



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**STUDIUM VLIVU PROCESNÍCH PARAMETRŮ NA
VLASTNOSTI HETEROGENNÍHO SVARU
MARTENZITICKÉ KOROZIVZDORNÉ OCELI S
UHLÍKOVOU OCELÍ PŘI LASEROVÉM SVAŘOVÁNÍ S
ROZMÍTÁNÍM SVAZKU**

STUDY OF THE INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON WELDING PROPERTIES OF FERRITIC
STAINLESS STEEL AND CARBON STEEL IN LASER OSCILLATION WELDING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martina Rýznarová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Bc. Martina Rýznarová**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Studium vlivu procesních parametrů na vlastnosti heterogenního svaru martenzitické korozivzdorné oceli s uhlíkovou ocelí při laserovém svařování s rozmítáním svazku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést analýzu vlivu paramaterů rozmítání (frekvence, amplituda) a parametrů svařovacích (výkon laseru, posuv) na tupý svar korozivzdorné martinzitické oceli s uhlíkovou ocelí. Vzniklé svary vyhodnotit z hlediska makro a mikrostruktury a z hlediska mechanických vlastností, svarových vad.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii laserového svařování včetně techniky s rozmítáním laserového svazku. Osvojit si problematiku svařování korozivzdorných martenzitických ocelí. Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu. Osvojit si základy metalografického vyhodnocování svaru. Osvojit si metody mechanických zkoušek svarového spoje.

Seznam doporučené literatury:

BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. Laserové technológie. 1. vyd. Bratislava: STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.

DULEY, Walter W. Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-47-24679-4.

KANNATEY-ASIBU, E. Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.

AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-857-7181-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

RÝZNAROVÁ Martina: Studium vlivu procesních parametrů na vlastnosti heterogenního svaru martenzitické korozivzdorné oceli s uhlíkovou ocelí při laserovém svařování s rozmítáním svazku.

V práci je zkoumán vliv tvaru geometrie rozmítací křivky a frekvence kmitání spotu na vlastnosti heterogenního svaru martenzitické korozivzdorné oceli X12Cr13 s uhlíkovou ocelí S355MC při laserovém svařování s rozmítáním svazku. U vzorků byla provedena makroskopická kontrola, která byla zaměřena na velikost svaru a tepelně ovlivněné oblasti, svarové vady, tvar svaru a převýšení/propad lící strany a kořene svarového spoje. Následnou mikroskopickou kontrolou byla určena jak struktura svarového kovu, tak tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu. Jako poslední byla vyhotovena zkouška mikrotvrdości dle Vickerse. Na základě experimentu bylo zjištěno, že významným procesním parametrem je frekvence spotu.

Klíčová slova: laser, laserové svařování, rozmítání svazku, ocel X12Cr13, ocel S355MC

ABSTRACT

RÝZNAROVÁ Martina: Study of the influence of process parameters on welding properties of martensitic stainless steel and carbon steel in laser oscillation welding.

In the thesis, the influence of the shape of the beam wobbling geometry and the spot vibration frequency on the properties of the heterogeneous weld of X12Cr13 martensitic stainless steel with carbon steel S355MC in laser oscillation welding is investigated. Macroscopic control was performed on the samples, which were focused on weld size and heat affected areas, weld defects, weld shape and cant / drop face and weld joint root. Subsequent microscopic inspection determined both the weld metal structure and the heat affected area and base material. The last was a Vickers microhardness test. Based on the experiment, it was found that the spot process frequency is an important process parameter.

Keywords: laser, laser welding, beam wobbling, X12Cr13 steel, S355MC steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RÝZNAROVÁ, Martina. *Studium vlivu procesních parametrů na vlastnosti heterogenního svaru martenzitické korozivzdorné oceli s uhlíkovou ocelí při laserovém svařování s rozmitáním svazku*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116794>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 24. 5. 2019

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, PhD. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce a Ing. Mgr. Haně Šebestové, Ph.D. za odborné konzultace a rady. Dále bych chtěla poděkovat pracovníkům Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky a Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně za pomoc při zkouškách a experimentech. A nakonec určitě mé rodině, přáteli a nejbližším, kteří mi byli oporou po celou dobu studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

| | Str. |
|--|------|
| ÚVOD | 9 |
| 1 ROZBOR ZADÁNÍ | 10 |
| 1.1 Varianty řešení | 11 |
| 2 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ | 14 |
| 2.1 Rozdělení laserů | 14 |
| 2.2 Princip laserového svařování | 19 |
| 2.3 Laserové svařování s rozmítáním svazku | 21 |
| 2.4 Svařitelnost materiálů | 24 |
| 2.5 Svarové vady | 27 |
| 2.6 Zkoušky svarového spoje a materiálů svarů | 29 |
| 3 EXPERIMENTY A JEJICH VYHODNOCENÍ | 33 |
| 3.1 Svařování laserem | 33 |
| 3.2 Metalografie | 36 |
| 3.3 Vyhodnocení makrostruktury | 38 |
| 3.4 Vyhodnocení mikrostruktury | 44 |
| 3.2 Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse | 52 |
| 4 ZÁVĚRY | 57 |
| Seznam použitých zdrojů | |
| Seznam použitých symbolů a zkratk | |
| Seznam obrázků | |
| Seznam tabulek | |
| Seznam příloh | |

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]

Parní turbíny jsou neodmyslitelnou součástí energetického průmyslu. V elektrárnách slouží k přeměně tepelné energie vodní páry na mechanickou práci, která je využívána pro pohon generátorů na výrobu elektrické energie. Další uplatnění mají v chemickém průmyslu, kde slouží jako pohon turbokompresorů, nebo se využívají pro chod čerpadel. První parní turbína byla sestrojena v roce 1883 a zasloužil se o to Carl Gustav de Laval. Dnes se výrobou parních turbín (obr. 1) zabývá například firma Škoda Doosan Power, EKOL, nebo odštěpný závod Industrial Turbomachinery firmy Siemens.

Pro odvětví energetiky jsou typické heterogenní spoje. Rozváděcí kola parních turbín se stacionárními lopatkami tvoří kvůli konstrukčním a technologickým důvodům dvojice materiálů, konkrétně korozivzdorná martenzitická ocel a uhlíková ocel. K jejich spojení výrobci parních turbín využívají metody TIG (obr. 1), ale svary nedosahují požadované kvality a z ekonomického hlediska je tento způsob výroby také nevýhodný. Testováno je svařování pomocí hybridní metody laser – TIG. Nicméně se vybízí prozkoumat další technologii a zjistit, zda by nebylo možné dosáhnout lepších výsledků.



Obr. 1 Parní turbíny a jejich výroba a využití v energetickém průmyslu [8], [9], [10], [11].

1 ROZBOR ZADÁNÍ [2], [7], [12], [13]

Mezi základní části parní turbíny patří skříň, v níž jsou vsazena rozváděcí kola se stacionárními lopatkami a rotor s oběžnými lopatkami. Rozváděcí kolo (obr. 2) slouží ke změně směru, expanzi a zvýšení kinetické energie proudu pracovní látky. Lopatky rozváděcího kola usměrňují proud páry na oběžné lopatky. Materiál na výrobu tohoto kola musí splňovat určité podmínky. Kvůli namáhání od tlaku proudící pracovní látky musí vyhovovat požadavku pevnosti v ohybu a krutu a musí být odolný vůči vysokým teplotám a únavě vzniklé od kmitání lopatek. Těmto podmínkám vyhovují žárovečné vysokochromové oceli. Výrobci parních turbín používají martenzitickou korozivzdornou ocel X12Cr13 a z důvodu snížení ceny výsledného produktu zařazují i uhlíkovou ocel S355MC. Jelikož konstrukce a technologie výroby součásti neumožňuje jiný způsob zhotovení, musí být rozváděcí kolo vyrobeno z dílů, které se poté spojí svařením. Heterogenní svary jsou tedy nevyhnutelnou záležitostí.



Obr. 2 Rozváděcí kolo [14].

Parní turbíny se konstruují dle požadavků zákazníka. Rozměry běžně vyráběných turbín a rozváděcích kol se mohou lišit, avšak stále nepřekračují určité limity. U menších turbín o výkonu přibližně 15 MW se tloušťka kola pohybuje v intervalu 30-50 mm a průměr dosahuje 750-800 mm. Délka svaru odpovídá přibližně obvodu kola, takže může nabývat i rozměru 2500 mm. Součást je nejprve svařena jako celek, poté je z konstrukčních důvodů rozdělena na poloviny a vsazena do skříně parní turbíny.

Ke spojení materiálů se využívá metoda TIG, která je zobrazena na obr. 3. Při svařování se do svaru vnese velké množství tepla, čímž dochází k deformaci materiálu, a proto se tloušťka svařovaného materiálu musí zvětšit o přídavky na obrobení, což činí přibližně 10 mm. Až po obráběcím procesu vykazuje součást požadované rozměry. Už z ekonomického hlediska je tento způsob výroby nevýhodný. Větší a podstatnější potíže však nastávají u kvality svaru. Pokud nedojde k dodržení svařovacích podmínek a postupů, svařovaný materiál se neprovaří, nedojde k dokonalému spojení ocelí a po obrobení svarový spoj zanikne. Při provozu parní turbíny dochází k vibracím, které se přenáší skrz součásti. Proto musí být svar kvalitně proveden a nesmí nést nepřijatelné vady, aby nedošlo k jeho destrukci a zničení celého dílce.



Obr. 3 Svařování rozváděcího kola pomocí technologie TIG [15].

Kromě větší spotřeby svarových materiálů, nutnosti použití přídavného materiálu pro doplnění objemu svarových kovů a obrobení součásti na hotovo patří mezi nevýhody metody TIG pro výrobu rozváděcích kol i nutnost aplikace předehřevu, dohřevu a tepelného zpracování, nezbytnost provést úpravu hran materiálu do úkosu „V“ a pomalá rychlost svařování, kdy se časový interval spojení materiálů pohybuje v řádech hodin u zmiňované výroby. Tato technologie nepatří mezi nejvhodnější ke svařování heterogenních materiálů části parní turbíny. Je nutné zjistit, zda neexistuje jiná varianta, díky které bude svarový spoj kvalitnější a po ekonomické stránce výhodnější.

1.1 Varianty řešení [7], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32]

V oblasti svařování dochází k neustálému vývoji, takže výčet metod používaných ke spojování materiálů je rozmanitý. Vzhledem ke složitosti součásti budou ale uvažovány pouze tavné technologie. Porovnávány budou výhody a nevýhody metod pro spojení ocelí X12Cr13 a S355MC s přihlédnutím na kvalitu a rychlost vzniku svarového spoje a s ohledem na náklady spojené s výrobou. Zmíněny budou jak běžně dostupné, konvenční metody, tak i nekonvenční a lze tedy uvažovat o těchto technologiích:

- MIG/MAG – se řadí mezi nejrozšířenější technologie svařování, které jsou ve své podstatě stejné, pouze se liší druhem plynu. Mezi jejich přednosti patří možnost automatizace, jednoduchá obsluha, rychlost svařování a vysoká produktivita. Při vhodném zvolení druhu inertního/aktivního plynu je možné vytvořit spoj zmíněných ocelí. Díky viditelnosti svarové lázně lze proces svařování kontrolovat. I přes své klady metoda MIG/MAG (obr. 4) není pro danou problematiku vhodná, protože u ní hrozí studené spoje vzniklé neprotavením materiálu a také neprovaření materiálu. Další nevýhodou je snížení pevnosti v tepelně ovlivněné oblasti a větší deformace základního materiálu, které by opět vedly k zařazení obrábění s velkým úběrem materiálu do výrobního procesu i přesto, že by byl aplikován předehřev a dohřev.
- Ruční obloukové svařování obalovanou elektrodou – patří k nejstarším technologiím, ale i tak si stále udržuje svou pozici v oblasti spojování materiálů, protože je investičně nenáročné, dostupnost svařovacích zdrojů a přídatných materiálů je snadná a jedná se o jednoduchou metodu. Kvalita a rychlost provedení svaru je ovlivněna zručností svářeče, z čehož vyplývá, stejně tak jako z názvu, že tato metoda není automatizována. Malá produktivita je navíc způsobena častou výměnou elektrod a odstraňováním strusky. Do svarového spoje je vneseno velké množství tepla, navíc je zde velké riziko vnesení vodíku a následný vznik studených trhlin, což je způsobené zvlhnutím elektrodových obalů, proto i ROS (obr. 5) není uvažována jako možnost pro zlepšení výrobního procesu rozváděcího kola.
- Plazma – dosahuje oproti výše zmíněným technologiím výhodnějšího poměru šířky k hloubce svaru, který je zajištěn efektem klíčové dírky neboli keyhole (z anglického názvu) a větší rychlosti svařování. Proces spojování materiálů pomocí plazmatu je na obr. 6. Svarový spoj je kvalitnější, bez pórů a bublin a zbaven nečistot. Tepelně ovlivněná oblast a deformace se



Obr. 4 Svařování metodou MIG/MAG [33].



Obr. 5 Ruční obloukové svařování obalovanou elektrodou [19].



Obr. 6 Svařování plazmou [34].

zmenšily v porovnání s hodnotami u MIG/MAG, či ručního obloukového svařování, nicméně stále velká svarová lázeň a s ní spojené deformace ztěžují užití tohoto procesu ke svaření martenzitické korozivzdorné a uhlíkové oceli.

- Elektronový svazek – se vyznačuje schopností spojit materiály pomocí vysoce štíhlého svaru, který má poměr hloubky k šířce až 50. S tím souvisí i úzká tepelně ovlivněná oblast spoje a minimální deformace. Tato technologie vyhovuje jak z hlediska kvality a čistoty svaru, tak z hlediska rychlosti svařování. Jednou z nevýhod je však nutnost vakua. Velká prodleva potřebná pro vyčerpání a zpětné zavzdušnění komory přidává metodě na časové náročnosti. Rozměry svařence jsou limitovány velikostí komory (obr. 7) a s tím je spojená i obtížnost manipulace se svařovanými materiály ve vakuu. Náklady spjaté s pořízením přístroje zapříčiňují, že svařování pomocí elektronového svazku je pro mnohé firmy nedostupné.



Obr. 7 Vakuová komora pro svařování elektronovým paprskem [35].

- Laser – stejně jako plazma a elektronový svazek využívá ke vzniku štíhlého, hlubokého spoje keyhole (obr. 8). Vnáší do svaru malé množství tepla, a tak nedochází k velkým deformacím. Spojení materiálů je kvalitní a rychlé s minimálními nároky na další opracování a nevyžaduje přídavný materiál. Tento způsob svařování je vysoce produktivní, a navíc lze zařízení zařadit do automatizovaného provozu. Pořizovací cena laserového přístroje je vysoká, avšak oproti zařízení pro svařování elektronovým svazkem je přijatelnější. Mezi další nevýhody patří složitější přípravkování, kdy je nutné omezit mezeru mezi



Obr. 8 Provaření materiálu laserovým paprskem režimem keyhole [36].

spojovanými díly na minimum a polohovat je tak, aby laserový paprsek byl vůči ose svaru v určitém rozmezí a neprovařil materiál v nežádoucím místě. Průmyslové lasery se řadí do IV. bezpečnostní třídy, tudíž jsou škodlivé pro lidský organismus, ať už přímým, či rozptýleným zářením. Je nutné provést ochranná a technická opatření jako například krytování, aby se záření stalo neškodným.

Z výše zmíněných metod lze tedy uvažovat pouze nekonvenční metody svařování, a to konkrétně svařování pomocí elektronového a laserového paprsku. Z hlediska kvality, čistoty a hloubky svaru, velikosti tepelně ovlivněné oblasti a účinnosti je vhodnější metodou svařování pomocí elektronového svazku. Při zohlednění výše pořizovací ceny, provozních nákladů,

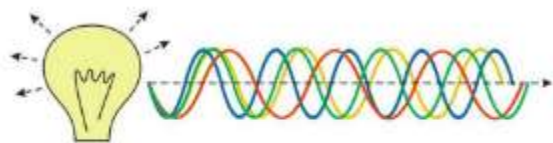
produktivity a složitosti manipulace s materiálem se do popředí dostává technologie laserového svařování. Jelikož se svar vytvořený pomocí laserového svazku výrazně neliší svou kvalitou, čistotou a hloubkou oproti elektronovému a velikost tepelně ovlivněné oblasti je přibližně souhlasná, tak z důvodu rychlosti svařování, snazší manipulace s materiálem, vyšší efektivity a nižších nákladů spojených s investicí a provozem přístroje bude zvolena metoda svařování pomocí laserového paprsku.

Díky koncentraci energie na velmi malou plochu a malému množství vneseného tepla do svaru nedojde k výrazným rozměrovým a úhlovým deformacím, takže u svařovaného materiálu nebudou nutné velké přídavky na obrobení do výsledného tvaru. Využita bude i jedna z novějších technologií, která se nazývá svařování rozmítáním svazku neboli tzv. wobbling, u které dochází k promísení svarové lázně a lepší difuzi materiálů.

Porovnávají budou svarové spoje provedené pomocí laseru i s aplikací wobblingu, u kterého budou měněny procesní parametry a bude vyhodnocen jejich dopad na kvalitu svaru.

2 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ [31], [37], [39]

Cílem technologie laserového svařování je vytvořit svarovou lázeň absorpcí dopadajícího záření, roztavit hranice svařovaných materiálů a umožnit tak vznik svarovému spoji, který je

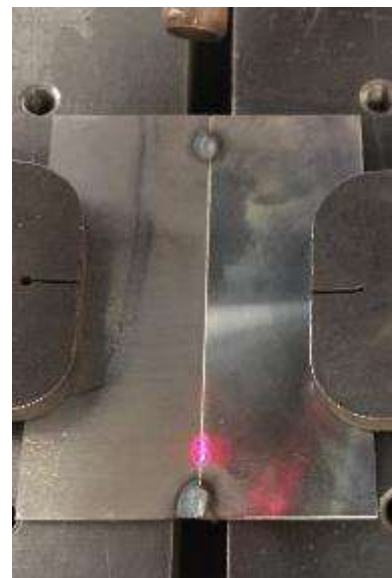


Obr. 9 Rozdíl mezi bílým světlem ze žárovky a laserovým zářením [38].

po ztuhnutí lázně nerozebíratelný a neobsahuje spojovací prvky. K tomu je zapotřebí laserový paprsek, což je optické vlnění spadající do skupiny elektromagnetického záření. Jedná se o monochromatické, málo divergentní záření o vysoké spektrální hustotě, které díky své koherentnosti je možné zaostřit pomocí optického systému na velmi malou plochu. Rozdíl oproti bílému světlu ze žárovky, nebo slunečního záření je zobrazen na obr. 9. Poloha ohniska určuje stopu dopadajícího paprsku a hustotu působící energie na

materiál. V závislosti na materiálu a parametrech svařování se může poloha ohniska nacházet pod, na, nebo nad povrchem materiálu. Při nastavení optimální polohy ohniska je možné dosáhnout maximální hloubky průniku paprsku. Laser je bezkontaktní nástroj, tudíž se neopotřebovává a nevyžaduje výměnu při změně technologie. Jeho provoz je tichý a je možné ho robotizovat a automatizovat. Tato metoda má podle normy ČSN EN ISO 4063 číselné označení 521 a 522 v závislosti na tom, o jaký typ laseru se jedná. Číslo 521 je přiřazeno pevnolátkovému laseru, 522 odpovídá plynovému laseru.

Laserový svazek umožňuje svařovat bez přídavného materiálu. Má však zvýšené nároky na přípravkování (obr. 10), tudíž například u tupého svaru musí mezera mezi spojovanými materiály činit maximálně 0,1 mm a odchylka od dráhy svaru se musí nacházet v rozmezí $\pm 0,05$ mm. Kromě tupého svaru je jeho schopnost vytvořit hluboký tzv. průvarový spoj uplatněna u přeplátovaných spojů, T-spojů, lemových nebo koutových spojů. Na čistotu svarových ploch nejsou u běžných materiálů kladeny výjimečné požadavky. Oxidů a nečistot jsou zbavovány pouze speciálními materiály, nebo kvalitativně náročné spoje.



Obr. 10 Přípravkování.

2.1 Rozdělení laserů [16], [27], [31], [32], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55]

Od roku 1960, kdy fyzik Theodore H. Maiman zkonstruoval první laser, jehož součástí byl válec ze syntetického rubínového krystalu, došlo k velkému vývoji v oblasti laserů. Díky dalším výzkumům a pracím byly sestrojeny nové typy laserů a postupně u nich byly zvyšovány výkony, a naopak zkracovány vlnové délky. Svě uplatnění našly laserová zařízení v různých odvětvích. Jedním z nich bylo i strojírenství, kde se využívá dodnes, například ke spojování, či naopak dělení materiálů, pájení, gravírování, nebo vrtání.

Existují různé druhy laserů a lze je dělit dle následujících kritérií, která jsou i uvedena v tab. 1: druhu aktivního prostředí, typu čerpání (buzení), režimu provozu, nebo vlnových délek optického zařízení.

Tab.1 Rozdělení laserů [32], [41].

| Rozdělení podle: | | | |
|---|---|---|---|
| druhu aktivního prostředí | typu čerpání | režimu provozu | vlnových délek optického zařízení |
| <ul style="list-style-type: none"> • kapalinové • plynové • pevnolátkové | <ul style="list-style-type: none"> • elektrický výboj • chemická reakce • optické čerpání • elektronový svazek • tepelné změny | <ul style="list-style-type: none"> • pulzní • kontinuální • impulzní | <ul style="list-style-type: none"> • infračervené • viditelné pásmo • ultrafialové • rentgenové |

Významným kritériem u rozdělení laserů je druh aktivního prostředí. Z laserů s kapalinovým aktivním prostředím jsou důležitou skupinou lasery barvivové, které mají své využití ve spektroskopii, protože umožňují plynule měnit vlnovou délku záření od 300 nm do 1500 nm. Jejich aktivní prostředí je tvořeno roztoky organických látek, bohužel ale podléhá chemickému rozkladu a vykazuje krátkou živostnost vlivem vneseného tepla a světla. Ve strojírenství se téměř tento typ laserů neuplatňuje, tudíž nebude detailněji přiblížen. Podrobněji budou rozebrány plynové, a především pevnolátkové lasery.

- K jednomu z nejstarších používaných plynových laserů patří infračervený CO₂ laser (obr.11), jehož aktivní prostředí je tvořeno kromě CO₂ také dusíkem a heliem. Laser je buzen elektrickým výbojem a umožňuje jak kontinuální, tak pulzní provoz. Jeho vlnová délka je 10,6 μm a výkon dosahuje až 20 kW. Účinnost tohoto přístroje spadá do rozmezí 5-10 % z důvodu tepelných ztrát. Kvalita laserového paprsku je charakterizována hodnotou BPP, která vyjadřuje fokusaci laseru do ohniska a uvádí se v jednotkách mm·mrad. Čím vyšší je tato hodnota, tím nižší je kvalita paprsku a nastavení optiky musí být přesnější. V případě CO₂



Obr. 11 CO₂ laser [56].

laseru dosahuje BPP vysoké hodnoty. Pořizovací cena přístroje je částečně ovlivněna vysokými náklady na reflexní a refrakční optiku, protože k výrobě reflexních zrcadel je využíváno zlato s křemíkem, nebo měď a refrakční prvky jsou vyrobeny ze zirkon selenidu, germania a arsenidu gallitého. I přesto se ale CO₂ laser řadí k investičně nejdostupnějším. Na výši provozních nákladů má značný vliv vysoká spotřeba plynů, především helia, které v laseru plní funkci difúzního chlazení a zabraňuje tak přehřátí reflexních a refrakčních zrcadel. Nákladnost tohoto plynu je zapříčiněna jeho vzácností. Ke snížení spotřeby helia bylo vyvinuto chlazení pomocí dvou vodou chlazených elektrod, které zároveň slouží k vysokofrekvenčnímu buzení. Tento typ laseru s elektrodami se nazývá CO₂ SLAB laser a mezi jeho výhody patří malé rozměry,

kvalitnější výstupní paprsek a jednoduchost. Nese ale i určité nevýhody, kde jednou z nich je nižší výkon.

- Do kategorie pevnolátkových laserů patří laserová zařízení s aktivním prostředím vyskytující se v pevném stavu. Typické je pro tento druh laserů aktivní prostředí tvořené buď krystalem, nebo sklem a je dopováno ionty vzácných zemin, nebo přechodných kovů. Existují však lasery, jejichž aktivní prostředí je odlišné. Polovodičové lasery se kvůli polovodičovým diodám často řadí do jiné, vlastní skupiny nazývané shodně – polovodičové lasery (viz [41] a [43]) namísto pevnolátkových [44], i když se stále jedná o aktivní prostředí nacházející se v pevném stavu.

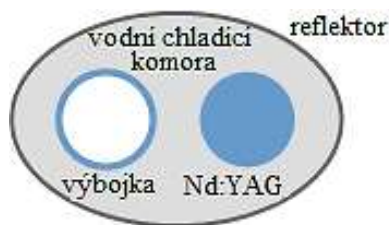
Nejvíce jsou používány 4 druhy laserů, z nichž 3 typy mají shodné aktivní prostředí, které je nejčastěji tvořeno umělým krystalem yttria hlinitého granátu (YAG) a je dopováno ionty neodymu (Nd), nebo yterbia (Yb), ale liší se svou geometrií. Mezi tvary, jež může nabývat, patří tyč, disk, nebo vlákno. Monokrystal Nd:YAG, ale i Yb:YAG má oproti jiným látkám dostatečnou mechanickou pevnost, malé optické ztráty a je tepelně stálý.

- Polovodičový laser, jehož aktivní prostředí je tvořeno z vrstvených polovodičových diod čerpaných elektrickým proudem, se vyznačuje vysokou účinností přeměny energie elektrické na světelnou, a to až 60 %. Polovodičové diody jsou vyrobeny z materiálu GaAs a vrství se na sebe obvykle ve vertikálním směru do tzv. stacku (obr. 12), což v překladu znamená stoh. K získání výsledného paprsku, který má tvar čárky, je nutné aplikovat usměrňovače. Laser pracuje kontinuálním režimem s nastavitelnou vlnovou délkou od 808 μm do 980 μm a běžně dosahuje výkonu 10 kW. Jedná se o investičně nenáročné zařízení s nízkými provozními náklady, avšak podstatnou nevýhodou je výstupní svazek o nízké kvalitě (vysokém BPP). Pro dosažení laserového paprsku vysoké kvality musí být polovodičové laserové diody co nejbliže u sebe. Tomu je však bráněno z důvodu zajištění vodního chlazení. Mezi diodami je potřeba minimální tloušťka pro vložení chladičů.



Obr. 12 Vrstvené polovodičové diody – tzv. stack [46].

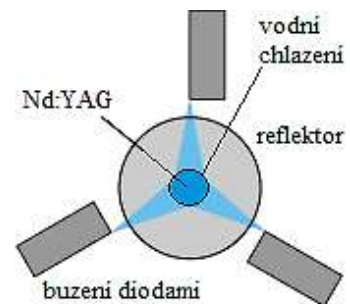
- Nd:YAG laser s tyčovou geometrií aktivního prostředí patří k nejstarším typům pevnolátkových laserů aplikovaných v průmyslu. Může být buzený buď výbojkou, nebo laserovými diodami. Optické čerpání výbojkami (obr. 13) se používá u svařování pulzním režimem, protože v této kombinaci lze provést hluboký svar s malou teplotně ovlivněnou oblastí díky vysoké energii v pulzu.



Obr. 13 Nd:YAG tyč buzená výbojkou [47].

K nevýhodě metody se řadí nízká účinnost, jelikož velká část energie se přemění na teplo. S tím jsou spojené i vysoké nároky na chlazení, které je ovšem složitější, protože vnější povrch Nd:YAG tyče nemůže být celý obklopen samostatným vodním chlazením (jako je tomu laserů s diodami, viz obr. 14), ale musí být uložen v chladičí komoře spolu s výbojkou. Dále jsou nepříznivé vysoké

vysoké teplotně ovlivněnou oblastí díky vysoké energii v pulzu.

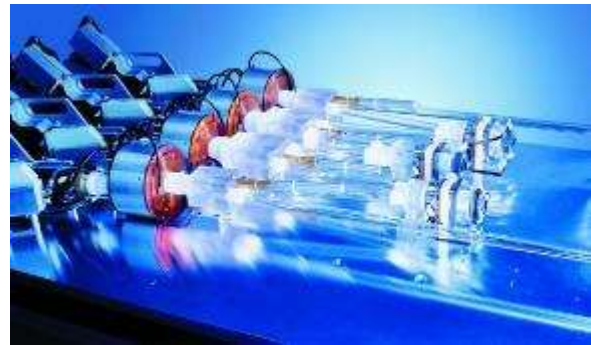


Obr. 14 Nd:YAG tyč buzená diodami [47].

provozní náklady a životnost výbojek, která je limitována přibližně 1000 h. Lasery s diodami sice vykazují vyšší účinnost a lepší kvalitu paprsku a jsou charakteristické velmi krátkými pulzy, ale jejich uplatnění klesá a jsou nahrazovány lasery vláknovými. V průmyslu se využívají ke gravírování a značení materiálů, v oblasti svařování nenachází upotřebení, proto nebudou více rozebírány. Tyčový Nd:YAG laser pracuje o vlnové délce 1,064 μm kontinuálním nebo pulzním režimem při běžném výkonu do 6 kW a jeho účinnost činí pouhá 2-3 %. Tyč nabývá délky 15-20 cm a průměr je v řádech milimetrů.

- c) Diskový laser (obr. 15) s aktivním prostředím Nd, nebo Yb:YAG ve tvaru tenkého disku nejčastěji o rozměrech 10 mm v průměru a tloušťce 0,25 mm má

vysoký výkon (16 kW) díky rovnému teplotnímu profilu po celé ploše disku. Účinné chlazení vodou, nebo vzduchem zajišťuje kvalitní ustálený výstupní svazek, stabilnější mód a možnost dlouhodobého zatěžování při vysokém výkonu, kde kvalita výstupního paprsku není degradována. Nd:YAG diskový laser má pracovní vlnovou délku 1,07 μm , je buzen laserovými diodami a využívá kontinuálního, nebo pulzního režimu. Jeho účinnost činí 32 % a z hlediska konstrukce je kompaktní.



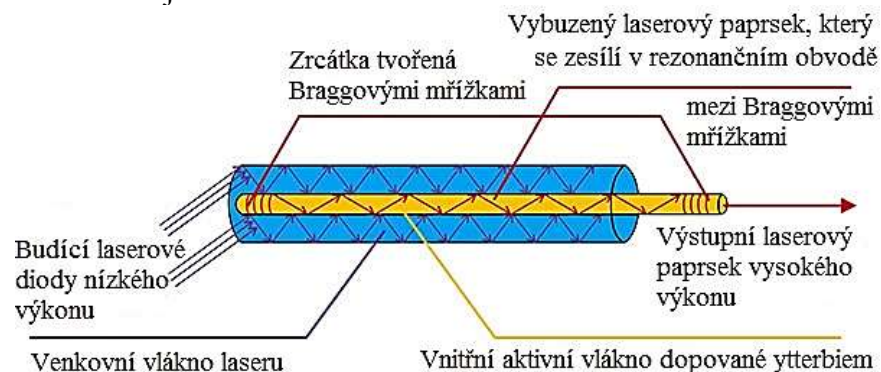
Obr. 15 Laser o výkonu 8 kW sestavený ze čtyř tenkých diskových laserových hlav [57].

- d) V laserové technologii je nejmodernějším a nejperspektivnějším typem pevnolátkového laseru vláknový (obr.16). Aktivní prostředí je tvořeno několika

metrů dlouhým optickým vláknem o průměru 50-300 μm dopovaným atomy prvků vzácných zemin ze skupiny lanthanoidů, z nichž se využívá erbium, ytterbium, neodým nebo praseodym. V tomto vnitřním optickém vlákně obklopeném tlustým vláknem je pomocí laserových diod o nízkém výkonu, generován a opticky zesilován laserový paprsek. Schéma optického vlákna je zobrazeno na obr. 17.



Obr. 16 Vláknový laser [58].



Obr. 17 Schéma optického vlákna [59].

Na rozdíl od jiných typů laserů, zde nejsou umístěna rovnoběžná zrcadla, která by měla ztráty způsobené přeměnou energie na teplo a mechanická poškození, ale Braggovské mřížky vzniklé změnou struktury („zářezy“) na optickém vlákne. Jelikož účinnost laseru činí 50 %, není nutná přítomnost aktivního chlazení, ale postačí odvádění tepla plochou optického vlákna po celé jeho délce pomocí vzduchu. Vlnová délka Yb:YAG paprsku má 1,07 μm a životnost vláknového laseru závisí hlavně na životnosti diod, která dosahuje 150 000 h. Spojováním optických modulů v modulárním uspořádání lze získat výkon až 100 kW. Vysoká kvalita a stabilita paprsku umožňuje jeho fokusaci do velmi malého bodu. Vláknový laser je jednoduchý, kompaktní, spolehlivý, nevyžaduje téměř žádnou údržbu a ze všech typů průmyslových laserů vykazuje nejnižší provozní náklady.

V tab. 2 jsou shrnuty výhody a nevýhody zmíněných typů laserů a lze vidět, že k perspektivním laserům se řadí diskový, a především vláknový, který je nejnovějším pevnolátkovým laserovým zařízením.

Tab. 2 Výhody a nevýhody laserů [27], [41], [48], [52], [53], [54].

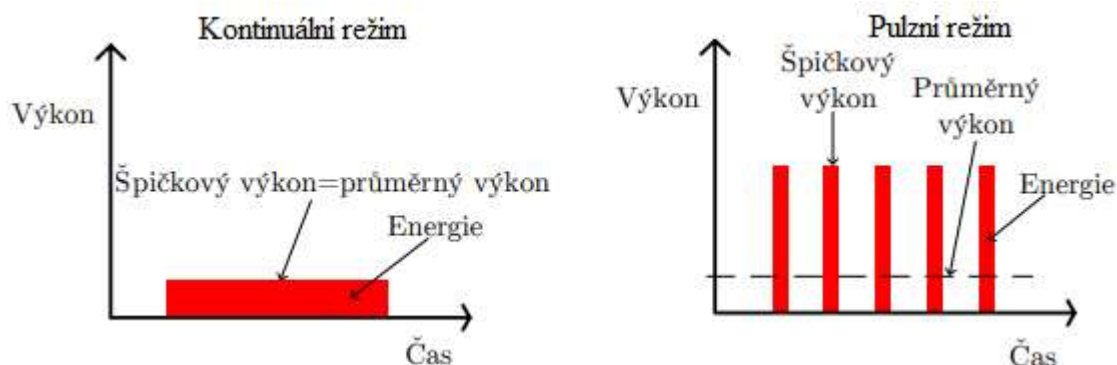
| Druh laseru | Výhody | Nevýhody |
|-------------------------|---|---|
| CO ₂ | nižší pořizovací náklady, vysoký výkon 20 kW, spolehlivost | účinnost 5-10 %, nízká kvalita paprsku (vysoký parametr BPP), vysoká spotřeba plynů, speciální optika, nutná údržba |
| Polovodičový | nižší pořizovací náklady, účinnost 60 %, nízké provozní náklady, bez nutnosti údržby, životnost 15 000 h | nízká kvalita paprsku (vysoký parametr BPP), usměrňovací optika |
| Nd:YAG tyčový | nižší pořizovací náklady, vysoká energie v pulzním režimu | životnost výbojek 1000 h, nutná údržba, účinnost 2-3 %, nízká kvalita modu (vysoké BPP), vysoké provozní náklady, intenzivní chlazení |
| Nd:YAG, Yb:YAG diskový | kvalitní stabilní paprsek, vysoký výkon 16 kW, účinné chlazení, dlouhodobé zatížení při vysokém výkonu, účinnost 32 % | nutná údržba, nízká životnost 10 000 h, vysoké pořizovací náklady |
| Nd:YAG, Yb:YAG vláknový | nízké provozní náklady, kvalitní stabilní paprsek (nízký parametr BPP), účinnost 50 %, bez nutnosti chlazení, životnost diod 100 000 h, bez nutnosti údržby, výkon až 100 kW, jednoduchá konstrukce | vysoké pořizovací náklady |

Lasery pracují nejčastěji ve dvou režimech a těmi jsou kontinuální, značený zkratkou cw (z anglického výrazu continual wave), a pulzní. Při kontinuálním svařování je stabilizovaný laserový svazek o neměnné intenzitě vyzařován nepřetržitě. Naopak u pulzního režimu jsou vysílány krátké pulzy, které trvají od desítek nanosekund po desítky pikosekund s opakovací frekvencí a dosahují velké hustoty energie. Tyto dva režimy (obr. 18) jsou rozdílné zejména v hodnotách výkonů. U kontinuálního provozu dosahuje výkon hodnot řádově ve wattech, kdežto u pulzního režimu okamžitý neboli špičkový výkon pulzů je měřený v megawattech (obr. 19).



Obr. 18 Průběhy režimů [55].

Rozdíl je možné najít i v parametrech režimů, kde kontinuální je popsán výkonem laseru, rychlostí svařování a parametry zaostřovacího systému a pulzní chod má více parametrů, které se týkají především pulzů. Existují lasery s impulzním režimem, které jsou velmi podobné pulsním, akorát krátké pulsy o vysokém výkonu nejsou vyzařovány s určitou frekvencí. Pokud by měly být režimy k něčemu přirovnány, pak kontinuální režim je jako žárovka. Jako příklad pulsního režimu lze uvést srdeční tep a impulsní je možné přirovnat k blesku fotoaparátu.



Obr. 19 Výkon laserového paprsku při kontinuálním a pulzním režimu [55].

2.2 Princip laserového svařování [7], [16], [27], [39], [53], [54], [60], [61], [62], [64], [65], [66]

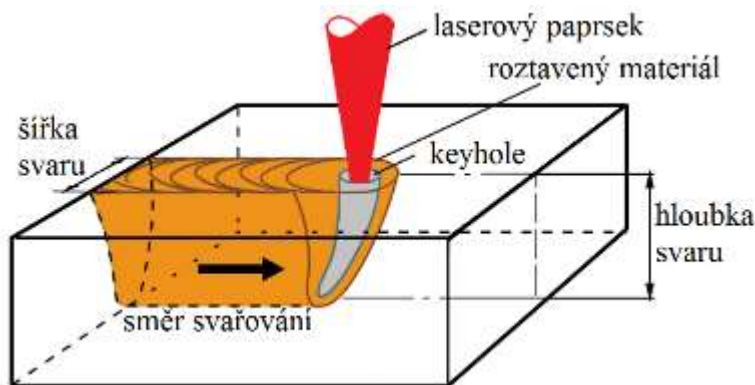
Ke vzniku svarového spoje pomocí laseru je nezbytné, aby proběhla interakce záření s materiálem. Kvantum energie v podobě fotonů dopadá na povrch materiálu a pouze část je absorbována, čímž dojde ke zvýšení frekvence vibrací mřížky a tím i k nárůstu teploty materiálu až na teplotu tavení. Zbytek energie se z velké části, v případě neprůhledných kovů všechna, odrazí od povrchu materiálu a jen velmi malé množství materiálem projde. Míra absorpce záření je závislá na vlnové délce, teplotě a povrchu materiálu, kde má vliv drsnost, geometrie a nátěr povrchu. Mezi další parametry ovlivňující laserové svařování, konkrétně hloubku průniku absorbovaného záření do povrchové vrstvy materiálu, patří výkon zdroje, vodivost materiálu a frekvence záření. Z tab. 3 lze vyčíst, že s rostoucí vlnovou délkou klesá schopnost pohlcení záření (koeficient odrazivosti se zvyšuje). Z tohoto důvodu má vláknový laser oproti CO₂ laseru větší možnost uplatnění. Ke zlepšení podmínek absorpce je možné materiál přehřát, protože se zvyšující se teplotou klesá součinitel odrazivosti, zdrsnit jeho povrch, nebo povrch pokrýt absorpčním nátěrem, či práškem s vyšším koeficientem absorpce.

Tab. 3 Koeficienty odrazivosti při pokojové teplotě [16].

| Materiál | Vlnová délka záření λ [μm] | | |
|----------|---|---------------------------------------|---|
| | 0,7 | 1,06 ($\sim \lambda$ vláknový laser) | 10,6 ($= \lambda_{\text{CO}_2}$ laser) |
| Hliník | 0,87 | 0,93 | 0,97 |
| Chrom | 0,56 | 0,58 | 0,93 |
| Měď | 0,82 | 0,91 | 0,98 |
| Nikl | 0,68 | 0,75 | 0,95 |
| Stříbro | 0,95 | 0,97 | 0,99 |
| Ocel | 0,58 | 0,63 | 0,93 |

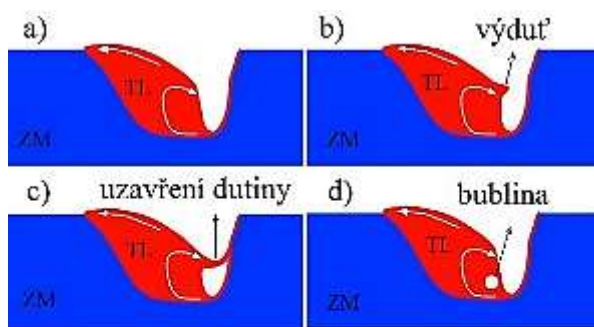
V závislosti na hustotě vnesené plošné energie do materiálu se rozlišují dva režimy svařování – kondukční a penetrační. Kondukční režim se využívá při vysokorychlostním svařování tenkých plechů a fólií, nebo k tepelnému zpracování, protože vytváří širokou, ale přitom mělkou svarovou lázeň s velkou tepelně ovlivněnou oblastí po ztuhnutí. K docílení takového typu lázně je nutné vnášet do materiálu menší množství tepla, čemuž odpovídá hustota plošného výkonu řádově o $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, aby stačilo být materiálem odváděno a neodpařovalo materiál za vzniku plynů, které by podpořily hloubku průvaru.

Název penetrační režim vzniknul na základě penetrace neboli průniku laserového paprsku do hloubky materiálu. Hluboký průvar je možné realizovat navýšením hustoty plošného výkonu na $10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, kdy dojde k překročení kritické hodnoty energie, takže dodané množství tepla není dostatečně rychle odváděno materiálem a v důsledku toho je materiál taven a odpařován za vzniku plynů. V materiálu se formuje kapilára tzv. keyhole vlivem úniku plynů a také vlivem plazmy generované interakcí paprsku s výpary a je obklopená roztaveným materiálem. Růst kapiláry se zastaví až po poklesu hustoty energie pod kritickou hodnotu kvůli divergenci paprsku a jeho absorpci stěnami. Díky vzniku keyhole dochází k přenosu energie do objemu materiálu a k hlubokému provaření. Při pohybu laserového paprsku se kuželovitý tvar paroplynového kanálu specificky zakřivuje, jak je tomu na obr. 20. Tavenina po průchodu paprsku uzavírá dutinu a velice rychle krystalizuje. Dochází ke vzniku svaru. Pokud nejsou dodrženy podmínky svařování a nastaveny vhodné parametry, může se kapilára uzavřít a způsobit tak poréznost svarového spoje. Průběh vzniku bubliny je na obr. 21. Jednou z příčin uzavření dutiny je její nestabilita kvůli malému poloměru keyhole. Stabilita stacionární kapiláry je zajištěna, jestliže vypařovací a radiální tlak, který drží dutinu otevřenou, je v rovnováze s hydrodynamickým a hydrostatickým tlakem a povrchovým napětím, jejichž působení ji naopak uzavírá. U malého poloměru keyhole převládá hodnota povrchového napětí nad hodnotou vypařovacího tlaku, proto je dutina nestabilní. Dalším parametrem ovlivňující pórovitost svaru je rychlost svařování. Při spojování materiálů nízkou svařovací rychlostí se vytváří z důvodu natavení velkého množství materiálu vysoký počet bublin. Po ztuhnutí svarové lázně se z bublin, které neproudí se svarovou lázní dostatečně rychle a nestihnou uniknout, stávají póry. S rostoucí rychlostí svařování klesá množství taveniny, tvorba a velikost bublin. Nestabilní je pouze spodní část dutiny, a tak je uzavírána menší oblast a vznikají bubliny menších rozměrů, které lépe unikají z taveniny. Pórovitost se vyskytuje ve spodní části svaru. Ideálního svaru s téměř nulovým výskytem pórů lze dosáhnout při vysokých rychlostech svařování. Zde je ale nevýhodou menší hloubka



Obr. 20 Tvarování keyhole při svařování [64].

Díky vzniku keyhole dochází k přenosu energie do objemu materiálu a k hlubokému provaření. Při pohybu laserového paprsku se kuželovitý tvar paroplynového kanálu specificky zakřivuje, jak je tomu na obr. 20. Tavenina po průchodu paprsku uzavírá dutinu a velice rychle krystalizuje. Dochází ke vzniku svaru. Pokud nejsou dodrženy podmínky svařování a nastaveny vhodné parametry, může se kapilára uzavřít a způsobit tak poréznost svarového spoje. Průběh vzniku bubliny je na obr. 21. Jednou z příčin uzavření dutiny je její nestabilita kvůli malému poloměru keyhole. Stabilita stacionární kapiláry je zajištěna, jestliže vypařovací a radiální tlak, který drží dutinu otevřenou, je v rovnováze s hydrodynamickým a hydrostatickým tlakem a povrchovým napětím, jejichž působení ji naopak uzavírá. U malého poloměru keyhole převládá hodnota povrchového napětí nad hodnotou vypařovacího tlaku, proto je dutina nestabilní. Dalším parametrem ovlivňující pórovitost svaru je rychlost svařování. Při spojování materiálů nízkou svařovací rychlostí se vytváří z důvodu natavení velkého množství materiálu vysoký počet bublin. Po ztuhnutí svarové lázně se z bublin, které neproudí se svarovou lázní dostatečně rychle a nestihnou uniknout, stávají póry. S rostoucí rychlostí svařování klesá množství taveniny, tvorba a velikost bublin. Nestabilní je pouze spodní část dutiny, a tak je uzavírána menší oblast a vznikají bubliny menších rozměrů, které lépe unikají z taveniny. Pórovitost se vyskytuje ve spodní části svaru. Ideálního svaru s téměř nulovým výskytem pórů lze dosáhnout při vysokých rychlostech svařování. Zde je ale nevýhodou menší hloubka



ZM - základní materiál, TL - tavná lázeň
a) Roztavený materiál proudí směrem od horní oblasti zadní stěny keyhole k přední stěně,
b) tvorba výdutě na zadní stěně keyhole,
c) uzavření kapiláry vlivem její nestability,
d) vznik a únik bubliny bez porušení laserovým paprskem.

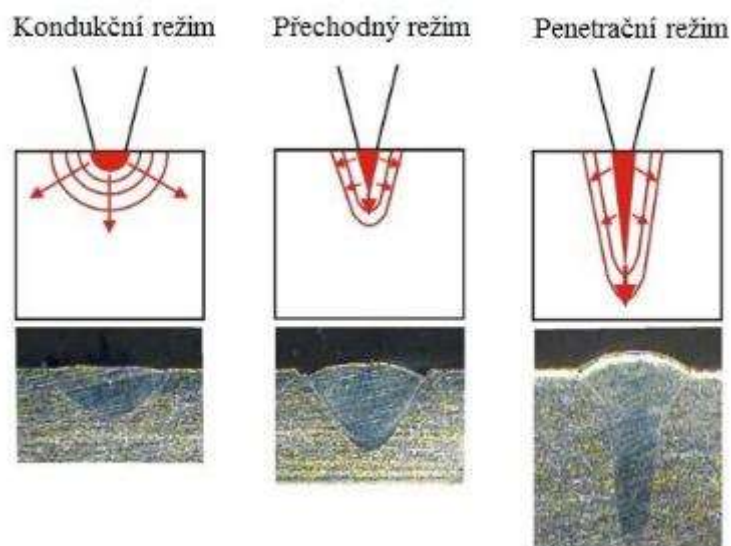
Obr. 21 Průběh vzniku bubliny [67].

Nestabilní je pouze spodní část dutiny, a tak je uzavírána menší oblast a vznikají bubliny menších rozměrů, které lépe unikají z taveniny. Pórovitost se vyskytuje ve spodní části svaru. Ideálního svaru s téměř nulovým výskytem pórů lze dosáhnout při vysokých rychlostech svařování. Zde je ale nevýhodou menší hloubka

provaření materiálů. Rychlost proudění bublin je závislá na viskozitě svarové lázně. S rostoucí viskozitou klesá rychlost pohybu bublin ve svarové lázni, tudíž nestačí z objemu přesunout na povrch. Jedním z činitelů zpomalujících posun plynových útvarů hustou taveninou je prvek chrom, který se hojně vyskytuje například v korozivzdorných ocelích.

V průběhu procesu svařování vzniká u penetračního režimu na rozdíl od indukčního plazmový obláček nad taveninou, který při vyšších hodnotách hustoty zhoršuje přenos energie, proto se pro zlepšení dopadu záření používají ochranné plyny k jeho zředění. Kromě snižování nežádoucího vlivu oblaku plazmatu v ose paprsku systém s ochranným plynem zabezpečuje ochranu před přístupem vzduchu, oxidací svaru, vznikem vnitřních vad, jako například póry, nebo plynové bubliny a odstraňuje z osy paprsku vyletující taveninu. Jako ochranný plyn se nejčastěji používá helium a argon, případně dusík. Při vnášení helia, které má vysoký ionizační potenciál, se minimalizuje tvorba plazmatu a rozostření paprsku. Zároveň ale díky vysoké tepelné vodivosti a difuzivitě nastává velký odvod tepla, což velmi často vyvolá nestabilitu a úzkost keyhole a s tím spojené neprovaření kořene svaru. K zajištění dostatečné plynové ochrany je nutný velký průtok plynu, protože helium kvůli své nízké měrné hmotnosti stoupá vzhůru směrem od svařovaného materiálu. Zvýšení průtoku ($30\text{--}35\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$) ovšem může vést k odfoukávání svarové lázně.

Helium se využívá především při svařování vyššími výkony. Vhodné je hlavně ke spojování hliníku. Ochranný plyn v podobě argonu je preferován u svařování s nižší vnesenou hustotou energie. Při nastavení vyšších výkonů u laserů dochází k jeho ionizaci a vzniku plynového plazmatu. Oproti heliu při použití tohoto plynu vzniká více plazmatu a laserový paprsek je rozostřenější. Charakteristickou vlastností argonu je vysoká měrná hmotnost. Při průtoku plynu ($12\text{--}20\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$) dochází k vytlačení vzduchu argonem v oblasti



Obr. 22 Režimy svařování [62].

svarové lázně, protože je těžší jak vzduch a je zajištěna výborná ochrana vznikajícího svaru. Výsledný spoj je širší, ale oproti svařování heliem má lepší pevnostní charakteristiky. K zajištění kvalitní ochrany svarového kovu je nutné zabezpečit dostatečné množství průtoku plynu, zároveň ale při nadbytečném přívodu dochází k ekonomickým ztrátám. Vhodné nastavení průtoku plynu je schopné prohloubit hloubku spoje.

Hlavní výhodou penetračního režimu svařování je možnost vytvoření tupého svaru, k němuž není zapotřebí přídavný materiál, nebo několikavrstvého svařence za použití průvaru při přeplátování. Spojení je možné provést na jeden průchod. Existuje ještě tzv. přechodový režim, kde výsledkem je větší penetrace než u indukčního módu. Všechny tři režimy jsou schematicky zobrazeny na obr. 22 i s praktickými ukázkami.

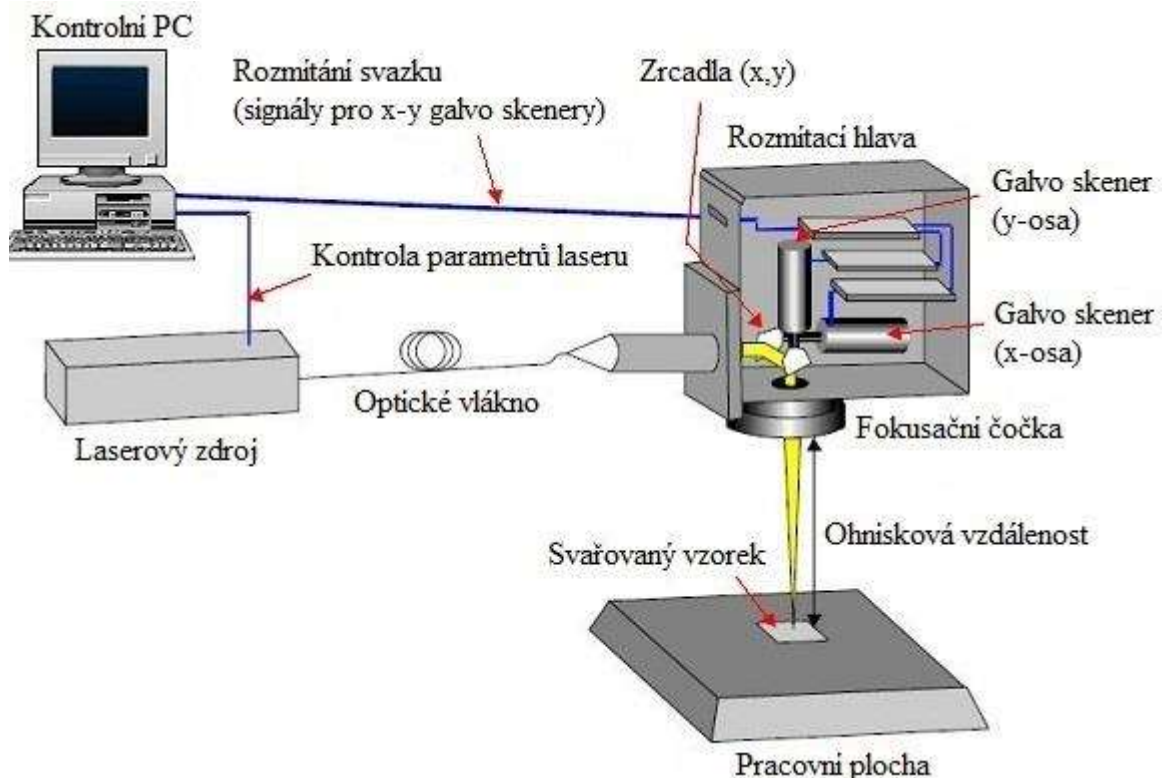
2.3 Laserové svařování s rozmítáním svazku [20], [63], [64], [68], [69], [70]

Snahy o zvýšení produktivity a zisků v průmyslové výrobě, zejména v automobilovém průmyslu, vedly k požadavkům na zrychlení svařovacího procesu. Problematickou záležitostí nepředstavoval výkon laseru, protože tenké plechy je možné svařit až rychlostí $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, ale dynamika polohovacího systému kvůli své hmotnosti. Základní metoda laserového svařování

tedy byla rozšířena o skenerové svařování nazývané také remote welding, které už není touto problematikou limitováno. Pohyb laserového paprsku není prováděn skrz svařovací hlavu upevněnou na robotickém rameni a ani nedochází k posunu pracovní součásti, ale je uskutečňován dvěma počítačem řízenými zrcadly uloženými ve skenerové hlavě, která zamíří svazek do místa spoje materiálů. Skenerová hlava umožňuje vychýlení paprsku a jeho nasměrování dovnitř plochy o hranách velikosti desítek až stovek mm a nejčastěji tvaru čtverce. Značnější rozsah dopadu laserového záření je možné docílit upevněním skenerové hlavy na polohovacího robota, takže po synchronizaci zrcadel s pohyby robota pomocí speciálního počítačového programu lze získat větší flexibilitu. Takové sestavení zařízení se nazývá on the fly, což je anglický název, ale nepřekládá se. Ochranná atmosféra v podobě argonu, dusíku, nebo helia se do místa svaru přivádí buď rozvodem v upínací soustavě součástí, nebo se tento systém u svařování vůbec nevyskytuje, protože je proces dostatečně rychlý a svařová lázeň příliš neoxiduje. Skenerová hlava (obr. 23) je většinou rozšířena o fokusační objektiv (čočku), který se liší způsobem zaostření, což souvisí i s jeho polohou vůči zrcadlům. Jedním ze dvou druhů fokusačního objektivu je tzv. F-theta čočka umístěná pod vychylovacími zrcadly, jejíž ohnisko je drženo v rovině skenování (obr. 24). Tento typ zaostřování je používán ke gravírování, značení a zpracování materiálu, nebo k přenosu obrazů na materiál a řadí se mezi jednodušší.



Obr. 23 Skenerová hlava Fiber Rhino [71].



Obr. 24 Zařízení vykonávající proces remote welding [72].

Druhá možnost fokusace je prováděna pomocí pohyblivé čočky, která se naopak vkládá před systém zrcadel. Na základě dat z 3D modelu řídicí systém přepočítává současnou vzdálenost od svařovaného místa a mění polohu čočky tak, aby se ohnisko vždy nacházelo na svařenci. Tato varianta je univerzálnější a obsáhne větší prostor, ale odchýlení laserového paprsku od kolmého dopadu je přijatelné přibližně do 15°.

Technikou rozmítání svazku označovanou také jako wobbling (slovo převzaté z anglického jazyka), při níž dochází ke dvěma pohybům svazku, je možné ovlivňovat geometrii a kvalitu svaru. Lze zajistit lepší difuzi materiálů oproti svařování laserovou hlavou. K pohybu paprsku po trajektorii svaru je přidán mikropohyb po triviální křivce typu přímka, kružnice, osmička a podobně a tyto dva úkony jsou současně prováděny vychylováním zrcadel. K tomu je tedy zapotřebí buď výše zmiňované skenerové hlavy, nebo speciální hlavy upravené pro tuto metodu. Režimy rozmítání svazku jsou uvedeny schematicky v tab. 4 a aplikované jsou na obr. 25. Změna průměru kružnice, či rozměru křivky má dopad na geometrii svaru, konkrétně na jeho šířku a vlivem složeného pohybu, při kterém dochází k promísení svarové lázně, je možné změnit mikrostrukturu a počet svarových vad ve spoji. Optimalizace svařování technologií rozmítání svazku není jednoduchá, protože kromě geometrie křivky patří k dalším doplňkovým parametrům i frekvence rozmítání.



A-kružnice, B-přímka, C-nekonečno

Obr. 25 Tvary primitivní geometrie rozmítací křivky [69].

Tab. 4 Režimy rozmítání svazku [53], [69].

| Tvar křivky | Schématické znázornění |
|-------------|------------------------|
| Kružnice | |
| Přímka | |
| Osmička | |
| Nekonečno | |
| Elipsa | |

2.4 Svařitelnost materiálů [7], [12], [18], [73], [74], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89]

Na materiál pro výrobu lopatek rozváděcího kola parní turbíny jsou kladeny vysoké požadavky, protože musí splňovat žárupevnost, odolnost proti korozi a tečení, ale zároveň musí mít dobré technologické vlastnosti a důležitým faktorem je i cena materiálu. Tyto nároky splňuje martenzitická korozivzdorná ocel, která se mimo jiné vyznačuje svou vysokou pevností. Výrobci parních turbín používají konkrétně martenzitickou korozivzdornou ocel X12Cr13 (1.4006) a spojují ji s uhlíkovou ocelí S355MC, která naopak splňuje spíše podmínky v oblasti nákladů.

Svařování materiálů odlišných jak chemickým složením, tak strukturami vede k degradaci fyzikálních, mechanických a chemických vlastností buď u jednoho, nebo u obou spojovaných materiálů. K poklesu dochází vlivem natavené (tzv. fúzní) zóny, která vzniká v přechodu materiálů do svarového kovu a má odlišné chemické složení. Aby při svařovacím procesu bylo co nejvíce omezeno nalegování svarového kovu, je nezbytné svarový spoj provést technologií, která na jednotku délky spoje přivede nízké hodnoty tepla. Mezi optimální řešení se řadí laserové a elektronové svařování, mikroplazma, nebo z kategorie tlakových metod spojování materiálů – svařování třením.

Norma ČSN EN 1011-3 Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 3: Obloukové svařování korozivzdorných ocelí se sice zabývá doporučeními pro svařování martenzitických korozivzdorných ocelí a udává důsledky a zpracování po svařování, ale týká se pouze obloukového svařování. Informace ohledně laserového svařování jsou uvedeny v normě ČSN EN 1011-6 Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 6: Laserové svařování a je zde také zmíněno, že korozivzdorné oceli jsou laserem snadno svařitelné.

Martenzitická ocel X12Cr13 má dle normy ČSN EN 10088-3 Korozivzdorné oceli – Část 3: Technické dodací podmínky pro předvýrobky, tyče, válcované dráty a tvarové tyče pro všeobecné použití nízký obsah uhlíku od 0,08 % do 0,15 %, aby docházelo k co nejnižší tvorbě karbidů a zároveň, aby její plastické vlastnosti a svařitelnost byly lepší. Obsah chromu se nachází v rozmezí od 11,5 % do 13,5 % a vede ke vzniku filmu s oxidační a pasivační funkcí na povrchu materiálu. Část chromu se naváže na uhlík a vytvoří karbidy, takže o tolik je jeho obsah v materiálu navýšen. Celé chemické složení materiálu podle normy ČSN EN 10088-3 je v tab. 5, kde je zaznačeno i složení tavby materiálu z inspekčního certifikátu 3.1 z přílohy 1, který byl použit pro experiment.

Tab. 5 Chemické složení oceli X12Cr13 [73], [74].

| Chemické složení [%] | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|---------------|--------------|-------------|
| Chemický prvek | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni |
| Dle normy | 0,08-0,15 | max 1,0 | max 1,5 | max 0,04 | max 0,03 | 11,5-13,5 | ≤ 0,75 |
| Dle inspekčního certifikátu | 0,117 | 0,35 | 0,67 | 0,022 | 0,0015 | 12,28 | 0,25 |

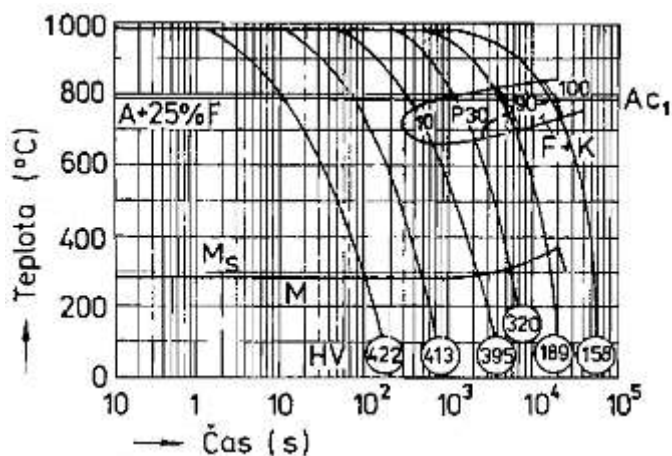
Množství chemických prvků v materiálu použitém pro experiment se nachází v rozmezí hodnot dle normy. Mechanické vlastnosti zjištěné ze zkoušky tahem a zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy za pokojové teploty (20 °C) provedených podle norem ČSN EN ISO 6892-1 Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty a ČSN EN ISO 148-1 Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – Část 1: Zkušební metoda jsou v tab. 6 spolu s mechanickými vlastnostmi danými normou ČSN EN 10088-3.

Tab. 6 Mechanické vlastnosti X12Cr13 [73], [74].

| | $R_{p0,2}$ [MPa] | R_m [MPa] | A_5 [%] | Kv_2 [J] |
|-----------------------------|------------------|-------------|-----------|------------|
| Dle normy | min 450 | 650-850 | min 15 | min 27 |
| Dle inspekčního certifikátu | 528 | 700 | 24 | 145 |

Martenzitické oceli se svařují popuštěné, žíhané, zušlechtěné, nebo v tvrdém stavu, kdy zmíněné tepelné zpracování nemá vliv na zakalení svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Materiál je dodán v zušlechtěném stavu na pevnost 650-850 MPa (QT 650). Kalení probíhalo z teploty 950 °C na vzduchu a výdrž na této teplotě trvala 3,5 h. Poté byl materiál popuštěn na teplotu 720 °C na 5,5 h s následným chlazením na vzduchu. Tvrdost materiálu po zakalení se odvíjí od množství uhlíku v něm obsaženém. S vyšším množstvím uhlíku se zvyšuje i pevnost materiálu, ale klesají plastické vlastnosti a možnost svaření materiálů je ztížena.

Anizotropní rozklad austenitu materiálu X12Cr13 je zobrazen na obr. 26, ale není v něm zanesena křivka, která určuje počátek vylučování karbidů na hranicích zrn. Ta u této oceli na rozdíl od jiných martenzitických není známa. Avšak pro zamezení precipitace karbidů, aby nedocházelo k poklesu vrubové houževnatosti, je vhodné zvýšit rychlost ochlazování na maximum. Po zakalení je nutné nechat materiál úplně zchladit v ochlazovacím prostředí v celém jeho průřezu. Pokud by tak nebylo učiněno, následně by po průběhu transformace zbyl ve struktuře zbytkový austenit, který by se po popuštění projevil snížením houževnatosti a mírným nárůstem tvrdosti. Teplota martenzitické přeměny je i ovlivňována obsaženým množstvím legujících prvků.



Obr. 26 ARA diagram oceli X12Cr13 [77].

Při popouštění vznikají a zanikají ve struktuře různé druhy karbidů, ne však všechny se po procesu ztratí. Popouštěcí teplota je volena na základě vrubové houževnatosti, která je požadována. K dosažení maximální houževnatosti se popouštějí oceli těsně pod teplotu, kdy začíná austenitická přeměna (700-750 °C), což je splněno i v tomto případě, viz tab. 7. Popouštěcí teplota musí být volena v závislosti na procentech uhlíku a legujících prvků a ovlivňuje odolnost proti korozi. Při nižší teplotě se začnou vylučovat karbidy chromu. Porovnání s hodnotami z normy ČSN EN 10088-3 jsou v tab. 7.

Tab. 7 Podmínky zušlechtování materiálu X12Cr13 [73], [74].

| | Kalení | | Popouštění |
|-----------------------------|--------------|---------------|--------------|
| | Teplota [°C] | Prostředí | Teplota [°C] |
| Dle normy | 950-1000 | olej/vzduch | 680-780 |
| Dle inspekčního certifikátu | 950 | vzduch | 720 |

Martenzitické oceli jsou svařitelné, viz norma ČSN EN 1011-6, která však neudává žádné údaje ohledně předehřevu, nebo teplotě interpass. Podle [78] u materiálu X12Cr13 není nutné použít předehřev a není nutné aplikovat žíhání po svařování. Avšak v [78] je také uvedeno, že

předehřev je závislý na množství uhlíku, viz tab. 8, tudíž je v tomto případě nezbytný a tepelné zpracování je po svaření doporučeno. Jedním z důvodů aplikace předehřevu je prokalitelnost a náchylnost na vznik studených trhlin. To samé potvrzuje i [81], [82], [83], [84]. Teploty předehřevu, interpass a tepelné zpracování se v případě svařování dvou heterogenních materiálů volí podle výše legovaného materiálu, což je v tomto případě martenzitická ocel.

Tab. 8 Teplota předehřevu a požadavek tepel. zpracování v závislosti na obsahu uhlíku [78].

| Obsah uhlíku [%] | Teplota předehřevu [°C] | Požadavek tepelného zpracování po svaření |
|------------------|-------------------------|---|
| 0,10 | min 50 | doporučuje se |
| 0,10-0,20 | 200-250 | pomalé chladnutí; doporučuje se |
| 0,20-0,50 | 250-320 | požadované |
| nad 0,50 | 250-320 | požadované |

Martenzitické korozivzdorné oceli mají zvýšenou vrubovou citlivost jak ve svarovém kovu, tak v tepelně ovlivněné oblasti, tudíž je nezbytné se vyvarovat při svařování ostrým přechodům tloušťky materiálů, neprůvarům, zápalům, studeným spojům a jiným iniciátorům vrubů. Po svaření je obvykle materiál popuštěn, nebo vyžihán s cílem zvýšit tažnost a houževnatost na úkor snížení tvrdosti.

Druhým materiálem, z kterého je vyráběna část rozváděcího kola, je uhlíková ocel S355MC. Podle označení materiálu se jedná o konstrukční ocel s mezí kluzu minimálně 355 MPa, termomechanicky válcovanou, se zvláštní tvařitelností za studena. Chemické složení materiálu podle normy ČSN EN 10149-2 Ploché výrobky válcované za tepla z oceli s vyšší mezí kluzu pro tvářeni za studena – Část 2: Technické dodací podmínky pro termomechanicky válcované oceli a dle inspekčního certifikátu 3.1 (příloha 2) jsou uvedeny v tab. 9.

Tab. 9 Chemické složení oceli S355MC [88], [89].

| Chemické složení [%] | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Chemický prvek | C max | Mn max | Si max | P max | S max | Al _{celk.} min | Nb max | V max | Ti max |
| Dle normy | 0,12 | 1,50 | 0,50 | 0,025 | 0,020 | 0,015 | 0,09 | 0,20 | 0,15 |
| Dle inspekčního certifikátu | 0,059 | 0,336 | 0,011 | 0,007 | 0,004 | 0,034 | 0,032 | 0,001 | 0,001 |

Součet Nb, V a Ti nesmí přesáhnout hodnotu 0,22 %, což je v tomto případě splněno. Chemické složení materiálu uvedené v inspekčním certifikátu je v mezích chemického složení dle normy. Mechanické vlastnosti dle normy ČSN EN 10149-2 a mechanické vlastnosti zjištěné ze zkoušek a uvedené v certifikátu jsou porovnány v tab. 10.

Tab.10 Mechanické vlastnosti oceli S355MC [88], [89].

| | R_{eH} [MPa] | R_m [MPa] | A [%] * |
|-----------------------------|----------------|-------------|-------------|
| Dle normy | 355 | 430-550 | 23 |
| Dle inspekčního certifikátu | 404 | 467 | 32,9 |

* pro jmenovitou tloušťku materiálu ≥ 3 mm

Ocel S355MC splňuje podmínku C $<0,25$ hm %, tudíž je materiál svařitelný bez nutnosti předehřevu.

Oproti klasickým metodám svařování dochází vlivem vysoko koncentrovaného zdroje tepla k poklesu náchylnosti k tvorbě studených trhlin iniciovaných vodíkem, přičemž se ale vysoká tahová napětí v materiálu stále vyskytují. Kromě toho je zamezeno přístupu vodíku z atmosférické vlhkosti ochranným plynem. Dalším zdrojem vodíku, který se ale u laserového svařování nevyskytuje, je zvlhlý přídatný materiál, respektive obaly elektrod, nebo tavidlo. Vzhledem k omezení příčin vzniku studených trhlin nebude předehřev u laserového svařování aplikován.

2.5 Svarové vady [18], [27] [31], [64], [76], [90], [91], [92], [94], [95], [96], [97]

Kvalita svarového spoje závisí na druhu svařovaného materiálu a zvolené technologii svařování a posuzuje se z hlediska jeho celistvosti, tvaru, velikosti, požadovaného chemického složení a mechanicko-plastických vlastností. Odchytky od vlastností svaru, které jsou předepsány smluvním vzorkem, technickými podmínkami, či technickou normou, se nazývají vady. Jejich klasifikaci uvádí norma ČSN EN ISO 6520-1 Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 1: Tavné svařování. Vady jsou hlídány kvůli své schopnosti vyvolat napětí, zhoršit mechanické vlastnosti, a především iniciovat lom.

I při spojování materiálů pomocí laserového paprsku, stejně jako u jiných druhů svařování, dochází ke vzniku defektů, které snižují kvalitu svaru. Na jejich tvorbu má vliv například rychlost pohybu a intenzita laserového paprsku, přítomnost par, čistota svarových spojů, postup svařování, případně nečistoty usazené na ochranném skle. Ne vždy mohou být vady okem viditelné čili odhalitelné vizuální zkouškou. Ke zjištění skrytých vad se používají různé přístroje, nebo laboratorní zkoušky. Přípustnost defektů je stanovena normou, nebo technickými podmínkami, kde vady nemají vliv na funkčnost součásti a jsou přijatelné. U nepřípustných vad se rozlišuje možnost jejich opravitelnosti. V případě, že součást nemůže být opravena, je vyřazena z výrobního procesu. Podle normy ČSN EN ISO 13919-1 Svařování – Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním – Směrnice pro určování stupňů jakosti – Část 1: Ocel jsou svarové spoje zhotovené laserovým svařováním (nikoliv celý výrobek, nebo jeho část) určeny stupni jakosti, viz tab. 11. Každý spoj na jenom výrobku může mít předepsán jiný stupeň.

Tab. 11 Klasifikace vad [97].

| Skupina-symbol | Stupeň jakosti |
|----------------|----------------|
| D | nízký |
| C | střední |
| B | vysoký |

Druhy vad jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 6520-1 a jsou rozříděny do 6 skupin. Některé vady z této normy jsou v tab. 12. V normě ČSN EN 1011-6 jsou uvedeny také některé vybrané vady, které se vyskytují u laserového svařování a jsou u nich zmíněny i jejich příčiny a prevence.

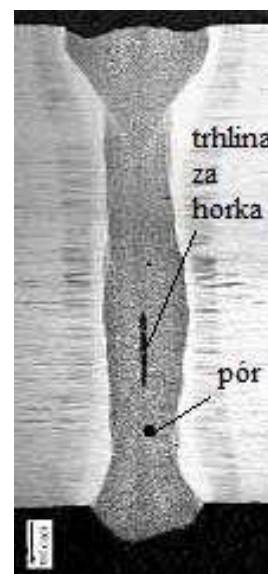
Tab. 12 Dělení svarových vad [96].

| Skupina č. | Název skupiny | Označení vady |
|------------|---------------------------|---|
| 1 | Trhliny | Trhlina, mikrotrhlina, podélná trhlina, příčná trhlina, hvězdicová trhlina, kráterová trhlina, ... |
| 2 | Dutiny | Dutina, plynová dutina, pór, rovnoměrná pórovitost, shluk pórů, řádek pórů, protáhlý pór, červovitý pór, povrchový pór, ... |
| 3 | Pevné vměstky | Pevný vměstek, struskový vměstek, tavidlový vměstek, oxidický vměstek, kovový vměstek, ... |
| 4 | Studené spoje a neprůvary | Studený spoj a neprůvar, studený spoj, neprůvar (nedostatečný průvar), neprovařený kořen, jehlice. |
| 5 | Vady tvaru a rozměru | Vada tvaru, zápal (vrub), souvislý zápal, vrub v kořeni, ... |
| 6 | Různé vady | Dotyk elektrodou, rozstřík, vytržený povrch, stopa po broušení, ... |

Každá vada má referenční číslo, kde třímístné číslo označuje hlavní skupinu vad a čtyřmístné číslo přidružené termíny, a je označena. Ke každé vadě náleží i vysvětlení. V tab. 12 nejsou vady vysvětleny a nejsou zde uvedeny ani referenční čísla.

Typickou vadou u laserového svařování je pór (obr. 27). Jedná se o plynovou dutinu převážně kulovitěho tvaru, která je skrytá v prostoru svaru. Příčin vzniku je více. Pórovitost může způsobovat nestabilita a kolaps keyhole, vlhkost plynu, nevhodně zvolená rychlost svařování, nebo vysoká viskozita svarové lázně. Dále může být příčinou rychlé tuhnutí kovu. Jestliže je stanoven stupeň jakosti před začátkem výroby, pak podle symbolu D, C, nebo B jsou dle normy ČSN EN ISO 13919-1 určeny mezní hodnoty rozměru póru. Pokud se póry shlukují, pak je jejich výskyt nepřijatelný, protože by mohlo nastat jejich propojení a vzniknout lomová plocha.

Další vyskytovanou vadou u spoje vytvořeného laserovým paprskem je trhlina za horka, která se vytváří smršťováním při tuhnutí kovu z důvodu velkých vnitřních pnutí. Mezi nebezpečné vady, vážnější než zmíněné póry, se řadí kvůli možnosti šíření ve svaru. Proto se dle normy ČSN EN ISO 13919-1 podle všech stupňů jakosti nesmí ve spoji vyskytovat. Pokud už je trhlina způsobena, musí být odstraněna, nebo součást musí být vyřazena z výrobního procesu. Jedním z příčin vzniku trhlin za horka může být výskyt nečistot v podobě síry a fosforu v základním materiálu, proto se doporučuje jejich obsah (S+P) menší než 0,02 hm. %. Výhodou laserového svařování jsou vysoké rychlosti, kterých paprsek dosahuje, protože při rychlostech nad 2 m·min⁻¹ se snižuje náchylnost ke tvorbě trhlin za horka. Na obr. 27 je také zobrazena trhlina za horka. Výskyt studených trhlin byl rozebrán v předchozí kapitole, zde už zmíněn nebude.



Obr. 27 Svarové vady [95].

2.6 Zkoušky svarového spoje a materiálů svarů [64], [91], [92], [93], [98], [99], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111],[112], [113], [114], [115], [116], [117], [118], [119], [120]

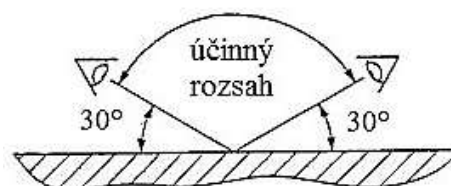
Svarové vady jsou téměř běžnou součástí svarových spojů. Pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti dílce jsou prováděny nedestruktivní zkoušky, kde se zjistí četnost, druh a rozsah svarových vad. Jak už název napovídá, nedestruktivní zkouška se obejde bez deformace, porušení celistvosti a snížení kvality svaru i výrobku. Po provedení této zkoušky je součást plně funkční, takže lze zkoušku aplikovat nejen na konci výroby, ale i v průběhu. Pomocí nedestruktivní defektoskopie lze odhalit jak vnější, tak vnitřní vady. Vhodnost zkoušek na druh vady, základní zařízení a vybavení potřebné k provedení, označení a norma uvádějící obecné principy a zásady zkoušky jsou v tab. 13.

Tab. 13 Typy nedestruktivních zkoušek [101], [102], [103], [104], [105], [107], [108].

| Druh vady | Typ nedestruktivní zkoušky | Označení | Základní zařízení, vybavení | Norma |
|--------------|--------------------------------|----------|---|-------------------------------------|
| Vnější vada | Vizuální zkouška | VT | zrak, lupa, endoskop – pevný (boroskop), ohebný (fibroskop), posuvné měřítko, svítidla | ČSN EN ISO 17637 |
| | Penetrační (kapilární) metoda | PT | penetrační kapalina, vývojka, emulgátor, odmašťovač, odstraňovač penetrantu (čistič) | ČSN EN ISO 3452-1 |
| | Magnetická prášková zkouška | MT | magnetický suchý prášek/suspenze roztoku magnetického prášku, stejnosměrný/střídavý proud, nebo elektromagnet | ČSN EN ISO 9934-1, ČSN EN ISO 17638 |
| Vnitřní vada | Ultrazvuková zkouška | UT | zkušební sondy připojené na obrazovku | ČSN EN ISO 16810, ČSN EN ISO 17640 |
| | Rentgenová zkouška (prozáření) | RT | film (radiogram), rentgenový přístroj/zdroj gama záření | ČSN EN ISO 17636-1 |

Existují další normy, kde jsou zmíněny například přístroje a prostředky, případně vyhodnocení zkoušek. Ty však v tab. 13 nejsou zapsány. Při předepsání normy ČSN EN ISO 15614-11 Stanovení a kvalifikace postupů kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 11: Elektronové a laserové svařování musí být provedeny normou definované zkoušky na předepsaném zkušebním tělese.

Z nedestruktivních metod bude aplikována na experiment pouze vizuální zkouška, a to před procesem svařování a poté po procesu svařování. V průběhu procesu nebude moc být provedena z důvodu krytování laserového stroje. Minimální hodnota intenzity osvětlení, která musí být použita při testování, je 350 lx. Vzdálenost umístění oka nesmí překročit hodnotu 600 mm a zároveň úhel od povrchu nesmí být menší než 30 ° (obr. 28). Svařovaný materiál bude dobře dostupný pro oko, takže nebude potřeba nepřímá kontrola pomocí zrcátek, boroskopů, nebo kamer. Před svařováním bude



Obr. 28 Podmínky pro vizuální kontrolu svarů [98].

zkontrolován tvar a rozměry přípravy svaru, čistota tavné plochy, svarové hrany a přilehlých povrchů a dále správné sestavení a upevnění dílů (i vůči sobě navzájem). Po spojení materiálů bude prohlédnut profil povrchu svaru a velikost převýšení svarového kovu, také pravidelnost povrchu svaru a jeho šířka. Dále bude zkontrolován průvar a vydutost kořene svaru, propaly, či staženiny a vady na povrchu svaru, nebo v tepelně ovlivněné oblasti.

Nedestruktivní zkoušky mají sice výhodu v možnosti aplikace na součást, která musí být i nadále funkční, nicméně jsou nicneříkající z hlediska mechanických vlastností svaru. K jejich zjištění je zapotřebí deformace, či destrukce. Nejčastěji používané zkoušky jsou v tab. 14, kde je uvedena i norma zkušební metody a jaké mechanické vlastnosti lze ze zkoušky zjistit.

Tab. 14 Destruktivní zkoušky [106], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117].

| Destruktivní zkouška | Norma | Mechanické vlastnosti |
|--|-------------------|--|
| Zkoušení tahem | ČSN EN ISO 6892-1 | mez kluzu, mez pevnosti, tažnost, kontrakce |
| Zkouška ohybem | ČSN EN ISO 5173 | deformační schopnost – prodloužení, úhel ohybu |
| Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy | ČSN EN ISO 148-1 | vrubová houževnatost |
| Zkouška rozlomením | ČSN EN ISO 9017 | detekce vnitřních vad |
| Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů | ČSN EN ISO 17639 | hodnocení struktury – vady, struktura zrn, morfologie a orientace atd. |
| Zkouška tvrdosti podle Vickerse | ČSN EN ISO 6507-1 | tvrdost |
| Zkouška tvrdosti podle Brinella | ČSN EN ISO 6506-1 | tvrdost |
| Zkouška tvrdosti podle Rockwella | ČSN EN ISO 6508-1 | tvrdost |
| Zkoušení mikrotvrdosti | ČSN EN ISO 9015-2 | mikrotvrdost |

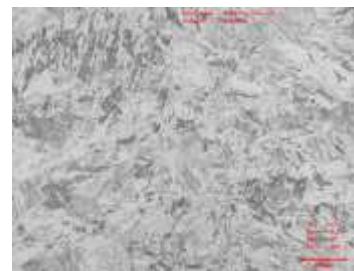
Zkoušku tahem je možné provádět v příčném směru podle normy ČSN EN ISO 4136 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem, nebo v podélném směru podle normy ČSN EN ISO 5178 Destruktivní zkouška svarů materiálů – Podélná zkouška tahem svarového kovu tavných svarových spojů. V případě heterogenního svaru nemají tyto zkoušky význam, protože dojde k dřívějšímu poškození základního materiálu s nižší mezí pevnosti než k přetržení svarového spoje.



Obr. 29 Makroskopie.

V experimentální části bude provedena makroskopická (obr. 29) a mikroskopická (obr. 30) kontrola svarů. Při zvětšení vzorku obecně menším, jak 50x se jedná o makroskopii

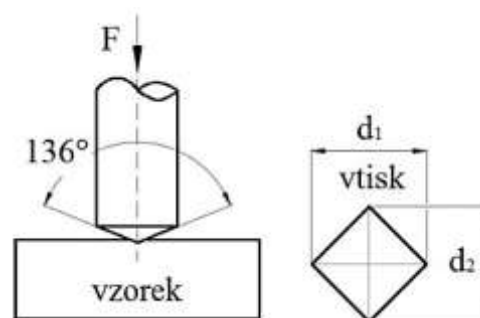
označovanou písmenem A. Zvětšením pozorovaného materiálu 50x – 500x je dosaženo kontroly v oblasti mikroskopie značenou I. Vzorky mohou být prohlíženy jak v nenaleptaném (U), tak v naleptaném stavu (E). U vzorků, připravených obvykle napříč ose svaru, jsou vyhodnocovány tyto parametry: struktura zrn, morfologie a orientace, precipitáty, vměstky, trhliny za horka i studena, lamelární praskání, dutiny, studený spoj, hranice zrn, struktura zrn a jiné.



Obr. 30 Mikroskopie.

Další provedenou zkouškou bude změření mikrotvrdomosti v souladu s normami ČSN EN ISO 6507-1 Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda a ČSN EN ISO 9015-2 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti – Část 2: Zkoušení mikrotvrdomosti svarových spojů.

Tato zkouška (obr. 31) probíhá tak, že vnikající těleso je zatlačováno do povrchu zkušební tělesa zkušebním zatížením F a po jeho odlehčení jsou změřeny délky uhlopříček vtisku d_1 a d_2 , které v povrchu zůstanou. Parametry indentoru jsou určeny normou ČSN EN ISO 6507-2 Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 2: Ověřování a kalibrace zkušebních strojů a vnikající těleso je diamantový čtyřboký pravidelný jehlan, jehož základna nabývá čtvercového tvaru a vrcholový úhel mezi protilehlými stranami má danou hodnotu 136° . Zatěžující síla dosahuje



Obr. 31 Zkouška (mikro)tvrdosti podle Vickerse [27].

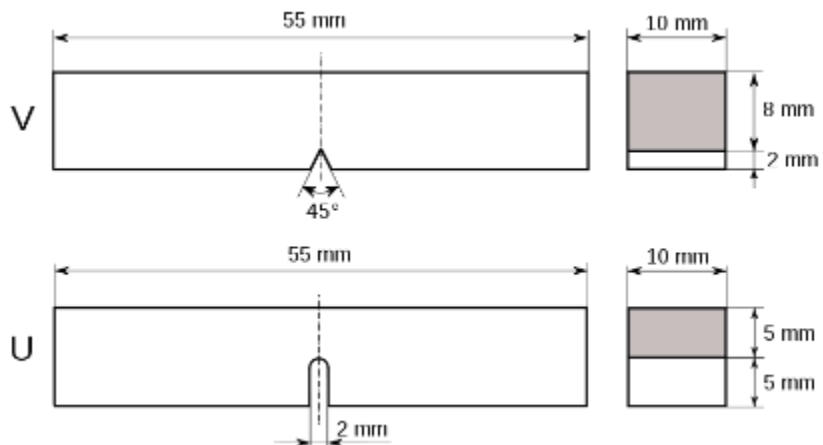
u měření mikrotvrdomosti hodnot od 0,01 N do 1 N, u měření tvrdosti od 2 N do 1000 N a působí po dobu v rozmezí 10-180 s, obvykle však doba působení nachází v intervalu 10–15 s. Aby byla zkouška platná, musí se délky uhlopříček nacházet v rozmezí intervalu 0,020 mm až 1,400 mm. K výpočtu tvrdosti je používána zatěžující síla a aritmetický průměr délek uhlopříček vtisku a výsledkem je bezrozměrné číslo napětíového charakteru. Hodnotu tvrdosti je možné také určit z tabulek na základě velikosti uhlopříčky. Jednotkou tvrdosti je HV a za ní je vždy uvedena přibližná hodnota použitého zkušebního zařízení (např. HV0,1), případně doba zkušebního zatížení, pokud je mimo předepsaný rozsah 10-15 s (např. HV0,1/20).

Díky zkoušce mikrotvrdomosti je možné získat hodnoty tvrdosti jednotlivých fází a strukturních složek. Tyto údaje lze poté aplikovat při určování neznámých struktur materiálů na základě změřených hodnot jejich mikrotvrdomosti. Každá fáze a strukturní složka je specifikována určitým rozhraním hodnot HV, viz tab. 15.

Tab. 15 Tvrdost fází a strukturních složek [120].

| Fáze a strukturní složky | HV | Fáze a strukturní složky | HV |
|--------------------------|---------|--------------------------|---------|
| Fe | 85 | Perlit jemný | 250-300 |
| Ferit | 85-130 | Bainit horní | 300-400 |
| Austenit | 120-180 | Bainit dolní | 400-550 |
| Austenit zpevněný | až 800 | Martenzit nízkouhlíkový | 600-700 |
| Perlit hrubý | 200-250 | Martenzit vysokouhlíkový | 700-800 |

Poslední zkouškou, kterou ovšem z časových důvodů nebylo možné provést, je zkouška uvedená v normě ČSN EN ISO 148-1 Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – Část 1: Zkušební metoda. Jedná se o test náchylnosti materiálu vůči křehkému porušení. Na zkušebním vzorku je proveden V, nebo U vrub (obr. 32)



Obr. 32 Zkušební těleso s V a U vrubem [121].

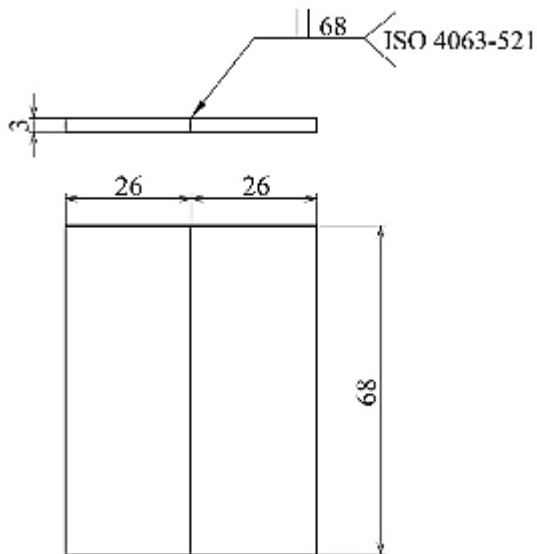
a poté je vložen do Charpyho kladiva. Břit kyvadla (obr. 33) udeří na opačnou stranu vzorku, než je vrub a zjišťuje se velikost nárazové práce (absorbované energie), z které je stanovena vrubová houževnatost. Před první zkouškou je stanovena energie pohlcená třením, která zahrnuje odpor vzduchu, tření v ložiscích a tření ručičky číslíkového ukazatele, aby nebyly ovlivněny naměřené hodnoty. Zkouška je prováděna při zadané teplotě, protože se u většiny kovů mění hodnoty při rázu s teplotou. Nárazová práce, jejíž jednotkou je joule, je získána z odečtení výškových rozdílů kladiva v počáteční a konečné poloze a vynásobením hmotností kladiva. Hodnocen je i charakter lomu, konkrétně zdali se jedná o křehký, nebo tvárný.



Obr. 33 Charpyho kladivo [100].

3 EXPERIMENTY A JEJICH VYHODNOCENÍ

Pro experimentální část bylo zhotoveno šest vzorků z tyčového polotovaru z martenzitického korozivzdorného materiálu X12Cr13 a šest vzorků z plechu z uhlíkové oceli S355MC. K oběma materiálům byly doloženy inspekční certifikáty 3.1, které jsou v příloze 1 a 2, a je v nich uvedeno chemické složení s mechanickými vlastnostmi (viz kapitola 2.4). Geometrie všech vzorků je totožná a rozměry dosahují následujících hodnot: délka – 68 mm, šířka – 26 mm a tloušťka – 3 mm, viz obr. 34. Vždy budou spojeny dva vzorky odlišných materiálů pomocí tupého svaru. Před samotným svařováním byly plechy spojeny bodovými svary (tzv. nabodování) ve dvou místech metodou TIG (obr. 35), aby nemuselo být prováděno složité přípravkování a při průchodu laserového paprsku nedošlo k posuvu materiálů a zvětšení mezery mezi nimi a následně k jejich neprovaření. U tohoto experimentu nebude použit přehřev, dohřev, ani



Obr. 34 Geometrie vzorků.

tepelné zpracování. Materiál bude svařen laserovým paprskem v pozici PA (vodorovná shora) s i bez použití rozmitání svazku, kde budou nastaveny některé triviální křivky uvedené v tab.4 a měněn jeden z procesních parametrů. Získané spoje materiálů budou připraveny na pozorování struktur provedením metalografického výbrusu. Hodnoceny budou vzorky jak na úrovni makroskopické, tak i na mikroskopické. Následovat bude změření hodnot mikrotvrdosti podle Vickerse.

S355MC. K oběma materiálům byly doloženy inspekční certifikáty 3.1, které jsou v příloze 1 a 2, a je v nich uvedeno chemické složení s mechanickými vlastnostmi (viz kapitola 2.4). Geometrie všech vzorků je totožná a rozměry dosahují následujících hodnot: délka – 68 mm, šířka – 26 mm a tloušťka – 3 mm, viz obr. 34. Vždy budou spojeny dva vzorky odlišných materiálů pomocí tupého svaru. Před samotným svařováním byly plechy spojeny bodovými svary (tzv. nabodování) ve dvou místech metodou TIG (obr. 35), aby nemuselo být prováděno složité přípravkování a při průchodu laserového paprsku nedošlo k posuvu materiálů a zvětšení mezery mezi nimi a následně k jejich neprovaření. U tohoto experimentu nebude použit přehřev, dohřev, ani

tepelné



Obr. 35 Příprava vzorků bodovými svary.

3.1 Svařování laserem

Experiment byl uskutečněn na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky pomocí vláknového laseru IPG Laser YLS-2000 (obr. 36) od výrobce IPG Photonics a jeho parametry jsou uvedeny v příloze 3. Jedná se o laser o vlnové délce 1,07 μm s přesností ± 10 nm, který umožňuje pracovat v kontinuálním režimu. Ve výkonové jednotce laseru jsou uloženy 4 optické moduly o výkonu 500 W (obr. 37), takže jejich spojením do modulárního uspořádání je maximální dosahovaný výkon 2 kW. K přenosu laserového paprsku z laseru do skenerové hlavy slouží optické vlákno. Aktivní prostředí je dopováno atomy ytterbia. Mimo svařování je možné uplatnit laser i k řezání, vrtání, žihání, pájení, nebo tepelnému zpracování. Na polohovacím průmyslovém robotu IRB 2400/16 od firmy ABB je upnuta 2D skenerová hlava Fiber Rhino 31



Obr. 36 IPG Laser YLS-2000.

Experiment byl uskutečněn na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky pomocí vláknového laseru IPG Laser YLS-2000 (obr. 36) od výrobce IPG Photonics a jeho parametry jsou uvedeny v příloze 3. Jedná se o laser o vlnové délce 1,07 μm s přesností ± 10 nm, který umožňuje pracovat v kontinuálním režimu. Ve výkonové jednotce laseru jsou uloženy 4 optické moduly o výkonu 500 W (obr. 37), takže jejich spojením do modulárního uspořádání je maximální dosahovaný výkon 2 kW. K přenosu laserového paprsku z laseru do skenerové hlavy slouží optické vlákno. Aktivní prostředí je dopováno atomy ytterbia. Mimo svařování je možné uplatnit laser i k řezání, vrtání, žihání, pájení, nebo tepelnému zpracování. Na polohovacím průmyslovém robotu IRB 2400/16 od firmy ABB je upnuta 2D skenerová hlava Fiber Rhino 31



Obr. 37 Optické moduly v modulárním uspořádání.

laser i k řezání, vrtání, žihání, pájení, nebo tepelnému zpracování. Na polohovacím průmyslovém robotu IRB 2400/16 od firmy ABB je upnuta 2D skenerová hlava Fiber Rhino 31

od výrobce Arges, která je připojena k optickému vláknu o průměru 100 μm . Upořádání průmyslového robotu a skenerové hlavy s připojením k optickému vláknu je zobrazeno na obr. 38. Robot v tomto případě nekonal žádný pohyb stejně jako ostatní části sestavy. Posuv paprsku byl zajištěn pouze skenerovou hlavou pomocí vychylovacích zrcadel. Skenerová hlava je vhodná pro vlnové délky v rozsahu 1020–1080 μm a její pracovní prostor nabývá přibližně rozměrů 205 x 205 m. Pracovní vzdálenost (odstup ohniska od konce objektivu) činí 200 mm a clona (průzor) dosahuje hodnoty 31 mm. Datový list s údaji o skenerové hlavě jsou v příloze 4. K sestavě byl přidán přívod ochranného plynu.



Obr. 38 Průmyslový robot se skenerovou hlavou.

Některé svařovací parametry byly nastaveny pro všechny experimenty shodně. Řadí se mezi ně následující:

- výkon laseru: $P=2000\text{ W}$,
- ochranný plyn: argon 4.6,
- průtok ochranného plynu: $Q_v=16,7\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$,
- průměr spotu: $d_s=200\ \mu\text{m}$,
- zaměření ohniska na povrch vzorku: $f=0$,
- rychlost posuvu: $v=10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Svařovací parametry, které byly u každého vzorku měněny jsou uvedeny v tab. 16.

Tab. 16 Svařovací parametry.

| | Vzorek č. 1 | Vzorek č. 2 | Vzorek č. 3 | Vzorek č. 4 | Vzorek č. 5 | Vzorek č. 6 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|--|-----------------------------|
| wobbling | NE | ANO | ANO | ANO | ANO | ANO |
| tvar křivky | - | kružnice | kružnice | kružnice | elipsa (hlavní osa ve směru svařování) | přímka (ve směru svařování) |
| rádius kružnice r_w [mm] | - | 0,6 | 0,6 | 0,6 | - | - |
| rozměr hlavní/vedlejší osy elipsy [mm] | - | - | - | - | 2,4/1,2 | - |
| délka přímky [mm] | - | - | - | - | - | 2,4 |
| Frekvence kmitání f_w [Hz] | - | 30 | 60 | 90 | 60 | 60 |
| rychlost spotu v_w [mm. s^{-1}] | - | 103-123 | 216-236,2 | 329-349 | - | - |

Než se přešlo k samotnému experimentu, byla řešena otázka přípravkování. Plechy byly svařovány v pozici PA vodorovně shora tupým svarem, proto stačilo uchycení pomocí upínek (obr. 39) k přípravku na svařování, aby se zamezilo pohybu plechů vlivem dodaného

tepla. Vzdálenost mezi materiály byla zajištěna bodovými svary, tudíž bylo upevnění vzorků zjednodušeno. Byla provedena simulace laserového svařování, při níž se kontrolovala trajektorie paprsku, zdali kopíruje spojované hrany materiálů. Dále proběhla kontrola vychýlení paprsku, resp. jeho dopad na materiál, aby došlo ke spojení vzorků po celé délce. Skenerová hlava byla polohována doprostřed spáry materiálů, takže v tomto místě bylo dosaženo kolmého dopadu paprsku a jeho vychýlení na obě strany bylo symetrické. Poté byl seřízen průtok ochranného plynu po délce spáry mezi plechy. Pro každý vzorek byly nastaveny jiné (výše zmíněné) svařovací parametry. Vzorky před spojením nebyly nijak upravovány, protože nenesly známky znečištění. Svařovací proces probíhal za krytíváním kvůli škodlivosti záření, nejprve byl spuštěn přívod argonu, poté až samotný laser. Po provedení byly svary očištěny a vizuálně zkontrolovány. Na obr. 40 je zobrazen spoj těsně po svaření.

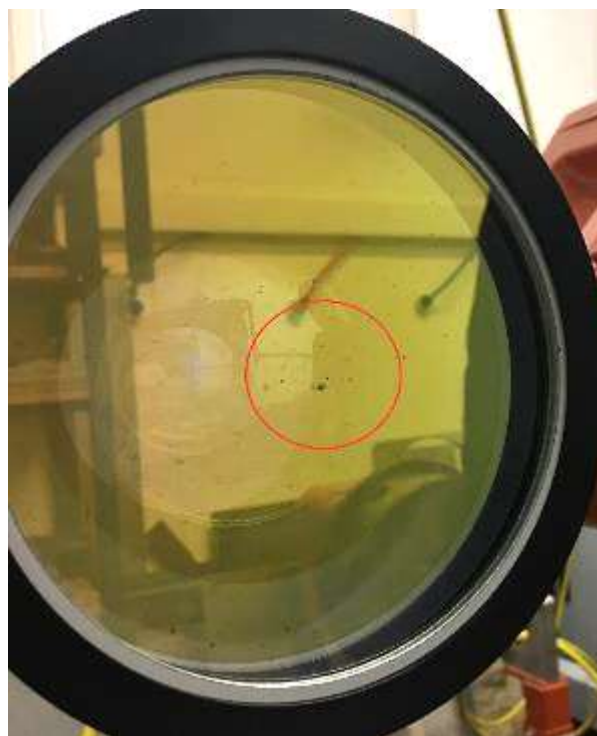


Obr. 39 Upevnění vzorků před svařovacím procesem.

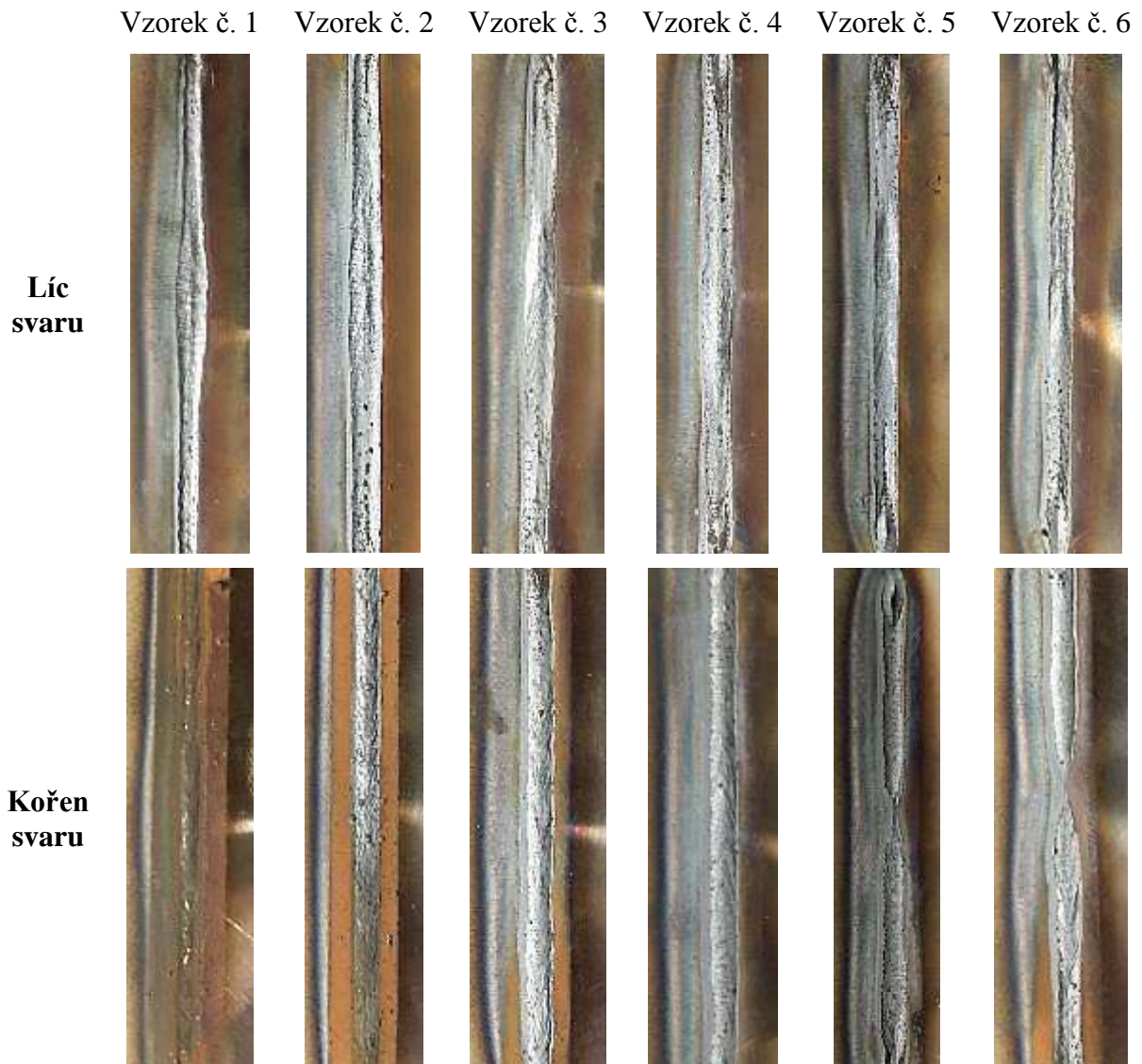


Obr. 40 Svařené vzorky materiálů.

Pro větší přehlednost byly vybrány pouze svary s tepelně ovlivněnými oblastmi všech vzorků a byly vloženy do obr. 41, kde na levé straně je materiál S355MC a na pravé straně X12Cr13. Na povrchu svarů a v tepelně ovlivněné oblasti nebyly viditelné žádné vady v podobě trhlin, nebo pórů. Útvary podobné pórům byly pouze černé kousky materiálu, nebo stíny způsobené rozstříkem materiálu. Svary byly bez propalů a staženin, kořen spoje nebyl vydutý a nebylo zaznamenáno žádné převýšení svaru. Viditelný byl však rozstřík kovu a problém se vyskytl u vzorku č. 5 a 6, u kterých nebyl provařen kořen v části svaru, kde by měl být dopad paprsku kolmý čili provaření materiálu nejlepší. Po prohlédnutí skenerové hlavy bylo zjištěno, že na ochranném skle (obr. 42) během svařovacího procesu ulpěla nečistota, která omezovala průchod laserového paprsku skrz materiál. Z vizuální kontroly toho nebylo možné více zjistit, proto následovalo provedení metalografického výbrusu a zařazení kontroly makrostruktury a mikrostruktury.



Obr. 42 Nečistota na ochranném skle skenerové hlavy.



Obr. 41 Líc a kořen svarů vzorků č. 1-6.

3.2 Metalografie

Metalografické výbrusy byly provedeny opět na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v souladu s normou ČSN EN ISO 17639. Prvním krokem bylo vybrání vhodné části svaru, která bude následně podrobena kontrole mikro/makrostruktury. Zvolena byla oblast, kde dopad laserového paprsku byl kolmý (obr. 43). V případě vzorků 5 a 6 nedošlo uprostřed spoje plechů k průvaru kořene, takže byla volena část, kde vychýlení paprsku bylo nejmenší a kořen svaru byl již provařený. Materiál byl nařezán na požadovaný rozměr a tvar pomocí speciálního kotouče na přesné laboratorní pile MTH Mikron 110, u které bylo využito intenzivního chlazení, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorků. Vyřezané vzorky byly přesunuty k pracovišti s automatickým elektrohydraulickým lisem Struers Citopress-1, aby mohly být zalisovány do pryskyřice a lépe se s nimi manipulovalo. Před tím byly ještě odmaštěny a očištěny od rezné kapaliny. Pro zasypání byla použita fenolová pryskyřice MultiFast černá od



Obr. 43 Zvolená oblast vzorku, z které byl odebrán preparát.

totožné značky jako přístroj. Zalisování probíhalo při 180 °C a tlaku 250 bar po dobu 3 minuty a výsledný válcový tvar nosiče vzorku, jež je zobrazen na obr. 44, dosahoval průměru 30 mm.

Následnou operací bylo broušení a leštění. Vzorky byly vloženy do přístroje Struers Tegramin-20, kde byl upevněn SiC brusný kotouč o zrnitosti 500 a byl puštěn program broušení po dobu 3 minuty. K zabezpečení chlazení celého procesu a odvodu částic z kotouče a vzorku byla použita procesní kapalina, v tomto případě pouze voda.



Obr. 45 Ultrazvuková čistička Ulsonix Proclean 2.0M.

Síla přitlačující nosič k brusnému kotouči dosahovala 30 N. Za stejných podmínek probíhalo i broušení s kotoučem o zrnitosti 1200. V dalším kroku byly povrchy vzorků čtyřkrát leštěny



Obr. 44 Vzorek zalisovaný do nosiče.

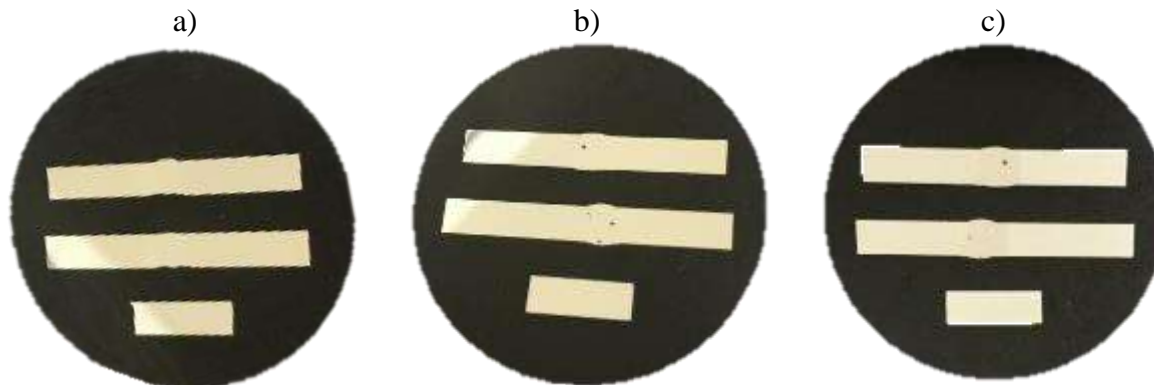
pomocí diamantové suspenze DiaDuo-2 na textilním kotouči s odlišnými velikostmi zrn, časovým intervalem a přitlačnou silou, které jsou uvedeny v tab. 17. Mezi každou operací byly vzorky vloženy do ultrazvukové

čističky Ulsonix Proclean 2.0M (obr. 45), aby nedošlo k jejich poškrábání. Zbylá zmíněná zařízení nezbytná pro provedení metalografických výbrusů jsou zobrazeny na obr. 46.

Tab. 17 Parametry leštění diamantovou suspenzí.

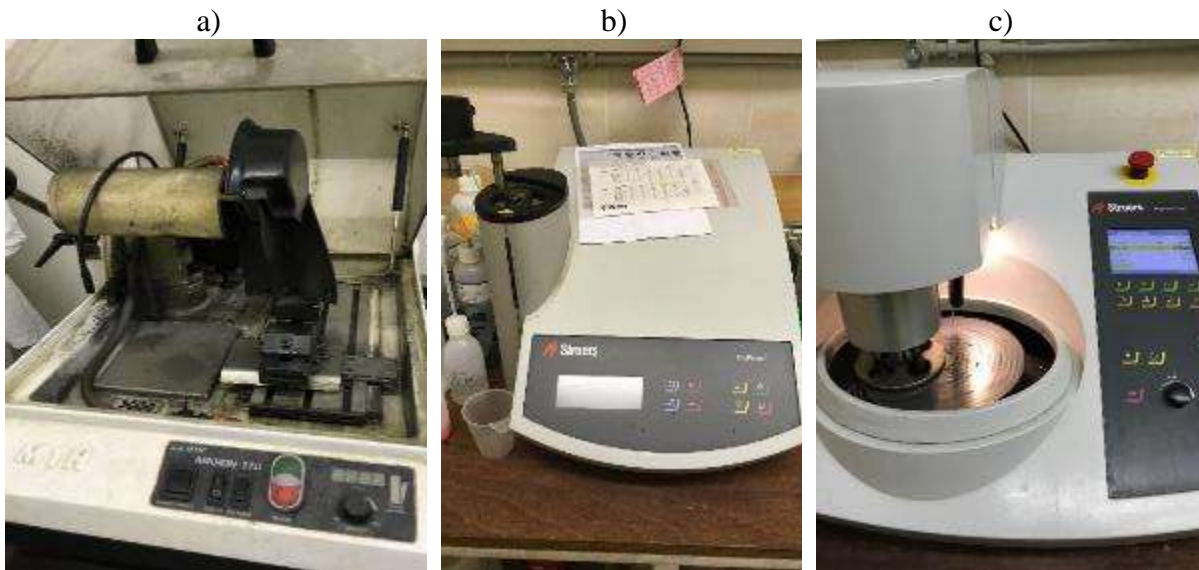
| Fáze leštění | 1. | 2. | 3. | 4. |
|--------------------------------|----|----|-----|-----|
| Velikost zrn [μm] | 9 | 3 | 1 | 1 |
| Doba leštění [min] | 3 | 2 | 1,5 | 1,5 |
| Přítlačná síla [N] | 25 | 25 | 20 | 20 |

V tomto stavu by už mohly být vzorky vloženy pod mikroskop, nicméně pro zlepšení viditelnosti struktury bylo zařazeno i leptání povrchu. Po dobu 10 s působilo na povrch vzorku leptadlo Vilella's Reagent složené z 1 g kyseliny pikrové, 5 ml kyseliny chlorovodíkové a 100 ml ethanolu, poté byl přípravek opláchnut vodou a lihem. Leptáním je proces přípravy vzorku ukončen, vyleštěné a naleptané vzorky jsou zobrazeny na obr. 47. Po uložení vzorků do nosiče a následného zpracování jejich povrchu lze přejít k vyhodnocení makrostruktury.



a) vzorek č. 1 a 2, b) vzorek č. 3 a 4, c) vzorek č. 5 a 6

Obr. 47 Vyleštěné vzorky po leptání.



a) laboratorní pila MTH Mikron 110, b) automatický elektrohydraulický lis Struers Citopress-1, c) jednokotoučová bruska/leštička Struers Tegramin-20

Obr. 46 Zařízení potřebná pro přípravu metalografických výbrusů.

3.3 Vyhodnocení makrostruktury

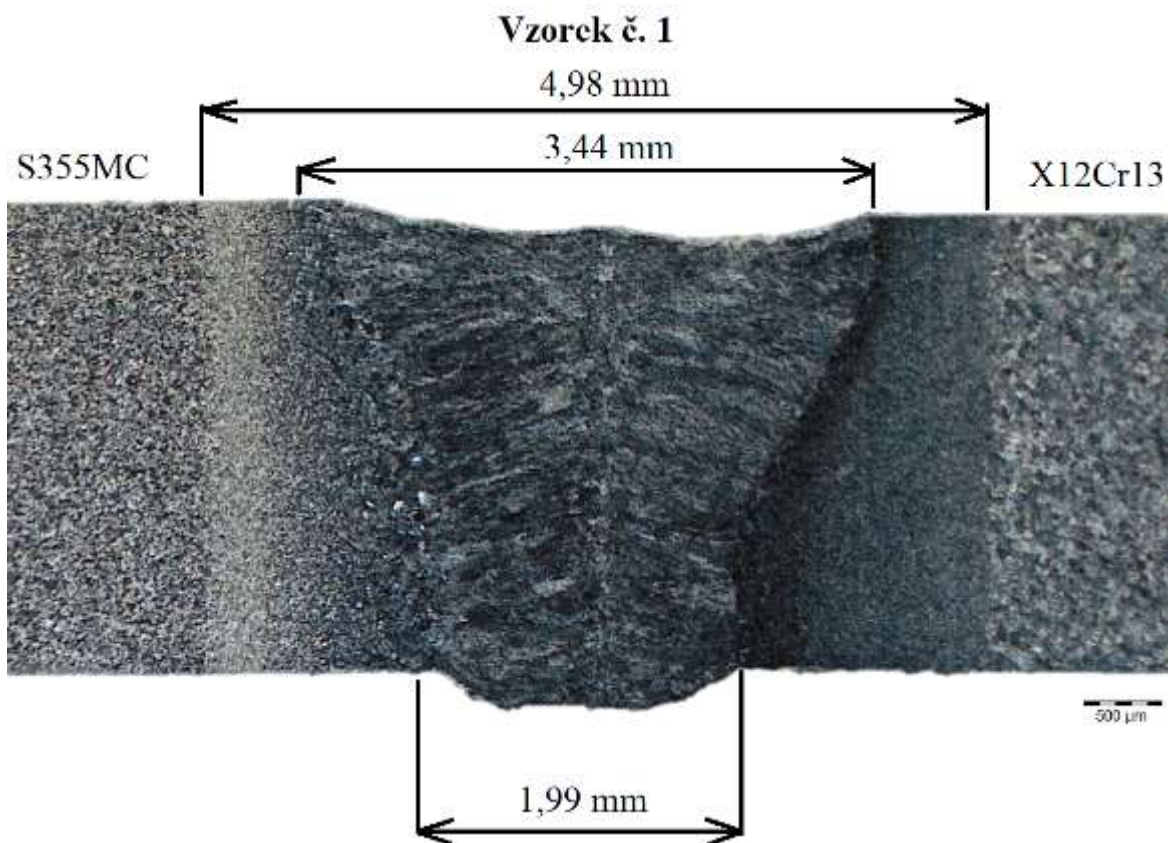
Snímky makrostruktur byly pořízeny na stereomikroskopu Olympus SZ61 (obr. 48) opět na ÚPT AV ČR a vyhodnoceny v programu Olympus Stream Basic. Změřena byla velikost svaru a tepelně ovlivněné oblasti. Všechny svaru jsou zobrazeny ve stejném měřítku (tj. za použití stejného přiblížení). Vzorky jsou zpracované tak, že na levé straně se nachází vždy materiál S355MC a na pravé straně od svaru materiál X12Cr13.

Vyhodnocení makrostruktury bylo zaměřeno na velikost svaru a tepelně ovlivněné oblasti, svarové vady, tvar svaru a převýšení/propad lící strany a kořene svarového spoje.

Na obr. 49 je zobrazen makroskopický snímek vzorku č. 1, který byl svařen laserem bez použití wobblingu. Šířka svarového kovu u vzorku č. 1 činí v horní části 3,44 mm a směrem ke kořenu svaru je proměnná, ale zužujícího charakteru. U kořene dosahuje šířka hodnoty 1,99 mm. Jedná se o téměř symetrický tvar svaru s mírným propadem ve vrchní oblasti a převýšením v místě kořene. Tepelně ovlivněná oblast je široká 4,98 mm a její velikost se odvíjí od množství vneseného tepla. Hranice mezi základním materiálem, tepelně ovlivněnou oblastí a svarovým kovem jsou dobře viditelné, od svaru směrem k martenzitické oceli o něco lépe, ale nejsou vyloženě ostré. Na snímku není znatelné výrazné zhrubnutí zrna a nejsou viditelné žádné svarové vady.



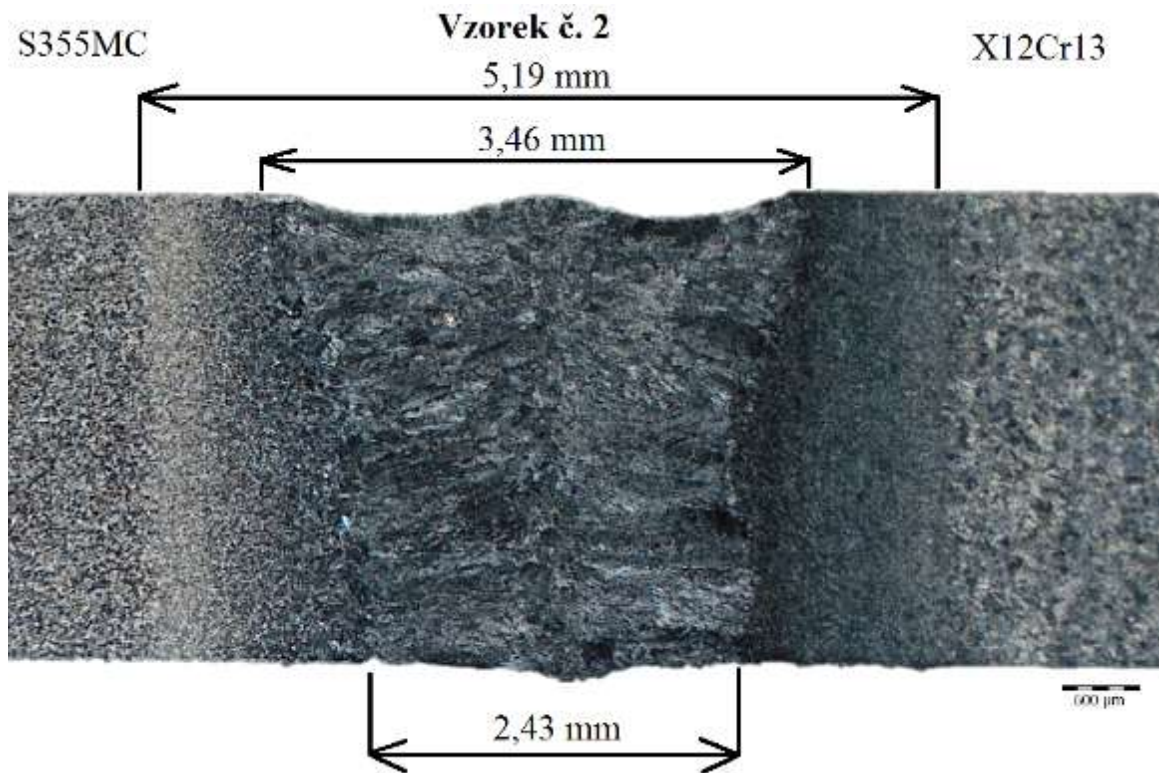
Obr. 48 Stereomikroskop Olympus SZ61 [122].



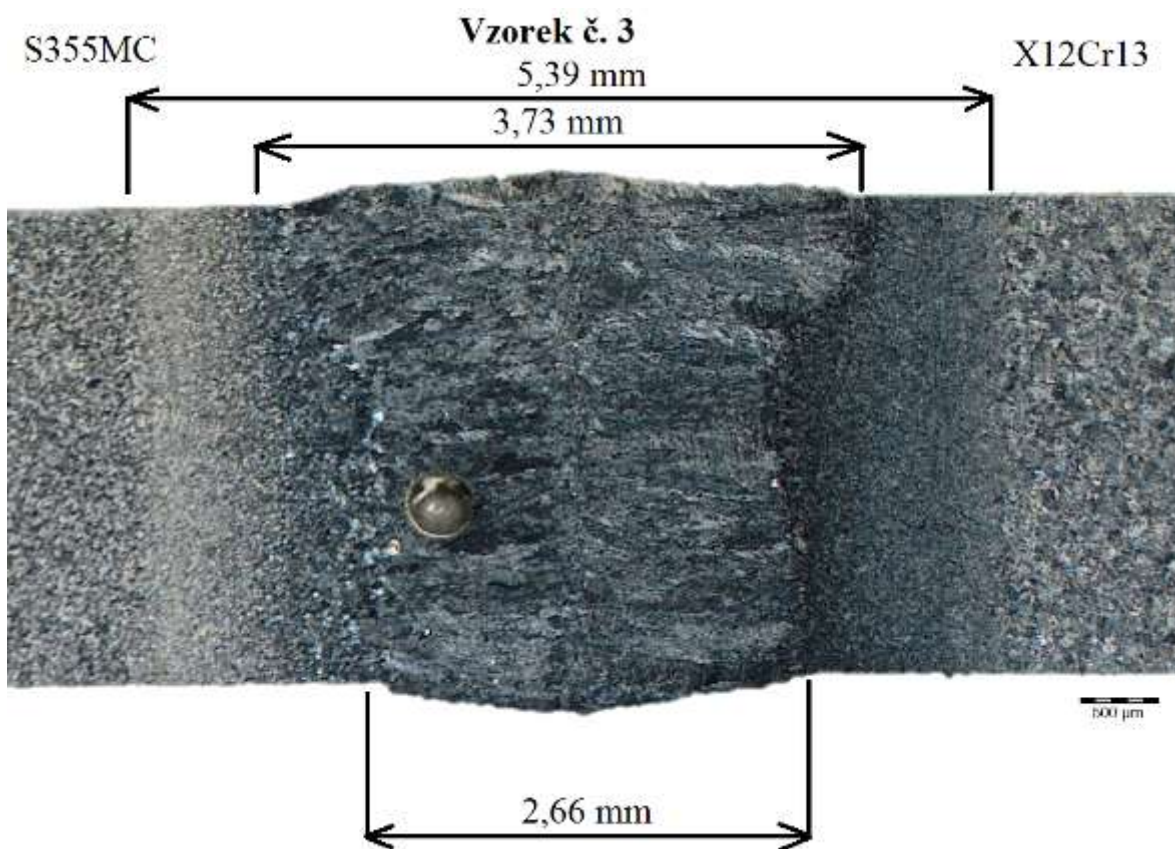
Obr. 49 Makroskopický snímek vzorku č. 1.

Šířka tepelně ovlivněné oblasti u vzorku č. 2 na obr. 50 se zvětšila vlivem většího množství vneseného tepla, protože u tohoto vzorku už byla použita technika wobblingu. Jak je ale zřejmé ze změřených rozměrů u svaru, zvětšení oblasti tepelného ovlivnění není nijak významné a totéž platí i u šířky svarového kovu v horní oblasti. Zaznamenány byly pouze změny v místě kořene, kde došlo ke zvětšení přibližně o 0,44 mm, avšak ani zde se nejedná o velký rozdíl mezi hodnotami. Vzorky se od sebe odlišují především převýšením kořene, které je u vzorku č. 2 zanedbatelné. U líce svaru je opět viditelné neúplné vyplnění svaru, avšak oproti vzorku č. 1 je menší. Při wobblingu dochází k promísení svarové lázně, tudíž hranice mezi základním materiálem, tepelně ovlivněnou oblastí a svarovým kovem jsou neostré. Na snímku je viditelný jeden pár malých rozměrů ve svarovém kovu, ale další svarové vady již nejsou přítomny.

Vzorek č. 3 na obr. 51 byl svařován pomocí wobblingu se zvýšenou frekvencí, což způsobilo vnesení většího množství tepla do svaru a ovlivnilo šířku tepelně ovlivněné oblasti, která se zvětšila na hodnotu 5,39 mm, šířku svarového kovu ve vrchní oblasti, jejíž rozměr je 3,73 mm a v místě kořene došlo ke zvětšení na hodnotu 2,66 mm. Jak na lícové straně, tak v místě kořene je svar mírně převýšen. Přechod mezi základním materiálem, tepelně ovlivněnou oblastí a svarovým kovem není vlivem promísení svarové lázně při spojování materiálů jednoznačný. U tohoto svarového spoje se vyskytuje ve svarovém kovu vada v podobě póru. Rozměr póru by mohl být nevyhovující, pokud by byl větší než mezní hodnoty, které stanovuje norma ČSN EN ISO 13919-1 Svařování – Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním – Směrnice pro určování stupňů jakosti – Část 1: Ocel.

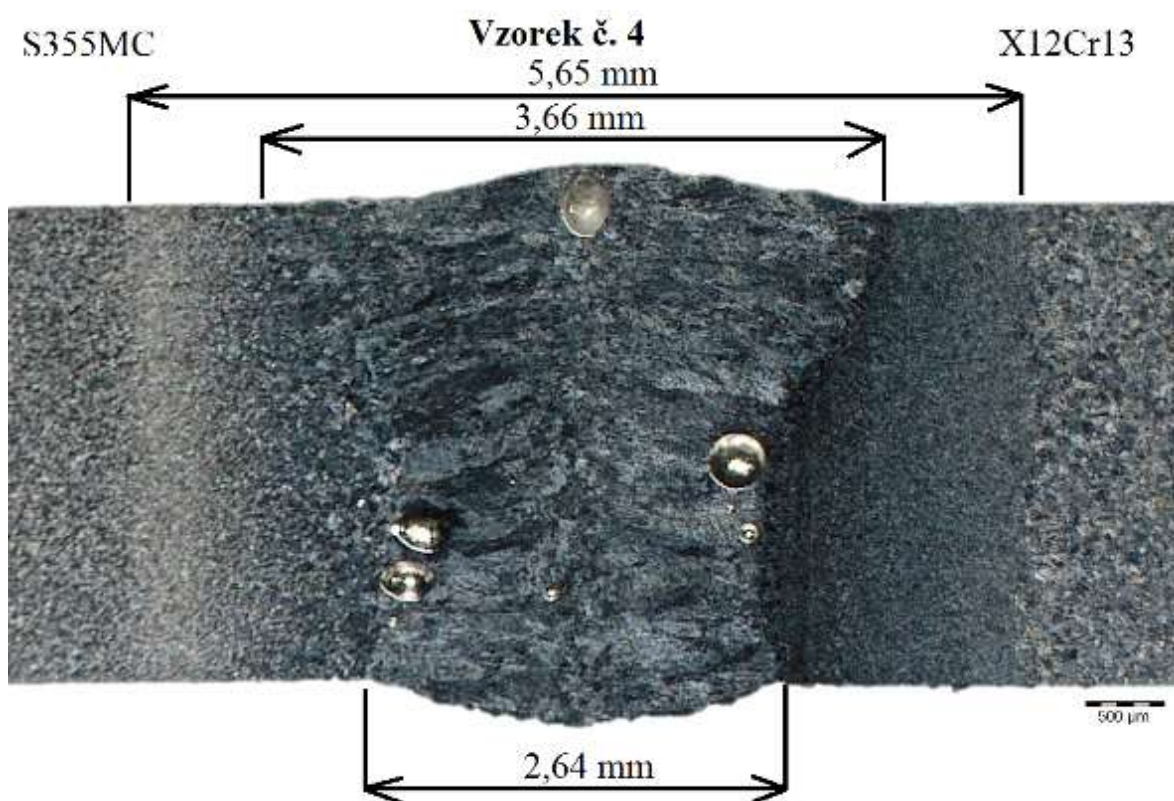


Obr. 50 Makroskopický snímek vzorku č. 2



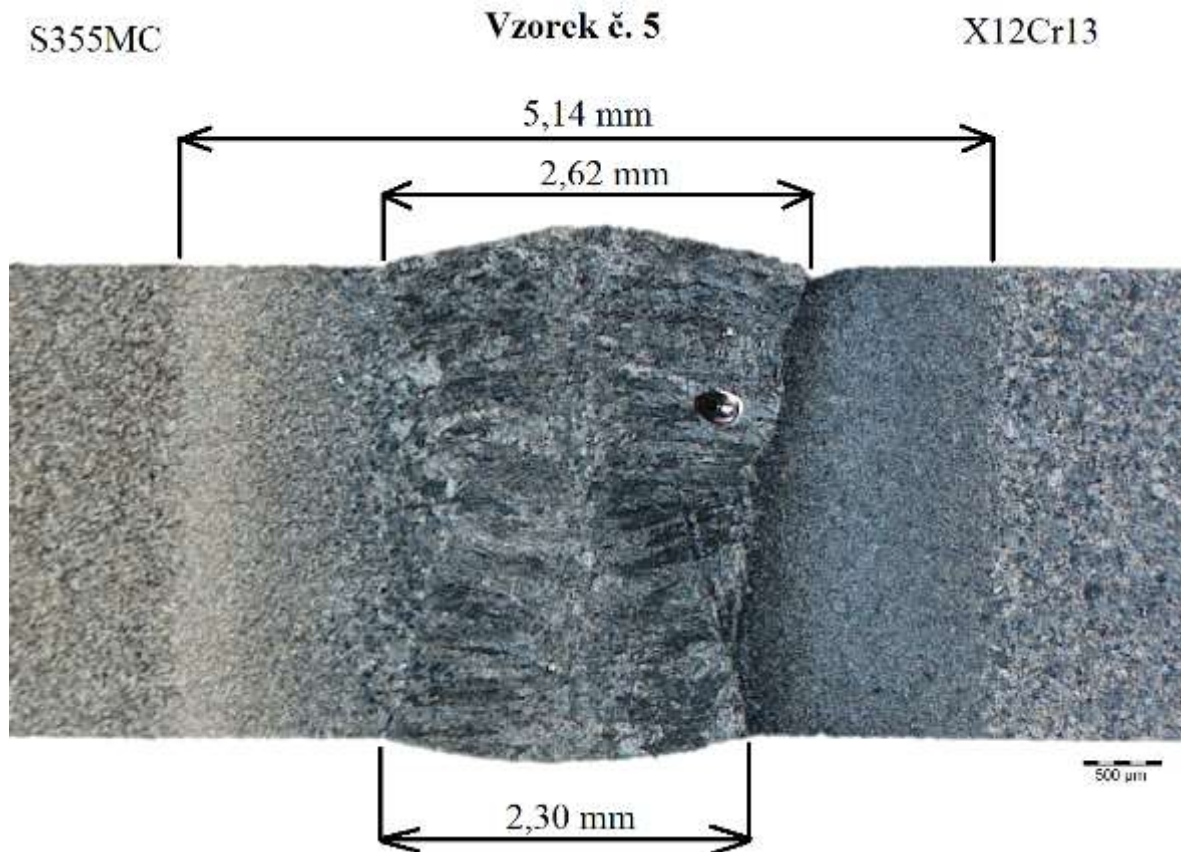
Obr. 51 Makroskopický snímek vzorku č. 3.

Vzorek č. 4 (obr. 52) byl proveden opět za aplikace wobblingu, u kterého byla navýšena frekvence o 30 Hz oproti předchozímu vzorku. Laserový paprsek tímto navýšil vnesené teplo do materiálu, což je znatelné na šířce tepelně ovlivněné oblasti. Rozměr kořene svaru je téměř totožný s předchozími dvěma vzorky, nicméně líc svaru nabývá v tomto případě menších rozměrů než u vzorku 3. Přechody od svarového kovu k základním materiálům jsou opět neostře, jak tomu je i u předchozích vzorků za použití wobblingu. Obzvláště nevýrazná je hranice v horní oblasti spoje mezi svarovým kovem a tepelně ovlivněnou oblastí u základního materiálu S355MC, takže šířka svarového kovu může být určena odlišně v závislosti na člověku vyhodnocujícím snímky makrostruktur. Výskyt svarových vad je u vzorku č. 4 navýšen. Póry se vyskytují zejména v oblasti svarového kovu u tepelně ovlivněných oblastí. Jejich četnost, nebo rozměry by mohly zapříčinit, že už by svar nemusel být vyhovující. Převýšení kořene i horní části spoje je výraznější než u již ukázaných vzorků.



Obr. 52 Makroskopický snímek vzorku č. 4.

Svaření vzorku č. 5 zobrazeném na obr. 53 proběhlo za použití wobblingu, podmínky svařování byly obdobné jako u vzorku č. 2, až na tvar triviální křivky, který byl z kružnice změněn na elipsu. Tepelně ovlivněná oblast je rozměrem téměř shodná s oblastí u vzorku č. 2. Rozdílné jsou ale šířky svaru, kdy v tomto případě dosahuje menších rozměrů – 2,62 mm u líce a 2,30 mm u kořene svaru. Viditelný je i rozdíl tvarů spojů. U vzorku č. 5 došlo k převýšení kořene a vrchní oblasti svaru, kde je přesah výraznější. Neostrá rozhraní se objevují zejména mezi základními materiály a tepelně ovlivněnými oblastmi. Jednou z vad, která je při tomto přiblížení zaznamenatelná, je plynová dutina kulovitého tvaru. Dále je pod stereomikroskopem viditelný malý vrub vyskytující se na rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti u materiálu X12Cr13. Závažnost této vady se však posuzuje ke způsobu namáhání, například při cyklickém namáhání může i malý vrub vyvolat trhlinu a porušit celý svarový spoj.



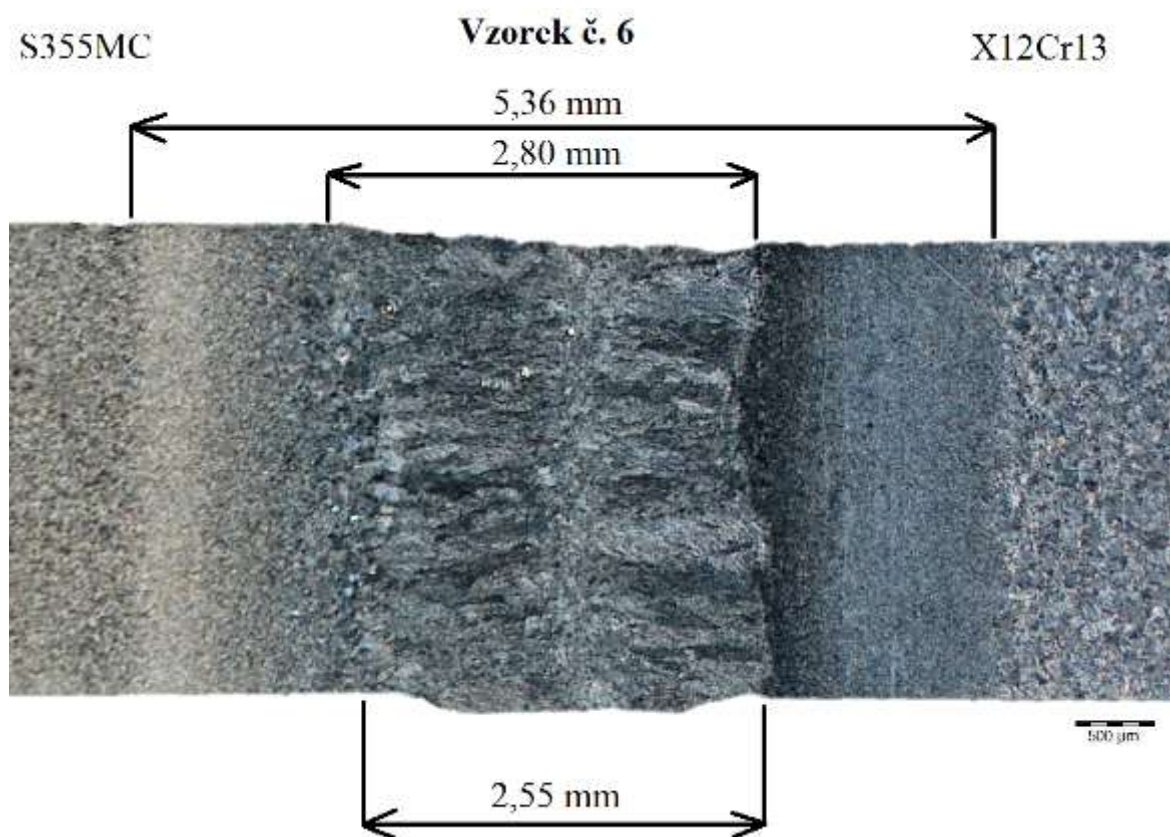
Obr. 53 Makroskopický snímek vzorku č. 5.

Na obr. 54 je uveden makroskopický snímek vzorku č. 6, jehož svařovací podmínky jsou srovnatelné se vzorky č. 2 a 5 až na zvolenou geometrii triviální křivky, která nabývala tvaru přímky a byla vychylována ve směru svařování. Vnesené teplo do svaru je větší, protože šířka tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu dosahuje vzhledem k hodnotám uvedených u vzorku č. 5 větších rozměrů. Přejít mezi svarovým kovem, tepelně ovlivněnou oblastí a základním materiálem je postupný bez ostrých hranic. U svaru nejsou zaznamenána výrazná převýšení, nebo propady a vyskytují se v něm póry o malých velikostech.

Naměřené hodnoty se mohou lišit v závislosti na osobě, která v programu určovala hranice mezi základním materiálem, tepelně ovlivněnou oblastí a svarovým kovem, protože přechody jsou plynulé a rozhraní nejsou přesně určena. Pro srovnání rozměrů a množství vyskytujících se vad by bylo nutné provést z každého svařeného vzorku více metalografických výbrusů než pouze jeden. Makroskopické snímky byly upraveny pro lepší přehlednost a původní verze jsou uvedeny v příloze 5.

U všech vzorků lze vidět výraznou zrnitost, kdy zrna pevné fáze jsou naorientovaná do středu svarového kovu. U některých vzorků jsou zrna (licí struktura) na sebe i kolmá, jak si je možné povšimnout například na snímku č. 6. Orientace licí struktury je závislá na rychlosti ochlazení. Dendrity rostou ve směru největšího teplotního gradientu. Vzorek svařený bez použití wobblingu má oproti vzorkům, kde byl použit, větší propad ve vrchní oblasti svaru a větší převýšení kořene. Z tohoto důvodu je výhodnější aplikovat ke svaření materiálů mikropohyb po triviální křivce, kde však kvalita svaru závisí na zvolených procesních parametrech. Porovnány byly vzorky č. 2, 5 a 6, kde byla zvolena stejná frekvence, ale jiné tvary triviálních křivek. Vzorek č. 2 má mírný propad v horní oblasti svaru a ve vzorku č. 5 se vyskytuje pór. Z nastavených primitivních křivek se proto jeví jako nejlepší možnost přímka ve směru svařování. K přesnému určení nevhodnějšího tvaru by ale bylo potřeba posoudit více makroskopických snímků z různých částí svaru. Významným procesním parametrem je frekvence, s jakou spot kmitá. K porovnání lze použít vzorky č. 2, 3 a 4, kde tvarem křivky byla

kružnice o shodném poloměru, ale frekvence byla navyšována. Při použití 30 Hz (obr. 50) je viditelný jenom malá svarová vada v podobě póru. Zvýšením frekvence na 60 Hz (obr. 51) a 90 Hz (obr. 52) ve svarovém kovu přibýlo objemnějších pórů, protože svarovou lázní bylo při svařování více mícháno. Chrom v materiálu způsobuje, že svarová lázeň je více viskózní a při zvýšení pohybu lázně mícháním se do ní vnese více bublin plynu, které hustou lázní nestihnou projít na povrch a po ztuhnutí se z nich stanou póry. Zároveň došlo i k rozšíření šířky svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti kvůli vnesení většího množství tepla.



Obr. 54 Makroskopický snímek vzorku č. 6.

V tab. 18 jsou pro přehlednost shrnuty vlastnosti svarů zjištěné z makroskopie. Mezní hodnoty jsou v tabulce červeně zvýrazněny. Z těchto informací lze vyvodit závěr, že nejvíce vyhovujícím způsobem spojení materiálů je wobbling při frekvenci 30 Hz, kdy je s tavnou lázní nejméně mícháno a při nastavení primitivní křivky tvaru přímky o délce 2,4 mm vychylované ve směru svařování, případně kružnice o průměru 0,6 mm.

Tab. 18 Porovnání vlastností svarových spojů získaných při makroskopii.

| Vzorek č. | Šířka – TOO [mm] | Šířka – lící strana svaru | Šířka – kořen svaru | Póry | Propad/převýšení lící strany svaru | Převýšení kořene svaru |
|-----------|------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------|
| 1 | 4,98 | 3,44 | 1,99 | Ne | Velký propad | Velké |
| 2 | 5,19 | 3,46 | 2,43 | Ano (malé rozměry) | Malý propad | Žádné |
| 3 | 5,39 | 3,73 | 2,64 | Ano (i větší rozměry) | Malé převýšení | Malé |
| 4 | 5,65 | 3,66 | 2,64 | Ano (velké rozměry) | Velké převýšení | Velké |
| 5 | 5,14 | 2,62 | 2,30 | Ano (i větší rozměry) | Malé převýšení | Velké |
| 6 | 5,36 | 2,80 | 2,55 | Ano (malé rozměry) | Žádné | Malé |

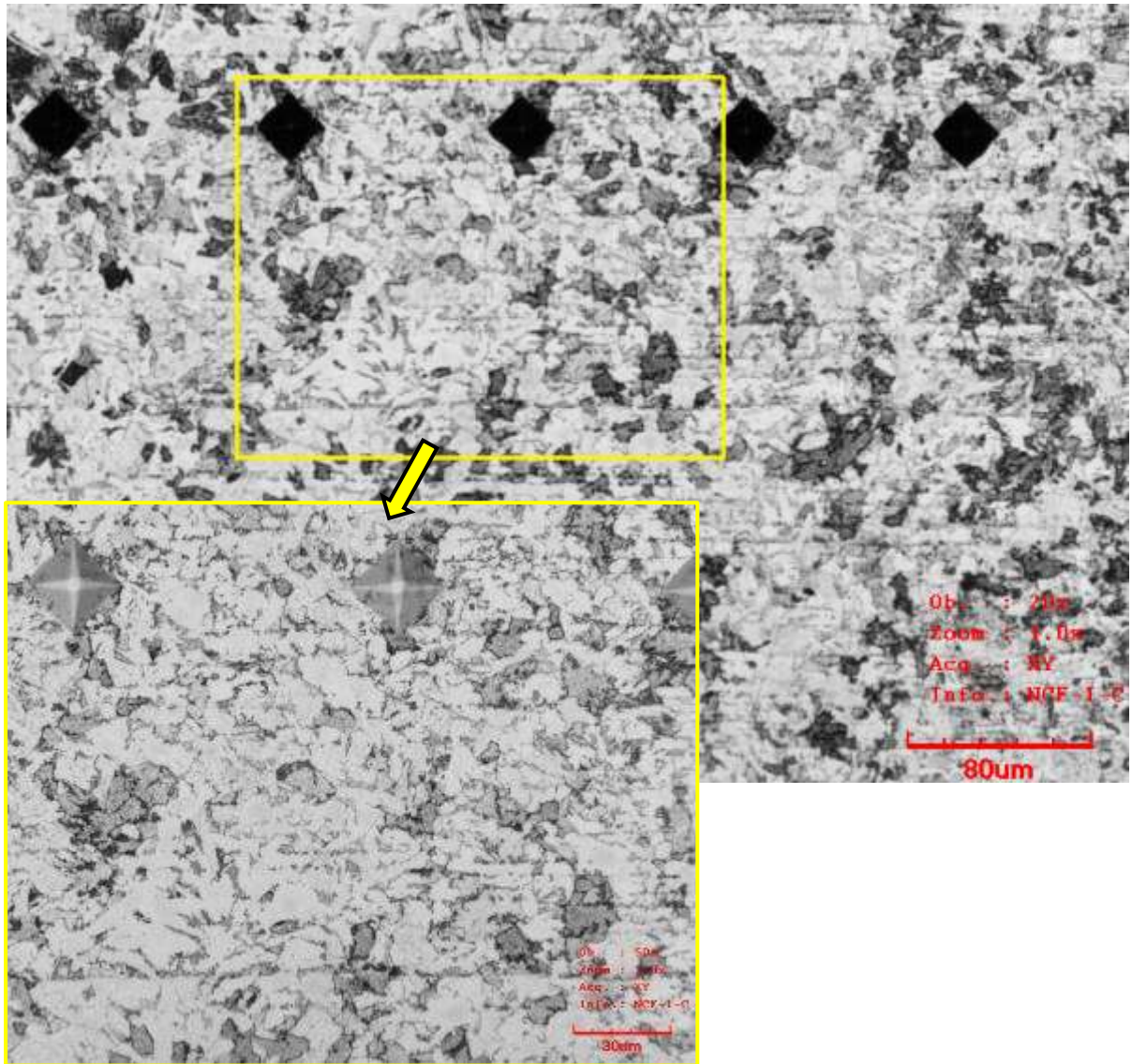
3.4 Vyhodnocení mikrostruktury

Pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT OLS 3100 (obr. 55) na ÚPT AV ČR byly získány mikroskopické snímky za použití zvětšení objektivů – 5x, 10x, 20x, 50x a 100x, tudíž zvětšení bylo v rozmezí od 120x do 2400x. Rozhodující je vždy měřítko, které je na snímcích uvedeno vpravo dole. Vyhodnocována byla jak struktura svarového kovu, tak tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu.

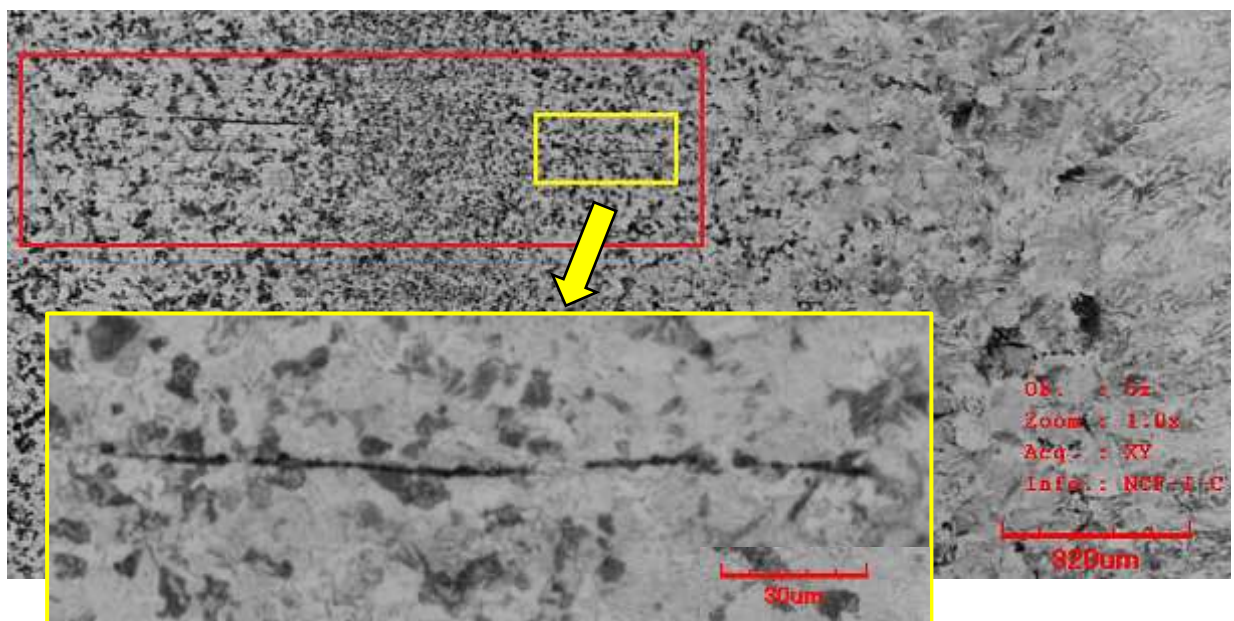
Na obr. 56 je zobrazen mikroskopický snímek základního materiálu S355MC, kde na přiblíženém snímku měřítko vyznačené v pravém dolním rohu činí 30 μm . Ze snímku lze určit, že se jedná o feritickou matici s karbidickými ostrůvky neostrých hranic, které mohou být buď perlitické nebo bainitické. Podle naměřené tvrdosti, která je u základního materiálu nízká, odpovídá struktura spíše feriticko-perlitické. Při prohlížení vzorků téměř na všech byly zjištěny v tepelně ovlivněné oblasti blíže k materiálu S355MC malé trhliny ve vodorovném směru. U svarů je takovýto typ trhlin velmi neobvyklý. Při podrobnějším prozkoumání vzorků bylo zjištěno, že se trhliny vyskytují i v základním materiálu, jak je tomu na obr. 57 ve vyznačeném červeném obdélníku, takže je pravděpodobné, že nevznikly při svařovacím procesu, ale že se v materiálu nacházely už před spojením. Způsobeny mohly být nesprávnou výrobou materiálu, kdy se do materiálu dostaly malé póry, které byly následně rozválcovány na úzké štěrbinny připomínající trhliny.



Obr. 55 Konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS 3100 [123].

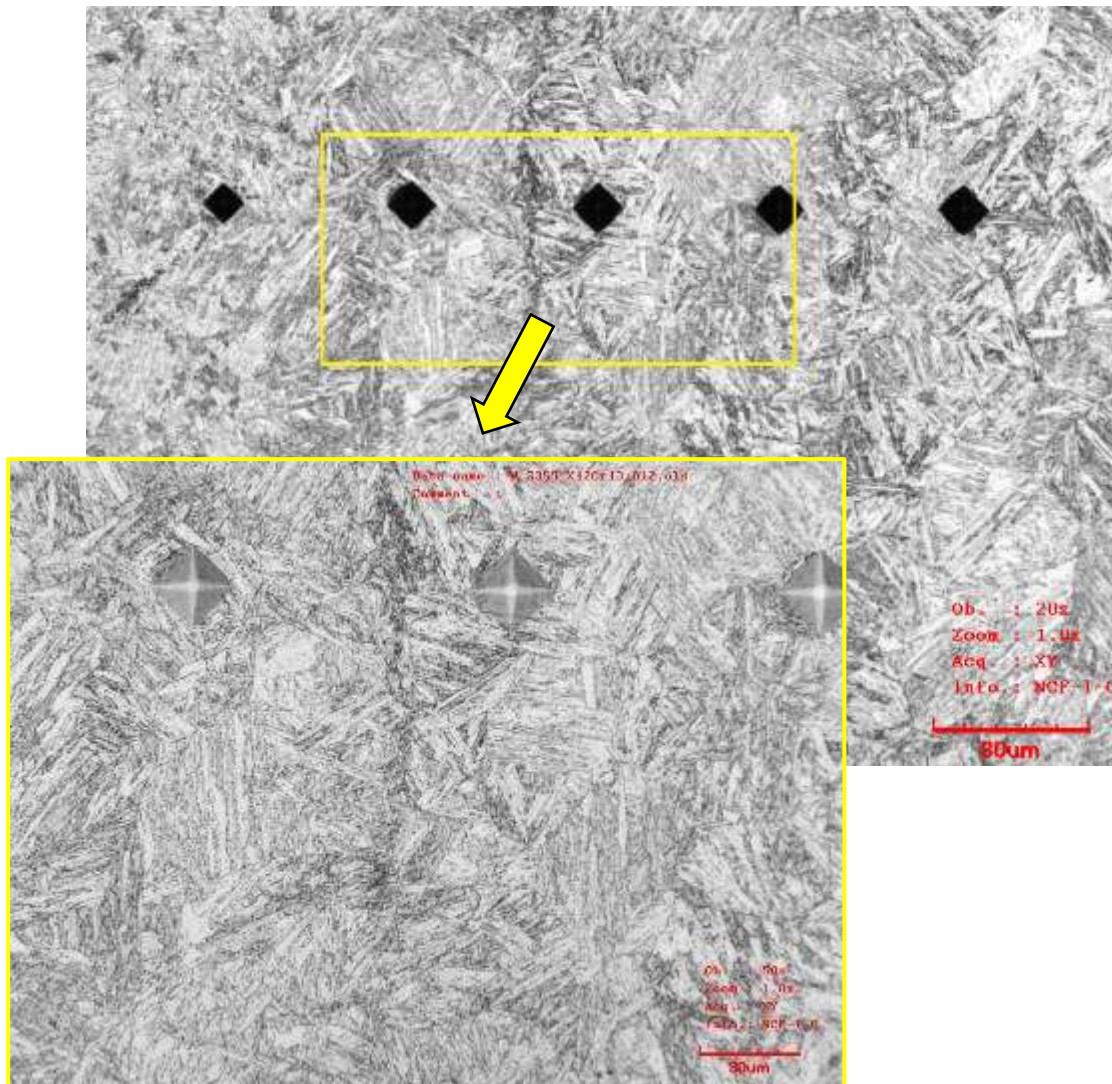


Obr. 56 Mikroskopické snímky základního materiálu S355MC.



Obr. 57 Trhliny v základním materiálu S355MC a v tepelně ovlivněné oblasti.

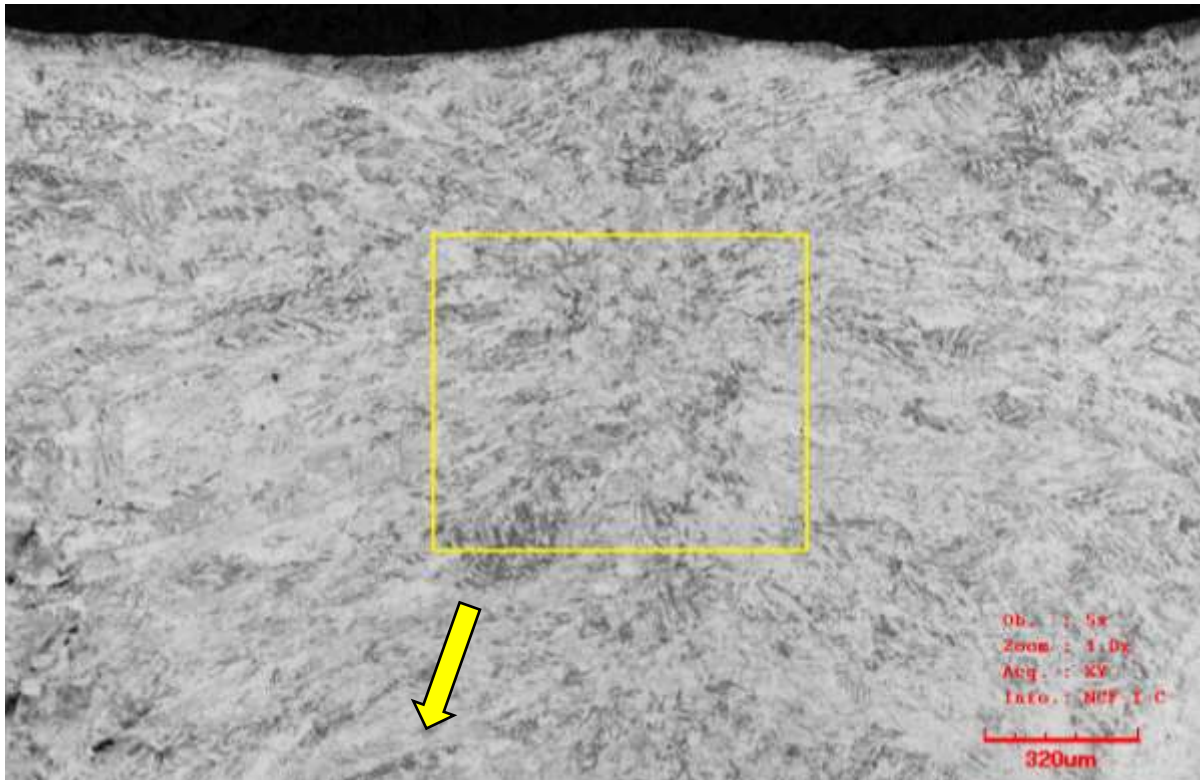
Snímek struktury materiálu X12Cr13 je zobrazen na obr. 58. Ocel je tvořena jehlicovou martenzitickou strukturou s většími karbidy, protože teplota kalení dosahovala nižších hodnot (950 °C), takže rozpustnost karbidů byla omezena. Zároveň při výrobě bylo použito kalení s ochlazením na vzduchu namísto do oleje, takže ochlazovací rychlost byla nižší a mohlo dojít k precipitaci karbidů na hranicích zrn.



Obr. 58 Jehlicová martenzitická struktura materiálu X12Cr13 s karbidy.

V lící struktuře ve svarovém kovu u vzorku č. 1 (obr. 59) lze po přiblížení vidět (obr. 60, obr. 61), že se vyskytují karbidické částice spolu s martenzitem, nebo bainitem. Není možné při použití zmíněného mikroskopu přesně určit strukturu svarového kovu, musel by být využit elektronový mikroskop. Na snímku na obr. 58 je měřítko vpravo dole 30 µm a na obr. 59 je měřítko 15 µm.

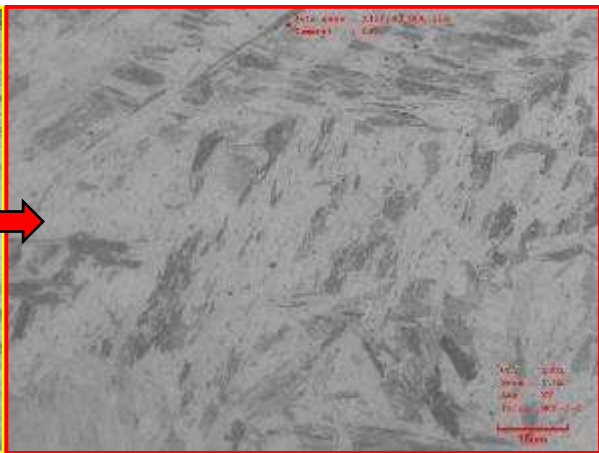
Na obr. 62 (měřítko 320 µm) a 63 (měřítko 160 µm) je zobrazena tepelně ovlivněná oblast u materiálu S355MC. Od základního materiálu, kde se nachází feriticko-perlitická struktura, se směrem ke svarovému kovu mění struktura z jemnozrnné vzniklé při chladnutí žháním a překrystalizací na hrubozrnnější a před svarovým kovem se nachází silně hrubozrnná struktura. V tomto místě je obvykle svar nejnáchylnější na porušení.



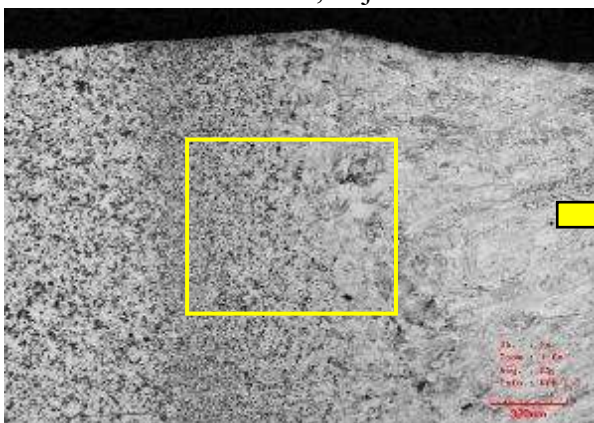
Obr. 59 Mikroskopická struktura svarového kovu vzorku č. 1, objektiv 5x.



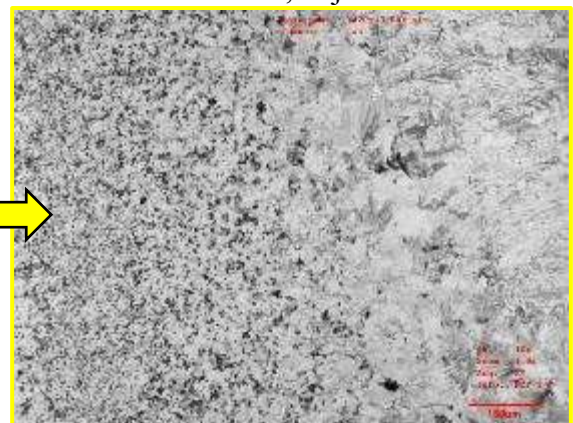
Obr. 60 Mikroskopická struktura svarového kovu vzorku č. 1, objektiv 50x.



Obr. 61 Mikroskopická struktura svarového kovu vzorku č. 1, objektiv 100x.

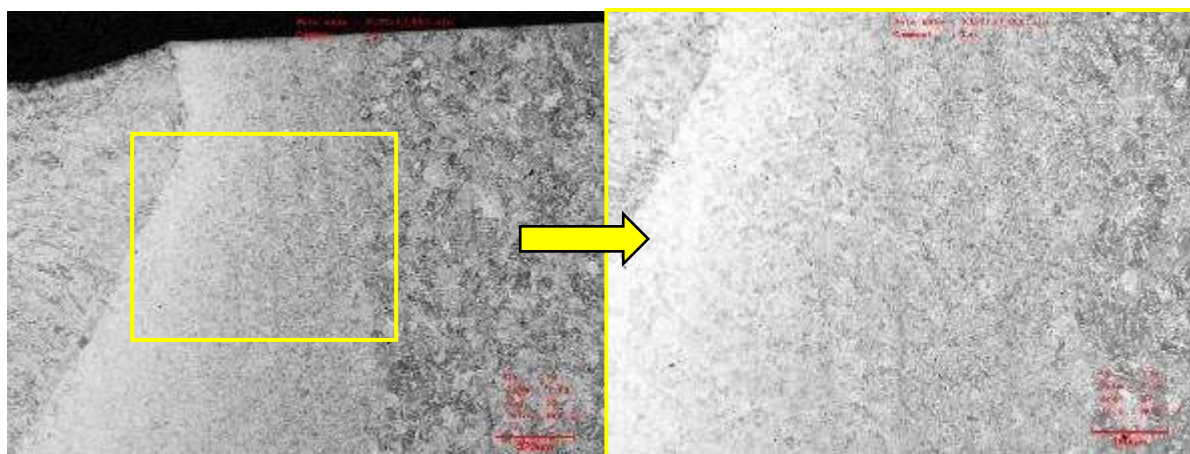


Obr. 62 Tepelně ovlivněná oblast vzorku č. 1 u materiálu S355MC, objektiv 5x.



Obr. 63 Tepelně ovlivněná oblast vzorku č. 1 u materiálu S355MC, objektiv 10x.

Na mikroskopickém snímku (obr. 64) je možné vidět ostrý přechod mezi svarovým kovem a tepelně ovlivněnou oblastí u materiálu X12Cr13. U lící struktury v tepelně ovlivněné oblasti (obr. 65) se vyskytuje vysokopopuštěný martenzit, který je velmi jemnozrný. Směrem k základnímu materiálu klesá jemnost struktury, protože materiál byl zakalen na nižší teplotu a ve struktuře přibývá karbidů. S tím souvisí i pokles tvrdosti materiálu směrem od svarového kovu. Rychlost tuhnutí materiálu způsobila, že pro zhrubnutí zrna zde nebyl prostor. Jelikož je tepelně ovlivněná oblast menších rozměrů, tak nárůst tvrdosti není tak postupný. U obr. 62 je měřítko uvedené vpravo dole 320 μm , u obr. 63 160 μm .

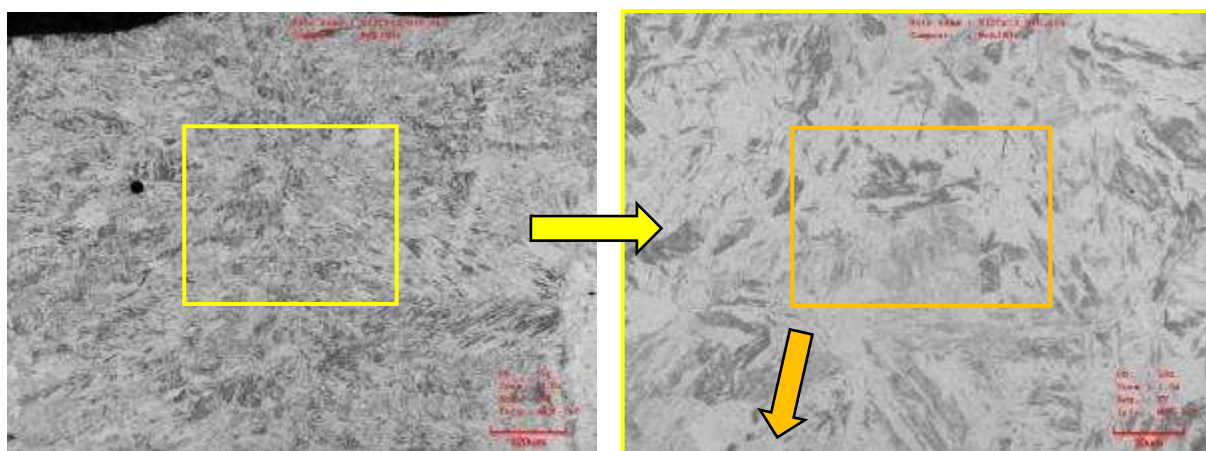


Obr. 64 Tepelně ovlivněná oblast vzorku č. 1 u materiálu X12Cr13, objektiv 5x.

Obr. 65 Tepelně ovlivněná oblast vzorku č. 1 u materiálu X12Cr13, objektiv 10x.

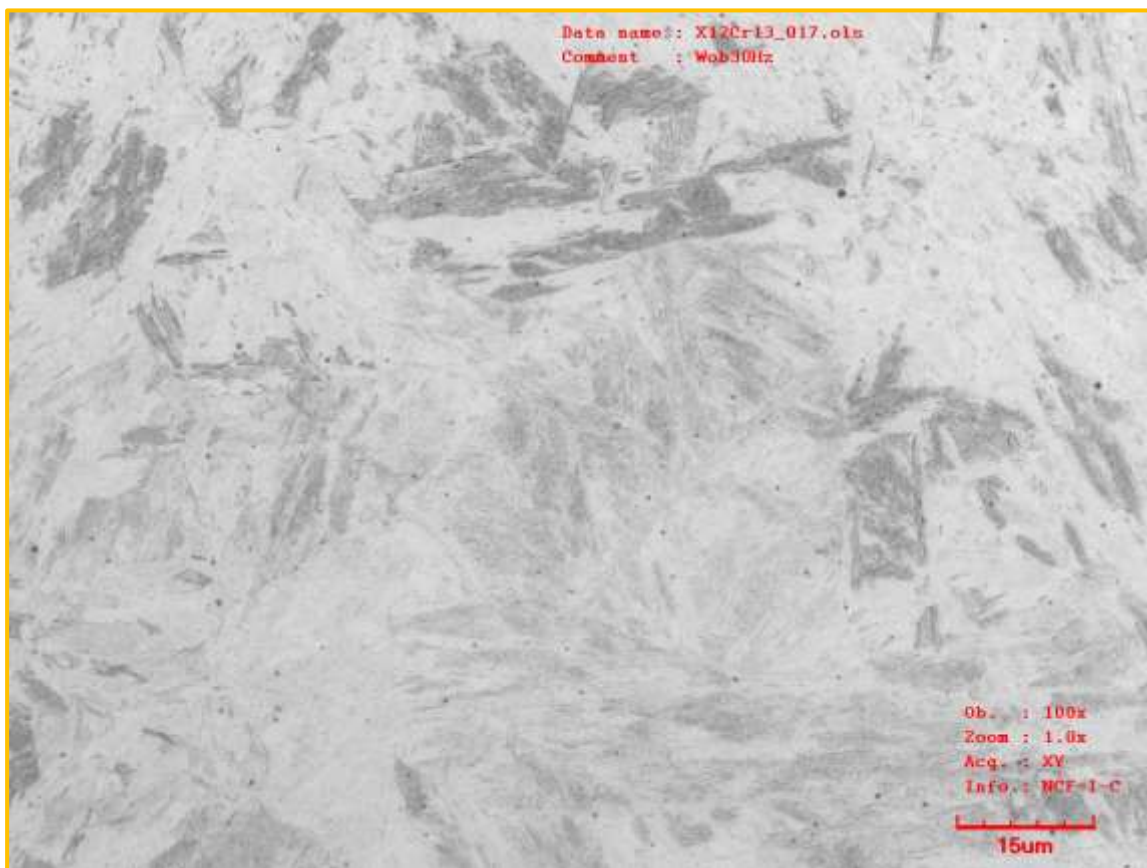
Svarový kov (obr. 66) u vzorku č. 2 není výrazně odlišný od vzorku č. 1. Struktura je opět tvořena martenzitem, avšak pro potvrzení by bylo stále nezbytné použít elektronový mikroskop. Díky použití wobblingu je mikrostruktura zjemnělá a promíchaná. Na obr. 68 jsou opět k vidění karbidické částice v lící struktuře. Měřítka na obr. 66 je 320 μm , na obr. 67 činí 30 μm .

Přechod z feriticko-perlitické struktury základního materiálu k martenzitické struktuře svarového kovu má nejasné hranice způsobené mícháním svarové lázně při spojování. Na obr. 69 lze vidět směrem od základního materiálu zjemnění struktury, ale poté postupné hrubnutí, které je největší u svarového kovu. Hranice mezi lící strukturou, u které martenzitické jehlice nesměřují tak do středu svarového kovu, a tepelně ovlivněnou oblastí se zhrubnými zrny je téměř nerozeznatelná.

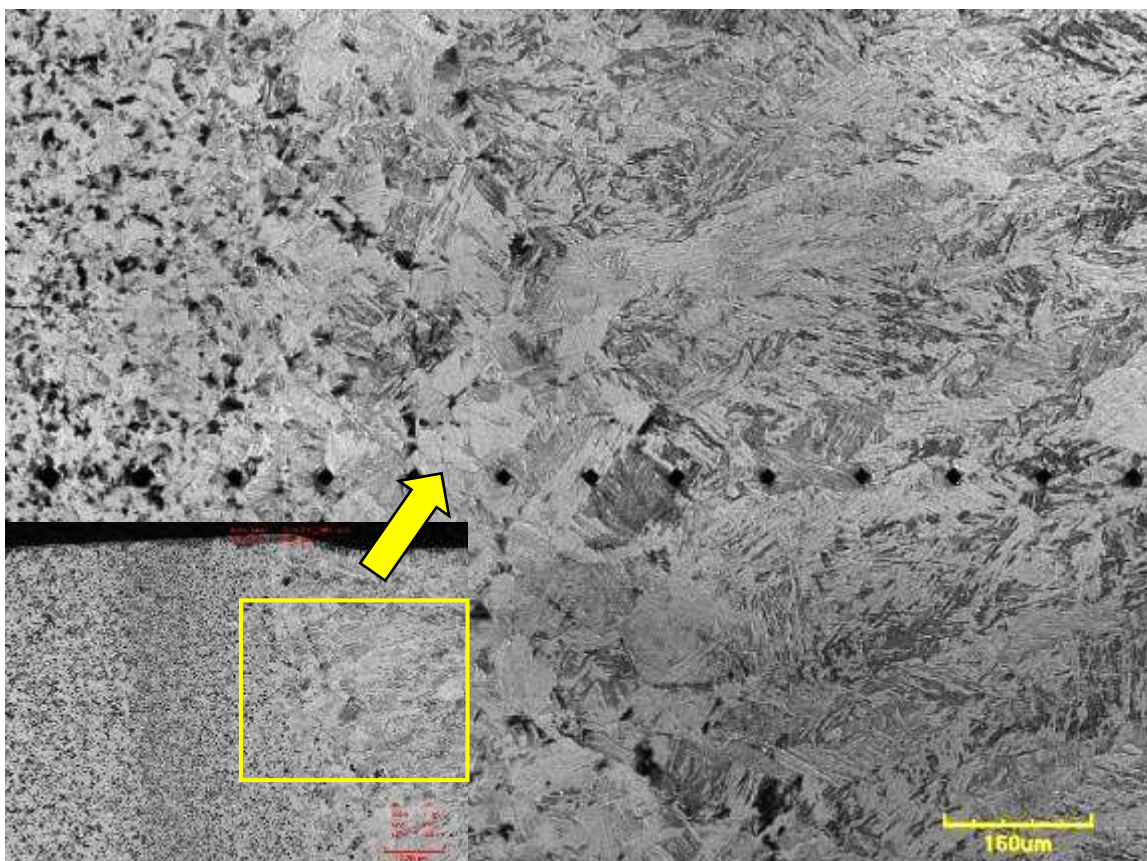


Obr. 66 Svarový kov u vzorku č.2, objektiv 5x.

Obr. 67 Svarový kov u vzorku č. 2, objektiv 50x.

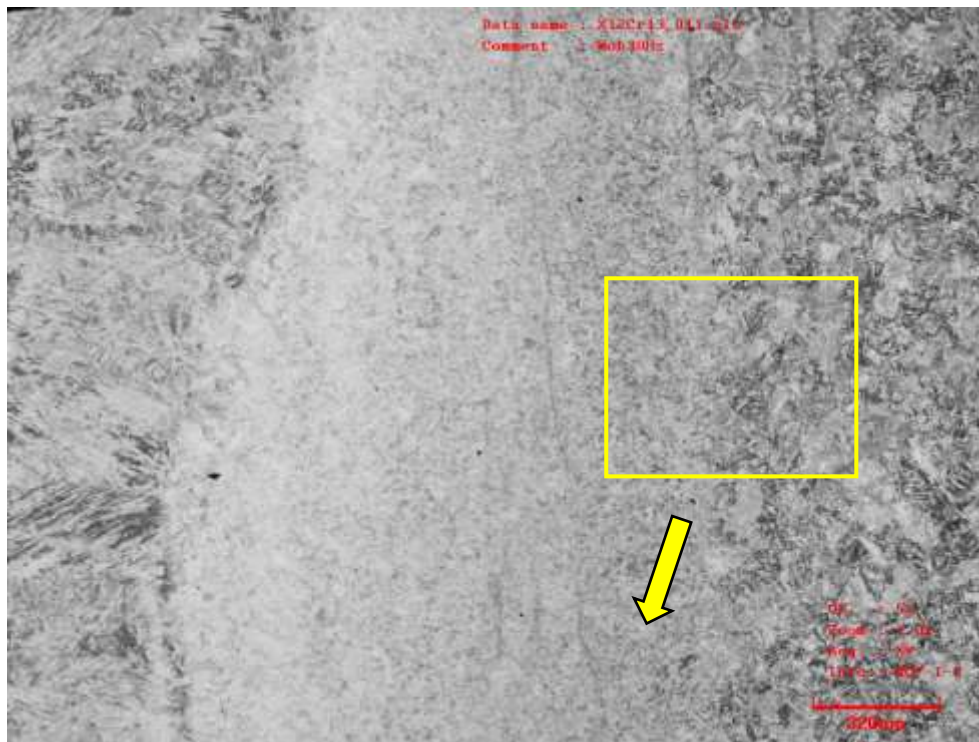


Obr. 68 Svarový kov u vzorku č. 2, objektiv 100x.

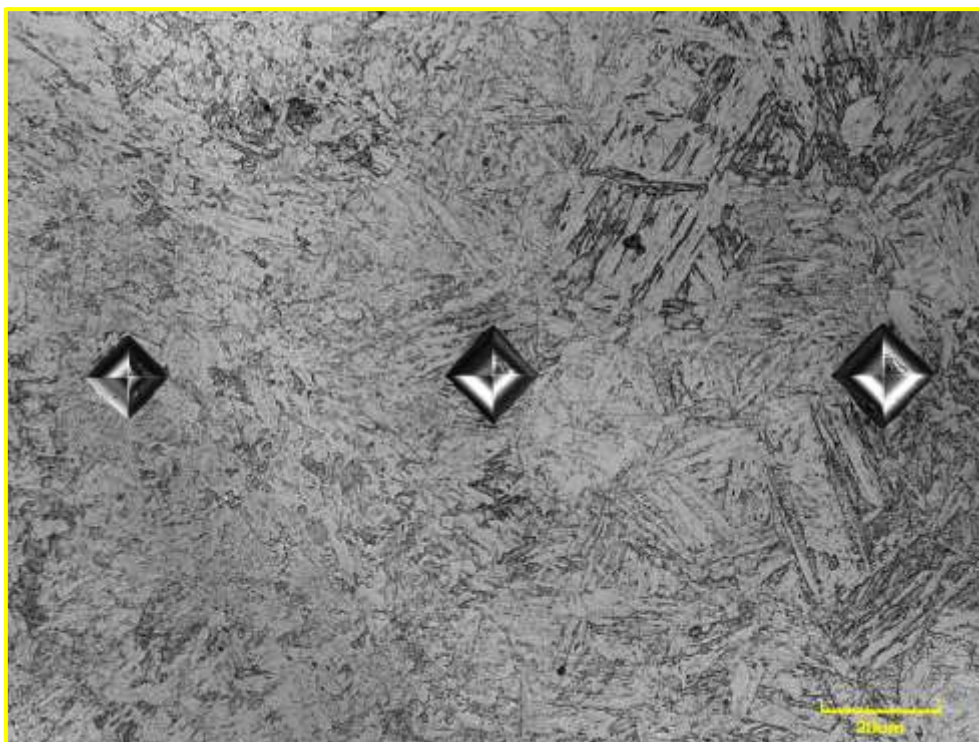


Obr. 69 Tepelně ovlivněná oblast materiálu S355MC a svarový kov vzorku č. 2.

Pomalejší rychlost ochlazování je znatelná na mikrostruktuře tepelně ovlivněné oblasti materiálu X12Cr13 (obr. 70). Martenzit u svarového kovu není tak jemnozrný, jak tomu bylo u předchozího vzorku. Směrem k základnímu materiálu klesá i zakalenost martenzitu. Hranice mezi svarovým kovem a tepelně ovlivněnou oblastí je oproti předchozímu vzorku méně ostrá a nelze ji s vysokou přesností určit. Na obr. 71 je dobře viditelný přechod struktur z jemnozrnější na jehlicovou základního materiálu, s čímž souvisí i pokles tvrdosti, tudíž vtisky v materiálu se zvětšují (je snazší je do materiálu provést). Měřítko uvedené na obr. 70 je 320 μm , na obr. 71 činí 30 μm .



Obr. 70 Tepelně ovlivněná oblast vzorku č. 2 u materiálu X12Cr13.

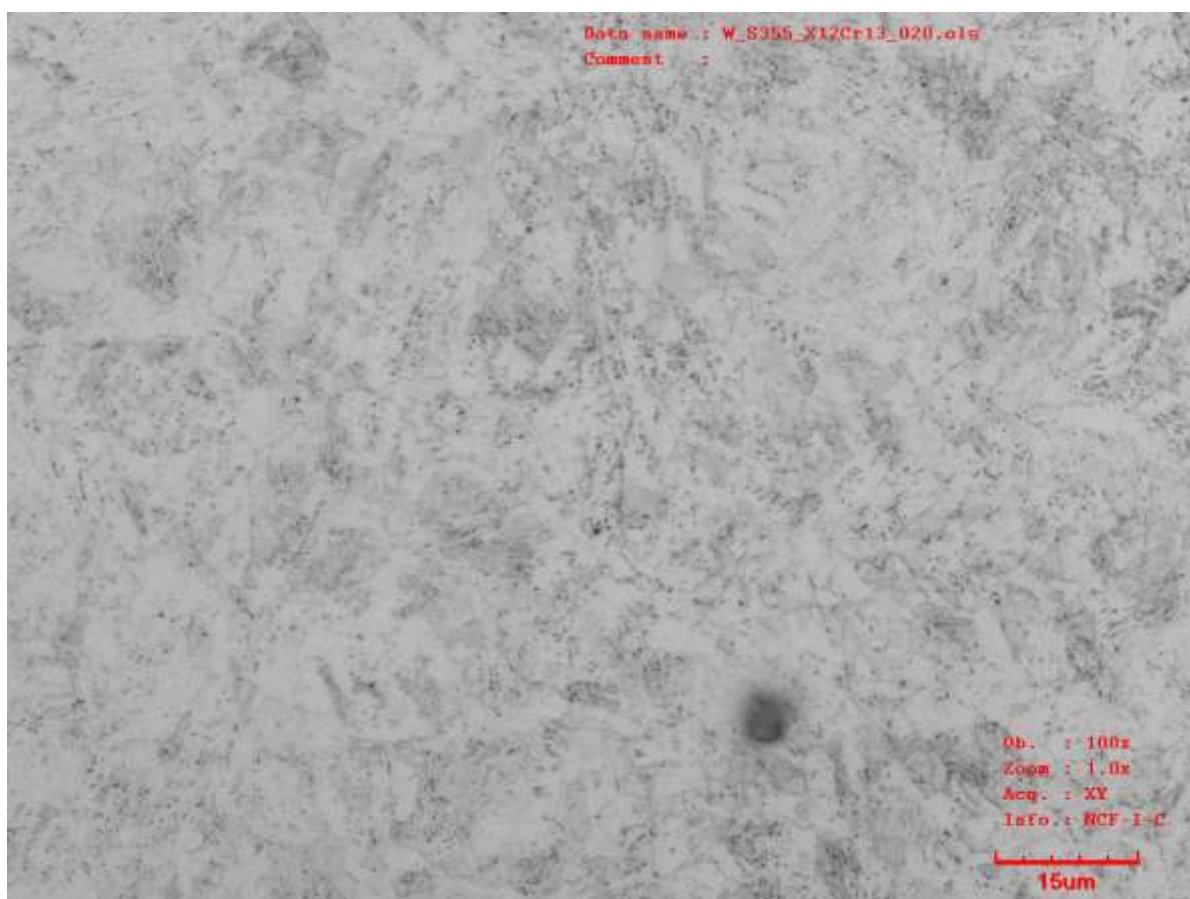


Obr. 71 Změna struktury z tepelně ovlivněné oblasti do základního materiálu.

Mikrostruktura svarových kovů je u zbylých vzorků téměř shodná – martenzitická. Lze uvažovat i o bainitu, ale je možné, že se jedná pouze o natočený martenzit, který je barevně odlišný (tmavší) od ostatního. Jak už bylo zmíněno, pro přesnější posouzení je nutné prohlédnutí mikrostruktury pod elektronovým mikroskopem. Tepelně ovlivněná oblast je také stejná jako u vzorku č. 2. Rovněž došlo ke zhrubnutí zrna u svarového kovu a směrem k základnímu materiálu je struktura jemnější. U vzorku č. 6 je hrubozrnná oblast v tepelně ovlivněné oblasti širší oproti ostatním vzorkům. U materiálu X12Cr13 vykazuje tepelně ovlivněná oblast podobné vlastnosti jako u předchozích vzorků. Příklad martenzitické struktury s karbidy je použit ze vzorku č. 4 a je zobrazena na obr. 72.

U vzorku č. 4 bylo už z makroskopie zjištěno větší množství pórů. Po prohlédnutí struktury pod mikroskopem byly zjištěny ještě mále póry ve větší míře, které se vyskytovaly kromě svarového kovu i na hranici s tepelně ovlivněnou oblastí. Kromě trhlin způsobených při výrobě materiálu S355MC nebyly žádné další ve svarovém spoji zaznamenány. Místa, která vypadala jako trhliny, byla pouze tvořena shlukem karbidů. Výše zmíněné a popsané struktury vzorků č. 3, 4, 5 a 6 jsou uvedeny v příloze 6.

Hlavní rozdíl zaznamatelný mezi vzorky č. 2, 3 a 4, u kterých byly svary provedeny wobblingem s odlišnou frekvencí, je výskyt malých pórů, který roste spolu se zvětšující se frekvencí kmitání spotu. Možná je i případná změna struktury svarového kovu způsobená pomalejším chladnutím kovu při vyšší frekvenci.



Obr. 72 Martenzická struktura s karbidy v tepelně ovlivněné oblasti vzorku č. 4.

3.5 Zkouška mikrotvrlosti podle Vickerse

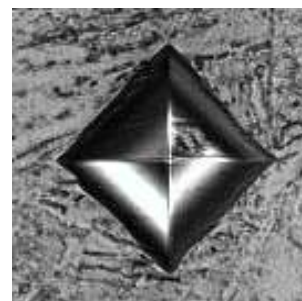
Měření tvrdosti proběhlo na Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1 Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1:



Obr. 73 Mikrotvrdoměr LM 247AT [124].

Zkušební metoda a normou ČSN EN ISO 9015-2 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti – Část 2: Zkoušení mikrotvrlosti svarových spojů.

Zkouška byla provedena na automatickém mikrotvrdoměru LM 247AT firmy LECO (obr. 73), který je vybaven softwarem pro automatické měření AMH 2000 od totožného výrobce. Vtisky (obr. 74) byly provedeny automaticky s tím, že parametry vzdálenosti byly nastaveny takto: 2 mm od viditelného rozhraní základního materiálu a tepelně ovlivněné oblasti



Obr. 74 Vtisk od zatěžující síly.

(z obou stran), 1 mm od líce svaru a rozestupy mezi vtisky činily 0,1 mm. Vzdálenost od hranice základního materiálu a tepelně ovlivněné oblasti se volí větší, protože je často ovlivněn i materiál za viditelným rozhraním vlivem vneseného tepla. Linie vtisků byla zvolena v tomto případě přibližně do jedné třetiny materiálu od

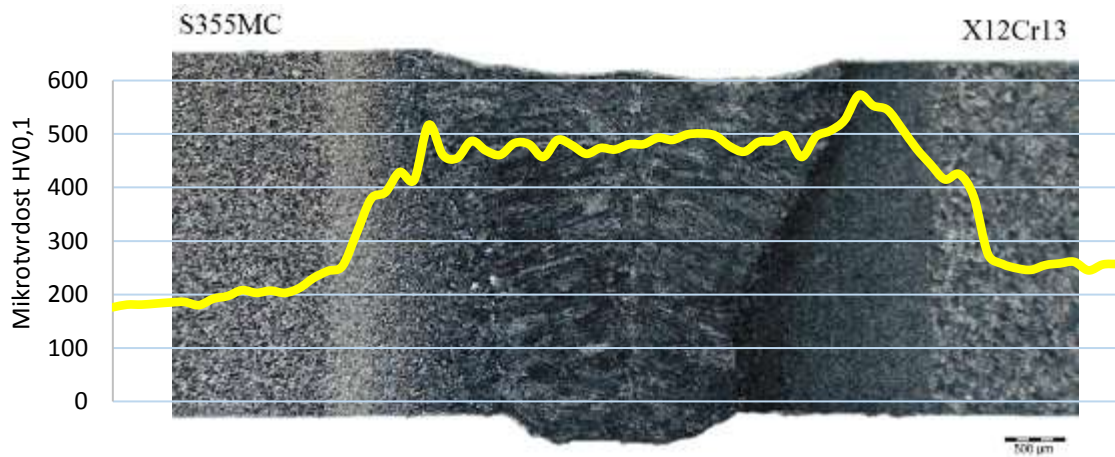
okraje líce svaru. Cílem je obsáhnout všechny přechody mezi oblastmi základních materiálů, TOO a svarových kovů, aby byly zjištěna minimální a maximální tvrdost. Pro vytvoření vtisků byl použit diamantový indentor tvaru čtyřbokého jehlanu, který vyvolal zatěžující sílu 1 N odpovídající zatížení závažím o 100 g (označení mikrotvrlosti HV0,1) a působil na materiál po dobu 10 s. Protokoly o provedených zkouškách jsou uvedeny v příloze 7. Pro lepší přehlednost byly vybrány jen některé hodnoty tvrdosti, zaneseny do grafu a následně do makroskopických snímků pořízených na stereomikroskopu Olympus SZ61.

Na všech snímcích jsou vpravo dole uvedena měřítka 500 μm . Na obr. 75 je zaznamenána tvrdost svarového spoje vzorku č. 1. Naměřená tvrdost materiálu S355MC osciluje přibližně okolo hodnoty 190 HV0,1, což odpovídá feriticko-perlitické struktuře. Martenzitická ocel dosahuje hodnot tvrdosti okolo 260 HV0,1. V inspekčních certifikátech nejsou tvrdosti materiálů uvedeny, takže hodnoty nelze porovnat. Maxima 573 HV0,1 je dosaženo v TOO, kde se nachází vysokopopuštěný martenzit, jehož struktura je velmi jemnozrná. V této oblasti by bylo vhodné provést vrubovou zkoušku houževnatosti a zjistit velikost nárazové práce a charakter lomu. Pokud by byla vrubová houževnatost v okolí vysokopopuštěného martenzitu nízká, což by se dalo předpokládat vzhledem k vysokým hodnotám tvrdosti, pak by bylo nezbytné po svařování zařadit tepelné zpracování (žihání, nebo popouštění), díky kterému by došlo k nárůstu houževnatosti, ale na úkor snížení tvrdosti a také pevnosti materiálu. Zároveň by došlo i k odstranění vnitřních pnutí a křehkosti.

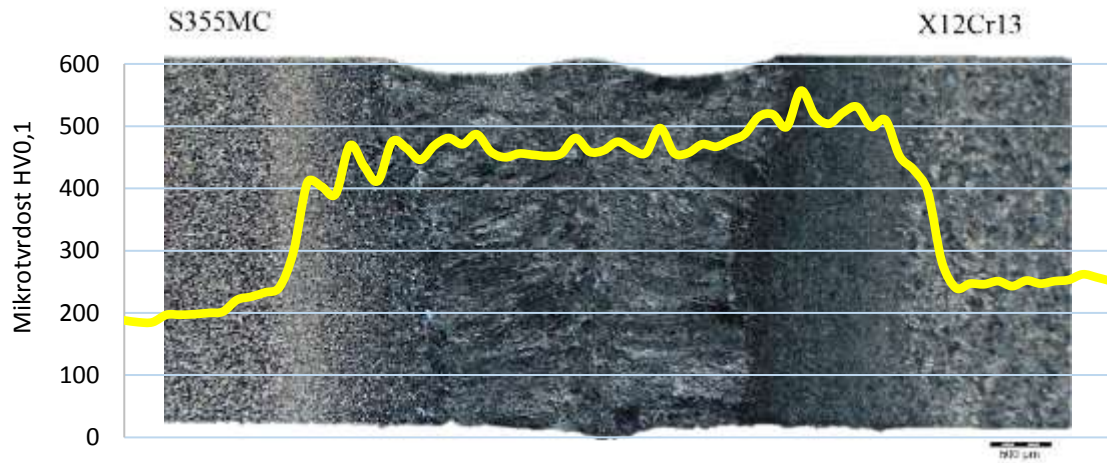
Mikrotvrdot zbylých vzorků je zobrazena na následujících obr. 76, 77, 78, 79 a 80. Maximální tvrdosti všech vzorků jsou uvedeny v tab. 19.

Tab. 19 Maximální tvrdost vzorků.

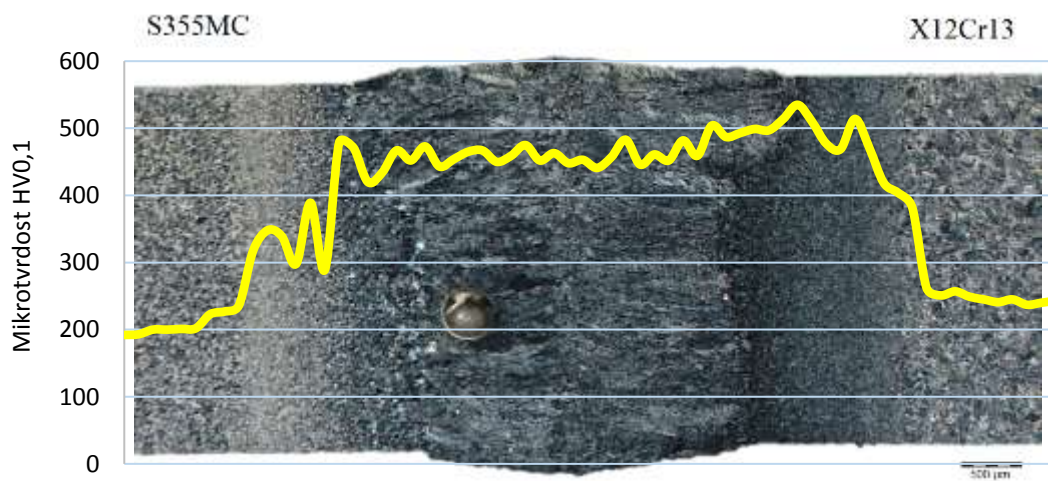
| Vzorek č. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Max. tvrdost [HV0,1] | 573 | 557 | 535 | 545 | 576 | 553 |



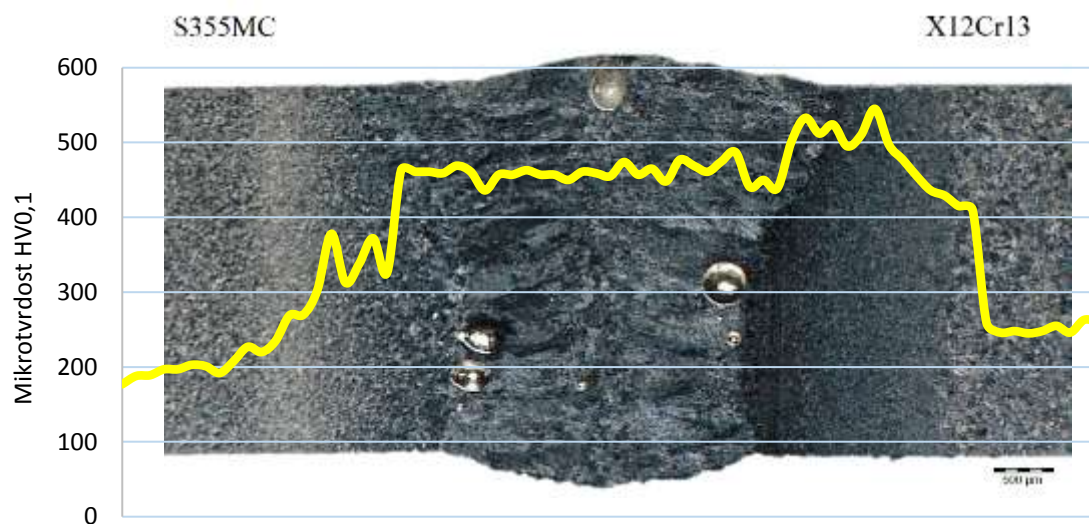
Obr. 75 Mikrotvrđost vzorku č. 1.



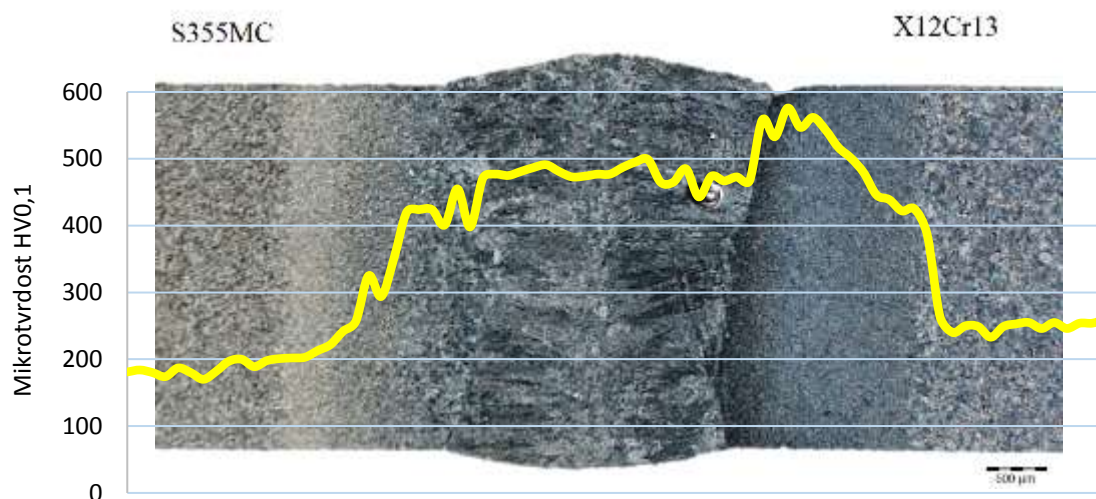
Obr. 76 Mikrotvrđost vzorku č. 2.



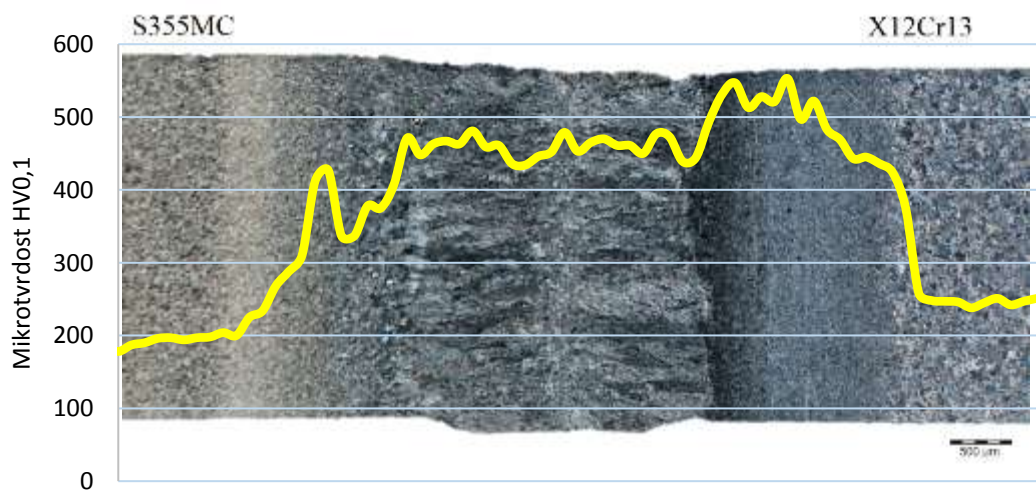
Obr. 77 Mikrotvrđost vzorku č. 3.



Obr. 78 Mikrotvrđost vzorku č. 4.

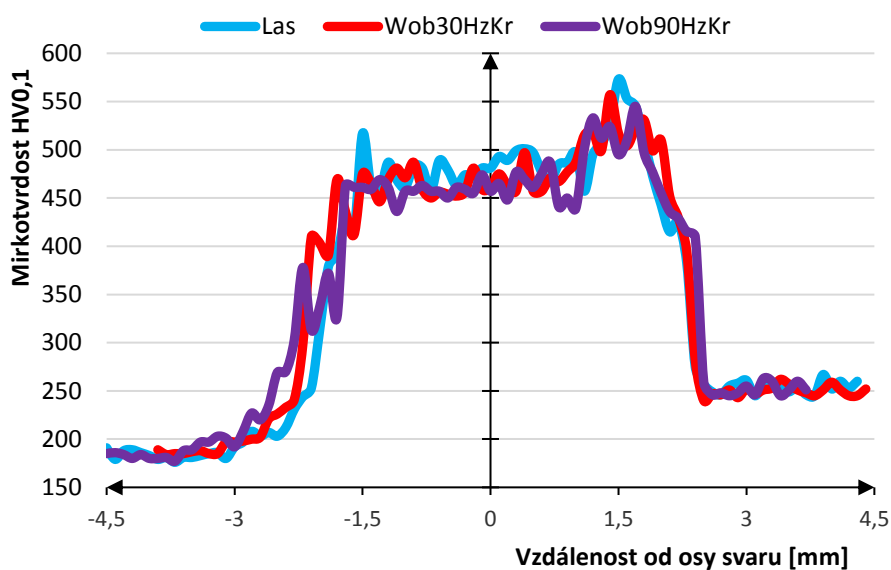


Obr. 79 Mikrotvrđost vzorku č. 5

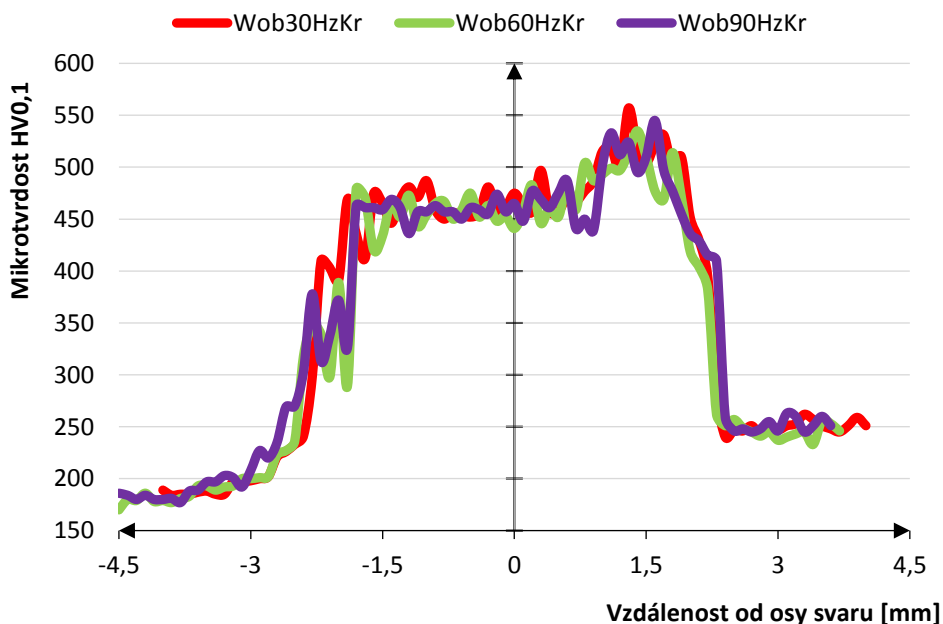


Obr. 80 Mikrotvrđost vzorku č. 6.

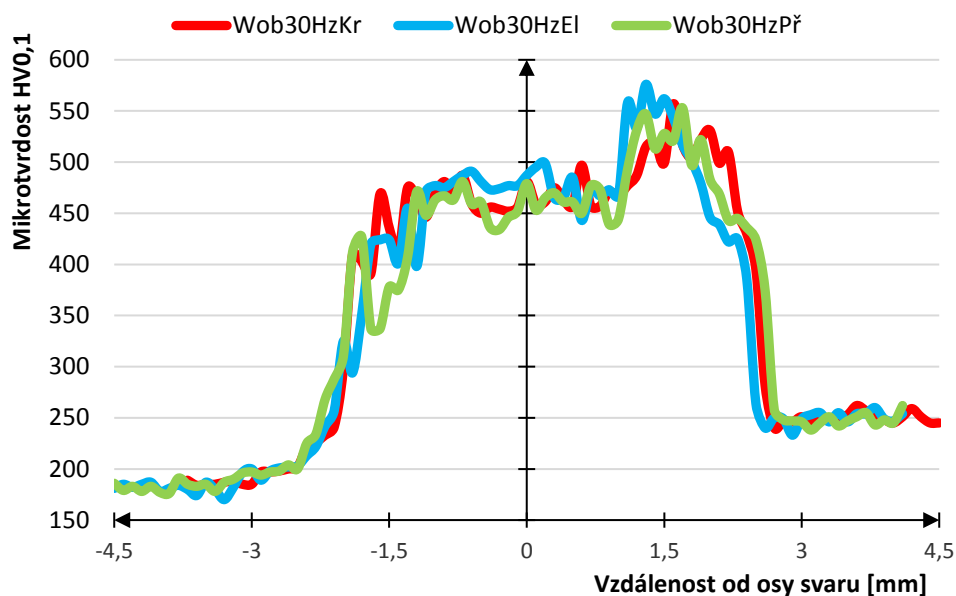
Do grafů nebyly využity všechny naměřené hodnoty. Tvrdosti v základních materiálech, které měly téměř konstantní průběh byly odebrány, aby bylo možné graf vložit do makroskopických struktur. Kompletní grafy jsou uvedeny v příloze 7 v protokolech o provedených zkouškách. Tvrdost základních materiálů získaná z ostatních vzorků odpovídá hodnotám naměřeným u vzorku č. 1. Maximální hodnoty tvrdostí vzorků jsou jen nepatrně odlišné. Rozdílný je však přechod hodnot, kdy u vzorků č. 4, 5 a 6 je více stupňovitý. Pro srovnání jsou vloženy do jednoho grafu hodnoty tvrdosti vzorků provedených bez a s wobblingem (obr. 81), dále tvrdosti vzorků spojených kruhovým wobblingem při různých frekvencích (obr. 82) a v posledním grafu (obr. 83) jsou porovnány tvrdosti vzorků vzniklých při wobblingu o frekvenci 30 Hz za použití různých druhů triviálních křivek – kružnice, elipsy a přímky.



Obr. 81 Porovnání tvrdostí u vzorků spojených s i bez použití wobblingu.



Obr. 82 Porovnání tvrdostí u vzorků spojených wobblingem s různou frekvencí.



Obr. 83 Porovnání tvrdostí u vzorků spojených wobblingem s frekvencí 30 Hz s odlišnými tvary primitivních křivek.

Z grafů lze vyčíst, že nejvíce odlišné jsou křivky tvrdostí u vzorků, kde byly použity různé primitivní křivky při wobblingu. Nicméně celková rozdílnost naměřených tvrdostí není výrazná, a proto z hlediska tvrdosti lze použít jakoukoliv výše provedenou techniku svařování.

K lepšímu a přesnějšímu vyhodnocení svarů by napomohly výsledky zkoušky vrubové houževnatosti. Z nich by bylo možné určit případné další operace nezbytné pro zajištění požadované kvality svaru.

4 ZÁVĚRY

Pro výrobu stacionárních lopatek rozváděcích kol parních turbín je používána korozivzdorná martenzitická ocel X12Cr13 a uhlíková ocel S355MC a k jejich spojení se používá metoda TIG. Svarové spoje ale často nedosahují požadované kvality a proces svařování je časově náročný. Proto byl proveden experiment, při němž byly materiály spojeny tupým svarem pomocí laserového svařování s rozmítáním svazku a byl pozorován vliv procesních parametrů na vlastnosti heterogenního spoje. Zhotoveno bylo 6 vzorků o tloušťce 3 mm bez použití předeřevu a mezi měněné vstupní parametry patřil tvar primitivní geometrie rozmítací křivky a frekvence kmitání spotu.

Jeden ze vzorků byl svařen pouze konvenční metodou laserového svařování, na zbylé bylo aplikováno rozmítání svazku. U třech vzorků byla nastavena kružnice jako tvar primitivní geometrie rozmítací křivky a frekvence spotu dosahovala 30 Hz, 60 Hz a 90 Hz. Zbylé dva vzorky byly svařeny při frekvenci 30 Hz za použití elipsovitého a přímkového tvaru rozmítací křivky.

Vizuální zkouškou byl shledán rozstřík materiálu a u dvou vzorků nedošlo k provaření kořene svaru, ale pouze v určité oblasti svařovaného materiálu. Důvodem neprůvaru byla nečistota, která se uchytila mezi procesy svařování na ochranném skle skenerové hlavy. Žádné další vady nebylo možné touto zkouškou odhalit, proto se přistoupilo k provedení metalografických výbrusů, aby mohly být vzorky podrobeny makroskopické a mikroskopické kontrole.

Ze snímků makrostruktur byly určeny šířky TOO a svarů v kořenové a lící oblasti, svarové vady a propad, nebo převýšení svarového spoje. Makroskopickou kontrolou bylo zjištěno, že se zvyšující se frekvencí spotu je do materiálu vnášeno větší množství tepla, tudíž se zvětšuje šířka tepelně ovlivněné oblasti, případně i svaru a zároveň je tavnou lázní více mícháno, což zapříčiňuje větší výskyt bublin, které se ve vysoce viskózní chromové lázni špatně pohybují, a tak po ztuhnutí obsahuje svarový kov větší množství jak velkých, tak malých pórů. U konvenčně, elipsovým wobblingem a kruhovým wobblingem (90 Hz) spojených ocelí byly zaznamenány propady/převýšení horní oblasti svaru, nebo převýšení kořene svaru. Kromě zmíněných vad a vrubu u vzorku svařeného elipsovým rozmítáním svazku nebyly na snímcích odhaleny žádné další vady. Po zhodnocení všech zmíněných parametrů byla zvolena jako vhodná frekvence 30 Hz a tvar triviální rozmítací křivky přímka ve směru svařování, nebo kružnice. Metalografické výbrusy byly zhotoveny pouze v jednom místě svaru. Pro potvrzení výsledků je vhodné provést preparaci vzorku i z jiných částí.

Následnou kontrolou mikrostruktury byly odhaleny trhliny v základním materiálu S355MC, které do něj musely být vneseny již při výrobě. Uhlíková ocel je tvořena feriticko-perlitickou strukturou a ocel X12Cr13 obsahuje jehlicovou martenzitickou strukturu s karbidy, jejichž větší velikost je způsobena volbou teplot při zušlechťování při výrobě. Mikrostruktura všech vzorků je obdobná. Na všech se vyskytuje vysokopopuštěný martenzit s jemnozrnnou strukturou u svarového kovu. Jemnozrnnost ale vlivem nižší kalící teploty směrem k základnímu materiálu X12Cr13 klesá. Z druhé strany svarového kovu v TOO materiálu S355MC se nachází hrubozrnná struktura. Lící struktura je tvořena martenzitem, nebo bainitem a karbidickými částicemi. Pro přesné stanovení by muselo být využito elektronového mikroskopu.

Poslední provedenou zkouškou byla zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse. Hodnoty tvrdosti všech vzorků si jsou velmi podobné. Maxima je dosaženo v jemnozrnné oblasti martenzitu, kde by bylo nejvíce vhodné provést také zkoušku vrubové houževnatosti. Ze získaných výsledků by poté bylo možné určit, zda bude nutné následné tepelné zpracování.

Ke svařování martenzitické korozivzdorné oceli a uhlíkové oceli je vhodné užití rozmítání svazku o nižší frekvenci (30 Hz), kde jako tvar triviální geometrie rozmítací křivky je nastavena přímka, nebo kružnice. Další procesní parametr, který by mohl mít na vlastnosti svaru vliv, ale nebyl v této práci řešen, je posuvová rychlost paprsku, která byla nastavena na $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [127]

1. KLÍMA, Petr. *Parní turbíny* [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=63980. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jan Fiedler.
2. ČÍPEK, Petr. *Parní turbína* [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67099. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jan Fiedler.
3. KISSLER, Martin. *Použití parních turbín* [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=63965. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jan Fiedler.
4. *Doosan Škoda Power* [online]. Plzeň, ©2019 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <http://www.doosanskodapower.com>
5. *Ekol* [online]. Brno, ©2019 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <http://www.ekolbrno.cz>
6. *Siemens* [online]. Praha, ©1996-2019 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/cz/cz.html>
7. MRŇA, Libor. Osobní rozhovor s vedoucím diplomové práce. Brno, 8. 2. 2019.
8. TIG Welding: Top-Quality Connections. In: *Fronius* [online]. Pettenbach: Fronius International, ©2006-2018, 11. April 2018 [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: <https://blog.perfectwelding.fronius.com/en/tig-welding-top-quality-connections/>
9. Steam Turbine Generating System. *Mitsui E&S* [online]. Tokyo, [2019] [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.mes.co.jp/english/business/infra/industrial/detail802.html>
10. ZAVORAL, Libor. Uhelná elektrárna Počerady se prodávat Tykačovi nebude, dozorčí rada ČEZ to neschválila. *Česká televize* [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/ekonomika/2122950-uhelna-elektrarna-pocerady-se-prodavat-tykacovi-nebude-dozorci-rada-cez>
11. DIMYADI, Hywit. Rotor parní turbíny. In: *Rotana* [online]. Velké Meziříčí, 2013 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: https://www.rotana.cz/files/image/Fotolia_56159073_S.jpg
12. MATOUŠ, Pavel. *Obrábění pro energetický průmysl – Komponenty parních turbín* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/2597/1/BP11-12_MATOUS_Obrabeni_pro_energeticky_prumysl.pdf. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Zdeněk Janda.
13. ŠAMALÍK, Jakub. *Parní turbína* [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30307730.pdf>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jan Fiedler.
14. View of the Stationary Blade Holders. In: *Belzona* [online]. Harrogate, ©2019, August, 2006 [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: https://khia.belzona.com/images/hwidjaja_905157_1.jpg

15. Practical Welding Letter: PWL#132 - Maintenance and Repair, Vacuum Aluminum Brazing, Controlling Distortion with Filler Metal. *Welding-advisers* [online]. 2014 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: https://www.welding-advisers.com/PRACTICAL_WELDING_LETTER-PracticalWeldingLetterNo132.html
16. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
17. Rozdíl mezi MIG nebo MAG. *Svartop* [online]. Město Touškov, ©2019 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.svartop.cz/clanky/rozdil-mezi-mig-nebo-mag/>
18. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s.: il.; 30 cm. ISBN 80-85771-85-3.
19. Ruční obloukové svařování. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Ru%C4%8Dn%C3%AD_obloukov%C3%A9_sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD
20. MRŇA, Libor. Aktuální možnosti v laserovém svařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2018, 2018(1) [cit. 2019-02-10]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-moznosti-v-laserovem-svarovani.html>
21. Svařování MIG/MAG. *BV Group* [online]. Plzeň, ©2019 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <http://www.bvgroup.cz/svarovani-mig-mag.php>
22. CYZEWSKI, Ed. Mig Welding Advantages, Disadvantages. *Baker's Gas & Welding Supplies* [online]. Wauseon, ©2019 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.bakersgas.com/mig-welding-advantages-disadvantages.php>
23. REED, Brian. MIG vs TIG: The difference between MIG and TIG welding explained. *Fairlawn Tool* [online]. Westminster, ©2016, 1 May 2016 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.fairlawntool.com/blog/mig-vs-tig-welding/>
24. *Příručka svářeče: Pro svařování v ochranné atmosféře a tepelné dělení plamenem*. Děčín. Dostupné také z: http://www.airproducts.cz/~media/Files/PDF/industries/metals/CZ_Priruckasvarece.pdf?la=cs-CZ
25. TEPLÝ, Jan. *Analýza svařování Laserhybridem*. Brno, 2010, 44 s. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28219. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Petr Kovář.
26. Svařování metodou ROS 111. *Ostroj* [online]. Opava, ©2012 [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <http://www.ostroj.cz/svarovani-metodou-ros-111>
27. DEBS, Martin. *Studium vlastností laserových svarů materiálu Hardox 450 při využití obloukového předehřevu* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=173312. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Libor Mrňa.

28. MRŇA, Libor. *Dělení a svařování svazkem plazmatu* [přednáška]. Brno, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně. 2013. In: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory> [online]. [cit. 2019-02-18] Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_deleni_a_svarovani_plasmou_2013_mrna.pdf
29. MRŇA, Libor. *Svařování svazkem elektronů* [přednáška]. Brno, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně. 2013. In: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory> [online]. [cit. 2019-02-18] Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_svazkem_elektronu_2013_mrna.pdf
30. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser* [přednáška]. Brno, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně. 2013. In: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory> [online]. [cit. 2019-02-18] Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf
31. BENKO, Bernard. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
32. MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky* [přednáška]. Brno, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně. 2013. In: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory> [online]. [cit. 2019-03-25] Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techniky_2013_mrna.pdf
33. MIG-MAG Welding. In: *SAF-FRO* [online]. Barcelona, ©2019 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://www.saf-fro.com/processes/mig-mag-welding-process>
34. Plazmové svařování. In: *Fronius* [online]. Fronius International, ©2019 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/our-expertise/welding-processes/plasma>
35. Electron Beam Welders & Custom EB Welding Solutions. *Sciaky* [online]. Chicago, ©2019 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.sciaky.com/eb-welding-systems/electron-beam-welding-solutions>
36. Penetration laser weld. In: *EB Industries* [online]. Farmingdale, ©2015 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://www.ebindustries.com/conduction-mode-keyhole-mode-welding/?cn-reloaded=1>
37. ČSN EN ISO 4063 (050011). *Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
38. MARKOVÁ, Barbora. *Lasery a jejich biologické účinky* [online]. Hradec Králové, 2016 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwiVt5HQzenhAhWSZVAKHZKPA0kQjRx6BAgBEAQ&url=https%3A%2F%2Fis.cuni.cz%2Fwebapps%2Fzpp%2Fdownload%2F130193741&psig=AOvVaw0B62WRaIoI9ttlydaHgokO&ust=1556225417724885>. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Farmaceutická fakulta v Hradci Králové. Vedoucí práce Monika Kuchařová.

39. DULEY, Walter W. *Laser welding*. New York: A.Wiley-Interscience publication, 1999. ISBN 04-712-4679-4.
40. ROSE, Melinda. A History of the Laser: A Trip Through the Light Fantastic. *Photonics Spectra* [online]. Pittsfield: Laurin Publishing, 2010 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: https://www.photonics.com/Articles/A_History_of_the_Laser_A_Trip_Through_the_Light/a42279#Comments
41. Rozdelenie laserov. *Lascam* [online]. Nitra, 2015 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/sk/rozdelenie-laserov/>
42. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Lasery kapalinové. *Encyklopedie fyziky* [online]. ©2006-2019, 24.9.2008 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/787-lasery-kapalinove>
43. KUSALA, Jaroslav. Typy laserů. *Lasery kolem nás* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
44. Solid-state Lasers. *RP Photonics* [online]. ©2018 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/solid_state_lasers.html
45. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery – Základní princip laseru a jejich dělení. *Lao: Lasery a optika* [online]. Praha, [2014], 19.2.2013 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
46. Diode Stacks. *RP Photonics* [online]. ©2018 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/diode_stacks.html
47. Rod Lasers. *RP Photonics* [online]. ©2018 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/rod_lasers.html
48. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery – Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Lao: Lasery a optika* [online]. Praha, [2014], 19.2.2013 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
49. PASCHOTTA, Rüdiger. *Encyclopedia of laser physics and technology* [online]. Weinheim: Wiley-VCH, c2008 [cit. 2019-04-15]. ISBN 978-3-527-40828-3. Dostupné z: <https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
50. Helium. *Linde Gas: Technické plyny Česká republika* [online]. ©2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.linde-gas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/gases_atmospheric/helium.html
51. CO2 SLAB Lasers: Diffusion cooled with minimal gas consumption. *Rofin* [online]. Hamburg, [2019] [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.rofin.com/en/products/co2-laser/slab-lasers/>
52. Princip vláknového – fiber laseru. *Leonardo Technology: Automatizace průmyslového značení* [online]. Hlohovec, ©2002-2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
53. MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky*. [přednáška]. Brno: Vysoké učení technické, 20.10. 2018.

54. BAZALOVÁ, Lucie. *Porovnání vlastností pevnolátkových laserů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53332. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jaroslav Kubiček.
55. OŠKERA, Jakub. *Femtosekundové lasery a jejich aplikace* [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=129472. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Petr Münster.
56. CO2 laser. In: *Trumpf* [online]. ©2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/co2-laser/
57. Thin-disk laser heads. In: *RP Photonics* [online]. c2008 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/thin_disk_lasers.html
58. Vláknoový laser. In: *Trumpf* [online]. ©2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/vlaknovy-laser/
59. Princip aktivního vlákna. In: *Leonardo Technology: Automatizace průmyslového značení* [online]. Hlohovec, ©2002-2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
60. KUDR, Martin. *Porovnání laserem vytvořených svarů při použití přímé a skenerové svařovací hlavy* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147195. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Libor Mrňa.
61. MRŇA, Libor. Laserové technologie v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2015, **2015**(1), 78 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-technologie-v-prumyslove-praxi.html>
62. SHANNON, Geoff. Laser welding modes: conduction, transition, & keyhole welding. *Amada Miyachi* [online]. Monrovia, ©2015, 19 Jan 2016 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://info.amadamiyachi.com/blog/conduction-transition-and-keyhole-welding-modes>
63. MRŇA, Libor a Petr HORNÍK. Pokročilé metody laserového svařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2017, 2017(3) [cit. 2019-02-10]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrocile-metody-laseroveho-svarovani.html>
64. SLÍŽ, Michal. *Posouzení svarových vad při laserovém svařování s rozmítáním svazku hliníkové slitiny* [online]. Brno, 2018 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=173474. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Libor Mrňa.
65. KAŠPAR, Jan a Stanislav NĚMEČEK. Laserové svařování - posouzení vlivu ochranného plynu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2014, **2014**(1), 118 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani-posouzeni-vlivu-ochranneho-plynu.html>

66. KŘIVAN, Miloš. *Simulace geometrie key hole v závislosti na svařovacích parametrech při laserovém penetračním svařování* [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64721. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Libor Mrňa.
67. WU, Dongsheng, Xueming HUA, Lijin HUANG, Fang LI a Yan CAI. Elucidation of keyhole induced bubble formation mechanism in fiber laser welding of low carbon steel. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2018, **2018**(December), 1081 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931018303636#f0010>
68. F-Theta Lenses Tutorial. *Thorlabs* [online]. ©1999-2019 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10766
69. SAMSON, Bryce, Tony HOULT a Mustafa COSKUN. Fiber laser welding technique joins challenging metals. *Industrial laser solutions: for manufacturing* [online]. 2017 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-32/issue-2/features/fiber-laser-welding-technique-joins-challenging-metals.html>
70. BEA, Martin, Ruediger BROCKMANN a David HAVRILLA. Remote laser welding in automotive production. *Industrial laser solutions: for manufacturing* [online]. 2011 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-26/issue-5/features/remote-laser-welding-in-automotive-production.html>
71. Fiber Rhino. *Arges* [online]. Wackersdorf, [2019] [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.arges.de/industrial-products/2d-scan-heads/fiber-rhino/>
72. NOVÁK, Miroslav. Remote welding: Svařovací metoda s vysokou produktivitou. *Istrojirenstvi.cz* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?nazev=remote-welding&id=22>
73. MÜLLER. *Certificate of material tests according to DIN EN 10204 3.1: 1.4006 X12Cr13*. Freital: BGH Edelstahl Freital, 2017.
74. *ČSN EN 10088-3 (420927). Korozivzdorné oceli. Část 3: Technické dodací podmínky pro polotovary, tyče, dráty, tvarovou ocel a lesklé výrobky z ocelí odolných korozi pro všeobecné použití*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
75. *ČSN EN 1011-3 (052210). Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů. Část 3: Obloukové svařování korozivzdorných ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
76. *ČSN EN 1011-6 (052210). Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů. Část 6: Laserové svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
77. FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8.
78. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálův*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s. : il., čb. fot. ISBN 978-80-227-3167-6.

79. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3.
80. *Materiály a jejich chování při svařování: učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*. Česká svářečská společnost ANB : Český svářečský ústav, 2016, 404 stran : ilustrace.
81. Stainless Steel - Grade 410 (UNS S41000). *Azom* [online]. Manchester, 2001 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=970>
82. CUNAT, Pierre-Jean. *Svařování korozivzdorných ocelí: Materiály a jejich použití, Volume 3* [online]. Lucembursko: Euro Inox, 2007 [cit. 2019-04-27]. ISBN 978-2-87997-177-3. Dostupné z: http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf
83. 410 Martensitic Stainless Steel Bar. *Interlloy: Engineering steels and alloys* [online]. ©2011 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <http://www.interlloy.com.au/our-products/stainless-steel/410-martensitic-stainless-steel-bar/>
84. 410 Welding Wire and Rod. *Washington Alloy Co.* [online]. Charlotte, ©2019 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://weldingwire.com/Images/Interior/documentlibrary/410.pdf>
85. DAUMER, Tomáš. *Navarování Stellitem na ocel 1.4122* [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=131223. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.
86. LICHOROBIEC, Vojtěch. *Vliv vodíku na pevnost a svařitelnost vysokopevných martenzitických ocelí pro automobilové aplikace* [online]. Pardubice, 2010 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/37122/LichorobiecV_Vodikvysokopevneoceli_ES_2010.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Eva Schmidová.
87. SKRÝVAL, Tomáš. *Návrh technologie a uspořádání výroby držáku* [online]. Brno, 2007 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7974. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Pavel Rumišek.
88. TRUHLÍKOVÁ, Markéta. *Inspekční certifikát 3.1 (EN 10204)*. Bruntál: Alfun, 2018.
89. *ČSN EN 10149-2 (421090). Ploché výrobky válcované za tepla z ocelí s vyšší mezí kluzu pro tváření za studena. Část 2: Dodací podmínky pro termomechanicky válcované oceli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
90. BARTÁK, Jiří. *Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. Česká svářečská společnost ANB: Czech Welding Society ANB* [online]. Plzeň: Česká svářečská společnost ANB, 2012 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
91. FOLDYNOVÁ, Šárka. *Vady svarových spojů* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://dSPACE.vsb.cz/bitstream/handle/10084/114494/FOL0043_FMMI_

- B3923_3911R028_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Martina Kraus.
92. HARANTOVÁ, Alena. *Kontrola laserových svarových spojů pomocí softwaru Weldwatcher* [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73123/F2-BP-2017-Harantova-Alena-zaverecna%20prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Miroslav Zajíček.
 93. PLÍŠEK, Roman. *Optimalizace laserem vytvářených průvarových svarů u pozinkovaných plechů* [online]. Brno, 2014 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30309371.pdf>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Libor Mrňa.
 94. NĚMEČEK, Stanislav. *Zpracování materiálů laserem, 1. díl - svařování. MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2011, **2011**(4), 32 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zpracovani-materialu-laserem-1-dil-svarovani.html>
 95. What are the typical defects in laser welds?. *TWI* [online]. Cambridge, ©2019 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-are-the-typical-defects-in-laser-welds>
 96. ČSN EN ISO 6520-1 (050005). *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů. Část 1: Tavné svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
 97. ČSN EN ISO 13919-1 (050335). *Svařování - Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním - Směrnice pro určování stupňů jakosti. Část 1: Ocel*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
 98. DVOŘÁK, Jaroslav. *Nedestruktivní zkoušení – Zásady vizuální kontroly svarů a výrobků. Tlakinfo.cz: Oborový portál pro vyhrazená tlaková zařízení* [online]. Praha, 2006 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1240>
 99. MACHÁČ, Miroslav. *Měření tvrdosti materiálů a zpracovávání zjištěných hodnot* [online]. Brno, 2010 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27306. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Milan Kalivoda.
 100. Zařízení pro zkoušky rázové houževnatosti HIT25P - Charpyho kladivo. *Vyrtych* [online]. Břežno [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.cvzl.cz/Vybaven%C3%AD-laborato%C5%99e/Charpyho-kladivo>
 101. ČSN EN ISO 17637 (051180). *Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
 102. ČSN EN ISO 3452-1 (015018). *Nedestruktivní zkoušení - Kapilární zkouška. Část 1: Obecné zásady*. Praha: Český normalizační institut, 2015.
 103. ČSN EN ISO 9934-1 (015046). *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení magnetickou práškovou metodou. Část 1: Obecné principy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

104. *ČSN EN ISO 16810 (015023). Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení ultrazvukem - Obecné zásady.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
105. *ČSN EN ISO 17636-1 (051150). Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení. Část 1: Metody rentgenového a gama záření využívající film.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
106. *ČSN EN ISO 6892-1 (420310). Kovové materiály – Zkoušení tahem. Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
107. *ČSN EN ISO 17638 (051182). Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení magnetickou metodou práškovou.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
108. *ČSN EN ISO 17640 (051171). Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem – Techniky, třídy zkoušení a hodnocení.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
109. *ČSN EN ISO 15614-11 (050313). Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování. Část 11, Elektronové a laserové svařování.* Praha: Český normalizační institut, 2003.
110. *ČSN EN ISO 5173 (051124). Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušky ohybem.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
111. *ČSN EN ISO 148-1 (420381). Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy. Část 1: Zkušební metoda.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
112. *ČSN EN ISO 9017 (051127). Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkouška rozlomením.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
113. *ČSN EN ISO 17639 (051128). Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
114. *ČSN EN ISO 6507-1 (420374). Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse. Část 1: Zkušební metoda.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
115. *ČSN EN ISO 6506-1 (420359). Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella. Část 1: Zkušební metoda.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
116. *ČSN EN ISO 6508-1 (420360). Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella. Část 1: Zkušební metoda.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
117. *ČSN EN ISO 9015-2 (051134). Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti. Část 2, Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

118. ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
119. ČSN EN ISO 5178. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Podélná zkouška tahem svarového kovu tavných svarových spojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
120. Zkoušení mechanických vlastností – zkoušky tvrdosti. In: *E-nano: Nano[studijní] materiály* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, [2019] [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/3448/mod_resource/content/1/MN1_Mechanick%C3%A9%20vlastnosti-tvrdest.pdf
121. U és V próbatestek Charpy-vizsgálatok. In: *Wikimedia Commons* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 2010 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eprouvette_charpy1.svg
122. *Stereo Microscope System SZX7/SZ61/SZ51 For Industrial Use*. Tokyo, [2019]. Dostupné také z: [https://www.olympus-ims.com/downloads/detail/?0\[downloads\]\[id\]=276824291](https://www.olympus-ims.com/downloads/detail/?0[downloads][id]=276824291)
123. Olympus Confocal microscope LEXT OLS3100. In: *Tel Aviv University* [online]. Tel-Aviv, [2019] [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://nano.tau.ac.il/old/index.php/labs/9-equipment/microscopes/14-olympus-confocal-microscope-lext-ols3100>
124. Hardness System. In: *M. M. Engineers* [online]. Mulund West, [2019] [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.mmengineers.net/hardness-system.html>
125. YLS-2000. *Go Photonics* [online]. ©2017 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.gophotonics.com/products/lasers/ipg-photonics/29-152-yls-2000>
126. Fiber Rhino. In: *Arges* [online]. Wackersdorf, [2019] [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://www.arges.de/fileadmin/downloads/scanheads/en/scan_head_data_sheet_en.pdf
127. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Označení | Legenda | Jednotka |
|---------------------------------|--|------------------------|
| A | Tažnost | [%] |
| Al | Hliník | [-] |
| ARA | Anizotropní rozklad austenitu | [-] |
| BPP | Beam Parameter Product | [mm·mrad] |
| C | Uhlík | [-] |
| CO ₂ | Oxid uhličitý | [-] |
| Cr | Chrom | [-] |
| cw | Continual wave | [-] |
| ČSN | Česká státní norma | [-] |
| d ₁ , d ₂ | Uhlopříčky vtisku | [μm] |
| d _s | Průměr spotu | [μm] |
| EN | Evropská norma | [-] |
| F | Zkušební zatížení | [N] |
| f | Zaměření ohniska | [mm] |
| Fe | Železo | [-] |
| f _w | Frekvence kmitání | [Hz] |
| GaAs | Arsenid gallitý | [-] |
| ISO | International organization for standardization | [-] |
| K _v | Nárazová práce | [J] |
| MAG | Metal Active Gas | [-] |
| MIG | Metal Inert Gas | [-] |
| Mn | Mangan | [-] |
| Nb | Niob | [-] |
| Nd | Neodym | [-] |
| Ni | Nikl | [-] |
| P | Fosfor, Výkon | [-], [W] |
| QT | Quenched and Tempered | [-] |
| Q _v | Průtok ochranného plynu | [l·min ⁻¹] |
| R _{eH} | Horní mez kluzu | [MPa] |
| R _m | Mez pevnosti | [MPa] |
| ROS | Ruční obloukové svařování | [-] |
| R _{p0,2} | Smluvní mez kluzu | [MPa] |
| r _w | Rádus kružnice | [mm] |
| S | Síra | [-] |
| Si | Křemík | [-] |
| TIG | Tungsten Inert Gas | [-] |
| TOO | Tepelně ovlivněná oblast | [-] |
| V | Vanad | [-] |
| v | Rychlost posuvu | [mm·s ⁻¹] |
| v _w | Rychlost spotu | [mm·s ⁻¹] |
| YAG | Yttrium Aluminium Granát | [-] |
| Yb | Ytterbium | [-] |
| λ | Vlnová délka | [μm] |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Parní turbíny a jejich výroba a využití v energetickém průmyslu [8], [9], [10], [11].... | 9 |
| Obr. 2 Rozváděcí kolo [14]..... | 10 |
| Obr. 3 Svařování rozváděcího kola pomocí technologie TIG [15]..... | 10 |
| Obr. 4 Svařování metodou MIG/MAG [33]..... | 11 |
| Obr. 5 Ruční obloukové svařování obalovanou elektrodou [19]..... | 11 |
| Obr. 6 Svařování plazmou [34]..... | 11 |
| Obr. 7 Vakuová komora pro svařování elektronovým paprskem [35]..... | 12 |
| Obr. 8 Provaření materiálu laserovým paprskem režimem keyhole [36]..... | 12 |
| Obr. 9 Rozdíl mezi bílým světlem ze žárovky a laserovým zářením [38]..... | 14 |
| Obr. 10 Přípravkování..... | 14 |
| Obr. 11 CO ₂ laser [56]..... | 15 |
| Obr. 12 Vrstvené polovodičové diody – tzv. stack [46]..... | 16 |
| Obr. 13 Nd:YAG tyč buzená výbojkou [47]..... | 16 |
| Obr. 14 Nd:YAG tyč buzená diodami [47]..... | 16 |
| Obr. 15 Laser o výkonu 8 kW sestavený ze čtyř tenkých diskových laserových hlav [57].... | 17 |
| Obr. 16 Vláknový laser [58]..... | 17 |
| Obr. 17 Schéma optického vlákna [59]..... | 17 |
| Obr. 18 Průběhy režimů [55]..... | 18 |
| Obr. 19 Výkon laserového paprsku při kontinuálním a pulzním režimu [55]..... | 19 |
| Obr. 20 Tvarování keyhole při svařování [64]..... | 20 |
| Obr. 21 Průběh vzniku bubliny [67]..... | 20 |
| Obr. 22 Režimy svařování [62]..... | 21 |
| Obr. 23 Skenerová hlava Fiber Rhino [71]..... | 22 |
| Obr. 24 Zařízení vykonávající proces remote welding [72]..... | 22 |
| Obr. 25 Tvary primitivní geometrie rozmítací křivky [69]..... | 23 |
| Obr. 26 ARA diagram oceli X12Cr13 [77]..... | 25 |
| Obr. 27 Svarové vady [95]..... | 28 |
| Obr. 28 Podmínky pro vizuální kontrolu svarů [98]..... | 29 |
| Obr. 29 Makroskopie..... | 30 |
| Obr. 30 Mikroskopie..... | 30 |
| Obr. 31 Zkouška (mikro)tvrdosti podle Vickerse [27]..... | 31 |
| Obr. 32 Zkušební těleso s V a U vrubem [121]..... | 32 |
| Obr. 33 Charpyho kladivo [100]..... | 32 |
| Obr. 34 Geometrie vzorků..... | 33 |
| Obr. 35 Příprava vzorků bodovými svary..... | 33 |
| Obr. 36 IPG Laser YLS – 2000..... | 33 |
| Obr. 37 Optické moduly v modulárním uspořádání..... | 33 |
| Obr. 38 Průmyslový robot se skenerovou hlavou..... | 34 |
| Obr. 39 Upevnění vzorků před svařovacím procesem..... | 35 |
| Obr. 40 Svařené vzorky materiálů..... | 35 |
| Obr. 41 Líc a kořen svarů vzorků č. 1-6..... | 36 |
| Obr. 42 Nečistota na ochranném skle skenerové hlavy..... | 35 |
| Obr. 43 Zvolená oblast vzorku, z které byl odebrán preparát..... | 36 |
| Obr. 44 Vzorek zalisovaný do nosiče..... | 37 |
| Obr. 45 Ultrazvuková čistička Ulsonix Proclean 2.0M..... | 37 |
| Obr. 46 Zařízení potřebná pro přípravu metalografických výbrusů..... | 38 |
| Obr. 47 Vyleštěné vzorky pro leptání..... | 37 |
| Obr. 48 Stereomikroskop Olympus SZ61 [122]..... | 38 |
| Obr. 49 Makroskopický snímek vzorku č. 1..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Obr. 50 Makroskopický snímek vzorku č. 2 | 40 |
| Obr. 51 Makroskopický snímek vzorku č. 3 | 40 |
| Obr. 52 Makroskopický snímek vzorku č. 4 | 41 |
| Obr. 53 Makroskopický snímek vzorku č. 5 | 42 |
| Obr. 54 Makroskopický snímek vzorku č. 6 | 43 |
| Obr. 55 Konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS 3100 [123] | 44 |
| Obr. 56 Mikroskopické snímky základního materiálu S355MC..... | 45 |
| Obr. 57 Trhliny v základním materiálu S355MC a v tepelně ovlivněné oblasti..... | 45 |
| Obr. 58 Jehlicová martenzitická struktura materiálu X12Cr13 s karbidy..... | 46 |
| Obr. 59 Mikroskopická struktura svarového kovu vzorku č. 1, objektiv 5x..... | 47 |
| Obr. 60 Mikroskopická struktura svarového kovu vzorku č. 1, objektiv 50x..... | 47 |
| Obr. 61 Mikroskopická struktura svarového kovu vzorku č. 1, objektiv 100x..... | 47 |
| Obr. 62 Tepelně ovlivněná oblast vzorku č. 1 u materiálu S355MC, objektiv 5x..... | 47 |
| Obr. 63 Tepelně ovlivněná oblast vzorku č. 1 u materiálu S355MC, objektiv 10x..... | 47 |
| Obr. 64 Tepelně ovlivněná oblast vzorku č. 1 u materiálu X12Cr13, objektiv 5x..... | 48 |
| Obr. 65 Tepelně ovlivněná oblast vzorku č. 1 u materiálu X12Cr13, objektiv 10x..... | 48 |
| Obr. 66 Svarový kov u vzorku č. 2, objektiv 5x..... | 48 |
| Obr. 67 Svarový kov u vzorku č. 2, objektiv 50x..... | 48 |
| Obr. 68 Svarový kov u vzorku č. 2, objektiv 100x..... | 49 |
| Obr. 69 Tepelně ovlivněná oblast materiálu S355MC a svarový kov vzorku č. 2..... | 49 |
| Obr. 70 Tepelně ovlivněná oblast vzorku č. 2 u materiálu X12Cr13..... | 50 |
| Obr. 71 Změna struktury z tepelně ovlivněné oblasti do základního materiálu..... | 50 |
| Obr. 72 Martenzitická struktura s karbidy v tepelně ovlivněné oblasti vzorku č. 4..... | 51 |
| Obr. 73 Mikrotvrdoměr LM 247AT [124]..... | 52 |
| Obr. 74 Vtisk od zatěžující síly..... | 52 |
| Obr. 75 Mikrotvrdoměr vzorku č. 1..... | 53 |
| Obr. 76 Mikrotvrdoměr vzorku č. 2..... | 53 |
| Obr. 77 Mikrotvrdoměr vzorku č. 3..... | 53 |
| Obr. 78 Mikrotvrdoměr vzorku č. 4..... | 54 |
| Obr. 79 Mikrotvrdoměr vzorku č. 5..... | 54 |
| Obr. 80 Mikrotvrdoměr vzorku č. 6..... | 54 |
| Obr. 81 Porovnání tvrdostí u vzorků spojených s i bez použití wobblingu..... | 55 |
| Obr. 82 Porovnání tvrdostí u vzorků spojených wobblingem s různou frekvencí..... | 55 |
| Obr. 83 Porovnání tvrdostí u vzorků spojených wobblingem s frekvencí 30 Hz s odlišnými tvary primitivních křivek..... | 56 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tab. 1 Rozdělení laserů [32], [41]..... | 15 |
| Tab. 2 Výhody a nevýhody laserů [27], [41], [48], [52], [53], [54]..... | 18 |
| Tab. 3 Koeficienty při pokojové teplotě [16]..... | 19 |
| Tab. 4 Režimy rozmítání svazku [53], [69] | 23 |
| Tab. 5 Chemické složení oceli X12Cr13 [73], [74] | 24 |
| Tab. 6 Mechanické vlastnosti X12Cr13 [73], [74]..... | 25 |
| Tab. 7 Podmínky zušlechťování materiálu X12Cr13 [73], [74] | 25 |
| Tab. 8 Teplota předehřevu a požadavek tepel. zpracování v závislosti na obsahu uhlíku [78] | 26 |
| Tab. 9 Chemické složení oceli S355MC [88], [89]..... | 26 |
| Tab. 10 Mechanické vlastnosti oceli S355MC [88], [89] | 27 |
| Tab. 11 Klasifikace vad [97] | 27 |
| Tab. 12 Dělení svarových vad [96] | 28 |
| Tab. 13 Typy nedestruktivních zkoušek [101], [102], [103], [104], [105], [107], [108]..... | 29 |
| Tab. 14 Destruktivní zkoušky [106], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117] .. | 30 |
| Tab. 15 Tvrdost fází a strukturních složek [120] | 31 |
| Tab. 16 Svařovací parametry. | 34 |
| Tab. 17 Parametry leštění diamantovou suspenzí. | 37 |
| Tab. 18 Porovnání vlastností svarových spojů získaných při makroskopii. | 44 |
| Tab. 19 Maximální tvrdost vzorků..... | 52 |

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Inspekční certifikát 3.1 oceli X12Cr13 [73]
- Příloha 2 Inspekční certifikát materiálu S355MC [88]
- Příloha 3 Parametry YLS – 2000 [125]
- Příloha 4 Parametry skenerové hlavy Arges Rhino [126]
- Příloha 5 Makroskopické snímky
- Příloha 6 Mikroskopické snímky
- Příloha 7 Protokoly z měření mikrotvrdosti dle Vickerse



BGH Edelstahl Freital GmbH

BGH Edelstahl Freital GmbH Am Stahlwerk 1 01705 Freital

Zeugnis-Nr. **443041**
Certificate no.
No. de certificat

Bescheinigung über Werkstoffprüfung nach DIN EN 10204
Certificate of material tests according to DIN EN 10204 **3.1**
Certificat des essais des matériaux selon DIN EN 10204

Die Lieferung entspricht den vereinbarten Lieferbedingungen.
Delivery in accordance with the agreed terms of delivery.
La livraison correspond aux conditions de livraison convenues.

Zeichen des Lieferwerkes
Trade mark
Signe du fournisseur

Stempel des Werkstoffsachverständigen
Inspector's stamp
Poinçon de l'inspecteur



Kunden-Bestell-Nr.
Customer order no.
Cde. no. du client

BGH-Auftrags-Nr.
BGH works no.
BGH reference

| | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|---|----------------------------|--|------------|--|---------------------------------------|---|-------------------|--|--|
| Erzeugnisform Product | | Stab, rund, geschält round bars, peeled | | | | | | | | | |
| Werkstoff / Quality | | 1.4006 X12Cr13 | | | | | | | | | |
| Anforderungen Requirements | | 1.4006 X12Cr13 DIN EN 10088 -3 12/14 1.4006 X 12 Cr 13 DIN EN 10272 01/08 UNS S41000 - F6a (Chemical Composition) ASTM A 182 /A 182M - 15 | | | | | | | | | |
| Besichtigung und Maßnachprüfung Inspection and dimensional control Inspection et contrôle de dimension ohne Beanstandung without objection | | | | Erschmelzung/Nachbehandlung Melting process/secondary refining Mode d'élaboration/traitement ultérieur E- VÖD | | | | Verwechslungsprüfung (spektralanalytisch) Identification test (spectral analysis) examen d'identification (analyse spectrale) ohne Beanstandung without objection | | | |
| Pos. Item Poste | Anzahl Quantity | Abmessung Dimension Dimensions | | Gewicht Weight Poids | | Schmelz-Nr. Heat no. No. de coulée | | | | | |
| 1 | 4 | 120,00 RD | | 1730 kg | | 392868 | | | | | |
| Schmelze Heat % | | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | | | |
| 392868 | | 0,117 | 0,35 | 0,67 | 0,022 | 0,0015 | 12,28 | 0,25 | | | |
| Wärmebehandlungszustand Condition of heat treat | | vergütet QT650 quenched + tempered 950 °C 3,5h Luft/air + 720 °C 5,5h Luft/air | | | | | | | | | |
| Probe-Nr. Test-No. | Lage Loc. | Temp. °C | Rp0,2 N/mm ² | Rm N/mm ² | A5/A4 % | Z % | Kerbschlagarbeit Impact value J | Probenform Shape of test piece Charpy-V °C | Härte Hardness | | |
| 003HE1 | + L | RT | 528 | 700 | 24/- | 70 | 145 151 146 | RT | | | |
| 003HE1 | + L | RT | 526 | 697 | --/29 | 71 | | | | | |
| +) Erprobung nach/Testing acc. to DIN EN ISO 6892-1 / DIN EN ISO 148-1 (12,5 mm) *) Erprobung nach/Testing acc. to ASTM/ASME A 370 (D/4 - mid radius) US-Prüfung nach/ultrasonic testing acc. to DIN EN 10308-03/02 Tab.1-Typ1a(vollst.)Tab.2-Qual.-X1.4: ohne Beanstandung/no objection. Fertigung nach QM-System ISO 9001: 2008/ QM system in effect is ISO 9001: 2008 Kontrolle auf Radioaktivität ohne Befund, der Messwert liegt unter der Nachweisgrenze von 0,1 Bq/g. Radioactivity inspection without objection, the measured value is below the detection limit of 0.1 Bq/g. | | | | | | | | | | | |
| Anlagen Encl. Annexe | | | | Freital/don Place and date Lieu et date 14.08.2017 | | | | Abnahmebeauftragter Inspector representative Inspecteur de réception Müller | | | |
| Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig. | | | | | | This certificate was generated by data system and it is valid without signature as well. Ce certificat a été créé sur système informatique et est valable sans signature aussi. | | | | | |

ALFUN

Dodávatel / Supplier:

ALFUN a.s.
Zahradní 1610/40
79201 BRUNTÁL

IČ: 25828649 DIČ: CZ25828649
Společnost zapsaná v OR KS Ostrava, oddíl B, vložka
2732

Kontaktní osoba odběratele / Contact person of buyer:

Novotný Josef
FAX:

INSPEKČNÍ CERTIFIKÁT 3.1 (EN 10204) OPIS
INSPECTION CERTIFICATE 3.1 (EN 10204) COPY

Výrobce / Producer : ArcelorMittal Commercial CZ, k.s.
Země původu / Country of origin : DE

Interní kód atestu / Internal certificate code : AT18112126

Zákazník / Customer : **AQUAdem, s.r.o. (Tovární 739/1 Brno-Chrlice, 643 00)**
Číslo objednávky / Order number : OV18-3250
Číslo dodacího listu / Packing list number : DL181044039
Zhotovil / Issued by : Truchlíková Markéta Dne / Date : 20.12.2018

Atest:AT18112126

Opis atestu (Copy of inspection cert.)

Tavba (Heat No.) Datum zhotovení (Date)

184174 08.08.2018

Obsažené prvky (Contained elements)

| C | Mn | Si | P | Al | S | N |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| 0,059 | 0,336 | 0,011 | 0,007 | 0,034 | 0,004 | |
| Nb | Ti | Cu | V | Mo | B | |
| 0,032 | 0,001 | | 0,001 | | | |

Mechanické hodnoty (Mechanical properties)

| Rm [MPa] | Re [MPa] | A | A80 | Tvrdość HB |
|----------|----------|------|-----|------------|
| 467 | 404 | 32,9 | | |

Vlastnosti materiálu dle (Following standards) EN 10149 2, EN10051

Charakteristika materiálu / Material characteristics

Jakost / Grade, Rozměry[mm] / Dimension[mm]

S355MC 3.0x1500x3000 mařený

Popis materiálu / Material specification: 2x20 ks

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavil ALFUN a.s. k dodacímu listu č.: DL181044039, jednoznačným údajem pro přiřazení je č. tavby: 184174. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a dodaným výrobkem. / This copy of an inspection document was issued by ALFUN a.s. as the attachment to the delivery note n.: DL181044039, with its definite and unequivocal data for the assignment to the melting n.: 184174. Instructions in the QMS guarantee the connection between the original document and delivered product

| | | |
|--|---------------------|---|
| Za správnost údajů odpovídá / Person responsible for the accuracy of data above: | Truchlíková Markéta | Podpis / Signature ALFUN ALFUN A.S. ZAHRADNÍ 40 79201 BRUNTÁL, CZ DIČ: CZ25828649 |
|--|---------------------|---|

Product Details

| | |
|----------------|----------------------------|
| Part Number : | YLS-2000 |
| Manufacturer : | IPG Photonics |
| Description : | Ytterbium CW Laser Systems |

General Parameters

| | |
|-----------------------|---|
| Configuration : | Laser Head with Control Unit (Integrated) |
| Type : | Laser System |
| Technology : | Solid State Laser |
| Operation Mode : | CW/Modulated |
| Wavelength : | 1.07 μm |
| Tunable : | No |
| Fiber Coupled : | Yes |
| Mode : | Single-Mode |
| Laser Color : | Infrared |
| Power : | 2 W |
| Output Power (CW) : | 2 W |
| Application : | Cutting, Drilling, Welding, Cladding, Annealing, Brazing, Heat Treating |
| Laser Gain Medium : | Ytterbium Laser |
| Power Stability : | $\pm 2\%$ |
| Wavelength Accuracy : | ± 10 nm |
| Power Supply : | 400 to 480 VAC |

Physical Properties

| | |
|------------------|----------------------------|
| Dimension : | 790 x 815 x 558 mm |
| Fiber diameter : | 50, 100, 200 μm |



RHINO

heavy duty 2D scan head

suitable for measurement systems, multi-kW applications and gas lasers

available in a version without an objective, e. g. for annealing

aperture 16, 21, 31/28 or 31 mm

for all commercial wavelengths

TYPICAL CONFIGURATIONS; more on request

| | | | | | | | | | |
|---|------------|-----------|-----|-----------------|-----|-----|-------|-----|-----|
| aperture | (mm) | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 16 | 16 | 16 |
| for wavelength | (nm) | 1020–1080 | | | 532 | 355 | 10600 | | |
| focal length | (mm) | 254 | 330 | 800 | 160 | 254 | 100 | 200 | 300 |
| working distance | (mm) | 299 | 390 | 880 | 188 | 261 | 127 | 262 | 371 |
| scan field size □ | (mm) | 180 | 240 | 500 | 120 | 120 | 70 | 140 | 210 |
| approx. focus ϕ (TEM ₀₀) | (μ m) | 33 | 43 | 69 ¹ | 14 | 15 | 110 | 215 | 320 |
| protective glass | | yes | yes | yes | yes | yes | no | no | no |

¹aperture 31 mm



SPECIFICATION; more on page 3 et seqq.

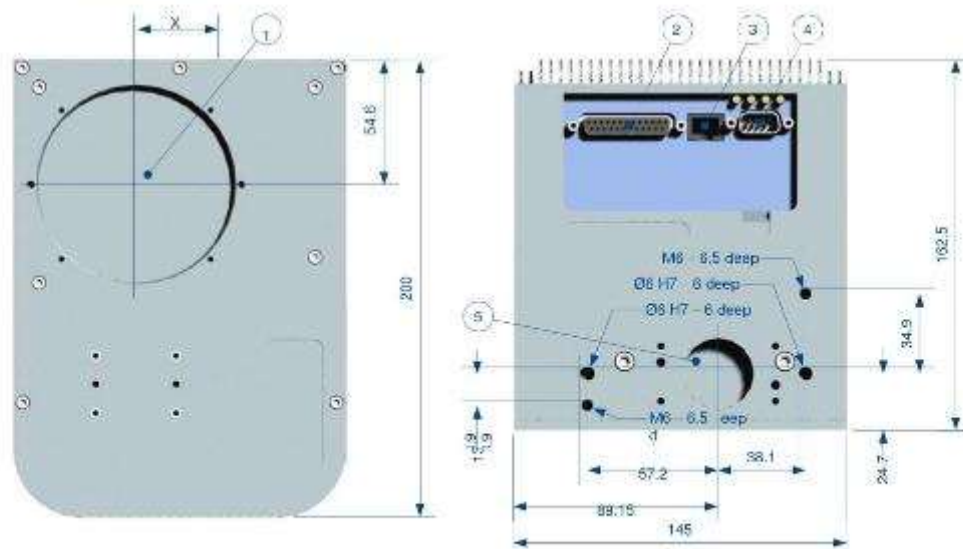
| | | | | | |
|---|------|------|------|-------|------|
| aperture | (mm) | 16 | 21 | 31/28 | 31 |
| beam entry/-exit displacement X | (mm) | 18.4 | 24.2 | 35.8 | 35.8 |
| weight without objective and options; approx. | (kg) | 3.7 | 3.7 | 3.7 | 3.7 |

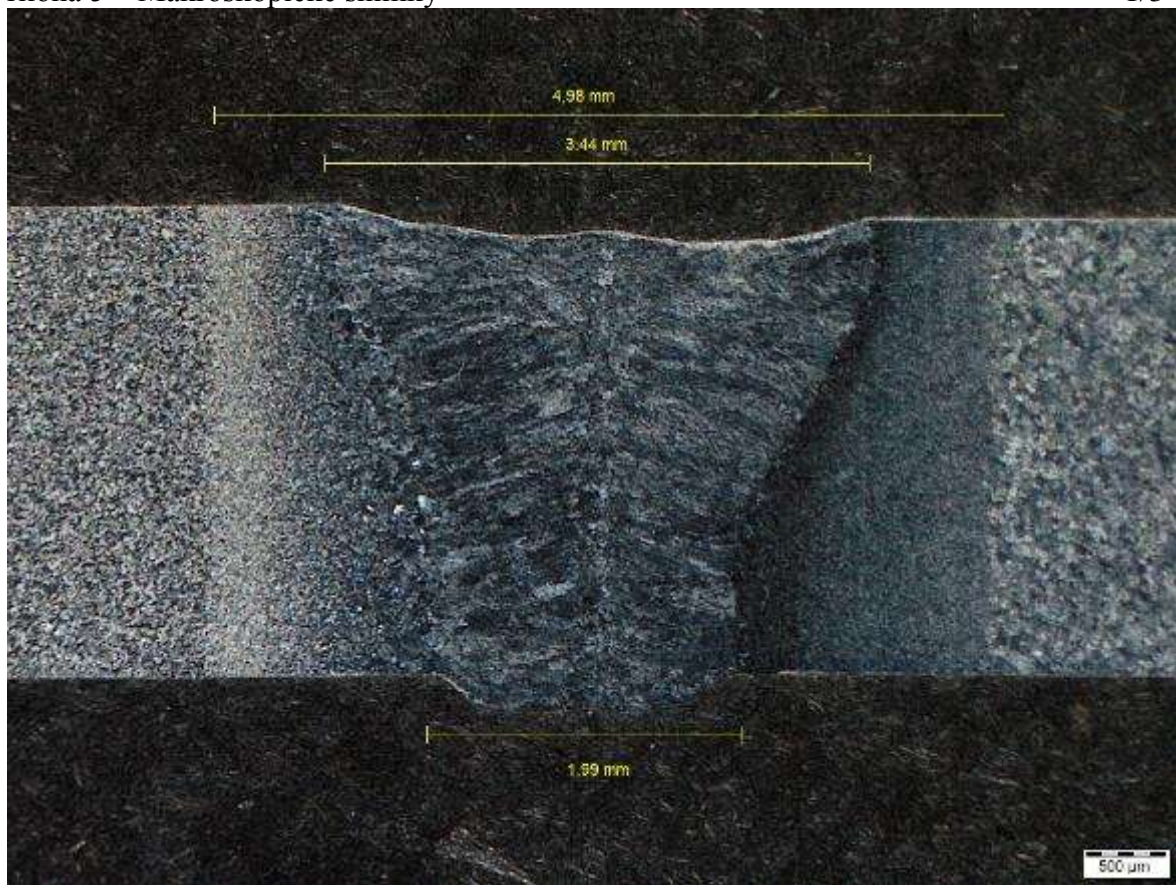
options

water cooling; thermal stabilization; air cooled mirrors

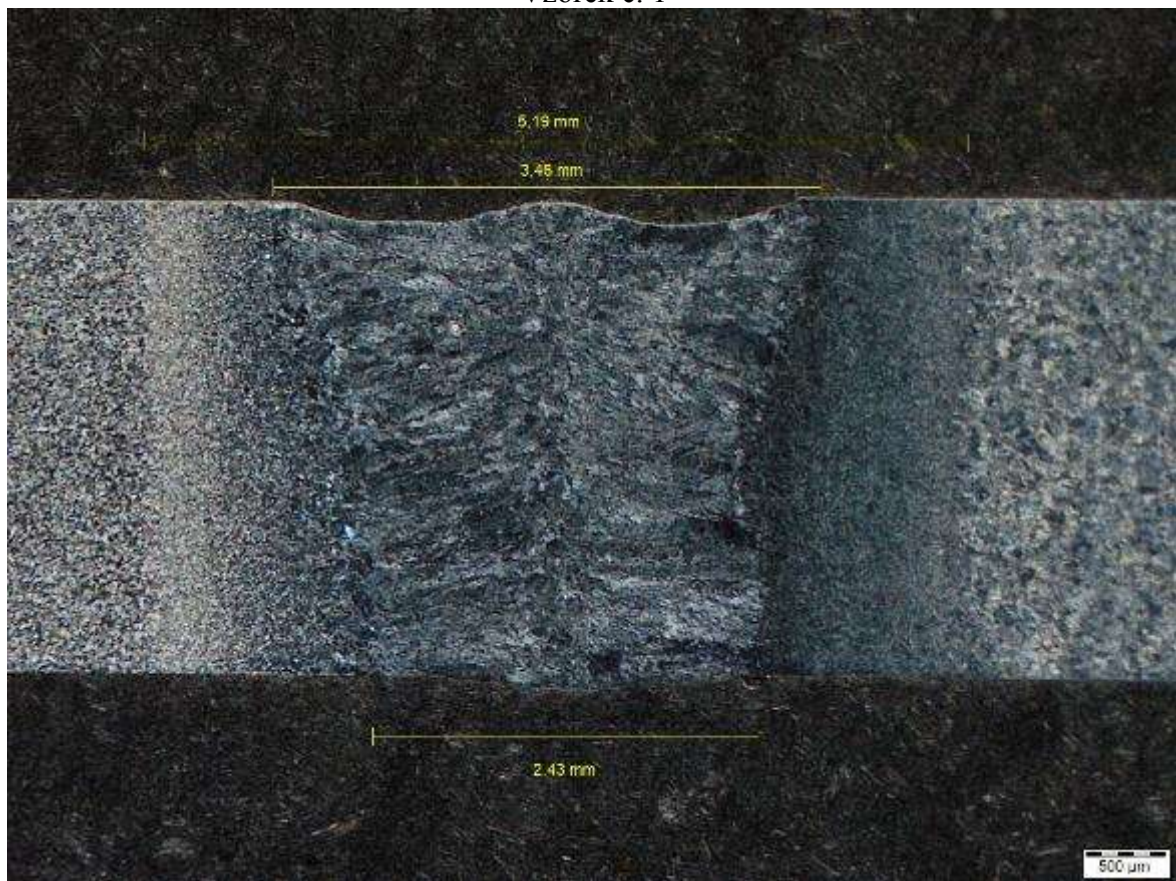
dimensions in mm; without objective and options

① laser beam exit; ② XY4-100 / SLAVE LINK; ③ DATA I/O; ④ DC INPUT; ⑤ laser beam entry

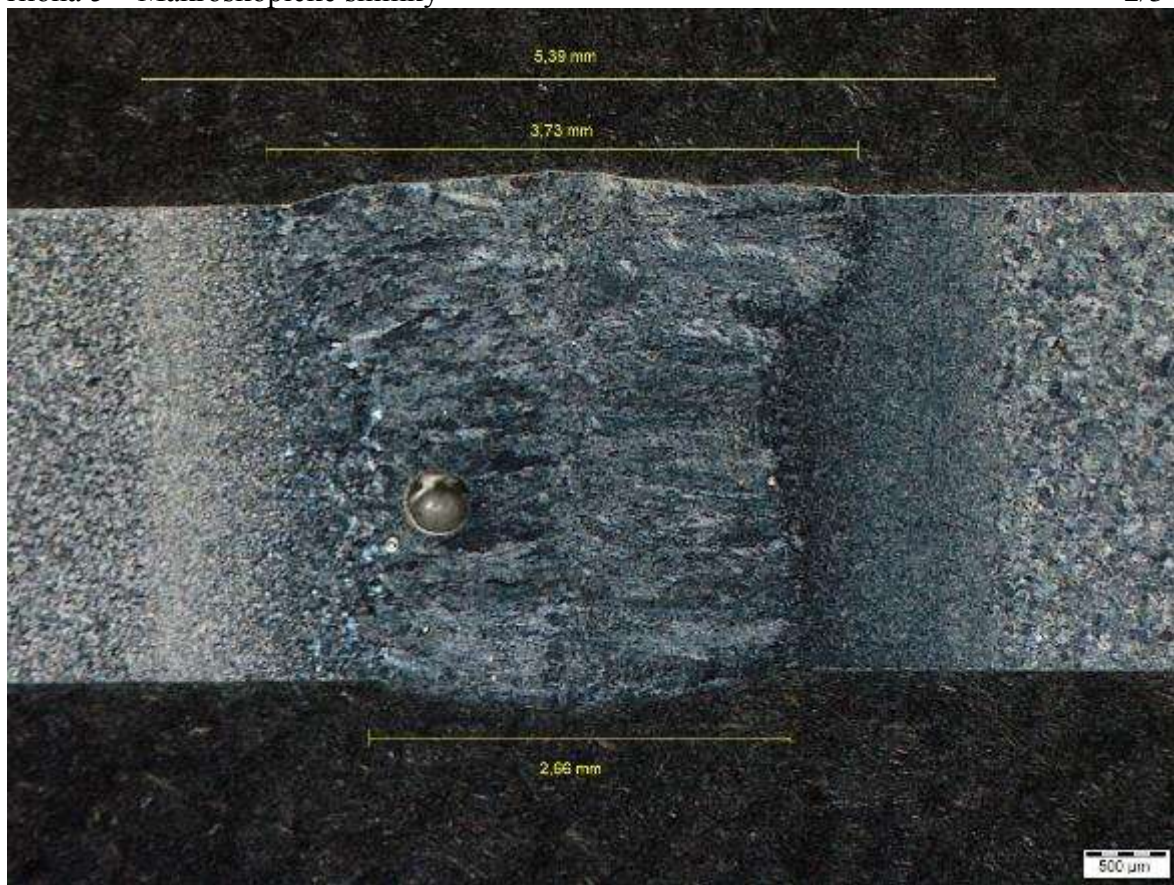




Vzorek č. 1



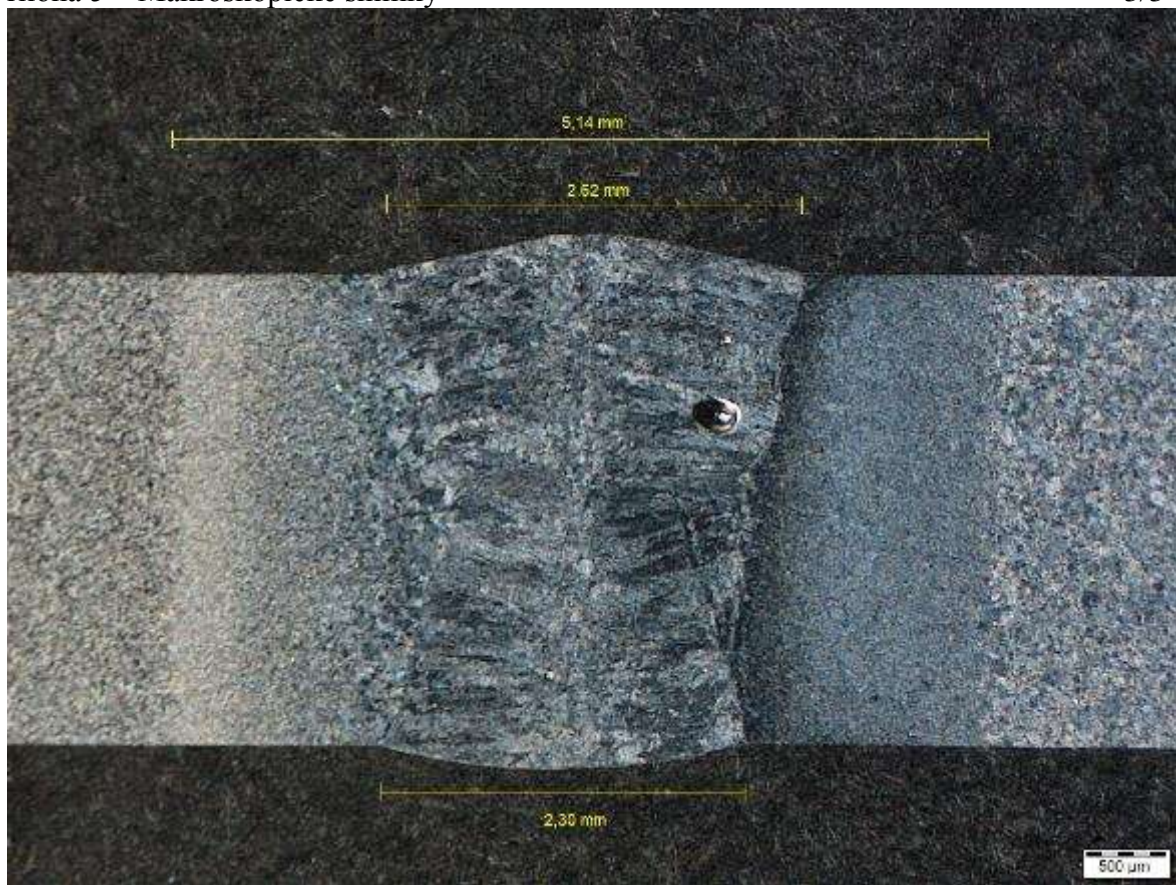
Vzorek č. 2



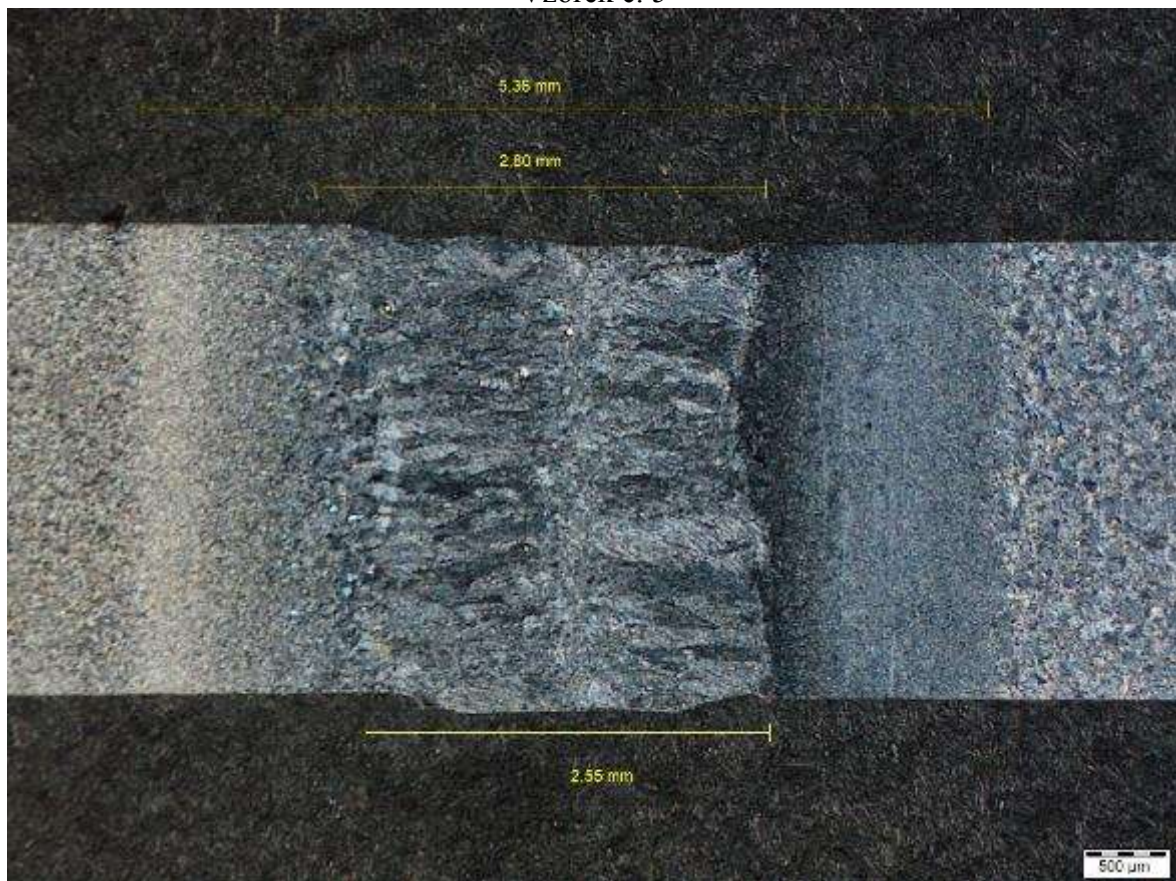
Vzorek č. 3



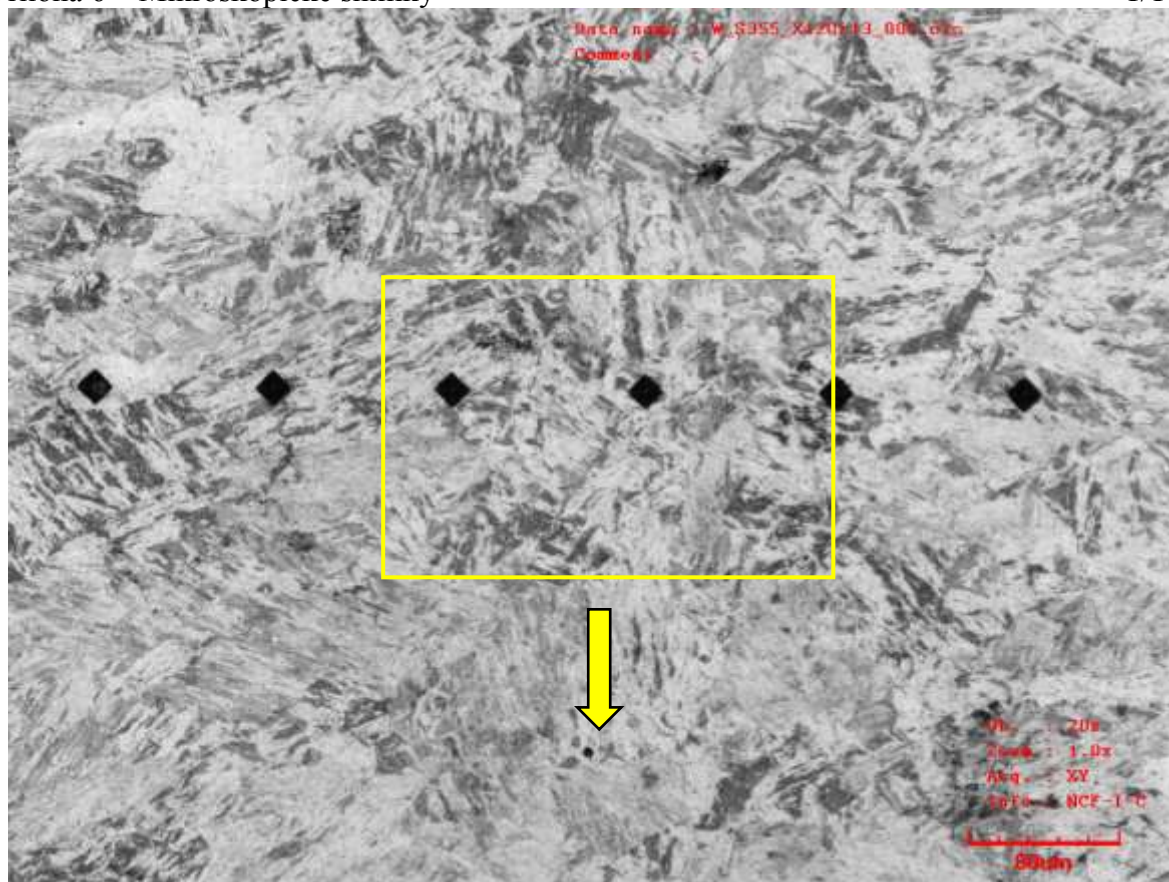
Vzorek č. 4



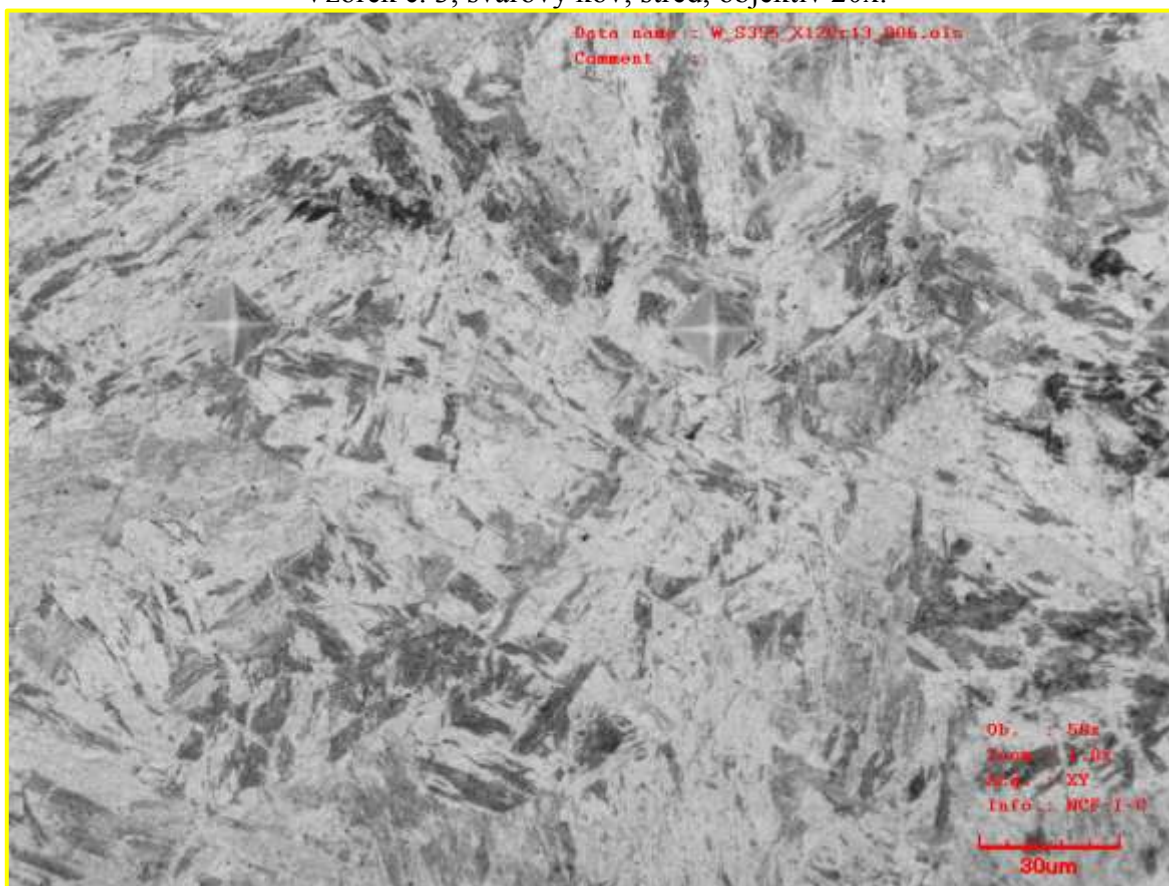
Vzorek č. 5



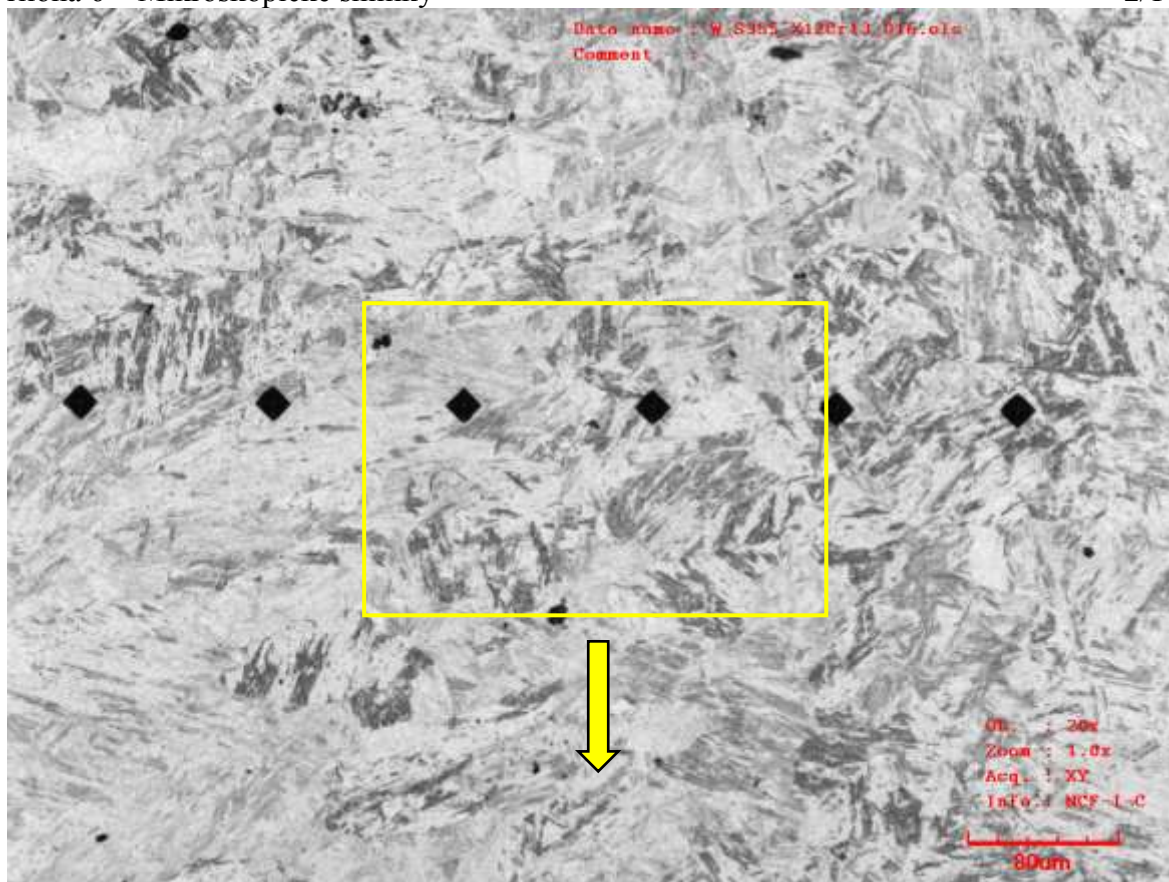
Vzorek č. 6



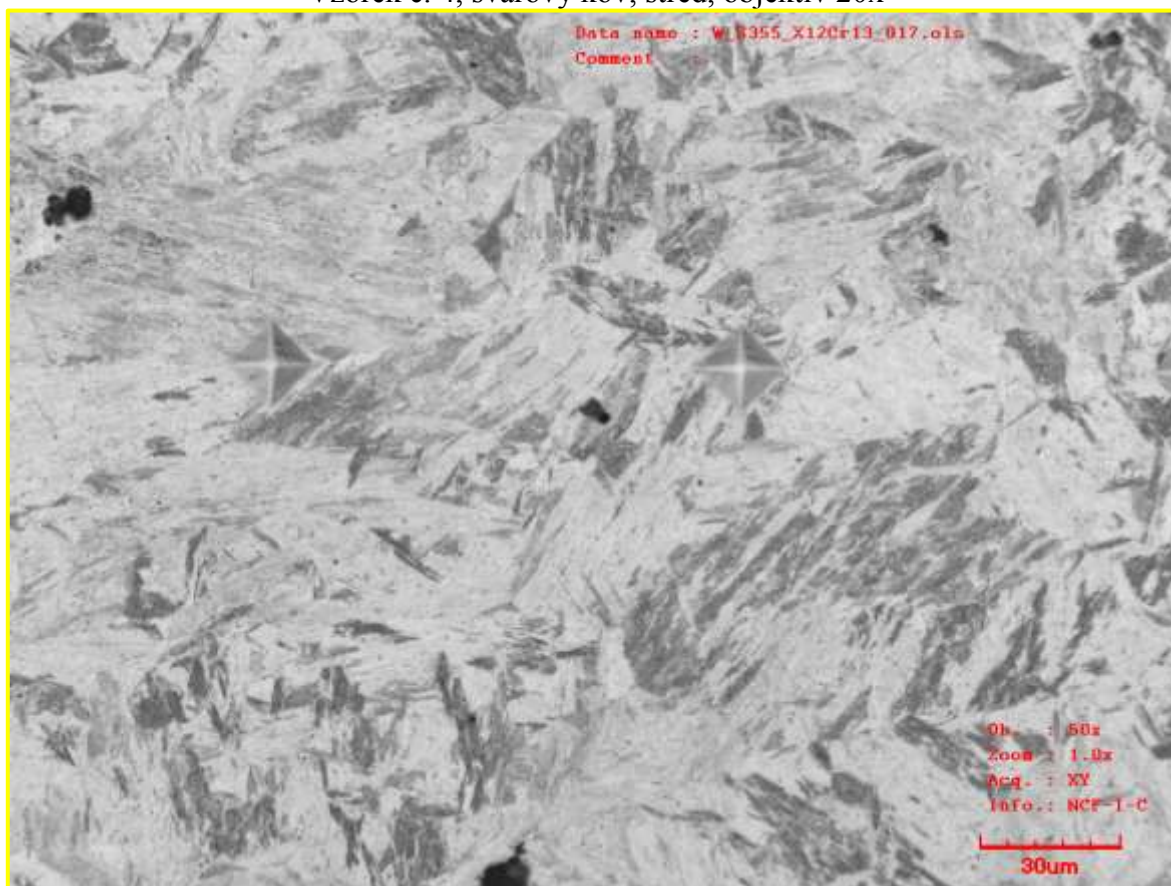
Vzorek č. 3, svarový kov, střed, objektiv 20x.



Vzorek č. 3, svarový kov, střed, objektiv 50x



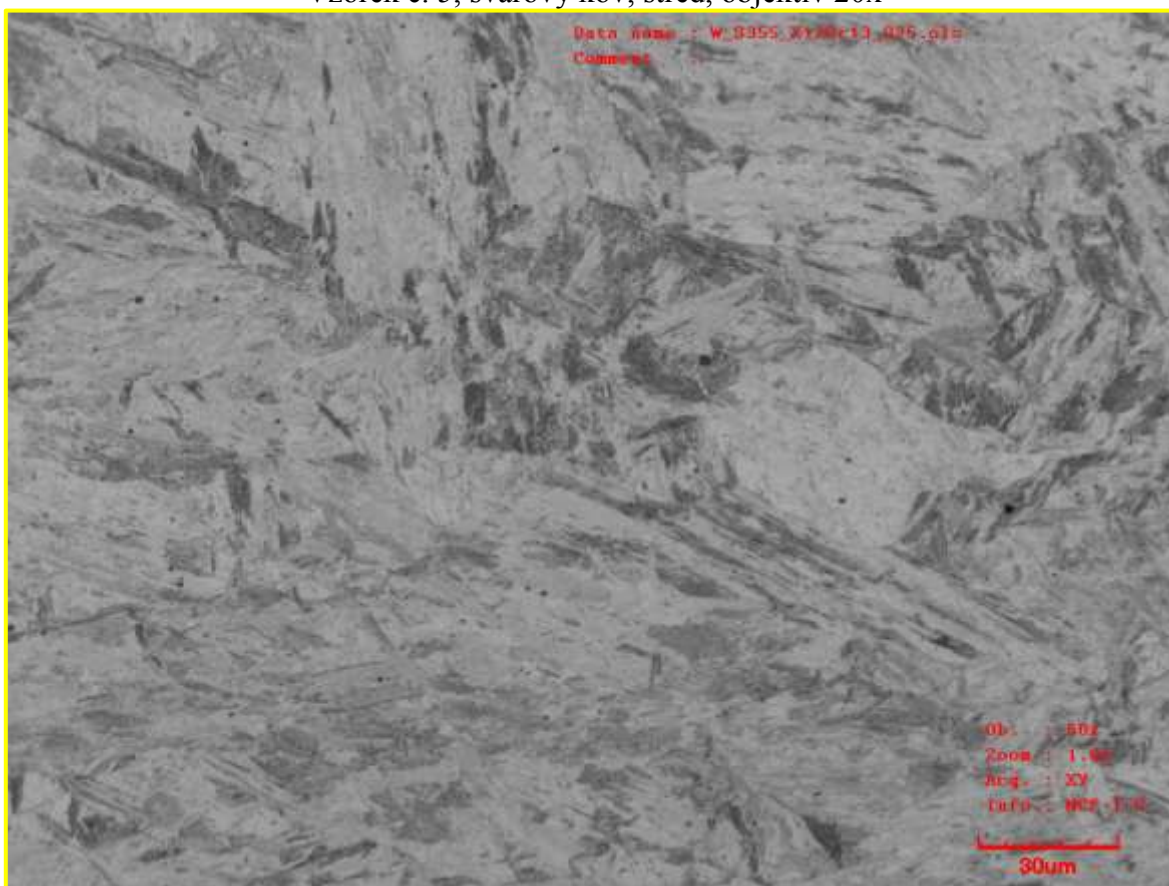
Vzorek č. 4, svarový kov, střed, objektiv 20x



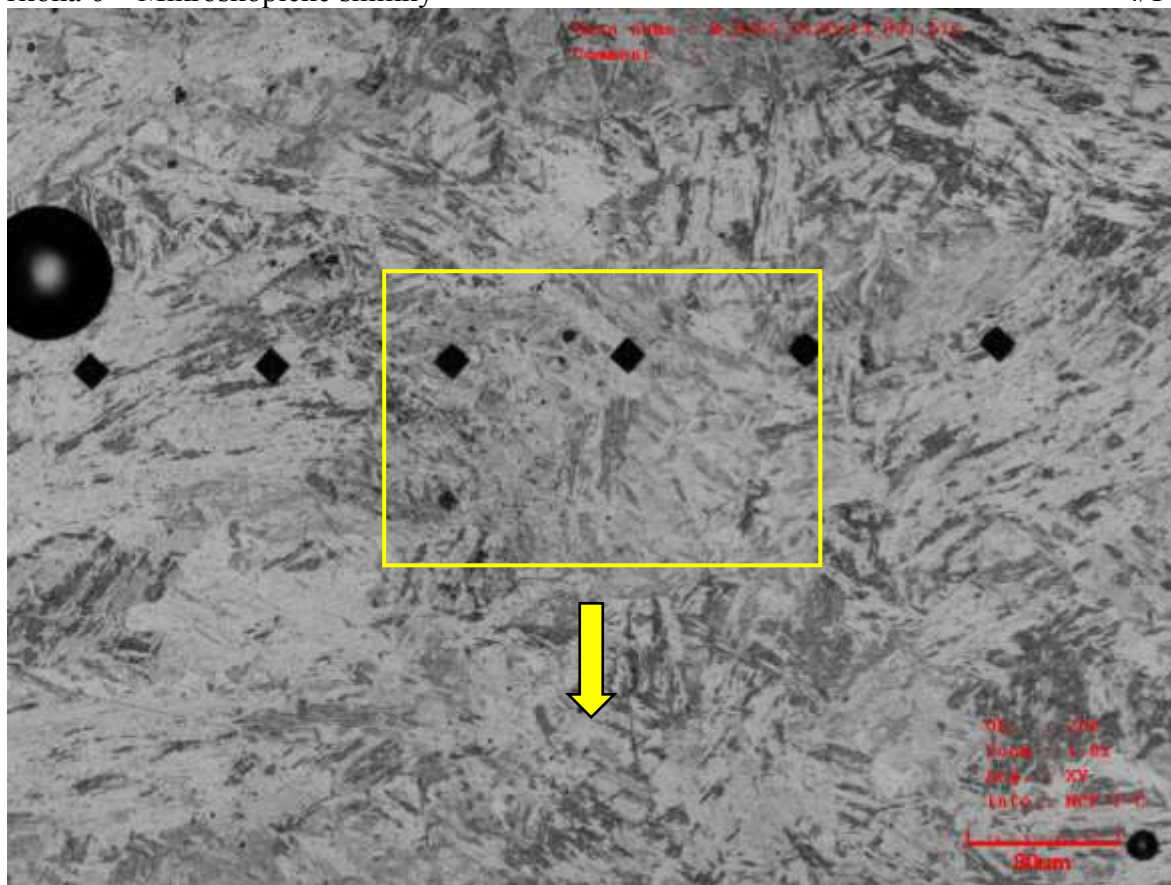
Vzorek č. 4, svarový kov, střed, objektiv 50x



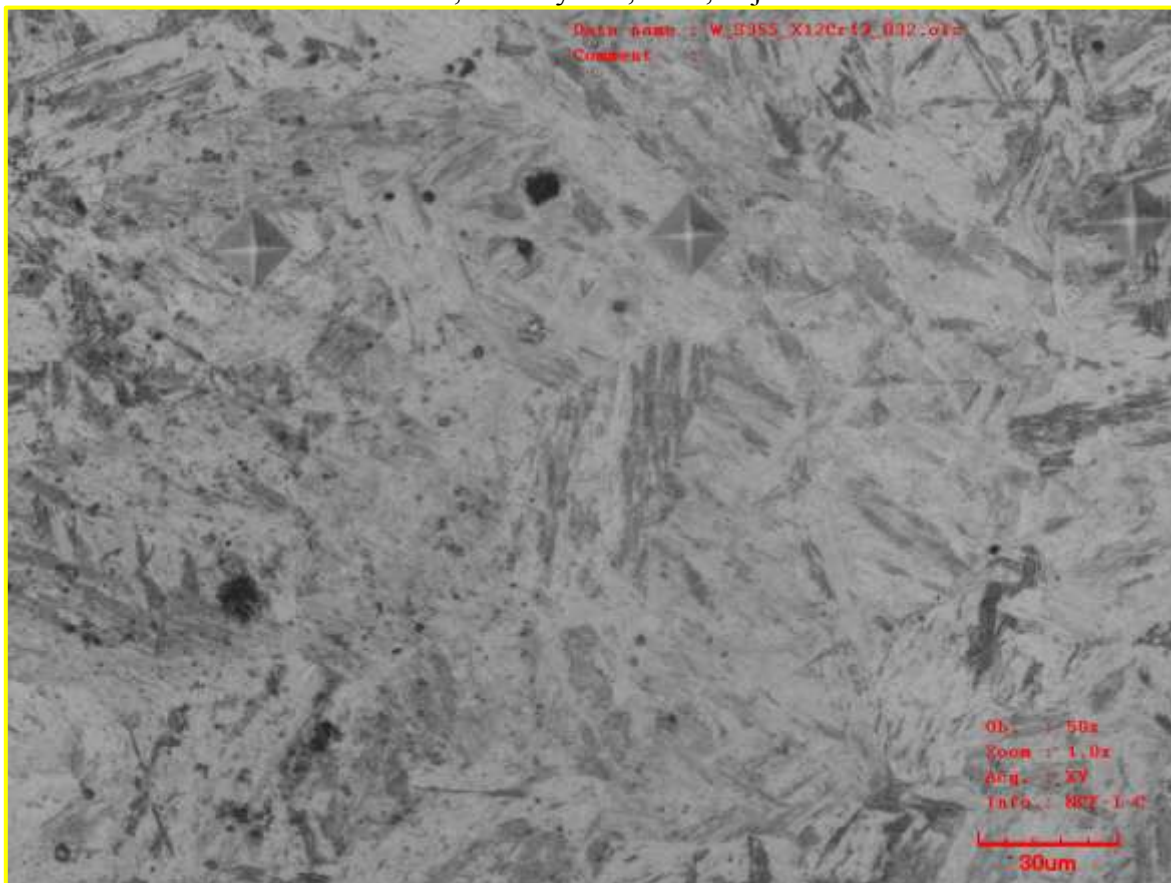
Vzorek č. 5, svarový kov, střed, objektiv 20x



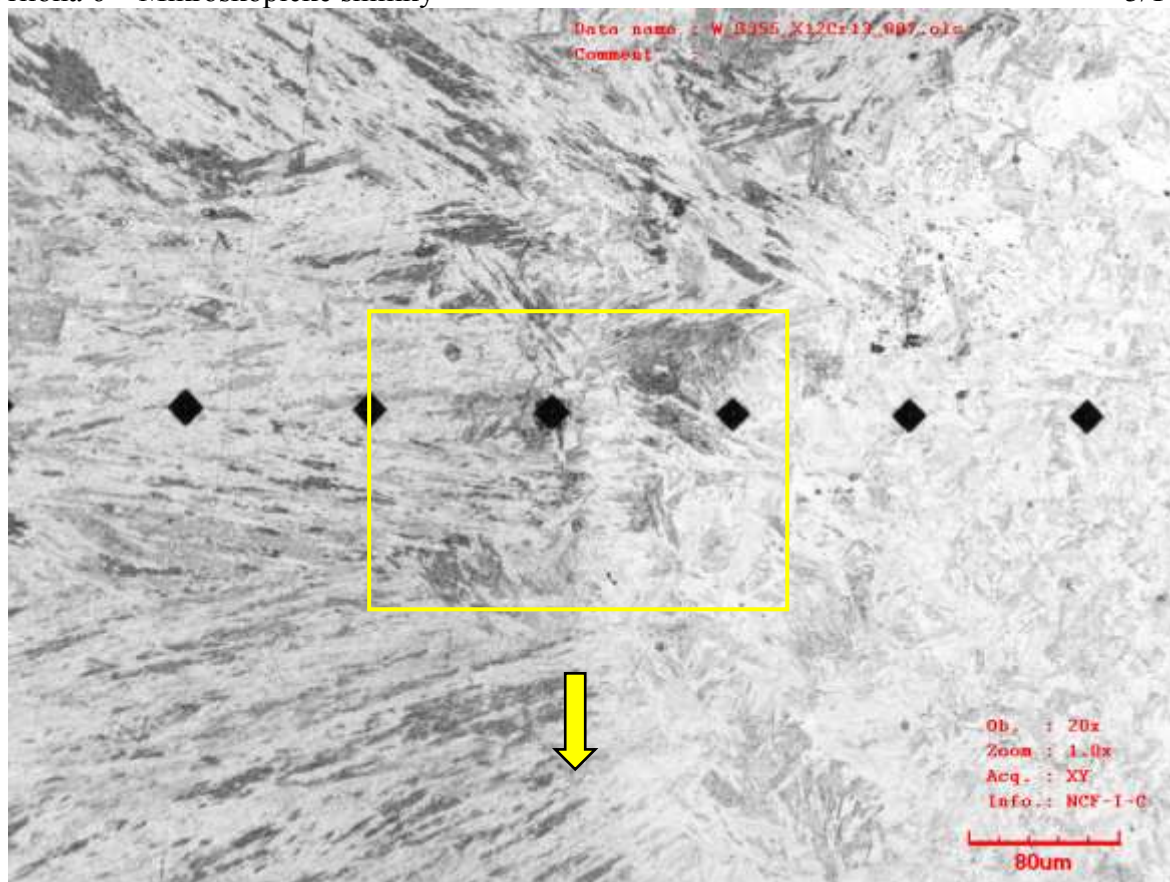
Vzorek č. 5, svarový kov, střed, objektiv 50x



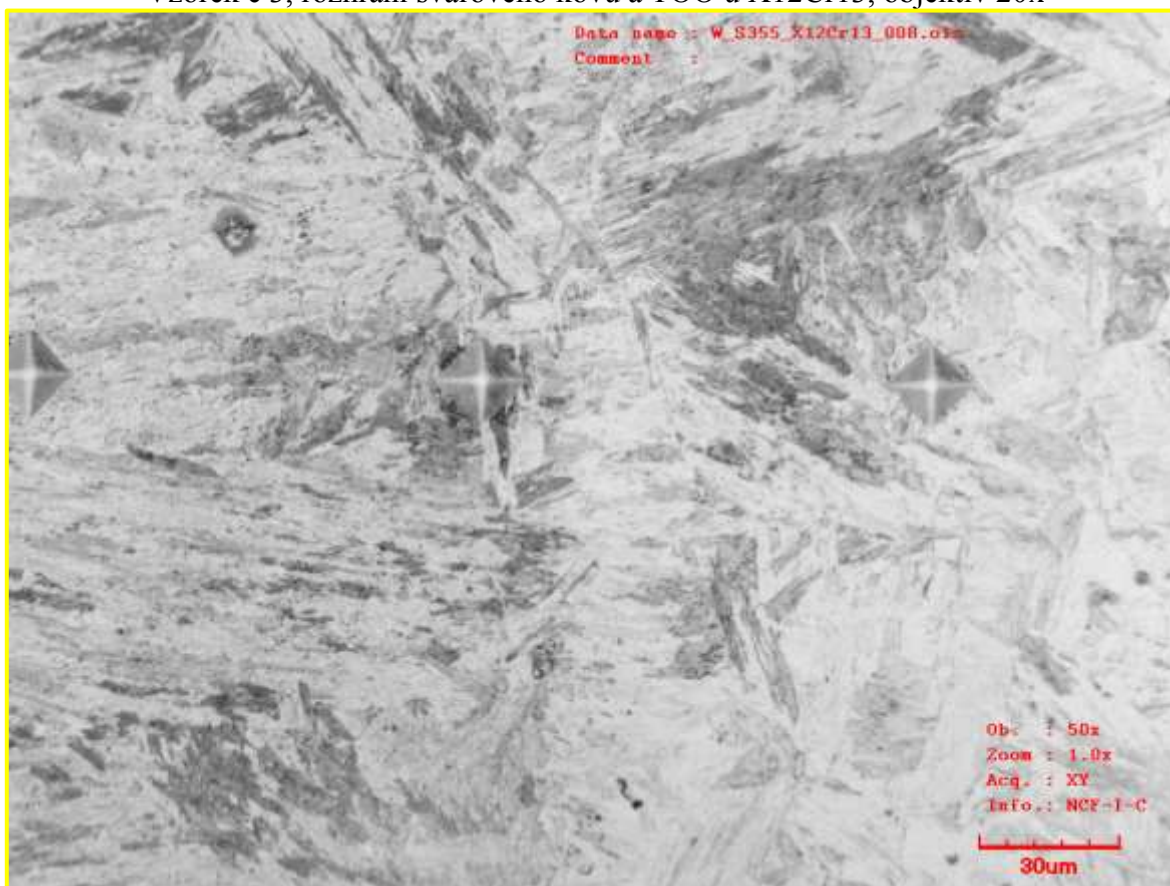
Vzorek č. 6, svarový kov, střed, objektiv 20x



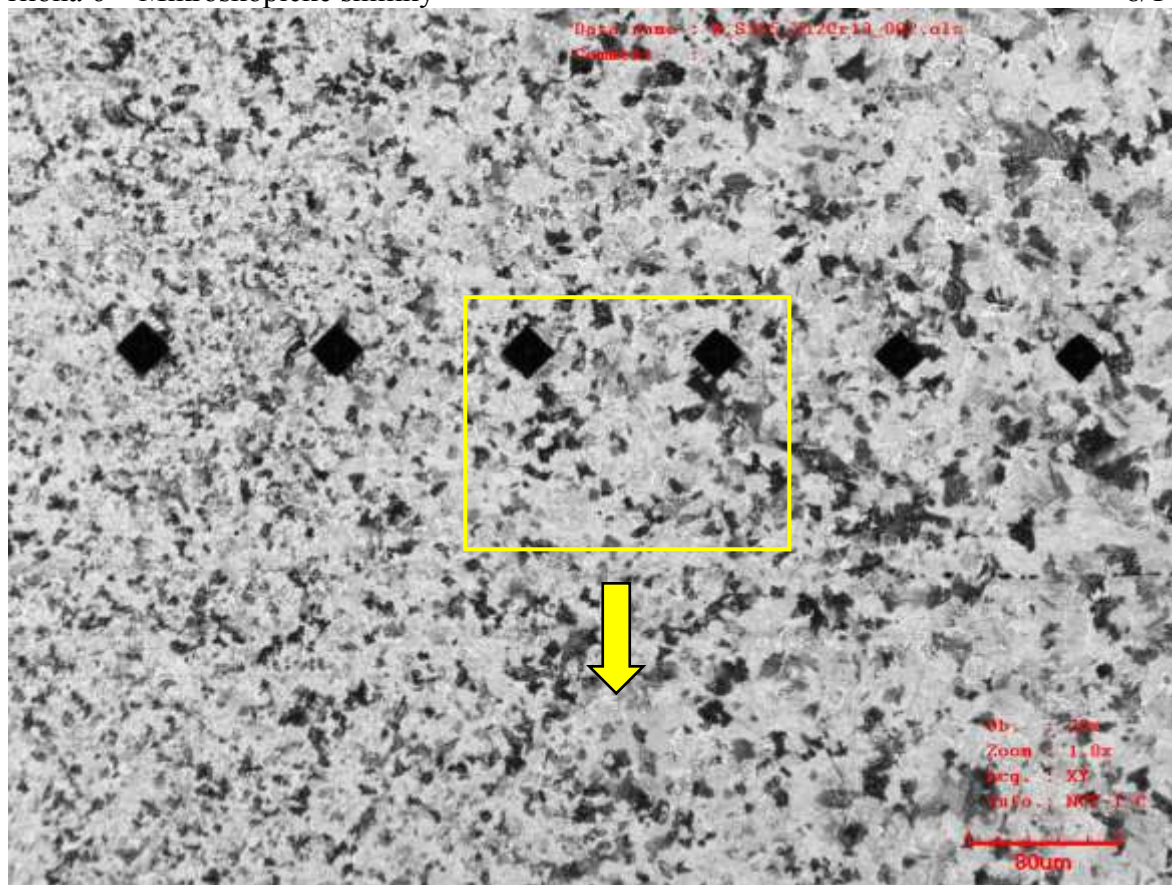
Vzorek č. 6, svarový kov, střed, objektiv 50x



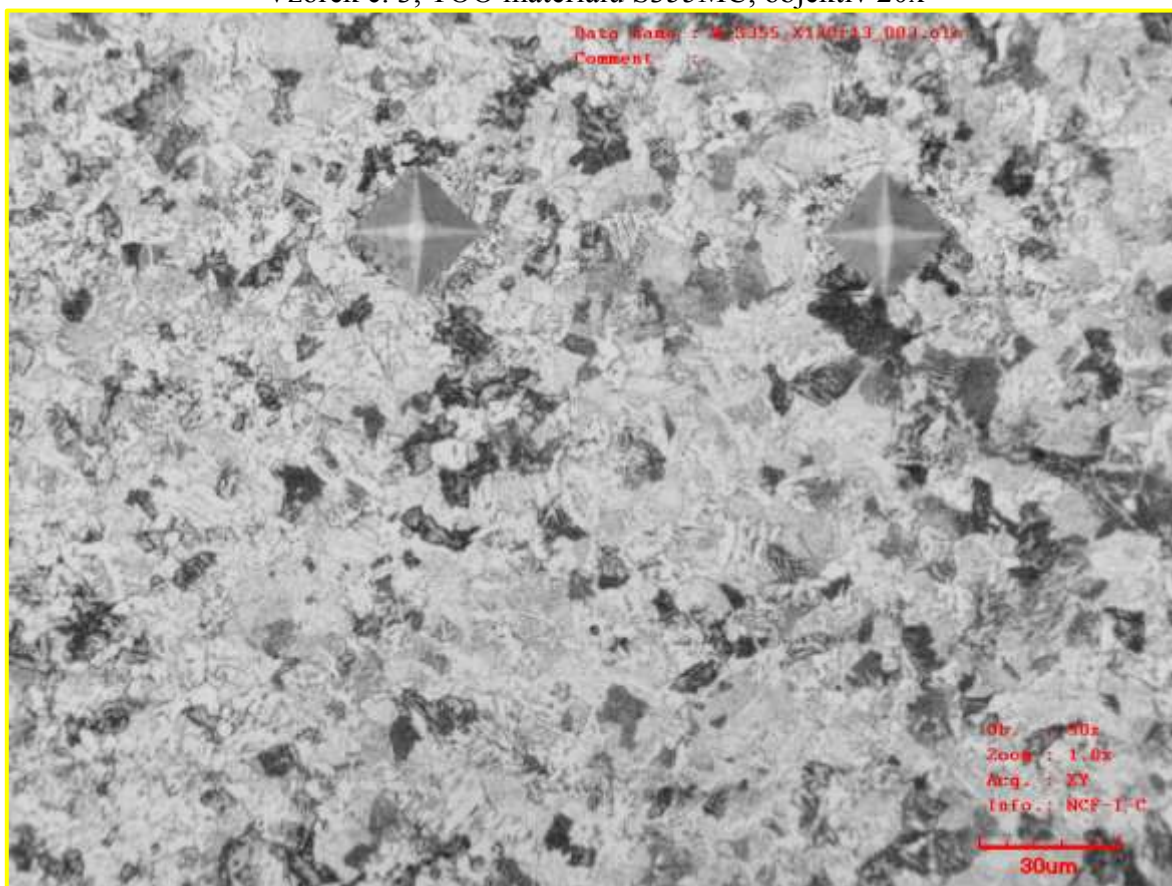
Vzorek č 3, rozhraní svarového kovu a TOO u X12Cr13, objektiv 20x



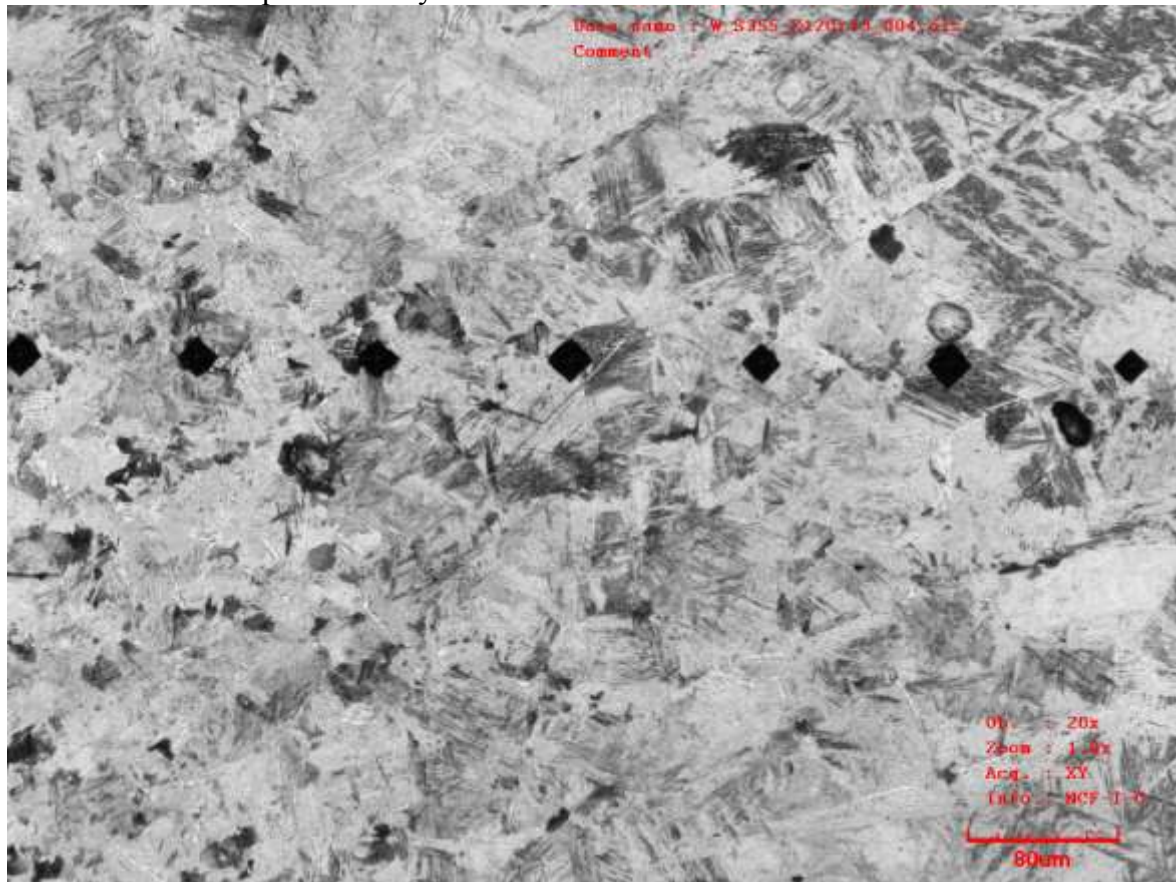
Vzorek č. 3, rozhraní svarového kovu a TOO u X12Cr13, objektiv 50x



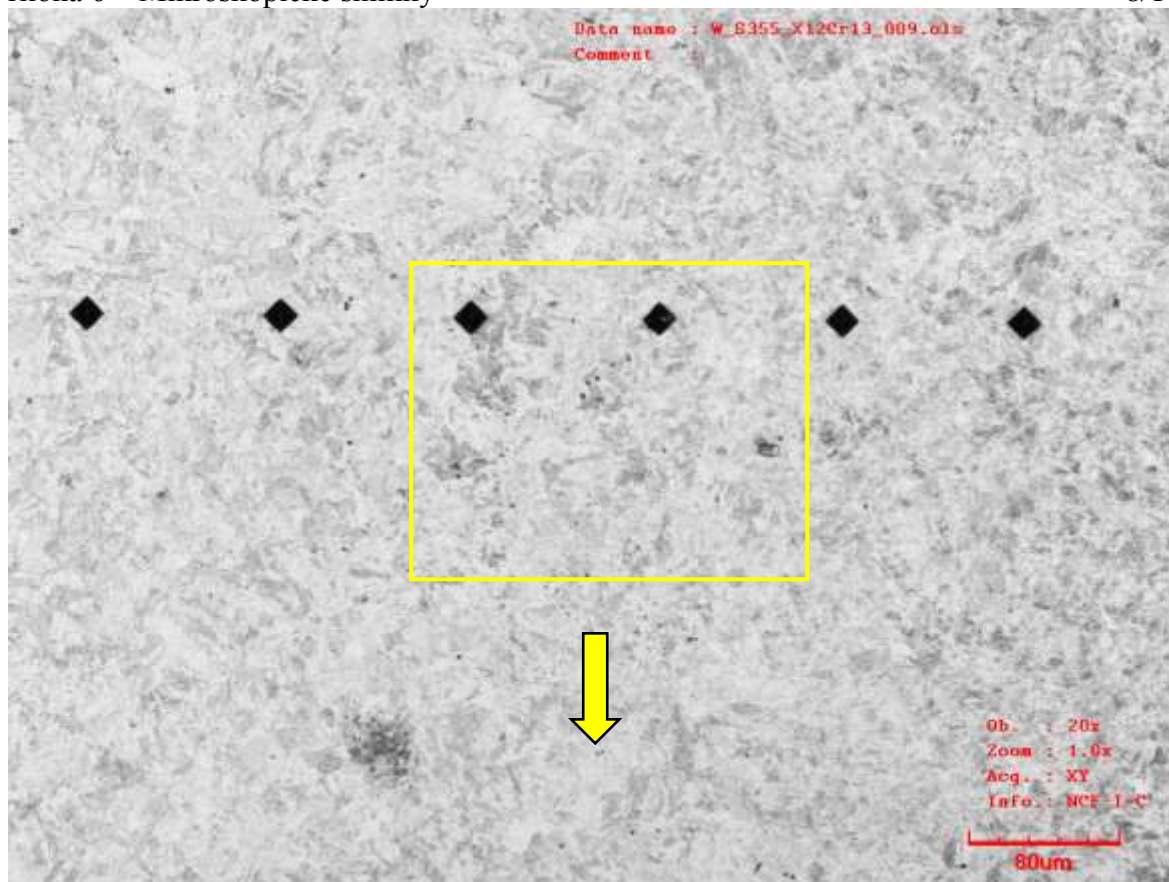
Vzorek č. 3, TOO materiálu S355MC, objektiv 20x



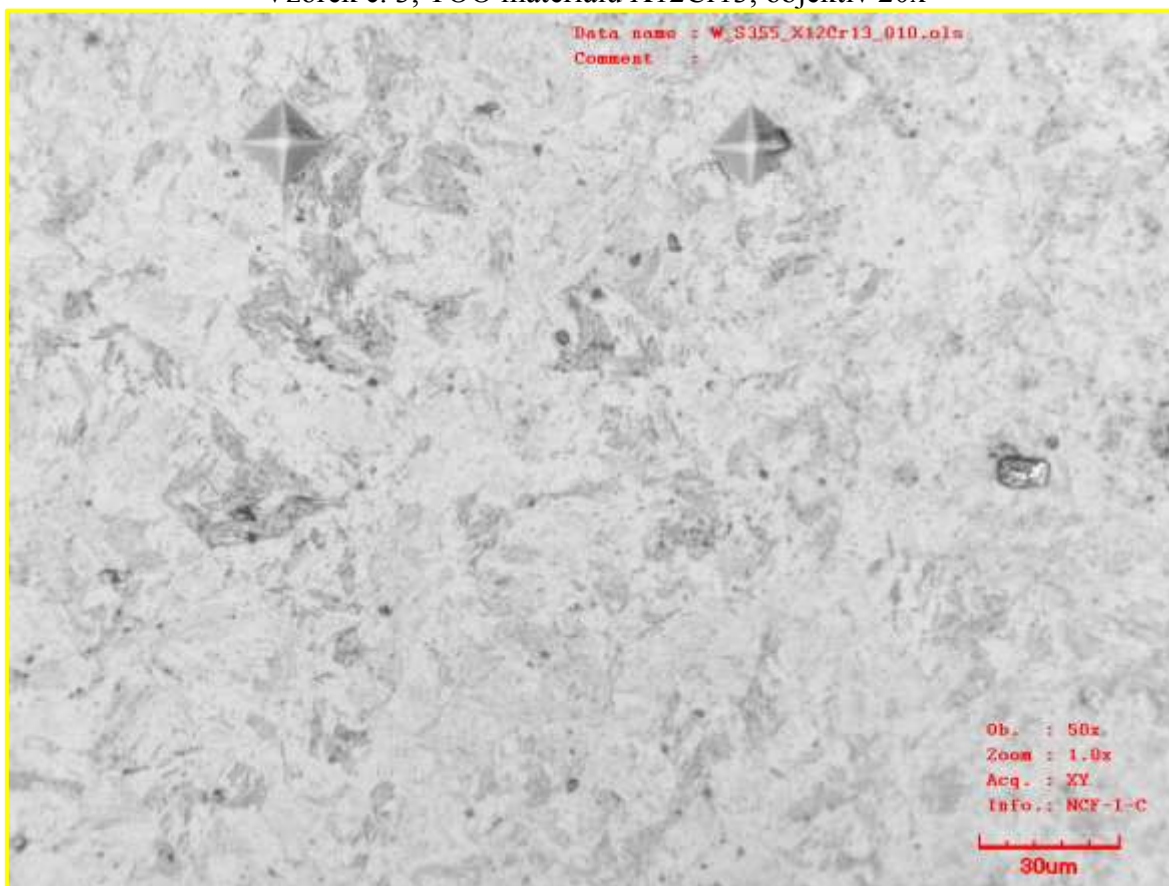
Vzorek č. 3, TOO materiálu S355MC, objektiv 50x



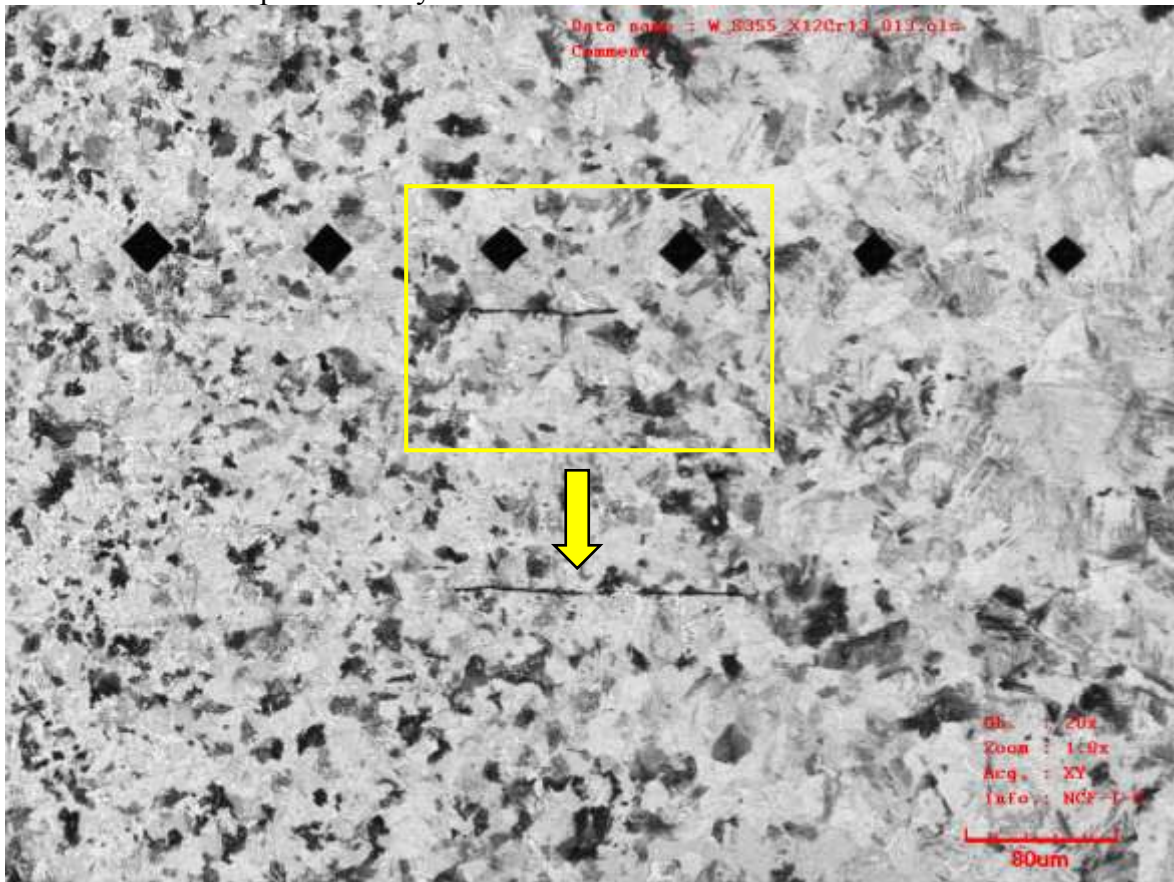
Vzorek č.3, rozmezí TOO a svarového kovu u materiálu S355MC, objektiv 20x



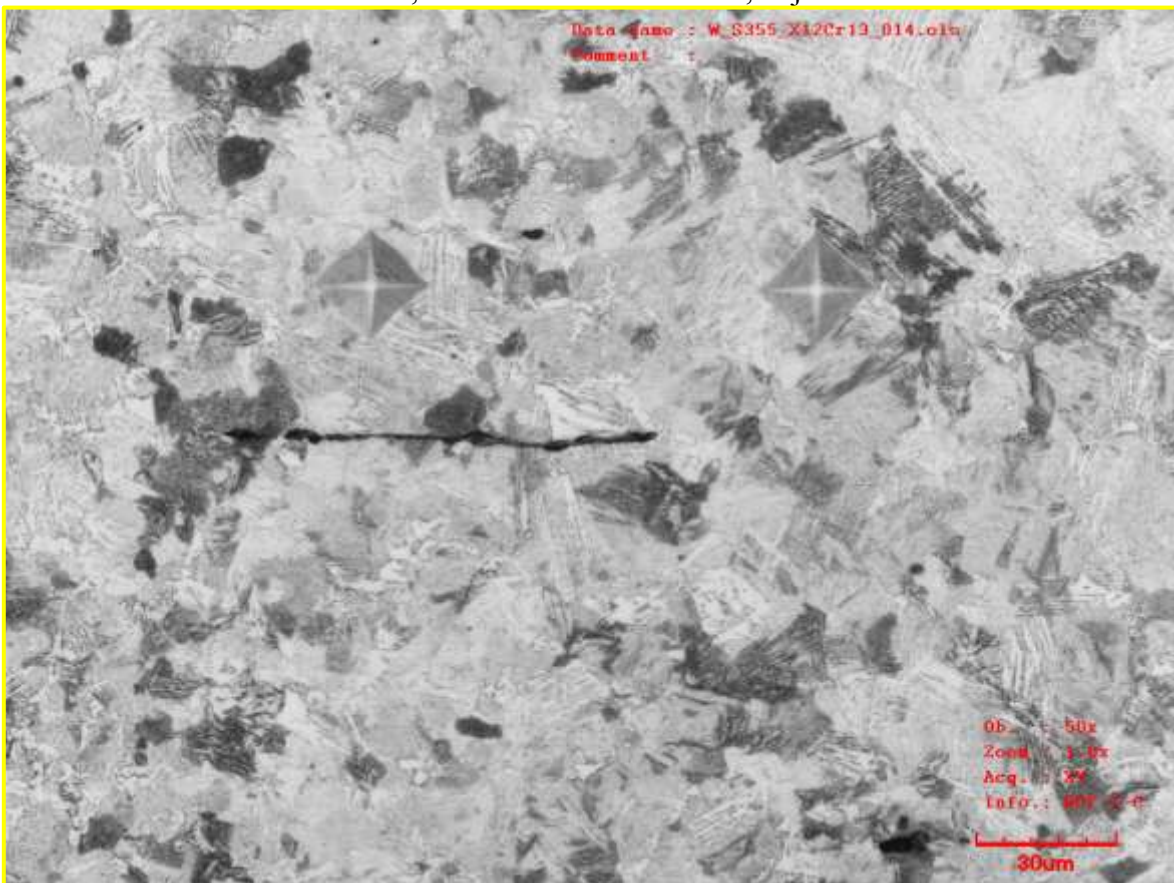
Vzorek č. 3, TOO materiálu X12Cr13, objektiv 20x



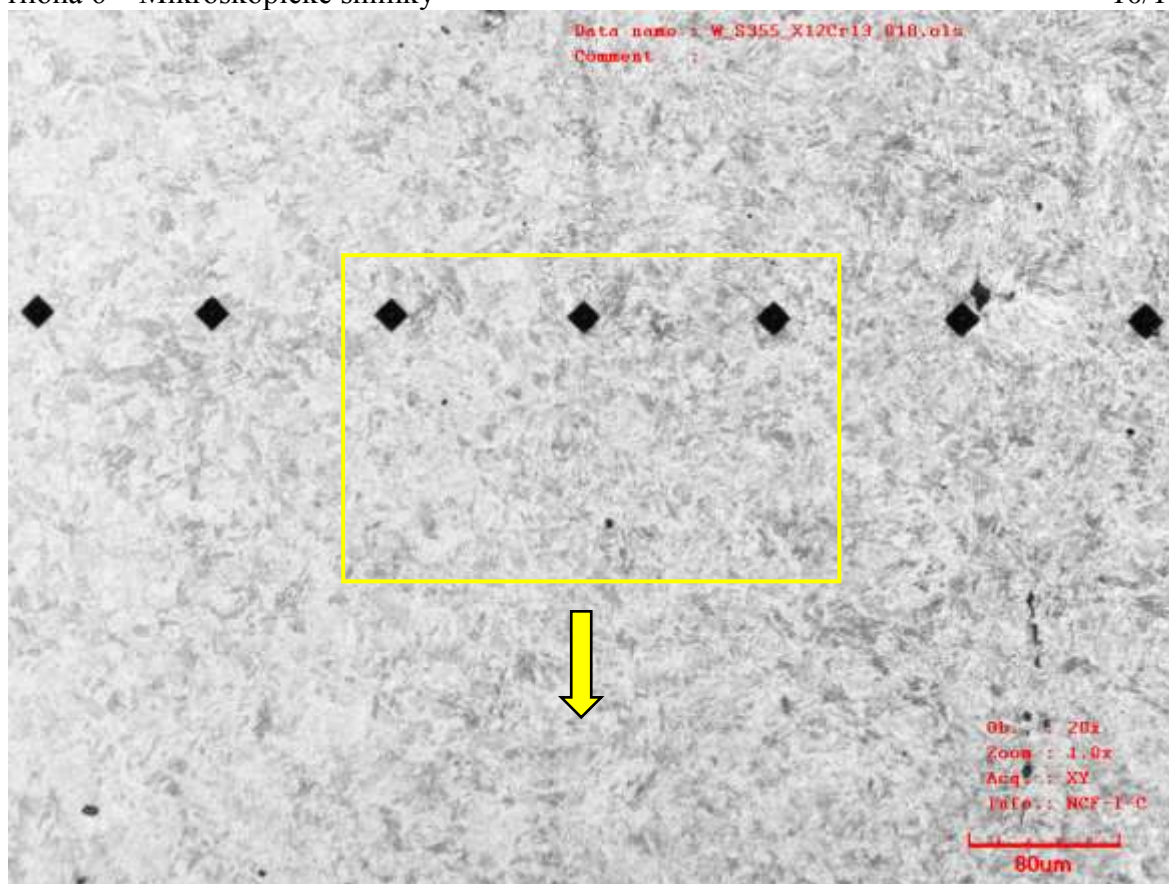
Vzorek č. 3, TOO materiálu X12Cr13, objektiv 50x



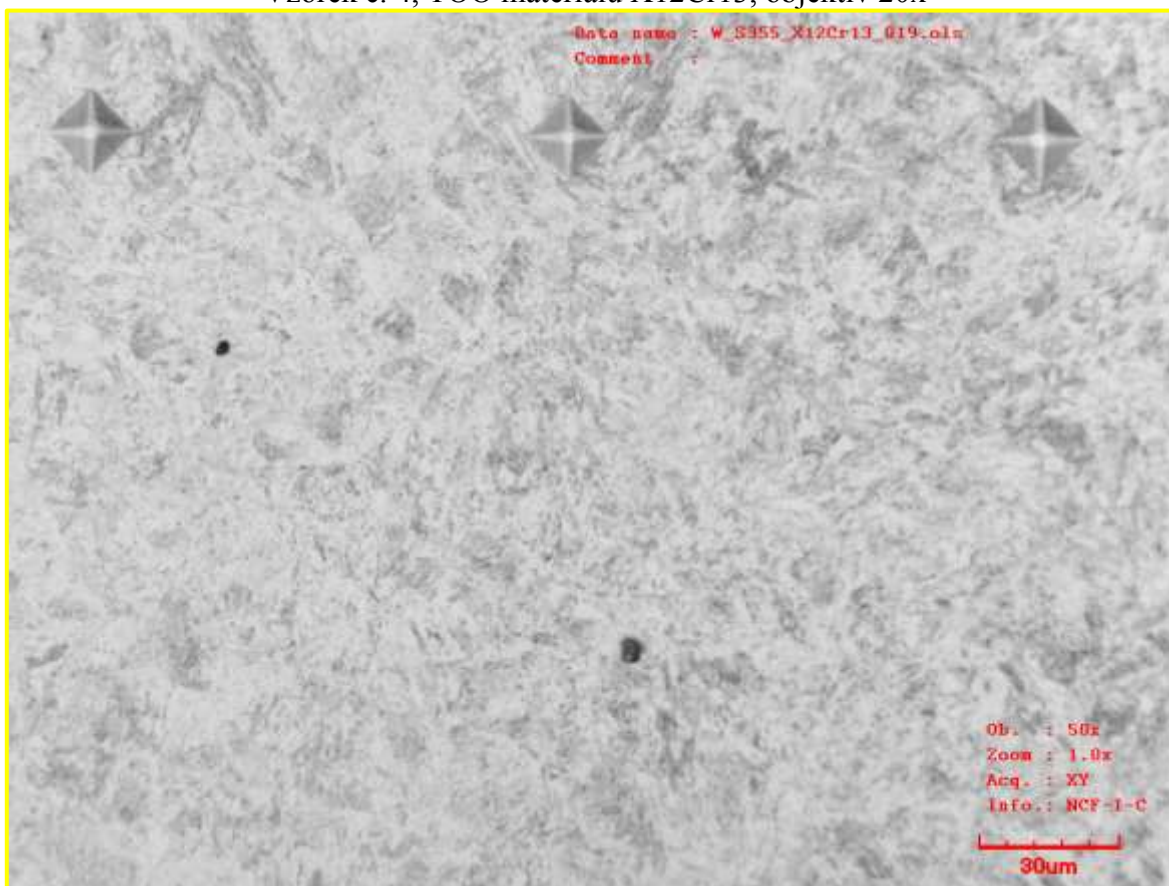
Vzorek č. 4, TOO materiálu S355MC, objektiv 20x



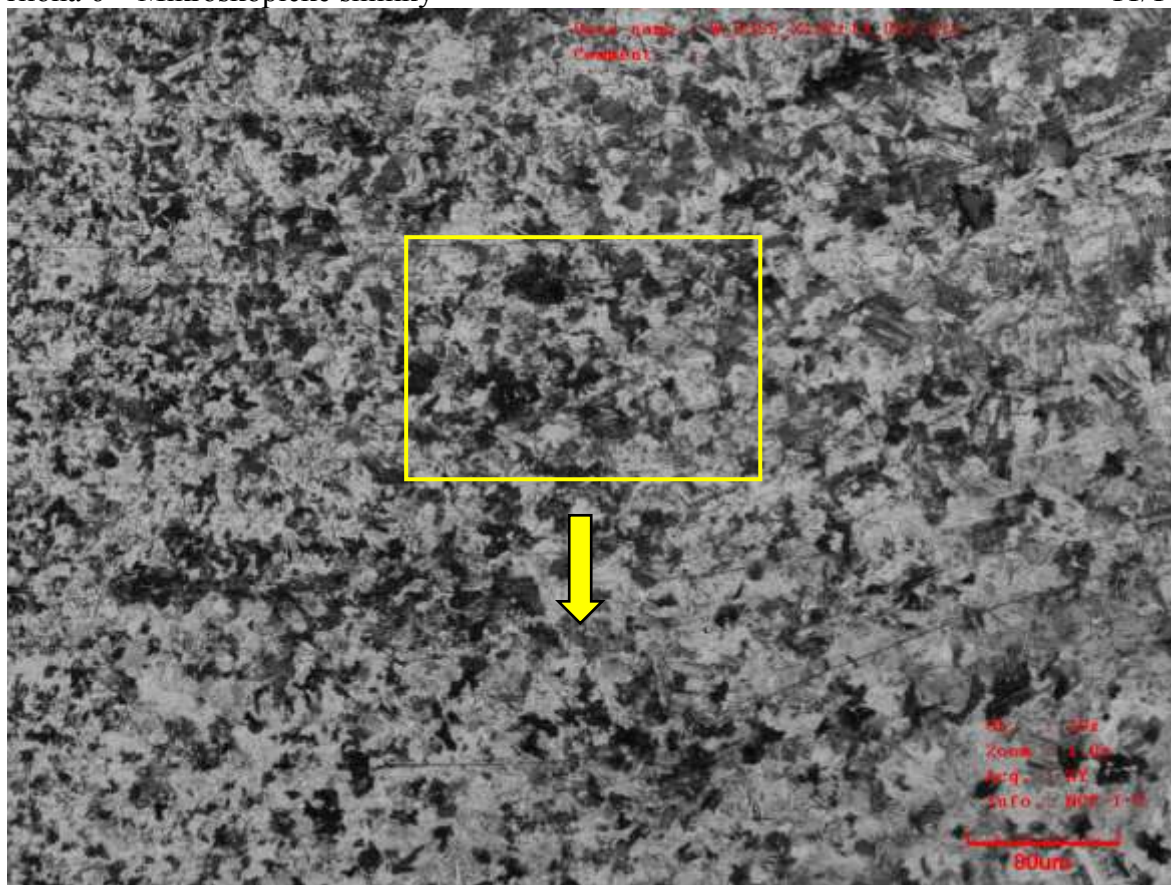
Vzorek č. 4, TOO materiálu S355MC, objektiv 50x



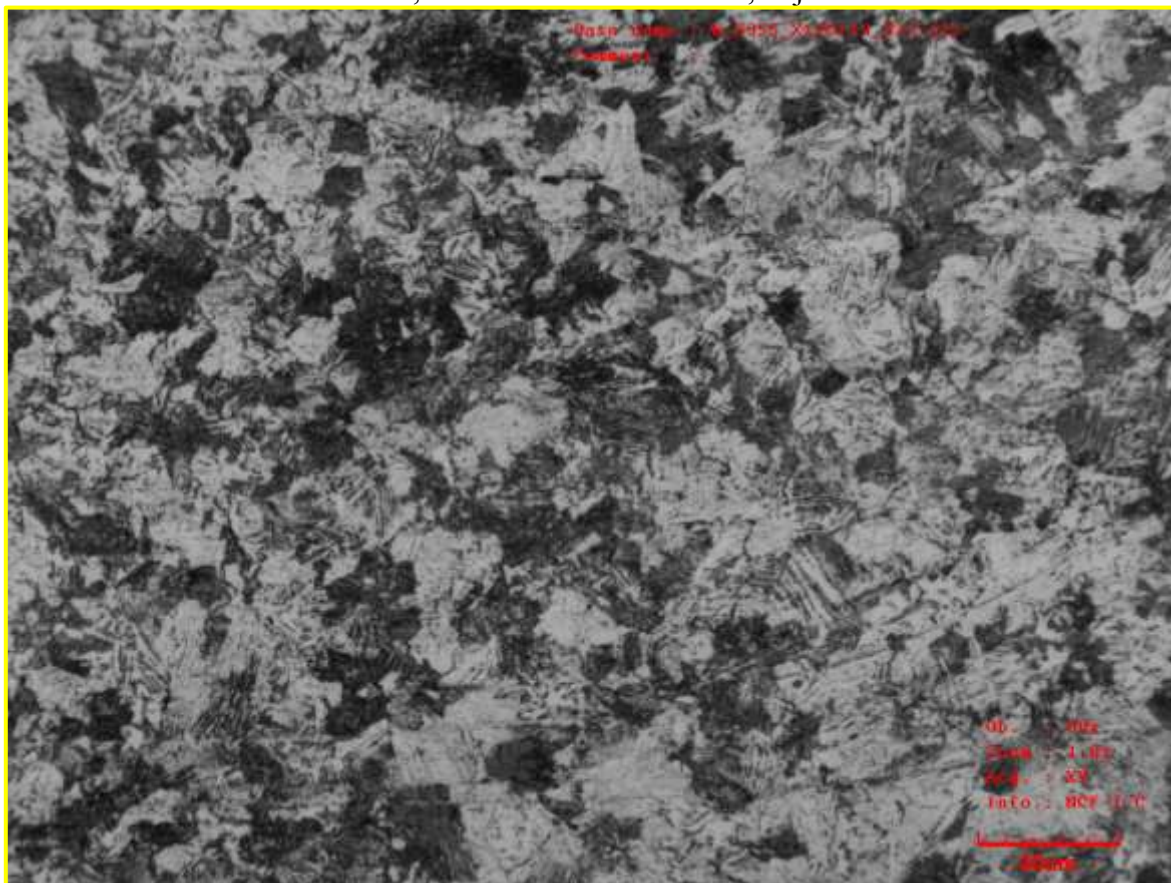
Vzorek č. 4, TOO materiálu X12Cr13, objektiv 20x



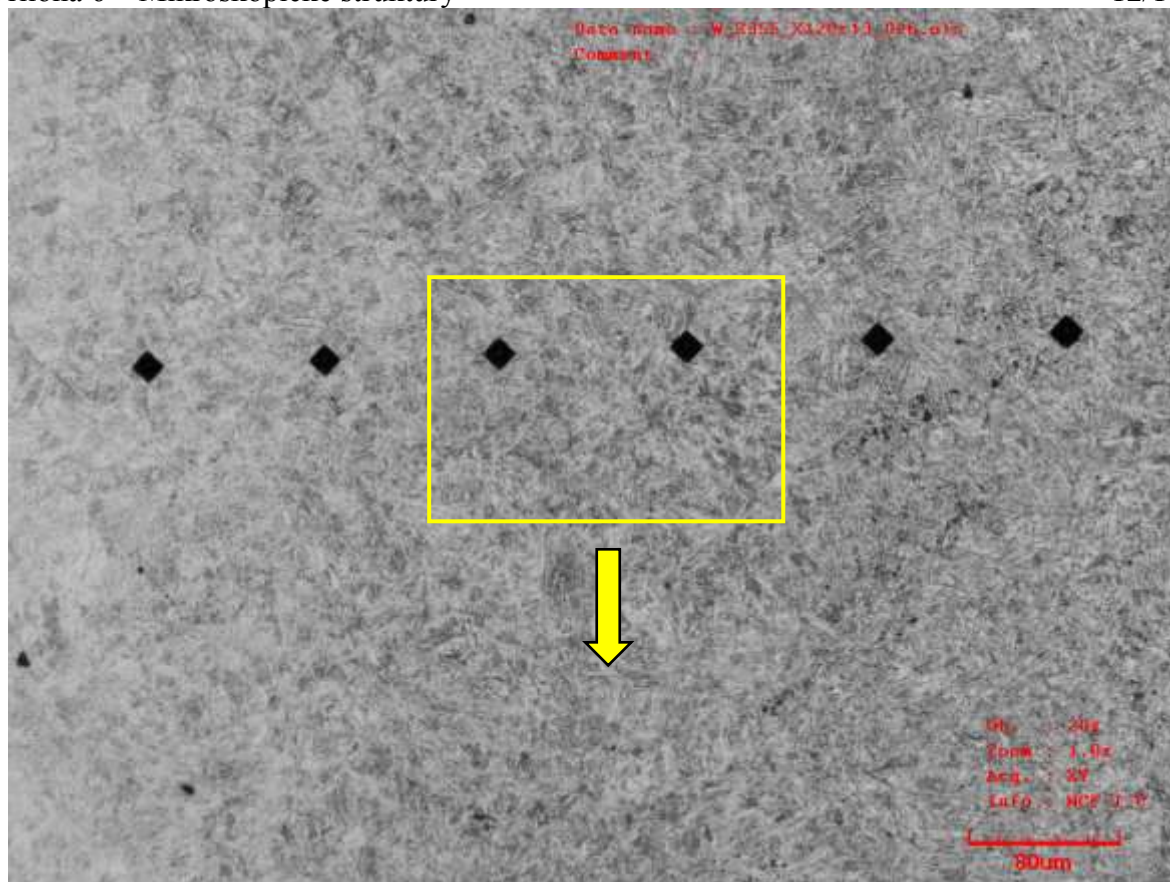
Vzorek č. 4, TOO materiálu X12Cr13, objektiv 50x



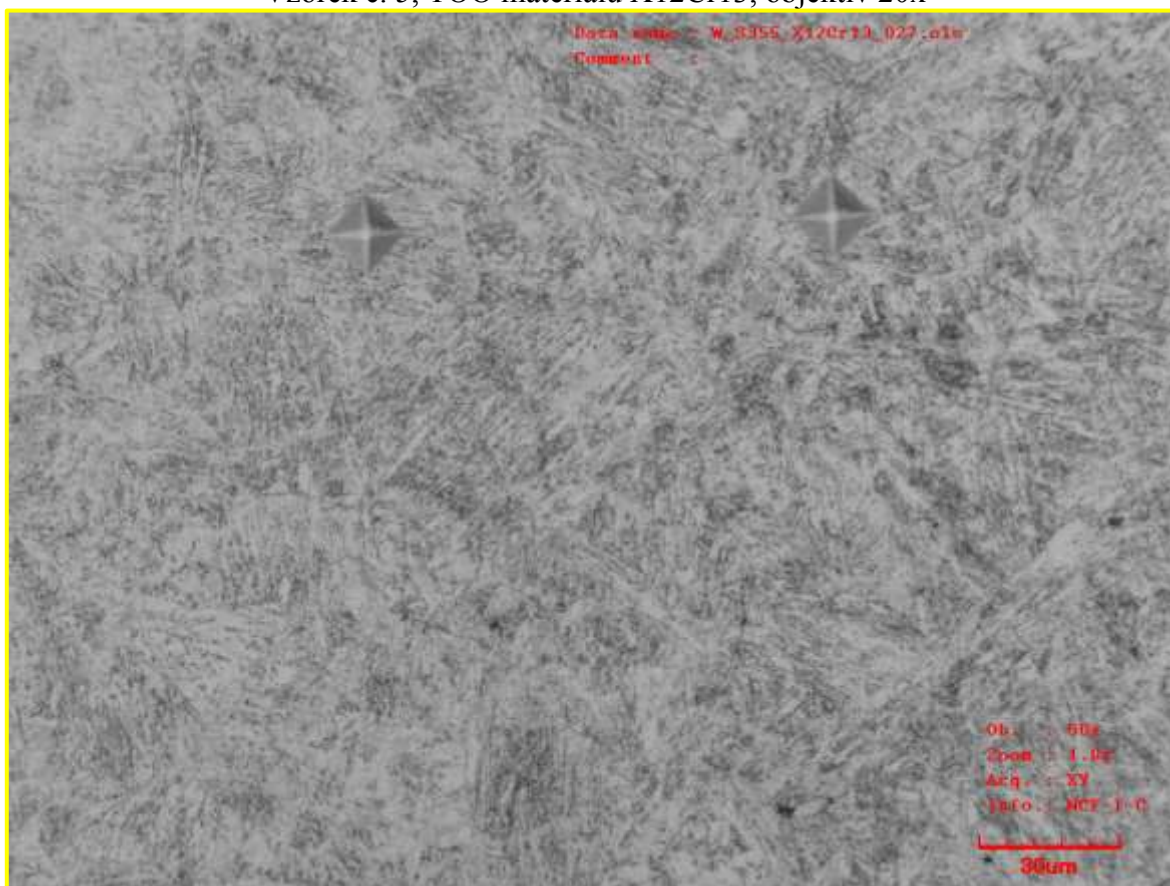
Vzorek č. 5, TOO materiálu S355MC, objektiv 20x



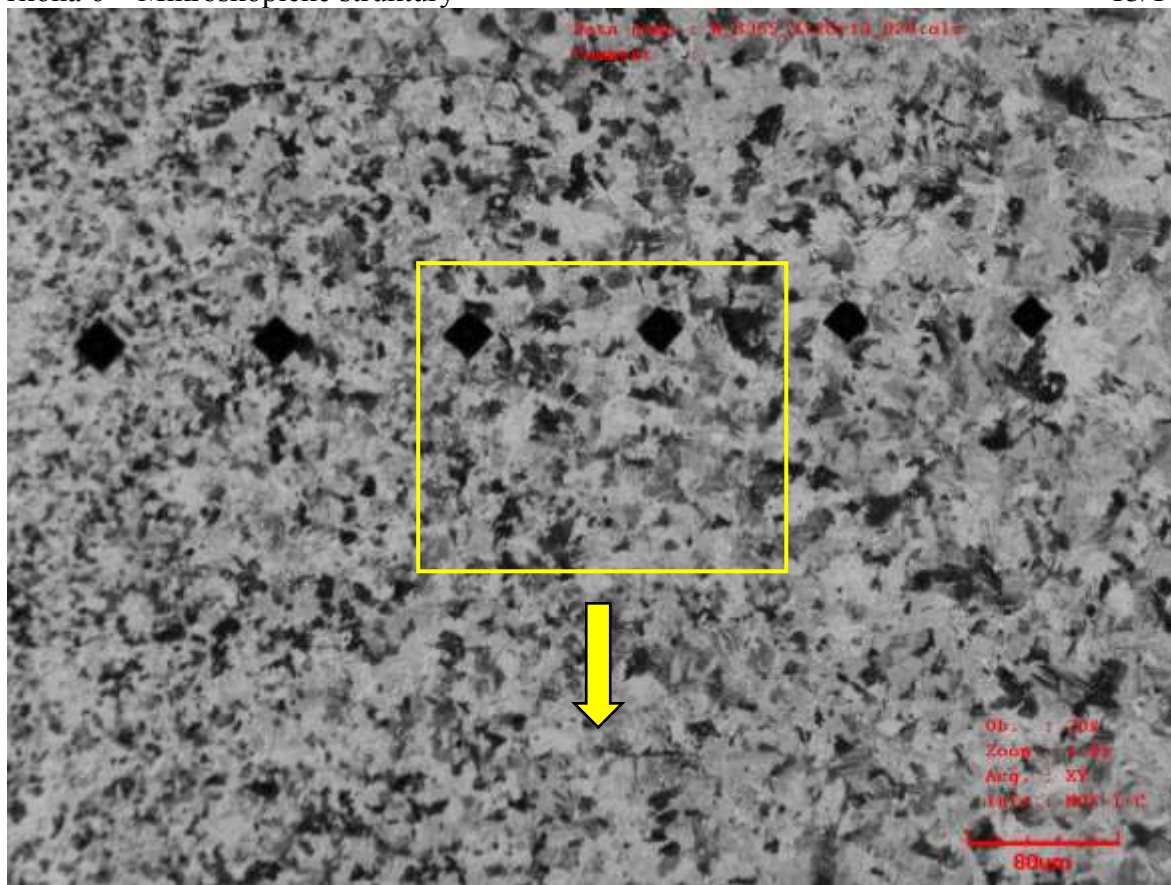
Vzorek č. 5, TOO materiálu S355MC, objektiv 50x



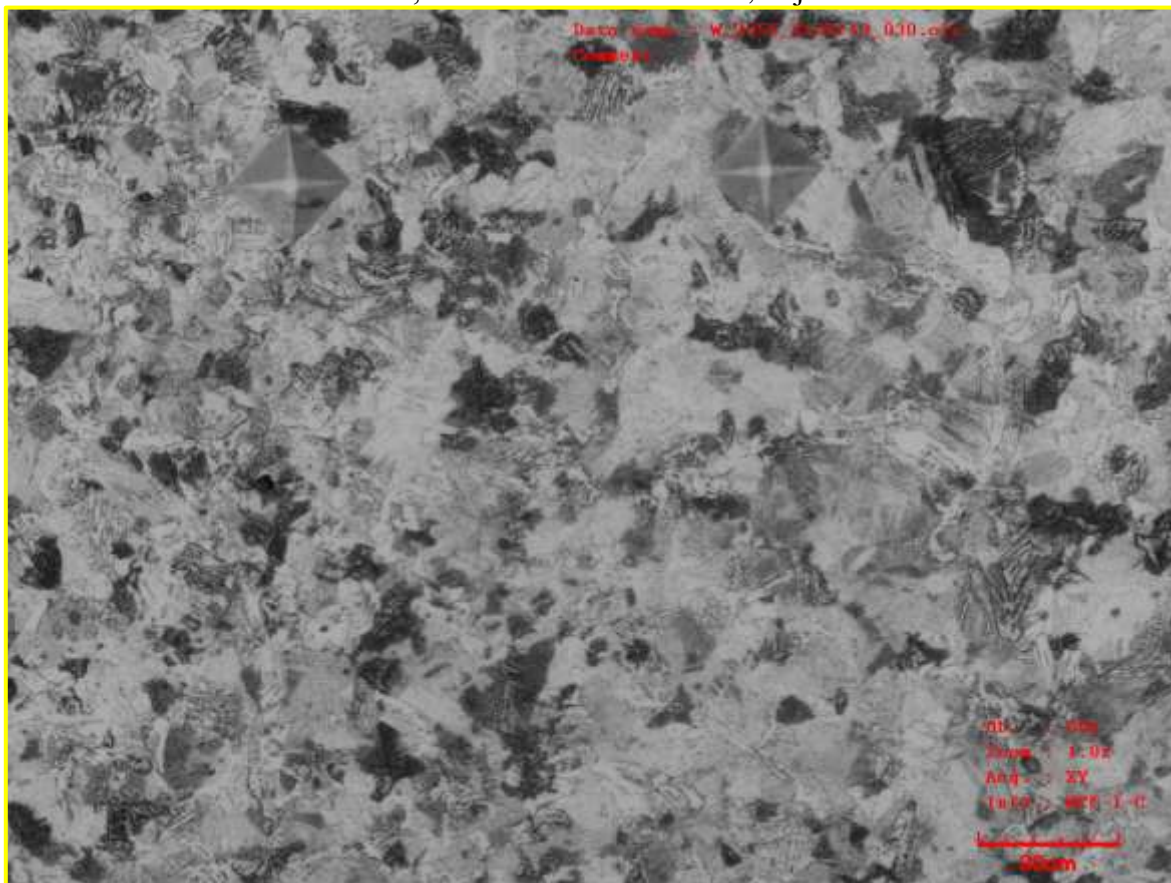
Vzorek č. 5, TOO materiálu X12Cr13, objektiv 20x



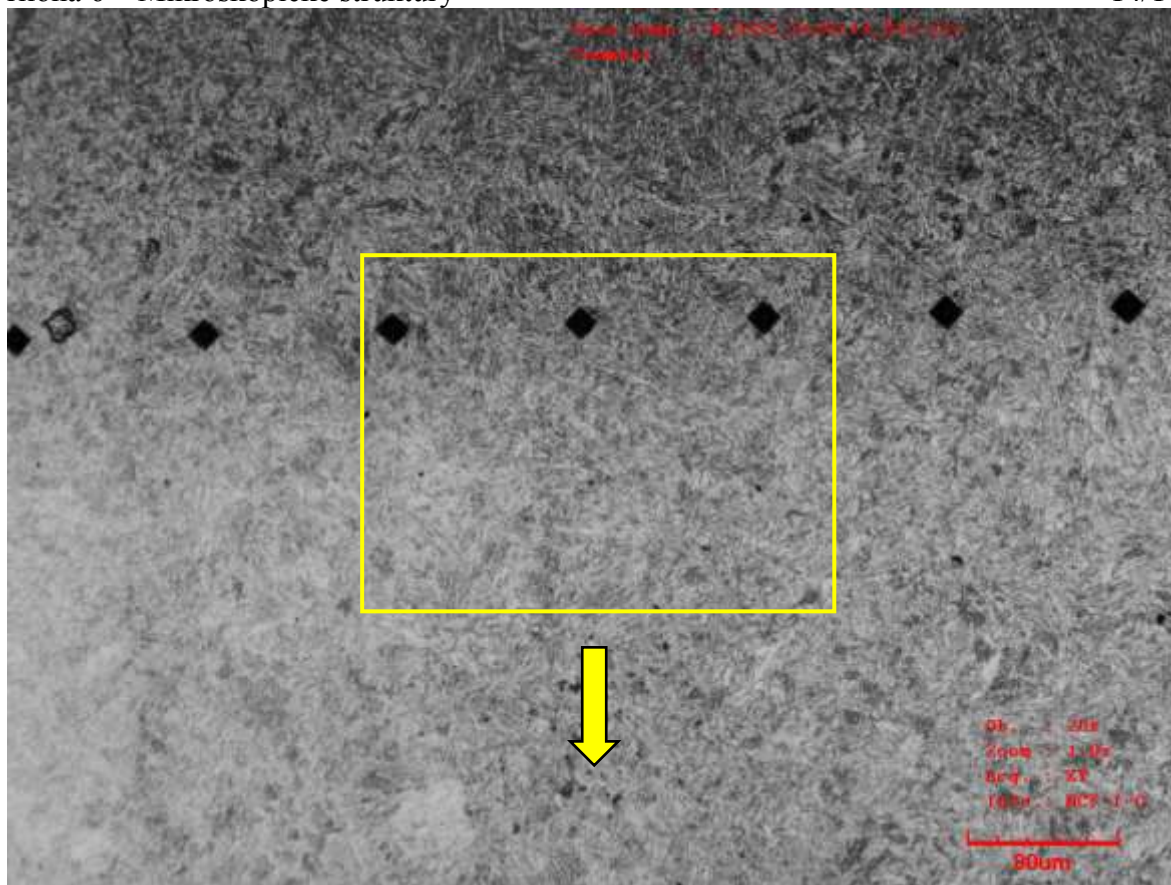
Vzorek č. 5, TOO materiálu X12Cr13, objektiv 50x



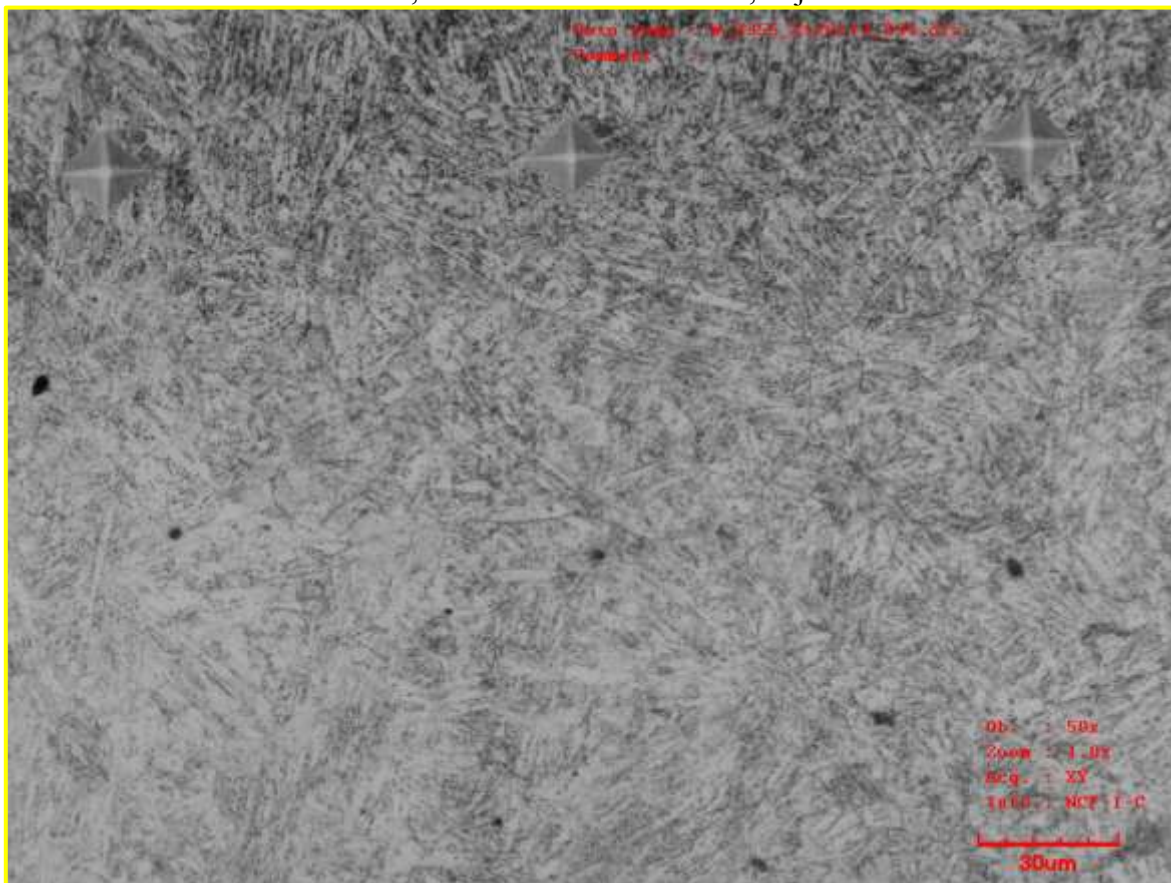
Vzorek č. 6, TOO materiálu S355MC, objektiv 20x



Vzorek č. 6, TOO materiálu S355MC, objektiv 50x



Vzorek č. 6, TOO materiálu X12Cr13, objektiv 20x



Vzorek č. 6, TOO materiálu X12Cr13, objektiv 50x

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v
Fakulta strojního inženýrství
Ústav materiálových věd a
Technická 198/2, 616 69

Vzorek : X12Cr13+S355 - vz.1

Datum : 7.3.2019

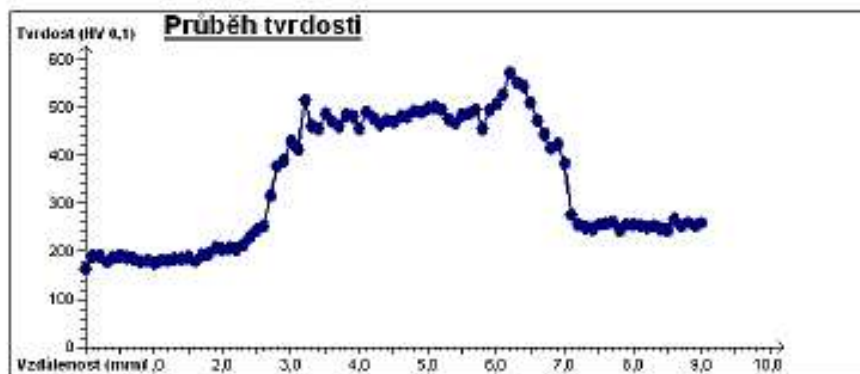
Objed. číslo :

MFI : Dolezal

Indentor : VICKERS Objektiv : X100

Čas : 10 Zatížení : 0,1

Materiál: metoda WOB
Předpis:



| Rada | Bod | Vzdálenost | Tvrdost | Přep. tvrdosti 1 |
|------|-----|------------|------------|------------------|
| | 1 | 0.000 | 163 HV 0,1 | - |
| | 2 | 0.100 | 190 HV 0,1 | - |
| | 3 | 0.200 | 191 HV 0,1 | - |
| | 4 | 0.300 | 179 HV 0,1 | - |
| | 5 | 0.400 | 188 HV 0,1 | - |
| | 6 | 0.500 | 189 HV 0,1 | - |
| | 7 | 0.600 | 186 HV 0,1 | - |
| | 8 | 0.700 | 183 HV 0,1 | - |
| | 9 | 0.800 | 179 HV 0,1 | - |
| | 10 | 0.900 | 181 HV 0,1 | - |
| | 11 | 1.000 | 176 HV 0,1 | - |
| | 12 | 1.100 | 181 HV 0,1 | - |
| | 13 | 1.200 | 181 HV 0,1 | - |
| | 14 | 1.300 | 183 HV 0,1 | - |
| | 15 | 1.400 | 185 HV 0,1 | - |
| | 16 | 1.500 | 186 HV 0,1 | - |
| | 17 | 1.600 | 180 HV 0,1 | - |
| | 18 | 1.700 | 192 HV 0,1 | - |
| | 19 | 1.800 | 197 HV 0,1 | - |
| | 20 | 1.900 | 208 HV 0,1 | - |
| | 21 | 2.000 | 203 HV 0,1 | - |
| | 22 | 2.100 | 207 HV 0,1 | - |
| | 23 | 2.200 | 203 HV 0,1 | - |
| | 24 | 2.300 | 212 HV 0,1 | - |
| | 25 | 2.400 | 231 HV 0,1 | - |
| | 26 | 2.500 | 244 HV 0,1 | - |
| | 27 | 2.600 | 253 HV 0,1 | - |
| | 28 | 2.700 | 315 HV 0,1 | - |
| | 29 | 2.800 | 379 HV 0,1 | - |
| | 30 | 2.900 | 391 HV 0,1 | - |
| | 31 | 3.000 | 429 HV 0,1 | - |
| | 32 | 3.100 | 414 HV 0,1 | - |
| | 33 | 3.200 | 517 HV 0,1 | - |
| | 34 | 3.300 | 461 HV 0,1 | - |
| | 35 | 3.400 | 455 HV 0,1 | - |
| | 36 | 3.500 | 487 HV 0,1 | - |
| | 37 | 3.600 | 469 HV 0,1 | - |
| | 38 | 3.700 | 461 HV 0,1 | - |
| | 39 | 3.800 | 483 HV 0,1 | - |
| | 40 | 3.900 | 481 HV 0,1 | - |
| | 41 | 4.000 | 457 HV 0,1 | - |
| | 42 | 4.100 | 489 HV 0,1 | - |
| | 43 | 4.200 | 479 HV 0,1 | - |
| | 44 | 4.300 | 463 HV 0,1 | - |
| | 45 | 4.400 | 474 HV 0,1 | - |

Vzorek : X12Cr13+S355 - vz.1 7.3.2019

Strana 2

| <u>Řada</u> | <u>1</u> | | | |
|-------------|------------|------------|------------------|--|
| Bod | Vzdálenost | Tvrdost | Přep. tvrdosti 1 | |
| 46 | 4.500 | 471 HV 0,1 | - | |
| 47 | 4.600 | 481 HV 0,1 | - | |
| 48 | 4.700 | 481 HV 0,1 | - | |
| 49 | 4.800 | 493 HV 0,1 | - | |
| 50 | 4.900 | 489 HV 0,1 | - | |
| 51 | 5.000 | 499 HV 0,1 | - | |
| 52 | 5.100 | 501 HV 0,1 | - | |
| 53 | 5.200 | 497 HV 0,1 | - | |
| 54 | 5.300 | 477 HV 0,1 | - | |
| 55 | 5.400 | 467 HV 0,1 | - | |
| 56 | 5.500 | 485 HV 0,1 | - | |
| 57 | 5.600 | 487 HV 0,1 | - | |
| 58 | 5.700 | 497 HV 0,1 | - | |
| 59 | 5.800 | 457 HV 0,1 | - | |
| 60 | 5.900 | 495 HV 0,1 | - | |
| 61 | 6.000 | 506 HV 0,1 | - | |
| 62 | 6.100 | 526 HV 0,1 | - | |
| 63 | 6.200 | 573 HV 0,1 | - | |
| 64 | 6.300 | 553 HV 0,1 | - | |
| 65 | 6.400 | 545 HV 0,1 | - | |
| 66 | 6.500 | 510 HV 0,1 | - | |
| 67 | 6.600 | 473 HV 0,1 | - | |
| 68 | 6.700 | 443 HV 0,1 | - | |
| 69 | 6.800 | 415 HV 0,1 | - | |
| 70 | 6.900 | 425 HV 0,1 | - | |
| 71 | 7.000 | 383 HV 0,1 | - | |
| 72 | 7.100 | 275 HV 0,1 | - | |
| 73 | 7.200 | 257 HV 0,1 | - | |
| 74 | 7.300 | 249 HV 0,1 | - | |
| 75 | 7.400 | 246 HV 0,1 | - | |
| 76 | 7.500 | 255 HV 0,1 | - | |
| 77 | 7.600 | 258 HV 0,1 | - | |
| 78 | 7.700 | 261 HV 0,1 | - | |
| 79 | 7.800 | 245 HV 0,1 | - | |
| 80 | 7.900 | 256 HV 0,1 | - | |
| 81 | 8.000 | 257 HV 0,1 | - | |
| 82 | 8.100 | 252 HV 0,1 | - | |
| 83 | 8.200 | 249 HV 0,1 | - | |
| 84 | 8.300 | 254 HV 0,1 | - | |
| 85 | 8.400 | 246 HV 0,1 | - | |
| 86 | 8.500 | 245 HV 0,1 | - | |
| 87 | 8.600 | 267 HV 0,1 | - | |
| 88 | 8.700 | 252 HV 0,1 | - | |
| 89 | 8.800 | 260 HV 0,1 | - | |
| 90 | 8.900 | 253 HV 0,1 | - | |
| 91 | 9.000 | 260 HV 0,1 | - | |

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v
Fakulta strojního inženýrství
Ústav materiálových věd a
Technická 198/2, 616 69

Vzorek : X12Cr13+S355 - vz.2

Datum : 7.3.2019

Objed. číslo :

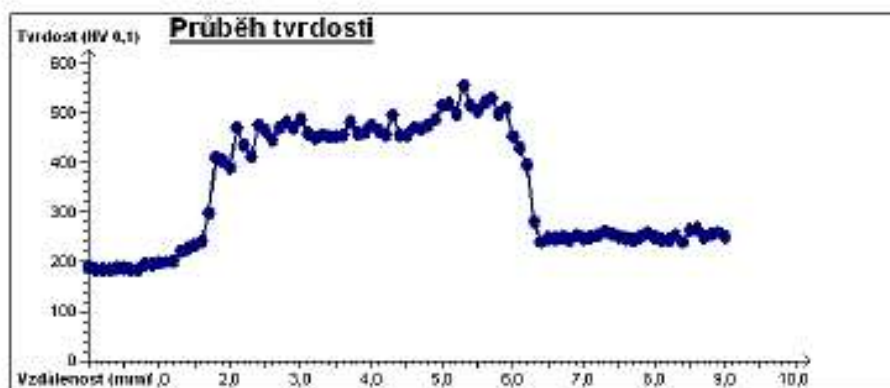
Měří : Dolezal

Indentor : VICKERS Objektv : X100

Čas : 10 Zatížení : 0,1

Material: metoda WOB

Předpis:



| Řada | 1 | | | | | | |
|------|------------|------------|----------------|----|-------|------------|---|
| Bod | Vzdálenost | Tvrdost | Přep. tvrdosti | | | | |
| 1 | 0.000 | 189 HV 0,1 | - | 22 | 2.100 | 469 HV 0,1 | - |
| 2 | 0.100 | 184 HV 0,1 | - | 23 | 2.200 | 436 HV 0,1 | - |
| 3 | 0.200 | 185 HV 0,1 | - | 24 | 2.300 | 412 HV 0,1 | - |
| 4 | 0.300 | 185 HV 0,1 | - | 25 | 2.400 | 475 HV 0,1 | - |
| 5 | 0.400 | 187 HV 0,1 | - | 26 | 2.500 | 465 HV 0,1 | - |
| 6 | 0.500 | 188 HV 0,1 | - | 27 | 2.600 | 446 HV 0,1 | - |
| 7 | 0.600 | 185 HV 0,1 | - | 28 | 2.700 | 469 HV 0,1 | - |
| 8 | 0.700 | 185 HV 0,1 | - | 29 | 2.800 | 481 HV 0,1 | - |
| 9 | 0.800 | 197 HV 0,1 | - | 30 | 2.900 | 471 HV 0,1 | - |
| 10 | 0.900 | 197 HV 0,1 | - | 31 | 3.000 | 487 HV 0,1 | - |
| 11 | 1.000 | 198 HV 0,1 | - | 32 | 3.100 | 459 HV 0,1 | - |
| 12 | 1.100 | 200 HV 0,1 | - | 33 | 3.200 | 450 HV 0,1 | - |
| 13 | 1.200 | 202 HV 0,1 | - | 34 | 3.300 | 456 HV 0,1 | - |
| 14 | 1.300 | 221 HV 0,1 | - | 35 | 3.400 | 454 HV 0,1 | - |
| 15 | 1.400 | 226 HV 0,1 | - | 36 | 3.500 | 452 HV 0,1 | - |
| 16 | 1.500 | 233 HV 0,1 | - | 37 | 3.600 | 456 HV 0,1 | - |
| 17 | 1.600 | 241 HV 0,1 | - | 38 | 3.700 | 481 HV 0,1 | - |
| 18 | 1.700 | 298 HV 0,1 | - | 39 | 3.800 | 459 HV 0,1 | - |
| 19 | 1.800 | 410 HV 0,1 | - | 40 | 3.900 | 461 HV 0,1 | - |
| 20 | 1.900 | 403 HV 0,1 | - | 41 | 4.000 | 475 HV 0,1 | - |
| 21 | 2.000 | 391 HV 0,1 | - | 42 | 4.100 | 463 HV 0,1 | - |
| | | | | 43 | 4.200 | 457 HV 0,1 | - |
| | | | | 44 | 4.300 | 497 HV 0,1 | - |
| | | | | 45 | 4.400 | 457 HV 0,1 | - |

Vzorek : X12Cr13+S355 - vz.2

7.3.2019

strana 2

| <u>Řada</u> | <u>1</u> | | | |
|-------------|------------|------------|------------------|---|
| Bod | Vzdálenost | Tvrdoost | Přep. tvrdosti 1 | |
| 46 | 4.500 | 457 HV 0,1 | - | - |
| 47 | 4.600 | 471 HV 0,1 | - | - |
| 48 | 4.700 | 467 HV 0,1 | - | - |
| 49 | 4.800 | 477 HV 0,1 | - | - |
| 50 | 4.900 | 487 HV 0,1 | - | - |
| 51 | 5.000 | 515 HV 0,1 | - | - |
| 52 | 5.100 | 519 HV 0,1 | - | - |
| 53 | 5.200 | 499 HV 0,1 | - | - |
| 54 | 5.300 | 557 HV 0,1 | - | - |
| 55 | 5.400 | 517 HV 0,1 | - | - |
| 56 | 5.500 | 504 HV 0,1 | - | - |
| 57 | 5.600 | 522 HV 0,1 | - | - |
| 58 | 5.700 | 531 HV 0,1 | - | - |
| 59 | 5.800 | 499 HV 0,1 | - | - |
| 60 | 5.900 | 510 HV 0,1 | - | - |
| 61 | 6.000 | 452 HV 0,1 | - | - |
| 62 | 6.100 | 430 HV 0,1 | - | - |
| 63 | 6.200 | 395 HV 0,1 | - | - |
| 64 | 6.300 | 282 HV 0,1 | - | - |
| 65 | 6.400 | 240 HV 0,1 | - | - |
| 66 | 6.500 | 247 HV 0,1 | - | - |
| 67 | 6.600 | 246 HV 0,1 | - | - |
| 68 | 6.700 | 251 HV 0,1 | - | - |
| 69 | 6.800 | 243 HV 0,1 | - | - |
| 70 | 6.900 | 252 HV 0,1 | - | - |
| 71 | 7.000 | 247 HV 0,1 | - | - |
| 72 | 7.100 | 251 HV 0,1 | - | - |
| 73 | 7.200 | 253 HV 0,1 | - | - |
| 74 | 7.300 | 262 HV 0,1 | - | - |
| 75 | 7.400 | 257 HV 0,1 | - | - |
| 76 | 7.500 | 251 HV 0,1 | - | - |
| 77 | 7.600 | 248 HV 0,1 | - | - |
| 78 | 7.700 | 245 HV 0,1 | - | - |
| 79 | 7.800 | 251 HV 0,1 | - | - |
| 80 | 7.900 | 259 HV 0,1 | - | - |
| 81 | 8.000 | 251 HV 0,1 | - | - |
| 82 | 8.100 | 245 HV 0,1 | - | - |
| 83 | 8.200 | 245 HV 0,1 | - | - |
| 84 | 8.300 | 252 HV 0,1 | - | - |
| 85 | 8.400 | 240 HV 0,1 | - | - |
| 86 | 8.500 | 263 HV 0,1 | - | - |
| 87 | 8.600 | 266 HV 0,1 | - | - |
| 88 | 8.700 | 251 HV 0,1 | - | - |
| 89 | 8.800 | 255 HV 0,1 | - | - |
| 90 | 8.900 | 260 HV 0,1 | - | - |
| 91 | 9.000 | 251 HV 0,1 | - | - |

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v
Fakulta strojního inženýrství
Ústav materiálových věd a
Technická 198/2, 616 69

Vzorek : X12Cr13+S355 - vz.3

Datum : 7.3.2019

Objed. číslo :

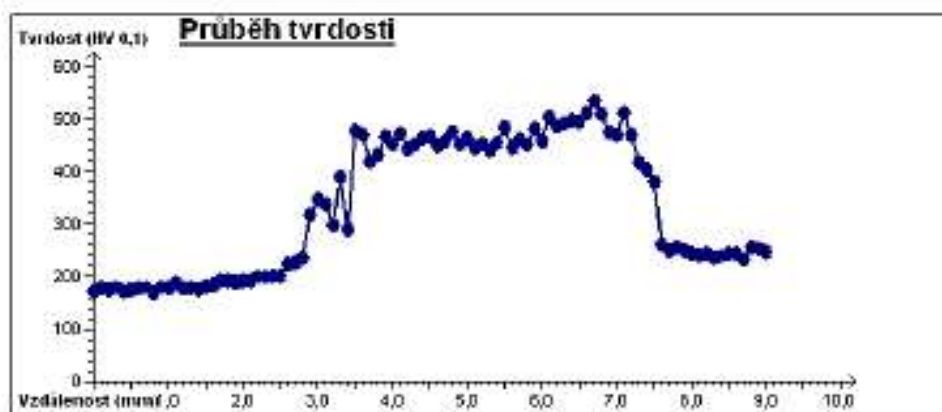
MĚŘÍ : Dolezal

Indentor : VICKERS Objektv : X100

Čas : 10 Zatížení : 0,1

Material: metoda WOB

Předpis:



| Řada | 1 | | | | | | |
|------|------------|------------|----------------|----|-------|------------|---|
| Bod | Vzdálenost | Tvrdomost | Přep. tvrdosti | 1 | | | |
| 1 | 0.000 | 174 HV 0,1 | - | 22 | 2.100 | 193 HV 0,1 | - |
| 2 | 0.100 | 178 HV 0,1 | - | 23 | 2.200 | 200 HV 0,1 | - |
| 3 | 0.200 | 175 HV 0,1 | - | 24 | 2.300 | 200 HV 0,1 | - |
| 4 | 0.300 | 180 HV 0,1 | - | 25 | 2.400 | 201 HV 0,1 | - |
| 5 | 0.400 | 174 HV 0,1 | - | 26 | 2.500 | 202 HV 0,1 | - |
| 6 | 0.500 | 175 HV 0,1 | - | 27 | 2.600 | 223 HV 0,1 | - |
| 7 | 0.600 | 178 HV 0,1 | - | 28 | 2.700 | 227 HV 0,1 | - |
| 8 | 0.700 | 180 HV 0,1 | - | 29 | 2.800 | 236 HV 0,1 | - |
| 9 | 0.800 | 170 HV 0,1 | - | 30 | 2.900 | 318 HV 0,1 | - |
| 10 | 0.900 | 180 HV 0,1 | - | 31 | 3.000 | 348 HV 0,1 | - |
| 11 | 1.000 | 179 HV 0,1 | - | 32 | 3.100 | 339 HV 0,1 | - |
| 12 | 1.100 | 186 HV 0,1 | - | 33 | 3.200 | 298 HV 0,1 | - |
| 13 | 1.200 | 178 HV 0,1 | - | 34 | 3.300 | 389 HV 0,1 | - |
| 14 | 1.300 | 179 HV 0,1 | - | 35 | 3.400 | 289 HV 0,1 | - |
| 15 | 1.400 | 177 HV 0,1 | - | 36 | 3.500 | 479 HV 0,1 | - |
| 16 | 1.500 | 181 HV 0,1 | - | 37 | 3.600 | 471 HV 0,1 | - |
| 17 | 1.600 | 183 HV 0,1 | - | 38 | 3.700 | 420 HV 0,1 | - |
| 18 | 1.700 | 193 HV 0,1 | - | 39 | 3.800 | 434 HV 0,1 | - |
| 19 | 1.800 | 193 HV 0,1 | - | 40 | 3.900 | 467 HV 0,1 | - |
| 20 | 1.900 | 189 HV 0,1 | - | 41 | 4.000 | 452 HV 0,1 | - |
| 21 | 2.000 | 192 HV 0,1 | - | 42 | 4.100 | 473 HV 0,1 | - |
| | | | | 43 | 4.200 | 443 HV 0,1 | - |
| | | | | 44 | 4.300 | 454 HV 0,1 | - |
| | | | | 45 | 4.400 | 465 HV 0,1 | - |

Vzorek : X12Cr13+S355 - vz.3 7.3.2019

Strana 2

| <u>Řada</u> | <u>1</u> | | |
|-------------|------------|------------|------------------|
| Bod | Vzdálenost | Tvrdoost | Přep. tvrdosti 1 |
| 46 | 4.500 | 467 HV 0,1 | - |
| 47 | 4.600 | 450 HV 0,1 | - |
| 48 | 4.700 | 459 HV 0,1 | - |
| 49 | 4.800 | 475 HV 0,1 | - |
| 50 | 4.900 | 452 HV 0,1 | - |
| 51 | 5.000 | 463 HV 0,1 | - |
| 52 | 5.100 | 448 HV 0,1 | - |
| 53 | 5.200 | 453 HV 0,1 | - |
| 54 | 5.300 | 441 HV 0,1 | - |
| 55 | 5.400 | 457 HV 0,1 | - |
| 56 | 5.500 | 483 HV 0,1 | - |
| 57 | 5.600 | 446 HV 0,1 | - |
| 58 | 5.700 | 461 HV 0,1 | - |
| 59 | 5.800 | 452 HV 0,1 | - |
| 60 | 5.900 | 482 HV 0,1 | - |
| 61 | 6.000 | 459 HV 0,1 | - |
| 62 | 6.100 | 504 HV 0,1 | - |
| 63 | 6.200 | 487 HV 0,1 | - |
| 64 | 6.300 | 493 HV 0,1 | - |
| 65 | 6.400 | 499 HV 0,1 | - |
| 66 | 6.500 | 497 HV 0,1 | - |
| 67 | 6.600 | 514 HV 0,1 | - |
| 68 | 6.700 | 535 HV 0,1 | - |
| 69 | 6.800 | 510 HV 0,1 | - |
| 70 | 6.900 | 477 HV 0,1 | - |
| 71 | 7.000 | 469 HV 0,1 | - |
| 72 | 7.100 | 514 HV 0,1 | - |
| 73 | 7.200 | 471 HV 0,1 | - |
| 74 | 7.300 | 419 HV 0,1 | - |
| 75 | 7.400 | 404 HV 0,1 | - |
| 76 | 7.500 | 382 HV 0,1 | - |
| 77 | 7.600 | 262 HV 0,1 | - |
| 78 | 7.700 | 251 HV 0,1 | - |
| 79 | 7.800 | 257 HV 0,1 | - |
| 80 | 7.900 | 249 HV 0,1 | - |
| 81 | 8.000 | 245 HV 0,1 | - |
| 82 | 8.100 | 241 HV 0,1 | - |
| 83 | 8.200 | 245 HV 0,1 | - |
| 84 | 8.300 | 237 HV 0,1 | - |
| 85 | 8.400 | 240 HV 0,1 | - |
| 86 | 8.500 | 243 HV 0,1 | - |
| 87 | 8.600 | 245 HV 0,1 | - |
| 88 | 8.700 | 233 HV 0,1 | - |
| 89 | 8.800 | 256 HV 0,1 | - |
| 90 | 8.900 | 253 HV 0,1 | - |
| 91 | 9.000 | 246 HV 0,1 | - |

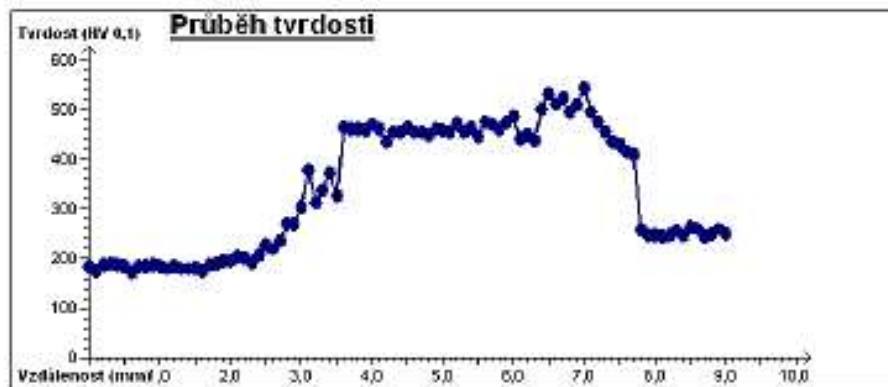
PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v
Fakulta strojního inženýrství
Ústav materiálových věd a
Téchnická 198/2, 616 69

Vzorek : X12Cr13+S355 - vz.4
Datum : 8.3.2019
Objed. číslo :
MĚŘÍ : Dolezal
Indentor : VICKERS Objektív : X100
Čas : 10 Zatížení : 0,1

Material: metoda WOB
Předpis:



| Řada | Bod | Vzdálenost | Tvrdost | Přep. tvrdosti 1 |
|------|-------|------------|---------|------------------|
| 1 | 0.000 | 183 HV 0,1 | - | 22 |
| 2 | 0.100 | 177 HV 0,1 | - | 23 |
| 3 | 0.200 | 186 HV 0,1 | - | 24 |
| 4 | 0.300 | 190 HV 0,1 | - | 25 |
| 5 | 0.400 | 186 HV 0,1 | - | 26 |
| 6 | 0.500 | 183 HV 0,1 | - | 27 |
| 7 | 0.600 | 173 HV 0,1 | - | 28 |
| 8 | 0.700 | 184 HV 0,1 | - | 29 |
| 9 | 0.800 | 185 HV 0,1 | - | 30 |
| 10 | 0.900 | 186 HV 0,1 | - | 31 |
| 11 | 1.000 | 184 HV 0,1 | - | 32 |
| 12 | 1.100 | 180 HV 0,1 | - | 33 |
| 13 | 1.200 | 184 HV 0,1 | - | 34 |
| 14 | 1.300 | 180 HV 0,1 | - | 35 |
| 15 | 1.400 | 180 HV 0,1 | - | 36 |
| 16 | 1.500 | 181 HV 0,1 | - | 37 |
| 17 | 1.600 | 177 HV 0,1 | - | 38 |
| 18 | 1.700 | 188 HV 0,1 | - | 39 |
| 19 | 1.800 | 189 HV 0,1 | - | 40 |
| 20 | 1.900 | 197 HV 0,1 | - | 41 |
| 21 | 2.000 | 197 HV 0,1 | - | 42 |
| | | | - | 43 |
| | | | - | 44 |
| | | | - | 45 |
| | | | - | 2.100 |
| | | | - | 2.200 |
| | | | - | 2.300 |
| | | | - | 2.400 |
| | | | - | 2.500 |
| | | | - | 2.600 |
| | | | - | 2.700 |
| | | | - | 2.800 |
| | | | - | 2.900 |
| | | | - | 3.000 |
| | | | - | 3.100 |
| | | | - | 3.200 |
| | | | - | 3.300 |
| | | | - | 3.400 |
| | | | - | 3.500 |
| | | | - | 3.600 |
| | | | - | 3.700 |
| | | | - | 3.800 |
| | | | - | 3.900 |
| | | | - | 4.000 |
| | | | - | 4.100 |
| | | | - | 4.200 |
| | | | - | 4.300 |
| | | | - | 4.400 |
| | | | - | 4.500 |

Vzorek : X12Cr13+S355 - vz.4

8.3.2019

strana 2

| <u>Řada</u> | <u>1</u> | | | |
|-------------|------------|------------|------------------|---|
| Bod | Vzdálenost | Tvrdość | Přep. tvrdości 1 | |
| 46 | 4.500 | 463 HV 0,1 | | - |
| 47 | 4.600 | 457 HV 0,1 | | - |
| 48 | 4.700 | 457 HV 0,1 | | - |
| 49 | 4.800 | 450 HV 0,1 | | - |
| 50 | 4.900 | 461 HV 0,1 | | - |
| 51 | 5.000 | 459 HV 0,1 | | - |
| 52 | 5.100 | 455 HV 0,1 | | - |
| 53 | 5.200 | 474 HV 0,1 | | - |
| 54 | 5.300 | 457 HV 0,1 | | - |
| 55 | 5.400 | 465 HV 0,1 | | - |
| 56 | 5.500 | 448 HV 0,1 | | - |
| 57 | 5.600 | 477 HV 0,1 | | - |
| 58 | 5.700 | 469 HV 0,1 | | - |
| 59 | 5.800 | 461 HV 0,1 | | - |
| 60 | 5.900 | 475 HV 0,1 | | - |
| 61 | 6.000 | 487 HV 0,1 | | - |
| 62 | 6.100 | 441 HV 0,1 | | - |
| 63 | 6.200 | 450 HV 0,1 | | - |
| 64 | 6.300 | 439 HV 0,1 | | - |
| 65 | 6.400 | 501 HV 0,1 | | - |
| 66 | 6.500 | 533 HV 0,1 | | - |
| 67 | 6.600 | 512 HV 0,1 | | - |
| 68 | 6.700 | 524 HV 0,1 | | - |
| 69 | 6.800 | 495 HV 0,1 | | - |
| 70 | 6.900 | 510 HV 0,1 | | - |
| 71 | 7.000 | 545 HV 0,1 | | - |
| 72 | 7.100 | 497 HV 0,1 | | - |
| 73 | 7.200 | 477 HV 0,1 | | - |
| 74 | 7.300 | 455 HV 0,1 | | - |
| 75 | 7.400 | 436 HV 0,1 | | - |
| 76 | 7.500 | 429 HV 0,1 | | - |
| 77 | 7.600 | 415 HV 0,1 | | - |
| 78 | 7.700 | 410 HV 0,1 | | - |
| 79 | 7.800 | 259 HV 0,1 | | - |
| 80 | 7.900 | 246 HV 0,1 | | - |
| 81 | 8.000 | 248 HV 0,1 | | - |
| 82 | 8.100 | 245 HV 0,1 | | - |
| 83 | 8.200 | 248 HV 0,1 | | - |
| 84 | 8.300 | 255 HV 0,1 | | - |
| 85 | 8.400 | 246 HV 0,1 | | - |
| 86 | 8.500 | 263 HV 0,1 | | - |
| 87 | 8.600 | 260 HV 0,1 | | - |
| 88 | 8.700 | 245 HV 0,1 | | - |
| 89 | 8.800 | 251 HV 0,1 | | - |
| 90 | 8.900 | 260 HV 0,1 | | - |
| 91 | 9.000 | 251 HV 0,1 | | - |

PROTOKOL MĚŘENÍ

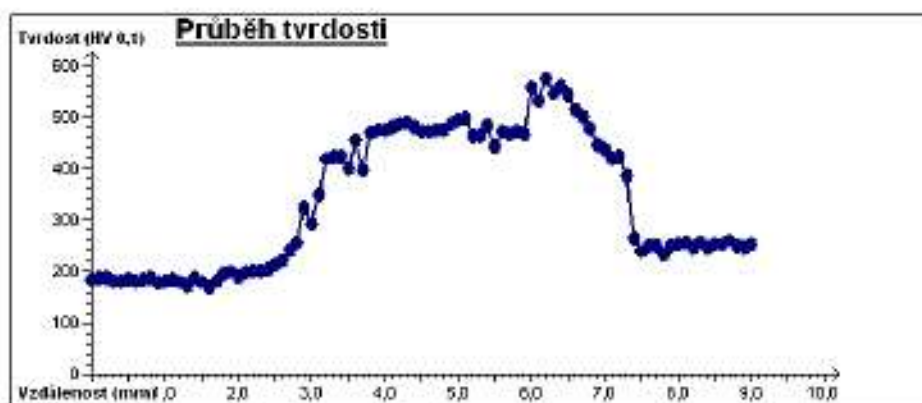


Vysoké učení technické v
Fakulta strojního inženýrství
Ústav materiálových věd a
Téchnická 198/2, 616 69

Vzorek : X12Cr13+S355 - vz.5
Datum : 8.3.2019
Objed. číslo :
Měřil : Dolezal
Indentor : VICKERS Objektív : X100
Čas : 10 Zatížení : 0,1

Materiál: metoda WOB

Předpis:



| Řada | Bod | Vzdálenost | Tvrdość | Přep. tvrdość 1 |
|------|-----|------------|------------|-----------------|
| | 1 | 0.000 | 184 HV 0,1 | - |
| | 2 | 0.100 | 187 HV 0,1 | - |
| | 3 | 0.200 | 187 HV 0,1 | - |
| | 4 | 0.300 | 182 HV 0,1 | - |
| | 5 | 0.400 | 181 HV 0,1 | - |
| | 6 | 0.500 | 185 HV 0,1 | - |
| | 7 | 0.600 | 182 HV 0,1 | - |
| | 8 | 0.700 | 185 HV 0,1 | - |
| | 9 | 0.800 | 187 HV 0,1 | - |
| | 10 | 0.900 | 178 HV 0,1 | - |
| | 11 | 1.000 | 181 HV 0,1 | - |
| | 12 | 1.100 | 184 HV 0,1 | - |
| | 13 | 1.200 | 180 HV 0,1 | - |
| | 14 | 1.300 | 174 HV 0,1 | - |
| | 15 | 1.400 | 187 HV 0,1 | - |
| | 16 | 1.500 | 180 HV 0,1 | - |
| | 17 | 1.600 | 170 HV 0,1 | - |
| | 18 | 1.700 | 182 HV 0,1 | - |
| | 19 | 1.800 | 197 HV 0,1 | - |
| | 20 | 1.900 | 200 HV 0,1 | - |
| | 21 | 2.000 | 189 HV 0,1 | - |
| | 22 | 2.100 | 198 HV 0,1 | - |
| | 23 | 2.200 | 201 HV 0,1 | - |
| | 24 | 2.300 | 202 HV 0,1 | - |
| | 25 | 2.400 | 203 HV 0,1 | - |
| | 26 | 2.500 | 213 HV 0,1 | - |
| | 27 | 2.600 | 222 HV 0,1 | - |
| | 28 | 2.700 | 242 HV 0,1 | - |
| | 29 | 2.800 | 257 HV 0,1 | - |
| | 30 | 2.900 | 325 HV 0,1 | - |
| | 31 | 3.000 | 294 HV 0,1 | - |
| | 32 | 3.100 | 351 HV 0,1 | - |
| | 33 | 3.200 | 420 HV 0,1 | - |
| | 34 | 3.300 | 424 HV 0,1 | - |
| | 35 | 3.400 | 424 HV 0,1 | - |
| | 36 | 3.500 | 401 HV 0,1 | - |
| | 37 | 3.600 | 455 HV 0,1 | - |
| | 38 | 3.700 | 398 HV 0,1 | - |
| | 39 | 3.800 | 471 HV 0,1 | - |
| | 40 | 3.900 | 477 HV 0,1 | - |
| | 41 | 4.000 | 475 HV 0,1 | - |
| | 42 | 4.100 | 481 HV 0,1 | - |
| | 43 | 4.200 | 487 HV 0,1 | - |
| | 44 | 4.300 | 491 HV 0,1 | - |
| | 45 | 4.400 | 481 HV 0,1 | - |

Vzorek : X12Cr13+S355 - vz.5 8.3.2019

Strana 2

| <u>Řada</u> | <u>1</u> | | | |
|-------------|------------|------------|-----------------|--|
| Bod | Vzdálenost | Tvrdość | Přep. tvrdość 1 | |
| 46 | 4.500 | 473 HV 0,1 | - | |
| 47 | 4.600 | 474 HV 0,1 | - | |
| 48 | 4.700 | 477 HV 0,1 | - | |
| 49 | 4.800 | 477 HV 0,1 | - | |
| 50 | 4.900 | 487 HV 0,1 | - | |
| 51 | 5.000 | 495 HV 0,1 | - | |
| 52 | 5.100 | 499 HV 0,1 | - | |
| 53 | 5.200 | 465 HV 0,1 | - | |
| 54 | 5.300 | 465 HV 0,1 | - | |
| 55 | 5.400 | 485 HV 0,1 | - | |
| 56 | 5.500 | 443 HV 0,1 | - | |
| 57 | 5.600 | 474 HV 0,1 | - | |
| 58 | 5.700 | 467 HV 0,1 | - | |
| 59 | 5.800 | 473 HV 0,1 | - | |
| 60 | 5.900 | 467 HV 0,1 | - | |
| 61 | 6.000 | 558 HV 0,1 | - | |
| 62 | 6.100 | 533 HV 0,1 | - | |
| 63 | 6.200 | 576 HV 0,1 | - | |
| 64 | 6.300 | 547 HV 0,1 | - | |
| 65 | 6.400 | 562 HV 0,1 | - | |
| 66 | 6.500 | 543 HV 0,1 | - | |
| 67 | 6.600 | 517 HV 0,1 | - | |
| 68 | 6.700 | 501 HV 0,1 | - | |
| 69 | 6.800 | 479 HV 0,1 | - | |
| 70 | 6.900 | 446 HV 0,1 | - | |
| 71 | 7.000 | 439 HV 0,1 | - | |
| 72 | 7.100 | 422 HV 0,1 | - | |
| 73 | 7.200 | 425 HV 0,1 | - | |
| 74 | 7.300 | 386 HV 0,1 | - | |
| 75 | 7.400 | 264 HV 0,1 | - | |
| 76 | 7.500 | 240 HV 0,1 | - | |
| 77 | 7.600 | 250 HV 0,1 | - | |
| 78 | 7.700 | 249 HV 0,1 | - | |
| 79 | 7.800 | 233 HV 0,1 | - | |
| 80 | 7.900 | 249 HV 0,1 | - | |
| 81 | 8.000 | 253 HV 0,1 | - | |
| 82 | 8.100 | 255 HV 0,1 | - | |
| 83 | 8.200 | 246 HV 0,1 | - | |
| 84 | 8.300 | 255 HV 0,1 | - | |
| 85 | 8.400 | 246 HV 0,1 | - | |
| 86 | 8.500 | 254 HV 0,1 | - | |
| 87 | 8.600 | 254 HV 0,1 | - | |
| 88 | 8.700 | 260 HV 0,1 | - | |
| 89 | 8.800 | 249 HV 0,1 | - | |
| 90 | 8.900 | 247 HV 0,1 | - | |
| 91 | 9.000 | 254 HV 0,1 | - | |

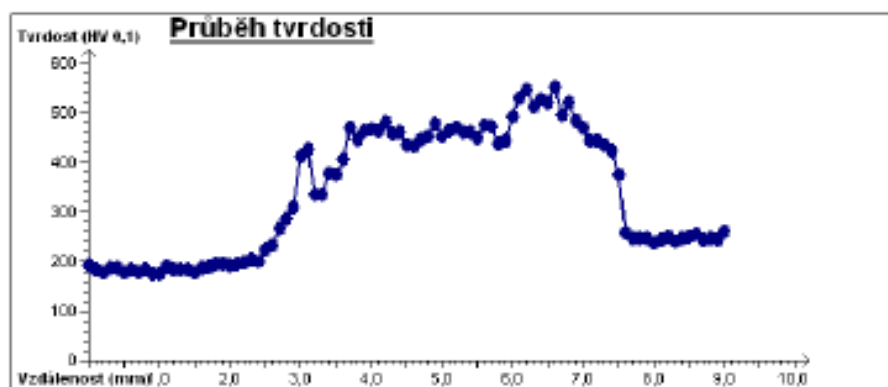
PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v
Fakulta strojního inženýrství
Ústav materiálových věd a
Technická 198/2, 616 69

Vzorek : X12Cr13+S355 - vz.6
Datum : 8.3.2019
Objed. číslo :
MĚŘÍ : Dolezal
Indentor : VICKERS Objektiv : X100
Čas : 10 Zatížení : 0,1

Material: metoda WOB
Předpis:



| Řada | Bod | Vzdálenost | Tvrdost | Přep. tvrdosti 1 |
|------|-------|------------|---------|------------------|
| 1 | 0.000 | 192 HV 0,1 | - | 22 |
| 2 | 0.100 | 184 HV 0,1 | - | 23 |
| 3 | 0.200 | 179 HV 0,1 | - | 24 |
| 4 | 0.300 | 186 HV 0,1 | - | 25 |
| 5 | 0.400 | 186 HV 0,1 | - | 26 |
| 6 | 0.500 | 179 HV 0,1 | - | 27 |
| 7 | 0.600 | 183 HV 0,1 | - | 28 |
| 8 | 0.700 | 178 HV 0,1 | - | 29 |
| 9 | 0.800 | 183 HV 0,1 | - | 30 |
| 10 | 0.900 | 177 HV 0,1 | - | 31 |
| 11 | 1.000 | 176 HV 0,1 | - | 32 |
| 12 | 1.100 | 191 HV 0,1 | - | 33 |
| 13 | 1.200 | 185 HV 0,1 | - | 34 |
| 14 | 1.300 | 183 HV 0,1 | - | 35 |
| 15 | 1.400 | 185 HV 0,1 | - | 36 |
| 16 | 1.500 | 178 HV 0,1 | - | 37 |
| 17 | 1.600 | 187 HV 0,1 | - | 38 |
| 18 | 1.700 | 190 HV 0,1 | - | 39 |
| 19 | 1.800 | 196 HV 0,1 | - | 40 |
| 20 | 1.900 | 197 HV 0,1 | - | 41 |
| 21 | 2.000 | 194 HV 0,1 | - | 42 |
| | | | - | 43 |
| | | | - | 44 |
| | | | - | 45 |
| | | | - | 46 |
| | | | - | 47 |
| | | | - | 48 |
| | | | - | 49 |
| | | | - | 50 |
| | | | - | 51 |
| | | | - | 52 |
| | | | - | 53 |
| | | | - | 54 |
| | | | - | 55 |
| | | | - | 56 |
| | | | - | 57 |
| | | | - | 58 |
| | | | - | 59 |
| | | | - | 60 |
| | | | - | 61 |
| | | | - | 62 |
| | | | - | 63 |
| | | | - | 64 |
| | | | - | 65 |
| | | | - | 66 |
| | | | - | 67 |
| | | | - | 68 |
| | | | - | 69 |
| | | | - | 70 |
| | | | - | 71 |
| | | | - | 72 |
| | | | - | 73 |
| | | | - | 74 |
| | | | - | 75 |
| | | | - | 76 |
| | | | - | 77 |
| | | | - | 78 |
| | | | - | 79 |
| | | | - | 80 |
| | | | - | 81 |
| | | | - | 82 |
| | | | - | 83 |
| | | | - | 84 |
| | | | - | 85 |
| | | | - | 86 |
| | | | - | 87 |
| | | | - | 88 |
| | | | - | 89 |
| | | | - | 90 |
| | | | - | 91 |
| | | | - | 92 |
| | | | - | 93 |
| | | | - | 94 |
| | | | - | 95 |
| | | | - | 96 |
| | | | - | 97 |
| | | | - | 98 |
| | | | - | 99 |
| | | | - | 100 |

Vzorek : X12Cr13+S355 - vz.6

8.3.2019

strana 2

| <u>Řada</u> | <u>1</u> | | |
|-------------|------------|------------|------------------|
| Bod | Vzdálenost | Tvrdość | Přep. tvrdości 1 |
| 46 | 4.500 | 436 HV 0,1 | - |
| 47 | 4.600 | 434 HV 0,1 | - |
| 48 | 4.700 | 446 HV 0,1 | - |
| 49 | 4.800 | 452 HV 0,1 | - |
| 50 | 4.900 | 479 HV 0,1 | - |
| 51 | 5.000 | 453 HV 0,1 | - |
| 52 | 5.100 | 465 HV 0,1 | - |
| 53 | 5.200 | 470 HV 0,1 | - |
| 54 | 5.300 | 461 HV 0,1 | - |
| 55 | 5.400 | 461 HV 0,1 | - |
| 56 | 5.500 | 450 HV 0,1 | - |
| 57 | 5.600 | 477 HV 0,1 | - |
| 58 | 5.700 | 473 HV 0,1 | - |
| 59 | 5.800 | 439 HV 0,1 | - |
| 60 | 5.900 | 444 HV 0,1 | - |
| 61 | 6.000 | 493 HV 0,1 | - |
| 62 | 6.100 | 531 HV 0,1 | - |
| 63 | 6.200 | 547 HV 0,1 | - |
| 64 | 6.300 | 513 HV 0,1 | - |
| 65 | 6.400 | 528 HV 0,1 | - |
| 66 | 6.500 | 521 HV 0,1 | - |
| 67 | 6.600 | 553 HV 0,1 | - |
| 68 | 6.700 | 497 HV 0,1 | - |
| 69 | 6.800 | 522 HV 0,1 | - |
| 70 | 6.900 | 483 HV 0,1 | - |
| 71 | 7.000 | 469 HV 0,1 | - |
| 72 | 7.100 | 443 HV 0,1 | - |
| 73 | 7.200 | 445 HV 0,1 | - |
| 74 | 7.300 | 436 HV 0,1 | - |
| 75 | 7.400 | 424 HV 0,1 | - |
| 76 | 7.500 | 375 HV 0,1 | - |
| 77 | 7.600 | 258 HV 0,1 | - |
| 78 | 7.700 | 248 HV 0,1 | - |
| 79 | 7.800 | 247 HV 0,1 | - |
| 80 | 7.900 | 246 HV 0,1 | - |
| 81 | 8.000 | 238 HV 0,1 | - |
| 82 | 8.100 | 245 HV 0,1 | - |
| 83 | 8.200 | 251 HV 0,1 | - |
| 84 | 8.300 | 242 HV 0,1 | - |
| 85 | 8.400 | 247 HV 0,1 | - |
| 86 | 8.500 | 251 HV 0,1 | - |
| 87 | 8.600 | 255 HV 0,1 | - |
| 88 | 8.700 | 243 HV 0,1 | - |
| 89 | 8.800 | 248 HV 0,1 | - |
| 90 | 8.900 | 245 HV 0,1 | - |
| 91 | 9.000 | 262 HV 0,1 | - |