



FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE

Ústav materiálového inženýrství

POSOUZENÍ KVALITY SPOJŮ SVAŘOVANÉ KONSTRUKCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2023

ONDŘEJ ZEDNÍK

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zedník** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **501332**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Posouzení kvality spojů svařované konstrukce

Název bakalářské práce anglicky:

Assessment of the quality of the joints of the welded structure

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je vyhodnotit makroskopickou a mikroskopickou kvalitu svarů.

1. Literární rešerše v problematice hodnocení kvality svarů.
2. Návrh metodického přístupu k řešení problematiky.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení a zpracování naměřených dat.
5. Diskuse a závěry.

Seznam doporučené literatury:

- (1) ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3.
- (2) ČSN EN ISO 6520-1 Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- (3) HRIVŇÁK, Ivan. Zváranie a zvaritel'nost' materiálův. 1. vyd. Bratislava: Nakladatelství STU, 2009. 492 s. ISBN 978-80-227-3167-6

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Elena Čižmárová, Ph.D. ústav materiálového inženýrství FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **01.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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 práci vypracoval samostatně za vedení vedoucí práce paní Ing. Eleny Čižmárové, Ph.D. Pracoval jsem pouze s prameny a zdroji informací, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Ondřej Zedník



PODĚKOVÁNÍ

Rád bych především poděkoval vedoucí mé bakalářské práce paní Ing. Eleně Čižmárové, Ph.D., za vedení, ochotu, odbornou pomoc a cenné rady při psaní této práce. Také bych chtěl poděkovat pracovníkům UMI FS ČVUT v laboratoři, kde jsem prováděl svá měření.

ANOTACE

Tato práce se zabývá posouzením svarů svarové konstrukce. V teoretické části byla popsána problematika metod svařování. Byly řešeny přeměny materiálu při svařování a vady, které při něm mohou nastat. Také jsou uvedeny metody testování kvality svarových spojů. V praktické části byla provedena analýza makrostruktur a mikrostruktur svarů na konstrukci. Dále na nich byla změřena mikrotvrdost.

KLÍČOVÁ SLOVA

svar, testování svarů, mikrostruktura svarových spojů, makrostruktura svarových spojů, tvrdost, vady svarů, analýza

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the evaluation of welded construction. In the theoretical part of this thesis, the problems of welding processes were described. Material transformations during welding and defects that can occur were discussed. Methods for testing the quality of welded joints were listed. In the practical part, an analysis of the weld's macrostructure and microstructure at the assembly was performed. The microhardness of the joints was measured as well.

KEYWORDS

weld, weld testing, the macrostructure of weld joints, microstructure of weld joints, hardness, weld defects, analysis

OBSAH

Úvod.....	- 8 -
Teoretická část.....	- 9 -
1 Princip svařování.....	- 9 -
1.1 Dělení podle typu svařování.....	- 10 -
1.1.1 Svařování plamenem.....	- 11 -
1.1.2 Svařování elektrickým obloukem.....	- 12 -
1.1.2.1. Svařování obalenou elektrodou.....	- 12 -
1.1.2.2. Svařování tavnou elektrodou v aktivním plynu (MAG).....	- 13 -
1.1.2.3. Svařování tavnou elektrodou v inertním plynu (MIG).....	- 14 -
1.1.2.4. Svařování netavnou elektrodou v inertním plynu (WIG).....	- 15 -
1.2 Přeměny materiálu při procesu svařování.....	- 16 -
1.2.1 Svarová lázeň.....	- 16 -
1.2.2 Tepelně ovlivněná oblast (TOO).....	- 17 -
1.3 Vady svarových spojů.....	- 19 -
1.3.1 Vada typu trhliny.....	- 19 -
1.3.1.1. Teplé trhliny.....	- 19 -
1.3.1.2. Trhliny za studena.....	- 20 -
1.3.1.3. Lamelární trhliny.....	- 21 -
1.3.1.4. Žíhací trhliny.....	- 21 -
1.3.2 Pórovitost.....	- 22 -
1.3.3 Vměstky.....	- 22 -
1.3.4 Vruby a zápaly.....	- 23 -
1.3.5 Studené spoje.....	- 23 -
1.3.6 Neprůvar.....	- 23 -



2	Vyhodnocování svarových spojů.....	- 24 -
2.1	Destruktivní zkoušky svarových spojů.....	- 24 -
2.1.1	Zkouška tvrdosti.....	- 24 -
2.1.2	Zkouška mikrotvrdosti svarových spojů.....	- 26 -
2.1.3	Metalografická zkouška.....	- 26 -
2.1.3.1.	Makrostruktury svaru.....	- 27 -
2.1.3.2.	Mikrostruktura svaru.....	- 27 -
2.1.4	Zkouška tahem svarových spojů.....	- 28 -
2.1.1	Zkouška rázem v ohybu svarových spojů.....	- 28 -
2.2	Nedestruktivní zkoušky svarových spojů.....	- 29 -
2.2.1	Vizuální metoda.....	- 29 -
2.2.2	Penetrační metoda.....	- 29 -
2.2.3	Metoda magnetická prášková.....	- 30 -
2.2.4	Prozařovací metody.....	- 31 -
2.2.5	Ultrazvukové metody.....	- 31 -
	Praktická část.....	- 32 -
3	Posouzení kvality svarové konstrukce.....	- 32 -
3.1	Příprava vzorků.....	- 32 -
3.2	Metalografická analýza.....	- 34 -
3.3	Zkouška tvrdosti.....	- 35 -
3.4	Kontrola svaru číslo 1.....	- 36 -
3.5	Kontrola svaru číslo 2.....	- 41 -
3.6	Kontrola svaru číslo 3.....	- 46 -
	Závěr.....	- 51 -
	Zdroje.....	- 52 -
	Seznam obrázků.....	- 55 -
	Seznam tabulek.....	- 57 -
	Seznam příloh.....	- 58 -

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

Zkratka symbol	Výraz
Al	Hliník
Ar	Argon
CO ₂	Oxid uhličitý
Cu	Měď
E	Jednotlivé vpichy při zkoušce tvrdosti
HNO ₃	Kyselina dusičná
HV	Zkouška tvrdosti podle Vickerse
Kp	Jednotka síly odpovídající 9,81 N
MAG	Svařování tavnou elektrodou v aktivním plynu
Mg	Hořčík
MIG	Svařování tavnou elektrodou v inertním plynu
Ni	Nikl
O ₂	Kyslík
P	Fosfor
R	Řada vpichů při zkoušce tvrdosti
S	Síra
SiO ₂	Silica (Oxid křemičitý)
Ti	Titan
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
WIG/TIG	Svařování netavnou elektrodou v inertním plynu
ZM	Základní materiál
α	Tuhý roztok alfa
α Fe	Alfa ferit
γ	Tuhý roztok gama

ÚVOD

Svařování je způsob spojování materiálů, který má významné zastoupení ve všech oblastech průmyslu. Z toho důvodu se stále zvyšuje počet vyráběných svarových spojů. Při svařování vlivem rychlých změn v materiálu mohou vznikat vady, jež mohou způsobit vážné havárie. Proto je při návrhu svarových spojů důležité volit takové metody, kterými toto riziko minimalizujeme.

Důležitá je také kontrola kvality svarových spojů. Toho můžeme docílit nedestruktivními metodami, které umožňují svar dále používat. Těmito metodami můžeme převážně odhalit povrchové vady spoje, ale například při použití rentgenu i vady pod povrchem. V případě realizace sériové výroby či svařování nových materiálů využíváme metod destruktivních, kdy díl po zkoušce nemůžeme dále použít, ale získáme z nich komplexnější výsledek. Zjistíme například, jaké strukturní složky v něm můžeme najít nebo jaké pevnosti od spoje můžeme očekávat. Svar je také důležité zkontrolovat v případě jeho poškození, aby byla určena příčina selhání a stejná situace se neopakovala.

Rešerše této práce se zabývá volbou správného svařovacího postupu. Byl popsán vliv svařovacích podmínek na spojovaný materiál a jaké vady mohou při svařování vzniknout. Nakonec je určeno, jak tyto vady analyzujeme. V experimentální části byla vyhodnocena kvalita svarů na konstrukci. Konkrétně byly provedeny metalografické zkoušky mikrostruktur a makrostruktur. Dále byly realizovány kontroly mikrotvrdosti svarových spojů.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Princip svařování

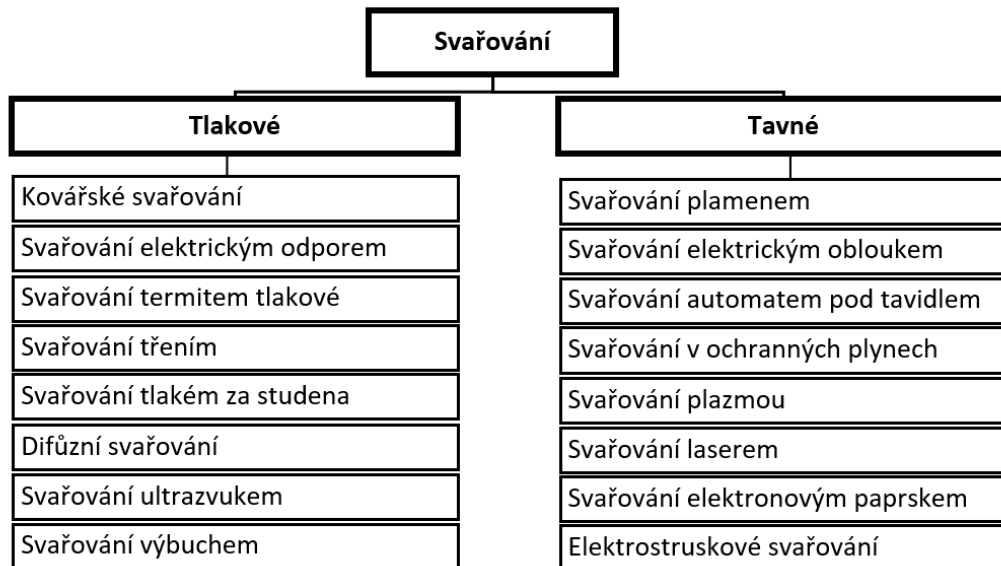
Svařování je technologický proces, při kterém vytváříme trvalý, nerozebíratelný spoj dvou nebo více součástí. K vytvoření svarového spoje využíváme externí zdroje, aby byly vytvořeny nové meziatomární vazby a vznikl difúzní spoj. Při svařování dochází kromě difúze například k deformacím, rekrytalizaci a precipitaci základního materiálu, jednotlivé fáze materiálu se rozpouštějí a vznikají nové. [1] [2]

K natavení materiálu využíváme tepla, tlaku, nebo jejich kombinací. Svařit můžeme všechny materiály, které jsou schopné difúzně se promíchat, ovšem u odlišných materiálů většinou dochází k degradaci fyzikálních vlastností. To se může stát například vlivem nauhličení a oduhličení určitých oblastí spoje. Z tohoto důvodu většinou svařujeme materiály se stejným chemickým složením. Z konstrukčních důvodů můžeme do svarů přidat výplňový materiál, který také může mít vliv na jeho fyzikální vlastnosti. Nejčastěji se svařují kovy, lze ale také svařovat další materiály, například termoplasty. [3]

O tom, zda dojde k vytvoření bezvadného svarového spoje, rozhoduje mnoho faktorů, ale jeden z nejdůležitějších je svařitelnost, která ovlivňuje vhodnost materiálu být svařen. Materiály s dobrou svařitelností mohou být svařeny bezpodmíněně. Když má materiál podmíněnou svařitelnost, je třeba se řídit určitým technologickým postupem. Kvalitu svarového spoje mohou ovlivnit i další faktory, jako jsou nevhodná příprava materiálu před svařováním, nedostatečné upevnění svařovaných součástí anebo špatná technika svařování. Spoj, který není proveden správně, může ohrozit stabilitu celé konstrukce a způsobit škody. [1]

1.1 Dělení podle typu svařování

Podle způsobu dodání energie do svaru můžeme svařování rozdělit na metody tlakového svařování a metody tavného svařování. Norma ČSN EN ISO 4063, uvádí rozdělení těchto metod, které můžeme vidět na obr. 1. [4] [5] [6]



obr. 1 - Rozdělení metod svařování na tavné a tlakové [2] – upraveno

Tlakové svařování se vyznačuje tím, že ke spoji dochází díky působení sil na kontaktní plochy, které jsou v tuhém nebo plastickém stavu, čímž mezi nimi vzniknou pevné vazby. Tento typ svařování nemá tak výrazné tepelně ovlivněné oblasti, jako tomu je u tavného svařování, takže základní materiál není příliš ovlivněn. Tlakové svařování bývá často použito k spojování kovů s odlišnými fyzikálními vlastnostmi. Ve většině případů je tlakové svařování provedeno za působení tepla (například z třecích sil, nebo z elektrického odporu). V případě měkkých kovů, jako jsou hliník nebo měď, lze ale také svařovat za studena. [7] [8]

Tavné svařování označuje ty metody, při kterých dochází k úplnému natavení spojovaných částí. Má mnohem širší zastoupení. Zdrojem tepla bývá zpravidla plamen anebo elektrický proud, ale můžeme se setkat i s laserem, plazmou a dalšími zdroji tepla. [9]

1.1.1 Svařování plamenem

Při této metodě je spojovaný povrch nataven pomocí chemické energie, která se vytvoří hořením oksydujícího a hořlavého plynu. Roztavené kovy, případně výplňový materiál, vytvoří homogenní spoj. Nejjednodušší a nejčastěji používanou soustavu můžeme vidět na obr. 2. Soustava se skládá z tlakových lahví s redukčními ventily, suché předlohy, hadic a svařovacího hořáku. [7] [10]



obr. 2- Soustava pro svařování plamenem [11] - upraveno

Nejpoužívanějším plynem ke svařování plamenem je acetylén. Tento plyn uvolňuje při rozpadu nejvyšší slučovací teplo, proto je acetylén nejlepším plynem ke svařování. Jako oxidovadlo při svařování využíváme kyslík. Svařování těmito plyny má v závislosti na jejich poměru redukčně – oxidační účinek. [5] [12]

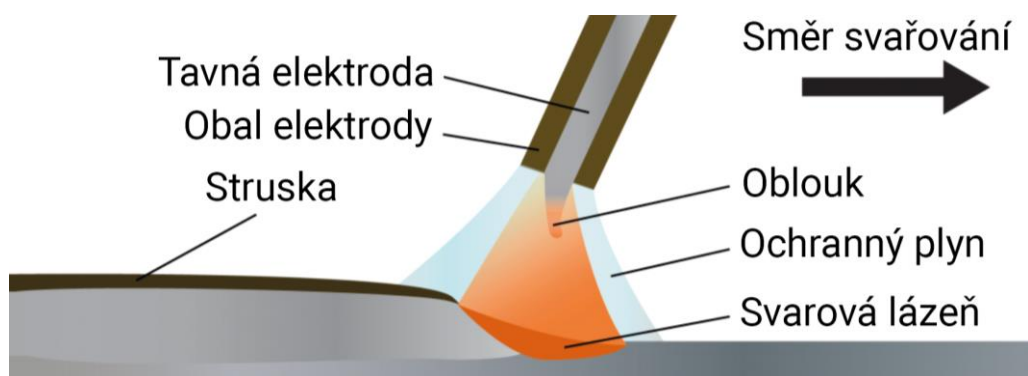
Byť se v dnešní době touto metodou nerealizuje velké množství svarů, má stále svařování plamenem své místo. Uvedený způsob svařování je velmi univerzální, nezávislý na elektrické energii a je také mobilní. Metoda se mimo jiné využívá k všeobecným opravám a údržbám, pájení, navařování, k žárovým nástřikům a k řezáním plamenem. Tento způsob je velmi ekonomický pro svařování tenkých trubek. [7] [13]

1.1.2 Svařování elektrickým obloukem

K vytvoření tepelné energie využívá tato metoda elektrický oblouk, který proudí mezi elektrodou a základním materiálem. Přídavným materiálem může být přímo elektroda, nebo v případě netavných elektrod bývá přidáván zvlášť. Oblouk používaný ke svařování je nízkonapěťový a hoří při vysokém proudu v prostředí ionizovaného plynu. Svarový kov je potřeba chránit před okolní atmosférou, která na něj má nepříznivý vliv. Toho dosahujeme nejčastěji ochrannými plyny. [5][7][14]

1.1.2.1. Svařování obalenou elektrodou

Při této metodě oblouk hoří mezi základním materiálem a obalenou tavnou elektrodou. Podle složení rozpoznáváme několik druhů obalených elektrod, všechny ovšem musí plnit základní funkce. Obaly elektrody při zapálení vytváří kouř a vypouští plyny, které vytváří ochrannou atmosféru, to můžeme vidět na obr. 3. Obaly mají také ionizační funkci, což znamená, že napomáhají iniciaci a udržení oblouku. Struska vytvořená obalenou elektrodou na sebe také váže nežádoucí prvky (P, S, snižuje O_2). [5][13]

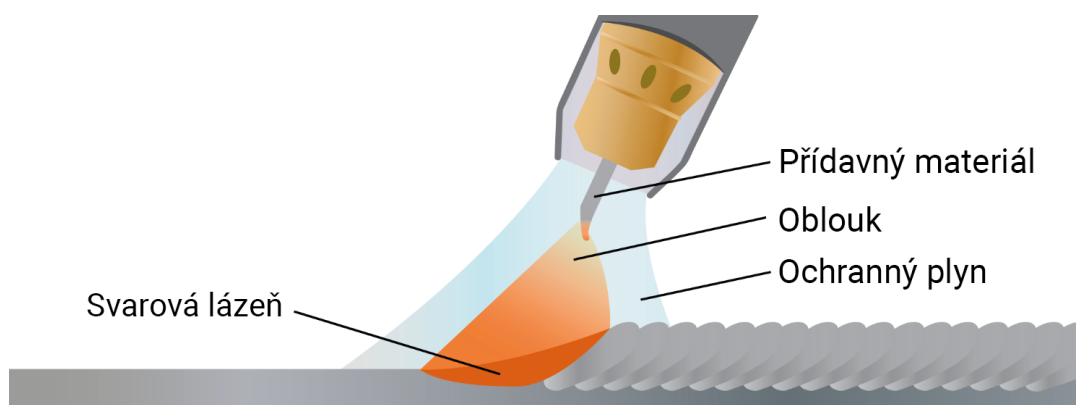


obr. 3 - Princip svařování obalenou elektrodou [15] - přeloženo

Tato metoda patří k jednomu z nejrozšířenějších způsobů svařování. Metoda je z hlediska parametrů svařování i z hlediska poloh poměrně jednoduchá. V porovnání s ostatními metodami obloukového svařování je vybavení k tomuto typu svařování méně komplexní a více přenosné. Tato metoda je čistě manuální, takže se kvalita svaru přímo odvíjí od zručnosti svářeče. Sváření obalenou elektrodou je poměrně pomalé. [5][10]

1.1.2.2. Svařování tavnou elektrodou v aktivním plynu (MAG)

Tato metoda využívá jako elektrodu přídavný drát, který je automaticky podáváný, toto můžeme vidět na obr. 4. Protože hořák je vedený ručně, mluvíme o poloautomatickém svařování. Jako ochranu svarové lázně před okolní atmosférou využíváme plyn, který aktivně reaguje s roztaveným kovem. [13]



obr. 4 - Schéma MIG/MAG svařování [15] - přeloženo

Plyny v závislosti na množství a složení ovlivňují vlastnosti, kvalitu a tvar spoje, ale také mají vliv na samotné svařování, kdy ovlivňují velikost a tvar oblouku a můžou napomáhat v jeho hoření. Můžeme například využít CO_2 , který je snadno dostupný a dosahuje dobrých průvarů. Jeho nevýhodou je, že ve svaru vznikají oxidy, které mají nepříznivý vliv na jeho mechanické vlastnosti. Také je oblouk v tomto plynu nestabilní a způsobuje rozstřík. Nejčastěji CO_2 využíváme na svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. V dnešní době často používáme vícesložkové plyny jako je směs Ar a CO_2 , případně Ar + CO_2 + O_2 . [7] [13]

MAG svařování patří k nejrozšířenějším metodám svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Tato metoda také stále častěji nahrazuje ruční svařování obalenou elektrodou. Je velmi efektivní a všestranná. Také je často používána na mechanizované a robotizované svařovací systémy. [7] [5]

1.1.2.3. Svařování tavnou elektrodou v inertním plynu (MIG)

Stejně jako metoda MAG je metoda MIG poloautomatická a využívá roboticky podávané tavné elektrody. Rozdílem je, že při této metodě využíváme inertního (netečného) plynu, který má pouze funkci ochrany svarové lázně před okolní atmosférou. [5] [16]

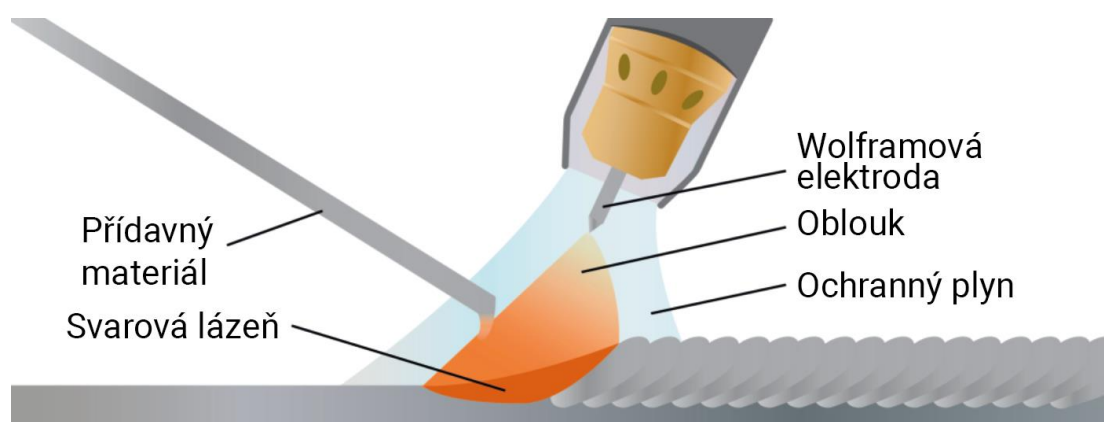
Ochranné inertní plyny chrání roztavený kov před oxidací a naplyněním. Také pozitivně působí na elektrický oblouk, kdy usnadňují jeho zapálení a posléze také udržují stabilitu. Napomáhají i přenosu tepla do svaru a ovlivňují tvar průvaru. Používaným inertním plynem je argon. Argon je o 40% těžší než vzduch, takže se dobře drží u svarové lázně. Jeho tepelná vodivost je nízká. Oblouk v Ar se dobře zapaluje a je stabilní i při větších délkách. [5] [7]

Další plyn, který můžeme takto použít, je helium. Helium má výrazně nižší hustotu než vzduch, a proto jeho ochrana není tak efektivní. Chceme-li ji využít, musíme volit vysoké průtoky plynu. Oblouk v He není také příliš stabilní. Má vysokou tepelnou vodivost. Plyny rovněž můžeme aplikovat ve směsích, kdy využíváme výhody jednotlivých plynů. [5] [7]

MIG využíváme pro svařování lehkých kovů jako jsou mimo jiné slitiny hliníku, mědi, niklu. Taktéž lze využít v automatizovaných procesech. [5]

1.1.2.4. Svařování netavnou elektrodou v inertním plynu (WIG)

Během svařování metodou WIG (též označovanou TIG) hoří oblouk mezi základním materiálem a netavnou wolframovou elektrodou. Stejně jako při metodě MIG je zde použit netečný plyn, který chrání svar před okolním vzduchem. Svařovat je možno s přídavným materiálem nebo i bez něj. Přídavný materiál si svářeč posouvá ručně, nebo může být posouván podavačem. Mívá většinou podobné chemické složení jako základní materiál. Celý proces je názorně popsán na obr. 5. [5] [7] [17]



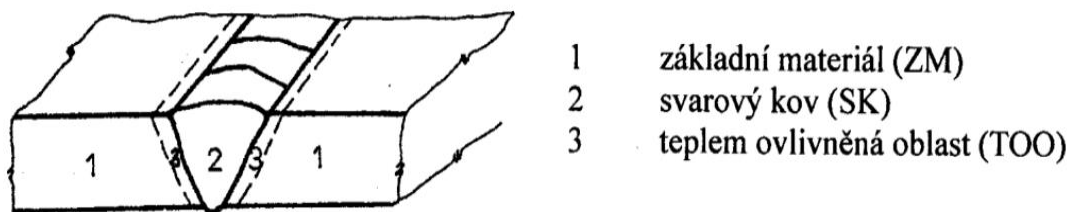
obr. 5 - Schéma WIG svařování [15] - přeloženo

Metodu svařování WIG lze díky vysoké teplotě oblouku využít pro svařování těžce svařitelných materiálů, jako jsou například vysokolegované oceli, Al, Cu, Ni, Mg a Ti. Je možné takto svařovat různorodé materiály například ocel s mědí. Svařování netavnou elektrodou se vyznačuje vysokou kvalitou svaru. Má malou tepelně ovlivněnou oblast a velkou hloubku závaru. Svářeč má díky ručnímu přidávání materiálu dobrou kontrolu nad svarovou lázní. [5] [7] [17]

Produktivita této metody svařování je z důvodu nízké účinnosti přenosu tepla nízká. Proto se s tímto druhem svařování setkáme převážně v kusové a malosériové výrobě. K svařování způsobem WIG sáhneme, pokud chceme využít jejich kvalitních výsledků a možnosti svařování různorodých anebo těžko svařitelných materiálů. [5] [7] [17]

1.2 Přeměny materiálu při procesu svařování

Při svařování dochází k rychlému nárůstu teploty svarového a přidaného materiálu, což ovlivňuje vlastnosti spoje, a to nejen v oblasti svarového kovu, ale v důsledku vodivosti tepla také v jeho okolí. Dochází k fázovým přeměnám, změnám struktur a také ke změně objemu, které způsobují napětí a deformace. V jakém množství a jak velký rozsah přeměny materiálu nastane určuje jak zvolená metoda svařování, tak i vlastnosti základního materiálu. Jednotlivé části svaru jsou popsány na obr. 6. [3]



obr. 6 - Schéma svarového spoje provedeného tavným svařováním [18]

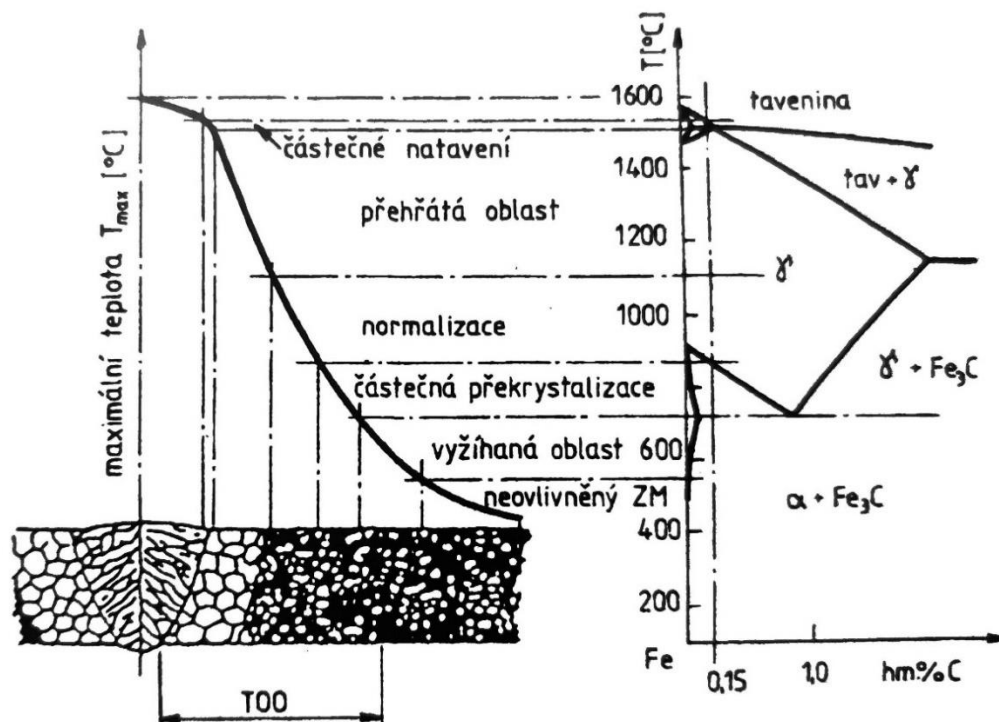
1.2.1 Svarová lázeň

Svařováním vzniká svarový kov vytvořený tavením základního a přídavného materiálu. Geometrické faktory jako šířka a hloubka svaru jsou ovlivněny silou svařovacího proudu a svařovacím napětím. Tvar svarové lázně také ovlivňuje rychlost svařování. Krystalizace svaru začíná, když teplota svarového kovu klesne pod teplotu likvidu. Orientace a velikost rostoucích zrn závisí na jejich orientaci v přechodovém pásmu. Chemické složení svarového kovu a rychlost svařování určuje, zda bude zrno růst celulárně či dendriticky. Svarový kov obvykle nedosahuje houževnatosti obecného kovu. Struktura svarového kovu je ovlivněna především chemickým složením materiálu a nastavením parametrů při svařování. Únavové vlastnosti svarového kovu jsou horší než u odpovídajícího obecného kovu a jsou ovlivněny odlévanou mikrostrukturou svaru, povrchovými defekty svaru, počtem vměstků a čistotou svarového kovu. Mikrostruktura svaru je daná primárně chemickým složením svarového kovu a svařovacími parametry. [1] [2] [3]

1.2.2 Tepelně ovlivněná oblast (TOO)

Oblast svaru, která není roztavená, ale která je teplem od svařování ovlivněná tak, že u ní dochází k mikrostrukturním změnám, nazýváme tepelně ovlivněnou oblastí (TOO). U kovů a slitin bez polymorfních přeměn jako například Cu, Ni a Al pozorujeme pouze strukturální změny, rekrytalizaci nebo růst zrn. Zatímco u kovů a slitin s polymorfními změnami, jako jsou například oceli, dochází k významnějším změnám, které výrazněji ovlivňují jejich fyzikální vlastnosti. [1] [2] [3]

U konstrukčních nebo legovaných ocelí s polymorfní transformací $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ lze tepelně ovlivněnou zónu rozdělit na více oblastí, které jsou zobrazené na obr. 7. Šířka jednotlivých pásem se liší v závislosti na použité technologii svařování a zvolených parametrech svařování. [1] [2] [3]



obr. 7 - Vliv teplotního účinku na strukturu svarového spoje [3]

Mikrostrukturní změny v TOO závisí například na chemickém složení svařovaného materiálu, výchozí mikrostruktuře od předchozích tepelných úprav kovu, dosažené teploty od svařování a rychlosti ochlazení. Také musíme počítat s tím, že jakékoliv zlepšené vlastnosti od předchozích tepelných úprav mohou být v okolí svaru výrazně redukovány. [1] [2] [3]

Pásmo částečného natavení je zóna přímo hraničící s nataveným svarovým kovem a v průběhu svařování se může částečně natavit. U ocelí bývá tato oblast redukována pouze na linii, kterou nazýváme hranicí ztavení. **Pásmo přehřátí** je oblast s teplotou nad A_3 , překračuje jak teplotu intenzivního růstu primárních zrn, tak i teplotu přehřátí, která je pro nelegované oceli kolem 1050°C , pro mikrolegované oceli je tato teplota asi 1250 až 1300°C a pro nízkolegované oceli asi 1200°C . Tato oblast se většinou vyznačuje hrubozrnnou strukturou, která je způsobena rozpuštěním precipitátů, které brání růstu austenitického zrna. Pásmo přehřátí také bývá v T_{00} nejtvrdší a má nejnižší houževnatost.

Pásmo normalizace je definované teplotami A_3 a teplotou přehřátí s úplnou transformací $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$.

Pásmo částečné překrystalisace v rozmezí teplot A_1 až A_3 s neúplnou polymorfní přeměnou.

Vyžíhaná oblast je pod teplotou A_1 a probíhají v ní změny v rámci tuhého roztoku α Fe, případně substrukturní. [1] [2] [3]

Pokles pevnosti se může vyskytovat při svařování ocelí které jsou legované, zušlechtěné a termomechanicky zpracované. Při svařování takových ocelí se doporučuje limitovat příkon svařování, aby se minimalizovala šířka popuštěné oblasti. Běžně pozorujeme v oblasti nad teplotou vyhřátí výrazné zvýšení tvrdosti. Dovolená hranice tvrdosti se odvíjí od chemického složení materiálu, který svařujeme. U konstrukčních ocelí obvykle požadujeme, aby nejvyšší tvrdost svaru nepřesahovala 340 až 450 HV. [1] [2] [3]

1.3 Vady svarových spojů

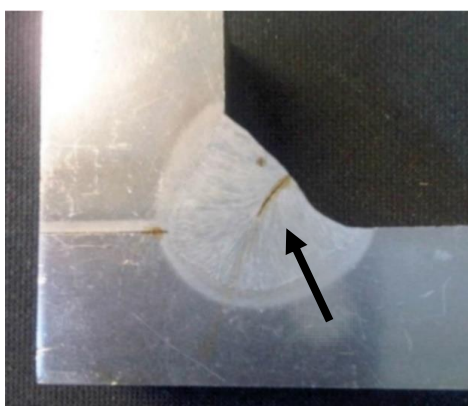
Během procesu tvorby svarového spoje mohou vznikat vady, které mají nepříznivý vliv na vlastnosti spoje a mohou se stát iniciátorem lomu. Největší vliv na druh a příčinu vady svarového spoje má volba svařovaného materiálu a metody svařování. Vady jsou přípustné jen tehdy, když víme, že za provozního zatížení neohrozí bezpečnost. Vady svaru popisuje norma ČSN EN ISO 6520-1, kdy je každá vada očíslována. Tato norma uvádí vady podle jejich umístění, tvaru a četnosti. [2] [19]

1.3.1 Vada typu trhlina

Trhliny patří k nejzávažnějším vadám svarových spojů a při jejich vyhodnocování vždy vedou k nepřijatelnému svarovému spoji. Trhlina se může iniciovat v jedné části svaru a poté se šířit dalšími částmi. [1] [2] [19]

1.3.1.1. Teplé trhliny

Tyto trhliny vznikají při vysokých teplotách (u ocelí nad 850°C) a mohou se vyskytovat jak ve svarovém kovu, tak v tepelně ovlivněné oblasti. Mohou vzniknout v průběhu tuhnutí (krystalizační trhliny viz obr. 8), pod housenkou v ohřáté oblasti základního materiálu, nebo v případě vícevrstvého svařování ve svarovém kovu (trhliny likvační a polygonizační). Prvky jako síra, fosfor, bor, niob, titan a křemík jsou považovány za hlavní metalurgické příčiny vzniku krystalizačních a likvačních trhlin, proto se doporučuje jejich obsah ve svarovém kovu minimalizovat. [1] [2]



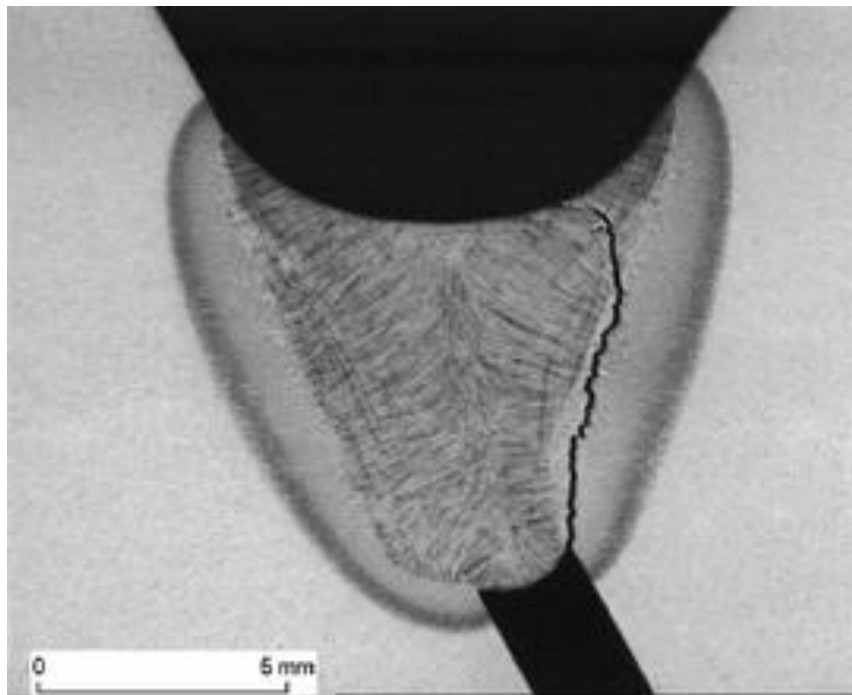
obr. 8 - Krystalizační trhlina [20]

Teplým trhlinám se můžeme vyhnout snížením natavené fáze, stupně segregace a růstu zrn, toho můžeme docílit pomocí snížení měrného příkonu svařování. Této vadě můžeme předejít také zvýšením čistoty přídatného materiálu a snížením napětí ve svaru volbou vhodné techniky svařování, a to jak správným tvarem svaru, tak předehřevem. [1] [2]

1.3.1.2. Trhliny za studena

Tyto trhliny vznikají nejčastěji vlivem vodíku, někdy až několik týdnů po svařování, při teplotách pod 200°C. Nejčastěji je nalezneme u ocelí v podhousenkové oblasti, jako tomu je i na obr. 9. Trhliny jsou transkrystalické a mají lesklý povrch. Vodík se do svaru dostává ze vzduchu. [1] [2]

Trhliny jsou iniciované zbytkovým napětím, proto u ocelí, které jsou na toto praskání náchylné, je třeba volit takový technologický proces, abychom se jim vyhnuli. Z tohoto důvodu se například doporučuje předehřev a dohřev. Také je vhodné pečlivě sušit přídatné materiály. [1] [2]

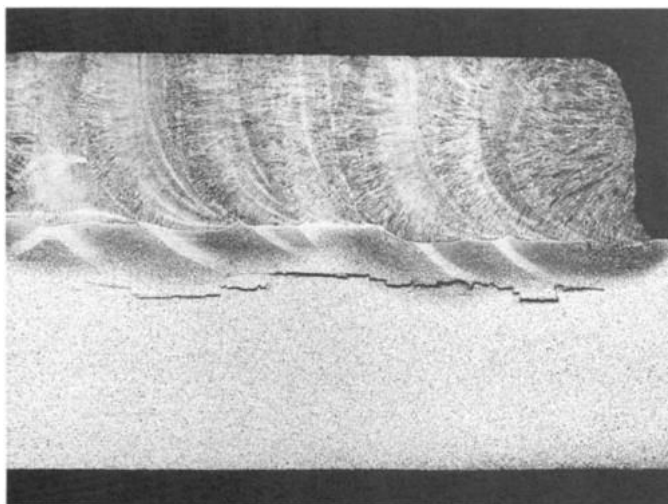


obr. 9 - Studená trhlina v tepelně ovlivněné oblasti [21]

1.3.1.3. Lamelární trhliny

Trhliny tohoto typu se vyskytují u svarů z válcovaných profilů. Jak můžeme vidět na obr. 10, tato trhlina se vyskytuje v základním materiálu paralelně k hraně svaru. Namáhání ve směru tloušťky profilu působí na vměstky v rozválcovaném plechu a způsobuje popraskání. Vznik těchto trhlín může souviset s ději v TOO. [1] [2]

Zabránit těmto vadám můžeme převážně volbou kvalitního základního materiálu s vysokou čistotou. Také lze volit svar tak, aby tahové napětí nepůsobilo kolmo ke svaru. Doporučuje se volit svařovací technika, která minimalizuje vnitřní napětí. [1] [2]



obr. 10 - Lamelární trhlina pod svarem vytvořeným na povrchu válcovaného plechu [22]

1.3.1.4. Žíhací trhliny

Iniciace těchto trhlín bývá zpravidla při žíhání, či při vícevrstevném svařování, a to za nízkých teplot v rozmezí 200–300°C, při ohřevu na teplotu žíhání. Příčinou vzniku těchto trhlín je velký rozdíl teplot jádra a povrchu svaru důsledkem rychlého ohřevu na teplotu žíhání. Tato změna vyvolá termální napětí, které může spolupůsobit se strukturními napětími. Nebo také mohou vznikat v oblasti žíhacích teplot od 600 do 650°C Tyto vysokoteplotní žíhací trhliny vznikají v oblasti s hrubým zrnem a objevují se u nízkolegovaných a mikrolegovaných ocelí. [2]

1.3.2 Pórovitost

Množství bublin ve svaru nazýváme pórovitostí. Bubliny vzniknou kvůli plynu uvězněnému během svařování do tavné lázně. Za běžných podmínek bubliny vyplavou na povrch svarového kovu. Avšak při rychlém ochlazení se mohou uvěznit ve svaru, a tak vznikne bublina. Bubliny bývají oblé a samostatně nepůsobí velké komplikace. Nebezpečí vznikne při jejich shlukování, jako například na obr. 11, kdy se mohou spojit. Spojené bubliny zvyšují nebezpečí lomu. [2] [19] [23]



obr. 11 - Příklad výrazné pórovitosti [24]

1.3.3 Vměstky

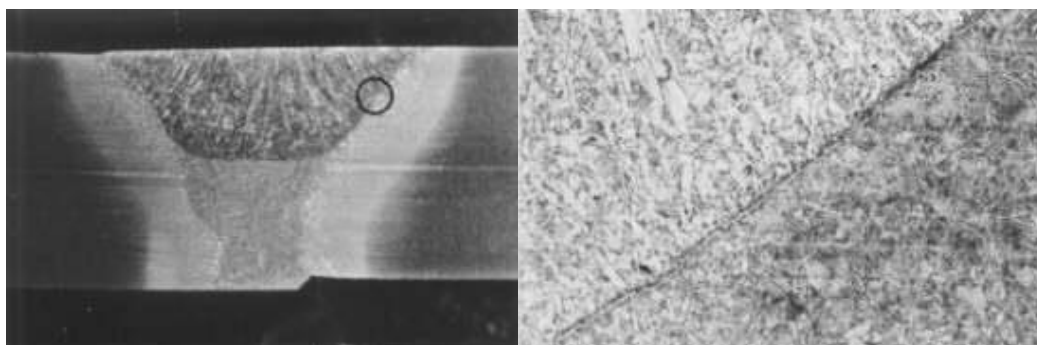
Vměstky mohou vzniknout jako cizí těleso, které se dostalo do svarové lázně a zhoršilo kvalitu svaru. Tyto vměstky označujeme jako exogenní. Také mohou vznikat reakcí v roztaveném kovu, kdy vznikne sloučenina, v takovém případě mluvíme o endogenních vměstcích. Příkladem endogenního vměstku může být nízkotavitelná fáze, kterou nejčastěji nalezneme na hranicích zrn a dendritů. Takové vměstky mohou způsobit trhliny za tepla. Dalšími typy endogenních vměstků mohou být vměstky oxidické, sulfidické a fosfidické, které mohou mít globulární tvar. Pokud mají globulární vměstky pevnost vyšší než základní materiál, nemusí být nijak nebezpečné, v opačném případě mohou mít vrubový účinek. Zpravidla jsou vměstky nebezpečnější než bubliny. [23]

1.3.4 Vruby a zápaly

Jedná se o vady tvaru, kdy má svarový povrch nepřijatelnou geometrii. Tyto vady vzniknou na přechodu svarové housenky a základního materiálu, nebo dříve navařeného svarového kovu. Jsou způsobeny nesprávnou technikou svařování, například při nesprávné volbě velikosti svářecího proudu. Kvůli zmenšení průřezu svaru si u nich musíme dávat pozor na únavové namáhání. [10] [19] [23]

1.3.5 Studené spoje

Studený svar není dostatečně natavený a nedošlo tak k promísení svarového kovu a základního materiálu. Naleznout jej můžeme na bočních stěnách svarového spoje, jak tomu můžeme vidět na obr. 12, ale může také vzniknout mezi housenkami nebo v kořeni svaru. Bývá způsoben rychlým svařováním, nízkým proudem svařování nebo špatnou úpravou svarových ploch. [10] [19] [23]



obr. 12 - Studený spoj mezi finální housenkou a základním kovem, zvětšeno 100x [25]

1.3.6 Neprůvar

Nastává, když je skutečná hloubka průvaru menší než hloubka předepsaná. Dochází k němu v případě, kdy nebyl dostatečně nataven základní materiál. Stejně jako u studeného spoje, je neprůvar způsoben vysokou svářecí rychlostí nebo i nízkým proudem. Také může být způsoben předběhnutím svarové lázně, nebo příliš vysokou housenkou. [10] [19] [23]

2 Vyhodnocování svarových spojů

Vlastnosti svarových spojů musí odpovídat nárokům na celou konstrukci. Z toho důvodu je nutné svary na konstrukci otestovat, zda odpovídají předepsaným požadavkům. Svarové spoje bývají testovány vícero způsoby než kovy zpracované jakkoliv jinak. Svarové spoje můžeme podrobit stejnými zkouškami jako při testování jakéhokoliv jiného kovu. Zkoušky také využíváme ke zhodnocení svarového postupu, kontroly kvality svářeče, či k porovnání kvality elektrod a přídavného materiálu. Vzhledem ke zvýšené potřebě kvalitních a spolehlivých svarů se objevují nové metody testování. Řada testů svarových kovů je normalizovaná, aby bylo možné zajistit přesnost a opakovatelnost zkoušky a jednotlivé výsledky šlo snadno mezi sebou porovnávat. [2] [3] [8]

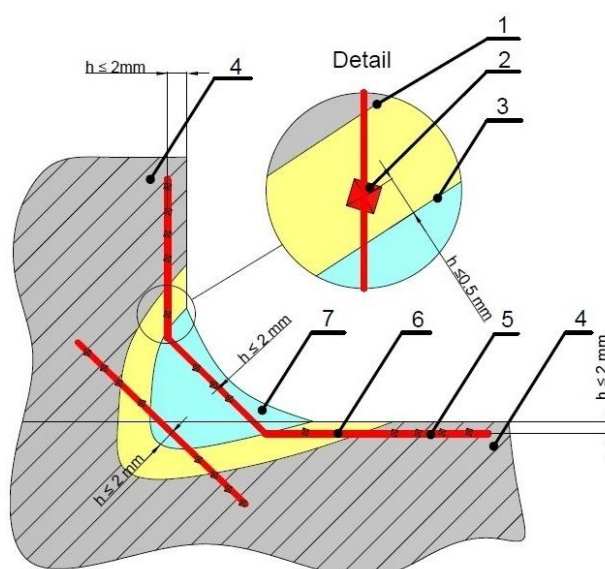
2.1 Destruktivní zkoušky svarových spojů

Tyto mechanické zkoušky během procesu testování svar poruší tak, že již není možné jej v konstrukci použít. Tyto zkoušky většinou využíváme před zahájením sériové výroby. Jejich použití je drahé, protože pro jejich vyhodnocení je třeba svarový spoj připravit pro vykonání dané mechanické zkoušky, což většinou zahrnuje dělení svařeného materiálu, případně další přípravy. [2] [8]

2.1.1 Zkouška tvrdosti

Tato zkouška jedné ze základních vlastností materiálu určuje odpor materiálu proti statickému, nebo dynamickému vnikání cizích těles. Provádí se podle normy ČSN EN 9015-1. Tvrdost měříme podle Vickerse v souladu s ISO 6507-1 při zatížení 49 a 98 N – HV5, HV10, popřípadě lze použít metodu i podle Brinella. Teplota okolí při zkoušení, pokud není uvedeno jinak je 18 až 28°C. [2] [26] [27]

Vzorek pro tuto zkoušku se odebírá kolmo na osu svarového spoje mechanickým řezáním tak, aby povrch nebyl ovlivněn. Vzorek spoje musí kromě svarového kovu obsahovat obě TOO a oba základní kovy. Povrch brousíme a v případě potřeby zviditelnění jednotlivých oblastí svarového spoje i leptáme. Často využíváme vzorky připravené na kontrolu makrostruktur spoje. Je možno volit jednotlivé vpichy (E), či řadu vpichů (R), kdy počet vtisků volíme tak, aby bylo možno určit tvrdost v jednotlivých oblastech a zároveň, aby byla respektována normou doporučená vzdálenost jednotlivých vtisků. [2] [26] [27]



- 1 - Hranice tepelně ovlivněné zóny (HAZ)
- 2 - Doplňující vpich
- 3 - Linie nastavení
- 4 - Základní materiál
- 5 - Linie vpichů
- 6 - Tepelné ovlivněná zóna (HAZ)
- 7 - Materiál sváru

obr. 13 - Zkoušení tvrdosti svarových spojů [28]

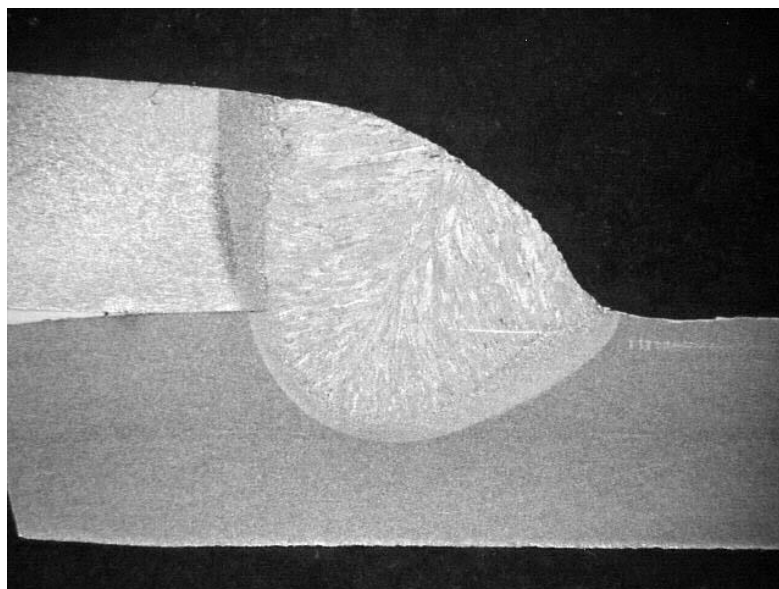
Výsledky této zkoušky zapisujeme do protokolu, který zahrnuje tabulky s naměřenými hodnotami a nákres, kde byly vpichy provedeny, tak jako například na obr. 13. [2] [26] [27]

2.1.2 Zkouška mikrotvrlosti svarových spojů

Zkoušku provádíme na příčném řezu svarového spoje s velkým gradientem tvrdosti. Mikrotvrdot měříme pomocí Vickersovy zkoušky se zatížením v rozsahu 0,98 až 49 N – HV0,1 až HV5. Norma popisující tuto metodu je ČSN EN ISO 9015-2. Můžeme provádět jednotlivé vpichy (E), nebo řadu vpichů (L). Vzdálenost mezi jednotlivými vpichy jsou popsány v normě a jsou menší než vzdálenosti pro měření tvrdosti. Tuto metodu volíme, když chceme podrobně znát minimální a maximální hodnoty tvrdosti spojeného materiálu. [2] [29]

2.1.3 Metalografická zkouška

Touto zkouškou zjistíme doplňující informace o stavu struktur svařeného materiálu. Rozděluje ji podle použitého zvětšení na ověření mikrostruktur a makrostruktur. K této zkoušce můžeme použít optický, nebo elektronový mikroskop. Vzorek je mechanicky odebrán a opracován pomocí postupného broušení a následného leštění. Povrch se může naleptat k zobrazení mikrostruktur spoje. Výsledky jsou doplněny o fotografie struktur. Norma ČSN EN ISO 17639 popisuje tuto zkoušku. [2] [30]



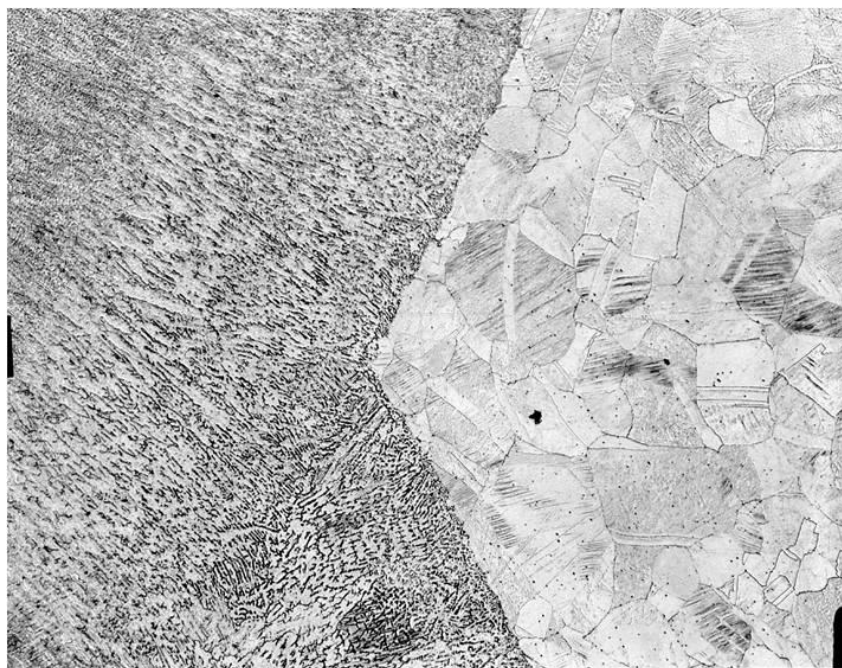
obr. 14 – Makrostruktura svaru uhlíkové oceli zvětšeno [31]

2.1.3.1. Makrostruktury svaru

Tato metoda pro zobrazení svarových makrostruktur využívá naleptání vybroušeného povrchu vzorku, který obsahuje svarový kov, tepelně ovlivněnou oblast a základní kov. Což můžeme vidět na obr. 14. Leptadlo volíme podle použitého materiálu. U ocelí jsou běžně používanými leptadly vodní 10% roztok persíranu amonného nebo kyseliny dusičné. Makrostruktury posuzujeme při malém zvětšení, lze je ale pozorovat i pouhým okem. Využíváme jí k posouzení tvaru svaru, míry provaření kořene svaru nebo šířky TOO. Zkouškou je taktéž možné zjistit defekty jako jsou například póry, vměstky, trhliny, neprůvary anebo studené spoje. [2] [30]

2.1.3.2. Mikrostruktura svaru

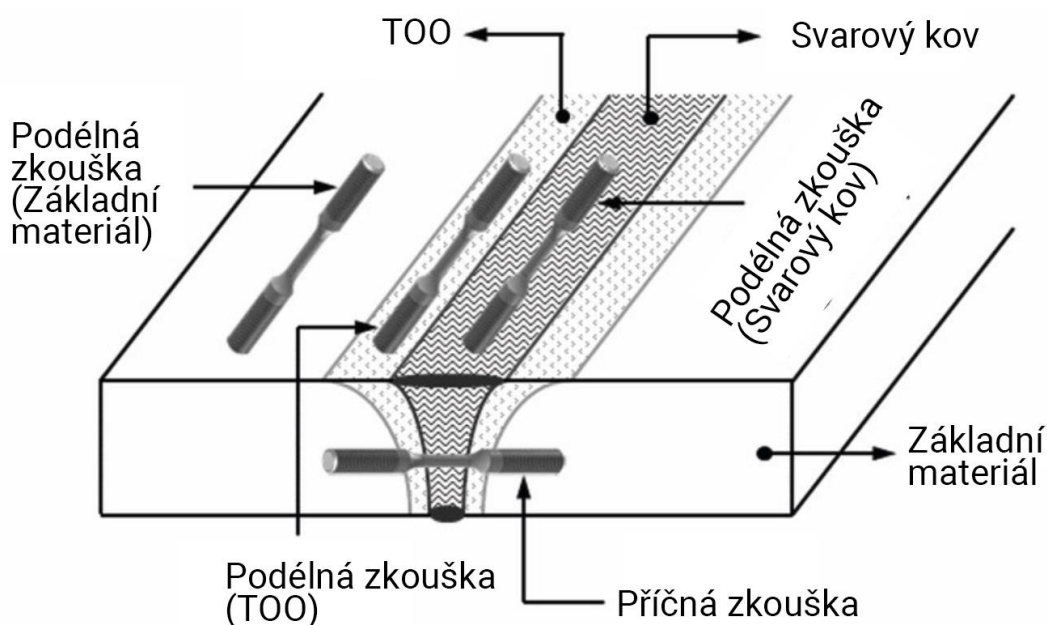
Při této zkoušce zkoumáme mikrostrukturu jednotlivých oblastí svarového spoje, a to při 30x až 2000x zvětšení. Pro provedení tohoto rozboru je třeba si materiál řádně připravit a případně naleptat, tak aby byly mikrostruktury patrné. Během pozorování oblastí svarového kovu, TOO a základního materiálu určujeme přítomnost a plošný podíl strukturních fází, obsah nekovových vměstků nebo velikosti zrn. Struktury můžeme poté nafotit. [2] [30]



obr. 15 - Mikrostruktura uhlíkové oceli při zvětšení 50x [31]

2.1.4 Zkouška tahem svarových spojů

K provedení této zkoušky využíváme normalizované tyče. Vzorky odebírané kolmo na osu svaru, slouží k zjištění pevnosti a míry plastické deformace spoje u tupých svarů. Nazýváme ji příčnou a řídí se podle normy ČSN EN ISO 4136. Vzorky odebírané z čistého svarového kovu ve směru osy bez základního materiálu slouží k určení mechanických vlastností svarového kovu. Případně můžeme odebírat vzorky z tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu. Tato zkouška je podélná a řídí se podle normy ČSN EN ISO 5178. Příklady odebrání vzorků jsou zobrazeny na obr. 16. [2] [32] [33]



obr. 16 - Orientace a umístění vzorků jednotlivých druhů tahové zkoušky [34] – upraveno

2.1.1 Zkouška rázem v ohybu svarových spojů

Doplňuje informace o materiálu získané tahovou zkouškou, kdy simuluje náchylnost materiálu ke křehkému porušení. Určuje plastické vlastnosti materiálu spoje. Norma ČSN EN ISO 9016 popisuje orientaci vrubu, jeho umístění a jak zaznamenat výsledky zkoušky. Zkouška je poté provedena podle normy ČSN EN ISO 148-1. Tyče mohou být odebírány tak, aby vrub byl umístěn ve svarovém kovu, v tepelně ovlivněné oblasti, nebo na základním materiálu. [2]

2.2 Nedestruktivní zkoušky svarových spojů

Toto testování svarových spojů využívá k detekci vad metody, které neovlivní jejich následnou použitelnost v provozu. Také lze některé tyto metody použít pro zjištění poruch za provozu bez nutné demontáže. Odhalují porušení celistvosti jak na povrchu, tak i uvnitř materiálu. Nedestruktivní zkoušky můžeme použít během všech fází výroby. Metody tohoto typu jsou v mnohých případech nutnou podmínkou pro použití svařovaného dílu v provozu. [2] [8]

2.2.1 Vizuální metoda

Je to nejjednodušší metoda, kdy buď přímo okem (případně s použitím lupy), nebo nepřímo pomocí endoskopu identifikujeme zjevné povrchové vady. Jsme schopni zjistit vady jako například nepřijatelné nerovnosti, převýšené svary, zápaly, některé studené spoje a vady kořenové oblasti. Endoskopy využíváme v místech, kde se z důvodu nepříznivé geometrie nemůžeme podívat (například uvnitř trubky), nebo by byla přítomnost obsluhy nebezpečná (například v chemicky zamořených prostorech). Případné defekty porovnáváme s normou ČSN EN ISO 5817, abychom zjistili, zda jsou přípustné. [2]

2.2.2 Penetrační metoda

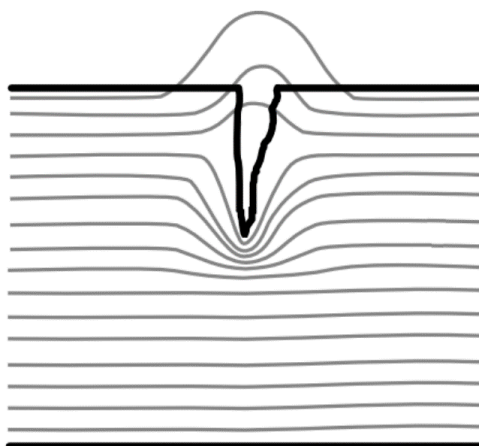
Při této metodě používáme kapalinu o nízkém povrchovém napětí, kterou aplikujeme na povrch svaru. Po určité době kapalina pronikne do necelestvosti svaru. Když odstraníme přebytečnou kapalinu a nanese se vývojku, kapalina, která v trhlině zůstala, vyvzlíná a danou vadu zviditelní. Příklad výsledku této metody můžeme vidět na obr. 17. Výhody této metody jsou, že je relativně levná a rychlá. Není možné ji však použít u materiálů s porézním povrchem. Když bude povrch znečištěný, tak se může defekt skrýt. Penetrant také může ovlivnit povrchovou úpravu. [2] [35]



obr. 17 - Příklad indikací kapilárního zkoušení [35]

2.2.3 Metoda magnetická prášková

Touto metodou můžeme u feromagnetických materiálů zjistit praskliny, které ústí k povrchu svarového spoje, ale také necelistvosti, které leží těsně pod povrchem a na povrch nevystupují. Metoda využívá principu rozptylových polí, kdy místo s vadou klade vyšší magnetický odpor a magnetické pole vedené dílem opustí svou předpokládanou dráhu a vytvoří rozptyl. V případě povrchové vady takto rozptýlené magnetické pole vystoupí nad povrch, jak tomu je i na obr. 18. Velikost rozptylu je dána velikostí, tvarem a místem vady. Na zmagnetovanou část pak nanese magnetický prášek v suché nebo kapalně formě, který se v místě vady začne shlukovat. [2]



obr. 18 - Rozptylové pole na vadě [36] – upraveno

2.2.4 Prozařovací metody

Tato metoda využívá pronikavé záření, jako je rentgenové nebo gama záření, které interaguje se zkoumaným materiálem svaru. Jak velké množství záření homogenním materiálem projde je přímo úměrné jeho tloušťce. Vady svaru vytváří na detekčním záření reliéfy, které nám napomáhají určit, kde se daná vada nachází, jakého by mohla být charakteru a jak velká může být. [2]

Prozařovací metody dělíme podle použitého detektoru. **Radioskopie** využívá takových zařízení, které jsou v reálném čase schopny zobrazit množství prošlého záření, proto je můžeme využít při sériové výrobě. **Radiografie** zachycuje prošlé záření stacionárním výrobkem na fotografický film, který je permanentní (takzvaný radiogram), ze kterého lze vady následně vyčíst. **Radiometrie** umožňuje měřit změny množství prošlého záření v určitém místě svaru, toho využijeme například při měření tloušťky svaru. [2]

2.2.5 Ultrazvukové metody

Akustické vlnění procházející materiálem se mění mezi dvěma materiály s rozlišnými akustickými vlastnostmi, jsme tedy touto metodou schopni detekovat vady jako je trhlinka, bublina nebo vměstek. Využívá se metoda **průchodová**, která využívá dvě sondy, které jsou umístěny na opačné straně materiálu. Jedna je využívána jako vysílač a druhá jako přijímač. Vada v materiálu vytváří takzvaný akustický stín, který se projeví nižší snímanou hodnotou. Druhou, více využívanou metodou, je **obrazová impulzní**, kdy jsou do materiálu vysílány krátké ultrazvukové impulzy, které jsou odraženy od protilehlého povrchu a vnitřních vad. Tyto vrácené impulzy jsou snímány přijímačem a časový průběh je zobrazen na stínítku obrazovky. Vada se na stínítku projeví jako dva zpětné impulzy, první od vady a druhý od protilehlé stěny. [2]

PRAKTICKÁ ČÁST

3 Posouzení kvality svarové konstrukce

Analyzováno bylo 11 svarů na konstrukci. Tato práce podrobně zkoumá první tři z nich. Výsledky ostatních provedených měření jsou v příloze. Chemické složení materiálů ani parametry svařování nebyly sděleny. Pro účel této práce byly vyhodnoceny makrostruktury, mikrostruktury a také byla provedena kontrola mikročistot a tvrdostí svarů.

3.1 Příprava vzorků

Vzorky byly vyjmuty z celé konstrukce na předem vybraných místech pomocí pásové pily. Aby bylo možno se vzorky pracovat, bylo třeba je poté zmenšit na stolní metalografické pile LECO MSX 255 (viz obr. 19). Také byla zaříznuta zkoumaná plocha, aby vzorek měl lepší povrch a nebyl tepelně ovlivněn od předchozího řezání. Během řezání byl vzorek chlazen proudem chladící tekutiny.



obr. 19 - Zabrušovací stolní pila LECO MSX 255 [37]

Vzorky následně byly zalisovány v bakelitu v lisu LECO PR-4X (viz obr 20). Svary byly dále broušeny na brusce LECO GPX300, která je zobrazena na obr. 21. Broušení bylo provedeno za mokra, kdy byly vzorky chlazeny vodou. Postupně byla vystřídána série brusných papírů s drsnostmi od P80 do P2400. Vzorky byly nakonec leštěny na plátnu za přítomnosti diamantové suspenze o zrnitosti 3 μm a poté leštící silikovou emulzí (SiO_2). Povrch byl posléze očištěn vodou, opláchnut alkoholem a vysušen proudem teplého vzduchu. Na takto upravených vzorcích byla pozorována mikročistota.

Pro zobrazení zrn materiálu je potřeba povrch naleptat. K naleptání byl využit 2-3% roztok nitalu (HNO_3 a alkohol), do kterého byl povrch ponořen. Plocha byla poté umyta alkoholem a usušena.



*obr. 20 - Metalografický lis LECO PR-4X
[39]*



*obr. 21 - Metalografická bruska
LECO GPX300 [40] – upraveno*

3.2 Metalografická analýza

Struktury svaru byly pozorovány na metalografickém mikroskopu Carl Zeiss Neophot 32 na obr. 22, stereo mikroskopu Nikon SMZ 1500 a digitálním mikroskopu Olympus DSX1000. Každý z těchto mikroskopů má určité výhody, u všech je možno digitálně zaznamenat pozorovanou oblast.

Olympus byl využit pro snímání celých nenaleptaných vzorků. Mikroskop Nikon pro pozorování makrostruktur. Mikroskop značky Carl Zeiss byl využit pro pozorování mikrostruktur.

Vady byly vyhodnocovány podle normy ČSN EN ISO 6520-1 a u každé vady bylo uvedeno její číslo a název dle této normy.



obr. 22 - Metalografický mikroskop Carl Zeiss Neophot 32 [35]

3.3 Zkouška tvrdosti

Tvrdot byla zkoušena na automatickém tvrdoměru Struers Duramin 40AC3, který je zobrazen na obr. 23. Příklad je vybaven mikroskopem pro prvotní nalezení ideálního místa vpichu a po provedení vpichování i jeho vyhodnocení. Tvrdot byla měřena podle Vickerse HV5 se zatížením 49,03 N (5 kp) s dobou trvání 10 sekund. Naměřené výsledky byly následně vkresleny do grafu.



obr. 23 - Automatický tvrdoměr Struers Duramin 40AC3 [38]

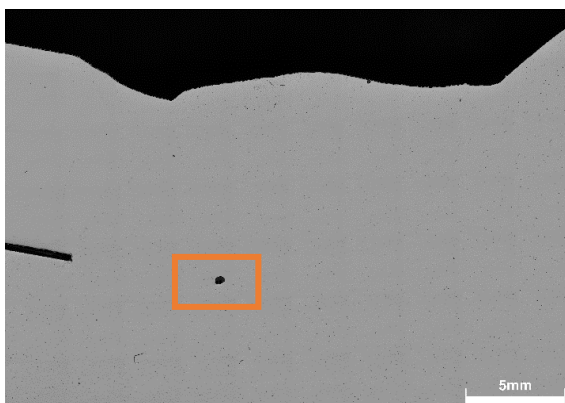
3.4 Kontrola svaru číslo 1

Vzorek byl odebrán z konstrukce v pozici, jenž vidíme na obr. 24. Jedná se o tupý svar provedený tavným svářením. Už na první pohled je patrné, že svar není úplně vyplněn (511 - neúplné vyplnění svaru), a tím pádem má svar nesprávný úhel přechodu svaru (5051 - nesprávný úhel přechodu svaru).



obr. 24 - Umístění svaru 1 na konstrukci

Po odřezání a vyleštění byl povrch nafocen. Na obr. 25, je patrné, že u kořene svaru je plynová dutina (2011 - pór), jejíž detail a rozměr můžeme vidět na obr. 26.

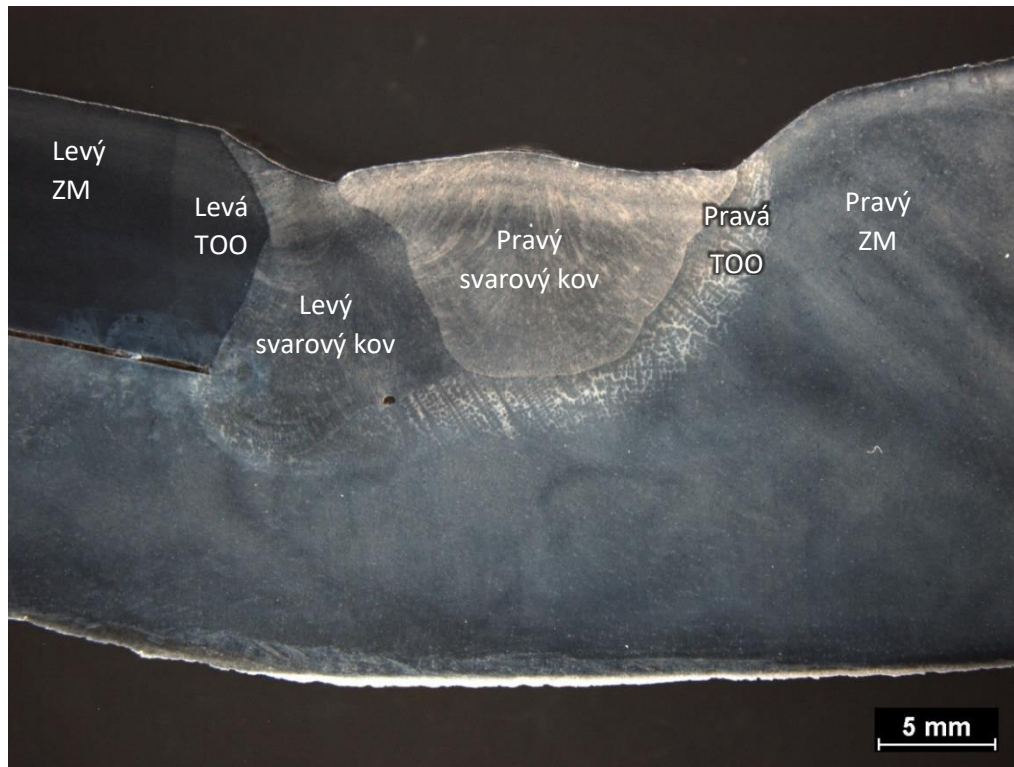


obr. 25 - Mikročistota svaru 1

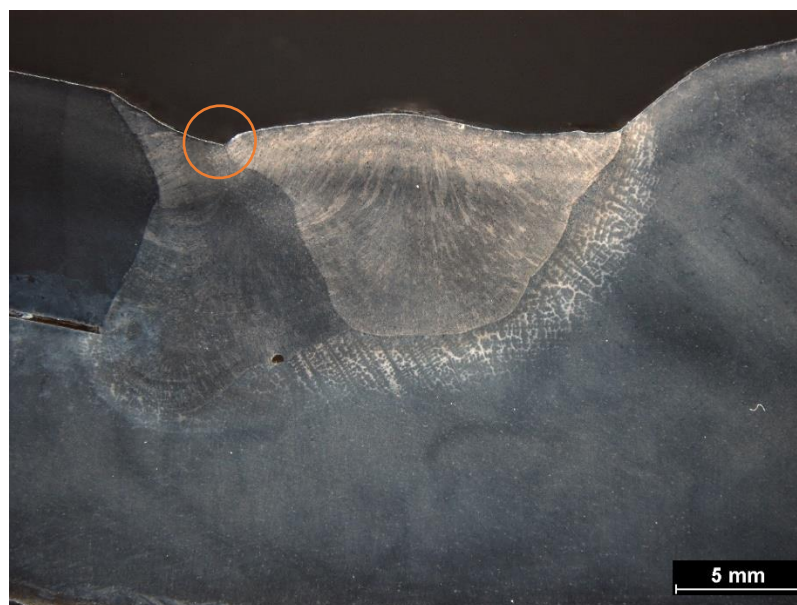


obr. 26 - Detail póru svaru 1

Vzorek byl dále naleptán, výsledná makrostruktura je na obr. 27. Je zjevné, že svar má dvě housenky. Jak je zvýrazněno na detailu obr. 28, přechod mezi housenkami má vrub (5014 - vrub mezi housenkami).

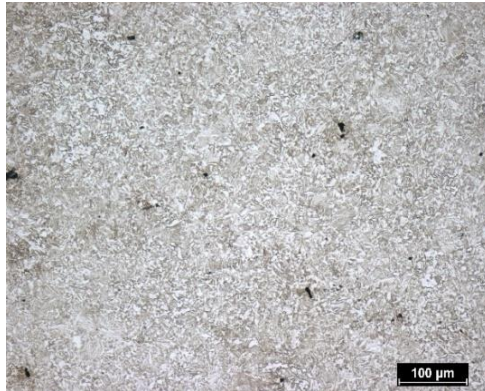


obr. 27 - Naleptaná makrostruktura svaru 1



obr. 28 – Detail naleptané makrostruktury svaru 1

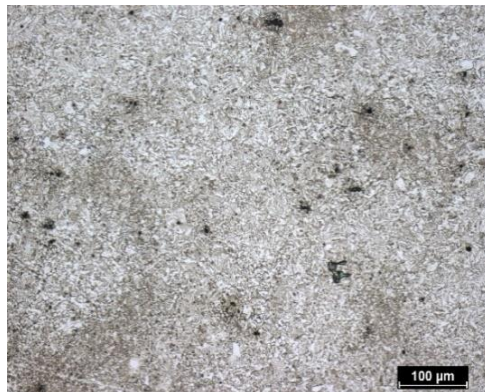
Mikrostrukturní analýza ukázala, že se jedná o spoj dvou odlišných materiálů, kdy na obr. 29 b) lze vidět základní materiál v pravé části svaru, mikrostruktura základního materiálu je s vysokým podílem acikulárního feritu. Zatímco vlevo na obr. 29 a) je ocel, která má perliticko feritickou strukturu. V pravé TOO, kterou můžeme vidět na obr. 29 d), má materiál jehlicovou strukturu, nejspíše způsobené zakalením materiálu.



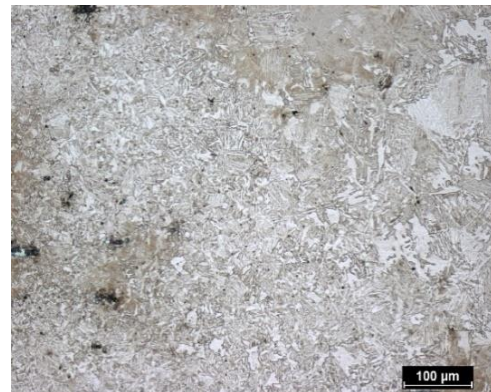
a) Mikrostruktura levého základního materiálu



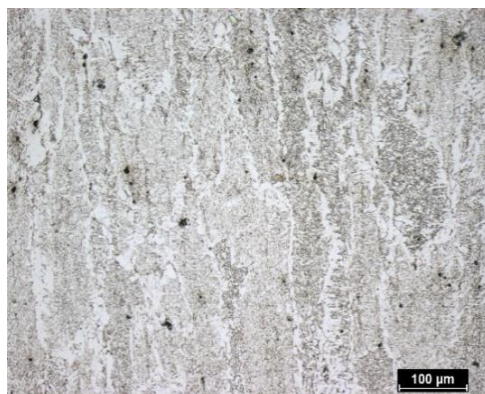
b) Mikrostruktura pravého základního materiálu



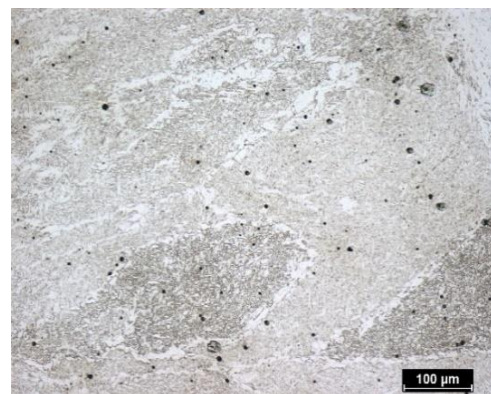
c) Mikrostruktura levé TOO



d) Mikrostruktura pravé TOO



e) Mikrostruktura levého svaru

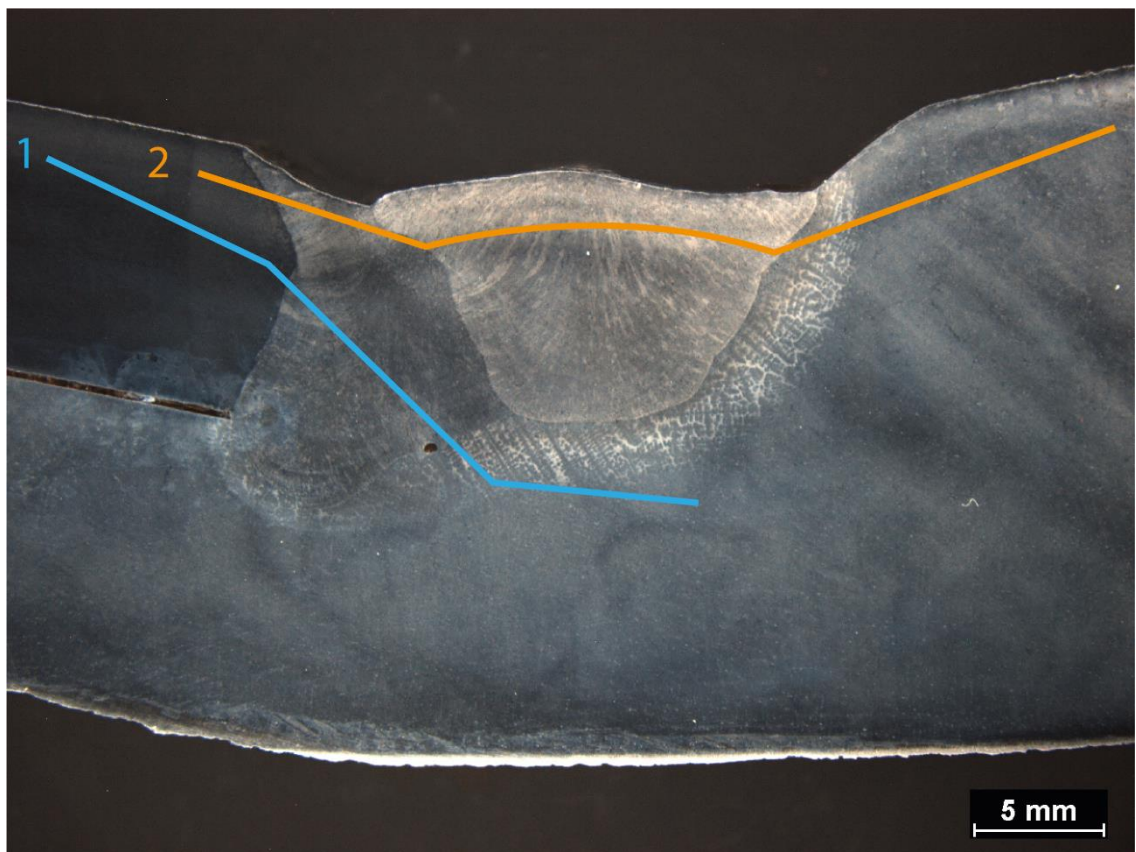


f) Mikrostruktura pravého svaru

obr. 29 - Mikrostruktura naleptaného svaru 1

Nakonec byla provedena zkouška tvrdosti. Z důvodu umístění housenek byla první řada vedena levým základním materiálem a levou housenkou do pravého základního materiálu. Druhá řada byla vedena těsně pod povrchem od levé TOO do pravého základního materiálu. Vedení řad měření je zobrazeno na obr. 30.

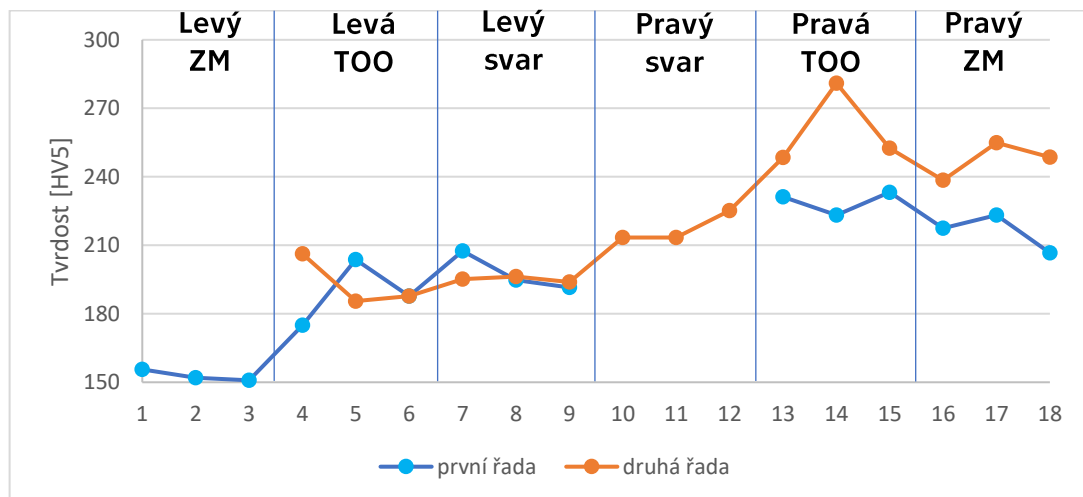
Jak vidíme v tabulce 1, tvrdosti se pohybují od 150 do 280 HV5. Nejvyšší tvrdost je v pravé tepelně ovlivněné oblasti, což by mohlo znamenat přítomnost zakaleného zrna, nejspíše způsobeného rychlým zchlazením oblasti v tomto místě. Ovšem tvrdost v tomto pásmu nepřekročila doporučené maximum.



obr. 30 - Vedení řad zkoušky tvrdosti vzorku 1

Tabulka 1 - Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku 1

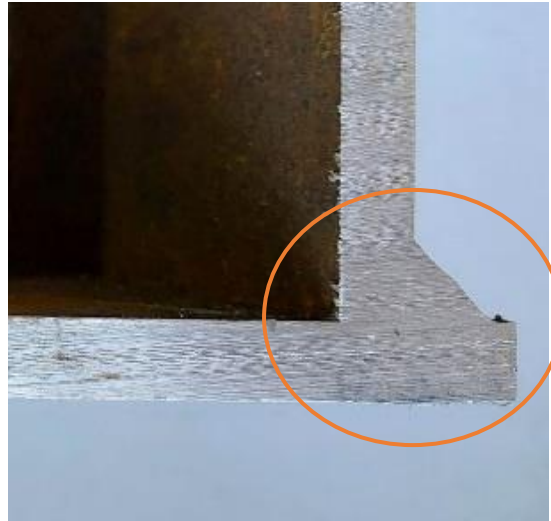
	číslo měření	první řada [HV5]	druhá řada [HV5]
Levý základní materiál	1	156	
	2	152	
	3	151	
Levá TOO	4	175	206
	5	204	186
	6	188	188
Levý svar	7	208	195
	8	195	196
	9	192	194
Pravý svar	10		213
	11		213
	12		225
Pravá TOO	13	231	248
	14	223	281
	15	233	252
Pravý základní materiál	16	218	238
	17	223	255
	18	207	249


obr. 31 - Graf naměřených tvrdostí

Svar obsahuje vady jako je nepříznivá geometrie, konkrétně vadu 511 - neúplné vyplnění svaru a vadu 5051 - nesprávný úhel přechodu svaru. Také na přechodu mezi housenkami je vada 5014 - vrub mezi housenkami. Ve svaru je chyba 2011 – pór. Tvrdosti se pohybují v přijatelných mezích.

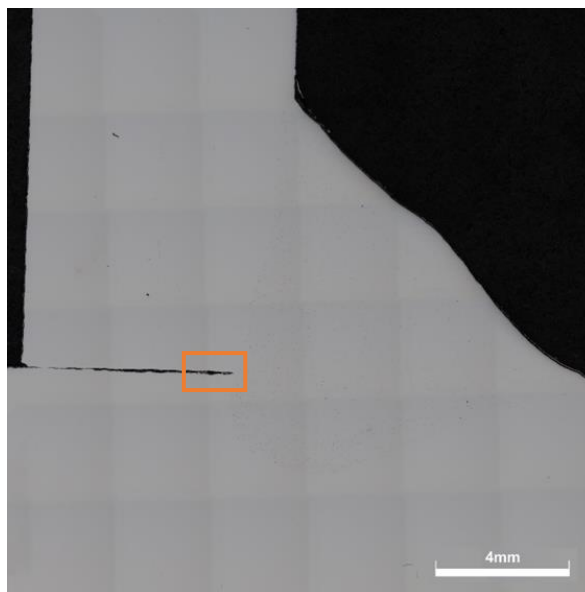
3.5 Kontrola svaru číslo 2

Na obr. 32 lze vidět umístění svaru na konstrukci. Svar je koutový a na první pohled vypadá, že neobsahuje žádné vady.

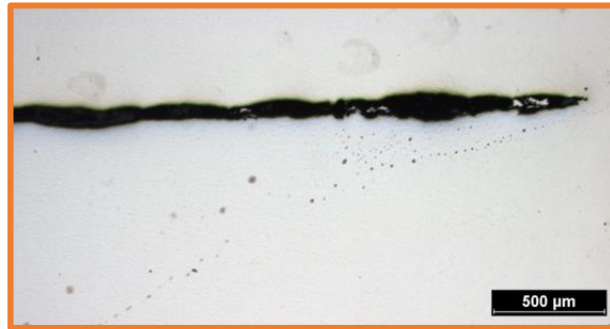


obr. 32 - Umístění svaru 2 na konstrukci

Svar byl zmenšen na metalografické pile a následně byl vyleštěn. Na obr. 33 je mikročistota spoje. Pórovitost i celková celistvost spoje byly vyhodnoceny jako dobré. Zkontrolována byla i svarová mezera na přítomnost trhlin. Výsledek je vidět na obr. 34. Konec sice působí ostrým dojmem, ale trhlina nebyla nalezena.

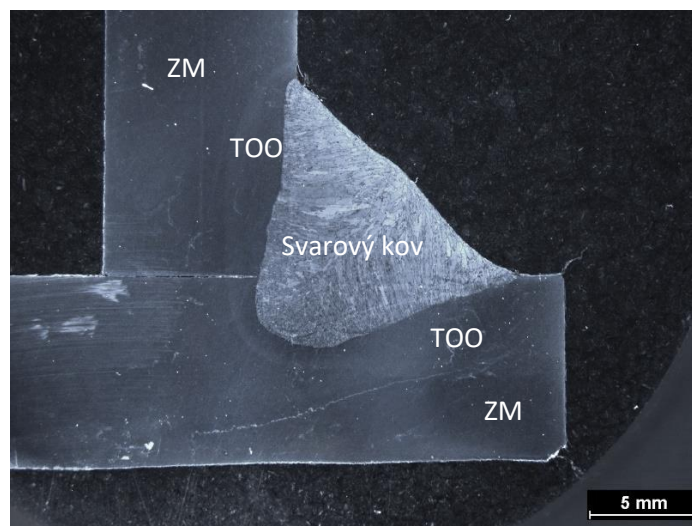


obr. 33 – Nenaleptaná mikročistota svaru 2

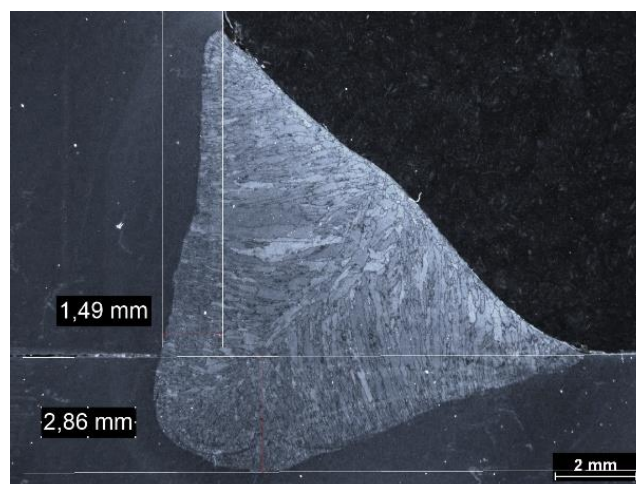


obr. 34 - Detail svarové mezery

Po naleptání byla provedena makroskopická analýza (obr. 35). Svar vypadá v pořádku. Hloubka průvaru je změřena na obr. 36. Průvar není na obou stranách stejný, ale měl by být dostatečný.

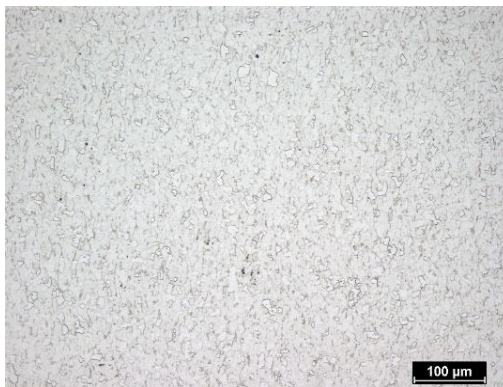


obr. 35 - Naleptaná makrostruktura vzorku 2



obr. 36 - Detail změření průvaru svaru 2

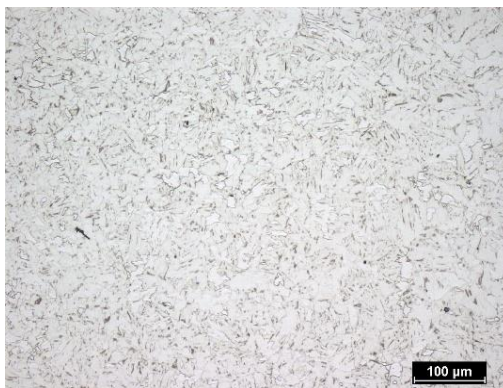
Základní materiál má feriticko perlitickou strukturu. V tepelně ovlivněné oblasti se zrno zvětšilo. Na svarovém kovu je licí dendritická struktura.



a) Mikrostruktura základního materiálu



b) Mikrostruktura základního materiálu



c) Mikrostruktura TOO



d) Mikrostruktura TOO



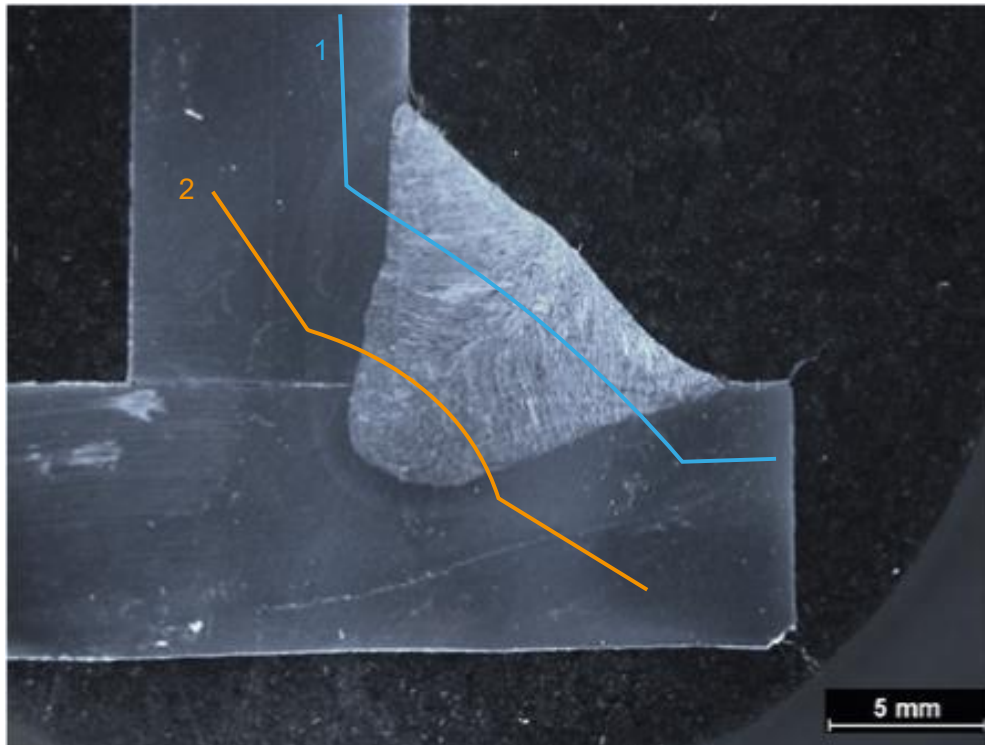
e) Mikrostruktura svarového kovu



f) Mikrostruktura svarového kovu

obr. 37 - Mikrostruktura naleptaného svaru 2

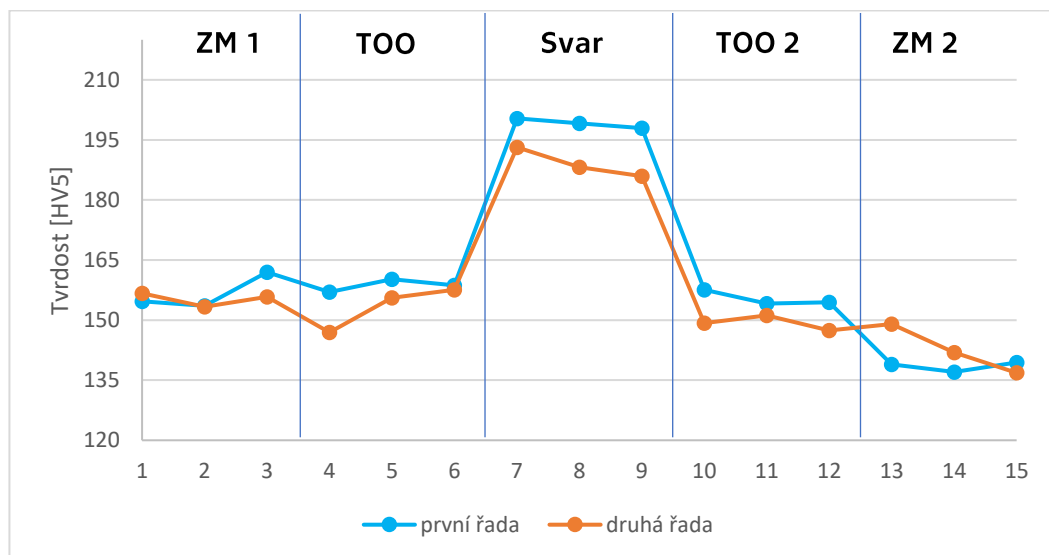
U zkoušky tvrdostí byly vedeny dvě řady, jedna těsně pod povrchem a druhá u kořene svaru, jak jde vidět na obr. 38. Naměřené hodnoty jsou vypsány v tabulce 2. Tvrdosti se pohybují od 135 do 200 HV5 a nejtvrdší je svarový kov, nejspíše z důvodu zjemnění zrna. Tvrdosti se pohybují v přijatelných mezích.



obr. 38 - Vedení řad zkoušky tvrdosti vzorku 2

Tabulka 2 - Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku 2

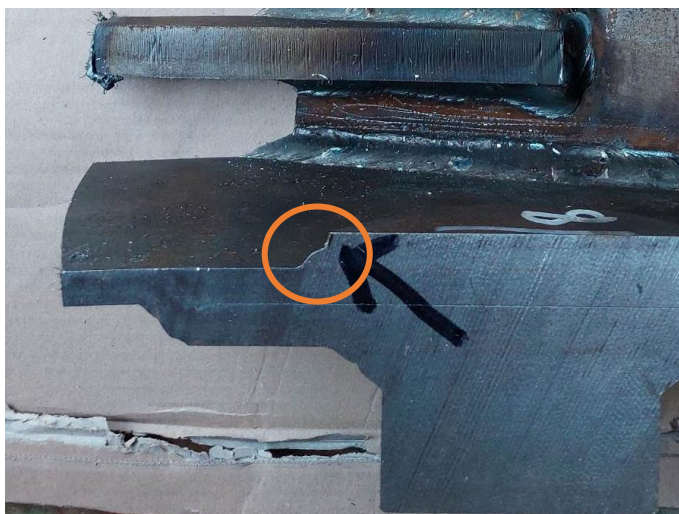
	číslo měření	první řada [HV5]	druhá řada [HV5]
Základní materiál 1	1	155	157
	2	154	153
	3	162	156
TOO 1	4	157	147
	5	160	156
	6	159	158
Svar	7	200	193
	8	199	188
	9	198	186
TOO 2	10	158	149
	11	154	151
	12	154	147
Základní materiál 2	13	139	149
	14	137	142
	15	139	137


obr. 39 - Graf naměřených tvrdostí vzorku 2

Byť má svar na vzorku 2 průvar na jedné straně menší než na druhé, svar je proveden dobře a mohl by být používán v provozu.

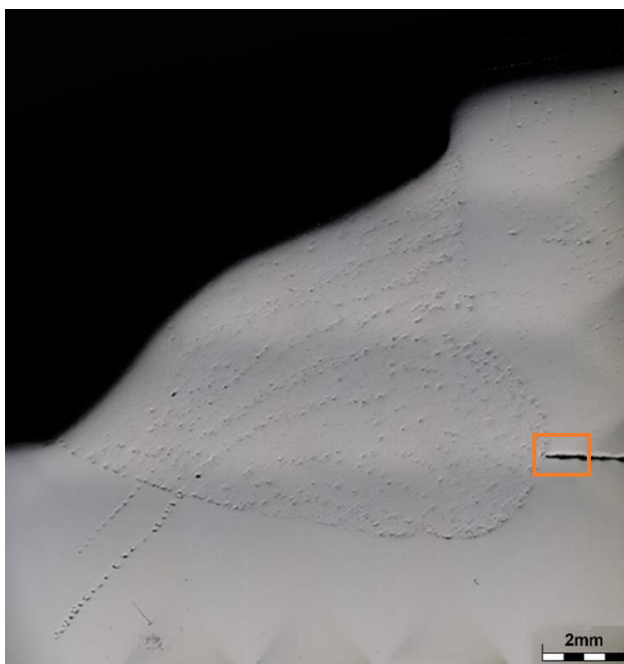
3.6 Kontrola svaru číslo 3

Vzorek číslo 3 byl odebrán z konstrukce na pozici zobrazené na obr. 40. Svar je koutový a vypadá, že je bez významných vad.

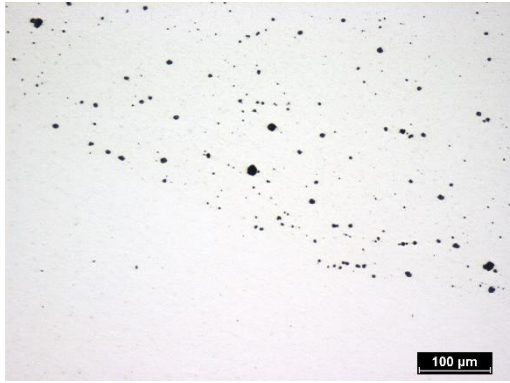


obr. 40 - Umístění svaru 3 na konstrukci

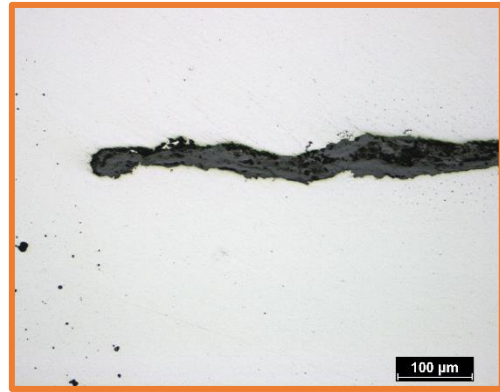
Na obr. 41 je zobrazena mikročistota svaru. Vzorek má výraznou pórovitost (2012 - rovnoměrná pórovitost), viz obr. 42. Také byla zkontrolována svarová mezera, zda nemá trhlinu. Výsledek je na obr. 43 a svarová mezera má bezpečné oblé zakončení.



obr. 41 - Nenaleptaná mikročistota svaru 3



obr. 42 - Detail pórovitost



obr. 43 - Detail svarové mezery

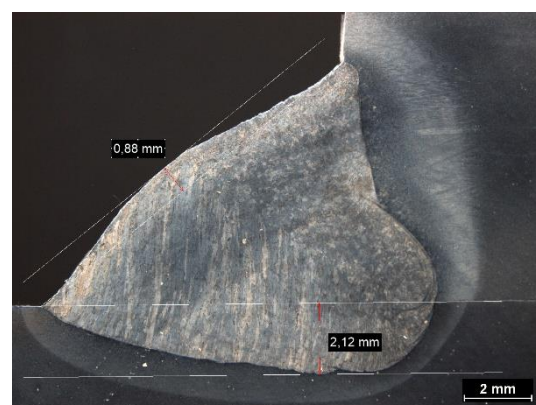
Naleptaná makrostruktura je zobrazena na obr. 44. Průvar svaru, který je zobrazen na obr. 46, není symetrický. Také bylo změřeno převýšení koutového svaru.



obr. 44 - Naleptaná makrostruktura svaru 3



obr. 45 - Detail makrostruktur svaru 3

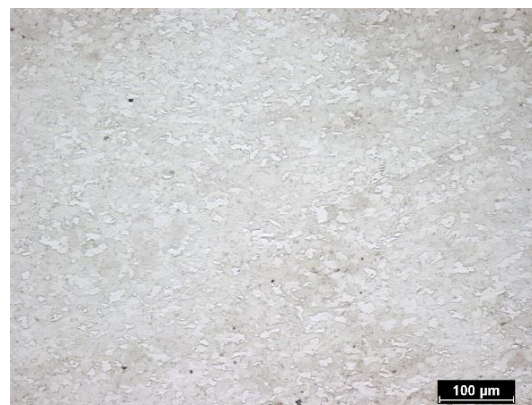


obr. 46 - Měření průvaru a velikosti svaru 3

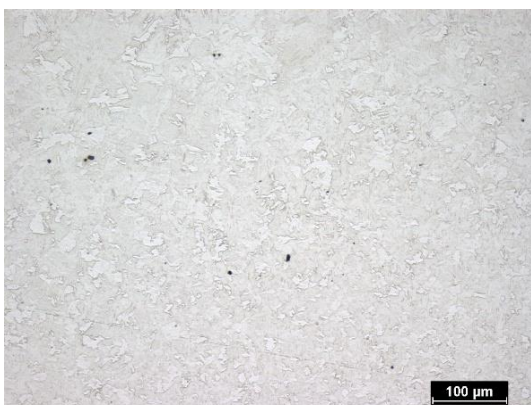
Z mikrostrukturní analýzy vyplývá, že základní kov je materiál s vysokým podílem acikulárního feritu. V tepelně ovlivněné oblasti na obr. 47 d) je jehlicovité zrna. To se projevilo ve zvýšené tvrdosti materiálu. Svarový kov na obr. 47 e) ukazuje dendritickou mikrostrukturu.



a) Mikrostruktura základního materiálu



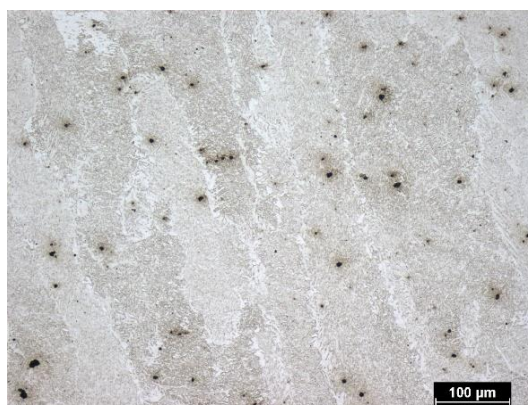
b) Mikrostruktura základního materiálu



c) Mikrostruktura TOO



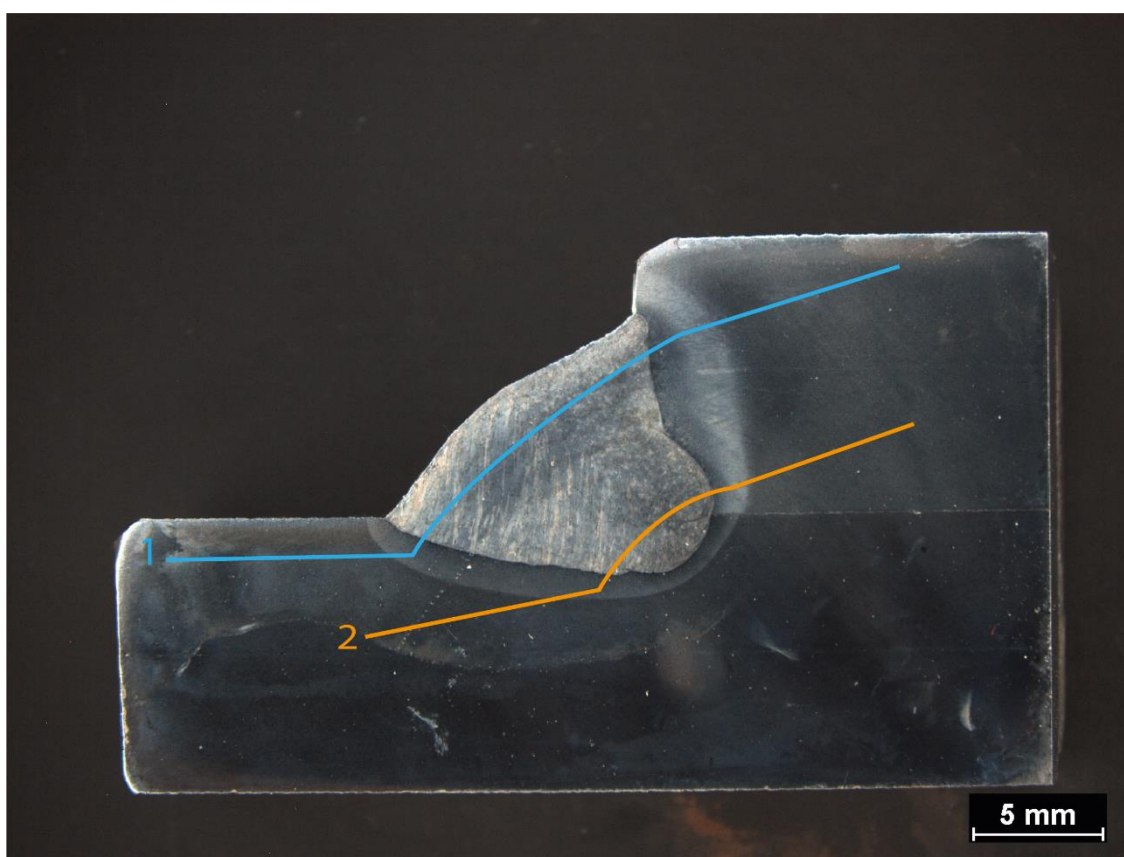
d) Mikrostruktura TOO



e) Mikrostruktura svarového kovu

obr. 47 - Mikrostruktura naleptaného svaru 3

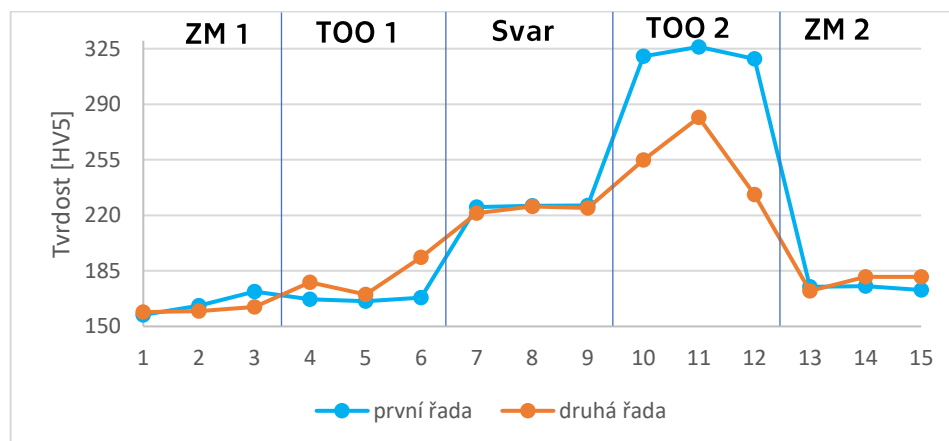
Zkoušku tvrdosti byla provedena ve dvou řadách, které jsou znázorněny na obr. 48. První řada byla vedena 2 mm pod povrchem a druhá u kořene svaru. Naměřené hodnoty vidíme v tabulce 3. Tvrdost se pohybuje ve velkém rozmezí a to od 157 do 326 HV₅. Základní materiál má tvrdost kolem 170 HV₅, ovšem ve svislé TOO došlo k velkému nárustu tvrdosti až na již zmíněných 326 HV₅. Taková vysoká tvrdost má za následek zvýšení křehkosti, a tak je tato tepelně ovlivněné oblasti pro provoz nepřijatelná. Vysoká tvrdost je nejspíše z důvodu rychlého zchlazení kovu, případně nebyl aplikován dostatečný předehřev.



obr. 48 - Vedení řad zkoušky tvrdosti vzorku 3

Tabulka 3 - Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku 3

	číslo měření	první řada [HV5]	druhá řada [HV5]
Základní materiál 1	1	157	159
	2	163	160
	3	172	162
TOO 1	4	167	178
	5	166	170
	6	168	194
Svar	7	225	221
	8	226	226
	9	226	225
TOO 2	10	320	255
	11	326	282
	12	319	233
Základní materiál 2	13	175	172
	14	175	181
	15	173	181


obr. 49 - Graf naměřených tvrdostí

Svar obsahuje vadu 2012 - rovnoměrnou pórovitost a průvar na jedné straně je menší. Tyto vady by pro běžný provoz byly akceptovatelné. V tepelné ovlivněné oblasti však byla naměřena vysoká hodnota tvrdosti, která je znatelně vyšší než tvrdost v neovlivněné oblasti a z toho důvodu je svar nepoužitelný do běžného provozu.

ZÁVĚR

V práci byla popsána problematika svarových spojů, princip několika základních druhů svařování a kde se s nimi můžeme setkat. Bylo uvedeno, jaký vliv má svařování na spojované materiály. Byly vyjmenovány některé vady svarových spojů a jejich možný vznik. Práce se rovněž zabývá problematikou hodnocení kvality svarových spojů dle různých norem.

V praktické části práce byla provedena kontrola makrostruktur a mikrostruktur svarů na svarové konstrukci a tři z nich byly důkladně popsány. Také byla u většiny vzorků provedena kontrola mikrotvrdosti. Vady byly vyhodnoceny podle normy ČSN EN ISO 6520-1.

Zkoumaný svar s číslem 1 měl dle normy přítomné vady, a to 511 - neúplné vyplnění svaru, 2011 - pór a 5014 - vrub mezi housenkami. Při kontrole mikrostruktur v tepelně ovlivněné oblasti byly objeveny známky zakalené struktury, což se promítlo i ve zkoušce tvrdosti. Tyto vady by negativně ovlivnily použitelnost svaru v provozu.

Svar s číslem 2 měl makrostruktury v pořádku, a to jak z hlediska geometrie, tak z hlediska výskytu bublin a vměstků. Naleptaná struktura ukázala, že svar má průvar na jedné straně menší než na druhé, ale jeho hodnoty byly přijatelné. Makrostruktura materiálu vypadala v pořádku. Svarový kov měl vyšší tvrdost než základní kov, ale ne výrazně.

Makrostruktura svaru 3 ukázala vadu 2012 - rovnoměrná pórovitost, která byla výrazná. Naleptaný vzorek také prokázal, že svar nemá symetrický průvar. Tyto vady jsou však přijatelné. Při zkoumání mikrostruktur svaru byl na jedné jeho straně v TOO zakalený povrch. To bylo potvrzeno i při zkoumání tvrdosti povrchu, která v této oblasti byla až 326 HV5. Svar by byl pro provoz nevyhovující.

Výsledky zkoušek dalších svarů nebyly zahrnuty v této práci a jsou umístěny v příloze. Ukázalo se, že 6 z 11 zkoumaných svarů má vážné vady, například studené spoje nebo trhliny.

ZDROJE

- [1] HRIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. 1. vyd. Bratislava: Veda, 1989. ISBN 80-224-0016-5.
- [2] KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. *Svařování I*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2005. ISBN 80-248-0870-6.
- [3] FOLDYNA, Václav. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2. upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-85-3.
- [4] INSTITUT, Český normalizační. ČSN ISO 857 Metody svařování, tvrdého a měkkého pájení - Slovník.
- [5] KUBÍČEK, Jaroslav. Díl 1 ZÁKLADNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ. Brno, 2006. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te__technologie__2__svarovani__tavne__kubicek.pdf
- [6] ČSN EN ISO 4063 *Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [7] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- [8] CARY, Howard a Scott HELZER. *Modern Welding Technology*. 6. Upper Saddle River, New Jersey Columbus, Ohio: Pearson Education, 2005. ISBN 0-13-113029-3.
- [9] KOU, Sindo. *Welding metallurgy. 2nd. Hoboken: Wiley-Interscience, 2002, . ISBN 9780471434917*.
- [10] ASM handbook. Volume 6, *Welding, brazing, and soldering. Materials Park: ASM International, 1993, . ISBN 0-87170-382-3*.
- [11] Typical oxy-acetylene equipment configuration. In: *International Marine Contractors Association* [online]. London, UK, 2019 [cit. 2023-07-04]. Dostupné z: <https://www.imca-int.com/safety-events/ruptured-acetylene-hose-fire/>
- [12] ANB, Česká svářečská společnost. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, .
- [13] BOHNART, Edward. *Welding: Principles and Practices*. 5. McGraw-Hill Education, 2017. ISBN 9780073373867.
- [14] WEMAN, Klas. *Welding processes handbook*. 1st. Cambridge: Woodhead, 2003, . ISBN 978-1855736894.

- [15] ANDERSON, Kenton. Stick vs. MIG vs. TIG: Which Process is Right For You?. In: *The Indiana Oxygen Company* [online]. 2015 [cit. 2023-07-05]. Dostupné z: <https://www.weldingsuppliesfromioc.com/blog/stick-vs-mig-vs-tig-which-process-is-right-for-you/>
- [16] SILD, Siim. MIG Welding Explained. In: Fractory [online]. 2022 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://fractory.com/mig-welding-explained/>
- [17] TIG svařování I: základní principy. In: SVARINFO [online]. 2009 [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008011702>>
- [18] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-697-5.*
- [19] INSTITUT, Český normalizační. ČSN EN ISO 6520-1 Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování. Praha: Český normalizační institut, 2008, .
- [20] Welding. In: SteelConstruction.info [online]. London: British Constructional Steelwork Association, b.r. [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://www.steelconstruction.info/Welding>
- [21] KANNENGIESSER, Thomas a Thomas BOELLINGHAUS. *Cold cracking tests— an overview of present technologies and applications.* Welding in the World. 2013, 57(1), 3-37. ISSN 1878-6669. Dostupné z: doi:10.1007/s40194-012-0001-7
- [22] LANCASTER, J.F. *Engineering Catastrophes: Causes and Effects of Major Accidents: Woodhead Publishing in Materials.* Elsevier Science, 2005. ISBN 9781845690816. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=9aqjAgAAQBAJ>
- [23] BOČEK, Martin. Svařování objímky z C-Mn oceli. Brno, 2017. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VUT. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček
- [24] GRILL, Jeff. What is Welding Porosity? Causes, Prevention & Fixes. In: Weld guru [online]. New York, 2023 [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://weldguru.com/welding-porosity/>
- [25] RIHAR, Gabriel. Lack of fusion in welded joints. In: NDT net [online]. Ljubljana, 2013 [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn403/idn403.htm>
- [26] ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti: Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním.* 2011.
- [27] INSTITUT, Český normalizační. ČSN EN ISO 6507-1 *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1:: Zkušební metoda.* Praha: Český normalizační institut, 2018, .
- [28] *Zkoušení tvrdosti svarových spojů.* In: JD Dvořák, s.r.o. [online]. Praha [cit. 2023-07-09]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/zkouseni-tvrdosti-svarovych-spoju>

- [29] ČSN EN ISO 9015-2 *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů*. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [30] ČSN EN ISO 17639 *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Český normalizační institut, 2022.
- [31] *Steel Welding: Specimen Preparation (Class 5 Procedures)*. In: *PACE TECHNOLOGIES* [online]. Tucson [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://www.metallographic.com/Metallographic-Preparation-Procedures/Steel-Weld.html>
- [32] ČSN EN ISO 4136 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Příčná zkouška tahem*. Praha: Český normalizační institut, 2023.
- [33] ČSN EN ISO 5178 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Podélná zkouška tahem svarového kovu tavných svarových spojů*. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [34] KURSTEN, B. a R. GAGGIANO. SCC susceptibility of carbon steel radioactive waste packages exposed to concrete porewater solutions under anoxic conditions. *Corrosion Engineering, Science and Technology*. Taylor & Francis, 2017, 52(1), 90-94. ISSN 1478-422X. Dostupné z: doi:10.1080/1478422X.2017.1296225
- [35] DAVID, Hrstka. PENETRAČNÍ ZKOUŠENÍ PŘI HODNOCENÍ POVRCHOVÝCH VAD SVARŮ. In: SVV Praha s.r.o. [online]. Praha [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://svv.cz/files/Kapilrnbarevzskouka.pdf>
- [36] Magnetická prášková metoda. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetická__prášková__metoda
- [37] Steel cutting machine MSX255 Series. In: Direct industry [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/leco/product-114499-1152843.html>
- [38] LABORATOŘ MĚŘENÍ TVRDOSTI. In: ČVUT - FS - ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ [online]. Praha [cit. 2023-07-12]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ustavy/sekce-ustav-materialoveho-inzenyrstvi/sekce-ustav-materialoveho-inzenyrstvi-12132/odborna-cinnost-12132/vybaveni-12132/tvrdest-12132/>
- [39] LECO Corporation - PR4X. In: LabWewnch [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: <https://www.labwrench.com/equipment/1548/leco-corporation-pr4x>
- [40] Příprava a hodnocení materiálografických vzorků. In: Studijní opora ÚMVI [online]. Brno [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: <http://imse.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/phmv/brvz.php>

SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1 - Rozdělení metod svařování na tavné a tlakové [2] – upraveno..	- 10 -
obr. 2- Soustava pro svařování plamenem [11] - upraveno.....	- 11 -
obr. 3 - Princip svařování obalenou elektrodou [15] - přeloženo.....	- 12 -
obr. 4 - Schéma MIG/MAG svařování [15] - přeloženo.....	- 13 -
obr. 5 - Schéma WIG svařování [15] - přeloženo.....	- 15 -
obr. 6 - Schéma svarového spoje provedeného tavným svařováním[18]-	16 -
obr. 7 - Vliv teplotního účinku na strukturu svarového spoje [3].....	- 17 -
obr. 8 - Krystalizační trhlina [20].....	- 19 -
obr. 9 - Studená trhlina v tepelně ovlivněné oblasti [21].....	- 20 -
obr. 10 - Lamelární trhlina pod svarem vytvořeným na povrchu válcovaného plechu [22].....	- 21 -
obr. 11 - Příklad výrazné pórovitosti [24].....	- 22 -
obr. 12 - Studený spoj mezi finální housenkou a základním kovem, zvětšeno 100x [25].....	- 23 -
obr. 13 - Zkoušení tvrdosti svarových spojů [28].....	- 25 -
obr. 14 – Makrostruktura svaru uhlíkové oceli zvětšeno [31].....	- 26 -
obr. 15 - Mikrostruktura uhlíkové oceli při zvětšení 50x [31].....	- 27 -
obr. 16 - Orientace a umístění vzorků jednotlivých druhů tahové zkoušky [34] – upraveno	- 28 -
obr. 17 - Příklady indikací kapilárního zkoušení [35].....	- 30 -
obr. 18 - Rozptylové pole na vadě [36] – upraveno.....	- 30 -
obr. 19 - Zabušovací stolní pila LECO MSX 255 [37].....	- 32 -
obr. 20 - Metalografický lis LECO PR-4X [39].....	- 33 -
obr. 21 - Metalografická bruska LECO GPX300 [40] – upraveno	- 33 -
obr. 22 - Metalografický mikroskop Carl Zeiss Neophot 32 [35].....	- 34 -
obr. 23 - Automatický tvrdoměr Struers Duramin 40AC3 [38]	- 35 -
obr. 24 - Umístění svaru 1 na konstrukci	- 36 -
obr. 25 - Mikročistota svaru 1	- 36 -
obr. 26 - Detail póru svaru 1	- 36 -
obr. 27 - Naleptaná makrostruktura svaru 1	- 37 -
obr. 28 – Detail naleptané makrostruktury svaru 1	- 37 -
obr. 29 - Mikrostruktura naleptaného svaru 1.....	- 38 -
obr. 30 - Vedení řad zkoušky tvrdosti vzorku 1	- 39 -
obr. 31 - Graf naměřených tvrdostí.....	- 40 -
obr. 32 - Umístění svaru 2 na konstrukci	- 41 -
obr. 33 – Nenaleptaná mikročistota svaru 2.....	- 41 -
obr. 34 - Detail svarové mezery.....	- 42 -
obr. 35 - Naleptaná makrostruktura vzorku 2.....	- 42 -
obr. 36 - Detail změření průvaru svaru 2	- 42 -
obr. 37 - Mikrostruktura naleptaného svaru 2.....	- 43 -
obr. 38 - Vedení řad zkoušky tvrdosti vzorku 2.....	- 44 -
obr. 39 - Graf naměřených tvrdostí vzorku 2.....	- 45 -



obr. 40 - Umístění svaru 3 na konstrukci	- 46 -
obr. 41 - Nenaleptaná mikročistota svaru 3.....	- 46 -
obr. 42 - Detail pórovitost.....	- 47 -
obr. 43 - Detail svarové mezery.....	- 47 -
obr. 44 - Naleptaná makrostruktura svaru 3	- 47 -
obr. 45 - Detail makrostruktur svaru 3.....	- 47 -
obr. 46 - Měření průvaru a velikosti svaru 3.....	- 47 -
obr. 47 - Mikrostruktura naleptaného svaru 3.....	- 48 -
obr. 48 - Vedení řad zkoušky tvrdosti vzorku 3	- 49 -
obr. 49 - Graf naměřených tvrdostí.....	- 50 -



SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku 1	- 40 -
Tabulka 2 - Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku 2.....	- 45 -
Tabulka 3 - Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku 3.....	- 50 -



SEZNAM PŘÍLOH

1. Analýza mikročistoty nenaleptaných vzorků
2. Makrostrukturní analýza naleptaných vzorků
3. Mikrostrukturní analýza naleptaných vzorků
4. Zkoušky mikrotvrdomosti vybraných vzorků

Příloha 1

Analýza mikročistoty nenaleptaných vzorků

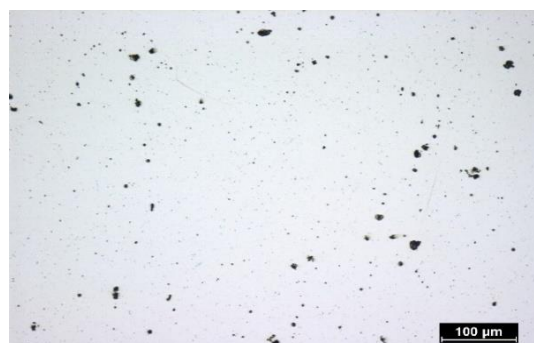
Vzorek 4



Nenaleptaná makrostruktura

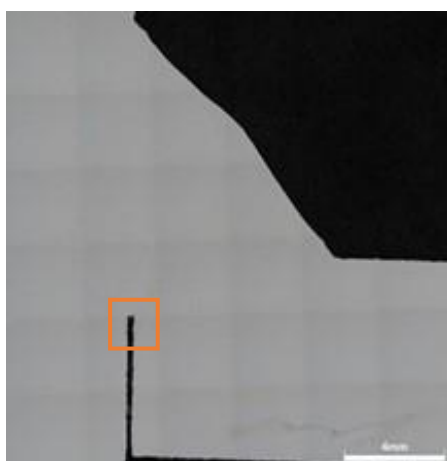


Detail – 2014 – řada pórů

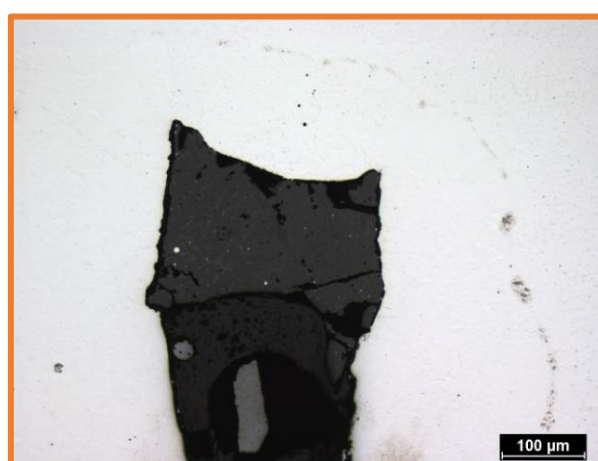


Detail – póry

Vzorek 5

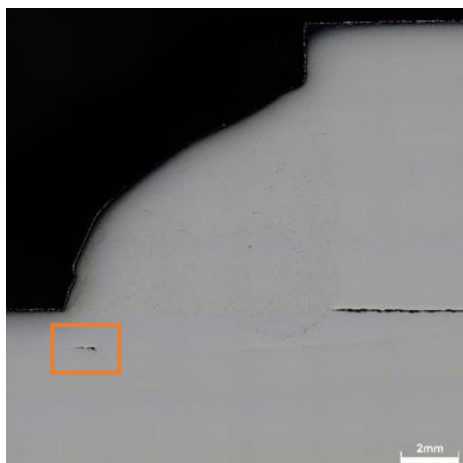


Nenaleptaná makrostruktura

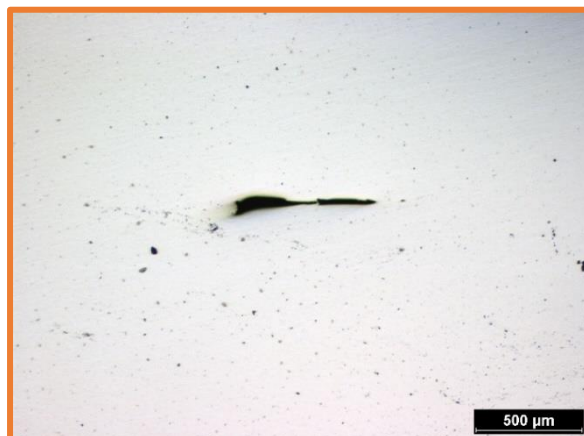


Detail – mezera

Vzorek 6

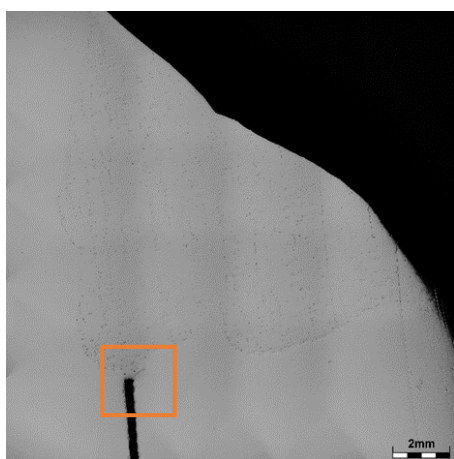


Nenaleptaná makrostruktura

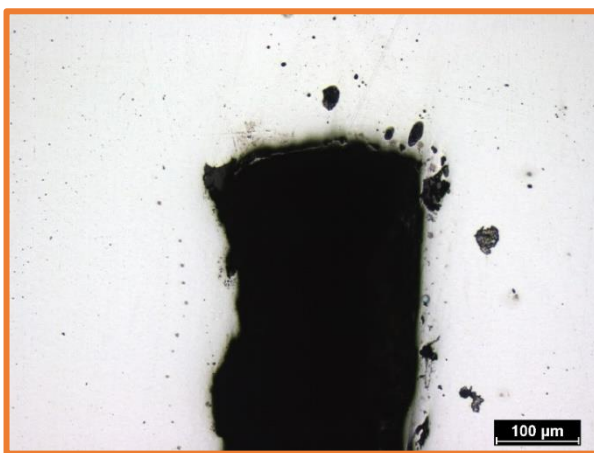


*Detail – 1014 - podélná trhlina
v základním materiálu*

Vzorek 7



*Nenaleptaná makrostruktura –
2012 - rovnoměrná pórovitost*

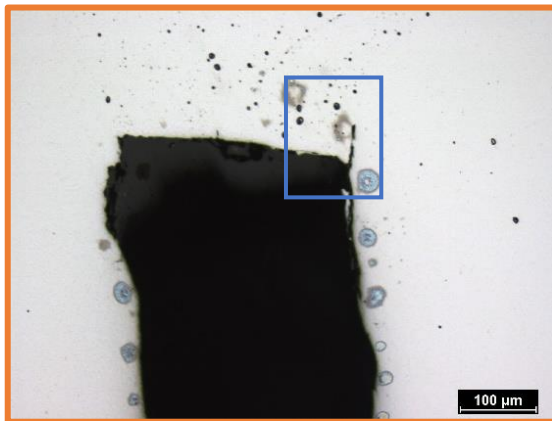


Detail – svarová mezera

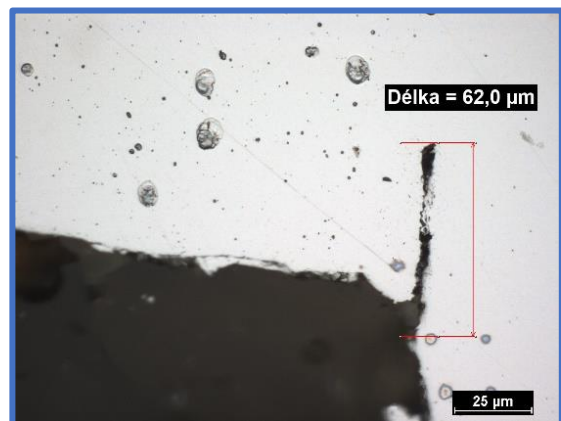
Vzorek 8



Neleptaná makrostruktura - 2012 - rovnoměrná pórovitost

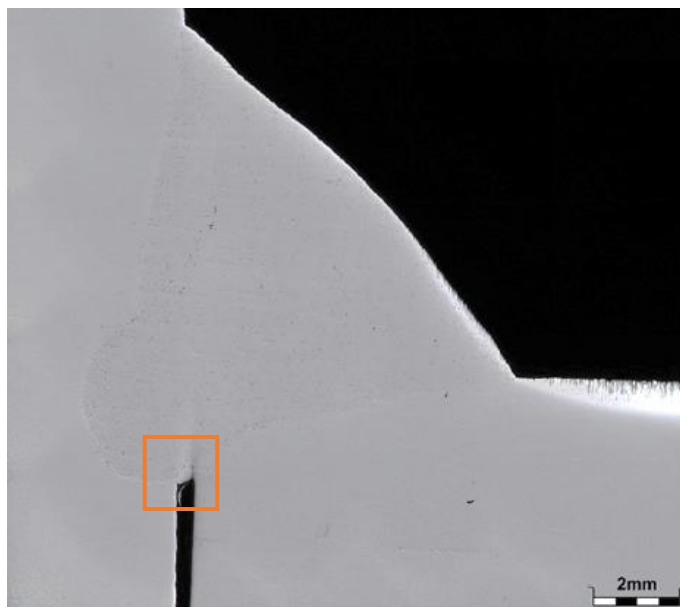


Detail - svarová mezera

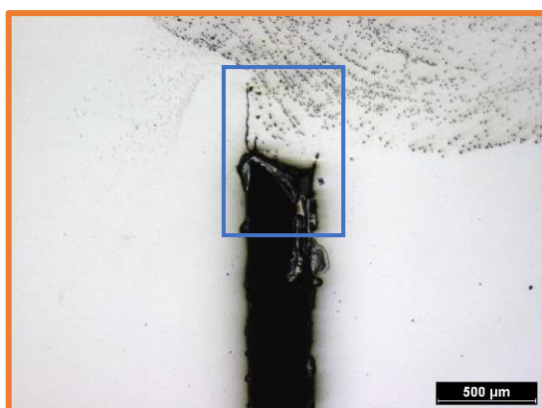


Detail - trhlina – 1001 - mikrotrhlina

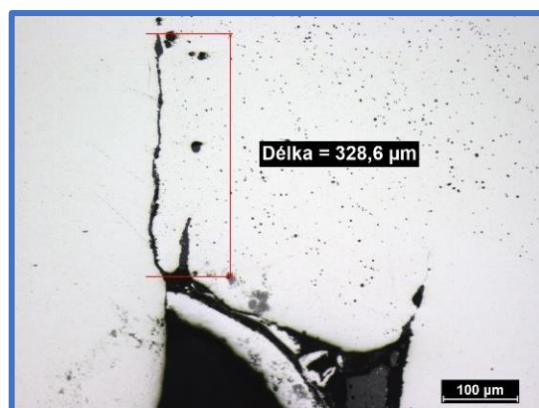
Vzorek 9



Neleptaná makrostruktura - 2012 - rovnoměrná pórovitost

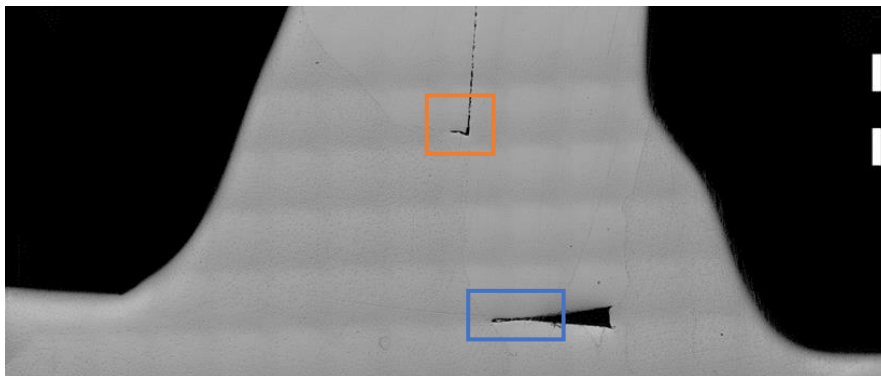


Detail – svarová mezera

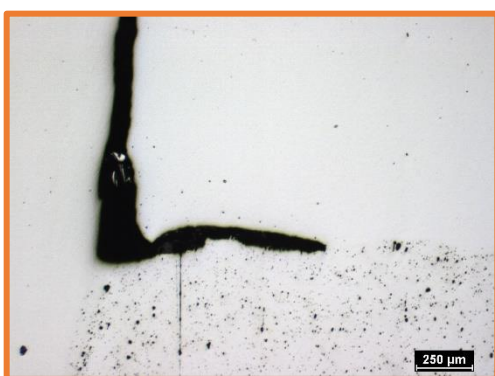


*Detail – měřeno – 1001 -
mikrotrhlina*

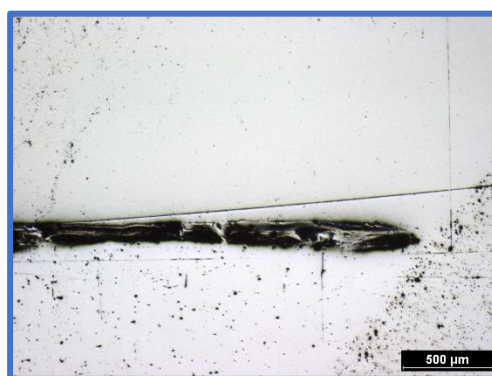
Vzorek 10



Neleptaná makrostruktura - 2012 - rovnoměrná pórovitost

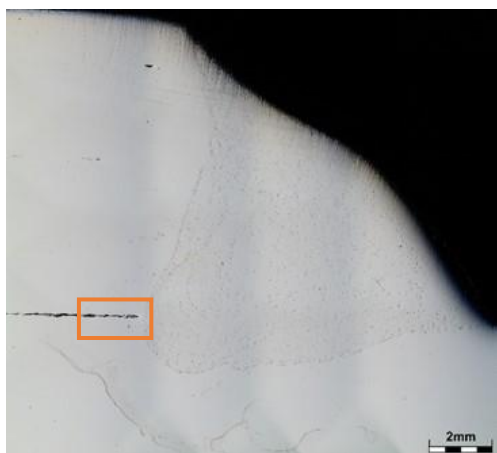


*Detail - svarová mezera – 4013 -
studený spoj v kořeni,*

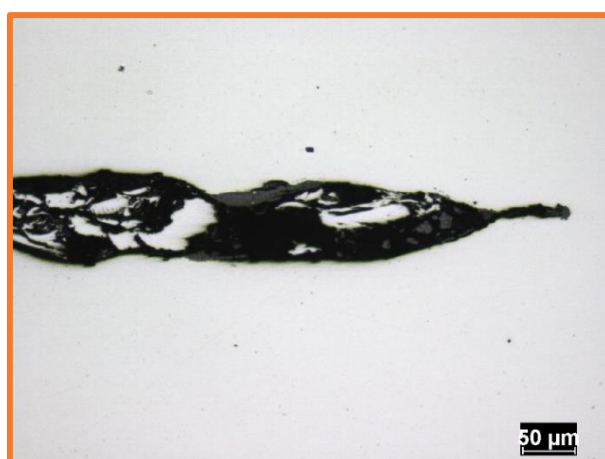


Detail – svarová mezera

Vzorek 11



*Nenaleptaná makrostruktura –2012
- rovnoměrná pórovitost*

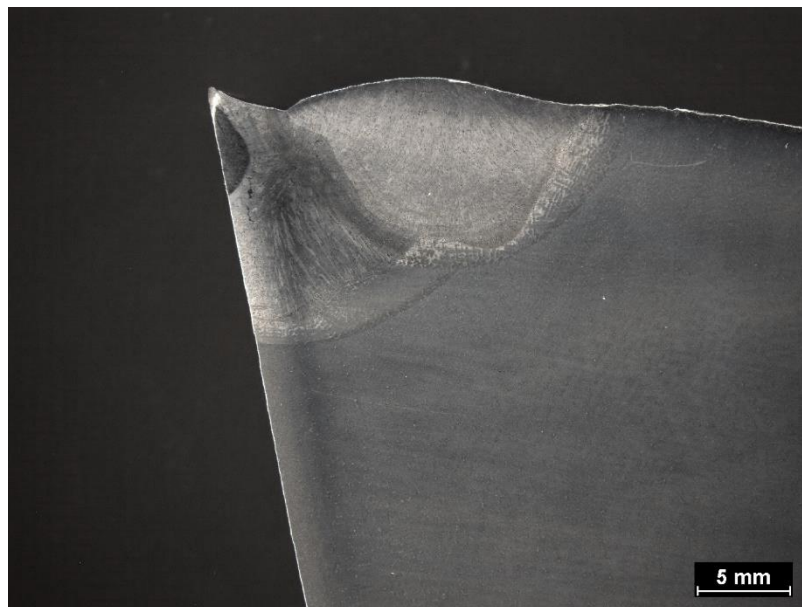


Detail – svarová mezera

Příloha 2

Makrostrukturní analýza naleptaných vzorků

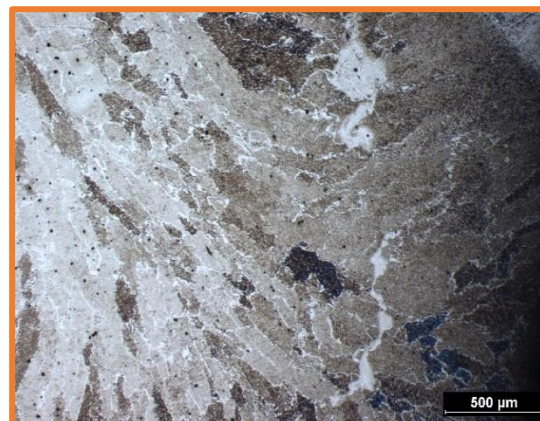
Vzorek 4



Makrostruktura spoje

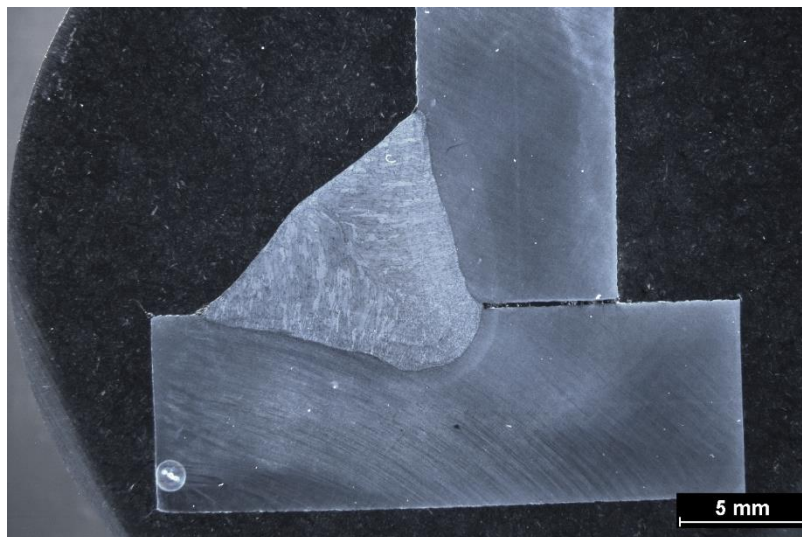


Detail

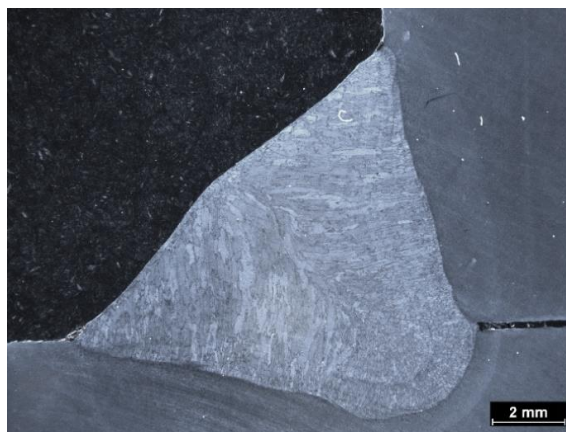


Detail - 401 - studený spoj

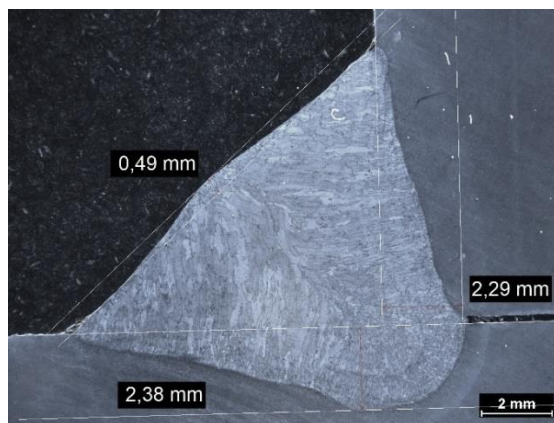
Vzorek 5



Makrostruktura spoje



Detail



Detail – měřeno

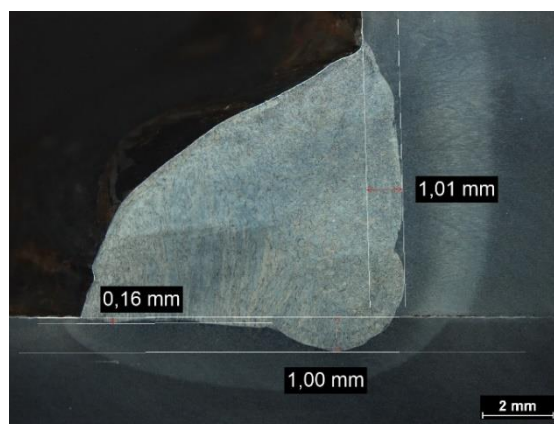
Vzorek 6



Makrostruktura – 514 – nadměrná nerovnost povrch

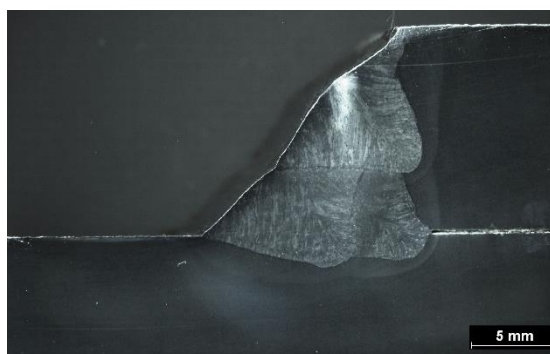


Detail – 1014 – podélná trhlinka v základním materiálu

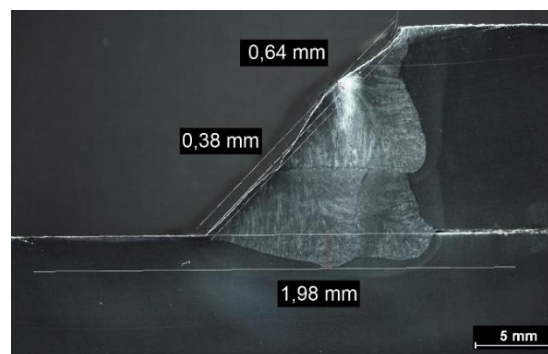


Detail – měřeno – 402 – nedostatečný průvar

Vzorek 7

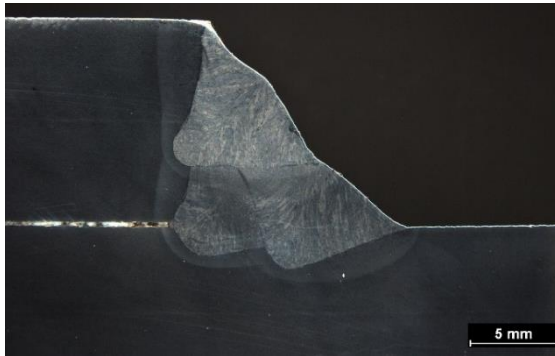


Makrostruktura

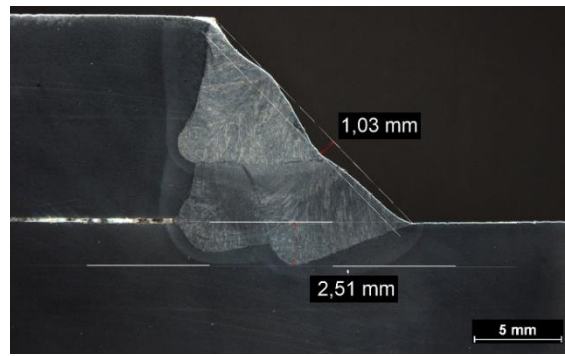


Detail – měřeno

Vzorek 8



Makrostruktura



Makrostruktura – měřeno – 514 –
nadměrná nerovnost povrchu svaru

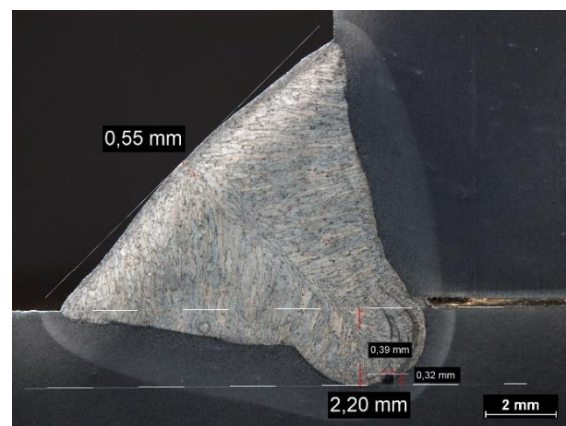
Vzorek 9



Makrostruktura

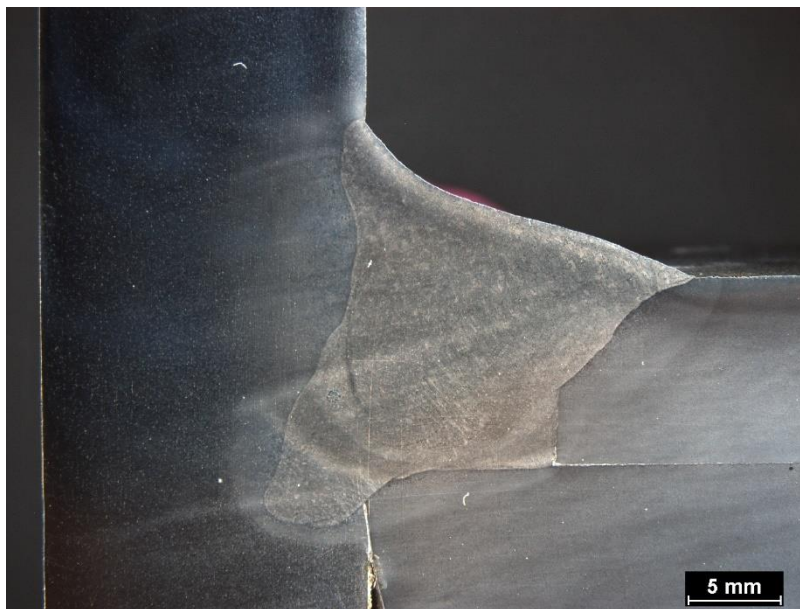


Detail – 301 – struskový vměstek



Detail – měřeno

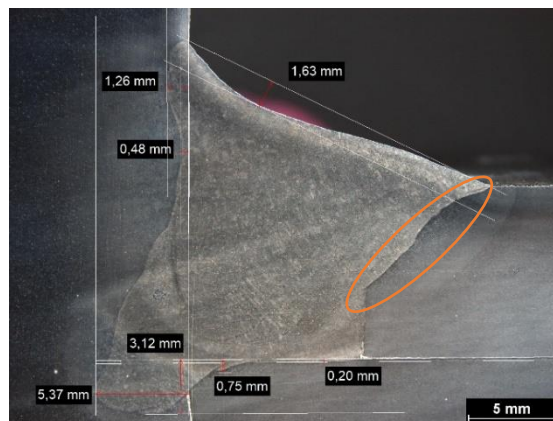
Vzorek 10



Makrostruktura

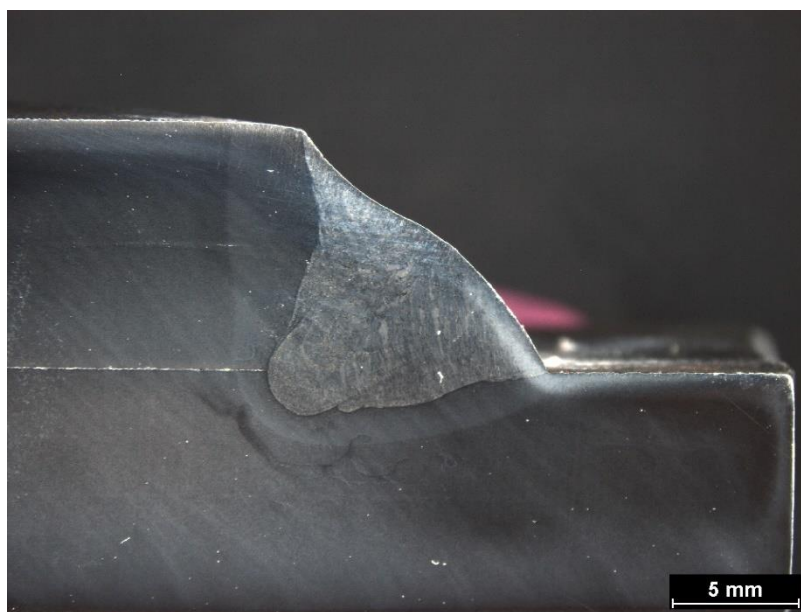


*Detail – 512 – nadměrná asymetrie
koutového svaru*



*Detail – měřeno – 4011 – studený svar
na svarové ploše (označeno), 402 –
nedostatečný průvar*

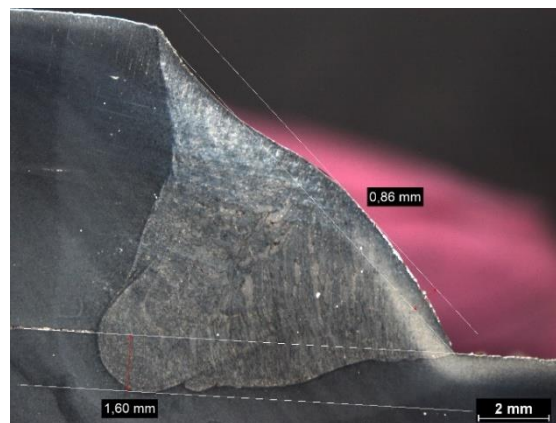
Vzorek 11



Makrostruktura



Detail – 4012 – studený spoj mezi housenkami

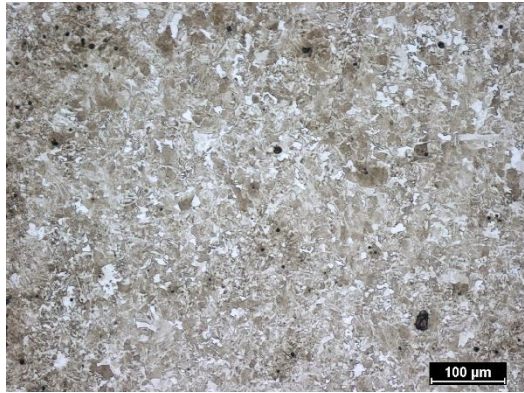


Detail - měřeno

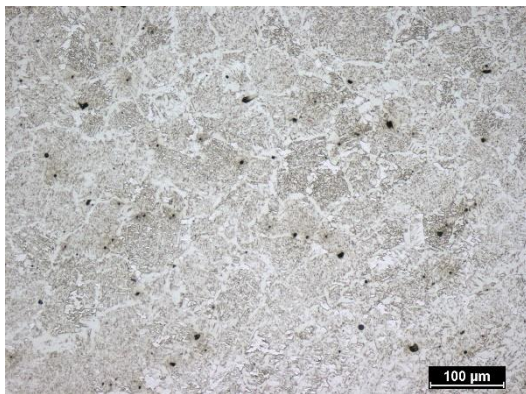
Příloha 3

Mikrostrukturní analýza naleptaných vzorků

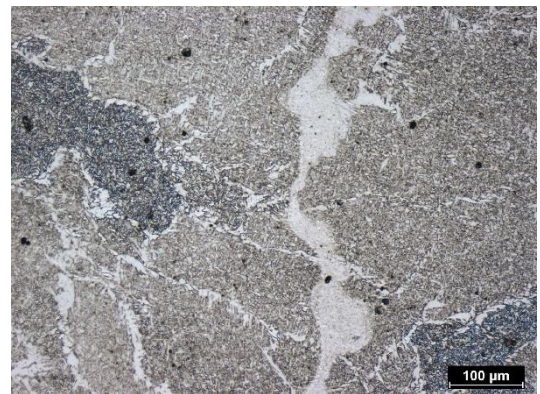
Vzorek 4



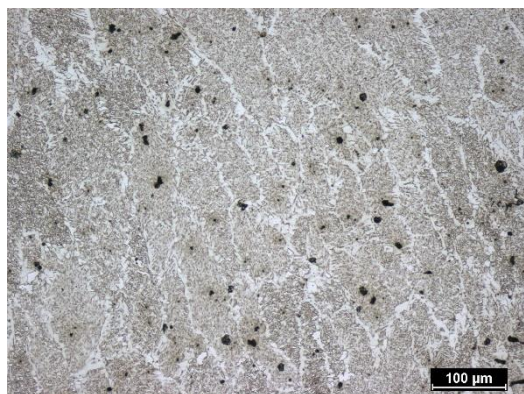
Mikrostruktura základního materiálu



Mikrostruktura TOO



Mikrostruktura TOO

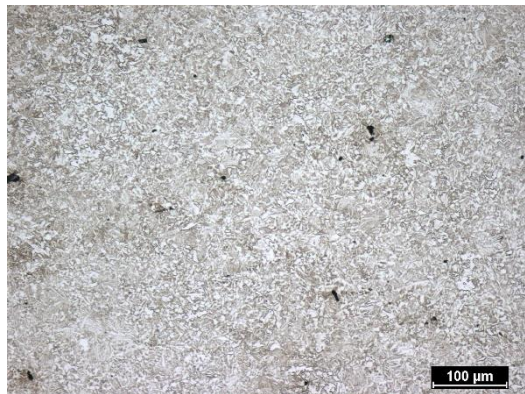


Mikrostruktura svaru

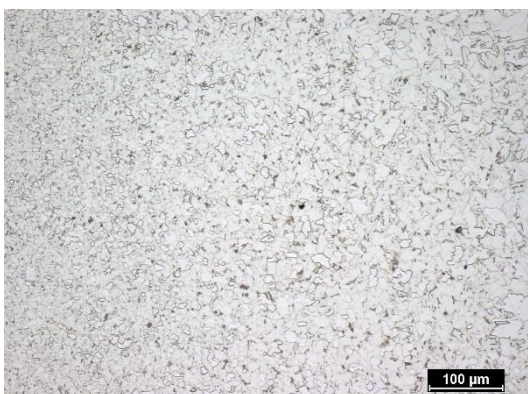
Vzorek 5



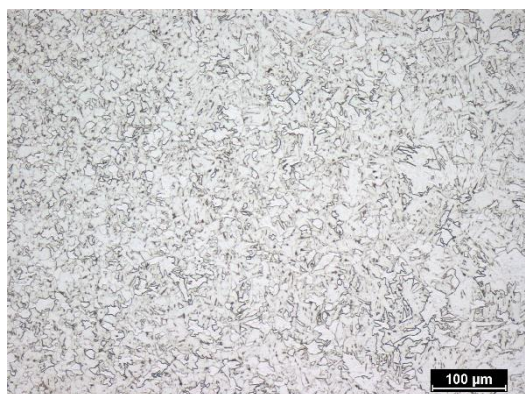
Mikrostruktura základního materiálu



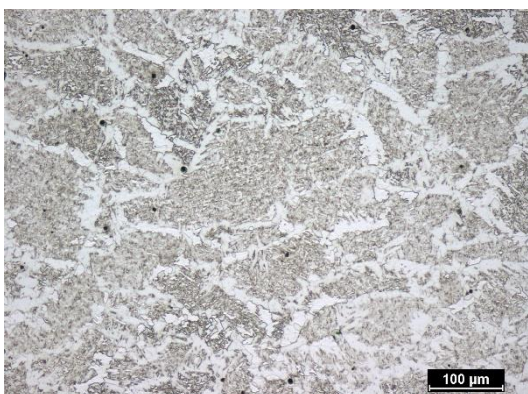
Mikrostruktura základního materiálu



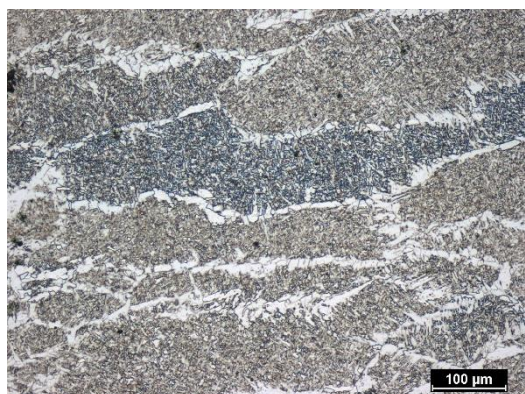
Mikrostruktura TOO



Mikrostruktura TOO



Mikrostruktura svaru



Mikrostruktura svaru

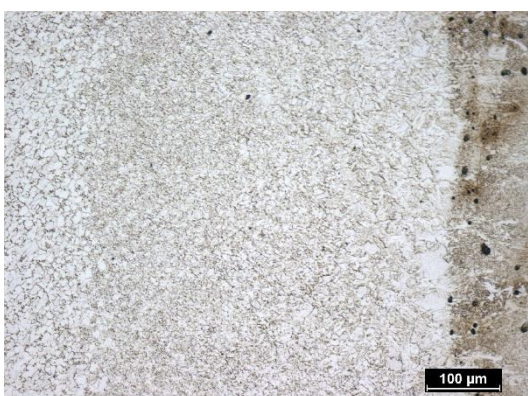
Vzorek 6



Mikrostruktura základního materiálu



Mikrostruktura základního materiálu



Mikrostruktura TOO



Mikrostruktura TOO



Mikrostruktura svaru

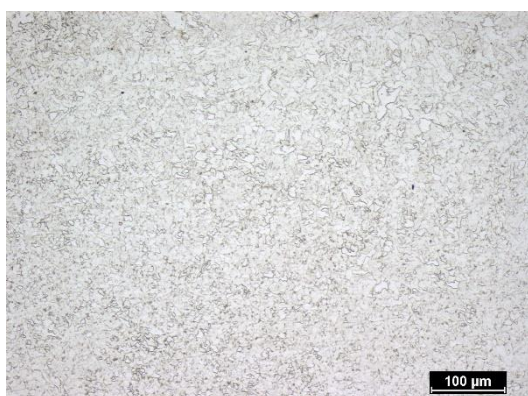
Vzorek 7



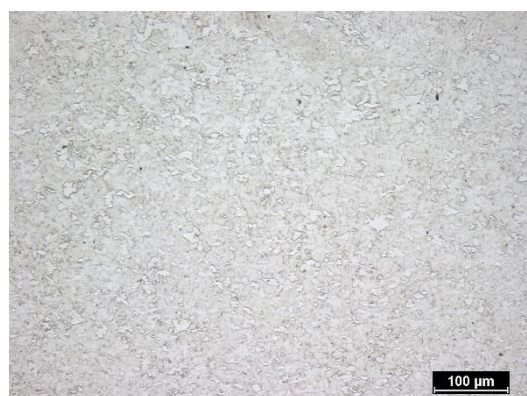
Mikrostruktura základního materiálu



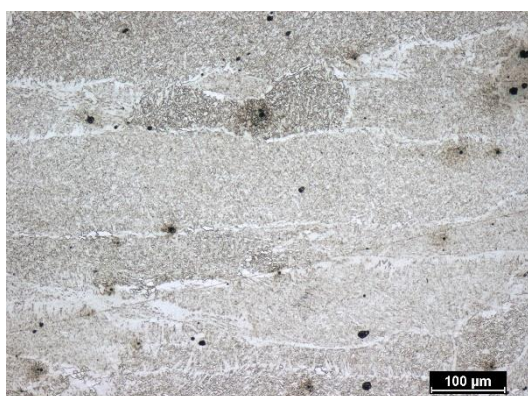
Mikrostruktura základního materiálu



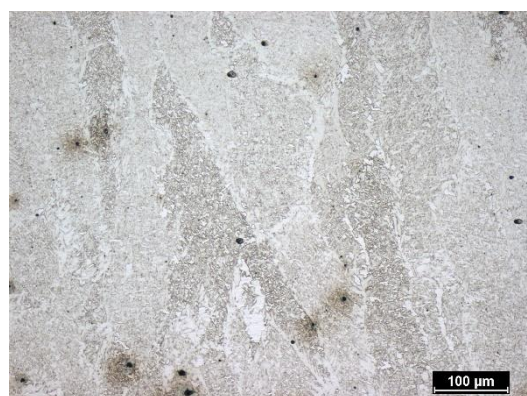
Mikrostruktura TOO



Mikrostruktura TOO



Mikrostruktura svaru

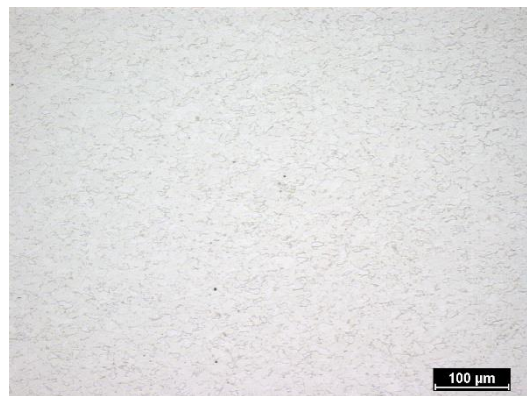


Mikrostruktura svaru

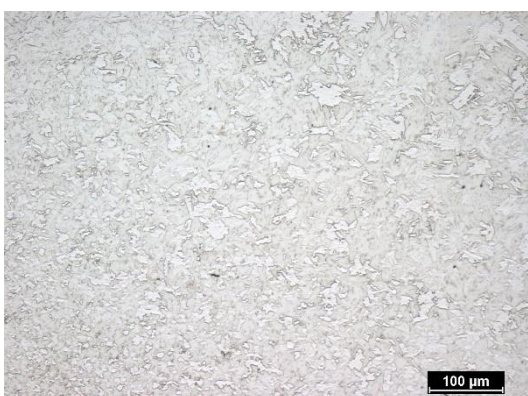
Vzorek 8



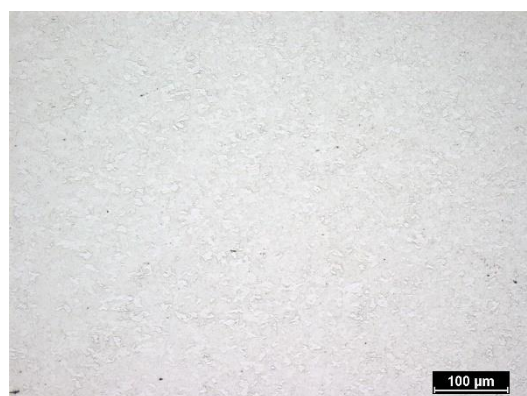
Mikrostruktura základního materiálu



Mikrostruktura základního materiálu



Mikrostruktura TOO



Mikrostruktura TOO

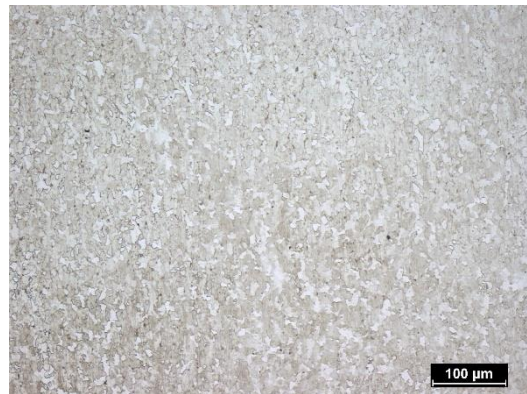


Mikrostruktura svaru

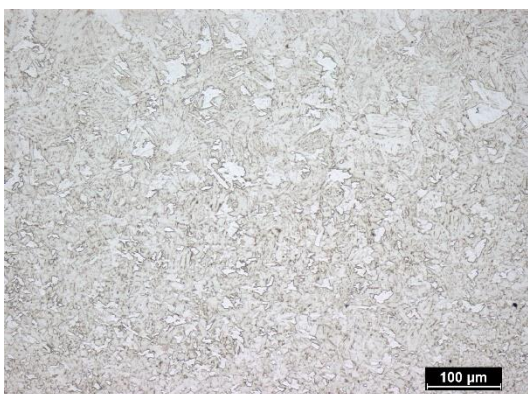
Vzorek 9



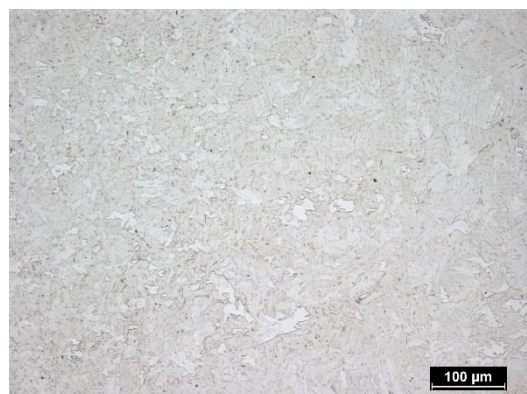
Mikrostruktura základního materiálu



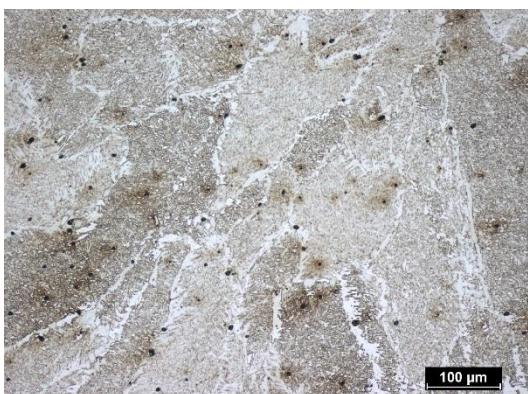
Mikrostruktura základního materiálu



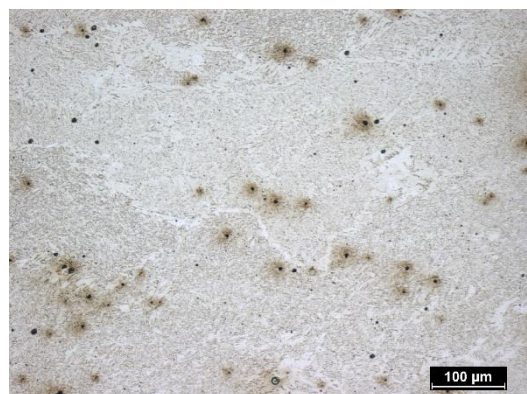
Mikrostruktura TOO



Mikrostruktura TOO

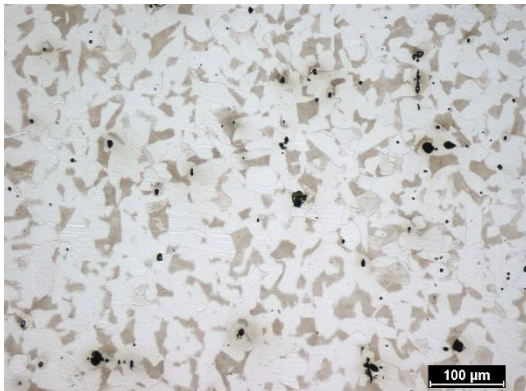


Mikrostruktura svaru

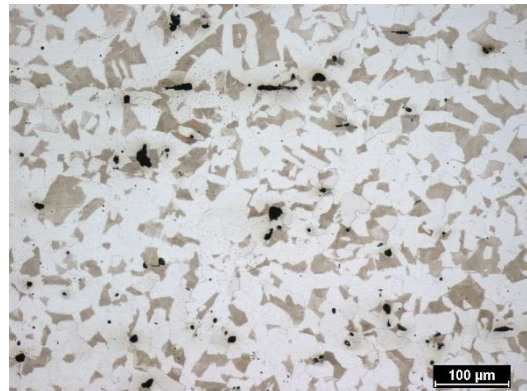


Mikrostruktura svaru

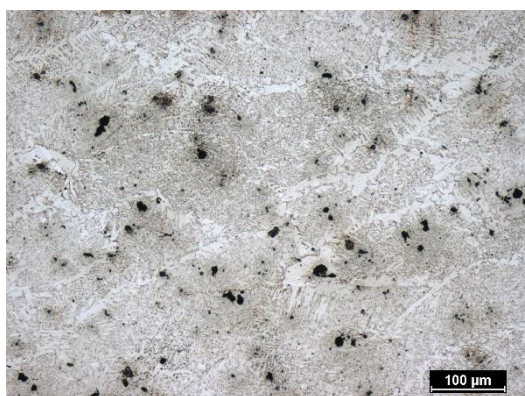
Vzorek 10



Mikrostruktura základního materiálu



Mikrostruktura základního materiálu

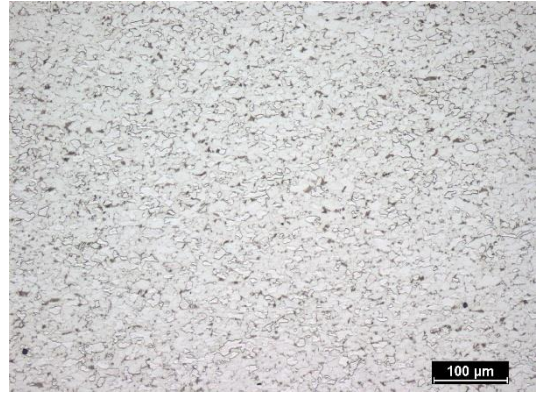


Mikrostruktura svaru

Vzorek 11



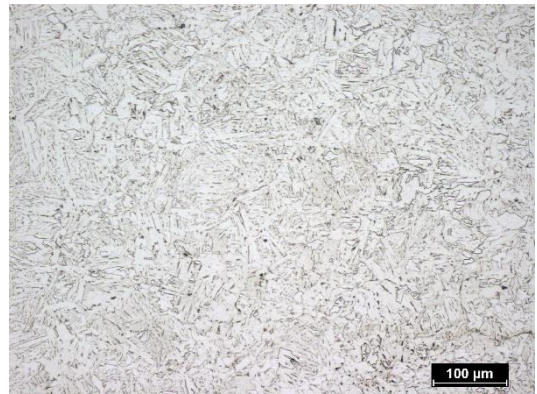
Mikrostruktura základního materiálu



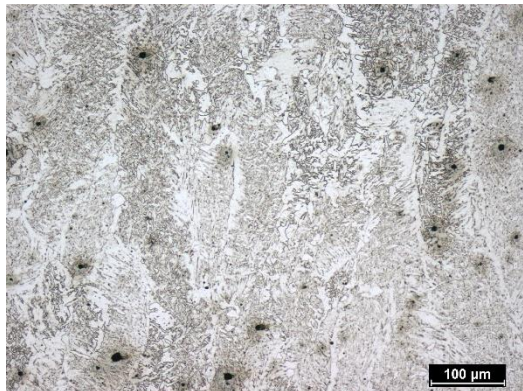
Mikrostruktura základního materiálu



Mikrostruktura TOO



Mikrostruktura TOO



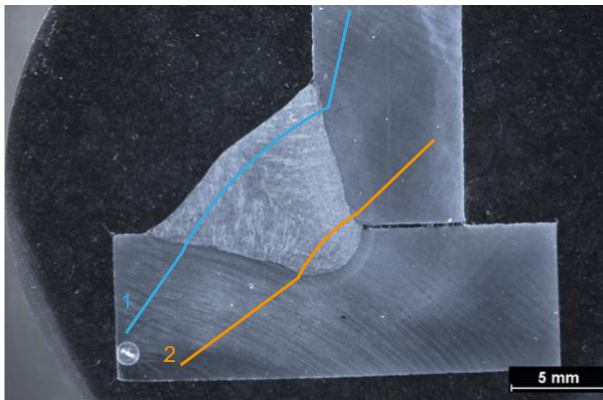
Mikrostruktura svaru

Příloha 4

Zkoušky mikrotvrdomosti vybraných vzorků

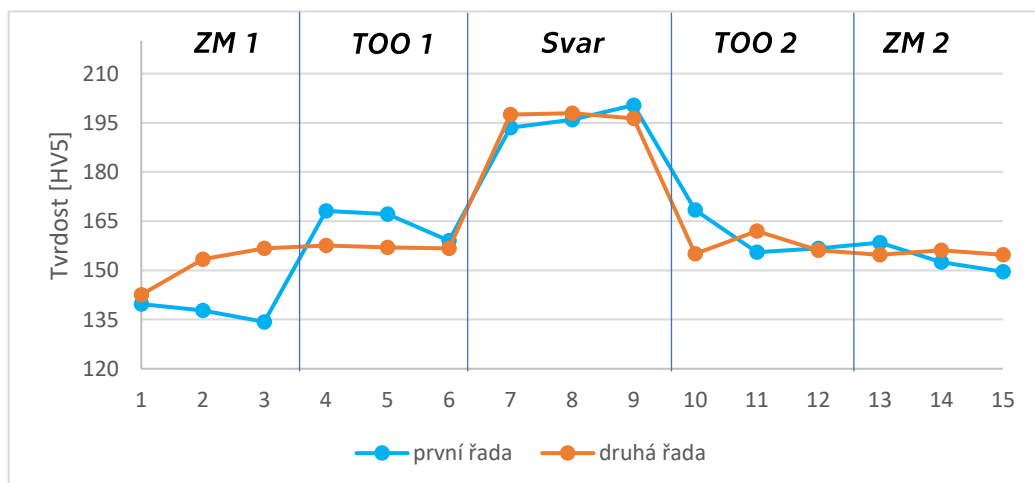
Vzorek 5

Tabulka naměřených mikrotvrdomostí



Vedení řad zkoušky mikrotvrdomosti

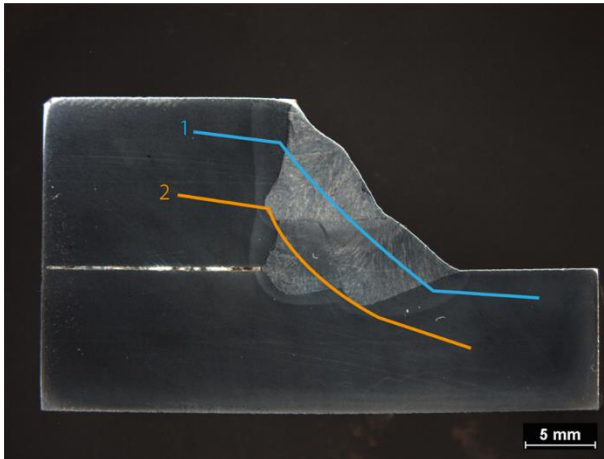
	číslo měření	první řada [HV5]	druhá řada [HV5]
Základní materiál 1	1	140	143
	2	138	153
	3	134	157
TOO 1	4	168	158
	5	167	157
	6	159	157
Svar	7	194	197
	8	196	198
	9	200	196
TOO 2	10	168	155
	11	156	162
	12	157	156
Základní materiál 2	13	158	155
	14	153	156
	15	150	155



Graf naměřených hodnot

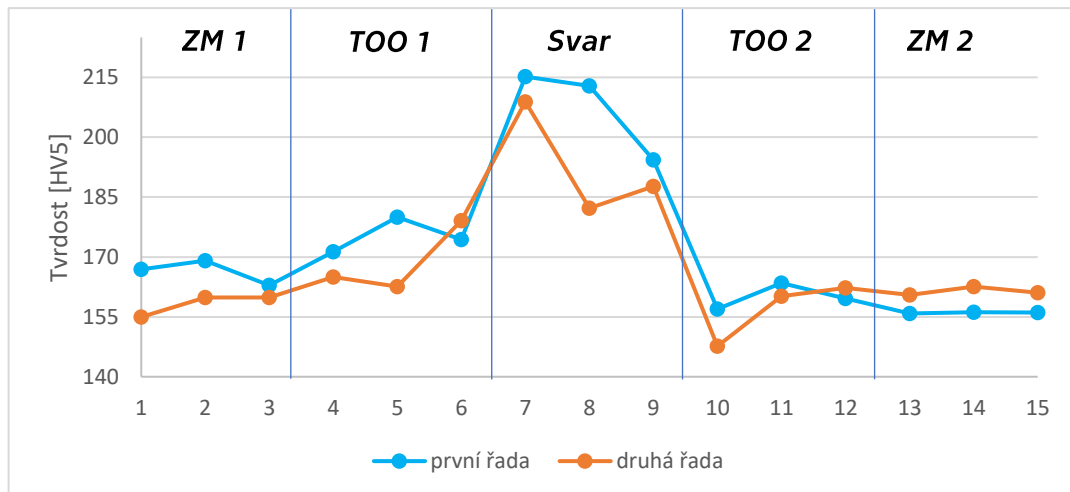
Vzorek 8

Tabulka naměřených
mikrotvrdoostí



Vedení řad zkoušky mikrotvrdoosti

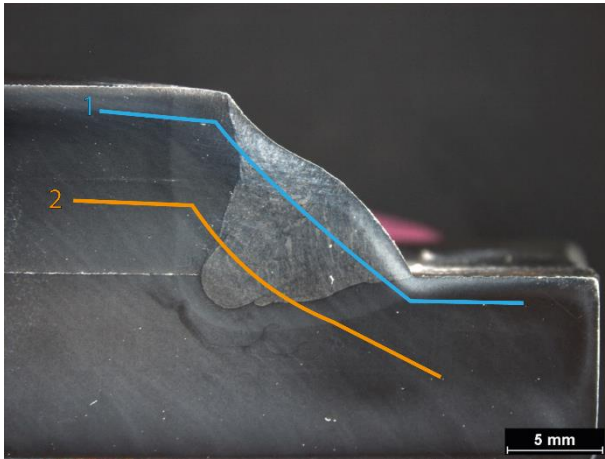
	číslo měření	první řada [HV5]	druhá řada [HV5]
Základní materiál 1	1	167	155
	2	169	160
	3	163	160
TOO 1	4	171	165
	5	180	163
	6	174	179
Svar	7	215	209
	8	213	182
	9	194	188
TOO 2	10	157	148
	11	163	160
	12	160	162
Základní materiál 2	13	156	160
	14	156	163
	15	156	161



Graf naměřených hodnot

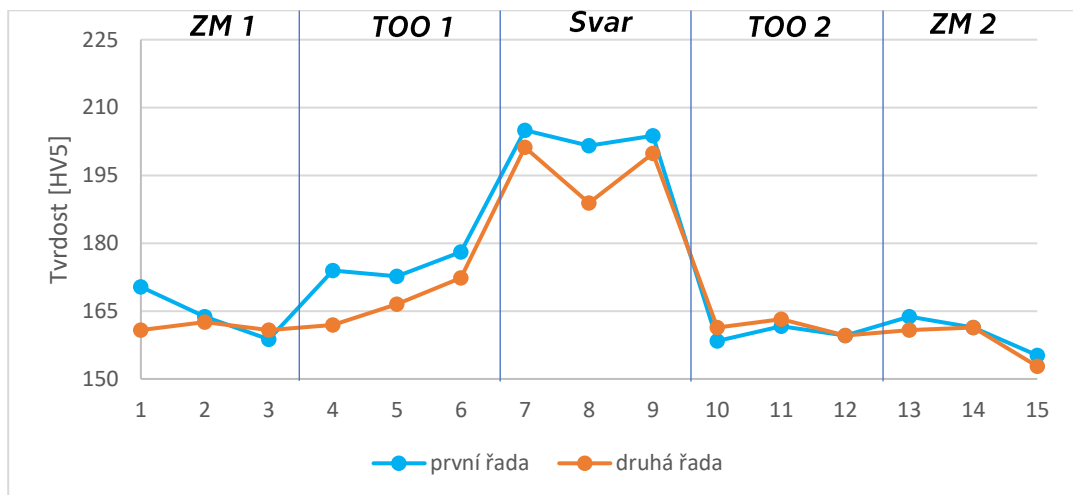
Vzorek 11

Tabulka naměřených
mikrotvrdoostí



Vedení řad zkoušky mikrotvrdoosti

	číslo měření	první řada [HV5]	druhá řada [HV5]
Základní materiál 1	1	170	161
	2	164	163
	3	159	161
TOO 1	4	174	162
	5	173	167
	6	178	172
Svar	7	205	201
	8	202	189
	9	204	200
TOO 2	10	158	161
	11	162	163
	12	160	160
Základní materiál 2	13	164	161
	14	161	161
	15	155	153



Graf naměřených hodnot