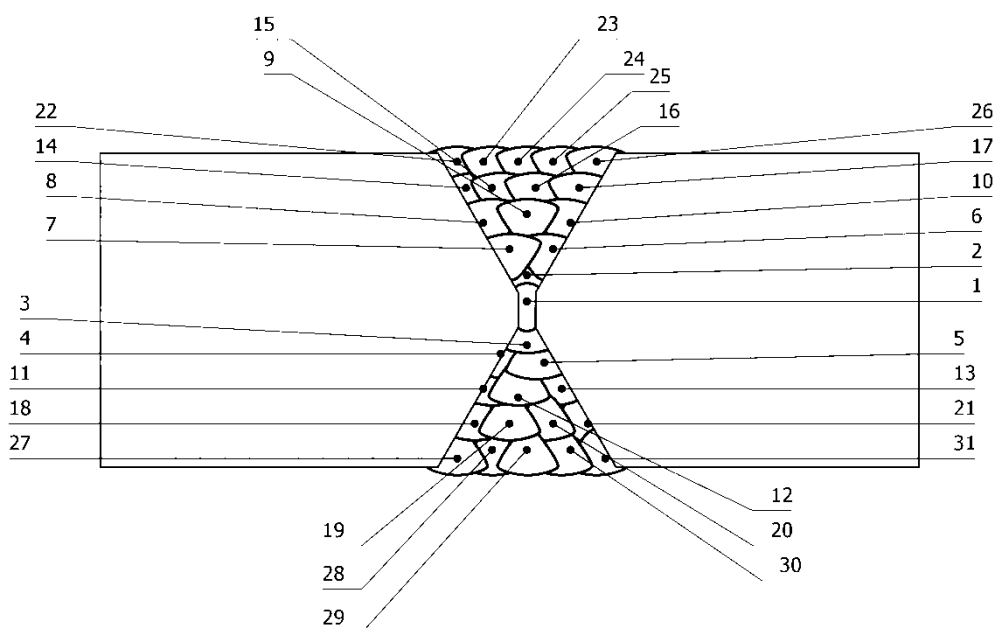
Provedení svarových spojů

Veškeré svary byly provedeny na zařízení EWM Phoenix Puls 405. Jako přídavný materiál (PM) byl použit svařovací drát OK AUTOROD 12.51 Ø1 mm. uvedený v práci ve formě přílohy (příloha IV materiálový list přídavného materiálu). Ochranou atmosféru zajistila směs plynů skládající se z 18 % CO₂ a 82 % Ar. V průběhu svařování byla kontrolována teplota mezi jednotlivými housenkami teploměrem digitální teploměr GTH 1160 s kontaktním termočlánkem NiCr-Ni s přesností $\pm 0,3 \% + 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Veškeré hodnoty z průběhu svařování byly zaznamenány a jsou uvedeny formou přílohy (*příloha V tabulky hodnot svařování*) v práci jsou uvedeny pouze části tabulek z důvodu příliš velkého obsahu. Svařovací procesy byly pro vzorky, které byly mezi sebou porovnány vždy totožné, viz příloha VI.

Návrh oboustranného V svaru



Obr. 45 Schéma uspořádání jednotlivých vrstev a housenek blíže popsaných tabulkami č.16 a 17 s přílohou V



Obr. 44 Skica uspořádání vzorků před tvorbou spoje



Obr. 46 Upnutí vzorků do přípravku před provedením svaru

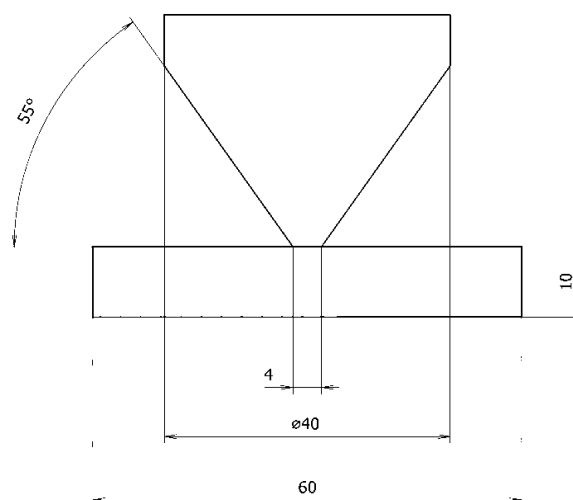
Hodnoty svařovacích procesů u oboustranných V svarů

Kořen svaru u vzorků oboustranných V svarů se skládá ze tří housenek, přičemž každá je vytvořena při proudu o 150 A a napětí 19,9 V s rychlostí svařování cca 4,1 mm/s. Výplň svaru se skládá z dalších 28 housenek vytvořených při proudu 192 A, napětí 22,3 V s rychlostí svařování cca 4,1 mm/s. Při tvorbě kořenové vrstvy je na jednu housenku do materiálu vneseno 0,583 kJ/mm tepla a při tvorbě výplňové housenky je to materiálu vneseno 0,835 kJ/mm tepla. Hodnoty tvorby svarů jsou zaznamenány formou přílohy (příloha V tabulky hodnot svařování) a správnost jejich nastavení ověřena výpočtem $t_{8/5}$.

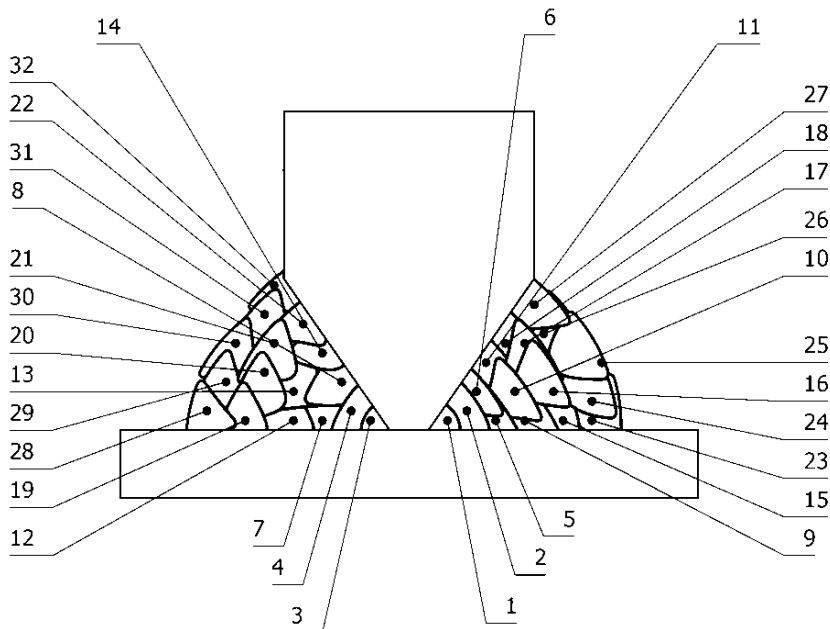
$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot 130) \cdot 0,58 \cdot \left(\frac{1}{500 - 130} - \frac{1}{800 - 130} \right) \cdot 0,9 \quad (7.2)$$

$$t_{8/5} = 3,82 \text{ s}$$

Návrh T spoje s plným průvarem



Obr. 47 Skica uspořádání vzorků před tvorbou spoje



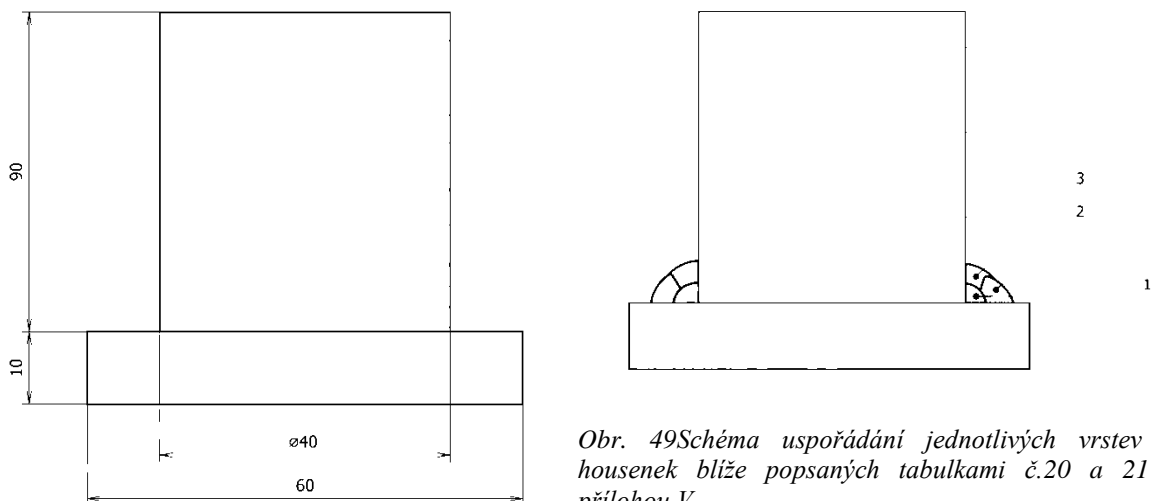
Obr. 48 Schéma uspořádání jednotlivých vrstev a housenek blíže popsaných tabulkami č.18a 19 s přílohou V

Kořen svaru u vzorků T svarů s plným průvarem se skládá ze čtyř housenek, přičemž každá je vytvořena při proudu o 150 A a napětí 19,3 V s rychlostí svařování cca 4,1 mm/s. Výplň svaru se skládá z dalších 27 housenek vytvořených při proudu 150 A, napětí 19,3 V s rychlostí svařování cca 4,1 mm/s. Při tvorbě jedné housenky je do materiálu vneseno 0,565 kJ/mm tepla. Hodnoty tvorby svarů jsou zaznamenány formou přílohy (příloha V tabulky hodnot svařování).

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot 130) \cdot 0,56 \cdot \left(\frac{1}{500 - 130} - \frac{1}{800 - 130} \right) \cdot 0,9 \quad (7.2)$$

$$t_{8/5} = 3,69 \text{ s}$$

Návrh T-spoje s koutovým svarem



Obr. 50 Skica uspořádání vzorků před tvorbou spoje

Obr. 49 Schéma uspořádání jednotlivých vrstev a housenek blíže popsaných tabulkami č.20 a 21 s přílohou V.

Hodnoty svařovacích procesů u tupých svarů

Kořen svaru u vzorků s koutovým T svarem se skládá z jedné housenky, přičemž každá je vytvořena při proudu o 150 A a napětí 19,3 V s rychlostí svařování cca 4,1 mm/s. Krycí vrstva svaru se skládá z dalších 2 housenek vytvořených při proudu 150 A, napětí 19,3V s rychlostí svařování cca 4,1 mm/s. Při tvorbě jedné housenky je do materiálu vneseno 0,565 kJ/mm tepla. Hodnoty tvorby svarů jsou zaznamenány formou přílohy (*příloha V tabulky hodnot svařování*).

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot 130) \cdot 0,56 \cdot \left(\frac{1}{500 - 130} - \frac{1}{800 - 130} \right) \cdot 0,9 \quad (7.2)$$

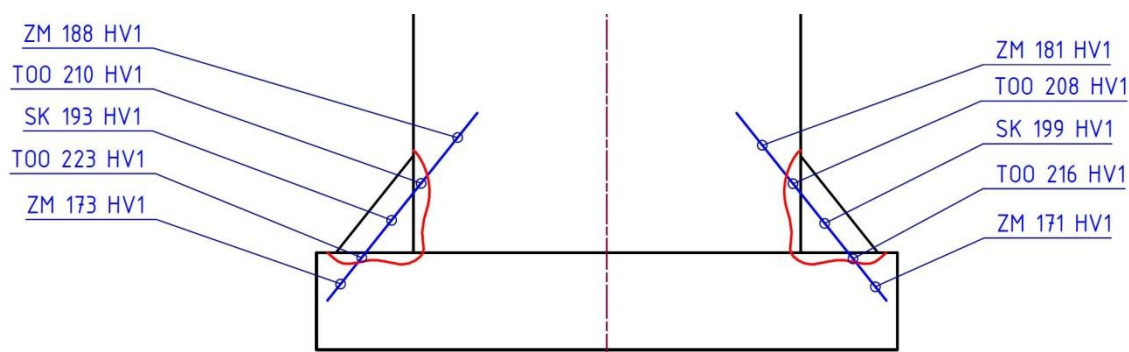
$$t_{8/5} = 3,69 \text{ s}$$

Ve všech případech provedených svarů je navržený čas $t_{8/5}$ (10s) dostatečný.

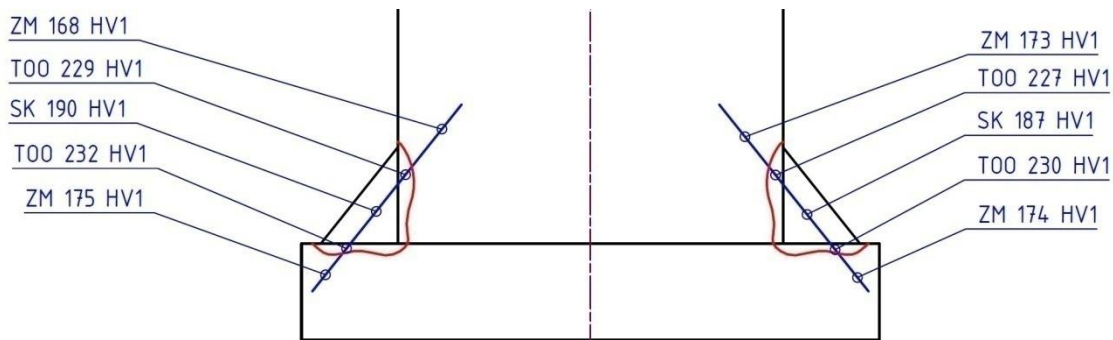
6.6 Vyhodnocení zkoušek tvrdosti na svařených vzorcích

V rámci zjištění a srovnání mechanických vlastností oceli S355J2 + AR a S355NL po svařování byla provedena zkouška tvrdosti v souladu s ČSN EN ISO 9015-2. Na každém bodě, ke kterému je označena tvrdost na obrázcích (obr. 51,52, 53, 54,55,56), byly provedeny tři vpichy a jejich aritmetický průměr je uveden na obrázcích. Body uvedené v obrázcích reprezentují jednotlivé oblasti svarového spoje (ZM = základní materiál, TOO = tepelně ovlivněná oblast, SK = svarový kov). Tabulky se zaznamenanými hodnotami jsou k dispozici ve formě přílohy (*příloha VI tabulky hodnot tvrdostí svařenců*).

Srovnání hodnot tvrdostí T spojů s koutovým svarem



Obr. 51 Grafické zobrazení rozložení hodnot mikrotvrdosti na vzorku S355J2_1



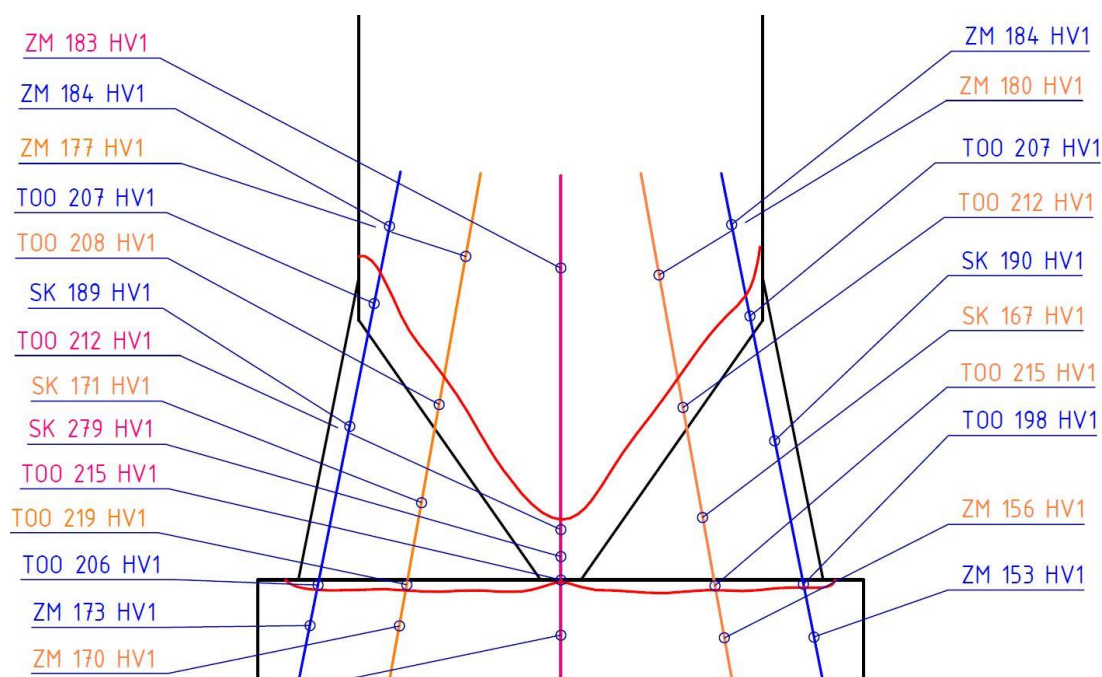
Obr. 52 Grafické zobrazení rozložení hodnot mikrotvrlosti na vzorku S355NL_1

T spoj s koutovým svarem dosahuje nejvyšších hodnot mikrotvrlosti v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) 207 až 223 HV1 (vyšší hodnoty se nacházejí mezi svarem a pásnicí a nižší hodnoty z tohoto intervalu mezi zkoumanou tyčí a svarem - viz obrázky 51 a 52). Naměřené hodnoty mikrotvrlosti u základního materiálu se pohybují v rozsahu 182 až 188 HV1, což odpovídá průměrným hodnotám naměřených a popsáných v kapitole 6.3. (Hodnoty mikrotvrlosti druhého základního materiálu z oceli S355J2 byly v rozsahu 172 až 174). Hodnoty mikrotvrlosti svarového kovu byly naměřeny v rozsahu 193 až 198 HV1. Z hlediska symetrie spoje se hodnoty liší max. o 7 HV1.

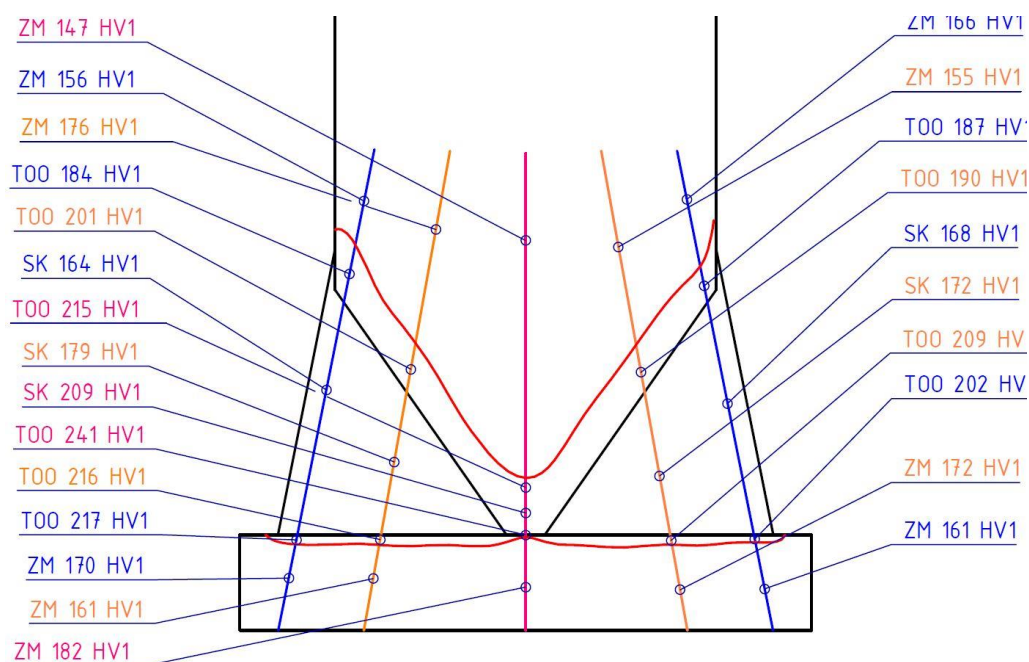
Pro stejný typ svaru, pro tyč z materiálu S355NL, vychází rozložení hodnot mikrotvrlosti stejným způsobem (z hlediska symetrie jsou rozdíly ještě menší – max. do 5 HV1). Hodnoty mikrotvrlosti tyče jsou však nižší u materiálu s jakostí NL než u materiálu J2 (cca o 10 HV1), zatímco hodnoty mikrotvrlosti v tepelně ovlivněné oblasti na straně tyče, jsou o cca 10 HV1 větší. Nepatrně vyšší jsou i hodnoty mikrotvrlosti v základním materiálu pásnice (o max. 3 HV1) i v druhé tepelně ovlivněné oblasti (cca max. 8 HV1). Mikrotvrdot svarového kovu je naopak o 3 až 11 HV1 vyšší.

U materiálu s jakostí S355NL došlo tedy k větším změnám tvrdosti v TOO, jak z hlediska rozdílů hodnot mikrotvrlosti mezi jednotlivými oblastmi svarového spoje, tak i z hlediska maximální naměřené hodnoty mikrotvrlosti. Ovšem i tak jsou všechny hodnoty hluboko pod přípustnou hodnotou z hlediska kvalifikace svarových spojů (320 až 350 HV – viz ČSN EN ISO 15614), takže z tohoto pohledu je tvrdost svarových spojů naprosto vyhovující v obou případech.

Srovnání hodnot tvrdostí T spojů provedených na tupo - s plným průvarem



Obr. 54 Grafické zobrazení rozložení hodnot mikrotvrdosti na vzorku S355J2_2



Obr. 53 Grafické zobrazení rozložení hodnot mikrotvrdosti na vzorku S355NL_2

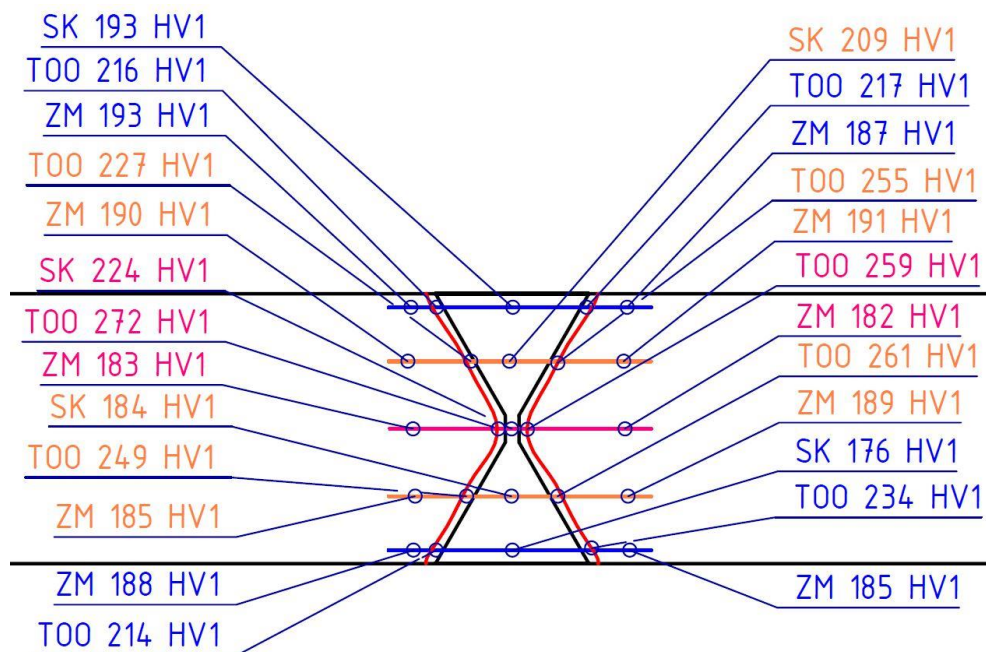
U T spoje provedeného na tupo s plným průvarem (pro vzorek s tyčí z materiálu S355J2) byla naměřena maximální mikrotvrdost v celém spoji ve svarovém kovu kořenové vrstvy (a to o průměrné hodnotě 278 HV1), mikrotvrdost svarového kovu výplňových vrstev poté klesla na rozsah 167 až 171 HV1 a v krycí vrstvě stoupla na hodnoty 189 až 190 HV1. Mikrotvrdost v tepelně ovlivněné oblasti měla následující průběh: v kořenové vrstvě měla hodnoty 212 až 215 HV1, v krycích vrstevkách se hodnoty příliš neměnily (208 až 212 HV1 resp. 215 až 219 HV1) v krycí vrstvě hodnoty klesly (na 207 HV1 resp. 198 až 206 HV1).

Hodnoty tvrdosti základního materiálu stojiny (tyče) byly naměřeny v rozsahu 177 až 184 HV1 a pásnice 153 až 173 HV1.

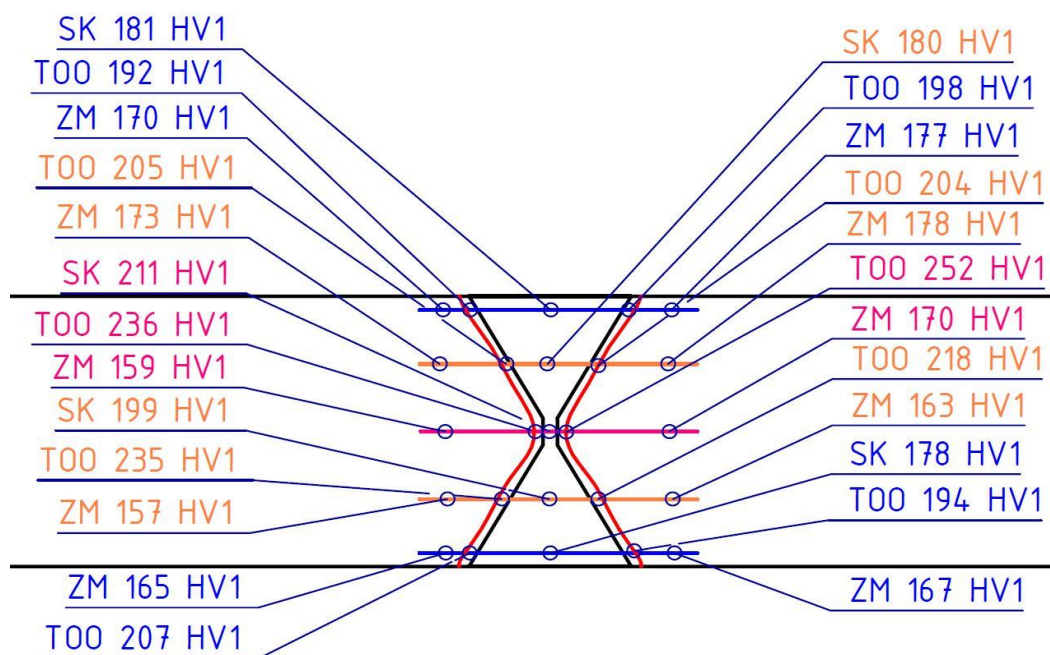
U stejného typu spoje s tyčí z materiálu S355NL je celkové maximální ovlivnění nižší. Největší nárůst mikrotvrdosti byl naměřen v tepelně ovlivněné oblasti kořenové vrstvy, na straně pásnice, a to o hodnotě 240 HV1. Hodnoty mikrotvrdosti svarového kovu byly naměřeny: v kořenové vrstvě – 209 HV1, ve výplňových vrstvách došlo ke snížení na rozsah mikrotvrdostí 179 až 172 HV1 a v krycí vrstvě 164 až 168 HV1. Mikrotvrdosti tepelně ovlivněných oblastí dosáhly lokálně nejvyšších hodnot, a to v kořenové vrstvě – 215 resp. již zmíněných 240 HV1, v krycích vrstvách klesly hodnoty na 201 až 190 HV1, resp. 215 až 209 HV1 a v krycí vrstvě na 184 až 187 HV1, resp. 217 až 202 HV1. Hodnoty tvrdosti základního materiálu stojiny (tyče) byly naměřeny v rozsahu 147 až 176 HV1 a pásnice 161 až 182 HV1.

U materiálu s jakostí S355J2 bylo dosaženo i maximální naměřené hodnoty mikrotvrdosti – 278 HV1, došlo zde i k velké skokové změně mikrotvrdosti mezi jednotlivými oblastmi svarového spoje (konkrétně mezi svarovým kovem a tepelně ovlivněnou oblastí v kořenové vrstvě, a to o hodnotu 66 HV1). Nicméně v dalších vrstvách se skokové rozdíly postupně snižovaly na max. + 48 HV1 ve výplňové vrstvě a max. + 17HV1 v krycí vrstvě. (Kromě kořenové vrstvy byly naměřeny u tohoto materiálu maximální skokové změny mezi jednotlivými oblastmi mezi TOO a ZM pásnice, a to ve výplňové vrstvě max. 59 HV1 a v krycí vrstvě max. 45 HV1). U jakosti S355NL byla naměřena maximální hodnota mikrotvrdosti také v TOO, a to o velikosti 240 HV1, maximální skoková změna mezi jednotlivými oblastmi byla v kořenové vrstvě mezi TOO a ZM pásnice (s hodnotou 58 HV1), ve výplňových vrstvách max. 54 HV1 a v krycí vrstvě max. 47 HV1. V krycí vrstvě však byla největší změna mikrotvrdosti mezi SK a TOO na straně pásnice, a to 53 HV1 (skokové rozdíly v mikrotvrdosti mezi SK a TOO: v kořenové vrstvě + 31HV1, ve výplňových vrstvách s rozdílem max. + 37 HV1).

Srovnání hodnot tupého spoje s oboustranným V svarem



Obr. 55 Grafické zobrazení rozložení hodnot mikrotvrdosti na vzorku S355J2_3



Obr. 56 Grafické zobrazení rozložení hodnot mikrotvrdosti na vzorku S355NL_3

U tupého spoje tyčí v obou případech dosahuje mikrotvrdost nejvyšších hodnot v TOO kořene svaru. Pro jakost oceli S355J2 dosahuje tato hodnota 272 HV1, zatímco pro jakost S355NL 252 HV1. Druhá nejvyšší hodnota tvrdosti ve vrstvách mimo kořen svaru se nachází v TOO první části krycí vrstvy. Pro jakost S355J2 se tato hodnota ustálila na průměru 261HV1 a pro jakost S355NL 235HV1. Z obrázků 55 a 56 je celkem jasný znovu se opakující trend hodnoty vyšší tvrdosti u jakosti S355J2, a to v průměru cca o 20HV1.

tento rozdíl je dobře graficky viditelný na obrázku 57. Hodnoty mikrotvrdości postupně klesají napříč všemi oblastmi svaru, se vzrůstající vzdáleností od středu.

Zatímco v kořeni svaru dosahovala hodnota tvrdosti u jakosti S355J2 272HV1, tak na krycí vrstvě (měření proběhlo 2 mm pod povrchem polotovaru) dosahuje tvrdost už "pouhých" 234. Ve vzdálenosti 18 mm od středu polotovaru dosahuje tedy spoj k rozptylu tvrdosti až o 38HV1. Ocel jakosti S355NL následuje tentýž vzorec pouze s tím rozdílem, že dosahuje obecně nižších hodnot. Zatímco TOO v kořenové vrstvě dosahovala hodnot 252HV1, tak povrchová vrstva má průměrnou hodnotu měření 207HV1. Dosahuje tedy ještě většího rozptylu vlastností než jakost S355J2, a to o celých 45HV1.

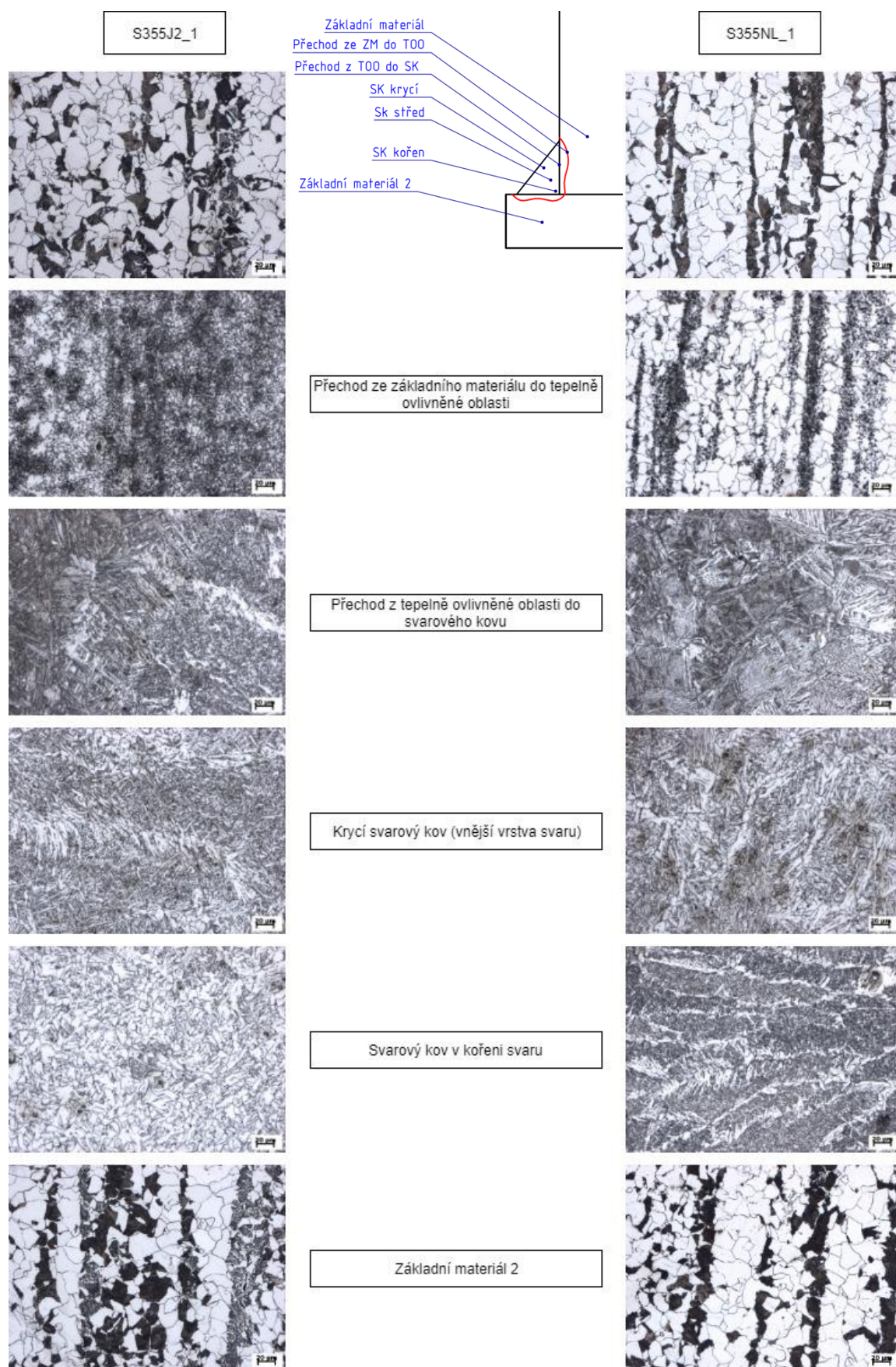
Graf na obrázku 57 zobrazuje hodnoty naměřené v kořenové vrstvě svaru obou vzorků. Zde je trend vyšší tvrdosti podstatně viditelnější. Největších rozdílů dosahují vzorky v oblasti TOO která je vzdálena od středu svaru zhruba 3 mm. Zde rozdíl dosahuje až 35HV1 a obecně nenastává případ, ve kterém by ocel jakosti S355NL v kořenové vrstvě tvrdostí přesáhla hodnoty naměřené u vzorku jakosti S355J2.



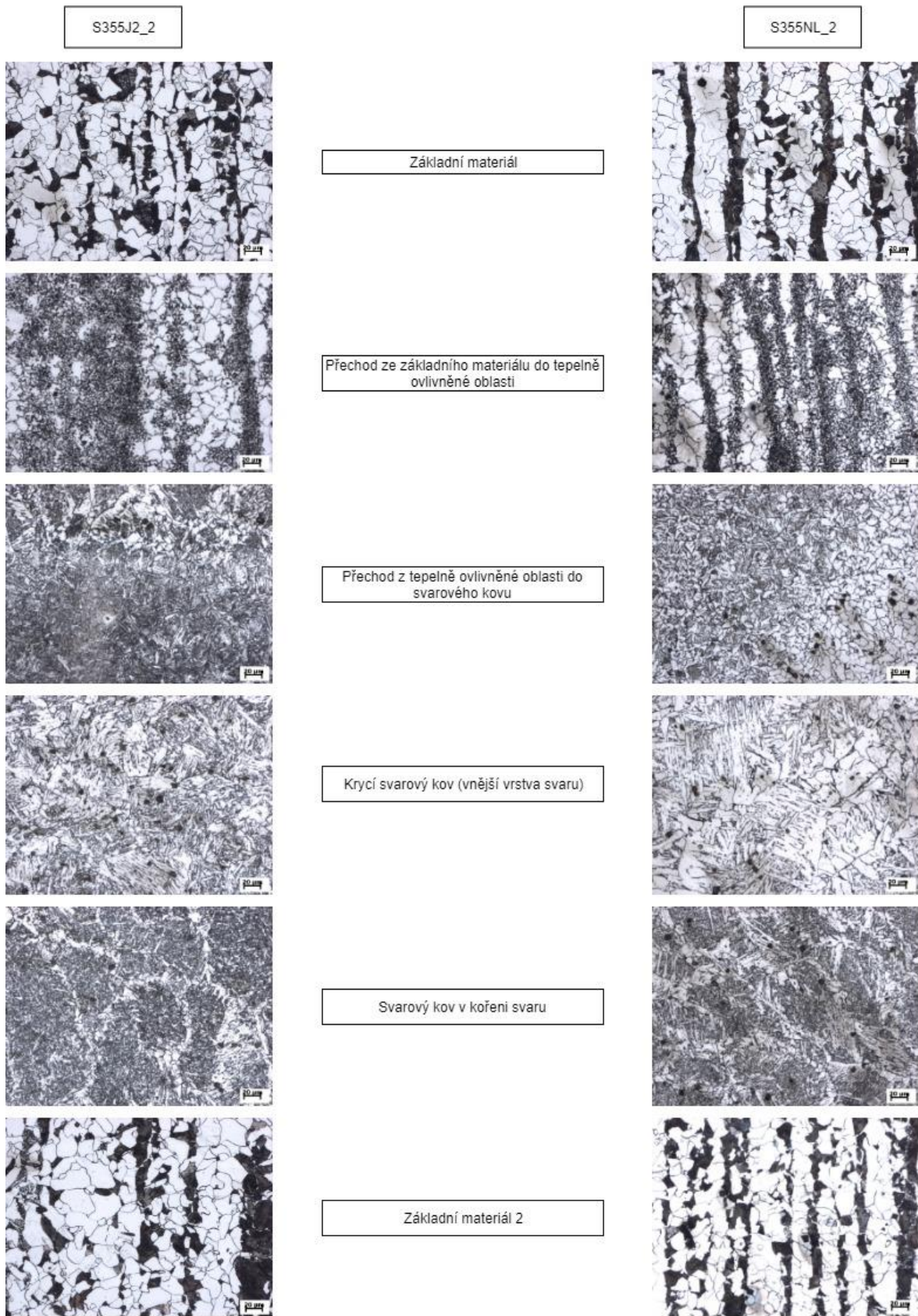
Obr. 57 Grafické znázornění rozložení hodnot mikrotvrdości – pro kořenovou oblast spoje

Opět se však potvrzuje, že v obou případech dosahují hodnoty tvrdosti hluboko pod stanovený limit z hlediska kvalifikace svarových spojů (320 až 350HV1). Svarové spoje jsou tedy z hlediska tvrdosti vyhovující.

6.7 Vyhodnocení mikroskopických a makroskopických fotografií struktury a tepelné ovlivněné zóny

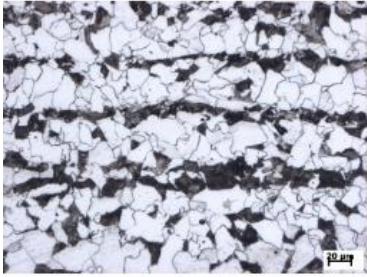


Obr. 58 Porovnání struktur vzorků koutového svaru

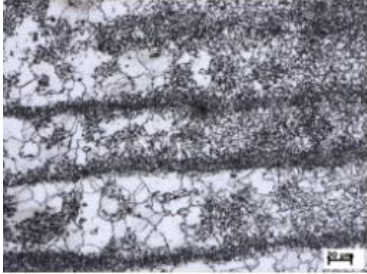


Obr. 59 Porovnání struktur vzorků oboustranného tupého 1/2 V svaru

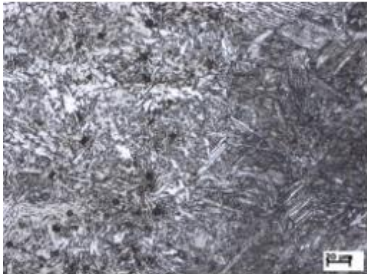
S355J2_3



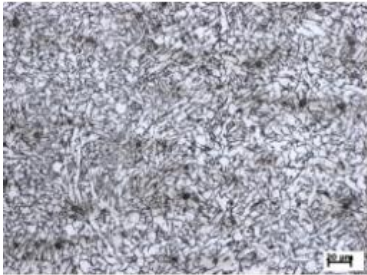
Základní materiál



Přechod ze základního materiálu do tepelně ovlivněné oblasti



Přechod z tepelně ovlivněné oblasti do svarového kovu

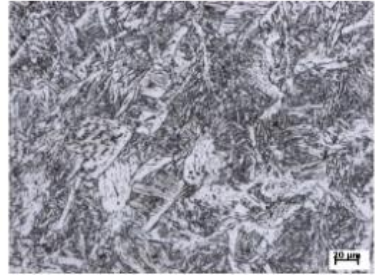
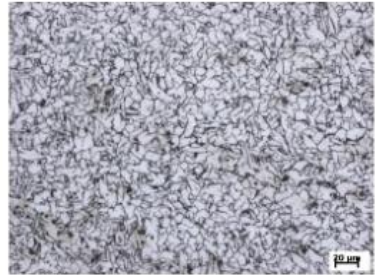
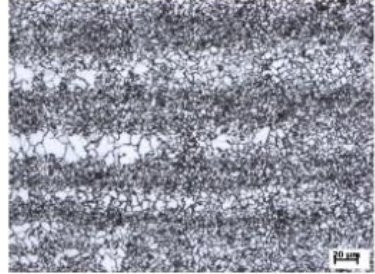
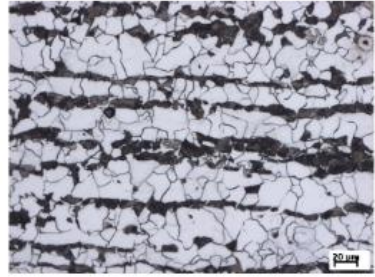


Krycí svarový kov (vnější vrstva svaru)

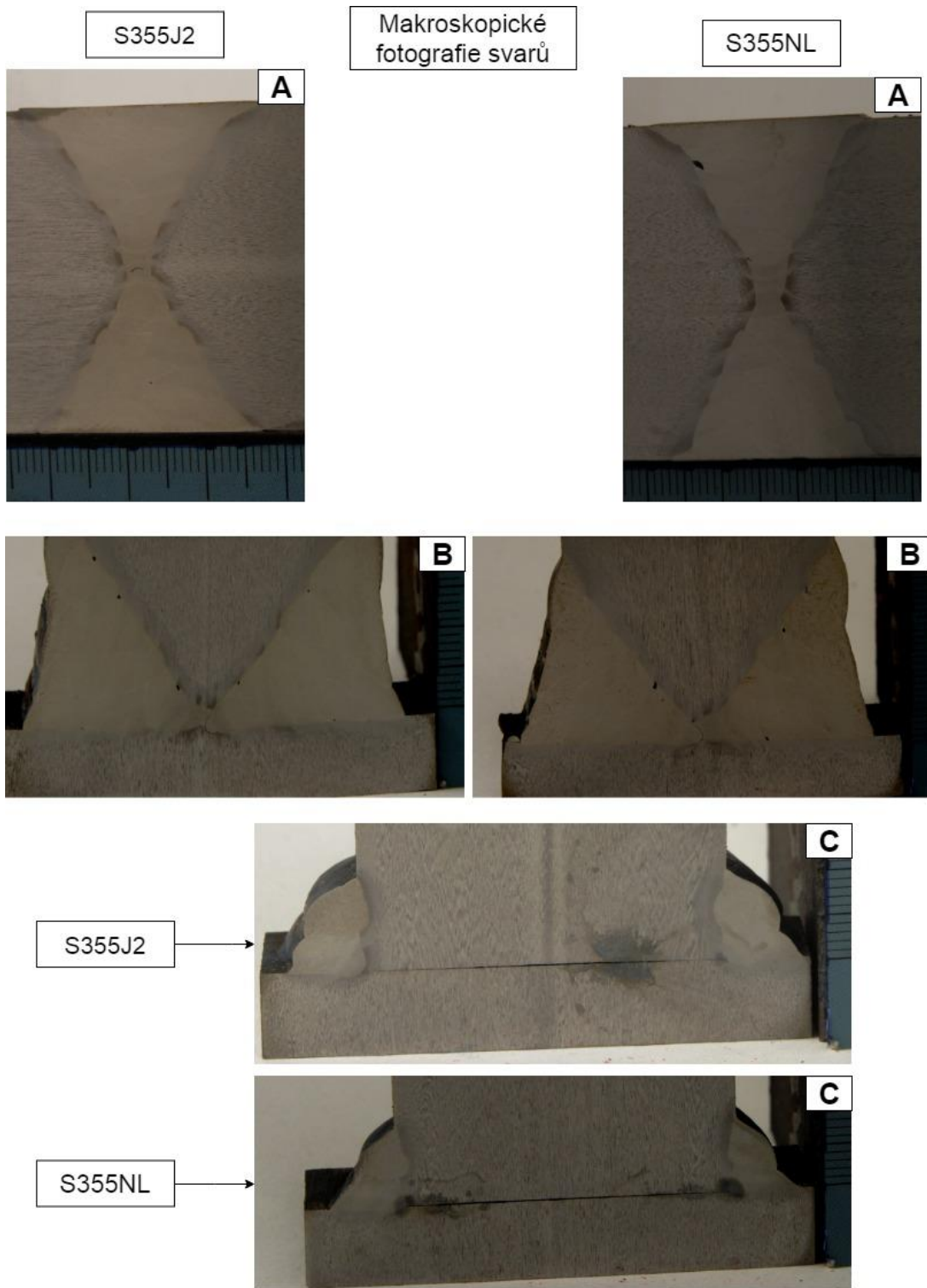


Svarový kov v kořeni svaru

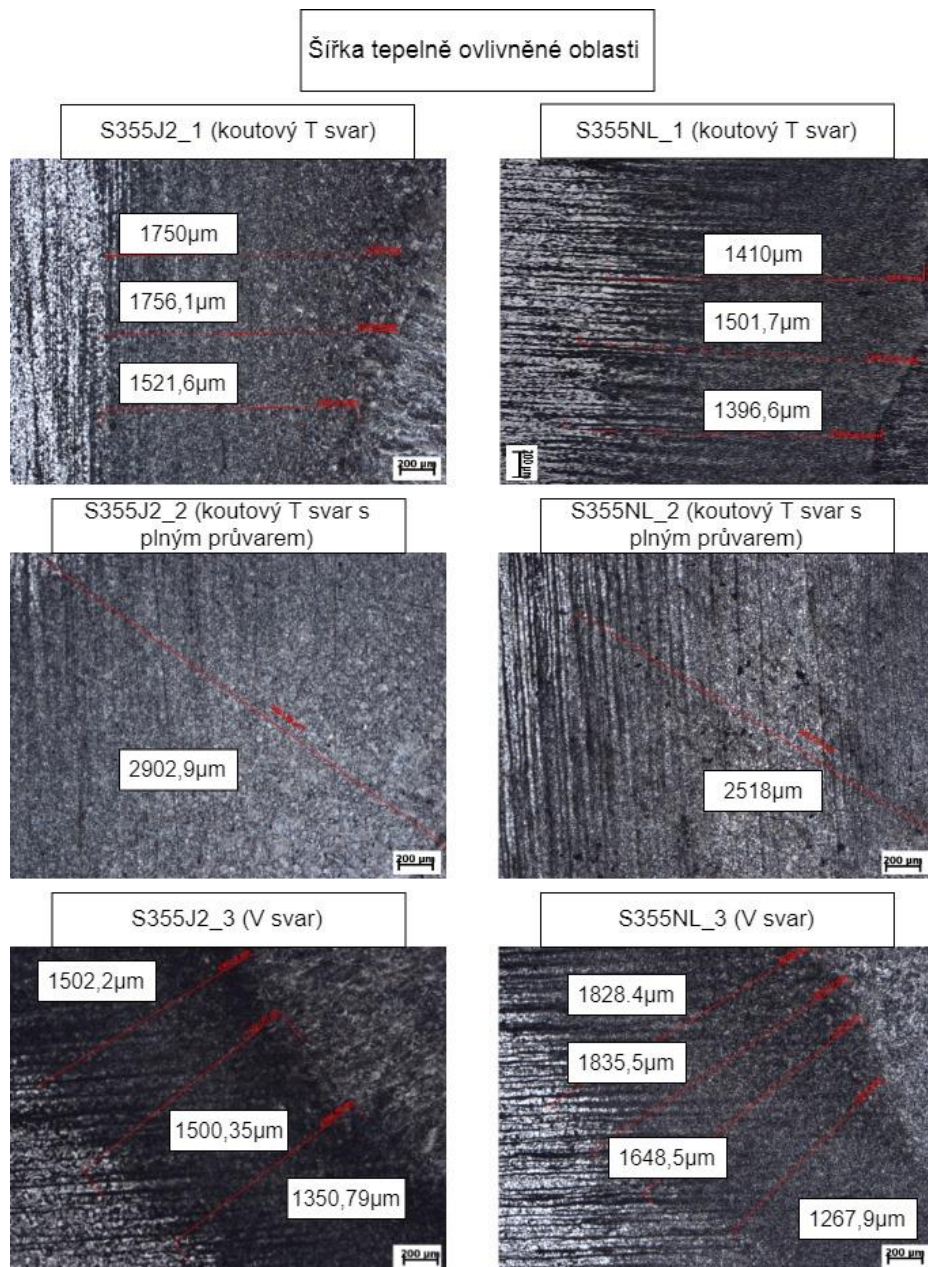
S355NL_3



Obr. 60 Porovnání struktur vzorků V svaru



*Obr. 61 Fotografie makroskopických struktur svarů
 A- Oboustranný V spoj
 B- T spoj na tupo s plným průvarem
 C- T spoj s koutovým svarem*



Obr. 62 Mikroskopické měření velikosti TOO

Z obrázku 61 je viditelné, že velikosti a rozložení TOO se pro jednotlivé vzorky příliš neliší. Mikroskopické měření velikostí TOO zobrazené na fotografiích v obrázku 64 neukazuje, že by zde byl tvořen jakýkoliv trend. Zatímco koutové svary dosahují průměrné velikosti TOO ze tří měření 1676 μm pro jakost S355J2, tak jakost S355NL dosahuje o něco nižších rozměrů, a to sice 1436 μm . Tento výsledek se sice opakuje s větším rozdílem pro koutový svar s plným průvarem, kde je rozdíl mezi měřeními o 385 μm větší TOO u jakosti S355J2 ovšem měření TOO u V svarů naznačení jakéhokoli trendu vyvrací. Velikost TOO u materiálu S355NL dosahuje 1709 μm , zatímco S355J2 1451 μm . TOO je v případě těchto vzorků tedy v průměru o 256 μm větší pro jakost S355NL než u jakosti S355J2. Veškeré fotografie jsou zpracovány formou přílohy (*příloha VIII fotky mikrostruktury a makrostruktury svarů*).

7 Závěr

V rámci bakalářské práce byla vypracována teoretická rešerše týkající se témat značení a dělení ocelí, svařitelnost ocelí, druhů zkoušení svarových spojů a druhů metod svařování. Dále práce obsahuje praktickou část, ke které bylo vytvořeno celkem 12 zkušebních vzorků, 6 od každého druhu jakosti.

Na dvou vzorcích odebraných z každého materiálu (viz kapitola 6.2) byla provedena zkouška mikrotvrdomosti v celém jejich průřezu a pořízeny mikroskopické snímky struktury. Tyto zkoušky byly následně graficky vyhodnoceny a jejich výsledky a nálezy popsány vždy v závěru kapitoly. Veškerá měření byla zpracována formou přílohy II.

Od každého materiálu po jednom vzorku bylo užito k provedení spektrální analýzy. Tato zkouška je popsána a její výsledky vyhodnoceny v kapitole 6.3. Veškerá měření byla zpracována formou přílohy VII.

Po třech vzorcích od každého materiálu bylo použito k tvorbě zkušebních svarových spojů, jejichž návrhy a vyhodnocení jsou popsány v kapitole 6.5 a 6.6. Byly vytvořeny tři zkušební svary při podmínkách, jejichž návrh je popsán kapitolou 6.5. Zkoušené svary byly typu: oboustranného tupého V svaru, T spoje s oboustranným polovičním V svarem, a koutového svaru. Na svarech byla zjištěna velikost TOO, nafocena mikrostruktura a makrostruktura materiálu a zjištěn průběh (mikro)tvrdosti. Vyhodnocení jednotlivých zkoušek a grafické porovnání je popsáno kapitolou 6.6 a veškerá měření jsou zpracována formou příloh V, VI, a VIII. Byly tedy použity všechny vhodné zkoušky pro kvalifikaci postupu svařování, vytipované podle ČSN EN ISO 15613.

Z provedených zkoušek je možno konstatovat, že oba materiály by vyhověly požadované kvalifikaci svarových spojů dle normy ČSN EN ISO 15 613, resp. 15614 s tím, že vzorky jakosti S355NL dosahovaly menšího nárůstu tvrdosti po svařování v celém průřezu svarového spoje než vzorky jakosti S355J2 (viz kapitola 6.6). Tepelně ovlivněná oblast obou materiálu byla téměř identická a ze zjištěných výsledků není možno vyvodit jednoznačný trend. Celkově lze tedy konstatovat, že při dodržení vhodného postupu jsou oba materiály dobře svařitelné bez zásadního rozdílu ve vlastnostech spoje či materiálu. Nicméně zajímavé by bylo doplnění vyhodnocení i o zkoušky rázem v ohybu, kde by jakost NL měla dosahovat hodnoty 27 J při pracovní teplotě – 50 °C, což by byla podstatná výhoda tohoto materiálu. Nicméně tato zkouška nebyla v rámci řešení bakalářské práce realizována, protože pro navržené vzorky a provedené zkoušky již nebyl dostatek zkušebního materiálu a práce je i bez této zkoušky poměrně rozsáhlá.

7 Seznam zdrojů

Literatura

- [1] FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. Konstrukční oceli. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8.
- [2] VOJTĚCH, Dalibor. Kovové materiály. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [3] Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-857-7185-3.
- [4] Technologie slévání, tváření a svařování. Vyd. 3. Praha: ČVUT, 1990. ISBN 80-01-00345-0.
- [5] Atesty ocelí S355NL doloženy v příloze práce
- [6] BARTÁK, Jiří. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2000. Svařování. ISBN 80-85771-72-1.
- [7] BEDNÁŘ, Bohumír. Technologičnost konstrukce I. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03268-x.
- [8] 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.
- [9] MACEK, Karel. Nauka o materiálu: cvičení. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02901-8.
- [10] ČSN EN ISO 9017 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška rozlomením. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014
- [11] Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- [12] TNI CEN ISO/TR 15608 (050323) A Svařování - Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin. Praha: Český normalizační institut, 2008. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>

[13] KOLEKTIV AUTORŮ. Svařování tenkých plechů, drátů a profilů, studijní text k modulu vzdělávacího programu Profesmodul, EPAVA Olomouc, vydání první, Olomouc 2012. CZ1.07/3.2.05/01.0006.

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

[15] Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Kvalifikace na základě předvýrobních zkoušky svařování ČSN EN ISO 15613. Praha: Český normalizační institut, 2005

[16] Kolaříková, M., Kolařík, L., Kovanda, K., Hrabina, R.: Welding of Normalized Heat Treated Steels S355NL Large Thicknesses by Method FCAW. In: Manufacturing Technology. 2013, vol. 13, no. 2, pp. 181-188, ISSN 1213-2489

Internetové zdroje

[i1] Ušlechtilé uhlíkové konstrukční oceli třídy 12, jejich složení a tepelné zpracování [online]. Praha: TumliKovo, 2010 [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/uslechtilé-uhlíkové-konstrukční-oceli-tridy-12-jejich-složení-a-tepelne-zpracování/#more-3180>

[i2] TumliKovo: Nízkolegované konstrukční oceli třídy 14, jejich složení a tepelné zpracování [online]. Praha: TumliKovo, 2010 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/konstrukční-oceli/oceli-tridy-14/>

[i3]TumliKOVO: Korozivzdorné a žárupevné oceli třídy 17,jejich složení a tepelné zpracování. TumliKOVO [online]. Praha: TumliKOVO, 2010, 2010 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/korozivzdorne-a-zarupevne-oceli-tridy-17jejich-složení-a-tepelne-zpracování/>

[i4] JANOVEC, Jiří a Václav PILOUS. Použití ocelí normalizačně tepelně zpracovaných S355NL a termomechanicky zpracovaných S355ML. Konstrukce [online]. 2011, 24.11.2011, 2011 [cit. 2019-06-08]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/pouziti-oceli-normalizacne-tepelne-zpracovanych-s355nl-a-termomechanicky-zpracovanych-s355ml/>

[i5]PILOUSVáclav. Tepelné zpracování konstrukcí svařených z normalizačně žíhaných a normalizačně válcovaných ocelí S235 a S355 ve shodě s ČSN EN ISO 17663. Konstrukce [online]. 2012, 11.5.2012, 2012 [cit. 2019-06-08]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/tepelne-zpracování-konstrukci-svařených-z-normalizacne-zihanych-a-normalizacne-valcovanych-oceli-s235-a-s355-ve-shode-s-csn-en-iso-17663/>

[i6]PILOUSVáclav. Volba konstrukčních ocelí pro stavební svařované konstrukce podle významu označení. Konstrukce [online]. 2013, 15.3.2017, 2013 [cit. 2019-06-08]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/volba-konstrukčních-oceli-pro-stavebni-svarovane-konstrukce-podle-vyznamu-oznaceni/>

[i7] Přehled způsobů svařování a základní dělení metod dle EN ISO 4063 [online]. Plzeň: Svarox technology, 2016 [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: <http://svarox.cz/prehled-zpusobu-svarovani-a-zakladni-deleni-metod-dle-en-iso-4063/>

- [i8] LIBOR BENEŠ [online]. Praha: Beneš, 2014 [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf
- [i9] Přehled vlastností oceli S355J2(dříve S355J2G3) [online]. Kladno: Bohdan Bolzano, 2019 [cit.2019-06-08]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s355j2drive-s355j2g3>
- [i10] Převodní tabulka značení ocelí [online]. E-konstrukér, 2013 [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/prevodni-tabulka-znaceni-oceli>
- [i11] Reichelt elektronik [online]. Elektronikring 1: Reichelt Elektronik GmbH& Co., 2016 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: <https://www.reichelt.de/endscope-camera-wireless-monitor-5-5-mm-dia-endo-s05-5-5-p150186.html?r=1>
- [i12] TECHNOTEST [online]. Pod Strání 14: TECHNOTEST, 2016 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: http://www.technotest.cz/kapilarni_zkouska
- [i13] Nedestruktivní testování [online]. Ostrava: INWIRO, 2010 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: <https://www.inwiro.eu/nedestruktivni-testovani/metody-testovani/magneticka-praskova-metoda/>
- [i14] <http://www.foerstergroup.cz/cs/cze/technologie/zkouseni-virivymi-proudy/>: Zkoušení vířivými proudy [online]. Praha: FOERSTER TECOM, 2019 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: <http://www.foerstergroup.cz/cs/cze/technologie/zkouseni-virivymi-proudy/>
- [i15] Nacereddine, L. Hamami and D. Ziou, Probabilistic deformable model for weld defect contour estimation in radiography, *Machine Graphics and Vision* 15(3/4) (2006), 547–556. (PDF) Computer aided weld defect delineation using statistical parametric active contours in radiographic inspection. Available from: https://www.researchgate.net/publication/279226594_Computer_aided_weld_defect_delineation_using_statistical_parametric_active_contours_in_radiographic_inspection [accessed Jun 13 2019].
- [i16] PILOUS, Václav. Svařitelné oceli podle EN, AISI, ASTM pro stavební svařované konstrukce. *Konstrukce* [online]. 2010, 3.12.2010 [cit. 2019-06-22]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/svaritelne-oceli-podle-en-aisi-astm-pro-stavebni-svarovane-konstrukce/>

[i17] B2B METAL: S355J2 STEEL GRADE, MECHANICAL PROPERTIES, CHEMICAL COMPOSITION, GRADE EQUIVALENT [online]. EU: B2B METAL, 2014 [cit. 2019-07-27]. Dostupné z: <http://www.b2bmetal.eu/en/pages/index/index/id/149/>

[i18] B2B METAL: S355NL STEEL GRADE, MECHANICAL PROPERTIES, CHEMICAL COMPOSITION, GRADE EQUIVALENT [online]. EU: B2B METAL, 2014 [cit. 2019-07-27]. Dostupné z: <http://www.b2bmetal.eu/en/pages/index/index/id/158/>

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma rozdělení ocelí	10
Obr. 2 Schéma popisující systém a význam jednotlivých symbolů při značení oceli dle normy ČSN EN 100072 - 1 [3].....	17
Obr. 3 Hodnoty uhlíkového ekvivalentu pro ocel S355J2 [i9].....	30
Obr. 4 Korelace uhlíkového ekvivalentu, teploty přehřevu a tloušťky svařovaných materiálů [i5]	31
Obr. 5 Grafické znázornění dělení vad [6]	33
Obr. 6 Princip a vzorek zkoušky rázem v ohybu [8]	36
Obr. 7 Výstupní diagram zkoušky tahem pro měkkou a tvrdou ocel [8]	37
Obr. 8 Schéma principu ohybové zkoušky [9]	38
Obr. 9 Schéma principu zkoušky rozlomením [10].....	39
Obr. 10 Schéma vtačování indentoru a vzniklých úhlopříček.....	40
Obr. 11 Endoskop sloužící k nepřímé vizuální kontrole [i11]	41
Obr. 12 Vady zvýrazněná metodou barevné indikace [i12]	43
Obr. 13 Indikace trhliny při magnetické práškové zkoušce [i13].....	44
Obr. 14 Schéma metody vířivých proudů [i14]	45
Obr. 15 Příklady různých druhů vad zobrazených na radiodiagramu [i15]	46
Obr. 16 Metody svařování a jejich dělení [11].....	49
Obr. 17 Princip svařování metodou TIG [11].....	51
Obr. 18 Schéma principu metod MAG/MIG [13]	52
Obr. 19 Schéma dělení polotovarů na vzorky S355NL.....	53
Obr. 20 Schéma dělení polotovaru na vzorky S355J2.....	54
Obr. 21 Schéma dělení materiálu S355NL	54
Obr. 22 Schéma dělení materiálu S355J2.....	54
Obr. 23 Upnutý vzorek před řezáním	55
Obr. 24 Lis Cito-Press 1	55
Obr. 25 Zkušební vzorky a jejich označení po vyjmutí z lisu	56
Obr. 26 Bruska Buehler Beta.....	56
Obr. 27 Proces leštění	57
Obr. 28 Porovnání mikrostruktury vzorků	58
Obr. 29 Porovnání mikrostruktury vzorků	59
Obr. 30 Mikrotvrdoměr Buehler indentamet 1000.....	61
Obr. 31 Schéma umístění osy měření na vzorcích J2_1 a NL_1.....	62
Obr. 32 Schéma umístění osy měření na vzorcích J2_2 a NL_2.....	62
Obr. 33 Grafické znázornění hodnot tvrdosti v závislosti na vzdálenosti měření od středu polotovaru.....	63
Obr. 34 Grafické znázornění hodnot tvrdosti v závislosti na vzdálenosti měření od středu polotovaru.....	63
Obr. 35 Fotka mikrostruktury vzorku NL_1 při zvětšení 200x.....	64
Obr. 36 Fotka mikrostruktury vzorku J2_1 při zvětšení 200x.....	64
Obr. 37 Fotka mikrostruktury vzorku NL_2 při zvětšení 200x.....	65
Obr. 38 Fotka mikrostruktury vzorku NL_2 při zvětšení 500x.....	65
Obr. 39 Fotka mikrostruktury vzorku J2_2 při zvětšení 200x.....	65
Obr. 40 Fotka mikrostruktury vzorku J2_2 při zvětšení 500x.....	65
Obr. 41 Skica svařovaného vzorku pro V svar	71
Obr. 42 Skica svařovaného vzorku pro tupý ½ V svar.....	71
Obr. 43 Skica svařovaného vzorku pro tupý svar.....	71
Obr. 44 Skica uspořádání vzorků před tvorbou spoje	72
Obr. 45 Schéma uspořádání jednotlivých vrstev a housenek blíže popsanych tabulkami č.16 a 17 s přílohou V.....	72
Obr. 46 Upnutí vzorků do přípravku před provedením svaru	73

Obr. 47	Skica uspořádání vzorků před tvorbou spoje	73
Obr. 48	Schéma uspořádání jednotlivých vrstev a housenek blíže popsaných tabulkami č.18 a 19 s přílohou V	74
Obr. 49	Schéma uspořádání jednotlivých vrstev a housenek blíže popsaných tabulkami č.20 a 21 s přílohou V	74
Obr. 50	Skica uspořádání vzorků před tvorbou spoje	74
Obr. 51	Grafické zobrazení rozložení hodnot mikrotvrdosti na vzorku S355J2_1	75
Obr. 52	Grafické zobrazení rozložení hodnot mikrotvrdosti na vzorku S355NL_1	76
Obr. 53	Grafické zobrazení rozložení hodnot mikrotvrdosti na vzorku S355NL_2	77
Obr. 54	Grafické zobrazení rozložení hodnot mikrotvrdosti na vzorku S355J2_2	77
Obr. 55	Grafické zobrazení rozložení hodnot mikrotvrdosti na vzorku S355NL_3	79
Obr. 56	Grafické zobrazení rozložení hodnot mikrotvrdosti na vzorku S355J2_3	79
Obr. 59	Grafické znázornění rozložení hodnot mikrotvrdosti.....	80
Obr. 60	Porovnání struktur vzorků koutového svaru	81
Obr. 61	Porovnání struktur vzorků oboustranného tupého 1/2 V svaru	82
Obr. 62	Porovnání struktur vzorků V svaru	83
Obr. 63	Fotografie makroskopických struktur svarů.....	84
Obr. 64	Mikroskopické měřené velikosti TOO	85

Seznam tabulek

Tab. 1Převodní tabulka značení ocelí [i10]	11
Tab. 3Popis písemného označení vyskytujícího se u jemnozrnných ocelí	15
Tab. 2Porovnání chemického složení uhlíkové oceli a jemnozrnné konstrukční oceli [i6]	15
Tab. 4Systém označování jemnozrnných ocelí dle ČSN EN 10027-1	16
Tab. 5Chemické složení ocelí S355NL a S355J2.....	19
Tab. 6 Tabulka porovnávající mechanické vlastnosti obou ocelí [i17][i18]	19
Tab. 7Starší dělení svařitelností.....	21
Tab. 8Pásma teplot předehřevu v koleraci s obsahem uhlíku u uhlíkových ocelí [3]	24
Tab. 9Limitní obsahy legur v jemnozrnných ocelích [3]	27
Tab. 10Přehled vlastností oceli S355J2 [i9]	29
Tab. 11Hodnoty uhlíkových ekvivalentů jemnozrnných ocelí pro různé tloušťky [i6]	31
Tab. 12Kvalifikační tabulka uvádějící jaké zkoušky je nutno splnit pro daný druh spoje [14]	35
Tab. 13Tabulka symbolů vyskytujících se při zkoušce ohybem [9]	38
Tab. 14 Tabulka rozdělení zkoušky na základě zatížení	40
Tab. 15 Sled brusných operací	56
Tab. 16 Sled leštících operací a prostředků.....	57
Tab. 17 Výsledky spektrální analýzy	60
Tab. 18 Tabulka stanovených hodnot pro tvorbu svarových spojů.....	70