ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Makrostrukturní a mikrostrukturní analýza svarových spojů

Macroscopic and microscopic analysis of weld joints

AUTOR: Jan Labík

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Elena Čižmárová Ph.D.

PRAHA 2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Labík** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **458924**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**

Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**

Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Makrostrukturní a mikrostrukturní analýza svarových spojů

Název bakalářské práce anglicky:

Macroscopic and microscopic analysis of weld joints

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je posouzení kvality svarových spojů, analýza přítomnosti vad a jejich klasifikace.
1. Literární rešerše v problematice.
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. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 0-87170-382-3.
2. HRIVŇÁK, Ivan. Zváranie a zvariteľnosť materiálov. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. 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: **03.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Elena Čižmárová, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

18. 4. 2018
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

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

V Praze dne: .....

.....

Podpis

Anotace

Tato práce se zabývá problematikou zkoušek svarových spojů. K vyhodnocení kvality spojů byla použita mikroskopická a makroskopická analýza a byly provedeny zkoušky mikrotvrdosti dle Vickerse. V použitých vzorcích byly objeveny vady a struktury, jež významně ovlivňují výslednou kvalitu svaru. Kvůli výskytu vad ve vzorcích došlo k defektu jednoho ze vzorků.

Klíčová slova

Tavné svařování, frikční svařování, nedestruktivní zkoušky svaru, destruktivní zkoušky svaru, tvrdost

Annotation

This thesis deals with problematics of weld joints testing. To evaluate the quality of specimens, using macroscopic a microscopic analysis and hardness testing using Vickers method. There were few structural errors that affect quality of weld joint. One specimen was cracked due to errors occurrence.

Keywords

Heat welding, friction welding, non-destructive testing, destructive testing, hardness

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především vedoucí své bakalářské práce Ing. Eleně Čižmárové Ph.D. za její obětavý přístup, cenné rady a nezbytné připomínky, bez kterých by tato práce nevznikla. Také bych chtěl poděkovat týmu v laboratoři UMI FS ČVUT, kde jsem provedl měření. Závěrem děkuji svým blízkým za neutuchající podporu.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek: ... 2
1. Úvod ... 3
2. Teoretická část ... 4
2.1. Obecné principy svařování ... 4
2.2. Svařování za působení tlaku ... 5
2.3. Svařování za působení tepla a tlaku ... 5
2.4. Svařování za působení tepla ... 8
2.5. Hodnocení kvality svarů ... 9
2.5.1. Nedestruktivní zkoušky ... 10
2.5.2. Destruktivní zkoušky ... 11
2.5.4. Makroskopická a mikroskopická analýza ... 17
3. Experimentální část ... 18
3.1. Příprava vzorků ... 18
3.2. Makroskopická analýza ... 19
3.3. Mikroskopická analýza ... 21
3.3.1. Mikrostruktura neleptaných vzorků ... 22
3.3.2. Mikrostruktura leptaných vzorků ... 24
3.4. Zkoušky tvrdosti ... 30
4. Závěr ... 34
Seznam použité literatury ... 35
Seznam obrázků ... 37

Seznam použitých symbolů a zkratek:

A	tažnost [%]
D	průměr části [mm]
F	síla [N]
FSW	frikční svařování promíšením (Friction stir welding)
HV	tvrdost dle Vickerse
Kp	kilopond, jednotka síly odpovídající 9,807 N
ΔL	prodloužení [mm]
OV	oxidický vměstek
Re	mez kluzu v tahu [MPa]
RFW	rotační frikční svařování (Rotary friction welding)
Rm	mez pevnosti v tahu [MPa]
$Rp_{0,2}$	smluvní mez kluzu [MPa]
SK	svarový kov
SV	sulfidický vměstek
TOO	tepelně ovlivněná oblast
u	úhlopříčka vtisku [mm]
Z	kontrakce [%]
ZM	základní materiál

1. Úvod

Svařování je způsob tvorby nerozebíratelného spoje materiálů. Ke spojení materiálů dochází na atomární úrovni a mezi jednotlivými svařovanými plochami tedy působí přitažlivé síly. Dnes existuje několik způsobů svařování, mezi hlavními jsou tavné svařování obalenou elektrodou, svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu (MAG), svařování v ochranné atmosféře inertního plynu (MIG), svařování plamenem, třecí svařování, svařování za pomocí laseru nebo elektronového paprsku.

Ke svaření dvou těles dochází za zvýšeného tepla, tlaku nebo v jejich kombinaci. Během svařovacího procesu dochází v blízkosti svaru k zásadním změnám ve struktuře materiálu, jeho složení a změně mechanických vlastností. [1, 2]

Při návrhu technologie použité k provedení svarového spoje je vhodné ověřit, zda nezpůsobuje nadměrné oslabení spojovaných částí v místě svaru. K tomu se používá několik druhů zkoušek materiálů. Zkoušky lze dělit podle toho, zda dochází k porušení povrchu součásti či nikoliv. [2]

Teoretická část práce obsahuje úvod do technologie tvorby svarových spojů a zabývá se problematikou hodnocení jejich kvality. Dále je popsáno několik způsobů a metod vyhodnocení kvality svarového spoje.

V experimentální části je uvedena příprava vzorků pro makroskopickou a mikroskopickou analýzu svaru, analýza pomocí světelné mikroskopie a postup při měření tvrdosti vzorků.

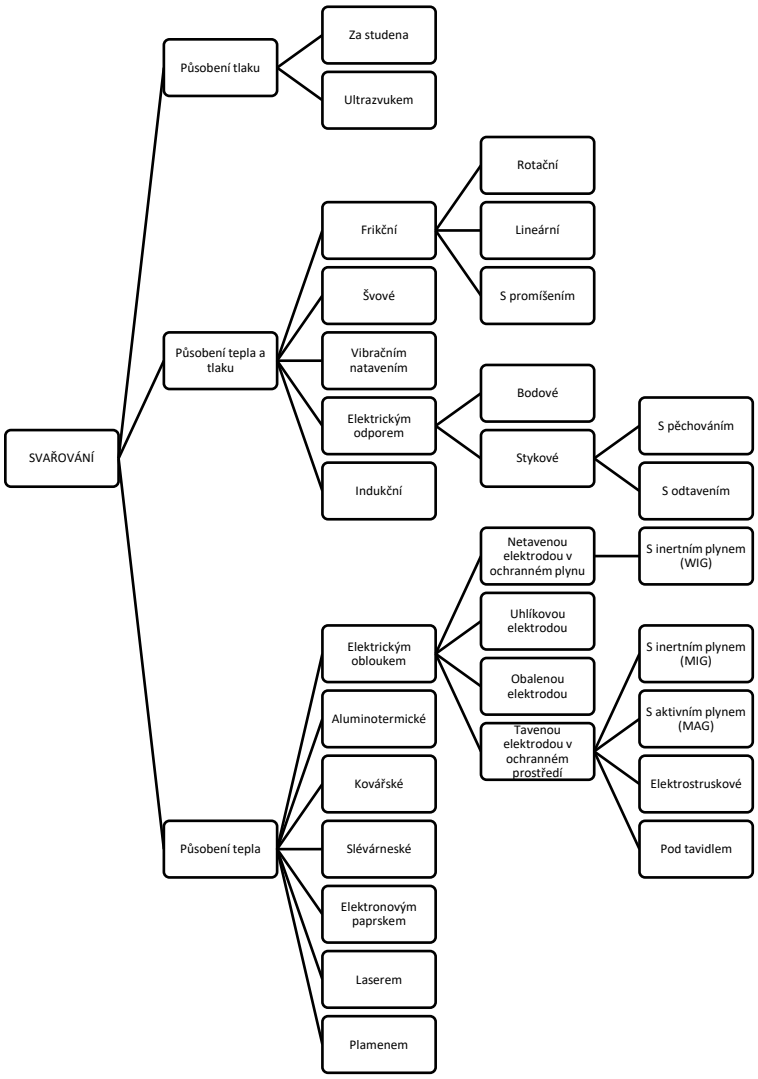
Cílem této práce byla analýza přítomnosti vad a jejich klasifikace.

2. Teoretická část

2.1. Obecné principy svařování

Svařování je proces, během kterého dojde ke spojení dvou podobných materiálů v nerozebíratelný spoj. Toho je dosaženo za zvýšeného tlaku, tepla nebo jejich kombinací. Rozdělení dle použitého způsobu je zobrazeno na Obr. 1.

Ke spojení materiálů během svařování dochází na atomární úrovni. Dodáním mechanické či tepelné energie je základní materiál roztaven a vzniká svarový kov. Z důvodu existence tepelné vodivosti materiálů se u každého svaru objevuje místo, kde kov nebyl nataven, ale došlo k jeho tepelnému ovlivnění. Tato oblast, která má rozdílné vlastnosti od základního materiálu (ZM) i svarového kovu (SK), se označuje jako tepelně ovlivněná oblast (TOO). Na povrchu vzniká výronek či svarová housenka. [2]



Obr. 1 Rozdělení svařování [3] upraveno autorem

2.2. Svařování za působení tlaku

U tlakového svařování je dosaženo spoje přiblížením svařovaných částí na takovou vzdálenost, že začnou mezi jednotlivými tělesy působit meziatomové síly. Tím dochází ke vzniku kovové vazby. V materiálu dochází k plastickým deformacím. Svaru je dosaženo bez roztavení základního materiálu. [2]

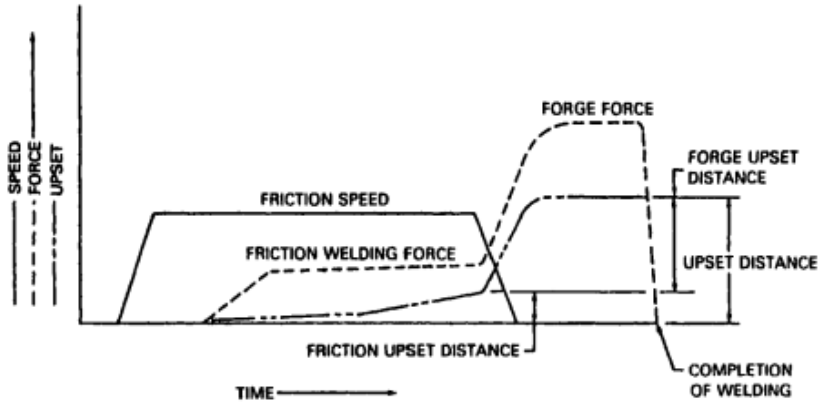
Příkladem tlakového svařování je svařování tlakem za studena. Ke spojování součástí dochází za působení vysokého tlaku při pokojové teplotě (21±3^{0}C). Pro vytvoření kvalitního spoje je nutné styčné plochy dokonale očistit. Následně je použito dostatečné tlakové síly, vedoucí ke spojení materiálu. [3]

Další metodou je svařování ultrazvukem. Svaření materiálu pomocí ultrazvuku dochází nejprve stlačením svařovaných materiálů k sobě. Následně jsou materiály rozkmitány pomocí sonotrody na frekvenci ultrazvuku, tím dojde k zahřátí materiálu a vzniku svarového spoje. [3]

2.3. Svařování za působení tepla a tlaku

Difúzní svařování využívá kombinace zvýšené teploty a zvýšeného tlaku mezi materiály. Při tomto druhu svařování záleží jak na velikosti přivedeného tepla, tak na použitém tlaku. Přivedeným teplem jsou materiály nataveny nebo ohřáty pro usnadnění plastické deformace a následné spojení materiálů za použití tlaku. Při difúzním svařování dochází ke spojení díky zásobě volných atomů s velkou kinetickou energií v tavenině, bez ohledu na použití přídavného materiálu. [1, 2]

Frikční neboli třecí svařování je spojování materiálů za použití tepla generovaného třením dvou součástí o sebe či třením indentoru o svařované součásti. Metodou frikčního svařování (FRW) lze dosáhnout svarového spojení na materiálech nesvařitelných běžnými metodami. Během procesu svařování jsou dvě tělesa stlačena k sobě vyšším tlakem. Schéma procesu frikčního svařování v závislosti na čas je zobrazeno na Obr. 2.



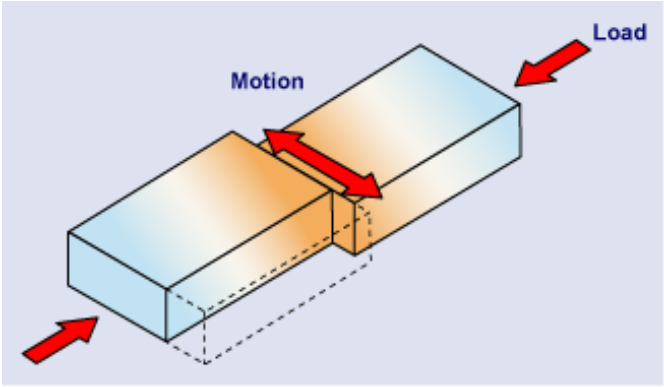
Obr. 2 Schéma frikčního svařování [4]

Díky pohybu jedné ze součástí dochází ke tření, při němž je generováno teplo. Uvolněné teplo zvýší teplotu svařovaného materiálu nad mez, kdy je materiál rigidní. Při této zvýšené teplotě dochází snadněji k plastickým deformacím materiálu v místě svarového spoje. Následně je zvýšen přítlak a je zastaveno otáčení součásti a dojde k samotnému spojení materiálů. Během stlačení materiálů dochází ke vniku výronku na povrchu svarového kovu. V poslední fázi je výronek mechanicky odstraněn. [2, 3, 4]

Princip rotačního svařování ke generaci tepla využívá rotaci jednoho tělesa vůči druhému. Je nutné zvolit vysoké otáčky za nižší přítlačné síly, která je u běžných ocelí kolem 50 kN a otáčky v rozmezí 500–1000 otáček za minutu. Po dostatečném ohřátí součásti se otáčky zastaví a přítlačná síla je zvýšena na 110 kN, čímž jsou součásti spojeny a pevně svařeny. Při rotačním svařování vzniká velmi typický výronek, jež je vidět na Obr. 3. V průběhu RFW dochází k ohřátí materiálů pod jejich teplotu tání a z toho vyplývá, že vzniká menší TOO než u tavného způsobu svařování. [2]

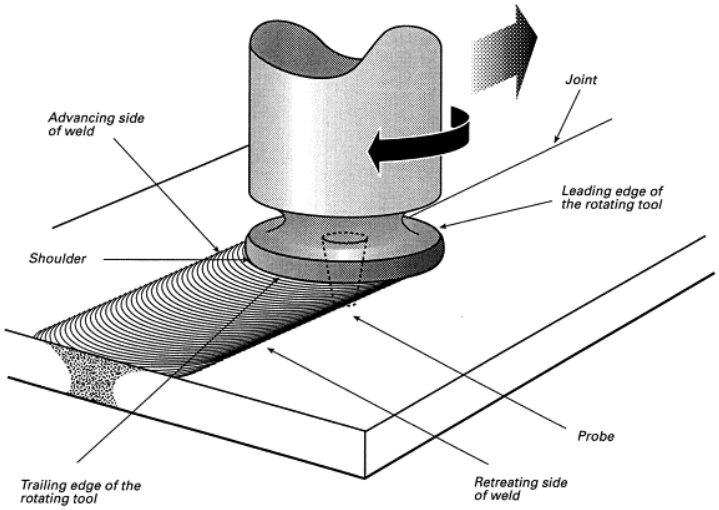
Obr. 3 Průběh rotačního svařování RFW [5]

V případě lineárního frikčního svařování (LFW), zachyceného na Obr. 4, dochází k tření dvou dílců, nejčastěji desek, lineárním harmonickým pohybem. Desky se o sebe třou frekvencí 25–125 kHz s amplitudou cca 3 mm a jsou přitlačovány přítlačnou silou v rozmezí 150–200 kN. [6]



Obr. 4 Schéma LFW [7]

Metoda směsného třecího svařování FSW spočívá v použití rychle se otáčejícího indentoru z tvrdokovu, který třením o dvě spojované součásti nataví materiál ve svařované oblasti. Ten vlastním rotačním pohybem způsobuje promísení svařovaných materiálů a vznik svarového kovu. Při třecím svařování dochází v materiálu k plastickým deformacím bez ohřátí materiálu nad teplotu tání. Schéma svařovacího procesu FSW je zobrazeno na obr. 5.



Obr. 5 Schematický nákres FSW [8]

Pokud je použito FSW, je potřebné, aby indentor byl z materiálu tvrdšího, než jsou svařované materiály. Díky tomu nedojde k jeho natavení a přimíšení do svarového kovu. Výhodou FSW je možnost svářet i nestejnorodé materiály s různou teplotou tání, protože nedochází k ohřevu nad tyto teploty. Pro vznik kvalitního svaru bez defektů je nutné zvolit správný tvar svařovacího trnu. Nejčastěji používanými tvary jsou: rotační, válcový, rotační se závitem, čtvercový či trojúhelníkový. Dalším významným faktorem při volbě indentoru je průměr ramena nástroje (na Obr. 5 odkaz shoulder), který ovlivní velikost TOO i jakost svaru. [9]

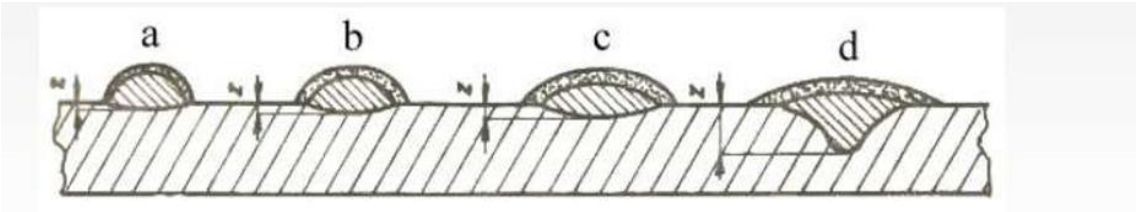
2.4. Svařování za působení tepla

U svařování za působení tepla, také nazývaném tavným svařováním, dochází k lokálnímu natavení svarových ploch základního materiálu. Do svarového kovu se zpravidla přidává přídavný materiál, který má podobné složení jako základní materiál. Použitím tavného svařování vzniká výrazná tepelně ovlivněná oblast, kde dochází ke změně mechanických vlastností materiálu. Pro provedení svaru je vhodné volit materiál se zaručenou svařitelností, tedy do 0,22 % uhlíku ve struktuře. Materiál s vyšším obsahem C je náchylnější ke vzniku vnitřních vad, pnutí a je možný vznik nestabilních fází ve svaru. [10]

Obloukové svařování je proces, který využívá energie elektrického oblouku vznikajícího mezi svařovaným materiálem a elektrodou. Dle druhu elektrody či přídavného materiálu dělíme obloukové svařování na svařování elektrodou nebo s přídavným drátem. Odtavování elektrody zde není podmíněno, záleží na požadovaném druhu, kdy elektroda může sloužit pouze jako zdroj elektronů, případně i jako přídavný materiál. [1, 3]

Při ručním svařování obalenou elektrodou (MMA – manual metal arc) dochází ke vzniku elektrického oblouku v bodě svaru mezi elektrodou a spojovaným materiálem. Při odtavování obalu elektrody vzniká ochranná svarová lázeň označovaná jako struska, kterou je nutno po dokončení svaru mechanicky odstranit.

Struska svar chrání před vlivem okolní atmosféry a zpomaluje chladnutí svarového kovu, jelikož při rychlém ochlazení dochází ke vzniku velkého vnitřního pnutí ve svaru. Tloušťka strusky i její složení ovlivňuje výsledné vlastnosti svaru. Elektrody můžeme dělit dle hloubky závaru, což ovlivňuje tloušťka obalové vrstvy. Jejich porovnání lze vidět na Obr. 6.

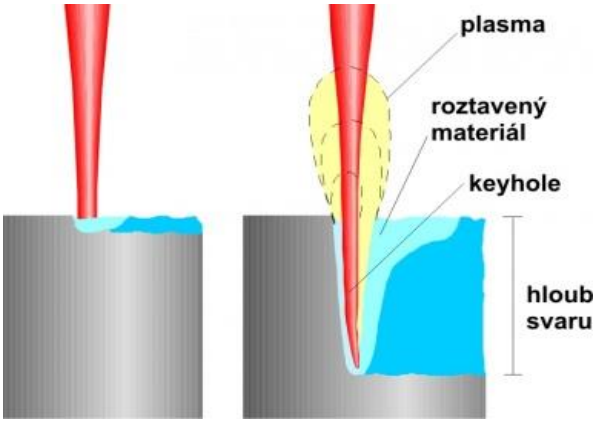


Obr. 6 Hloubka závaru a formování svarové housenky pro různě obalené elektrody;

a) tence b) středně c) tlustě obalená elektroda d) hlubokozávarová elektroda [11]

Další metodou svařování využívajícího působení tepla je svařování za použití laseru nebo proudu elektronů. Jejich princip je velmi podobný a liší se energií dodávanou do svaru a velikostí svařené oblasti. Pro spojování materiálů laserem

i proudem elektronů je používána metoda klíčové dírky (keyhole welding), viz Obr. 7. Metoda je založena na principu dopadu koncentrovaného proudu částic. Dopadající částice svou energii předávají materiálu a dochází k vytvoření kapiláry uvnitř svařovaných materiálů. V kapiláře dochází k tavení a odpařování spojovaných materiálů. Výsledkem velkého přívodu a nízkého odvodu tepla je úzký svar s dobrým průvarem a malou TOO. [2, 12, 13]



Obr. 7 Svařování laserem, keyhole efekt [14]

2.5. Hodnocení kvality svarů

Jakost zhotovených svarů je před použitím výrobku nutno otestovat. V případě sériové výroby je nutné udělat důkladné zkoušky použité technologie svařování, ještě před zahájením výroby. Zkoušení svarových spojů je možno provádět dvěma různými způsoby: destruktivními a nedestruktivními metodami.

2.5.1. Nedestruktivní zkoušky

V případě použití nedestruktivních metod nedochází k porušení nebo poškození výrobku. Těmito zkouškami je možné zjistit jak vnější, tak vnitřní vady svarů. Uplatňují se především v konečné fázi procesu výroby, kdy je nutno ověřit, zda se ve svaru nevyskytují nepřípustné vady způsobující bezpečnostní riziko. Nejběžnějšími metodami pro zjišťování povrchových vad jsou:

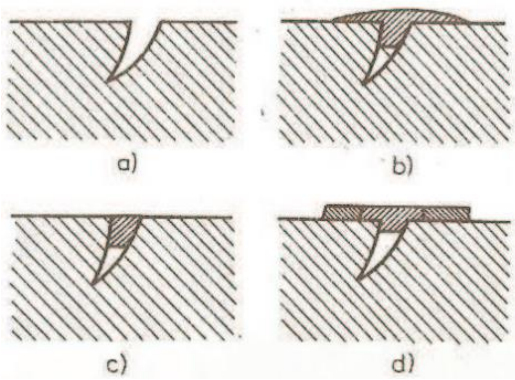
- Vizuální kontrola
- Kapilární (penetrační) zkouška
- Magnetická prášková zkouška.

Pro zjišťování vnitřních vad to jsou např.:

- Zkouška ultrazvukem
- Zkouška prozářením.

Vizuální kontrola je jednoduchou metodou kontroly povrchu svarových prvků, jelikož ji lze provést pouhým okem, případně pomocí lupy. Používá se jako předběžné posouzení kvality svarů před další kontrolou nebo jako samostatná zkušební metoda. Vizuální kontrolou lze zjistit vady v kořeni svaru, jako například neprovařený kořen, krápníky, zápaly. Dále vady napojení či vady na povrchu svaru, jako neúhledná a nerovnoměrná svarová housenka nebo povrchové praskliny.

Provedením kapilární zkoušky lze zjistit povrchové trhliny a praskliny malých rozměrů. Nejprve je nutno zkoušený povrch mechanicky očistit. Následně je nanesen penetrant, který musí zatéct do všech míst svaru, tato operace zabere několik minut. Následně je penetrant očištěn a je aplikována detekční látka. Ta po reakci s penetrantem zvýrazní místa defektu či vady. Zobrazení průběhu zkoušky je na Obr. 8. [10, 15, 16]

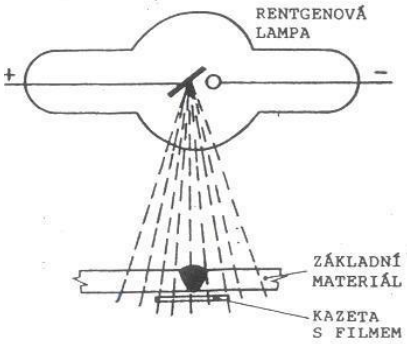


Obr. 8 Kapilární zkouška [16]

Posledním z uvedených zástupců zkoušek bez porušení materiálu sloužící k odhalení povrchových vad je magnetická prášková zkouška. Tu lze provádět na

feromagnetických materiálech, kdy je ke zkoušenému tělesu připojen magnet. Vytvořením magnetického pole vystoupí siločáry na povrch. Po zmagnetování je na zkoušené místo nalita směs oleje s drobnými kovovými částicemi, které se zachytí na všech vadách a utvoří jejich obraz. Po magnetizaci je nutné těleso odmagnetovat. [10, 15]

Jednou z možností, jak ověřit vnitřní celistvost svaru, je zkouška prozářením, jejíž schéma je na Obr. 9. Metoda spočívá v prozáření zkušebního tělesa rentgenovým nebo gama zářením, dle tloušťky materiálu. Pod zkoušeným tělesem je umístěna filmová destička, na kterou se zaznamenává intenzita procházejícího záření. V místech defektů ve svaru je vrstva materiálu oslabena a tím pádem v tomto místě projde záření snadněji než v oblastech bez jakýchkoli defektů. Touto metodou je možné zkoumat vady vnitřní struktury svarového spoje, jako jsou vměstky, staženiny, bubliny, studené spoje a vnitřní trhliny



Obr. 9 Zkouška prozářením [16]

2.5.2. Destruktivní zkoušky

Destruktivní zkoušky materiálu se často využívají během vývoje součástí a konstrukcí pro ověření vhodnosti zvolené svařovací metody. Rovněž mohou být použity jako průběžná kontrola výskytu vad. Tyto metody vyžadují výrobu zkušebních vzorků pro jednotlivé zkoušky, které jsou vyříznuty ze zkoušeného tělesa. Při samotném testování dochází k destrukci vzorku a v případě dalších pokusů je nutné zhotovit vzorek nový. Běžně používanými destruktivními metodami jsou [2, 13, 15]:

- Zkouška tahem
- Zkoušky tvrdosti
- Zkouška rázem v ohybu
- Zkouška rozlomením
- Analýza metalografického snímku.

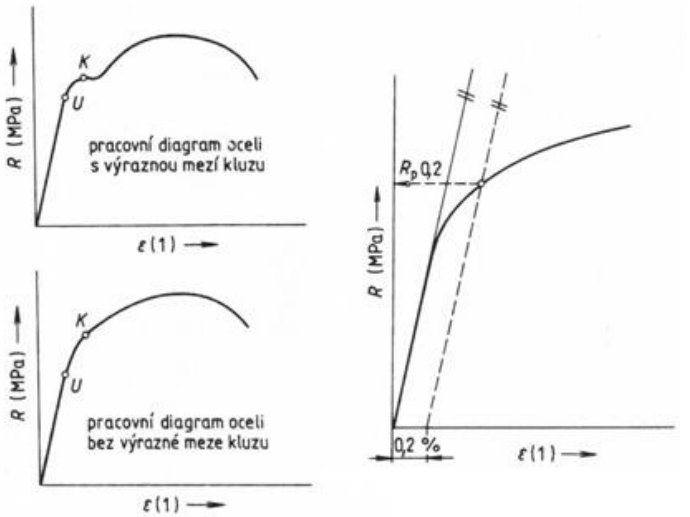
Při tahové zkoušce je vyhodnocována pevnost a plasticita materiálu. V případě zkoušení svarového spoje je ideálním výsledkem přetržení zkušební tyče mimo oblast svaru. U tahové zkoušky se používají zkušební tyče jejichž rozměry udává norma ČSN EN ISO 4136. [10, 13]

Samotná zkouška spočívá v natahování vzorku zátěžovou silou až do jeho přetržení, kdy průběh síly je zaznamenáván do pracovního diagramu (Obr. 10) a její velikost je určena vztahem:

$$F = f(\Delta L),$$

kde F je zatěžující síla a ΔL je absolutní prodloužení zkušební tyče.

Pracovní diagram vyjadřuje závislost síly na deformaci materiálu. Často využívanými hodnotami jsou mez kluzu *Re* a mez pevnosti *Rm.* Mez kluzu vyjadřuje napětí, při kterém dochází k prvním výraznějším plastickým deformacím [10]. Po mez kluzu je deformace elastická, tedy vratná. Po překonání *Re* již dochází k nevratným plastickým deformacím. Hodnota *Rm* je nejvyšší napětí před přetržením zkušebního vzorku. Měkké houževnaté oceli, například uhlíkové nebo nízkolegované oceli mají mez kluzu výraznou, jak lze vidět na Obr. 10. Pro tvrdé materiály jako vysokolegované oceli je mez kluzu nevýrazná a používá se smluvní mez kluzu $Rp_{0,2}$. To je hodnota napětí, při které je dosaženo předepsané smluvní hodnoty prodloužení, tato závislost je zobrazena na Obr.10. [3, 10]

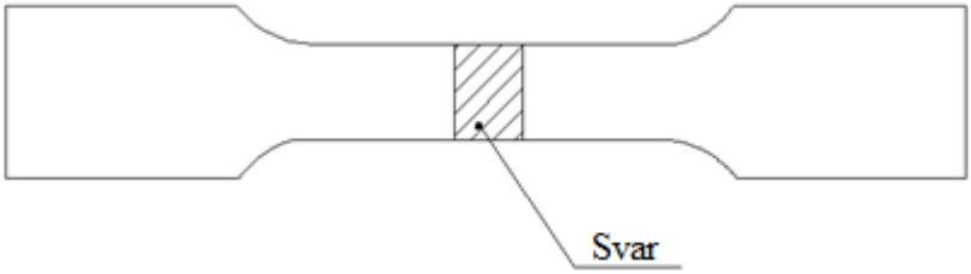


Obr. 10 Mez kluzu tvrdých ocelí a smluvní mez kluzu [17]

Dalšími parametry zjistitelnými ze zkoušky tahem jsou kontrakce a tažnost materiálu. Kontrakce, tedy poměrné zúžení materiálu, udává minimální hodnotu příčného průřezu zkoušené tyče v místě roztržení. Její velikost je určena v procentech. Tažnost materiálu je poměrné prodloužení zkušební tyče po

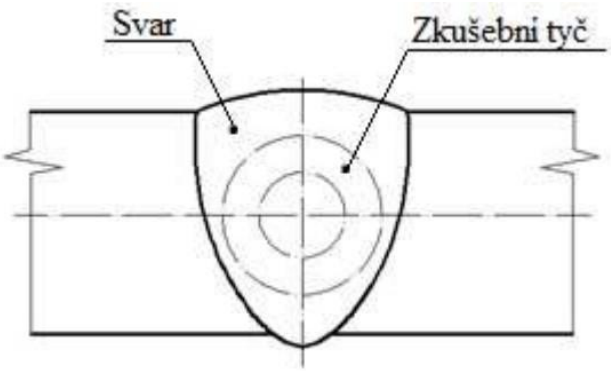
přetržení a také je uváděna v procentech[2, 10]U kvalitního svaru dojde k přetržení zkušební tyče mimo svarový kov a tepelně ovlivněnou oblast. V případě, že dojde k prasknutí ve svaru, může být svar vyhodnocen jako nekvalitní a špatně provedený.

Zkoušku tahem je možné provést příčně nebo podélně na svarový kov. Pokud je použita příčná zkouška tahem, tak zkušební tyč musí být zhotovena kolmo na osu svaru dle Obr. 11. Tímto způsobem je ve vzorku zachycen základní materiál (ZM), tepelně ovlivněná oblast (TOO) i svarový kov (SK). U příčné zkoušky tahem se vyhodnocuje mez pevnosti a ostatní charakteristiky jsou doplňkové. [18, 19]



Obr. 11 Vzorek pro příčnou zkoušku tahem[18]

V případě použití podélné zkoušky tahem zkušební tyč obsahuje pouze svarový kov, jak je ukázáno na Obr. 12, a lze tedy určit všechny materiálové charakteristiky svarového kovu. [18]

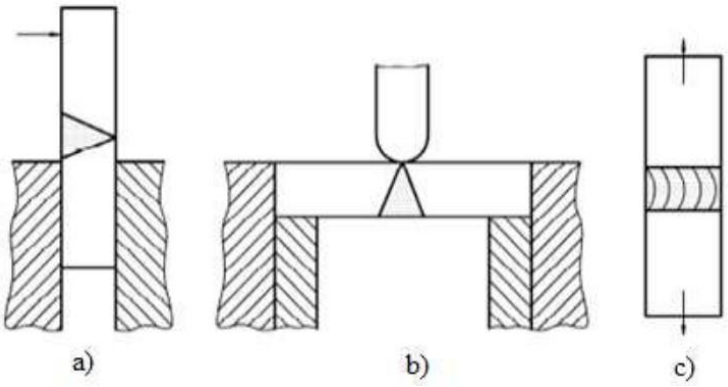


Obr. 12 Vzorek pro podélnou zkoušku tahem [18]

Velmi názornou zkouškou pro hodnocení kvality svarových spojů je zkouška rozlomením, dle ČSN EN ISO 9017. Jde o jednoduchou zkoušku, která může být provedena rázovým zatížením svaru, statickým zatížením na lisu nebo působením tahového zatížení, jak je naznačeno na Obr. 13. U této zkoušky lze pozorovat druh i polohu vnitřních vad ve svaru jako například studené spoje, dutiny, staženiny nebo trhliny.

Pro řádné provedení zkoušky je nutno zhotovit alespoň 2 vzorky. Pro snadnější rozlomení je možné opatřit vzorky čelním vrubem nebo bočními vruby, aby bylo zabezpečeno rozlomení ve svaru a nedošlo k odloupnutí celého svarového kovu.

Po provedení zkoušky dojde k jejímu vyhodnocení. Vyhodnocení se provádí vizuální kontrolou rozlomeného svaru, případně může být použita lupa pro detailnější pohled. [18, 20]



Obr. 13 Metody zkoušky rozlomením; a) dynamický ráz; b) statický ohyb; c) tahové zatížení [20]

Jedná se o dynamickou zkoušku, jelikož zde zatížení nepůsobí konstantně, nýbrž rázem. Během zkoušky dojde k prudkému přeražení vzorku za pomocí Charpyho kladiva. Z naměřených dat lze určit vrubovou houževnatost materiálu případně stanovit podmínky iniciace křehkého lomu. Před uskutečněním zkoušky je potřeba vyrobit vzorky, jejichž rozměry jsou stanoveny normou ČSN EN ISO 9016 na 10x10x55 mm a jsou opatřeny vrubem tvaru U nebo V. Vrub je nutné umístit na opačnou stranu, než je směřován úder kladiva, aby došlo k přeražení materiálu v určeném místě. [10]

V případě zkoušky rázem v ohybu je u svarů důležitá poloha a orientace svaru při zhotovení zkušební tyče vůči vrubu. Zkušební vzorek je z materiálu nutné odebrat tak, aby byl zachycen příčný průřez svarem a obsahoval tak všechny oblasti svaru. Po odebrání vzorku z materiálu musí být na zkušební těleso umístěn vrub, který má být orientován proti zkoumané oblasti. Vrub je možné umístit naproti svarovému kovu nebo tepelně ovlivněné oblasti. [21]

2.5.3. Zkoušky tvrdosti

Tvrdost materiálu je definována jako odpor materiálu proti vniknutí cizího tělesa. U zkoušek tvrdosti není destrukce tělesa podmíněna, lze je provádět jak na povrchu materiálu pro stanovení tvrdosti povrchové vrstvy, tak v řezu tělesa. Například pro stanovení tvrdosti jednotlivých oblastí svaru, zakaleného či jinak tepelně upraveného tělesa, u které jsou požadovány určité tvrdosti a vlastnosti. Zkoušek je několik druhů odlišujících se jak tvarem indentoru, tak zátěžovou silou, dobou zatížení i následným vyhodnocením vtisku či samotným principem vniknutí tělesa. [22, 23]

Princip zkoušky tvrdosti dle Vickerse spočívá ve vtisku diamantového pravidelného jehlanu s vrcholovým úhlem 136°, indentor a schéma zkoušky jsou na Obr. 14. Velikost úhlu indentoru je volena pro co nejmenší odpor materiálu, a tedy co nejpřesnější výsledky měření. Vickersova zkouška se řadí mezi statické metody. Indentor vniká do tělesa pozvolna narůstající silou, vedenou kolmo na povrch vzorku. Velikost zátěžové síly a doba působení je předepsána v normě ČSN EN ISO 6507. Při standardní zkoušce je náběhový čas 2–8 s a zátěžový čas 10–15 s. Zátěžová síla je, pokud není předepsáno jinak, 294,2 N (30 kp). Hodnoty zátěžové síly pro zkoušku mikrotvrdosti dle Vickerse jsou uvedeny v Tabulce 1.

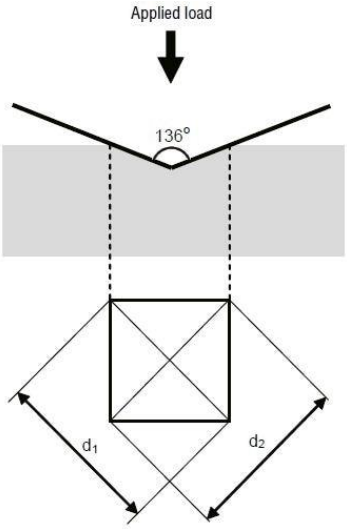
Tabulka 1 Zkušební zatížení dle Vickerse [10]

Označení	Symbol tvrdosti HV	Zkušební zatížení F (N)
Zkouška tvrdosti podle Vickerse	≥ HV 5	F ≥ 49,03
Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení	HV 0,2 až < HV 5	1,961 ≤ F < 49,03
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	HV 0,01 až < HV 0,2	0,09807 ≤ F < 1,961

Při vyhodnocování zkoušky měříme úhlopříčky provedených vtisků a následně dle vzorce:

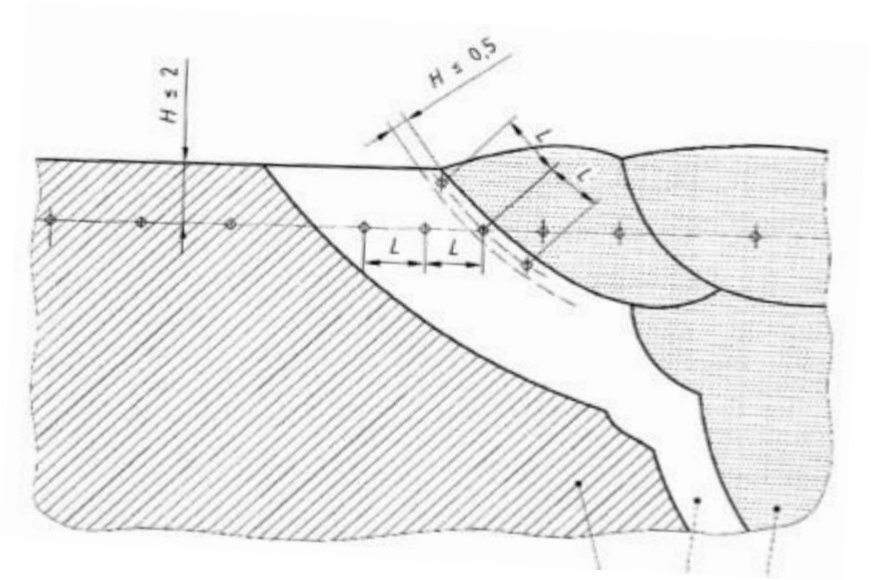
$$HV = \frac{1{,}981 * F}{u^2}$$

kde *HV* je tvrdost podle Vickerse, *F* je zátěžová síla a *u* je aritmetický průměr úhlopříček vtisku. Kladným znakem Vickersovy zkoušky je možnost jejího použití na tvrdé i měkké materiály. [15]



Obr. 14 Schéma zkoušky dle Vickerse [24]

Nevýhodou této metody je její náročnost na přípravu povrchu, který by měl být alespoň broušený a během měření je potřeba zamezit vlivu chvění na vzorek a zkušební přístroj. Odebrání vzorku mechanickým řezáním je obvykle provedeno kolmo na svarový spoj, aby vznikl průřez osou svaru, na kterém lze pozorovat všechny oblasti svaru. Proces oddělení vzorku z výrobku musí být proveden takovým způsobem, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění povrchu zkoumaného vzorku. Povrch vzorku musí být zbaven stop po mechanickém odřezání vzorku, to je zajištěno broušením. Následným leptáním je zajištěna lepší čitelnost obrysů vtisků ve struktuře, a tudíž je umožněno jejich přesnější změření. Pokud u vzorků došlo ke zvýšení tvrdosti v TOO, je nutné provést kontrolní vtisk ve vzdálenosti 0,5 mm od linie natavení a středu vtisku. Počet vtisků a jejich rozmístění musí být takové, aby bylo možné vyhodnotit oblast, kde došlo k zvýšení tvrdosti. Jak ukazuje Obr. 15, tak do jednotlivých oblastí svaru (ZM, TOO a SK) byly provedeny skupiny o velikosti 3 vtisků a vzdálenosti středů alespoň 0,7 mm od sebe. Řada se musí nacházet ve vzdálenosti alespoň 2 mm od okraje vzorku. [2, 19, 22]



Obr. 15 Rozmístění zkušebních vtisků [22]

Při zkoušení tvrdosti svarů je možné provést zkoušky provedením řady vtisků, což je značeno písmenem R, případně lze provádět vtisky jednotlivě do vybraných oblastí a tato metoda je značena písmenem E. Vtisky musí být umístěny ve vzájemné vzdálenosti takové, aby bylo možné provést hodnocení svarových spojů a nedošlo k jejich vzájemnému ovlivnění. [22]

2.5.4. Makroskopická a mikroskopická analýza

Jednoduchou a nenáročnou metodou hodnocení kvality svarových spojů je makroskopická analýza. Ta spočívá v pozorování vzorku připraveného dle požadavků v normě ISO/TR 16060. Vzorek je možné podrobit makroskopické analýze pouhým okem, případně lupou, jejíž zvětšení není větší než 50x.[25]

Před makroskopickým analyzováním vzorku je vhodné, aby byla vyvolána struktura svaru leptáním. Po vyvolání struktury je možné pozorovat jednotlivé oblasti, kterými jsou základní materiál a tepelně ovlivněná oblast po obou stranách svaru a svarový kov. [13, 15, 25]

Jednou z přesnějších možností hodnocení vlastností svarového spoje je mikroskopická analýza jeho struktury, kdy po přípravě vzorku jsou pod mikroskopem pozorovány jednotlivé složky a struktury, které se v daném materiálu a oblasti svaru nachází. U ocelí jsou po leštění svaru patrné kovové vměstky, staženiny, praskliny malých rozměrů či případně bubliny. Po leptání je možné pozorovat hranice krystalických zrn a jednotlivé strukturní složky. [2, 25]

3. Experimentální část

Pro experiment byly použity svarové spoje z oceli C 45 její složení je uvedeno v Tabulce 2. Kvůli vysokému obsahu uhlíku je ocel špatně svařitelná. Ze stejného důvodu lze očekávat vady ve svaru, jako například vyšší podíl vměstků či vznik martenzitické struktury při nevhodně zvolené teplotě předehřevu součásti. Vzorky 1 a 2 byly svařeny tavným způsobem a u vzorku 3 bylo použito rotační frikční svařování.

Tabulka 2 Chemické složení oceli C45

Prvek	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	P	S
Podíl prvku [%]	0,42-0,5	0,5-0,8	>0,4	> 0,4	>0,1	>0,4	> 0,04	> 0,04

3.1. Příprava vzorků

Příprava vzorků začíná řezáním zkušebních vzorků ze zkoumaných těles. Při hodnocení svarů je vhodné provádět příčný řez svarem tak, aby na vzorku byly zachyceny všechny fáze, které se ve svaru vyskytují, tedy základní materiál a tepelně ovlivněná oblast na obou stranách svarového spoje a svarový kov. V tomto případě byla k řezání použita stojanová pila LECO MSX255, zobrazená na Obr. 16.

Obr. 16 Pila LECO MSX 255

Obr. 17 LECO PR-4X

Pro snadnější manipulaci byly 2 vzorky zalisovány do pryskyřice za tepla a jeden vzorek byl zalit do zalévací hmoty za studena. Vzorky 1 a 2 lisované za tepla byly zasypány černým bakelitovým granulátem LECO. Následně byly zalisovány pomocí metalografického lisu LECO PR-4X, zobrazen na Obr. 17. Vzorek 3 byl umístěn do formy a následně zalit. Použita byla dvousložková zalévací hmota VariDur 200.

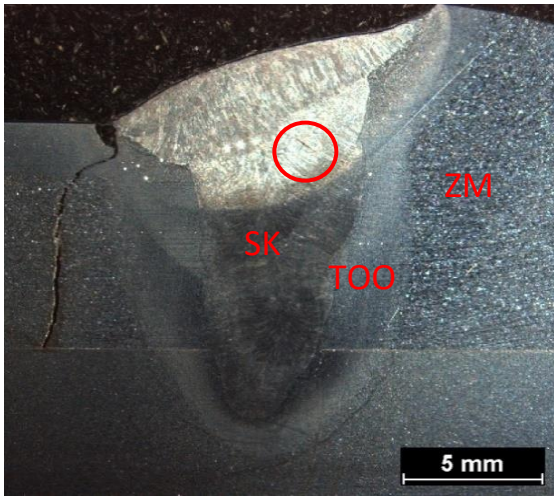
Po vytvrzení zalévací hmoty následovalo broušení vzorků sadou brusných kotoučů o hrubosti P80 až P2500. Broušení bylo provedeno na brusce LECO GPX 300 při rychlosti 180 a 210 ot. /min. Bruska je zobrazena na Obr. 18. Následně byly vzorky leštěny na leštícím kotouči s brusnou pastou z oxidu křemičitého (velikost zrn 3 μm). Po leštění byl každý vzorek opláchnut vodou, ethanolem a na závěr osušen proudem teplého vzduchu.

Obr. 18 Bruska/leštička LECO GPX 300

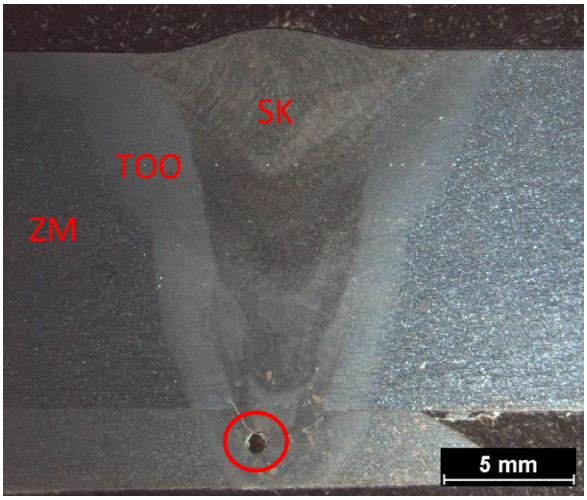
Vzorky byly leptány za použití leptadla NITAL 2, což je 2 % roztok kyseliny dusičné, po dobu 3 vteřin při teplotě (20±1 °C).

3.2. Makroskopická analýza

Jednoduchou a často používanou metodou kontroly svarových spojů je makroskopická kontrola, která spočívá v pozorování připraveného vzorku okem, případně pod lupou se zvětšením maximálně 50x. Vzorky 1, 2 a 3 byly po přípravě podrobeny makroskopické kontrole (Obr. 19 až 21).



Obr. 19 Vzorek 1 makrostruktura



Obr. 20 Vzorek 2 makrostruktura

Vzorky 1 a 2 byly svařeny tavnou technologií. To je patrné zejména v horní části svaru, kde jsou vidět svarové housenky. Dále to lze poznat podle typického tvaru svaru do písmene V. Na Obr. 19 je patrná trhlina na hranici natavení a také šířka poslední housenky je příliš velká oproti šířce zbytku svaru. Tyto vady nesou dle normy [4] označení:

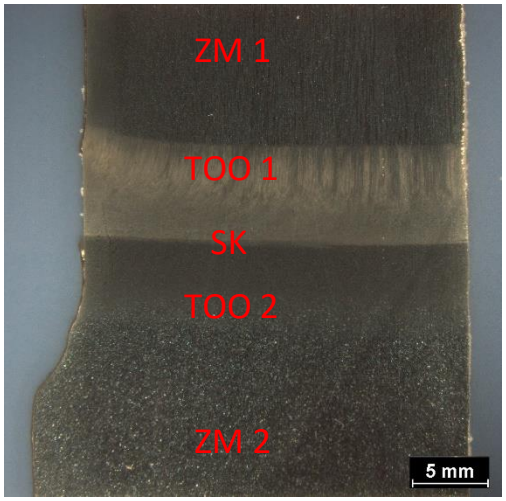
- Vada ISO 6520-1-1012 – prasklina na hranici SK a TOO
- Vada ISO 6520-1-5212 – nadměrná šířka svaru

V případě druhého vzorku už je kvalita svaru lepší, avšak je vidět staženina, která nese dle normy [4] označení:

Vada ISO 6520-1-202 – staženina ve svarovém kovu

Stejně jako u vzorku 1 bylo zde ke svaření použito několika housenek, ale u vzorku 2 vidíme, že šířka svaru se rovnoměrně rozrůstá od kořene až k povrchu.

Na rozdíl od vzorků 1 a 2 byl vzorek 3 svařen metodou rotačního frikčního svařování. Svar zhotovený metodou RFW má při porovnání s tavným svarem téměř konstantní šířku svarového kovu v délce celého svaru, viz Obr. 19. Oblast svarového kovu je u RFW tenká a znatelně menší než tepelně ovlivněná oblast, tyto jevy lze pozorovat po vyleptání vzorku.



Obr. 21 Vzorek 3 makrostruktura

Na vzorku 3 je vidět zvětšující se tloušťka TOO u levého okraje svaru, materiál pravděpodobně nebyl během svařování upnut zcela kolmo. Dále jsou patrné dva rozdílné druhy ZM, což bylo potvrzeno při mikroskopickém pozorování na Obr. 26 a) a Obr. 26 f) v následující kapitole.

3.3. Mikroskopická analýza

Mikroskopickou analýzou snímků byly pozorovány a určeny vady, které makroskopickou optickou analýzou nebylo možné odhalit. Bylo pozorováno složení struktury svaru, velikost TOO a základního materiálu, dále vměstky cizích prvků (oxidické, nitridické a sulfidické), hranice zrn a tepelné ovlivnění.

V případě analýzy mikrostruktury svaru byly vzorky připraveny dle požadavků normy ČSN EN ISO 17639, přesné parametry přípravy jsou udány normou ISO/TR 16060. Dle normy byl vzorek orientován kolmo na osu svaru, aby zároveň zachycoval svarový kov, TOO a základní materiál po obou stranách svaru. Snímky mikrostruktury byly vyfoceny na metalografickém mikroskopu NEOPHOT 32 vybaveného CCD kamerou s přidruženým programem NIS-Elements Advanced Research, který je na Obr. 22.

Obr. 22 Metalografický mikroskop NEOPHOT 32

3.3.1. Mikrostruktura neleptaných vzorků

Na snímcích mikrostruktury vzorků ve vyleštěném stavu lze pozorovat různé vměstky, nečistoty a případné vady ve svaru jako jsou staženiny, póry nebo praskliny. Na Obr. 23 jsou snímky mikrostruktury neleptaných vzorků.

Při pohledu na strukturu tepelně ovlivněné oblasti vzorku 1, Obr. 23 a), lze vidět, že se zde vyskytují jak sulfidické, tak oxidické vměstky. Sulfidické vměstky jsou označeny SV, oxidické vměstky označeny OV. Ve svarovém kovu jsou na Obr. 23 b) vidět pouze oxidické vměstky, označeny šipkou. Oproti TOO zde nejsou patrné sulfidické vměstky.

Na vzorku 2, lze pozorovat sulfidické vměstky, na Obr. 23 c) vyznačeny šipkami. V tepelně ovlivněné oblasti se také vyskytují oxidické vměstky, které jsou označeny šipkami. Ve svarovém kovu vzorku 2 je možné pozorovat oxidické vměstky, na Obr. 2 d) označeny šipkou. Stejně jako ve svarovém kovu vzorku 1 zde nejsou patrné sulfidické vměstky.

Tepelně ovlivněná oblast vzorku 3 obsahuje sulfidické vměstky, které jsou na Obr. 23 e) zvýrazněny šipkou SV. Ve svarovém kovu vzorku 3 se nachází podstatně větší množství oxidických vměstků v porovnání s předešlými vzorky. Na Obr. 23 f) jsou ukázány šipkou.

Vzorek 2 má, stejně jako vzorek 1, v základním materiálu sulfidické i oxidické vměstky. V základním materiálu vzorku 3 se vyskytují pouze sulfidické vměstky.

Pro pozorování samostatných struktur vyskytujících se ve svaru bylo nutné vzorky naleptat. Na obrázcích mikrostruktury neleptaných vzorků byly pozorovány tyto vady:

Vada ISO 6520-1-3033 – oxidický vměstek ve vzorku 1, Obr. 23 a)

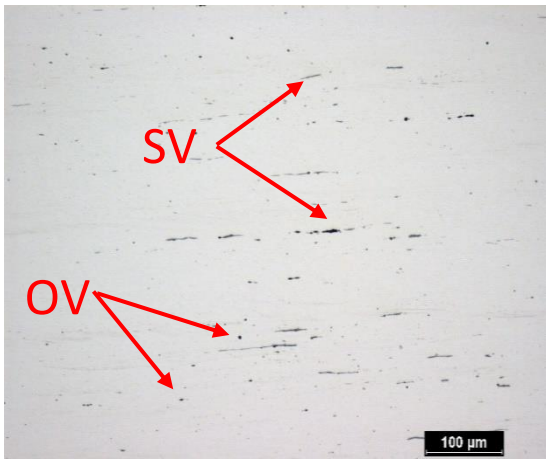
Vada ISO 6520-1-3043 – sulfidický vměstek ve vzorku 1, Obr. 23 a), Obr. 23 b)

Vada ISO 6520-1-3033 – oxidický vměstek ve vzorku 2, Obr. 23 c), Obr. 23 d)

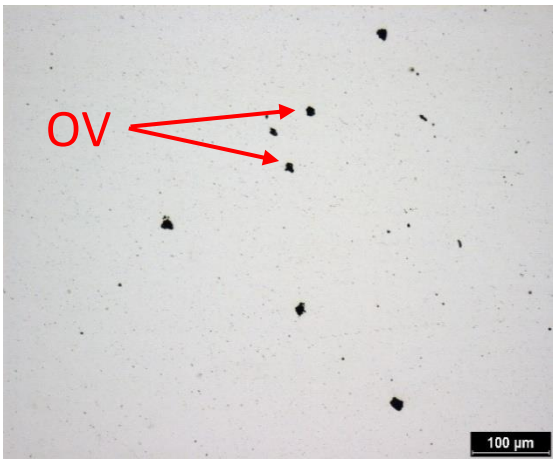
Vada ISO 6520-1-3043 – sulfidický vměstek ve vzorku 2, Obr. 23 c)

Vada ISO 6520-2-P303 – oxidický vměstek ve vzorku 3, Obr. 23 e)

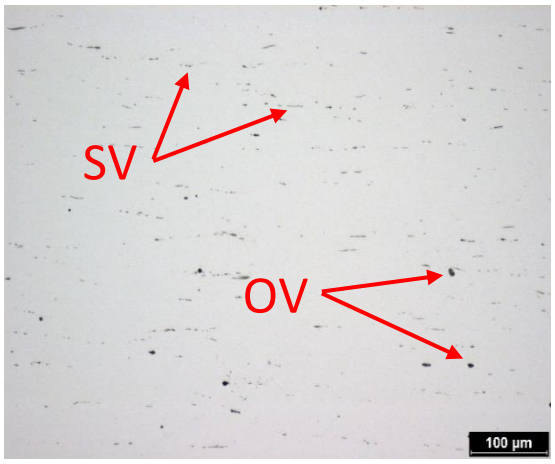
Vada ISO 6520-1-P304 – sulfidický vměstek ve vzorku 3, Obr. 23 f)



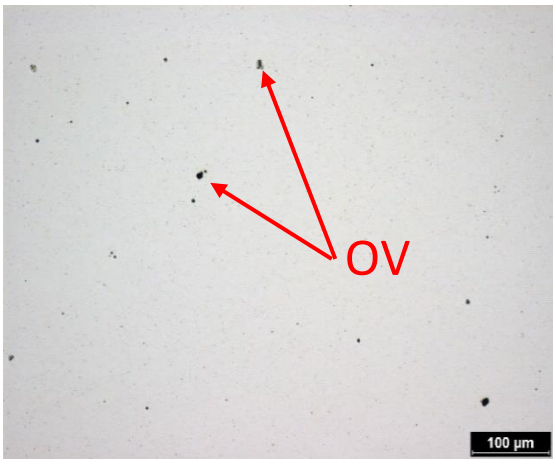
a) Vzorek 1 TOO



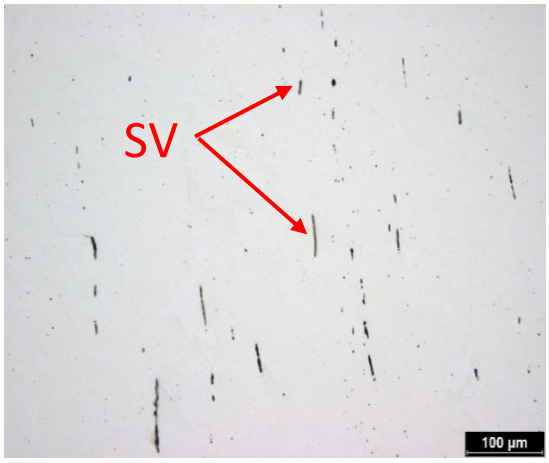
b) Vzorek 1 SK



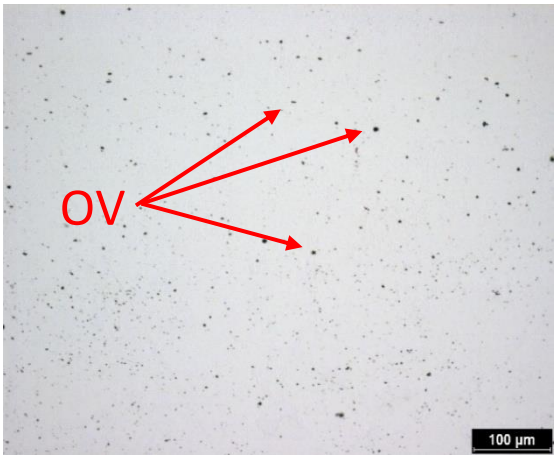
c) Vzorek 2 TOO



d) Vzorek 2 SK



e)Vzorek 3 TOO



f) Vzorek 3 SK

Obr. 23 Mikrostruktura neleptaných vzorků

3.3.2. Mikrostruktura leptaných vzorků

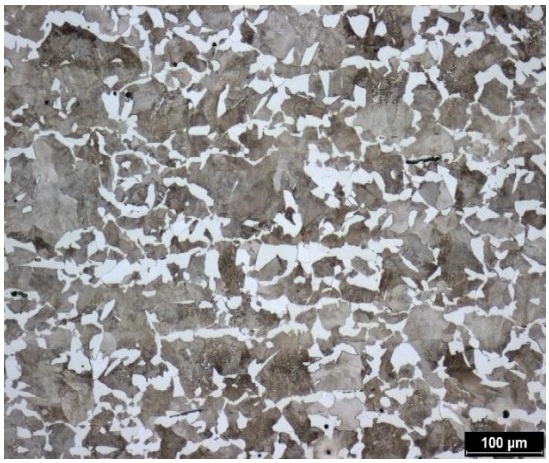
Na Obr. 24–26 je zobrazena mikrostruktura vzorků po leptání. Na rozdíl od leštěného povrchu lze vidět detailní strukturu materiálu. Kromě oxidických a sulfidických vměstků je možné pozorovat hranice zrn a také tvar a množství jednotlivých strukturních složek.

Základní materiál vzorku 1 je na Obr. 24 a). Po chemickém leptání lze v základním materiálu rozeznat perliticko – feritickou strukturu s 75 % obsahem perlitu, který se na snímku jeví jako oblast s tmavě šedým zabarvením.

V tepelně ovlivněné oblasti vzorku 1 lze pozorovat jemnozrnnou perliticko feritickou strukturu, viz Obr. 24 c). V TOO se vyskytuje martenzitická struktura, která je zobrazena na Obr. 24 d). Z přítomnosti martenzitu lze usuzovat, že během svařování došlo k zakalení, které mělo za následek vytvoření martenzitické struktury.

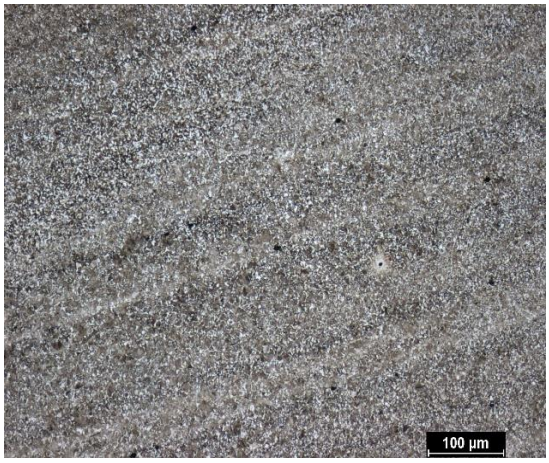
Ve svarovém kovu vzorku 1 je vidět licí struktura tvořená bainitem a feritem, který je vyloučen po hranicích licích zrn, viz Obr. 24 e). Na Obr. 24 f) je patrný výskyt polyedrického feritu a dendritické struktury. Jak ukázala makroskopická analýza (Obr. 19), tak na rozhraní SK a TOO došlo k šíření praskliny. Ve svarovém kovu vzorku 1 se nachází trhlina, která je označena na Obr. 19 (kroužek) a zobrazena na Obr. 24 b). Tato vada nese označení dle normy [4] :

Vada ISO 6520-1-1011 – trhlina ve svarovém kovu

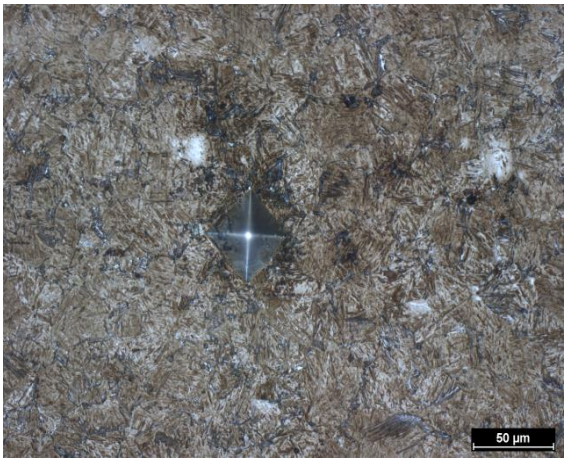


a) Vzorek 1 ZM

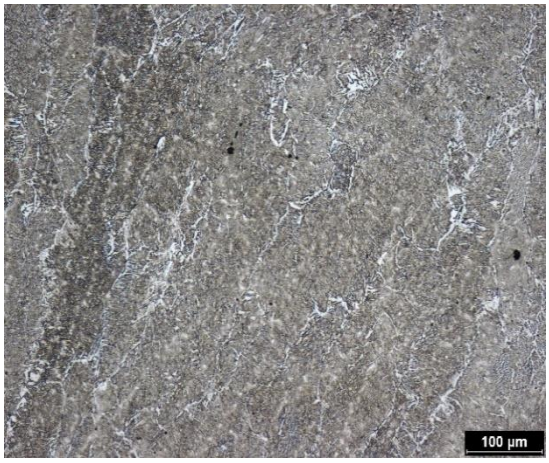
b) Vzorek 1 Prasklina – detail



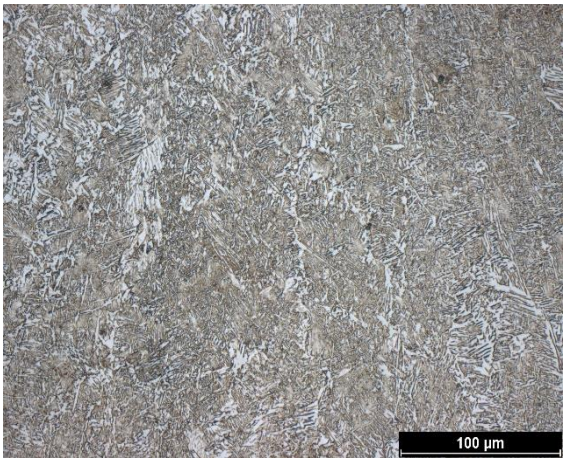
c) Vzorek 1 TOO



d) Vzorek 1 TOO



e) Vzorek 1 SK



f) Vzorek 1 SK – detail

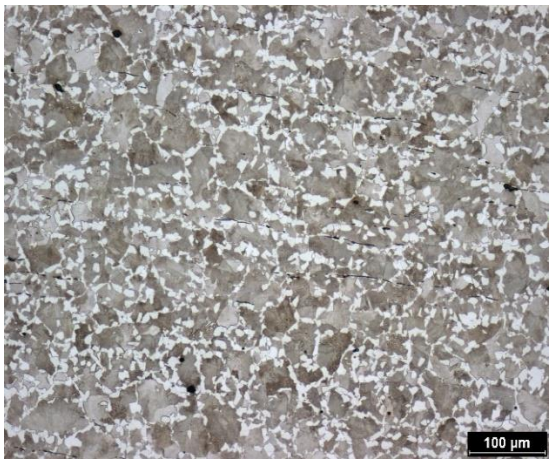
Obr. 24 Mikrostruktura vzorku 1 - leptáno

Na Obr. 25 a) je základní materiál vzorku 2, který má jemnější perliticko feritickou strukturu než vzorek 1. Detail struktury lamelárního perlitu je označen na Obr. 25 b).

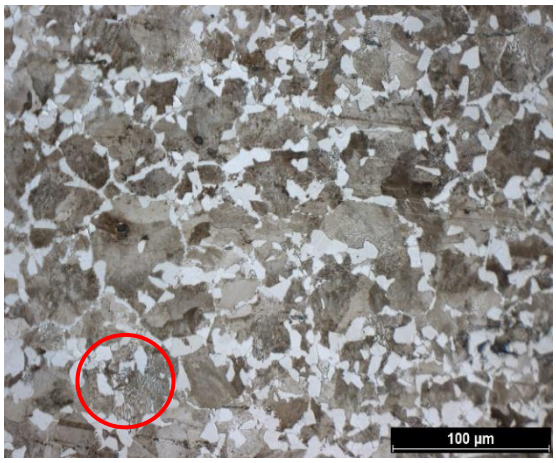
Na Obr. 25 c) je zachycena tepelně ovlivněná oblast vzorku 2. TOO je tvořena velmi jemnou perliticko feritickou strukturou, kterou ukazuje Obr. 25 d).

Ve svarovém kovu vzorku 2 je zřejmá struktura s acikulárním feritem a bainitická struktura, ta je zachycena na Obr. 25 e).

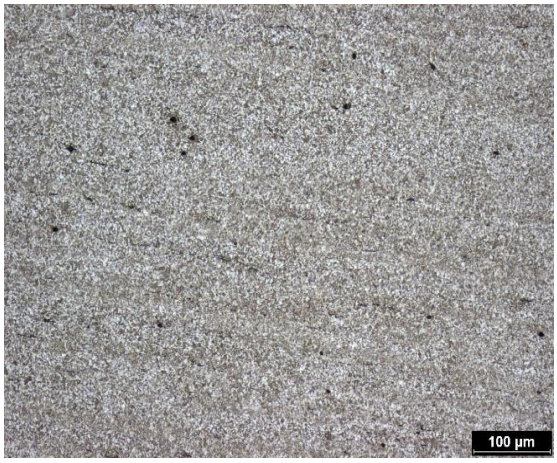
Na vzorku 2 nebyla u leptaných snímků pozorována žádná klasifikovatelná vada.



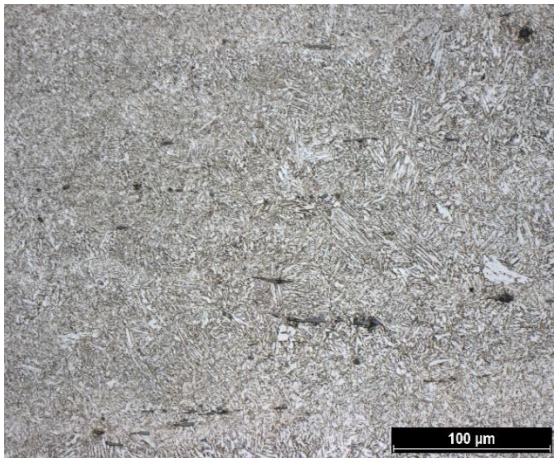
a) Vzorek 2 ZM



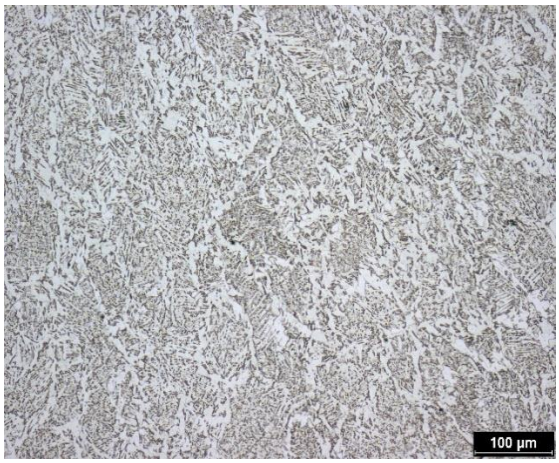
b) Vzorek 2 ZM – detail



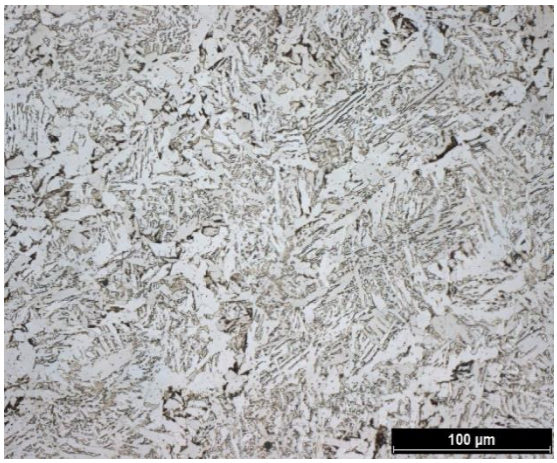
c) Vzorek 2 TOO



d) Vzorek 2 TOO – detail



e) Vzorek 2 SK



f) Vzorek 2 SK – detail

Obr. 25 Mikrostruktura vzorku 2 - leptáno

Základní materiál vzorku 3 obsahuje perliticko feritickou strukturu, jak lze vidět na Obr. 26 a).

V tepelně ovlivněné oblasti 1 vzorku 3 lze pozorovat jemnou perliticko feritickou strukturu, viz Obr. 26 c). V detailním zobrazení struktury, Obr. 26 d), je patrný nitrid titanu, který má zlatožlutou barvu a pravidelný tvar. Původ nitridu titanu ve struktuře je neznámý a může se jednat o precipitát případně nečistotu. V důsledku nestejnorodého ochlazování jsou zde minoritně zastoupeny i ostatní struktury, například: lamelární perlit, ferit a bainit.

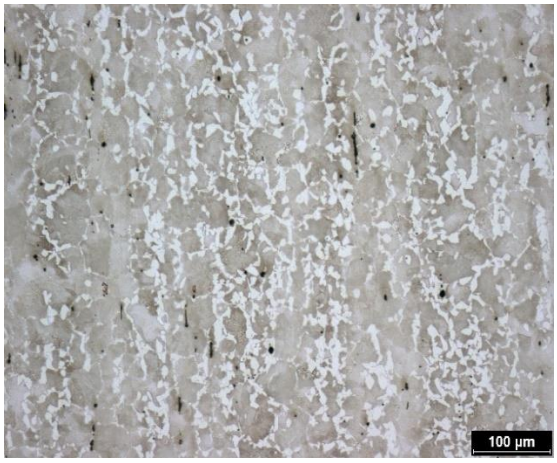
Struktura materiálu svarového kovu obsahuje acikulární ferit a bainit. Jak lze vidět na Obr. 26 e) struktura svarového kovu je jemnozrnná.

V porovnání se svarovým kovem je v TOO 2 nižší podíl feritu ve struktuře, což dokazuje Obr 26 e).

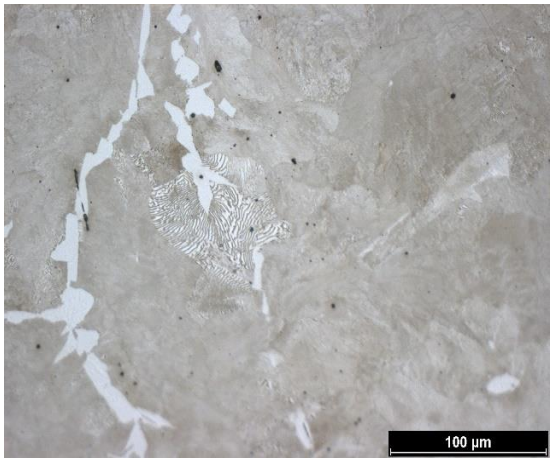
Základní materiál 2 vzorku 3 se odlišuje od materiálu předchozích vzorků, to je patrné ze struktury materiálu podle velikosti perlitických zrn. Oba základní materiály je možno porovnat na Obr. 26 a) a Obr. 26 f). Při pohledu na detailní snímek lze na Obr. 26 f) vidět lamely feritu a cementitu tvořící lamelární perlit.

Na vzorku 3 byla u leptaných snímků pozorována 1 klasifikovatelná vada:

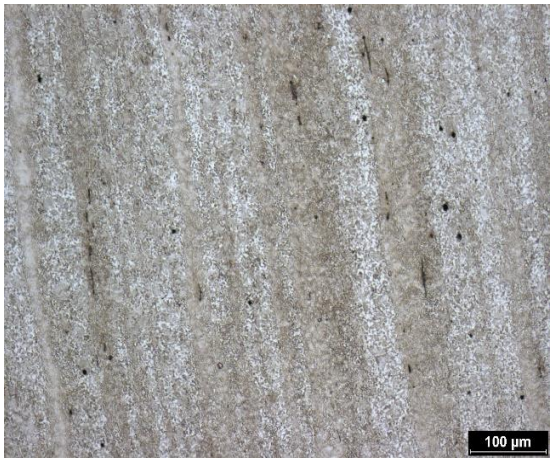
Vada ISO 6520-1-P304 – nitridický vměstek v TOO



a) Vzorek 3 ZM 1



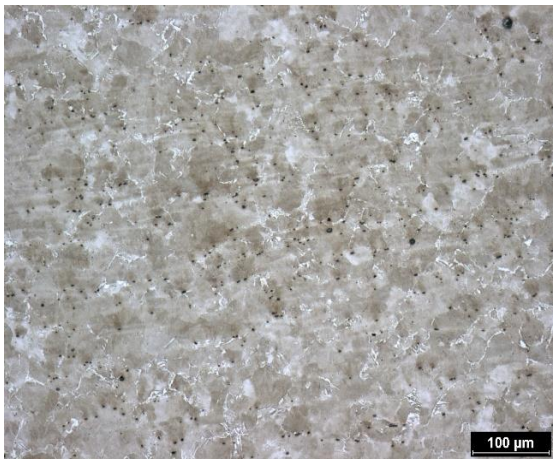
b) Vzorek 3 ZM 2 – detail



c) Vzorek 3 Vzorek 3 TOO 1

d) Vzorek 3 TOO 1 – detail

e) Vzorek 3 SK



f) Vzorek 3 TOO 2

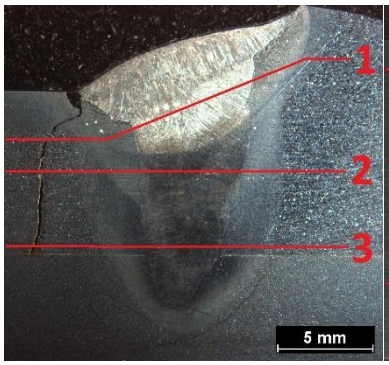
Obr. 26 Mikrostruktura vzorku 3 - leptáno

3.4. Zkoušky tvrdosti

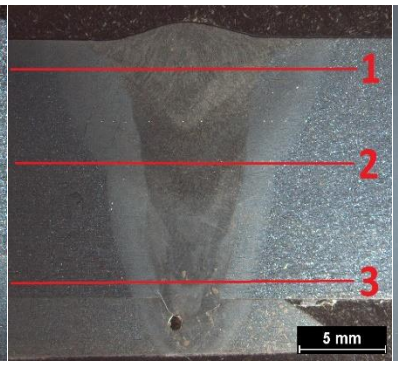
Tvrdosti byly měřeny na tvrdoměru LECO M-400-G1, který je zobrazen na Obr. 27. Pro měření byla zvolena zátěžná síla 9,81 N po dobu 10 vteřin. Vyhodnocení tvrdosti bylo provedeno změřením velikosti protilehlých vrcholů vtisku za pomocí měřících linek na obrazovce připojené ke snímací optice tvrdoměru. Po zaměření horizontálně orientovaných vrcholů byla jejich vzdálenost zaznamenána do paměti tvrdoměru a stejným způsobem došlo k zaměření vertikálně orientovaných vrcholů.

Obr. 27 Tvrdoměr LECO M-400-G1

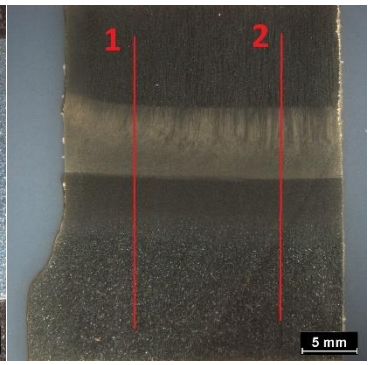
Na vzorcích 1, 2 a 3 bylo provedeno měření tvrdosti dle Vickerse podle normy [25]. U vzorků 1 a 2 bylo měření provedeno ve 3 rovinách řezu – v kořeni, ve středu svaru a v horní části svaru. V každé oblasti byly provedeny 3 zkušební vtisky a jejich hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v tabulkách 3-5. U vzorku 3 bylo měření provedeno pouze ve dvou rovinách řezu, jelikož u frikčního svařování jsou vrstvy svarového kovu a TOO rovnoměrné po celé šířce svaru. Místa provedení zkušebních vpichů jsou zachycena na Obr. 28-30. Výsledky měření tvrdosti jsou graficky zpracovány v grafech 1-3. Měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 9015-2



Obr. 28 Vzorek 1 měření tvrdosti



Obr. 29 Vzorek 2 měření tvrdosti

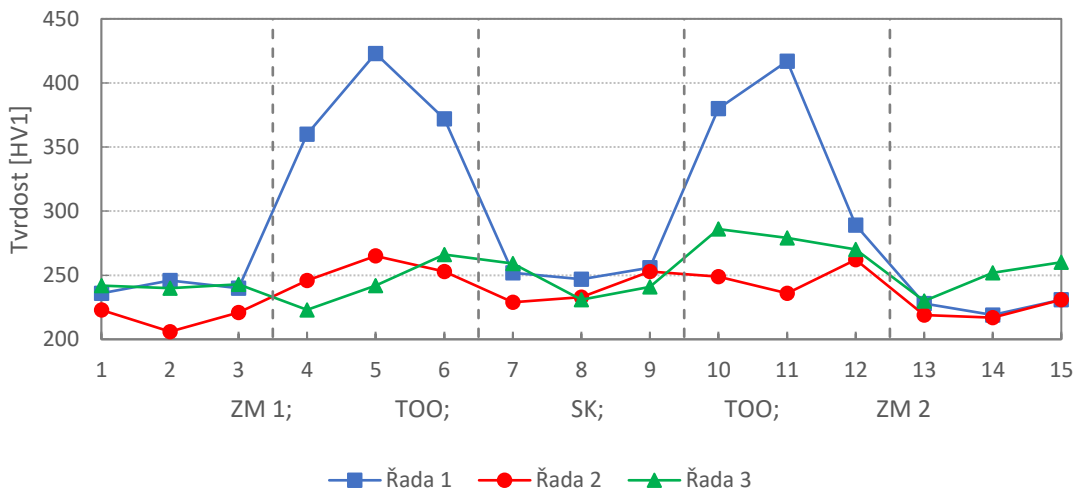


Obr. 30 Vzorek 3 měření tvrdosti

V grafu 1 je vidět, že k největšímu nárůstu tvrdosti došlo v TOO. Z obou stran svaru byla v TOO naměřena tvrdost větší než 350 HV1, což je v materiálu nežádoucí. Podle naměřené tvrdosti, která v některých místech TOO přesahovala hodnotu 400 HV1, lze předpokládat, že zde došlo k martenzitickému zakalení materiálu. To je způsobeno vysokým obsahem uhlíku ve svařovaném materiálu a rychlým ochlazením svaru či nedostatečným předehřátím materiálu.

Tabulka 3 Vzorek 1 - měření tvrdosti HV1

Řada:	1	2	3
Základní materiál	236	223	242
	246	206	240
	240	221	243
TOO	360	246	223
	423	265	242
	372	253	266
Svarový kov	252	229	259
	247	233	231
	256	253	241
TOO	380	249	286
	417	236	279
	289	262	270
Základní materiál	228	219	230
	219	217	252
	231	231	260

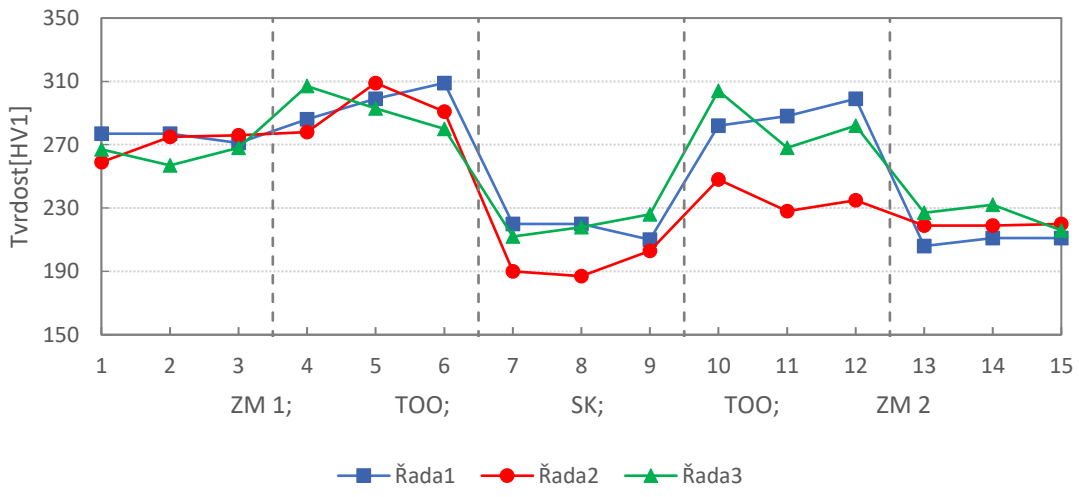


Graf 1 Vzorek 1 tvrdost

U vzorku 2 lze v Grafu 2 pozorovat nárůst tvrdosti v TOO po obou stranách svarového kovu. V porovnání s Grafem 1 však tvrdost nepřesahuje hodnotu 350 HV1, lze tedy soudit, že svar byl proveden kvalitněji. Ve svarovém kovu se tvrdost pohybuje v rozmezí 180–230 HV1, u tavného svařování tedy dochází ke snížení tvrdosti oproti základnímu materiálu. To lze vidět při porovnání grafů 1 a 2.

Tabulka 4 Vzorek 2 - měření tvrdosti HV1

Řada:	1	2	3
Základní materiál	277	259	267
	277	275	257
	271	276	268
TOO	286	278	307
	299	309	293
	309	291	280
Svarový kov	220	190	212
	220	187	218
	210	203	226
TOO	282	248	304
	288	228	268
	299	235	282
Základní materiál	206	219	227
	211	219	232
	211	220	216

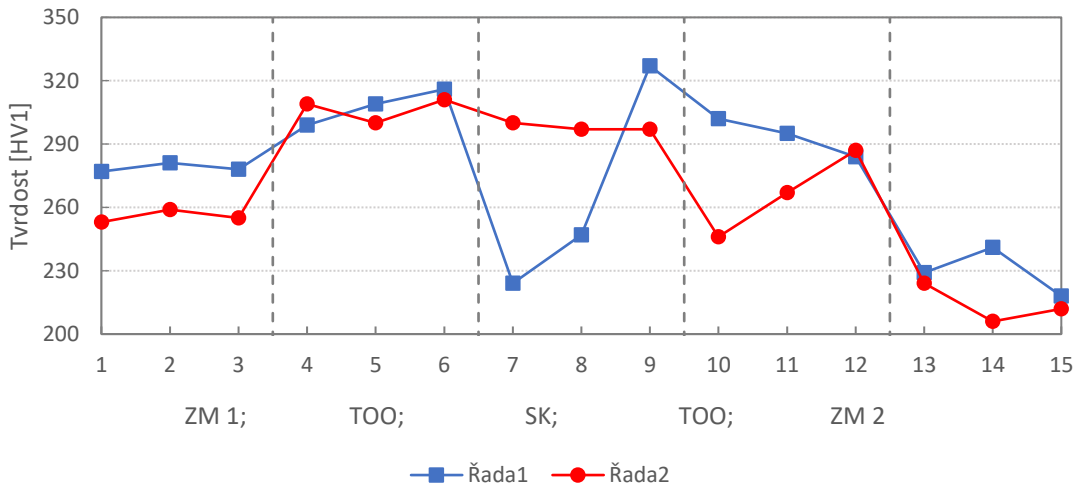


Graf 2 Vzorek 2 tvrdost

V případě vzorku 3 lze vidět, že tvrdost se v průběhu frikčního svaru nemění tolik, jako u svarů tavných. Při pohledu na tvrdost ve svarovém kovu v Grafu 3 si lze všimnout významného rozdílu hodnot tvrdosti ve svarovém kovu. Tato výrazná odchylka dosahující rozdílu téměř 100 HV1 mohla být způsobena provedením vtisku v různých strukturních složkách objevujících se ve struktuře svarového kovu.

Tabulka 5 Vzorek 3 - měření tvrdosti HV1

Řada:	1	2
Základní materiál	277	253
	281	259
	278	255
TOO	299	309
	309	300
	316	311
Svarový kov	224	300
	247	297
	327	297
TOO	302	246
	295	267
	284	287
Základní materiál	229	224
	241	206
	218	212



Graf 3 Vzorek 3 tvrdost

4.Závěr

Byla provedena makroskopická a mikroskopická analýza třech svarových spojů se základním materiálem z uhlíkové oceli C45. Vzorky 1 a 2 byly svařeny tavným svařováním, zatímco vzorek 3 byl svařen frikčním rotačním svařováním. Na vzorcích byla měřena tvrdost dle norem ČSN EN ISO 9015-1 a ČSN EN ISO 9015-2. Na základě dosažených výsledků lze konstatovat:

1) Makroskopickou analýzou vzorků bylo pozorováno:
   - prasklinu vyskytující se mezi TOO a SK u vzorku 1,
   - v kořeni svaru vzorku 2 se vyskytuje staženina, která může ovlivnit výslednou kvalitu svaru,
   - vzorek 3 vykazuje absenci makroskopických vad ve svaru.
2) Mikroskopickou analýzou byly pozorovány oxidické vměstky a vměstky cizích kovů u všech vzorků. Jejich četnost a velikost však nejsou kritické pro kvalitu svaru. Dále bylo z mikroskopické analýzy svaru pozorováno:
   - k prasknutí svaru vzorku 1 došlo z důvodu výskytu křehkého martenzitu ve struktuře TOO,
   - vzorek 2 vykazoval perliticko feritickou strukturu bez mikroskopických vad,
   - vzorek 3 vykazoval perliticko feritickou strukturu bez jakýchkoliv jiných vad.
3) Měření tvrdosti jednotlivých oblastí svaru vykazovalo zvýšení tvrdosti v TOO ve svarech zhotovených tavným svařováním. Rovnoměrný nárůst tvrdosti byl naměřen v průběhu svaru vytvořeného RFW.
4) Svary 1 a 2 obsahovaly množství vad, které mohou negativně ovlivnit kvalitu svaru. Svar vzorku 3 neobsahoval vnitřní vady.

Seznam použité literatury

[1] KOLAŘÍK, L. *Technologie svařování*. 2015

[2] MESSLER, R.W. *Principles of Welding* [online]. 1999. ISBN 9783527617487. Dostupné z: doi:10.1002/9783527617487

[3] BENEŠ, L. *Svařování* [online]. 2016. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT__01__Prehled__svarovani__T08.pdf

[4] *ČSN EN ISO 6520-1 Svařování a Příbuzné procesy- klasifikace geometrických vad kovových materiálů - část 2: Tlakové svařování*. B.m.: Český normalizační institut. 2008

[5] *Global Rotary Friction Welding Market Research Report 2011-2023*. 2011.

[6] SCHMICKER, D, K NAUMENKO a J STRACKELJAN. A holistic Approach on the Simulation of Rotary-Friction-Welding. 2016, 27(Thaut 2014), 148–150.

[7] NUNN, M. E. *Aero engine improvements through linear friction welding* [online]. 2005. Dostupné z: https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/aero-engine-improvements-through-linear-friction-welding-august-2005/

[8] THOMAS, W M a E D NICHOLAS. Friction stir welding for the transportation industries. *Materials & Design* [online]. 1997, 18(4), 269–273. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0261-3069(97)00062-9

[9] PADMANABAN, G a V BALASUBRAMANIAN. Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy – An experimental approach. *Materials & Design* [online]. 2009, 30(7), 2647–2656. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.021

[10] SOBOTOVÁ, J., Z. JENÍKOVÁ, E. ČIŽMÁROVÁ a J. HORNÍK. *Nauka o materiálu I. a II. Cvičení*. Praha: Česká technika, 2016. ISBN 978-80-01-05550-2.

[11] KOLAŘÍK, L. *Svařování El. obloukem obalenou elektrodou*. 2015

[12] *Laserové svařování* [online]. 2018. Dostupné z: http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-svarovani/

[13] SKÁLOVÁ, J., V. MOTYČKA a J. KOUTSKÝ. *Nauka o materiálech*. 3. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7043-244-6.

[14] KOŘÁN, P. *Laserové svařování 1* [online]. 2013. Dostupné z: http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134

[15] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I.* 2., a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, nedatováno. ISBN 80-7204-283-1.

[16] HLUCHÝ, M. a J. KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. Ve Scientii 2., vyd., dot. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-7183-150-6.

[17] MIKEL, L. Strojírenství - Engineering. *Pružnost, pevnost* [online]. 2005. Dostupné z: http://www.strojirenstvi.wz.cz/image.php?subject=1&class=1&topic=8&image=0

[18] PODHORA, J. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno - SMS, 2005. ISBN 809033864x.

[19] KOPECKÝ, L. *Destruktivní metody kontroly svarových spojů* [online]. B.m., 2014. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www__base/zav__prace__soubor__verejne.php?file__id=84906

[20] *ČSN EN ISO 9017 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška rozlomením*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014

[21] *ČSN EN ISO 9016 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška rázem v ohybu – umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2013

[22] *ČSN EN ISO 9015 – 1 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním* [online]. B.m.: Český normalizační institut. 2011. Dostupné z: https://www.citacepro.com/citacePWLpyUJy3NKSTyOI.pdf

[23] *ČSN EN ISO 9015 – 2 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů* [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2011. Dostupné z: https://www.citacepro.com/citacePWLpyUJy3NKSTyOI.pdf

[24] *Hardness Testing and Specimen Preparation* [online]. 2016. Dostupné z: https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12727

[25] *ČSN EN ISO 17639 - Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014

Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení svařování [3] upraveno autorem 4
Obr. 2 Schéma frikčního svařování [4] 5
Obr. 3 Průběh rotačního svařování RFW [5] 6
Obr. 4 Schéma LFW [7] 7
Obr. 5 Schematický nákres FSW [8] 7
Obr. 6 Hloubka závaru a formování svarové housenky pro různě obalené elektrody; 8
Obr. 7 Svařování laserem, keyhole efekt [14] 9
Obr. 8 Kapilární zkouška [16] 10
Obr. 9 Zkouška prozářením [16] 11
Obr. 10 Mez kluzu tvrdých ocelí a smluvní mez kluzu [17] 12
Obr. 11 Vzorek pro příčnou zkoušku tahem[18] 13
Obr. 12 Vzorek pro podélnou zkoušku tahem [18] 13
Obr. 13 Metody zkoušky rozlomením; a) dynamický ráz; b) statický ohyb; c) tahové zatížení [20] 14
Obr. 14 Schéma zkoušky dle Vickerse [24] 16
Obr. 15 Rozmístění zkušebních vtisků [22] 17
Obr. 16 Pila LECO MSX 255 18
Obr. 17 LECO PR-4X 18
Obr. 18 Bruska/leštička LECO GPX 300 19
Obr. 19 Vzorek 1 makrostruktura 19
Obr. 20 Vzorek 2 makrostruktura 19
Obr. 21 Vzorek 3 makrostruktura 20
Obr. 22 Metalografický mikroskop NEOPHOT 32 21
Obr. 23 Mikrostruktura neleptaných vzorků 23
Obr. 24 Mikrostruktura vzorku 1 - leptáno 25
Obr. 25 Mikrostruktura vzorku 2 - leptáno 27
Obr. 26 Mikrostruktura vzorku 3 - leptáno 29
Obr. 27 Tvrdoměr LECO M-400-G1 30
Obr. 28 Vzorek 1 měření tvrdosti 30
Obr. 29 Vzorek 2 měření tvrdosti 30
Obr. 30 Vzorek 3 měření tvrdosti 30