

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

SVAŘITELNOST OCELÍ PRO SOUČÁSTI PARNÍCH TURBÍN

WELDABILITY OF STEELS FOR STEAM TURBINE PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DAVID JECH

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN JULIŠ, Ph.D

BRNO 2010

ABSTRAKT

Cílem současných standardních svařovacích technologií je vytvoření homogenních svarů s vysokými hodnotami pevnosti a houževnatosti v laboratorních i provozních podmínkách. Tato technologie svařování je uplatňována u nových žárupevných ocelí na bázi CrMoV a CrMoNiV, které vykazují vysoké hodnoty pevnosti a žárupevnosti. Bakalářská práce se zabývá problematikou svařitelnosti ocelí pro rotory parních turbín a jejím cílem je vyhodnocení strukturních a mechanických vlastností svarového spoje pro uvažované kombinace materiálů. K vyhodnocení vlastností svarového spoje bylo použito měření mikrotvrdosti a tvrdosti podle Vickerse, mikrostruktura svaru byla pozorována metodami světelné mikroskopie.

ABSTRACT

The aim of contemporary standard welding technologies is to create compact welds with high value of solidity and toughness in laboratorial and operational conditions. This welding technology is asserted in new creep - resisting steels on basis of steel CrMoV and CrMoNiV, which have high value of solidity and creep - resistance. The thesis deals with problems connected with the weldability of steels for steam turbine rotors and it's aim is to interpret the structural and mechanical features of the weld joint for material combinations under consideration. For the assessment of weld joint features has been used measuring of micro hardness and hardness according to Vickers, microstructure was observed by methods of light microscopy.

Klíčová slova:

Svarový spoj, tvrdost, mikrotvrdost, mikrostruktura, ocel

Keywords:

Weld joint, hardness, micro hardness, microstructure, steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JECH, D. *Svařitelnost ocelí pro součásti parních turbín*. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Juliš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FSI VUT v Brně.

V Brně 28. 5. 2010

David Jech

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi pomáhali s tvorbou této bakalářské práce, hlavně mému vedoucímu Ing. Martinovi Julišovi, Ph.D. za jeho velikou trpělivost, pomoc a cenné rady.

Můj obrovský dík patří též rodičům, kteří mě celé studium velmi podporovali a pomáhali mi, stejně jako má přítelkyně a kamarádi.

OBSAH

1. ÚVOD	1
2. CÍLE PRÁCE	2
3. LITERÁRNÍ PŘEHLED PROBLEMATIKY	3
3.1 SVAŘITELNOST MATERIÁLU	3
3.1.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí	4
3.1.2 Svařitelnost nízkolegovaných ocelí.....	6
3.1.3 Svařitelnost vysokolegovaných ocelí	9
3.2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ A SVAŘOVACÍ ZAŘÍZENÍ	10
3.2.1 Struktura svaru.....	10
3.2.2 Necelistvosti ve svarových spojích	13
3.2.3 Metody svařování	16
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	20
4.1 EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL A TECHNIKA.....	20
4.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTU	22
4.2.1 Hodnocení makrotvrdosti a mikrotvrdosti svarového spoje	22
4.2.2 Makroskopický a mikroskopický rozbor svarového spoje	30
5. DISKUSE VÝSLEDKŮ	41
6. ZÁVĚRY	42
7. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	43
8. POUŽITÁ LITERATURA	44

1. ÚVOD

Parní turbíny slouží k přeměně kinetické a tepelné energie horké páry na mechanickou rotační energii, která se přenáší na rotor turbíny. Tato energie se používá například v energetice pro pohon alternátorů, anebo jako pohon pro bitevní lodě či jaderné ponorky. Vzhledem k tomu, v jakém prostředí (vysoká teplota, tlak) tyto součásti pracují, je zřejmé, že musí být vyrobeny z velmi kvalitních materiálů. Ale ani tyto materiály nám nezaručí dlouhodobou bezporuchovou činnost a často proto dochází k drobným opravám a renovacím.

Z technologického hlediska se nabízí technologie svařování, která ovšem musí být dokonale zvládnutá ať už z hlediska výpočtu svařitelnosti, přehřevu, dohřevu, výběru vlastní svařovací metody anebo tepelného zpracování. U svařovací technologie, kde používáme přídavný materiál, musí být mechanické, fyzikální, chemické a technologické vlastnosti svarového kovu stejné nebo velmi podobné, jako u základního materiálu. U svarového kovu je vyžadována zaručená hodnota meze pevnosti při tečení a také odolnost proti křehkolomovému chování za dané pracovní teploty.

Parní turbíny používané v tepelných, ale i jaderných elektrárnách se vyrábějí z nízkolegovaných žárupevných ocelí typu CrMo, CrMoV, CrMoNiV, které jsou dále legovány W, Nb, Ti, N a B. U nízkolegovaných žárupevných ocelí je požadována vysoká mez pevnosti při tečení za dané pracovní teploty, která je stejná jako u svarového spoje, ale také zvýšená houževnatost a odolnost oceli proti křehkému porušení za teploty okolí 20 °C. Nejlépe těmto požadavkům vyhovují žárupevné oceli s nízkým obsahem uhlíku, které po ochlazení z oblasti austenitu rychlostí, která je charakterizována ochlazovací dobou v rozmezí teplot 800 °C až 500 °C vytvářejí strukturu, jejíž nejdůležitější částí je bainitický laťkový ferit se stabilními karbidickými případně karbonitridickými precipitáty. Největší výhoda bainitické struktury spočívá v její odolnosti proti vzniku trhlin po svařování [7].

2. CÍLE PRÁCE

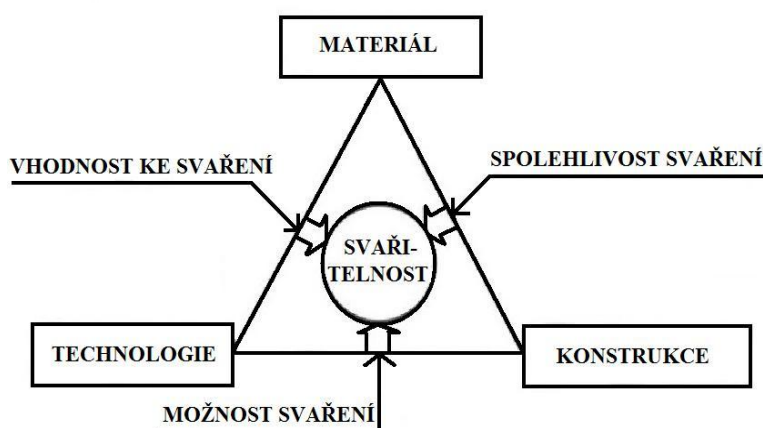
Cílem bakalářské práce je řešení problematiky svažitelnosti ocelí pro rotor parní turbíny. Práce je zaměřená na hodnocení strukturních a mechanických vlastností svarového spoje rotoru parní turbíny. Dílčí cíle práce jsou tyto:

- Hodnocení průběhu makrotvrdosti a mikrotvrdosti v ose svaru a dále v lící, střední a kořenové části svarového spoje. Výsledky budou porovnány pro zjištění přesného a detailního průběhu tvrdosti v celém svarovém spoji.
- Vyhodnocení mikrostruktury materiálu v oblasti svarového kovu, v tepelně ovlivněné oblasti a základním materiálu pomocí světelné mikroskopie.
- Na základě získaných výsledků bude rozhodnuto, je - li daný materiál a technologie svařování vhodná pro vytvoření homogenního svaru s vysokou hodnotou pevnosti a houževnatosti.

3. LITERÁRNÍ PŘEHLED PROBLEMATIKY

3.1 SVAŘITELNOST MATERIÁLU

Svařitelnost je komplexní charakteristika, která vyjadřuje vhodnost materiálu vytvořit svarový spoj požadovaných mechanických, fyzikálních a chemických vlastností při určitých metalurgických, konstrukčních a technologických možnostech. Cílem je dosažení požadované jakosti, spolehlivosti a životnosti svarového spoje. Tato vhodnost je pro jednotlivé typy ocelí rozdílná. Faktory, které ovlivňují svařitelnost, jsou znázorněny na obr. 3.1. Svařitelnost se určuje především podle chemického složení svařovaného materiálu – obsahu uhlíku, nečistot, legujících prvků, povrchově aktivních prvků, vodíku a tloušťky svařovaného materiálu. Některé oceli je možné svařovat bez jakýchkoli omezujících podmínek, v jiných případech je třeba použít přehřev, omezit specifický tepelný příkon, anebo svarový spoj dále tepelně zpracovat [1, 3].



Obr 3.1 – Faktory ovlivňující svařitelnost [4]

Materiálová svařitelnost

Vyjadřuje vhodnost materiálu ke svařování a charakterizuje změnu jeho vlastností v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) v důsledku působení teplotního cyklu svařování. Vhodnost materiálu ke svařování je určena zejména způsobem výroby oceli, chemickým složením, způsobem odlévání, tváření a tepelným zpracováním [1, 4].

Technologická svařitelnost

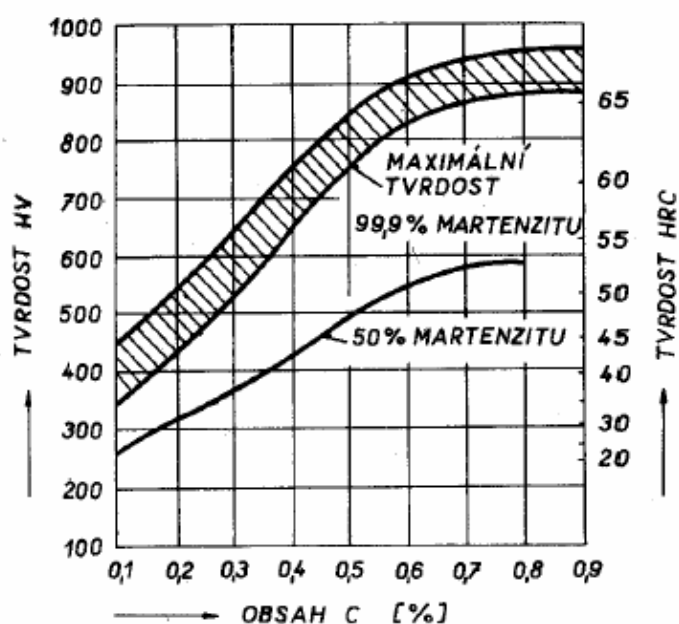
Vyjadřuje vliv použité metody a technologie svařování na vlastnosti svarového spoje a zabezpečuje se základními faktory jako je metoda svařování, přídavný materiál a parametry svařování [4].

Konstrukční svařitelnost

Vyjadřuje vliv konstrukčního řešení svarového spoje pro dané provozní podmínky. Zabezpečuje se tloušťkou materiálu, tvarem svarového spoje, přípravou svarových ploch a tuhostí spoje [1, 4].

3.1.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí

Základní vlastnosti uhlíkových ocelí jsou definovány obsahem uhlíku, který u těchto ocelí může být v rozmezí od velmi nízkého procenta až do obsahu 1,7 hm. %, i když jeho obsah nad 1,3 hm. % je u technických ocelí poměrně vzácný. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku se zvyšuje mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost, ale jejich plastické vlastnosti se snižují. Při svařování těchto ocelí nastává problém, pokud obsah uhlíku dosáhne přibližně 0,25 hm. % C a při jeho dalším překročení může dojít ke vzniku nežádoucích struktur, zejména většího obsahu martenzitu. Tvrdost v místě svarového spoje bývá obvykle nejvyšší v TOO, protože tato oblast chladne nejrychleji. Závislost tvrdosti martenzitu na obsahu uhlíku je vidět na obr. 3.2, ze kterého je patrné, že tvrdost ovlivňuje nejen množství uhlíku, ale zároveň procentuelní množství martenzitu ve výsledné struktuře [2, 5].



Obr. 3.2 - Závislost tvrdosti svarového spoje na obsahu uhlíku v oceli a na procentu martenzitu ve struktuře TOO [5]

U ocelí s obsahem uhlíku menším než 0,25 hm. % C není nutné zajišťovat zvláštní podmínky při svařování. Zatímco v případě svařování uhlíkové oceli s $C > 0,25$ hm. %, které jsou podmíněně svařitelné, je nutné zajistit předehřev, jehož teploty (vztahené na tloušťku stěny, tvar svarového spoje a obsah uhlíku) jsou uvedeny v tab. 3.1. Předehřev materiálu snižuje rychlost ochlazování a tím se sníží nebezpečí vzniku zakalené struktury – více než 50 % obsahu martenzitu ve struktuře [2, 5].

Tab. 3.1 Teplota předehřevu v závislosti na obsahu uhlíku [5]

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

Uhlíkový ekvivalent

Jeden z aspektů posouzení komplexní charakteristiky ocelí pro danou součást je určení tzv. ekvivalentního obsahu uhlíku C_e kdy pomocí něj lze informativně stanovit svařitelnost nelegovaných, nízkolegovaných, středně legovaných tvářených ocelí a ocelí na odlitky. Oceli s obsahem uhlíku menším než 0,22 hm. % C lze svařovat bez zvláštních opatření, přičemž ekvivalentní obsah uhlíku $C_e \leq 0,50$ je počítán dle rovnice:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024t \quad [\text{hm. \%}] \quad (1)$$

t... tloušťka plechu (mm)

Tato rovnice platí pro materiály do obsahu prvků: C = 0,22 hm. %, Mn = 1,6 hm. %, Cr = 1 hm. %, Ni = 3,0 hm. %, V = 0,14 hm. %, Cu = 0,30 hm. % [2, 4].

Mezinárodní svářečský institut (IIW/IIS) navrhl vzorec pro výpočet uhlíkového ekvivalentu (pro oceli s obsahem C > 0,18 hm. %) takto:

$$C_e(\text{IIW}) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\text{hm. \%}] \quad (2)$$

Nepřekročí-li uhlíkový ekvivalent hodnotu 0,45 % pro tloušťku plechu 4 mm (0,4 % pro tloušťku 6,5 mm, 0,35 % pro 25 mm, 0,3 % pro 50 mm), lze ocel svařovat bez předehřevu [4].

Dnes asi nejvíce používaný je uhlíkový ekvivalent CET:

$$\text{CET} = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\text{hm. \%}] \quad (3)$$

Tento vzorec platí pro složení materiálu: C (0,05 - 0,25 hm. %), Si (max. 0,8 hm. %), Mn (0,5 - 1,9 hm. %), Cr (max. 1,5 hm. %), Cu (max. 0,7 hm. %), Mo (max. 0,75 hm. %), Nb (max. 0,06 hm. %), Ni (max. 2,5 hm. %), Ti (max. 0,12 hm. %), V (max. 0,18 hm. %) a B (max. 0,005 hm. %) [4].

3.1.2 Svařitelnost nízkolegovaných ocelí

Nízkolegované žárupevné oceli představují nejpropracovanější skupinu ocelí, které mají největší podíl na stavbě konvečních, ale i jaderných energetických zařízení. Jedná se o nízkolegované žárupevné oceli typu CrMo, CrMoV a CrMoNiV, které jsou dále legovány W, Nb, Ti, N a B. Základními, ale též nejdůležitějšími požadavky na oceli tohoto typu jsou vysoké hodnoty meze pevnosti při tečení za dané pracovní teploty, ale také zvýšená houževnatost a odolnost oceli proti křehkému porušení i za teplot pohybujících se v okolí 20 °C. Těmto požadavkům vyhovují nejlépe žárupevné oceli s nízkým obsahem uhlíku, které po ochlazení z oblasti austenitu rychlostí charakterizovanou stanovenou ochlazovací dobou v rozsahu teplot 800 °C až 500 °C tvoří strukturu, jejíž podstatnou částí je bainitický lat'kový ferit se stabilními karbidickými popřípadě karbonitridickými precipitáty. Nejdůležitější vlastností takto vzniklé bainitické struktury je z hlediska svařování její odolnost proti vzniku trhlin [7].

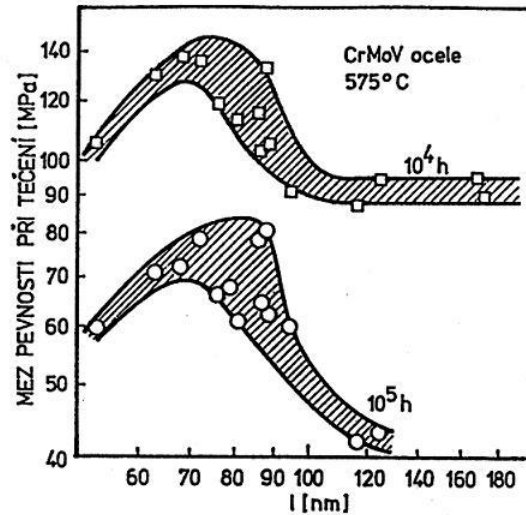
Mechanismus žárupevnosti svařovaných ocelí

Na žárupevnost ocelí mají výrazný vliv faktory, které zpevňují mřížku tuhého roztoku a tím omezují dislokační skluz nebo difuzní pohyb atomů, případně jejich kombinaci. Těmto mechanismům zpevnění odpovídají užité vlastnosti ocelí včetně křehkolomových vlastností a žárupevnosti. Mezi hlavní faktory zpevnění mřížky patří zejména:

- precipitační zpevnění [5, 7, 8];
- substituční zpevnění [6, 7].

Precipitační zpevnění

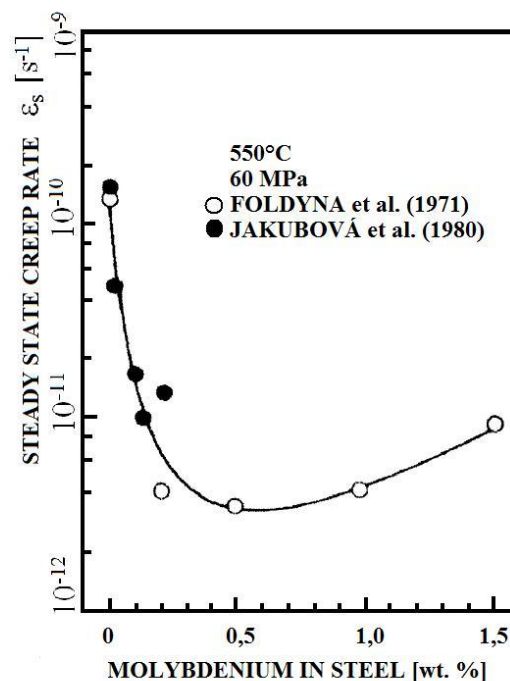
Jemné částice precipitátů vyloučené ve struktuře v dostatečně velkém množství mohou účinně omezovat dislokační skluz ev. difuzní pohyb atomů, které jsou nezbytné k procesu tečení při vysokoteplotní zátěži. Ke zpevnění u nízkolegovaných CrMoV ocelí dochází především disperzí karbidů nebo karbonitridů vanadu (V_4C_3 nebo VCN), ale u nízkolegovaných CrMo ocelí se na zpevnění podílejí hlavně karbidy Mo_2C nebo Cr_7C_3 . U modifikovaných chromových ocelí s nízkým obsahem dusíku se na zpevnění podílejí hlavně karbidy $M_{23}C_6$, zatím u ocelí se zvýšeným obsahem dusíku je zpevnění určeno částicemi typu $M_{23}C_6$ a MX (VN, NbCN). Velikost precipitačního zpevnění, mechanické vlastnosti a žárupevnost jsou závislé na velikosti, počtu a střední vzájemné vzdálenosti vytvrzujících fází, tedy na takzvané disperzi vytvrzujících fází. Na obr. 3.3 můžeme vidět vliv vzájemné vzdálenosti částic na mez pevnosti při tečení. Disperze precipitátů je při daném chemickém složení oceli ovlivněna především použitým tepelným zpracováním. Z tohoto důvodu se pro konstrukci svařenců z nízkolegovaných ocelí dodávají polotovary normalizované a popuštěné. Popuštění se provádí kvůli dosažení optimální disperze vytvrzujících částic a optimálnímu poměru pevnostních a plastických vlastností materiálu. Ohled musíme brát ovšem i na to, že precipitační zpevnění se může výrazně měnit během exploatace za zvýšených teplot a při cyklických změnách teploty [5, 7, 8].



Obr 3.3 – Vliv střední vzájemné vzdálenosti částic na mez pevnosti při tečení [6]

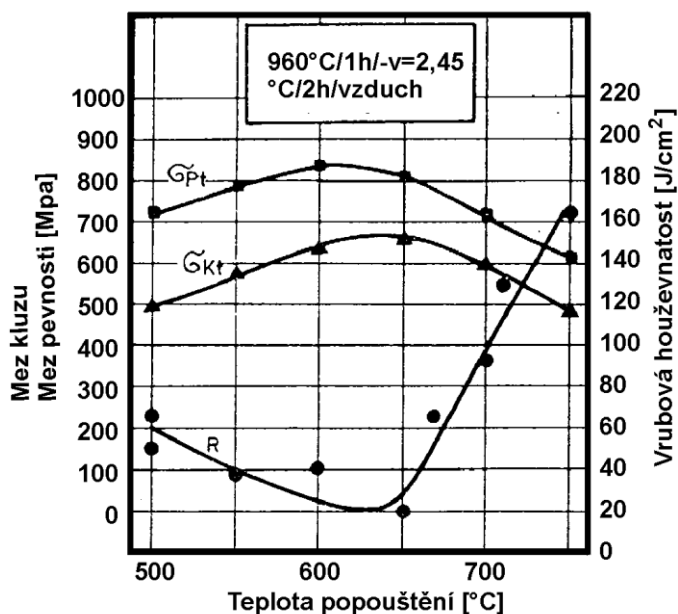
Substituční zpevnění

Zpevnění tuhého roztoku pomocí legujících prvků s velkým poloměrem atomu má za následek deformaci mřížky a tím snížení rychlosti sekundárního creepu a zvýšení odolnosti proti tečení. U žárupevných ocelí se nejlépe osvědčily atomy Mo a W. Na obr. 3.4 je vidět vliv obsahu Mo na rychlost tečení, která se ovšem snižuje pouze do obsahu 0,5 % Mo. Při přelegování oceli těmito prvky až nad limit rozpustnosti se během vysokoteplotní expozice mohou tvořit nežádoucí fáze typu M_6C nebo Fe_2Mo (W), které mají nízkou rozměrovou stabilitu a rozpouštějí příznivě působící VC a VCN [6, 7].



Obr 3.4 – Vliv obsahu Mo na rychlost tečení nízkolegované oceli [7]

Nízkolegované oceli jsou svařitelné za určitých podmínek, mezi které patří zvláště u CrMo a CrMoV ocelí přísné dodržení svařovacích postupů, které se týkají tepelného příkonu, zvoleného předehřevu a dohřevu a následujícího tepelného zpracování. Nízkolegované oceli jsou náchylné na vodíkové zkřehnutí, pokud se v oblasti svaru vyskytuje martenzit, anebo dolní bainit. To může vést ke vzniku studených trhlin, které jsou indukované vodíkem a můžou se vyskytovat jak v TOO tak ve svarovém kovu. Proto je pro svařování nízkolegovaných ocelí nutné použít přídatné materiály stejné legující báze s nízkým obsahem difuzního vodíku, které jsou před svařováním vysušeny. Svarové spoje nízkolegovaných ocelí se po svaření obvykle popouštějí, ale oceli této skupiny jsou náchylné na vznik žíhacích trhlin a proto je nutné dodržovat maximální povolené rychlosti ohřevu na popouštěcí teplotu a maximální povolené rychlosti ochlazování z této teploty. Účelem popouštění je snížení zbytkových napětí a zlepšení struktury svarového spoje, která je nepříznivě ovlivněna působením teplotního cyklu při svařování. Popouštění má také stabilizovat rozměry svařence. V průběhu popouštění se martenzit rozpadá na feriticko - karbidickou mikrostrukturu, ve svarovém kovu a v TOO svarového spoje se obnovuje optimální disperse vytvrzujících fází, čímž se dosahuje i optimálního poměru mezi pevnostními a plastickými vlastnostmi svarového spoje. Popouštěcí teplota musí být dostatečně vysoká, protože chceme dosáhnout toho, aby vytvrzující fáze vyprecipitovaly převážně v průběhu popouštění a tím zamezíme jejich precipitaci za provozu zařízení při vysokých teplotách. Při vyprecipitování fází během pracovní teploty za provozu nastává jev zvaný sekundární vytvrzování. To způsobuje zvýšení tvrdosti a snížení plastických vlastností svarového spoje. Popouštěcí teplota též ovlivňuje dispersi vytvrzujících částic. S rostoucí popouštěcí teplotou se zvyšují plastické vlastnosti svarových spojů, viz obr. 3.5. Pozornost je nutné věnovat hlavně správné volbě popouštěcích teplot, které musí být voleny a dodrženy za teplotní oblastí maxima sekundárního vytvrzování, ale zároveň stále pod A_{c1} [5, 6, 9].



Obr. 3.5 – Vliv teploty popouštění na mechanické vlastnosti CrMoV oceli [5]

3.1.3 Svařitelnost vysokolegovaných ocelí

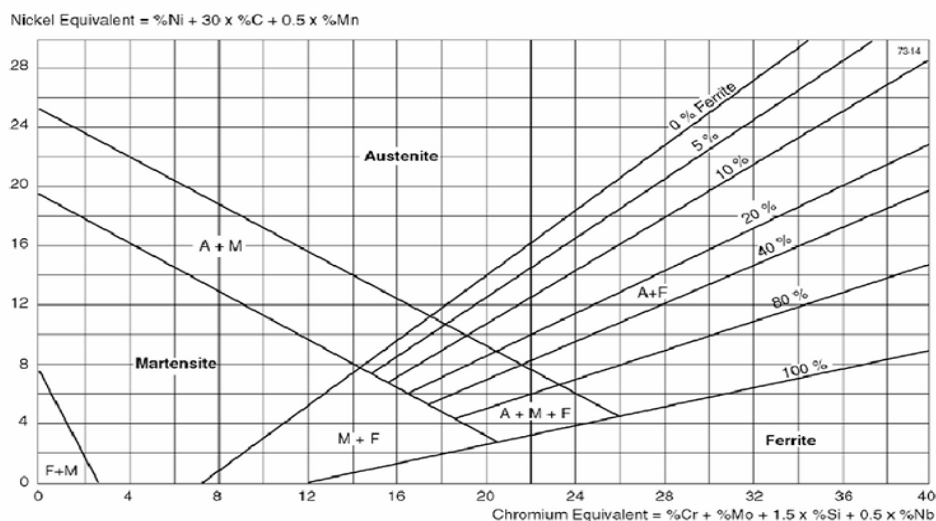
Vysokolegované žárupevné oceli obsahují více než 10 hm. % celkového obsahu legur a odolávají creepu při vysokých teplotách – mají vysokou hodnotu meze pevnosti při tečení. Jejich žárupevnost je zajištěna legujícími prvky Cr, V, Mo, W, Nb, Ti, B a N, které zpomalují degradaci mechanických vlastností při zvýšené teplotě a výrazně zpevňují tuhý roztok disperzními precipitáty. Austenitické oceli se svařují přídavnými materiály se stejným nebo podobným chemickým složením. Rozhodující je, aby ve svarovém kovu byl požadovaný obsah δ – feritu (obsah 2 až 6 % zamezuje vzniku krystalizačních trhlin), který závisí hlavně na chemickém složení svarového kovu. Ke svařování je možné použít téměř všechny známé technologie svařování, které zaručí dokonalou ochranu svarového kovu. Svařuje se bez přehřevu, protože je nelze zakalit a nejsou náchylné na vznik studených trhlin (vysoká rozpustnost vodíku v austenitu). Limitujeme však tepelný příkon do svaru z důvodu náchylnosti oceli k tvorbě teplých trhlin a snížení nebezpečí růstu zrn v TOO. Svarové spoje se obvykle tepelně nepracovávají [10, 14].

Svařování různorodých materiálů

Svařování různorodých materiálů, které mají nestejné chemické složení a rozdílné strukturní báze vede vždy k degradaci jednoho nebo obou svařovaných materiálů. Důvodem je vznik natavené – fúzní – zóny v přechodu materiálu, která má odlišné chemické složení. Při tepelném zpracování stejně jako během dlouhodobého provozu za teplot vyšších než 350 °C probíhají mezi základními materiály a svarovým kovem výrazné difuzní pochody (především uhlíku), které snižují spolehlivost, životnost a bezpečnost svarového spoje [1].

Použití Schaefflerova diagramu

Schaefflerův diagram lze použít ke stanovení strukturních stavů mezi základními materiály a svarovým kovem. Z obr. 3.6 je zřejmé, že v přechodu mezi feritickou ocelí a austenitickým svarovým kovem se vyskytuje směs struktur (včetně martenzitu). Z toho vyplývá, že je bezpodmínečně nutné svařovaný předmět přehřívat a předejít tak vzniku martenzitu s vyšším obsahem uhlíku. Přehřevem na teplotu 150 °C dojde k popuštění martenzitu a k eliminaci možnosti vzniku studených trhlin indukovaných vodíkem a také k výslednému snížení stavu napjatosti spoje po svařování. Schaefflerův diagram také znázorňuje závislost obsahu δ – feritu ve svarovém kovu, kterou vyjadřuje pomocí ekvivalentu chromu a niklu [1, 14].



Obr. 3.6 – Schaefflerův diagram [4]

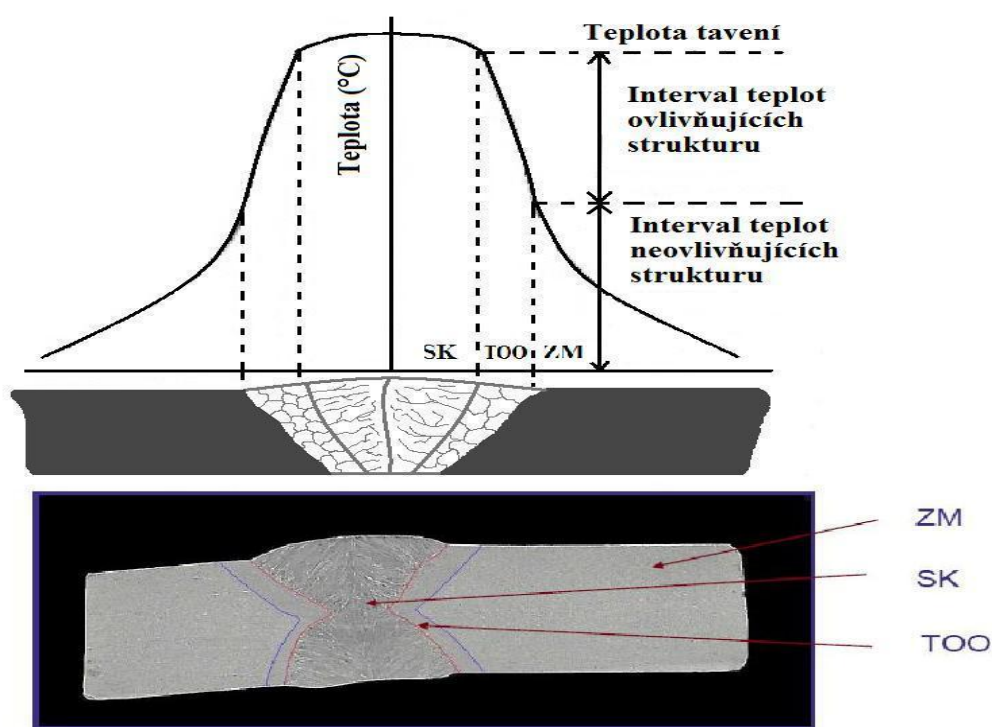
3.2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ A SVAŘOVACÍ ZAŘÍZENÍ

Svařování patří svým charakterem mezi nerozebíratelné druhy spojení dvou anebo více dílů, které je realizováno v důsledku dodání určitého množství energie do místa styku dílů. Podle druhu dodané energie můžeme rozlišit svařování ve stavu tekutém (energie ve formě tepla) a svařování ve stavu tuhém (pomocí kinetické energie) anebo jejich kombinaci [1, 12].

V dnešní době se svařování velmi dobře uplatňuje ve strojírenské výrobě, při výrobě silničních a železničních vozidel, při stavbě lodí, ocelových konstrukcí, tlakových nádob pro chemický a energetický průmysl, stejně jako v elektrotechnice a potravinářství [12].

3.2.1 Struktura svaru

Svarový spoj, znázorněný na obr. 3.1, je nerozebíratelné spojení zhotovené svařováním [12].



Obr. 3.1- Schéma svarového spoje [4]

V praxi rozeznáváme tyto druhy svarů:

- tupý svar – tvar písmene I, Y, V, U nebo W, u větších tloušťek je možné použít oboustranný svar;
- koutový svar – svar rohového, přeplátovaného nebo T spoje;
- bodový svar – používáný hlavně při odporovém svařování;
- lemový svar – vzniká roztavením olemovaných okrajů slabých plechů a provádí se převážně pouze roztavením okrajů bez přídavného materiálu;
- děrový svar – vzniká vyplněním otvoru, který je v jednom ze svařovaných dílů [1].

Teplotní cyklus svařování

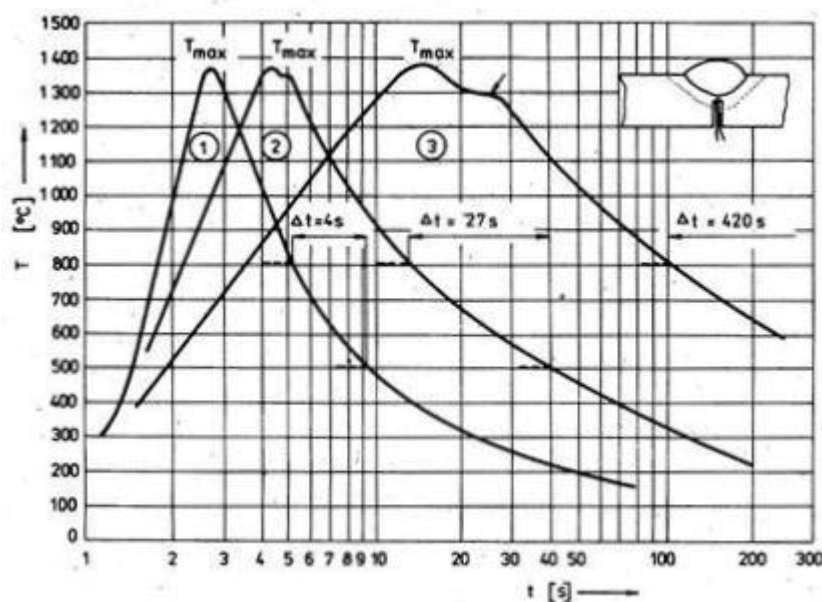
Teplotním cyklem označujeme průběh teploty ve svarovém spoji v době jeho tvorby. Při tomto procesu dochází působením soustředěného zdroje tepla ke krátkodobému intenzivnímu místnímu ohřevu materiálu na vysokou teplotu. Vnesené teplo způsobí, že se malý objem materiálu nataví a v důsledku tepelné vodivosti se ohřívá i okolní oblast základního materiálu. Vysoké teploty a následně jejich změny v základním materiálu způsobují:

- fázové přeměny – tavení základního a přídavného materiálu, jeho tuhnutí a změny v tuhém stavu;
- fyzikálně – chemické reakce;
- změny struktury v oblasti svarového spoje;
- změny objemu, které ve svarovém spoji způsobují vnitřní napětí a deformace [9, 13].

Míra a rozsah takto uvedených změn závisí hlavně na základním materiálu (chemické složení, fyzikální vlastnosti, geometrické rozměry), ale také na způsobu svařování a množství tepla vneseného do svarového spoje na jednotku délky. Teplotní cyklus svařování nám udává změnu teploty v čase v daném místě svarového spoje a především v TOO. Jak už bylo uvedeno, v důsledku působení teplotního cyklu na materiál se mění jeho struktura a vlastnosti, které lze hodnotit na základě charakteristik teplotního cyklu:

- rychlost ohřevu na maximální teplotu cyklu;
- maximální teplota cyklu $T_{\max}$;
- doba výdrže na dané teplotě;
- rychlost ochlazování [3, 13].

Schéma teplotních cyklů pro jednotlivé technologie můžeme vidět na obr. 3.2. Rychlosti ohřevu se u jednotlivých technologií velice liší, při obloukovém svařování se rychlost pohybuje v rozmezí 50 °C – 400 °C/s, při svařování elektronovým nebo laserovým paprskem je rychlost větší než 1000 °C/s, a to má za následek, že se teploty A_1 a A_3 posouvají k vyšším teplotám o 50 °C až 300 °C. Proto například i při teplotě 1000 °C může být ocel feriticko - austenitická a různá koncentrace uhlíku ve feritu a austenitu se vyrovná difuzí. Při dané teplotě je však difuze uhlíku ve feritu asi 40x vyšší než v austenitu a proto se v části TOO vyrovnává chemické složení mnohem rychleji než při technologiích s pozvolnějším teplotním cyklem. Z hlediska strukturních změn v materiálu má největší vliv maximální teplota cyklu a doba setrvání na kritických teplotách. Vliv na polymorfní přeměny a difuzi vodíku má zase ochlazovací větev teplotního cyklu. Při svařování oceli bez předehřevu jsou pro jednotlivé technologie charakteristické časy ochlazování mezi teplotami 800 °C a 500 °C následující: ruční svařování obalenou elektrodou 1 až 10 sekund, v ochranných plynech 2 – 50 sekund, svařování pod tavidlem 10 – 100 sekund a elektrostruskové svařování 60 – 1000 sekund [3, 13].



Obr. 3.2 – Teplotní cykly podhousenkové oblasti, 1 – svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou, 2 – svařování pod tavidlem, 3 – elektrostruskové svařování [13]

Svarový kov

Svarový kov vzniká tavením základního a přídavného materiálu, přičemž jeho vznik je turbulentní. Podíl nataveného základního materiálu ve svarovém kovu označujeme jako promísení. Při svařování kořenové části svarového spoje je promísení vyšší než při svařování výplňové části. Stupeň pomísení se pohybuje od 10 % do 90 % podle použité technologie. Ruční obloukové svařování 10 % až 40 %, svařování pod tavidlem až 80 %, elektrostruskové svařování až 90 %. Použitím určité technologie, jako je například svařování elektrickým odporem anebo elektronovým paprskem dosáhneme toho, že svarový kov je tvořen pouze nataveným základním materiálem. Při poklesu teploty svarového kovu pod teplotu likvidu začíná ve svaru probíhat krystalizace a průběhu tuhnutí probíhají likvační a segregační procesy. Svarový kov krystalizuje hlavně v důsledku heterogenní nukleace na svarových plochách. Mikrostruktura svarového kovu závisí hlavně na jeho chemickém složení a svařovacích parametrech. Houževnatost svarového spoje je většinou nižší než u základního materiálu [13].

Teplem ovlivněná oblast

V důsledku působení velkého zdroje tepla při svařování je teplotně ovlivněný určitý objem základního materiálu, který teplo odvádí a dochází v něm ke změnám mikrostruktury. Tato oblast se nazývá tepelně ovlivněná oblast (TOO). V kovech a slitinách s polymorfní přeměnou dochází v TOO k výrazným strukturním změnám. Při svařování nelegovaných, případně legovaných ocelí s polymorfní přeměnou $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$, můžeme teplem ovlivněnou oblast rozdělit na charakteristická pásma viditelná na obr. 3.3.

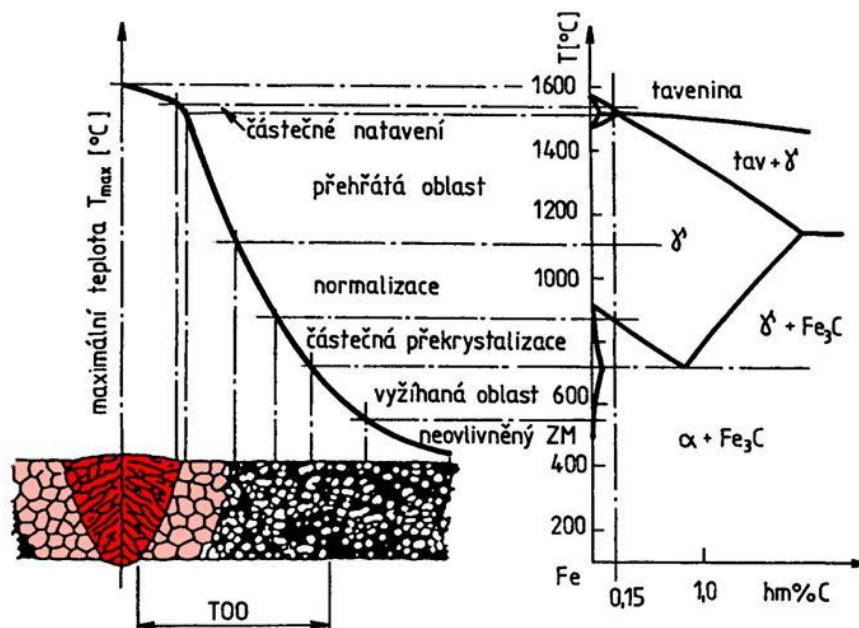
1) V oblasti částečného natavení vidíme přechod z TOO do svarového kovu. U většiny ocelí se tato oblast redukuje na linii, protože rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu je minimální.

2) Přehřátá oblast s teplotami nad A_3 překračuje teplotu intenzivního růstu primárních zrn.

3) Oblast vyhřátá nad A_3 s úplnou transformací $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$.

4) Oblast s neúplnou polymorfní přeměnou, mezi teplotami A_1 a A_3 .

5) Oblast pod teplotou A_1 , ve které probíhají změny v rámci tuhého roztoku α Fe [13, 14].



Obr. 3.3 – Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [13]

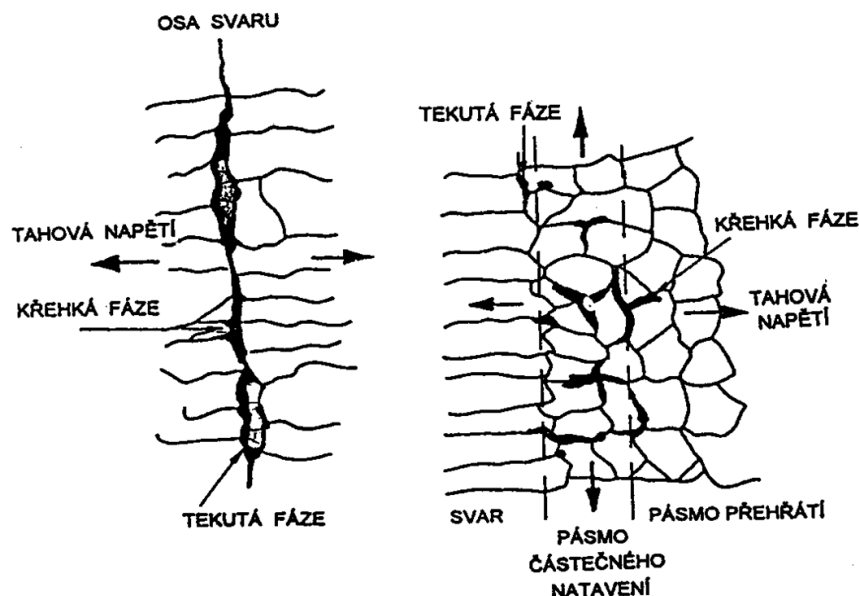
3.2.2 Necelistvosti ve svarových spojích

Je zřejmé, že za příčinu vzniku trhlin ve svarovém kovu může velké vnitřní pnutí při jeho chladnutí. Pokud je konstrukce svarového spoje příliš tuhá, základní materiál nemá dostatečnou zásobu plasticity, aby svou deformací vyrovnal vznikající pnutí, a pokud není dodržen správný technologický postup (předehřev, postup kladení housenek, průměr přídatného drátu a intenzita svařovacího proudu), je předvídatelné, že se tyto nepříznivé okolnosti musí projevit vznikem trhlin [15].

Trhliny za horka

Trhliny za horka vznikají při ochlazování svarových spojů z vysokých teplot (u ocelí nad 850 °C) ve svarovém kovu i v TOO, jak můžeme vidět na obr. 3.4. Hlavní příčinou jejich vzniku je ztráta deformační schopnosti, popř. pokles pevnosti svarového kovu nebo TOO ve svarovém spoji. Rozdělit je můžeme na trhliny:

- krystalizační – tyto trhliny vznikají ve svarovém kovu v průběhu tuhnutí (krystalizace);
- likvační – vznikají ve vysoce ohřátém podhousenkové pásmu teplem ovlivněné oblasti základního materiálu, anebo ve svarovém kovu při několikavrstvém svařování;
- polygonizační – vznikající z důvodu poklesu tažnosti, mohou vznikat jako likvační v TOO nebo ve svarovém kovu při teplotě nižší než 850 °C, tyto trhliny jsou charakteristické u vysokolegovaných austenitických ocelí [14, 16].



Obr. 3.4 – Trhliny za horka [16]

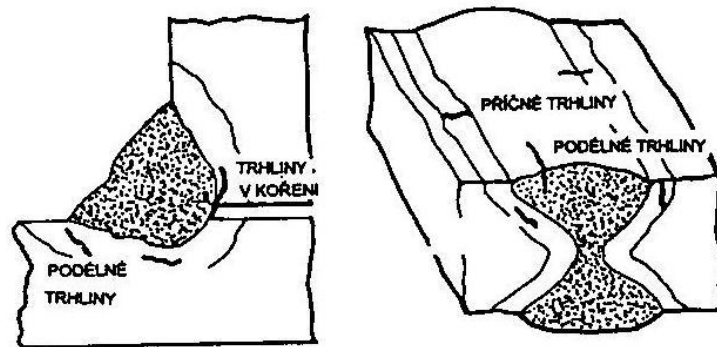
Vznik krystalizačních trhlin se spojuje s poklesem tažnosti okolo teploty solidu, zatímco polygonizační trhliny souvisejí s poruchami na hranicích zrn při ochlazování v oblasti teploty rekystalizace. Za hlavní příčinu vzniku likvačních a krystalizačních trhlin se z hlediska metalurgického považují prvky S, P, B, Nb, Ti a Si, které s železem vytvářejí nízkotavitelné eutektika jako například Fe – FeS ($T_s = 988\text{ °C}$) a Fe – Fe₃P ($T_s = 1048\text{ °C}$). Z tohoto důvodu se doporučuje omezit obsah síry a fosforu na méně než 0,02 hm. % [15].

Vzniku horkých trhlin můžeme zamezit, pokud snížíme měrný příkon svařování, budeme používat přídavné materiály vysoké čistoty, omezíme deformaci a napětí použitím vhodných svařovacích technik, tvarem svarového spoje a předehřevem [16].

Studené trhliny

Po ukončení svařování, anebo po nanášení jednotlivých housenek nebo vrstev svarového kovu může dojít k defektům, které jsou označovány jako studené trhliny, trhliny indukované vodíkem nebo zbrzděné lomy. Tyto defekty vznikají při nízkých teplotách asi pod 200°C. Jejich orientace může být podélná, nebo příčná viz obr. 3.5. Charakter lomu je transkrystalický, povrch lesklý a neoxidovaný. Hlavní příčinou jejich vzniku je splnění těchto tří předpokladů:

- ve svarovém spoji je přítomen vodík;
- struktura materiálu je citlivá na přítomnost vodíku (spodní bainit, martenzit);
- přítomnost zbytkových tlakových napětí [14, 16].

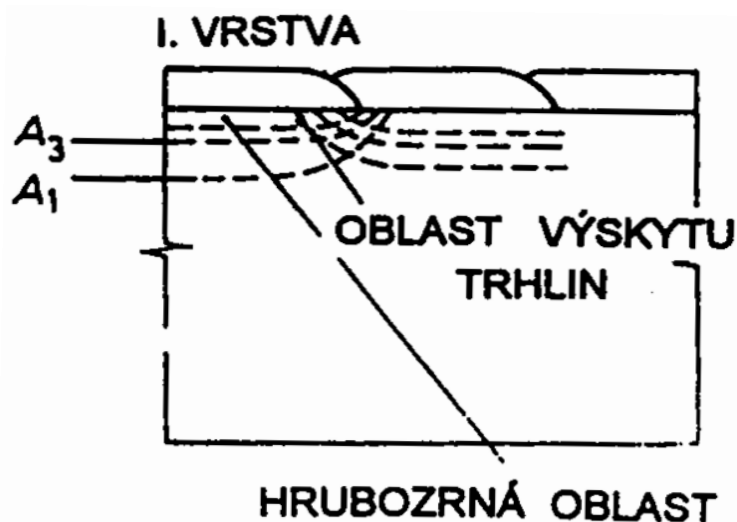


Obr. 3.5 – Typy studených trhlin [16]

Zdrojem vodíku ve svaru bývá nejčastěji atmosférická vlhkost, vlhkost z obalu elektrod, tavidel a svařovacích drátů. Je známo, že náchylnost ocelí na vznik studených trhlin velmi úzce souvisí s jejich prokalitelností, resp. s transformačním zkřehnutím. Vliv chemického složení na náchylnost oceli na zakalení v TOO a tím i na náchylnost na vznik studených trhlin můžeme vyjádřit uhlíkovým ekvivalentem. Na transformační zkřehnutí má největší vliv svařovací cyklus. Přechodná a zbytková napětí ovlivňují vznik studených trhlin do tak velké míry, že vznikají pouze, působí-li ve svarovém spoji tahová napětí. Vzniku studených trhlin můžeme zamezit použitím nízkovodíkové technologie svařování, pečlivým vysušením přídavných materiálů, aplikací předehřevu, dohřevu a vyššího měrného příkonu svařování, minimalizací vzniku zbytkových napětí po svařování a vyvarování se ostrých vad zejména v kořenové oblasti jako jsou neprůvary a studené spoje, které jsou místy koncentrace napětí [14, 16].

Žíhací trhliny

Žíhací trhliny vznikají, případně se šíří ve svarových spojích při tepelném zpracování, kdy se většinou jedná o žíhání ke snížení pnutí v oblasti teplot pod A_1 . Žíhací trhliny mohou vznikat za nízkých teplot, tj. v průběhu ohřevu na žíhací teplotu ($200\text{ }^{\circ}\text{C} - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) a to tehdy, pokud je rychlost ohřevu veliká a mezi povrchem a jádrem svaru vznikne veliký teplotní rozdíl. Mohou též vznikat v oblasti vysokých žíhacích teplot ($600\text{ }^{\circ}\text{C} - 650\text{ }^{\circ}\text{C}$) v podhousenkové oblasti, viz obr. 3.6. Příčinou jejich iniciace je snížení plastických vlastností kritické oblasti precipitačním vytvrzením a zkřehnutí hranic zrn segregací povrchově aktivních prvků. Proto se tento typ trhlin vyskytuje při tepelném zpracování svarových spojů nízkolegovaných CrMo a CrMoV ocelí. Náchylnost ke vzniku trhlin zvyšují povrchově aktivní prvky, jako Cu, Sn, Sb, As. Množství těchto prvků by se mělo pohybovat do 0,003 až 0,005 hm. %. K tomu, abychom zamezili vzniku žíhacích trhlin je zapotřebí většinou upravit žíhací režim a to hlavně snížením rychlosti ohřevu na žíhací teplotu (zvláště do teploty $250\text{ }^{\circ}\text{C}$), ale také rychlost ochlazování z žíhací teploty. Jako další opatření můžeme brát žíhání z mezioperační teploty, anebo pokud je ocel náchylná na trhliny v oblasti žíhacích teplot, je možné použít dvojstupňové žíhání [14, 16].



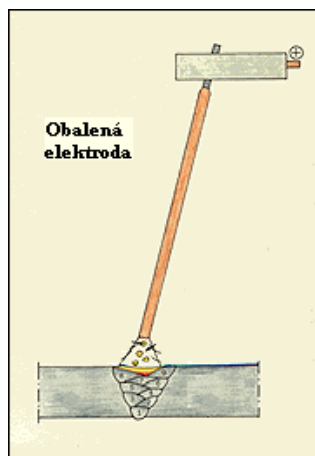
Obr. 3.6 – Oblast výskytu žíhacích trhlin [16]

3.2.3 Metody svařování

Ruční svařování obalenou elektrodou

Při obloukovém svařování obalenou elektrodou je zdrojem tepla elektrický oblouk, který hoří mezi elektrodou a svařovaným materiálem a dochází k tavení elektrody a povrchu základního materiálu jak můžeme vidět na obr. 3.7. Roztavený kov elektrody přechází spolu s taveným struskovým obalem sloupcem oblouku do roztavené lázně svařovaného materiálu. Vzájemným smíšením roztavených materiálů se vytvoří svar, který je chráněn struskovým příkrovem. Touto metodou lze svářet v podstatě všechny materiály a ve všech polohách svařovacím proudem 50 – 300 A s napětím 20 – 40 V, přičemž teplota oblouku dosahuje až 5000 °C. Svařovat můžeme stejnosměrným proudem s polaritou přímou i obrácenou, ale také střídavým proudem. Výsledné vlastnosti svarového kovu jsou určeny především průběhem metalurgických reakcí mezi svarovým kovem a struskou. Pro ruční svařování elektrickým obloukem se používají obalené elektrody, které se skládají z jádra (drátu) a obalu. Jádro elektrody vytváří kov, který se v oblouku taví souběžně s obalem. Roztavený kov je pomocí elektrického oblouku přenášen do svaru a po promísení s nataveným základním materiálem vytváří svarový spoj. Obal elektrody pak příznivě ovlivňuje proces a techniku svařování a výslednou jakost svaru. Za hlavní funkce obalu elektrody považujeme:

- chránit svarový kov před účinky atmosféry;
- usnadnit zapálení a stabilizaci oblouku;
- ovlivnit metalurgické pochody při tavení a chladnutí taveného kovu (obal obsahuje struskotvorné přísady – magnezit, křemičitany, dolomit a další);
- ochrana před vypálením některých prvků a dolegování roztaveného kovu, je-li to potřeba;
- zvýšení produktivity svařování;
- zajištění snadného odstranění strusky z povrchu svarového kovu [17, 18].



Obr. 3.7 – Ruční svařování obalenou elektrodou [22]

Svařování pod tavidlem

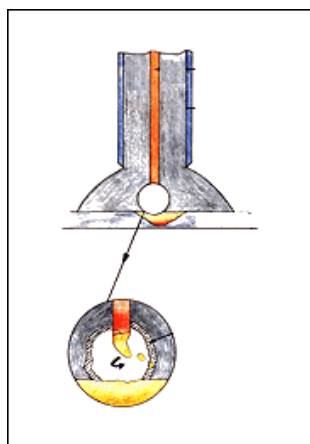
Elektrický oblouk hoří pod vrstvou tavidla a postupným tuhnutím roztavené kovové lázně dochází ke spojení svařovaných dílů, viz obr. 3.8. Výrobky, které jsou zhotovené touto metodou, pracují ve velmi náročných podmínkách. Princip této technologie spočívá v natavení svarové hrany základního materiálu pomocí tepelné energie vyvinuté v elektrickém oblouku, která zároveň roztavuje elektrodu (holý svařovací drát). Svarový kov poté vyplní část svarového úkosu pod vrstvou tavidla [19].

Tavidla zajišťují především stabilní hoření oblouku, desoxidaci, rafinaci a metalurgické procesy a podobně jako obal elektrod plní několik funkcí:

- chrání roztavenou lázeň proti účinkům atmosféry;
- rafinuje svarovou lázeň (především snižuje obsah síry);
- dolegovává svarový kov;
- formuje svarovou housenku;
- zabraňuje rychlému odvodu tepla z místa svařování [19].

S touto technologií lze svařovat materiály tloušťky 3 až 100 mm (ale i více), při svařovacím proudu 200 až 2000 A a napětím oblouku 20 až 50 V, přičemž její výhody jsou:

- velký průvar do základního materiálu;
- velká proudová hustota i při tenkých svařovacích drátech;
- vysoká kvalita svaru [17].



Obr. 3.8 – Svařování pod tavidlem [22]

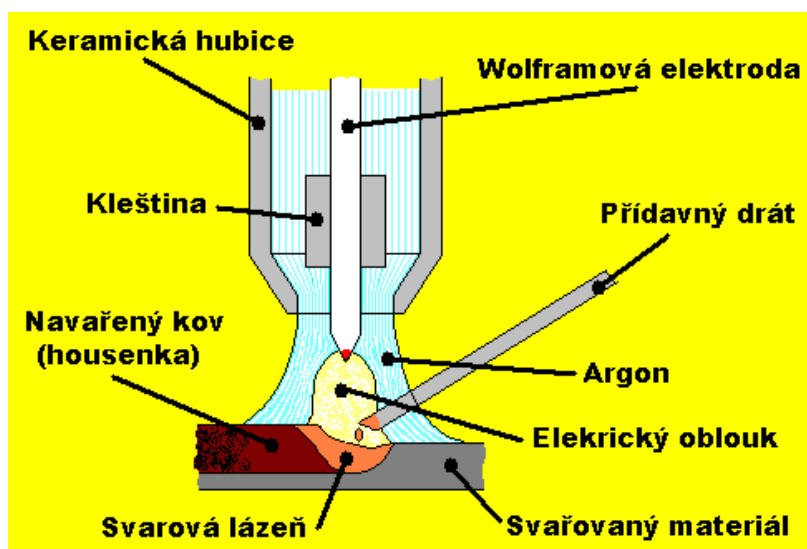
Svařování pod tavidlem do úzké mezery

V této technologii jde v podstatě o mnohovrstvé svařování se specifickým svarovým úkosem, jehož tvar je volen tak, aby každá vrstva byla složena ze dvou housenek. Vytvoření bezdefektního svarového spoje s požadovanými mechanickými vlastnostmi včetně snadného odstranění strusky v průběhu svařování je otázkou především technologie svařování, která se týká vhodné skladby housenek, svařovacích parametrů a přídavných materiálů. Na formovací vlastnosti tavidla jsou kladeny vysoké nároky – tavidlo musí dokonale formovat svarové housenky bez vrubového účinku do stěny svarového úkosu a také musí vytvářet pouze tenkou vrstvu strusky, která se z povrchu housenky samovolně uvolňuje [19].

Svařování metodou GTAW

Metoda GTAW spočívá ve vzniku a hoření elektrického oblouku mezi netavicí se wolframovou elektrodou a základním materiálem a zároveň je svarová lázeň a blízké okolí svaru chráněno inertním plynem před účinky atmosféry, jak můžeme vidět na obr. 3.8. Netavící se elektroda je buď čistě wolframová nebo obohacená oxidy ThO_2 , ZrO_2 , LaO_2 nebo CeO_2 . Inertní plyn je buď helium, argon nebo jejich směs. Zdrojem tepla při svařování touto metodou je elektrický oblouk, který místně nataví svarové plochy základního materiálu a odtavením potřebného množství přídavného materiálu se vytvoří svarová lázeň, která dále tuhne a vytváří tak nerozebíratelný svarový spoj. Tato metoda se velmi dobře uplatňuje při svařování neželezných kovů, vysokolegovaných, legovaných, nízkolegovaných i nelegovaných ocelí, a to jak pro automatické svařování nejnáročnějších svarů v jaderné energetice, letectví a kosmonautice tak i pro automatové a ruční svařování v malosériové výrobě. Výhody použití metody GTAW jsou:

- svařování s přídavným materiálem bez propalu prvků nám zajistí přesné legování svarového kovu;
- příznivé formování svarové housenky jak na straně povrchu, tak i v kořenové části svaru;
- elektrický oblouk je stabilní v širokém rozsahu proudů;
- vytváří svary vysoké celistvosti i na materiálech náchylných na naplynění a oxidaci při vysokých teplotách;
- svarová lázeň je viditelná a snadno ovladatelná;
- možnost přesného dávkování vneseného tepla do svaru [17, 20].

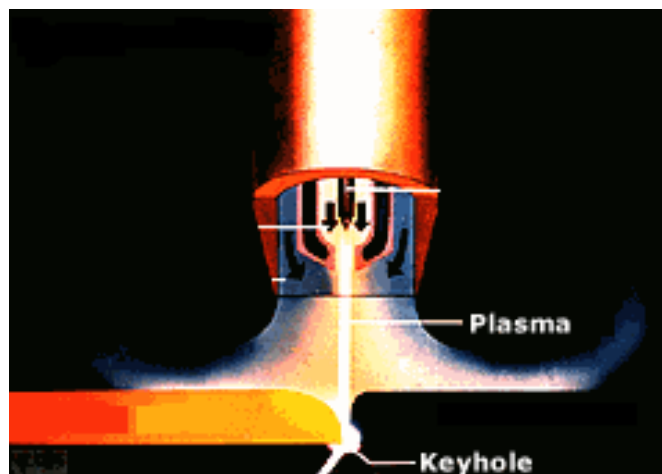


Obr. 3.8 – Svařování metodou GTAW [23]

Svařování plasmou

Plazmový oblouk hoří díky disociovanému a vysoce ionizovanému plynu. Koncentrovaný sloupec tohoto plazmového média vzniká stabilizací elektrického oblouku průchodem chlazenou tryskou. Na vnitřním povrchu stěn trysky pak dochází k rekombinaci ionizovaných částic a tím se jádro sloupce silně přehřívá a vznikající úzký sloupec plazmového oblouku se projeví svými specifickými vlastnostmi, jako je třeba vysoce koncentrovaná energie. Část plynu, která není ionizována a je tudíž chladnější, stabilizuje plazmový paprsek v ose hořáku tak, aby se plazma nedotýkala stěn trysky. Jestliže je energie plazmy vyšší než 10^5 W/cm^2 , přenos tepla vede k velmi rychlému ohřevu kovu a vytvoří se dutina ve tvaru kapiláry zvaná KEY HOLE, která je znázorněná na obr. 3.9. Tato kapilára proniká přes celou tloušťku materiálu, anebo zaniká hluboko pod povrchem. Teplota plazmy je určována především rychlostí částic v plazmovém paprsku (závislost na proudu), počtem srážek a počtem zpětným vazebných procesů, při kterých se uvolňuje teplo. Vzhledem k vysokému dynamickému účinku plazmového paprsku je možné svařovat i tupé svary typu I se spolehlivým provařením kořene do větších tloušťek bez nutnosti úpravy svarového úkosu. Plazmové svařování má tyto výhody:

- způsob uložení elektrody v hořáku zamezuje jejímu znečištění;
- jednoduchá úprava svarových ploch středních tloušťek do 12 mm;
- spolehlivé protavení celého kořene a zamezení vzniku studených spojů díky „KEY HOLE“;
- vysoká rychlost svařování, dobrý průvar, tvar svaru a rovnoměrný povrch housenky;
- malá TOO v závislosti na tepelném příkonu;
- možnost mechanizace a robotizace;
- vysoká čistota svarů bez pórů a bublin;
- dobré mechanické vlastnosti svarového spoje [17, 21].



Obr. 3.9 – Svařování plasmou [22]

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL A TECHNIKA

Základní materiál

Jako základní materiál byla použita nízkolegovaná žárovevná ocel 30CrMoNiV 5-11 s daným chemickým složením dle protokolu od dodavatele (Žďas, Žďár nad Sázavou), které je uvedené v tabulce tab. 4.1.

Tab. 4.1. Chemické složení nízkolegované žárovevné oceli 30CrMoNiV 5-11

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al
Hm. %	0,31	0,6	0,02	0,005	0,001	1,25	0,7	1,1	0,31	0,005

Chemický rozbor svarového kovu

Na vzorku svarového spoje byl proveden chemický rozbor svarového kovu v 5 místech svaru. Chemická analýza byla provedena na spektrometru fy Leco, Spectrumat GDS 750. Výsledná analýza chemického složení svarového kovu je uvedena v tab. 4.2.

Tab. 4.2. Chemické složení svarového kovu

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al
Hm. %	0,07	0,85	0,73	0,014	0,006	1,57	0,59	1,08	0,28	0,039

Mikrostruktura svarového spoje

Mikrostruktura svarového spoje byla hodnocena v řezu v rovině kolmé na osu svaru. Metalografický výbrus vzorku byl připraven standardními technikami – broušením a leštěním. Mikrostruktura byla zviditelněna chemickým leptáním pomocí 2% leptadla Nital (roztok kyseliny dusičné v etylalkoholu). Mikrostruktura materiálu byla pozorována na světelném mikroskopu Olympus GX-71 s digitálním fotoaparátem DP11 a to při zvětšení 50x a 500x.

Měření tvrdosti a mikrotvrdosti

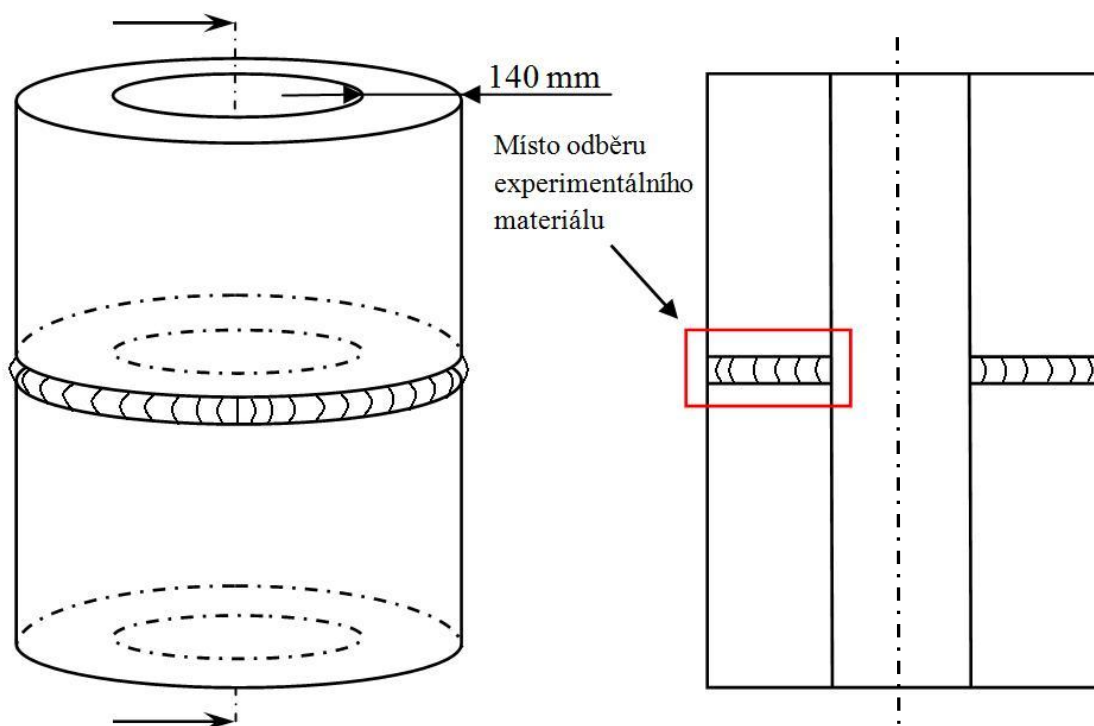
Tvrdost svarového spoje byla hodnocena na vzorku použitým pro hodnocení mikrostruktury. Zviditelněná struktura posloužila pro lepší orientaci vtisků tvrdoměru vzhledem k rozhraní svarového kovu a základního materiálu.

Tvrdost svarového spoje byla měřena Vickersovou metodou HV10 v souladu s ČSN EN ISO 6507 – 1 [24] v řadách vtisků ležících na přímkách kolmých ke středové rovině svaru (osa svaru) a dále v lící, střední a kořenové části svarového spoje. Poloha přímek a rozestup měřených míst svaru byl proveden v souladu s normou ČSN EN 1043 – 1 [25]. Měření bylo provedeno pomocí tvrdoměru LECO LV 700.

Mikrotvrdost svarového spoje byla měřena metodou dle Vickerse při nízkém zatížení HV1 v souladu s normou ČSN EN 1043 – 2 [26]. Měření bylo provedeno pomocí automatického mikrotvrdoměru LECO LM 247AT.

Schéma svařence rotoru

Zkoumaný vzorek byl odebrán po svaření dvou prstencových profilů (tloušťka stěny cca 140 mm) viz obr. 4.0, které byly svařeny obloukovým svařováním pod tavidlem (doba svařování cca 12 hodin). Metoda svařování spočívala v postupném kladení housek s použitím přídatného drátu tloušťky 3 mm do vzdálenosti 70 mm od kořene svaru, poté byl použit přídatný drát tloušťky 4 mm. Před vlastní svařováním byl proveden přehřev svařovaných částí na teplotu 350 °C. Celý svarový spoj byl následně po dobu 24 hodin žihán na teplotě 690 °C.



Obr. 4.0 – Svařený segment rotoru parní turbíny

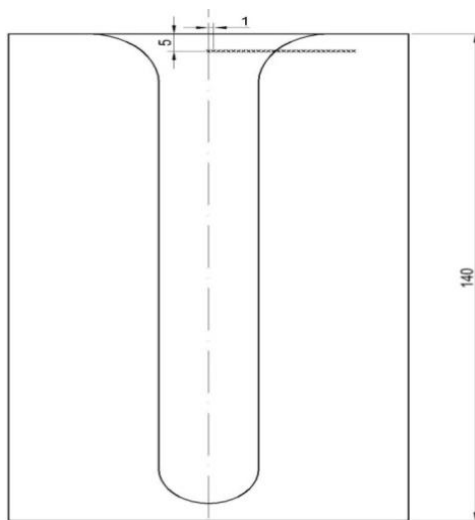
4.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

4.2.1 Hodnocení makrotvrdosti a mikrotvrdosti svarového spoje

Měření tvrdosti na lící, středové a kořenové části svaru probíhalo vždy do vzdálenosti 5 mm ve svarovém kovu od rozhraní (viz červená linie v grafech – např. na obr. 4.3 a 4.4) a 14 mm přes TOO a základní materiál.

Měření tvrdosti a mikrotvrdosti svarového spoje na lící straně

Měřením tvrdosti a mikrotvrdosti svarového spoje na lící straně bylo zjištěno, že naměřené hodnoty tvrdosti i mikrotvrdosti v žádném případě nepřekračují max. povolenou hodnotu 350 HV - viz graf na obr. 3.2. Výsledky měření tvrdosti a mikrotvrdosti na lící straně svarového spoje (viz obr. 4.1 a obr. 4.2) jsou uvedeny v tab. 4.3 a v grafech na obr. 4.3 a obr. 4.4. Na obr. 4.3 a obr. 4.4 je červenou čarou vyznačeno rozhraní svarového spoje, resp. přechod ze svarového kovu do TOO.



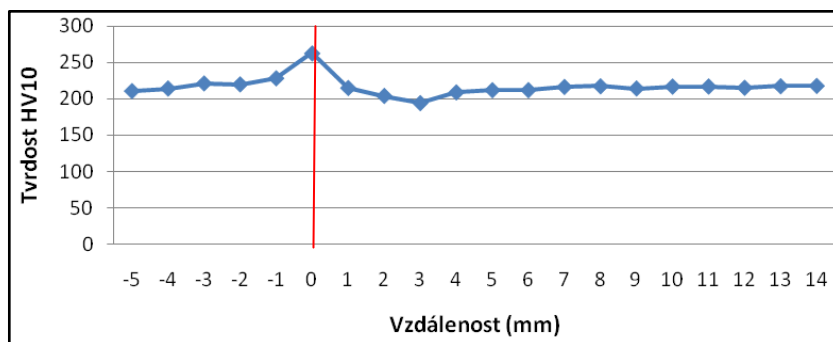
Obr. 4.1 – Poloha řady vtisků – lící strana



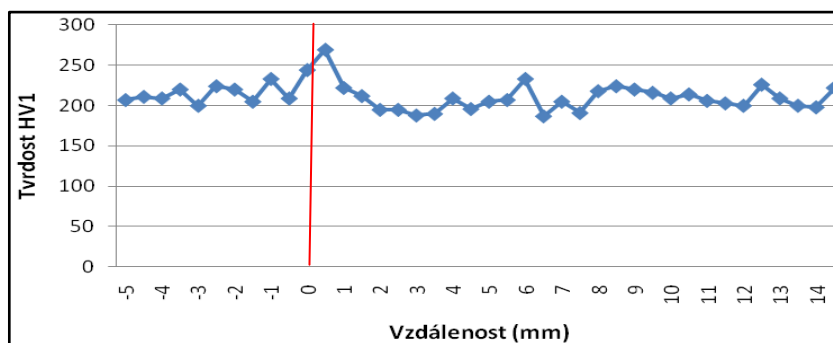
Obr. 4.2 – Vtisky mikrotvrdoměru přes SK, TOO a ZM na lící straně svarového spoje

Tab. 4.3 Průběh makro a mikrotvrdosti v lící straně svarového spoje

Lící strana - makro a mikrotvrdost					
Vzdálenost	Tvrdost HV10	Vzdálenost	Tvrdost HV1	Vzdálenost	Tvrdost HV1
-5	210,7	-5	207	5	205
-4	214,4	-4,5	211	5,5	207
-3	221,3	-4	209	6	233
-2	220	-3,5	220	6,5	187
-1	228,3	-3	200	7	205
0	262,8	-2,5	224	7,5	191
1	214,9	-2	220	8	218
2	203,9	-1,5	205	8,5	224
3	194	-1	233	9	220
4	208,8	-0,5	209	9,5	216
5	211,9	0	244	10	209
6	212	0,5	269	10,5	214
7	216,4	1	222	11	206
8	217,3	1,5	212	11,5	203
9	214,3	2	195	12	200
10	216,9	2,5	195	12,5	226
11	217	3	188	13	209
12	215,2	3,5	190	13,5	200
13	217,3	4	209	14	198
14	217,8	4,5	196	14,5	222



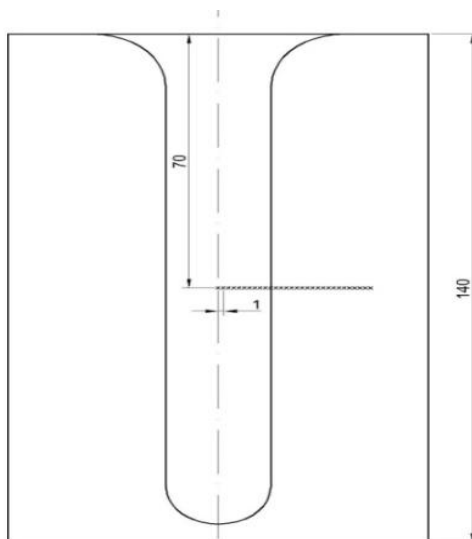
Obr. 4.3 – Průběh makrotvrdosti – lící strana



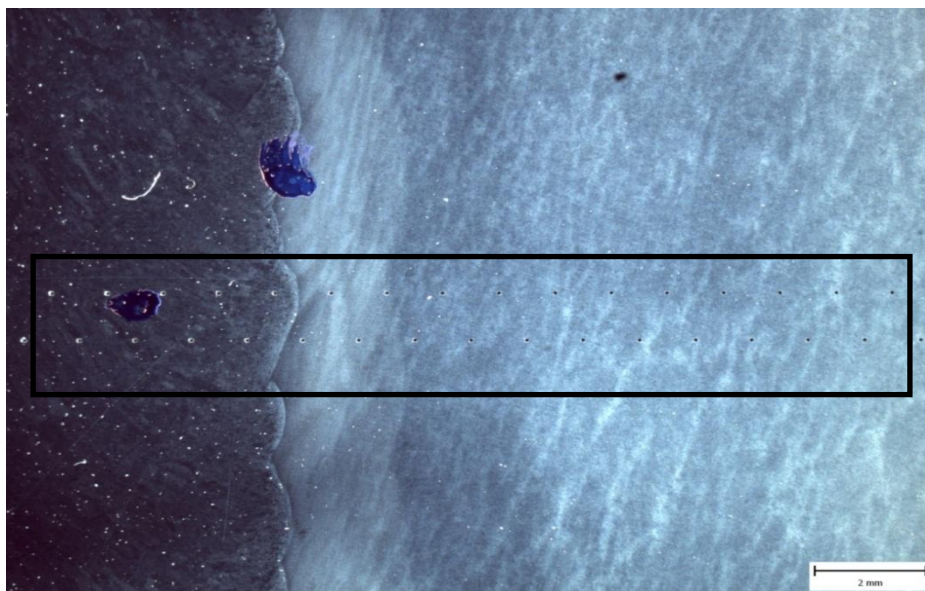
Obr. 4.4 – Průběh mikrotvrdosti – lící strana

Měření tvrdosti a mikrotvrdosti svarového spoje na střední části

Měřením tvrdosti a mikrotvrdosti svarového spoje na střední části bylo zjištěno, že naměřené hodnoty tvrdosti i mikrotvrdosti v žádném případě nepřekračují max. povolenou hodnotu 350 HV - viz graf na obr. 3.2. Výsledky měření tvrdosti a mikrotvrdosti na střední části svarového spoje (viz obr. 4.5 a obr. 4.6) jsou uvedeny v tab. 4.4 a v grafech na obr. 4.7 a obr. 4.8. Na obr. 4.7 a obr. 4.8 je červenou čarou vyznačeno rozhraní svarového spoje, resp. přechod ze svarového kovu do TOO.



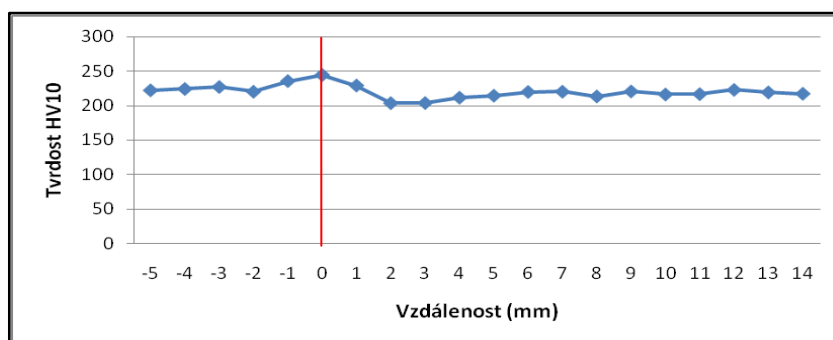
Obr. 4.5 – Poloha řady vtisků – střední část



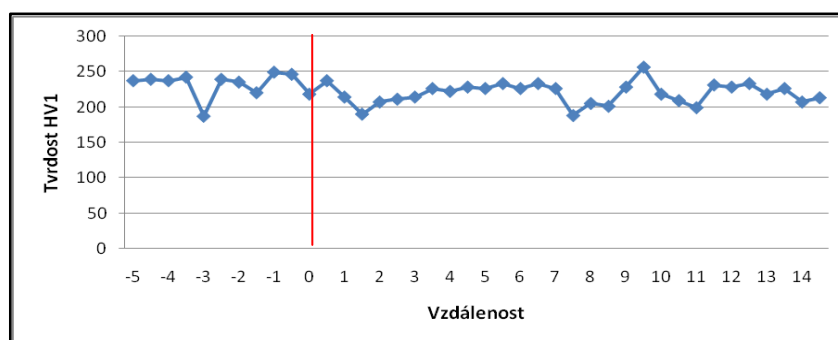
Obr. 4.6 – Vtisky mikrotvrdoměru přes SK, TOO a ZM ve střední poloze svarového spoje

Tab. 4.4 Průběh makro a mikrotvrdosti ve střední poloze svarového spoje

Střední část - makro a mikrotvrdost					
Vzdálenost	Tvrdost HV10	Vzdálenost	Tvrdost HV1	Vzdálenost	Tvrdost HV1
-5	221,9	-5	237	5	226
-4	223,9	-4,5	239	5,5	233
-3	226,8	-4	237	6	226
-2	219,9	-3,5	242	6,5	233
-1	235,3	-3	187	7	226
0	244,1	-2,5	239	7,5	188
1	228,9	-2	235	8	205
2	203,4	-1,5	220	8,5	201
3	203,6	-1	249	9	228
4	211,4	-0,5	246	9,5	256
5	214,2	0	218	10	218
6	219,6	0,5	237	10,5	209
7	219,9	1	214	11	199
8	213,1	1,5	190	11,5	231
9	220,3	2	207	12	228
10	215,9	2,5	211	12,5	233
11	216,4	3	214	13	218
12	222,6	3,5	226	13,5	226
13	218,9	4	222	14	207
14	217	4,5	228	14,5	213



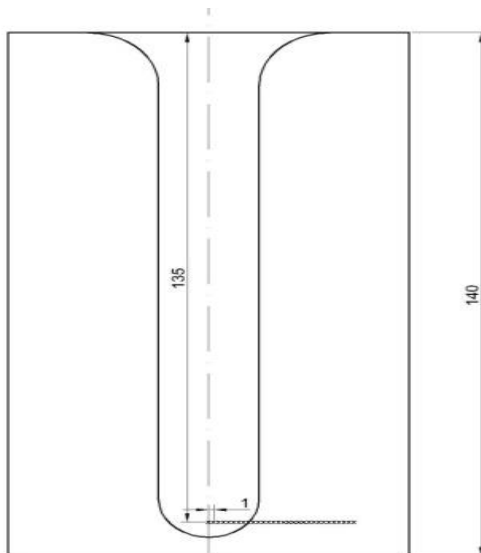
Obr. 4.7 – Průběh makrotvrdosti - střední část



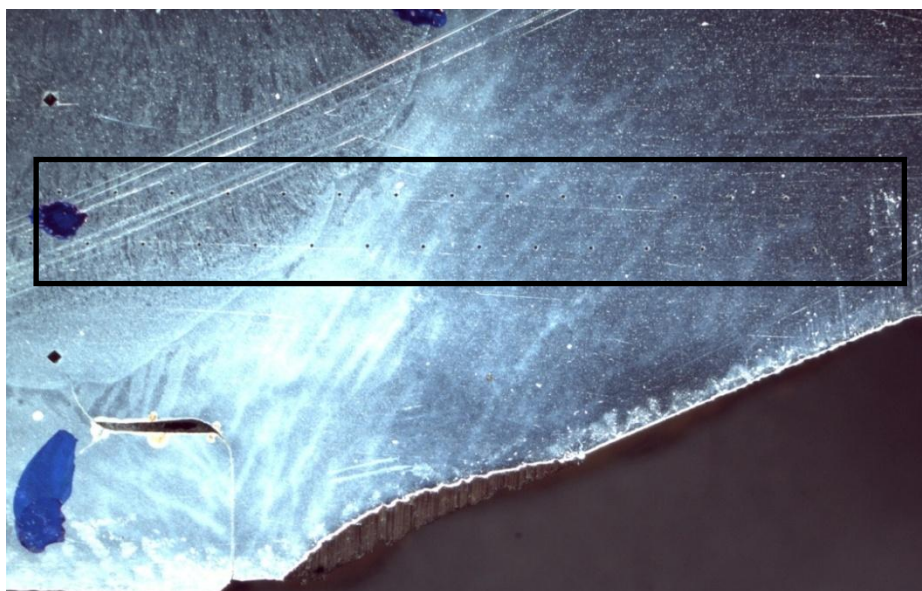
Obr. 4.8 – Průběh mikrotvrdosti - střední část

Měření tvrdosti a mikrotvrdosti svarového spoje na kořenové straně

Měřením tvrdosti a mikrotvrdosti svarového spoje na kořenové straně bylo zjištěno, že naměřené hodnoty tvrdosti i mikrotvrdosti v žádném případě nepřekračují max. povolenou hodnotu 350 HV - viz graf na obr. 3.2. Výsledky měření tvrdosti a mikrotvrdosti na kořenové straně svarového spoje (viz obr. 4.9 a obr. 4.10) jsou uvedeny v tab. 4.5 a v grafech na obr. 4.11 a obr. 4.12. Na obr. 4.11 a obr. 4.12 je červenou čarou vyznačeno rozhraní svarového spoje, resp. přechod ze svarového kovu do TOO.



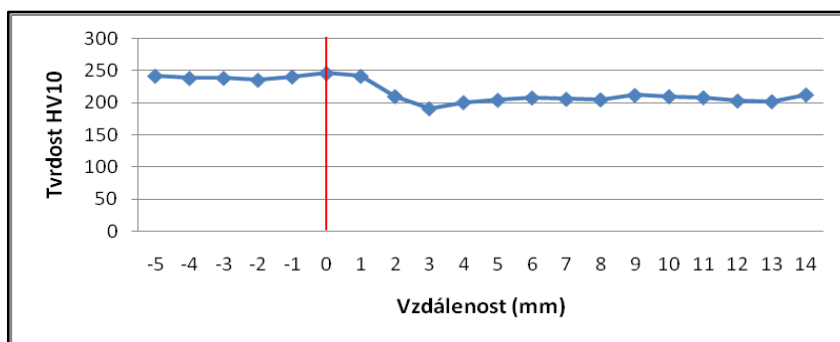
Obr. 4.9 – Poloha řady vtisků – kořenová strana



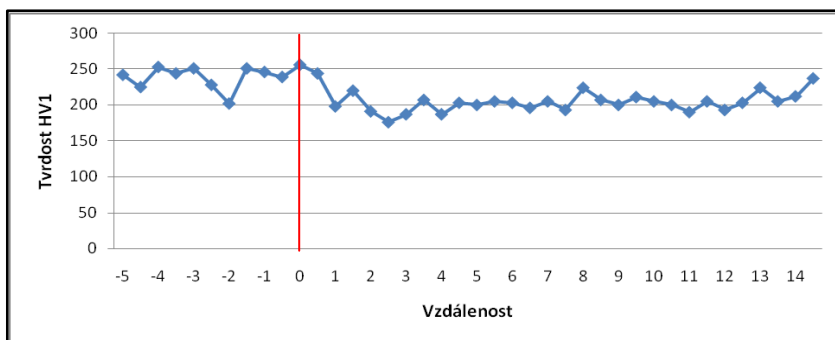
Obr. 4.10 – Vtisky mikrotvrdoměru přes SK, TOO a ZM v kořenové straně svarového spoje

Tab. 4.5 Průběh makro a mikrotvrdosti v kořenové straně svarového spoje

Kořenová strana - makro a mikrotvrdost					
Vzdálenost	Tvrdost HV10	Vzdálenost	Tvrdost HV1	Vzdálenost	Tvrdost HV1
-5	241,9	-5	242	5	200
-4	238,3	-4,5	225	5,5	205
-3	238,5	-4	253	6	203
-2	235,6	-3,5	244	6,5	196
-1	240,6	-3	251	7	205
0	246,1	-2,5	228	7,5	193
1	241,6	-2	202	8	224
2	210	-1,5	251	8,5	207
3	191	-1	246	9	200
4	200,6	-0,5	239	9,5	211
5	204,2	0	256	10	205
6	207,8	0,5	244	10,5	200
7	205,8	1	198	11	190
8	204,9	1,5	220	11,5	205
9	211,9	2	191	12	193
10	209,9	2,5	176	12,5	203
11	208,2	3	187	13	224
12	203,1	3,5	207	13,5	205
13	202	4	187	14	212
14	212,6	4,5	203	14,5	237



Obr. 4.11 – Průběh makrotvrdosti - kořenová strana



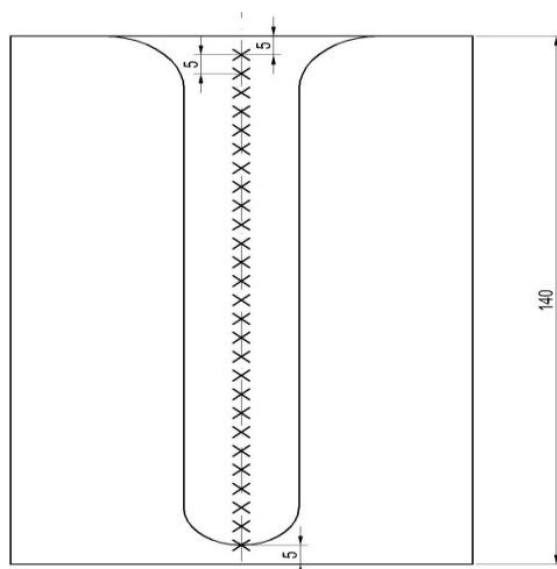
Obr. 4.12 – Průběh mikrotvrdosti - kořenová strana

Měření tvrdosti a mikrotvrdosti svarového spoje v ose svaru

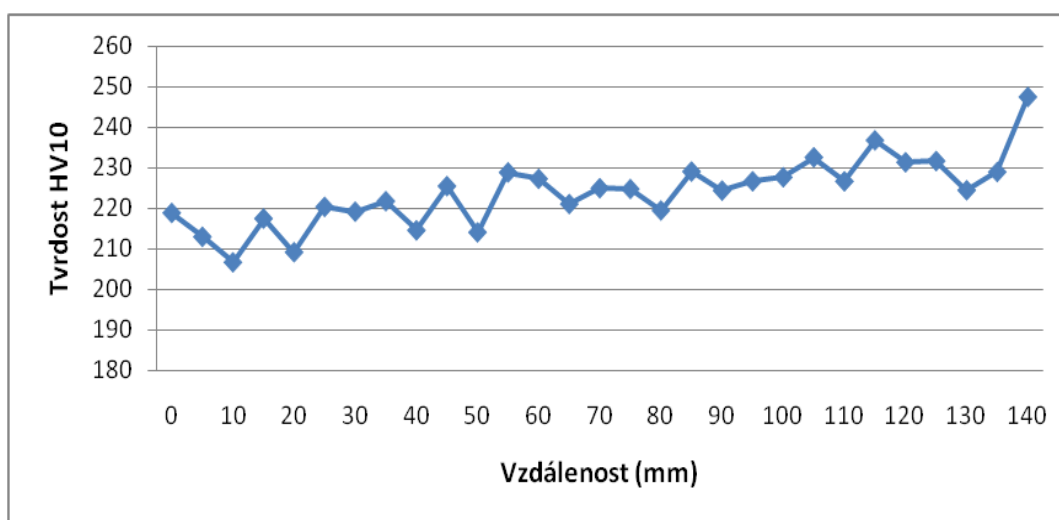
Měřením tvrdosti a mikrotvrdosti svarového spoje v ose svaru bylo zjištěno, že naměřené hodnoty tvrdosti i mikrotvrdosti v žádném případě nepřekračují max. povolenou hodnotu 350 HV - viz graf na obr. 3.2. Výsledky měření tvrdosti a mikrotvrdosti v ose svarového spoje (viz obr. 4.13) jsou uvedeny v tab. 4.6 a v grafech na obr. 4.14 a obr. 4.15.

Tab. 4.6 Průběh makro a mikrotvrdosti v ose svarového spoje

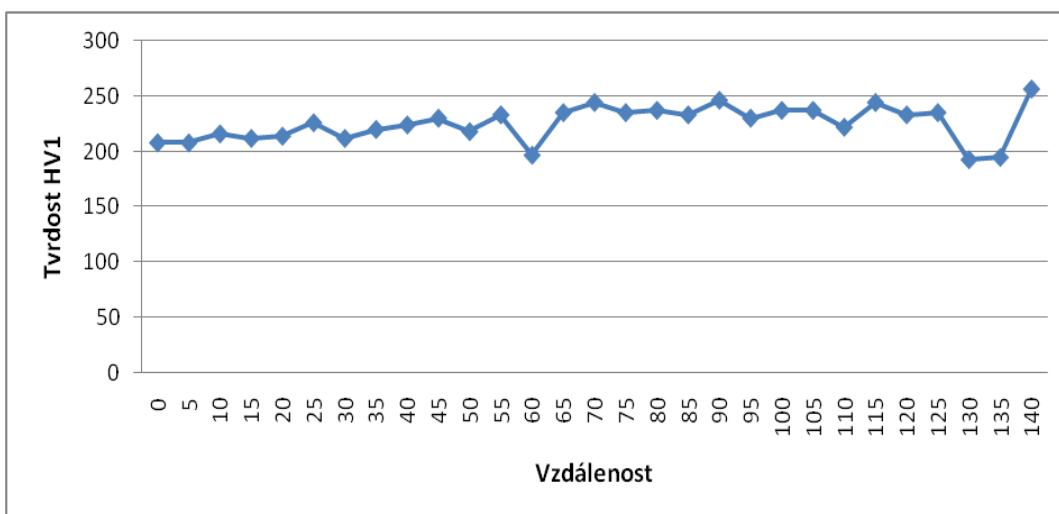
Osa svaru – makro a mikrotvrdost			
Vzdálenost	Tvrdost HV10	Vzdálenost	Tvrdost HV1
0	218,8	0	208
5	212,9	5	208
10	206,6	10	216
15	217,4	15	212
20	209,1	20	214
25	220,3	25	226
30	219,1	30	212
35	221,7	35	220
40	214,5	40	224
45	225,4	45	230
50	214	50	218
55	228,8	55	233
60	227,2	60	197
65	221	65	235
70	224,9	70	244
75	224,7	75	235
80	219,4	80	237
85	229	85	233
90	224,3	90	246
95	226,6	95	230
100	227,6	100	237
105	232,5	105	237
110	226,6	110	222
115	236,7	115	244
120	231,3	120	233
125	231,6	125	235
130	224,4	130	193
135	228,9	135	195
140	247,4	140	256



Obr. 4.13 – Poloha řady vtisků – osa svaru



Obr. 4.14 – Průběh makrotvrdosti – osa svaru

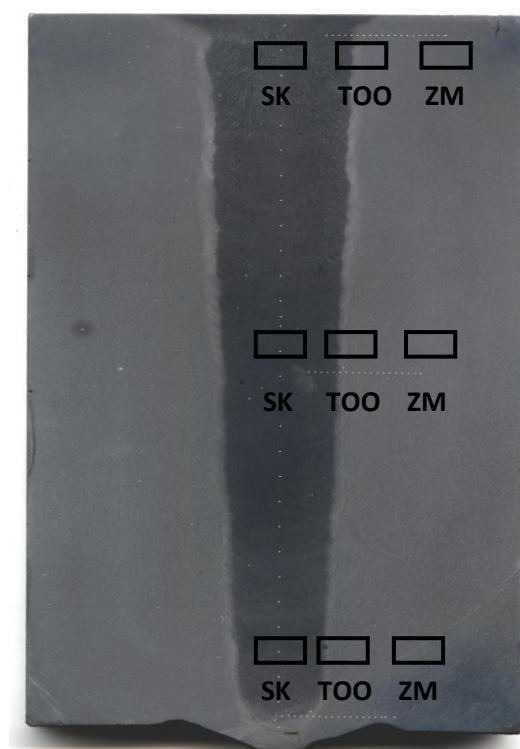


Obr. 4.15 – Průběh mikrotvrdosti – osa svaru

4.2.2 Makroskopický a mikroskopický rozbor svarového spoje

Tab. 4.7 Označení snímků pro hodnocení struktury svarového spoje

	Zvětšení	Svarový kov (SK)	Tepelně ovlivněná oblast (TOO)	Základní materiál (ZM)
Lící strana svaru	50 x	Obr. 4.18	Obr. 4.20	Obr. 4.22
	500x detail oblasti	Obr. 4.19	Obr. 4.21	Obr. 4.23
Střední část svaru	50 x	Obr. 4.24	Obr. 4.26	Obr. 4.28
	500x detail oblasti	Obr. 4.25	Obr. 4.27	Obr. 4.29
Kořenová část svaru	50 x	Obr. 4.30	Obr. 4.32	Obr. 4.34
	500x detail oblasti	Obr. 4.31	Obr. 4.33	Obr. 4.35



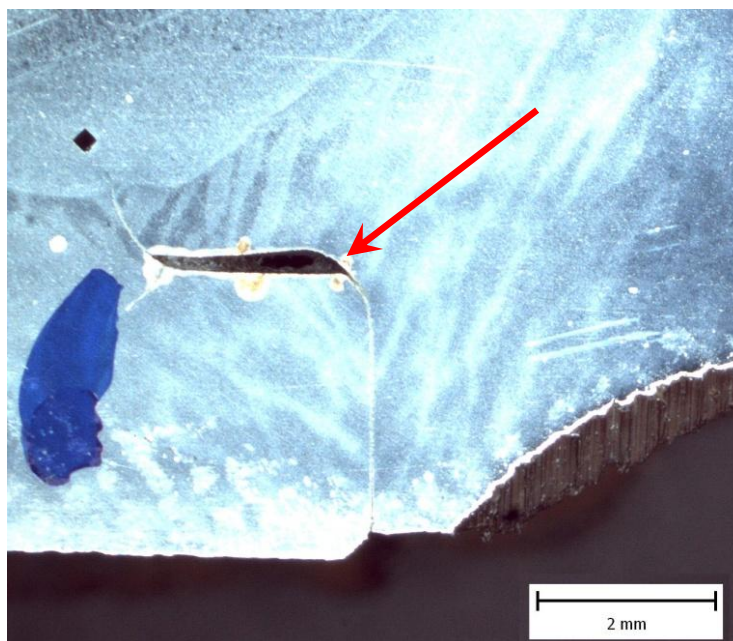
Obr. 4.16 – makropohled na svarový spoj s vyznačenými oblastmi pozorované mikrostruktury

Na obr. 4.16 jsou vyznačena místa, ve kterých byla pozorována mikrostruktura svarového spoje pomocí světelného mikroskopu. V těchto místech byly pořízeny také detailní snímky všech oblastí. Souhrnný popis snímků je zaznamenán v tab. 4.7 a tyto snímky budou použity pro metalografické vyhodnocení svarového spoje.

Metalografické vyhodnocení svarového spoje

Makroskopické vyhodnocení

Z hlediska makroskopické analýzy byl u daného vzorku pozorovatelný typický obraz svarového spoje. Jednotlivé vrstvy svarového kovu jsou kladené pravidelně s dobrým stranovým průvarem bez necelistvostí. Ve svarovém kovu ani v přechodové oblasti SK - TOO a TOO - ZM nebyly zjištěny žádné mikrotrhliny. Tepelně ovlivněná oblast je rovnoměrná a její šířka činí 2,5 – 3mm. V kořenu svaru byl nalezen neprůvar o velikosti cca 4 mm – viz červená šipka na obr. 4.17



Obr. 4.17 - Neprůvar v kořeni svarového spoje

Mikroskopické vyhodnocení

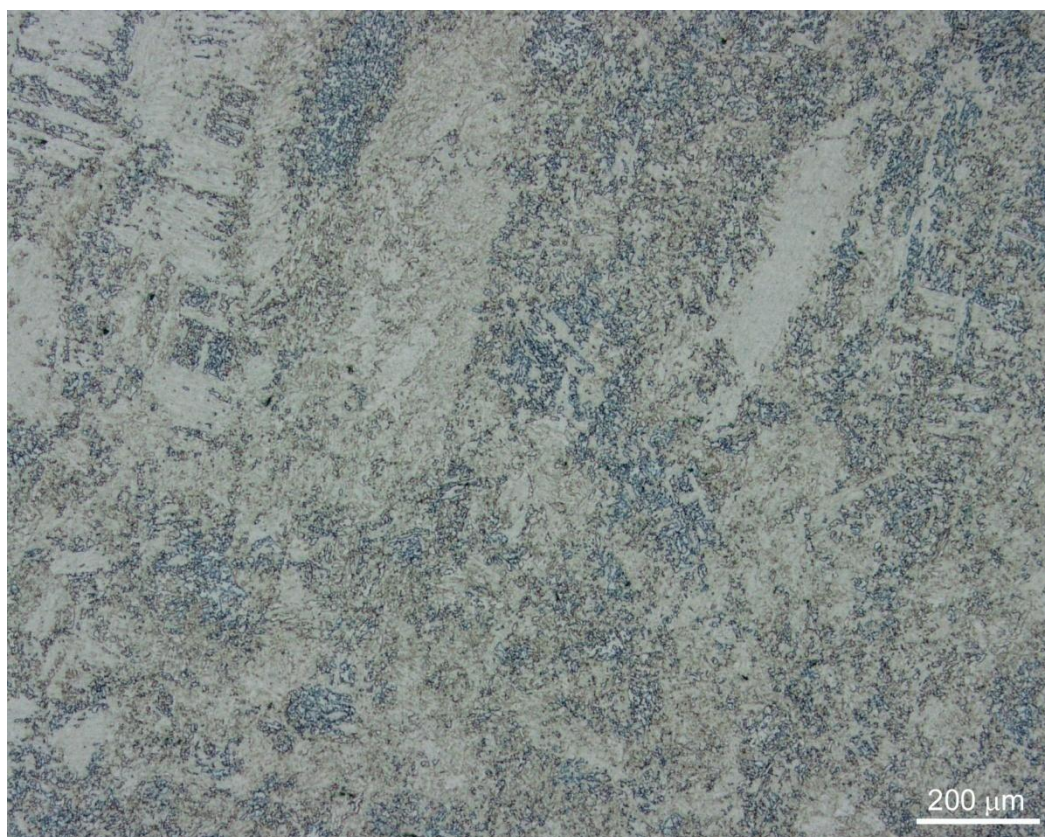
Mikrostruktura základního materiálu (ZM) po tepelném zpracování (žihání) je tvořena zrný feritu a zrný s feriticko – bainitickou směsí (viz. obr. 4.22, 4.23, 4.28, 4.29, 4.34, 4.35).

Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti (TOO) je složena ze směsi popuštěného martenzitu, bainitu a zbytkového austenitu (viz. obr. 4.20, 4.21, 4.26, 4.27, 4.32, 4.33). Velikost zrn je velmi malá, bez zřetelného zobrazení hrubší karbidické fáze, typické pro svar.

Mikrostruktura svarového kovu (SK) je tvořena feriticko – karbidickou směsí, tj. jedná se o popuštěnou strukturu (viz. obr. 4.18, 4.19, 4.24, 4.25, 4.30, 4.31).

Celkově lze mikrostrukturu hodnotit jako vyváženou bez výrazné vyloučené hrubé karbidické fáze.

Lící strana svarového spoje



Obr. 4.18 – Mikrostruktura svarového kovu v lící straně svaru

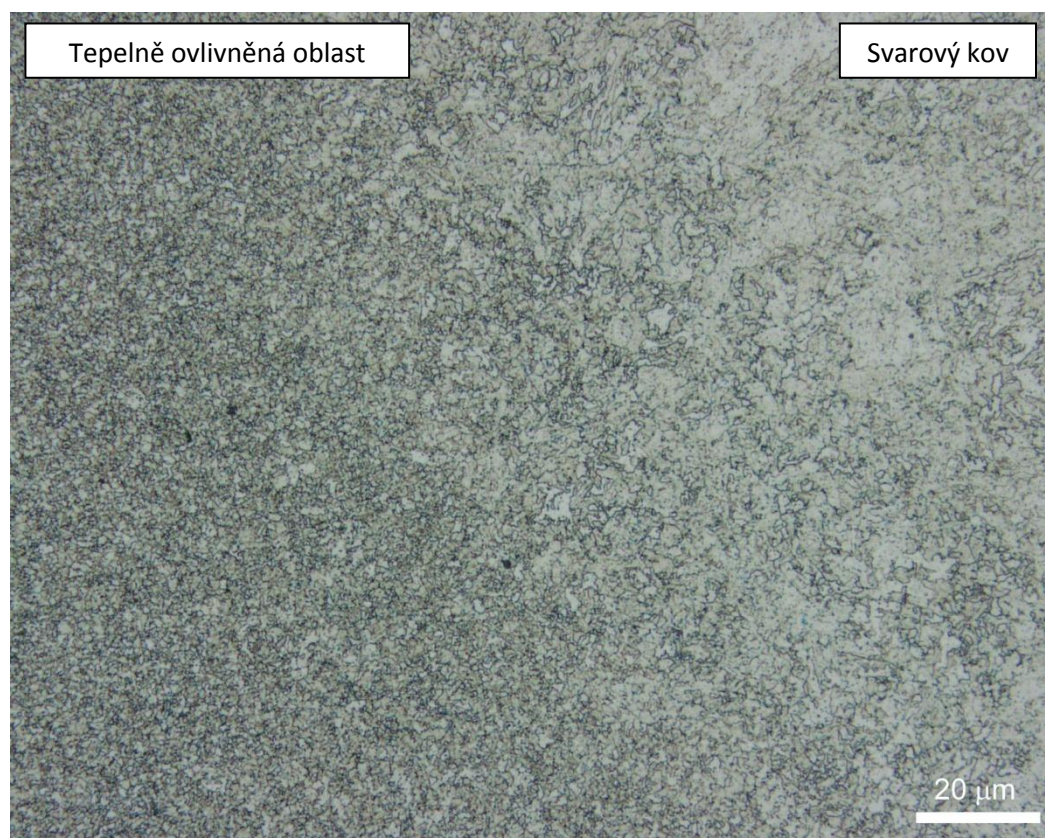


Obr. 4.19 – Mikrostruktura svarového kovu v lící straně svaru, detail

Lící strana svarového spoje



Obr. 4.20 – Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti v lící straně svaru



Obr. 4.21 – Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti v lící straně svaru, detail

Lícni strana svarového spoje

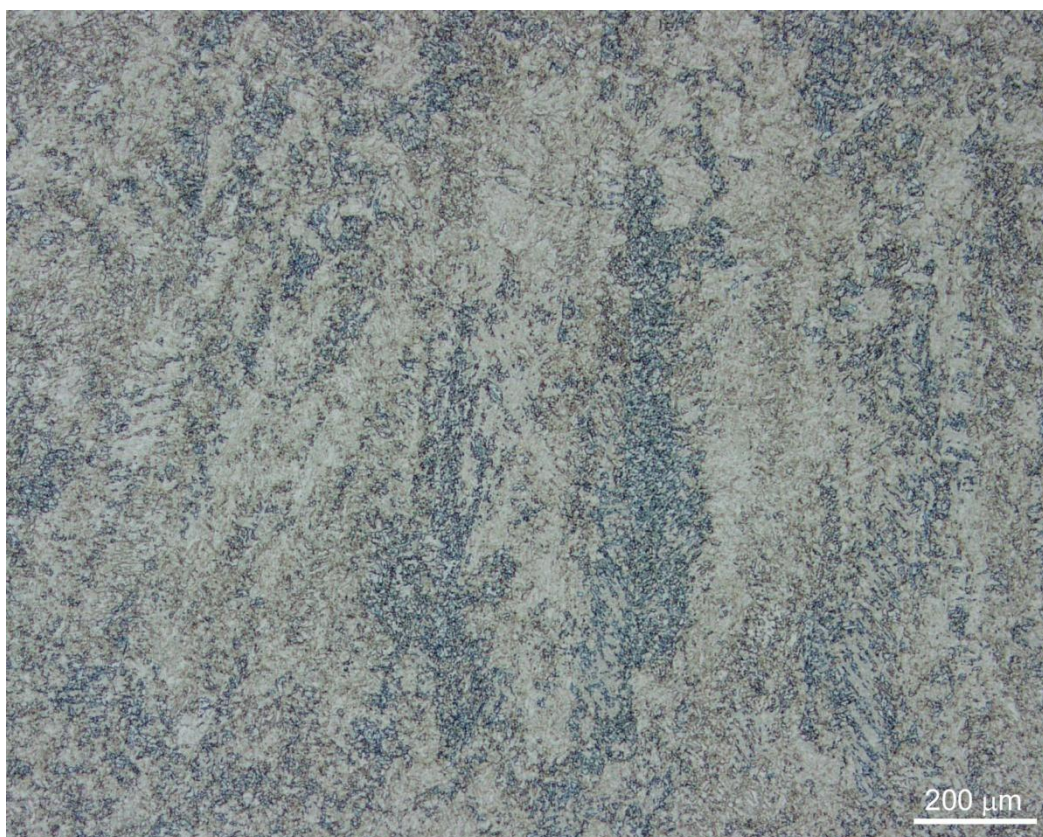


Obr. 4.22 – Mikrostruktura základního materiálu v lícni straně svaru

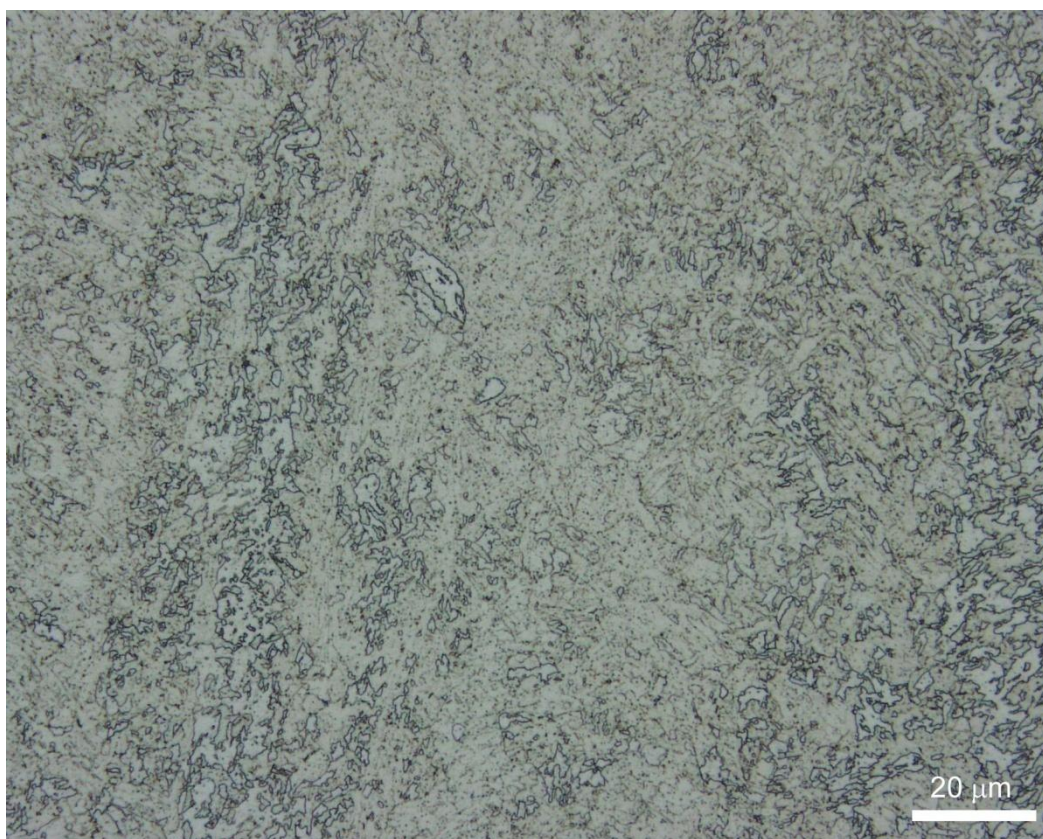


Obr. 4.23 – Mikrostruktura základního materiálu v lícni straně svaru, detail

Střední část svarového spoje

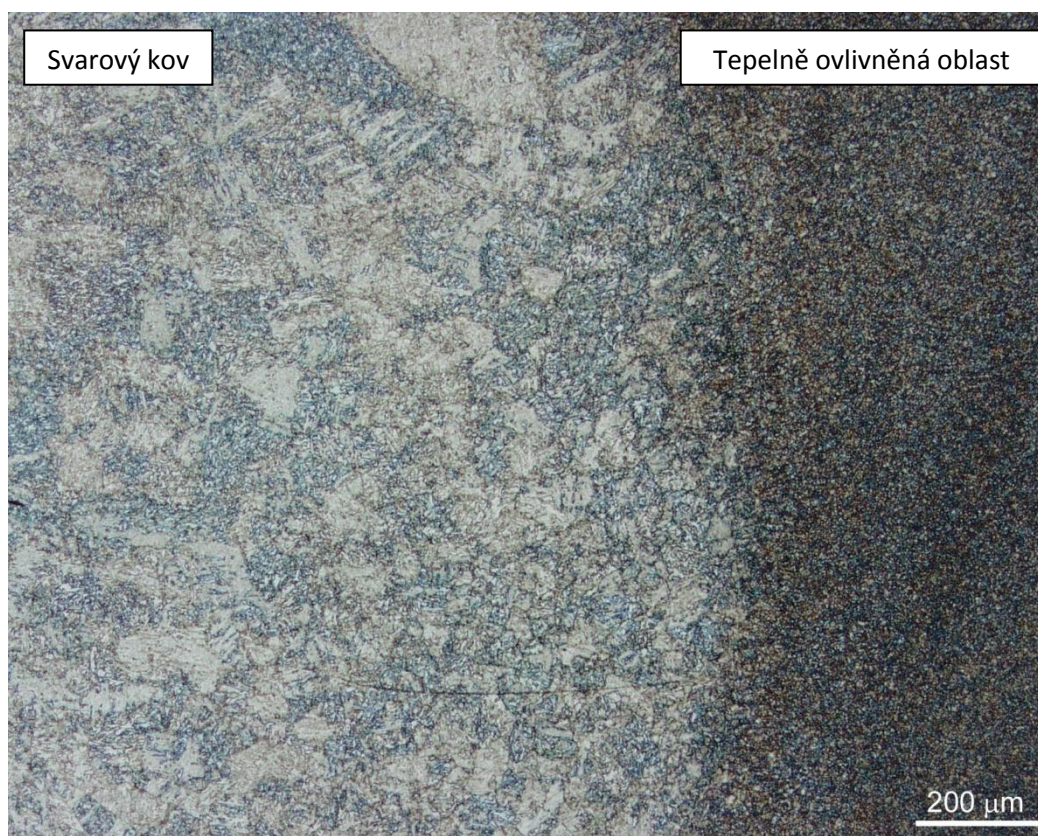


Obr. 4.24 – Mikrostruktura svarového kovu ve střední části svaru

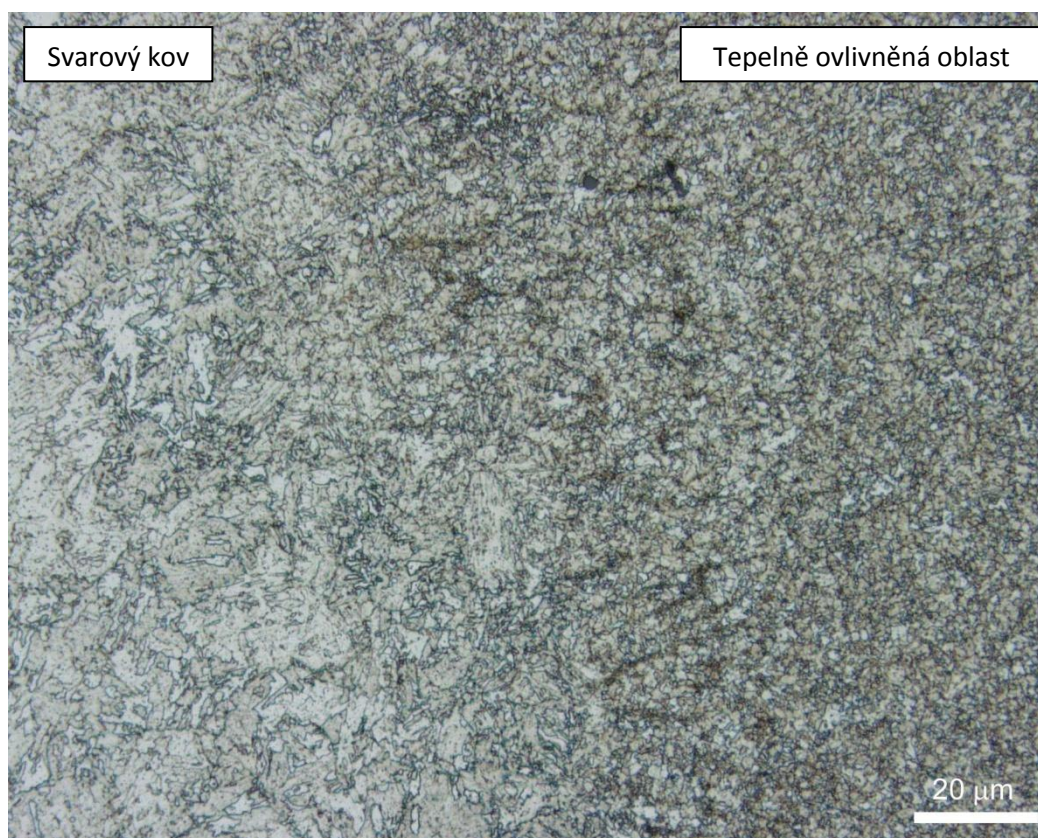


Obr. 4.25 – Mikrostruktura svarového kovu ve střední části svaru, detail

Střední část svarového spoje



Obr. 4.26 – Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti ve střední části svaru



Obr. 4.27 – Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti ve střední části svaru, detail

Střední část svarového spoje



Obr. 4.28 – Mikrostruktura základního materiálu ve střední části svaru

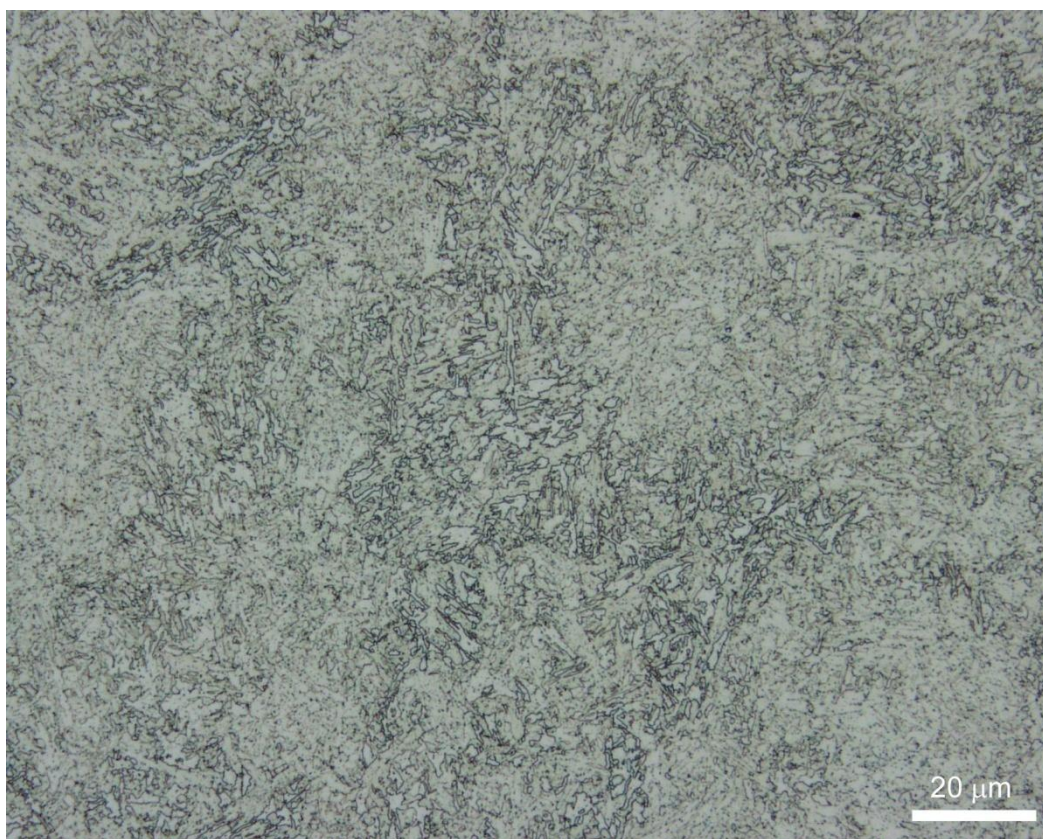


Obr. 4.29 – Mikrostruktura základního materiálu ve střední části svaru, detail

Kořenová část svarového spoje



Obr. 4.30 – Mikrostruktura svarového kovu v kořenové části svaru

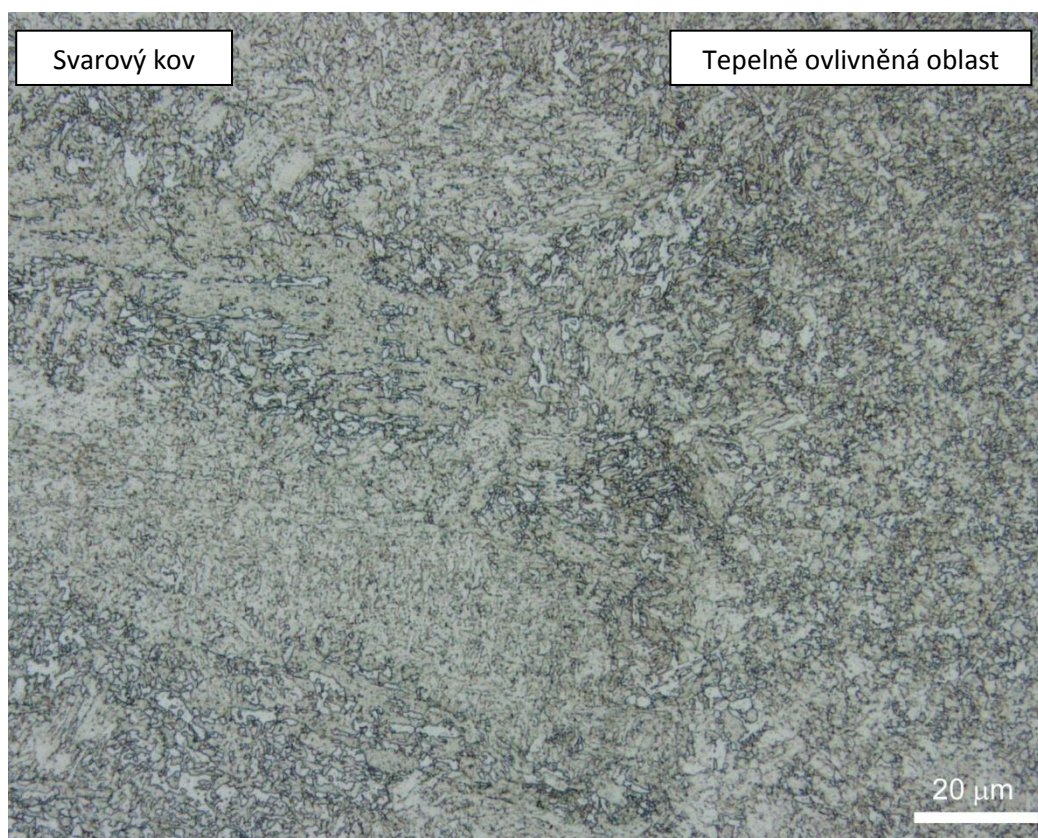


Obr. 4.31 – Mikrostruktura svarového kovu v kořenové části svaru, detail

Kořenová část svarového spoje



Obr. 4.32 – Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti v kořenové části svaru



Obr. 4.33 – Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti v kořenové části svaru, detail

Kořenová část svarového spoje



Obr. 4.34 – Mikrostruktura základního materiálu v kořenové části svaru



Obr. 4.35 – Mikrostruktura základního materiálu v kořenové části svaru, detail

5. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Tvrlost svarového kovu, ZM a TOO

- Průběh tvrdostí HV10 svarovým spojem dle metodiky ČSN EN 1043 – 1 vykázal po předepsaném žíhání na snížení pnutí při 690°C/24h hodnoty v doporučeném rozsahu. Hodnoty tvrdosti v kořenové, střední části a lící straně svaru po daném tepelném zpracování nepřesáhly hodnotu 350HV. Maximální naměřená tvrdost na lící straně svaru byla 263 HV10, ve střední části 244 HV10 a v kořenové části svaru 246 HV10. V ose svaru byla nejvyšší hodnota tvrdosti 247 HV10 změřena v blízkosti kořene svarového spoje.
- Rozptyl naměřených hodnot tvrdostí ve svarovém spoji je přijatelný a koresponduje s použitým přídavným materiálem na bázi CrMoNiV a aplikovaným tepelným zpracováním po svaření.

6. ZÁVĚRY

- Měřením tvrdosti a mikrotvrdosti svarového spoje ve sledovaných místech (osa svaru, lícní, střední a kořenová část) bylo zjištěno, že naměřené hodnoty tvrdosti i mikrotvrdosti splňují požadavek na maximální povolené hodnoty tvrdosti ve svarovém kovu, tepelně ovlivněné oblasti i v základním materiálu, tj. v žádném případě nedošlo k překročení hodnoty 350 HV – viz graf na obr. 3.2.
- Mikrostruktura základního materiálu (ZM) po tepelném zpracování (žíhání) je tvořena zrný feritu a zrný s feriticko – bainitickou směsí.
- Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti (TOO) je složena ze směsi popuštěného martenzitu, bainitu a zbytkového austenitu. Velikost zrn je velmi malá, bez zřetelného zobrazení hrubší karbidické fáze, typické pro svar.
- Mikrostruktura svarového kovu (SK) je tvořena feriticko – karbidickou směsí, tj. jedná se o popuštěnou strukturu.
- Celkově lze mikrostrukturu hodnotit jako vyváženou bez výrazné vyloučené hrubé karbidické fáze.

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

SK	Svarový kov
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
ZM	Základní materiál
HV	Tvrdost dle Vickerse (Hardness Vickers)
Ce	Uhlíkový ekvivalent (Carbon Equivalent)
GTAW	Svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu (Gas Tungsten Arc Welding)

8. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PILOUS, Václav. Materiály a jejich svařitelnost, In *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. 1. vydání. Ostrava: ZERROSS, 2002, s. 17-72. ISBN 80-85771-97-7.
- [2] HLAVATÝ, Ivo. Svařitelnost uhlíkových ocelí, In *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Druhé upravené vydání. Ostrava: ZERROS, 2001. Kapitola 9, s. 115–122. ISBN 80-85771-85-3.
- [3] HRIVŇÁK, Ivan. *Zvariteľnosť ocelí*. 1. vydání. Bratislava: Alfa, 1979. 240 s. MDT 621.791.011.
- [4] KOLAŘÍK, Ladislav. *Hodnocení svařitelnosti* [on-line]. Vydáno: 21.4.2008. Dostupné z: <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/Svaritelnost.pdf>>
- [5] MOHYLA, Petr. *Svařitelnost uhlíkových, mikro a nízkolegovaných ocelí pro tlaková zařízení* [on-line]. 2008, poslední revize 19.4.2009. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/userfiles/files2009/svaritelnost_oceli.doc>
- [6] HLAVATÝ, Ivo. Oceli žárupevné, In *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Druhé upravené vydání. Ostrava: ZERROS, 2001. Kapitola 14, s. 135–141. ISBN 80-85771-85-3.
- [7] KUČERA, Drahošlav. *Literární rešerše svařitelnosti materiálů: dílčí výsledky řešení etapy 1.0.1. projektu FR-T11/485*. Brno, 2009. 9 s. Zpráva číslo VUT 485/101/ÚST. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
- [8] PILOUS, V., STRÁNSKÝ, K. *Strukturní stálost návarů a svarových spojů v energetickém strojírenství*. Vydání 1. Praha: Academia, 1989. 208 s. ISBN 80–200–0007-0.
- [9] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vydanie. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2009. 492 s. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [10] KOUKAL, Jaroslav. Vysokolegované korozivzdorné oceli, In *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Druhé upravené vydání. Ostrava: ZERROS, 2001. Kapitola 15, s. 143–158. ISBN 80-85771-85-3.
- [11] HAJDÍK, J., HEINRICH, M. *Svařování vysokolegovaných ocelí* [on-line]. Vydáno: 11.5.2007. Dostupné z: <http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Sva%C5%99.vysoce.leg1_2007.pdf>
- [12] KOVAŘÍK, R., ČERNÝ, F. *Technologie svařování*. 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. 186 s. ISBN 80-7082-697-5.
- [13] OCHODEK, Vladislav. Struktura svaru, In *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Druhé upravené vydání. Ostrava: ZERROS, 2001. Kapitola 7, s. 95–101. ISBN 80-85771-85-3.

- [14] KUČERA, Jan. *Teorie svařování*. 2. vydání. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1991. 408 s.
- [15] BERNASOVÁ, Eva, et al. *Svařování*. Vydání druhé. Praha: SNTL, 1989. 200 s. DT 621.791 (075.3).
- [16] OCHODEK, Vladislav. Svařitelnost materiálu a praskavost, In *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Druhé upravené vydání. Ostrava: ZERROS, 2001. Kapitola 8, s. 103–113. ISBN 80-85771-85-3.
- [17] KUČERA, Drahošlav. *Výpočet svařitelnosti CrMoV rotorových materiálů a stanovení technologie pro TIG, MMA, SAW metody: dílčí výsledky řešení etapy 1.24 projektu FR-T11/485*. Brno, 2009. 23 s. Zpráva číslo VUT 485/12-45 ÚST. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
- [18] BUBENÍK, Vladimír. Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou, In *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS, 2002. Kapitola 5, s. 120-127. ISBN 80-85771-97-7.
- [19] BARTÁK, Jiří. Svařování pod tavidlem, In *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS, 2002. Kapitola 6, s. 127-134. ISBN 80-85771-97-7.
- [20] KUDĚLKA, Vladimír. Svařování metodou TIG, In *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS, 2002. Kapitola 7, s. 135-148. ISBN 80-85771-97-7.
- [21] SÍKA, Jiří. Ostatní způsoby svařování, In *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS, 2002. Kapitola 9, s. 163-171. ISBN 80-85771-97-7.
- [22] www.ocel.wz.cz. Obrázek [on-line]. Dostupné z: <<http://www.ocel.wz.cz/sortiment/svary.php>>
- [23] www.svarbazar.cz. Obrázek [on-line]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/image/200803131900_tig_princip2.gif>
- [24] ČSN EN ISO 6507-1. Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda. Praha: Český normalizační institut, 2006. 24 s. 42 0374
- [25] ČSN EN 1043 – 1. Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním. Praha: Český normalizační institut, 1998. 24 s. 05 1134.
- [26] ČSN EN 1043 – 2. Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška tvrdosti - Část 2: Zkouška mikrotvrdosti svarových spojů. Praha: Český normalizační institut, 1998. 12 s. 05 1134