



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ PŘEDEHŘEVU ELEKTRICKÝM OBLOUKEM PŘI LASEROVÉM SVAŘOVÁNÍ OCELÍ S VYŠŠÍM OBSAHEM UHLÍKU

USE OF THE PREHEATING BY ELECTRIC ARC DURING LASER WELDING OF STEELS WITH HIGHER CARBON CONTENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Mach

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Martin Mach**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

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:

Využití předehřevu elektrickým obloukem při laserovém svařování ocelí s vyšším obsahem uhlíku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést srovnání mechanických vlastností a geometrie svaru při laserovém svařování oceli s vyšším obsahem uhlíku při použití předehřevu materiálu pomocí elektrického oblouku.

Cíle diplomové práce:

- Osvojit si technologii laserového a hybridního svařování.
- Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu.
- Osvojit si problematiku svařování ocelí s vyšším obsahem uhlíku.
- Osvojit si základy metalografického vyhodnocování svaru.

Seznam literatury:

BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technológie,1. vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9

DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4

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

AMBROŽ O., KANDUS B., KUBÍČEK J.: Technologie svařování a zařízení, Ostrava, Zeross, 2001, 395 str. ISBN 80-85771-81-0

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

MACH Martin: Využití předehřevu elektrickým obloukem při laserovém svařování oceli s vyšším obsahem uhlíku.

Diplomová práce je zaměřena na studium využití předehřevu elektrickým obloukem, v tomto případě zdroje TIG, při laserovém svařování oceli s vyšším obsahem uhlíku, konkrétně pro tuto práci oceli 1.1191 tloušťky 2 mm. Na základě vypočtení uhlíkového ekvivalentu byla určena velikost předehřevu na 208 °C. Svařovací parametry byly zvoleny na základě prvních experimentů. V experimentální části byly vzorky svařeny laserem s předehřevem pomocí zdroje TIG, které posléze byly podrobeny zkoušce tahem, mikrotvrdosti podle Vickerse, makrostruktury a mikrostruktury. Použitím druhého zdroje tepla byla rozšířena tepelně ovlivněná oblast u vzorků. Vzorky, které praskly uprostřed svaru při tahové zkoušce, byly tepelně ovlivněny řezáním vzorků. Zbylé vzorky praskly v základním materiálu, tudíž vytvořený svar byl kvalitní. Kombinace svařování laserem s předehřevem elektrickým obloukem TIG je velice produktivní metoda oproti konvenčním metodám a jedním z mála řešení předehřevu pro laserové svařování. Jedná se o prvotní experimenty využití elektrického oblouku TIG pro předehřev při laserovém svařování, na které bude navazovat další výzkum, převážně pro automobilový průmysl.

Klíčová slova: Ocel 1.1191, svařování, předehřev, TIG, LasTIG

ABSTRACT

MACH Martin: Use of the preheating by electric arc during laser welding of steels with higher carbon content.

The thesis is focused on the study of the use of electric arc preheating, in this case source WIG, during laser welding of steel with a higher carbon content, specifically for this work steel 1.1191 thickness 2 mm. Based on the calculation of the carbon equivalent, the preheating was determined to 208 °C. The welding parameters were selected on the basis of the first experiments. In the experimental section, the samples were welded with laser with preheating using a source WIG, which were then made to a tensile test, Vickers microhardness, macrostructure and microstructure. By using a second heat source, the heat-affected area of the samples was expanded. Samples that cracked in the middle of the weld during the tensile test were heat influenced by cutting samples. The remaining samples was broken in the base material, thus the weld produced was of good quality. Combination of laser welding with WIG electric arc preheating is a very productive method over conventional methods and one of the few pre-heating solutions for laser welding. These are the initial experiments for the use of the WIG arc for preheating in laser welding, to be followed by further research, mainly for the automotive industry.

Keywords: 1.1191 steel, welding, preheating, WIG, LasWIG

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACH, Martin. *Využití předehřevu elektrickým obloukem při laserovém svařování ocelí s vyšším obsahem uhlíku*. Brno, 2017. 65s, 3 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V dne 26.5.2017

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za bezproblémovou komunikaci, cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D., Vojtěchu Řiháčkovi a Ing. Petru Horníkovi za pomoc a provedení mechanických zkoušek. V neposlední řadě bych poděkoval své rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Str.

ÚVOD	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ	11
1.1 Varianty řešení	12
2 ROZBOR TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ	15
2.1 Princip laseru	16
2.1.1 Typy průmyslových laserů	18
2.1.2 Pevnolátkové lasery	19
2.1.3 Plynové lasery	22
2.1.4 Polovodičové lasery	24
2.2 Použití laserů v průmyslových aplikacích	25
2.2.1 Interakce laseru s povrchem materiálu	27
2.3 Laserové svařování	27
2.3.1 Princip laserového svařování	28
2.3.2 Parametry svařování	29
2.4 Svařování metodou TIG	29
2.4.1 Princip metody TIG	30
2.4.2 Ochranné inertní plyny	30
2.4.3 Svařovací hořáky TIG	31
2.4.4 Wolframové elektrody	32
2.5 Svarové vady	32
2.6 Zkoušky svarů a materiálů	34
2.6.1 Zkouška tahem	35
2.6.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse	36
2.6.3 Metalografické zkoušky	38
2.7 Svařitelnost uhlíkových ocelí	39
2.7.1 Uhlíkový ekvivalent	39
2.7.2 Velikost teploty předehřevu	40

OBSAH

3 EXPERIMENT	42
3.1 Volba materiálu	42
3.2 Příprava a svařování vzorků	44
3.3 Zkouška tahem	49
3.4 Metalografické šetření	55
3.5 Zkouška mikrotvrlosti podle Vickerse	60
4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ HODNOCENÍ	63
5 ZÁVĚRY	64
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

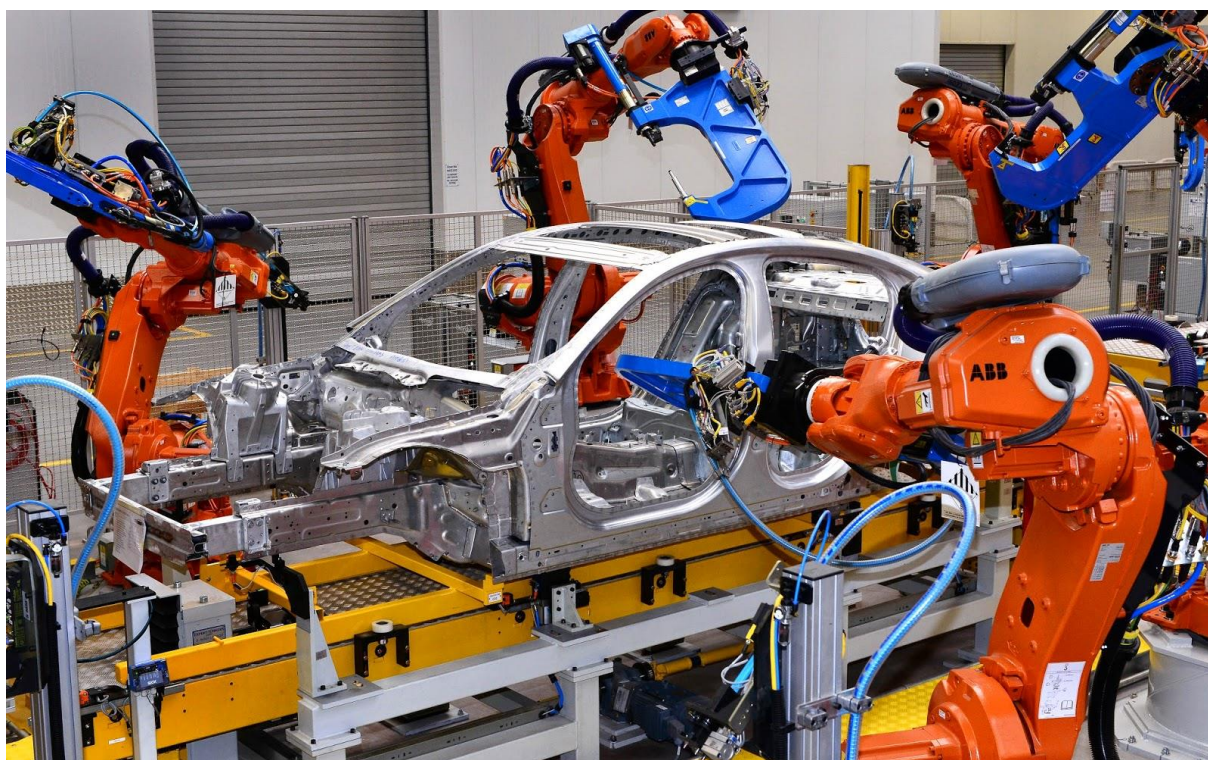
ÚVOD [5], [15], [72]

V poslední době došlo k velkému rozšíření laserových technologií v různých odvětvích strojírenského průmyslu. V oboru svařování dochází k výraznějšímu nárůstu podílu laserového svařování na úkor konvenčních svařovacích metod, jako jsou metody MIG a MAG. Mezi hlavní důvody rozmachu využití laseru při svařování je výsledná kvalita a vlastnosti vytvořeného svaru. Dále také vysoká svařovací rychlost, svařování bez přídavného materiálu a malá tepelně ovlivněná oblast.

Svařování je důležitá technologie při výrobě karoserií v automobilovém průmyslu. Karoserie se skládá z plechových výlisků s různými mechanickými vlastnostmi, které jsou posléze k sobě svařeny pomocí odporového bodového svařování, jak je zachyceno na obrázku níže. Mezi výhodnější metodu svařování karoserie patří svaření laserem, jelikož vytvořené svary laserem mají pozitivní vliv na tuhost celé karoserie.

Tato metoda vytváření svařenců z lisovaných plechů s rozdílnými vlastnostmi se nazývá Tailored blanks, která se využívá z důvodu snížení hmotnosti a ceny karoserie automobilů. Materiály, které se pro tuto metodu využívají, mohou mít rozdílnou pevnost až v řádech stovek MPa, rozdílnou tloušťku či odlišnou povrchovou úpravu. Při výrobě tailored blanks se plechy svařují pomocí švového nebo laserového svařování. Efektivnější pro výrobu je svařování laserové, kdy vlastnosti svaru jsou lepší, a dojde k nárůstu tuhosti celé karoserie.

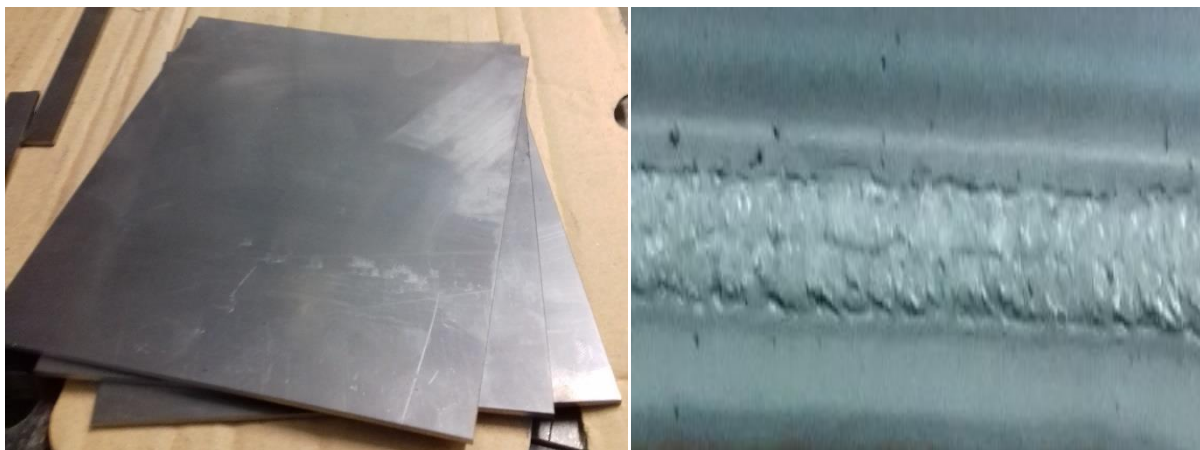
Názorný příklad je svaření B – sloupku s karoserií auta, kde se jako materiál pro B – sloupek používá vysokopevnostní martenzitická ocel. Pro svaření takové oceli s rozdílnou ocelí karoserie je zapotřebí využití specifických podmínek pro svaření, a to konkrétně predehřevu.



Obr. 1 Odporové svařování karoserie auta [15]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [7], [17].

V dnešní době se vysokouhlíkové oceli svařují obvyklými metodami, jako jsou metody MIG, MAG nebo TIG, ale musí být splněny specifické podmínky při svařování. Nejdůležitější podmínkou při svařování vysokouhlíkových ocelí je použití předehřevu svařovaného materiálu. Velikost teploty předehřevu je především závislá na svařovaném materiálu. Pro experiment byla vybrána vysokouhlíková ocel 1.1191, která odpovídá označení dle ČSN 12 050 (dle DIN C 45 E). Tato ocel je znázorněna na obrázku níže.



Obr. 2 Foto vzorků a sváru plechu 1.1191

Vzorek z vysokouhlíkové martenzitické oceli 1.1191 bude mít rozměry 150 x 120 x 2 mm a dojde ke svaření dvou takovýchto vzorků a následně z nich budou vyřezány vzorky pro tahovou zkoušku. Předehřev bude stanoven podle výpočtu z chemického složení oceli, které je uvedeno v tabulce 1.

Tab. 1 Chemické složení oceli 1.1191 dle normy [17]

Chem. prvek	C	Si	Mn	P	N	Cr	Mo	Ni
Obsah [hm. %]	0,42 – 0,50	max. 0,40	0,50 – 0,80	max. 0,035	max. 0,40	max. 0,40	max. 0,10	max. 0,40

Martenzitická ocel 1.1191 se dodává ve stavu normalizačně žíhaném. Dále je martenzitická ocel především určena k tepelnému zpracování, jako je zušlechťení nebo povrchové kalení. V tomto tepelně zpracovaném stavu se ušlechtilá nelegovaná ocel 1.1191 používá pro výrobu méně namáhaných strojních součástí. Je tedy vhodná pro výrobu hřídelí, karuselů, ojníc, vrtacích tyčí, frézovacích trnů nebo spojovacích materiálů apod. Třískovým obráběním může být tato ocel hůře obráběna, proto je výhodnější pro třískové obrábění stav oceli žíhaný na měkko. Svařitelnost této oceli je obtížná, proto je zapotřebí použití specifických podmínek, tedy předehřevu. Mechanické vlastnosti oceli 1.1191 jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli 1.1191 dle normy [17]

Mechanické vlastnosti	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Tvrdość [HV]
	min. 335	540 – 690	min. 18	Max. 180

1.1 Varianty řešení [7], [8], [14], [16], [23], [24], [29], [32], [47], [50], [58], [69], [70]

Pro možnost svařování uhlíkové oceli se používá více svařovacích procesů, přitom každá z těchto technologií má své výhody a nevýhody. Pro svařování dané oceli je potřeba vybrat svařovací metodu a metodu ohřevu materiálu co nejvhodnější, aby se nejlépe dosáhlo zvýšení produktivity, zlepšení kvality svaru, a z ekonomického hlediska šetření nákladů a provozních časů.

Ocel 1.1191 je možné svařit následujícími technologiemi:

- Metoda MIG – se nazývá zkráceně metoda „Metal Inert Gas“, tedy svařování v ochranné atmosféře tavnou elektrodou. Inertní plyn, který chrání povrch svarové lázně, nevstupuje do chemických reakcí při svařování. Jako ochranná atmosféra je nejčastěji používán argon. Touto metodou se svařuje měď, hliník a titan. Zařízení pro svařování metou MIG a MAG je identické, pouze dochází k výměně ochranného plynu a popřípadě i přídavného materiálu.
- Metoda MAG – neboli nezkráceně metoda „Metal Active Gas“, patří k nejrozšířenější svařovací technologii v průmyslu, převážně v poloautomatickém nebo automatickém režimu. Jedná se o svařovací technologii, která je prováděna v ochranné atmosféře oxidu uhličitého tavnou elektrodou. Oxid uhličitý při této metodě plní funkci aktivního plynu, tedy tento plyn aktivně vstupuje do chemických reakcí a ochraňuje svarovou lázeň. Metoda MAG se převážně používá pro svařování nelegovaných, nízkolegovaných a vysokolegovaných ocelí. Ukázka svařování metodou MIG/MAG je na obr. 3.
- Metoda TIG – je pojmenována z anglického spojení „Tungsten Inert Gas“ a je také známá pod označením vycházející z německého spojení „Wolfram Inert Gas“, zkráceně WIG. Princip metody TIG spočívá ve svařování v ochranné atmosféře neodtavující se wolframovou elektrodou. Wolframová elektroda je složena z čistého wolframu s případnými legujícími oxidy. Svařování probíhá převážně ručně a tenké plechy lze svařovat bez přítomnosti přídavného materiálu. Metoda TIG se používá pro svařování hliníku, mědi, titanu, hořčíku nebo korozivzdorné oceli. Tato metoda je vyobrazena na obr. 4.

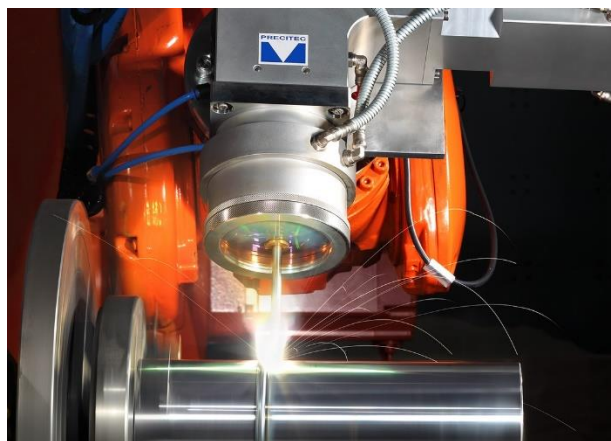


Obr. 3 Svařování metodou MIG/MAG [69]



Obr. 4 Svařování metodou TIG [14]

- Svařování laserovým paprskem – je jedna z moderních a velice progresivních svařovacích metod. Při svařování laserem, je laserový paprsek zaostřen do velmi malé plochy, kde dochází k přenosu tepla vedením, natavení materiálu a následnému svaření. Mezi značnou výhodou laserového svařování patří vyšší svařovací rychlosti, malá tepelně ovlivněná oblast nebo snadná automatizace. Svařování laserem je vhodné pro svařování korozivzdorné, nízkouhlíkové oceli, titanových, zirkonových nebo chromniklových slitin, plastů apod. Svařování laserovým paprskem rotačních součástí je zachyceno na obr. 5.



Obr. 5 Svařování laserovým paprskem [23]

Ohřev materiálu lze provést několika metodami, z nichž je potřeba vybrat tu nejvhodnější:

- Ohřev plynovým hořákem (plamen) – je jeden z nejjednodušších zdrojů tepla pro ohřev materiálu. Při využití tohoto ohřevu představuje plamen bodový zdroj tepla, se kterým je potřeba pohybovat pro ohřev v celé svařované ploše, viz obr. 6. Nevýhoda bodového zdroje tepla je, že může způsobit vytvoření vnitřního napětí v materiálu. Pro zdroj hoření jsou používány různé druhy plynů, jako je zemní plyn, propan-butan nebo acetylen. Ohřev pomocí hoření zemního plynu je pomalý, ale rovnoměrný. Propan-butan má podobné vlastnosti ohřevu jako zemní plyn, ale nedochází k tak rychlé oxidaci ohřátého materiálu. Nejvíce používaný je ohřev kyslíko-acetylenovým plamenem, kde je velice důležité správné nastavení plamene, protože má vysokou teplotu a kvůli koncentraci tepla na malou plochu může dojít ke spálení předehřívaného povrchu. Obecně je tato metoda velice operativní, levná, proto je často využívána i přes obtížnou ovladatelnost výsledné teploty.



Obr. 6 Ohřev plamenem [32]

- Indukční ohřev – lze používat v indukčních pecích pro menší vzorky, kde se prohřeje celý povrch svařovaných součástí nebo místní indukční ohřev pomocí různých druhů induktorů nebo indukčních smyček. Induktor, kterým protéká střídavý proud, je přiblížen k vodivému materiálu, v tomto případě k ohřívané součásti. Elektromagnetické pole cívky indukuje ve vodivé součásti vířivé proudy. Ztráty vířivých proudů



Obr. 7 Indukční ohřev [29]

se mění na teplo, které ohřívá materiál. Mezi výhody indukčního ohřevu lze zařadit rychlost ohřevu a dále, že se teplo vytváří přímo v materiálu a nedochází k oxidaci povrchu materiálu. Nevýhodou indukčního ohřevu je poměrně drahý provoz. Příklad indukčního ohřevu je na obr. 7.

- Odporový ohřev – je také využíván pro ohřev materiálu malých rozměrů v pecích nebo pro místní ohřev pomocí keramických tvarovek, které mohou být sestaveny z několika těles o různých velikostech a výkonů, viz obr. 8. Princip odporového ohřevu je založen na zahřívání odporového drátu průtokem elektrického proudu, který je jednostranně izolován. Odporový drát je vložen do keramických tvarovek, který tyto tvarovky ohřívá. Teplo je přenášeno na ohříváný materiál sáláním a dále je rozváděno v materiálu kondukcí. Jedná se o přesný a velice flexibilní druh ohřevu, kdy se může díky složení keramických tvarovek ohřát větší část materiálu. Nevýhoda této metody je časová náročnost na rovnoměrné ohřátí materiálu.



Obr. 8 Sestava keramických tvarovek [50]

- Ohřev materiálu obloukovou metodou – se především využívá u hybridních metod svařování, kdy zdroj elektrického oblouku je jedna z obloukových metod svařování. Elektrický oblouk je intenzivní zdroj tepla, který je soustředěn na poměrně malou plochu. Při využití elektrického oblouku jako ohřevu, jsou svařovací parametry zdroje upraveny, tak aby nedocházelo k natavení svařovaného materiálu, ale pouze k jeho ohřátí na požadovanou teplotu. Tato metoda je velice rychlá, levná, operativní a lze ji využít pro větší součásti. Elektrický oblouk pro ohřev vytvořený metodou TIG je znázorněn na obr. 9.



Obr. 9 Elektrický oblouk metodou TIG [24]

Pro experiment byla vybrána kombinace laserového svařování a ohřevu materiálu obloukovou metodou, která v tomto případě bude zprostředkována metodou TIG. Tyto dvě svařovací metody budou kombinovány v jedné svařovací hlavě, tudíž ohřev materiálu a následné svařování bude probíhat v jednom technologickém postupu při vysokých rychlostech, čímž by se měly šetřit náklady na čas a na drahé ohřevy materiálů jinými metodami.

Cílem této práce bude provést teoretickou rešerši na dané téma a provést experiment laserového svařování v kombinaci s ohřevem materiálu obloukovou metodou. Bude zkoumáno, jaký vliv bude mít tato kombinace Laser-TIG na kvalitu svaru a jeho vlastností při svařování uhlíkové oceli. Svařené vzorky budou podrobeny mechanickým a metalografickým zkouškám. Výsledky experimentu a zkoušek se následně vyhodnotí, a bude rozhodnuto, zda tato metoda je efektivnější a ekonomicky výhodnější. Svařovací experiment bude uskutečněn na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně.

2 ROZBOR TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ [7], [27]

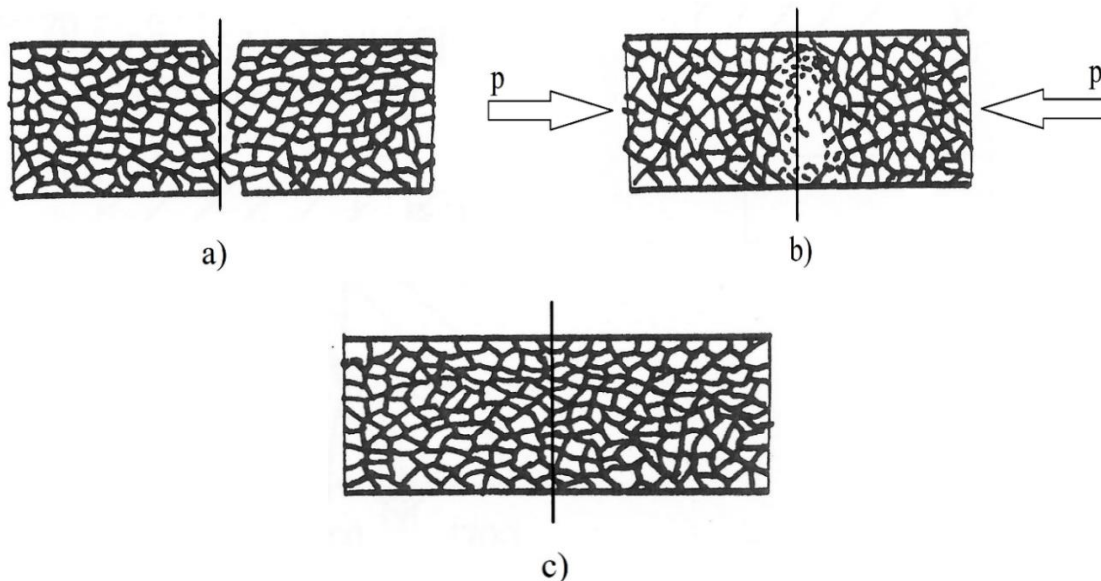
V oboru strojírenství jsou různé možnosti spojení součástí. Základní dva druhy spojování materiálů jsou spojení nerozebíratelná a rozebíratelná. Mezi rozebíratelná patří spojení šrouby, čepy nebo pery. Do druhé nerozebíratelné skupiny patří technologie, které nevyužívají spojovacích prvků. Mezi tyto technologie patří pájení, lepení a hlavně svařování. Cílem této operace je vytvořit nerozebíratelný spoj mezi danými částmi materiálů, přičemž na vzniklý spoj jsou kladeny vysoké nároky na jeho vlastnosti. Svařováním povrchů lze vytvořit spojení dvou nebo více součástí.

Svařování se řadí do hlavní skupiny strojírenských technologií mezi metody tváření, obrábění, povrchových úprav a dalších. Technologie svařování svým zaměřením nepatří mezi technologie se širším rozsahem, ale patří mezi technologie, která zpracovává největší objemové množství kovových materiálů, a to tvářených i litých. Číselně vyjádřeno se svařováním přetváří přes 26 % kovových materiálů. Celek technologie svařování je závislý na znalostech fyziky, chemie, metalurgie, materiálů, fyziky kovů a dalších. Svařování má tedy mezioborový charakter.

Svarový spoj kovů a jejich slitin se vytváří pomocí soustředěného tepla či tlaku, případně kombinací obou s možností použití přídavného materiálu, který má stejné nebo podobné chemické složení, tedy i vlastnosti, jako svařované materiály. K vytvoření spojení dojde působením meziatomových sil a vazeb na plochách, které jsou aktivovány tlakem nebo teplem a nachází se v místě svařování v roztaveném nebo plastickém stavu.

Zjednodušeně svarový spoj vzniká při dostatečném přiblížení svarových ploch, viz obr. 10 a). Na tyto plochy poté působí dostatečně velká tlaková síla, která zapříčiní stlačení výstupků na povrchu a začne se uskutečňovat lokální plastická deformace znázorněna na obr. 10 b). Svarový spoj bez získání aktivační energie vzniknout nemůže. Tato energie je nutná pro překonání bariéry potenciální energie atomů povrchových vrstev. Po splnění těchto podmínek může vzniknout svarový spoj, který je rozdělen do dvou fází a to:

- 1. fáze – rozvoj fyzikálního kontaktu (přiblížení svarových ploch),
- 2. fáze – energetická interakce, která ukončuje vznik spoje.



- a) opracovaný povrch bez následného stlačení
 - b) tlakem stlačený povrch a následná plastická deformace výstupků
 - c) svarový spoj po difúzi, rekrystalizaci a překrystalizaci
- Obr. 10 Schéma fází spojení a svaření dvou povrchů [7]

Doprovází-li vzájemný styk obou spojovaných ploch i difúzní procesy, dojde tak ke vzniku nových zrn pomocí mechanismu přemístování částic a díky tomu zmizí hranice mezi původními spojovanými plochami, viz obr. 10 c). Vznikne-li takovýto svarový spoj, pak se jeho vlastnosti velmi podobají původním spojovaným materiálům.

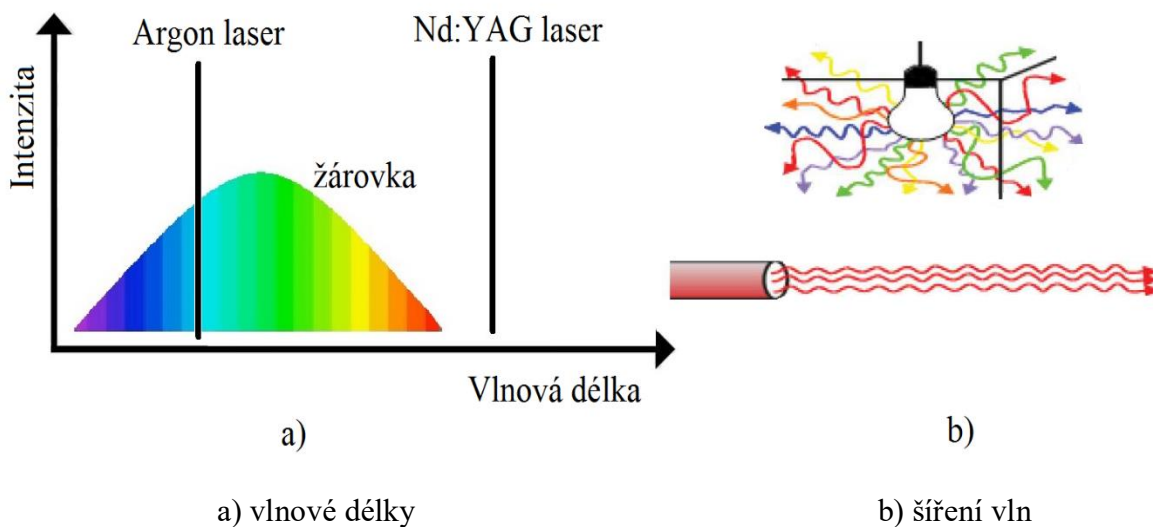
2.1 Princip laseru [3], [7], [11], [12], [25], [31], [34], [45], [56], [79], [82]

Slovo LASER vychází z prvních písmen odborného anglického názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, volně přeloženo jako „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Zářením v překladu rozumíme pohyb fotonů, tedy pohybu elementárních částic světla.

Základní princip laserového paprsku je patrný v porovnání s klasickým zdrojem světla, jako je například žárovka. U klasických zdrojů světla se záření šíří do celého prostoru rovnoměrně, oproti tomu světlo z laseru vychází jako úzký paprsek zaostřen do velmi malé plošky, ideálně bodu. Mezi další hlavní rozdíly mezi laserem a klasickým zdrojem je skladba světla. Klasický zdroj světla se skládá z barevného spektra o různých vlnových délkách, na rozdíl od toho laser je monochromatický jednobarevný paprsek. V tabulce a na obrázku níže lze vyčíst další rozdíly mezi laserem a klasickým zdrojem světla.

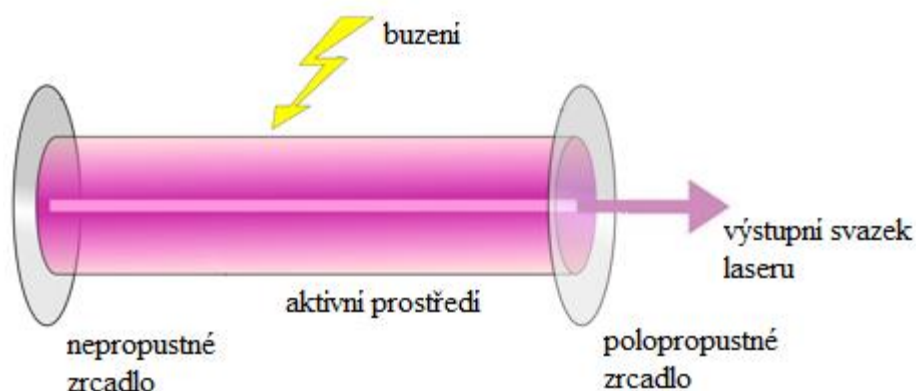
Tab. 3 Porovnání laseru a klasického zdroje světla. [82]

Laser	Klasický zdroj světla
Záření vychází jako úzký paprsek o malém průměru	Záření se šíří do celého prostoru rovnoměrně
Paprsek je monochromatický (jednobarevný)	Záření se skládá z barevného spektra (více vlnových délek)
Koherentní světlo (pouze jedna synchronizovaná vlna)	Nekoherentní světlo (světelné vlny nejsou synchronizovány)
Zaostření svazku fotonů do bodu	Zaostření do plochy



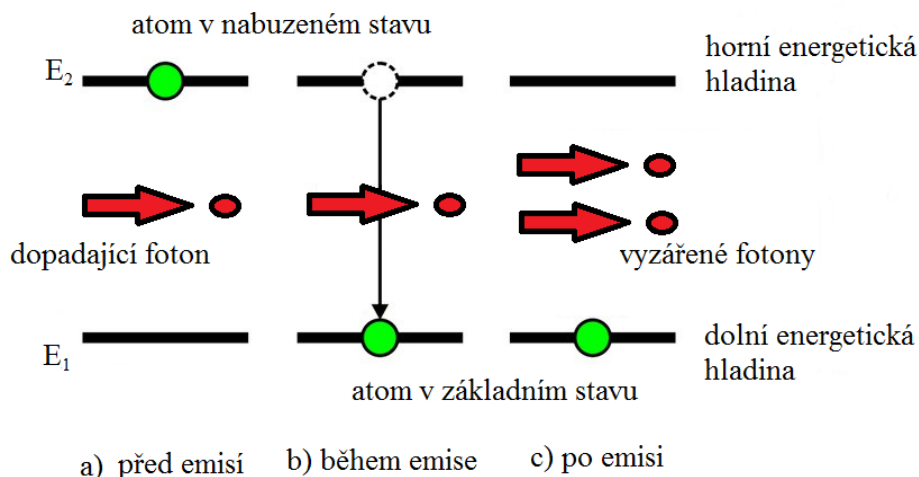
Obr. 11 Porovnání světla žárovky a laseru z pohledu [12] [31], [45]

Konstrukce laseru je složena ze tří základních částí – aktivní prostředí, optický rezonátor a buzení. Druh buzení je závislý na druhu aktivního prostředí. Buzení může být nejčastěji vytvářeno pomocí elektrického výboje, optickým zářením či zářením laserové diody. Velmi zřídka se jako buzení používá chemická reakce. Optický rezonátor je nejčastěji vyroben ze dvou rovnoběžných zrcadel, a to polopropustného a nepropustného. Aktivní prostředí je část konstrukce laseru, kde dochází k vytvoření laserového záření. Je více druhů aktivního prostředí, podle čehož se i rozlišují typy laseru. Aktivní prostředí může být tvořeno atomy a molekuly plynů, pevné látky, polovodiče a kapaliny. Energie vytvořená buzením je přeměněna v optickém rezonátoru na laserový paprsek díky procesu stimulované emise. Základní konstrukce laserového zařízení je zjednodušeně popsána na obrázku níže.



Obr. 12 Základní konstrukce laseru [11]

V aktivním prostředí dochází k vzájemným srážkám atomů, přičemž dochází k předávání své energie dalším atomům, což má za následek excitaci atomů do vyšších energetických vrstev. Při následném spontánním přechodu atomu z vyšší energetické vrstvy do nižší dochází k vyzáření fotonu. Přechod fotonů je zapříčiněn tím, že prostředí se vždy snaží být ve stavu s co nejmenší hladinou energie, tedy ve stavu termodynamické rovnováhy. Tento stav je narušen buzením, kdy dané aktivní prostředí dosáhne vybuzeného stavu. Celým procesem stimulované emise dojde k přeměně energie dodané aktivnímu prostředí na laserový paprsek. Při dopadu fotonu na vybuzený atom dojde k sestoupení tohoto vybuzeného atomu z horní energetické hladiny na spodní energetickou hladinu, a zároveň dojde k vyzáření dalšího fotonu. Vyzárené fotony se odráží v rezonátoru mezi nepropustným a polopropustným zrcadlem a jejich počet velmi rychle roste. Při rychlém růstu počtu fotonů také rapidně roste energie svazku fotonů až do kritické hodnoty, kdy polopropustné zrcadlo tento proud fotonů propustí. Zjednodušené schéma stimulované emise je na obr. 13.



Obr. 13 Princip stimulované emise [34]

2.1.1 Typy průmyslových laserů [3], [7], [9], [22], [34], [35], [39], [41], [56], [71], [79]

Typů průmyslových laserů je velké množství a každý typ vyniká jinými vlastnostmi a je vhodný pro určitou oblast použití. Jednotlivé průmyslové lasery je možné rozdělit do různých skupin podle jejich konstrukce, vlastností, způsobu čerpání energie nebo oboru, kde se tyto lasery budou využívat.

Podle druhu aktivního prostředí:

- pevnolátkové
- polovodičové
- kapalinové
- plynové
- chemické

Podle způsobu čerpání energie (buzení):

- optické čerpání
- elektrický výboj
- tepelnou změnou
- chemickou reakcí
- rekombinací

Podle hlediska režimu práce:

- pulzně
- impulzně
- kontinuálně

Podle vyzařované vlnové délky:

- infračervené
- rentgenové
- ultrafialové
- v pásmu viditelného světla

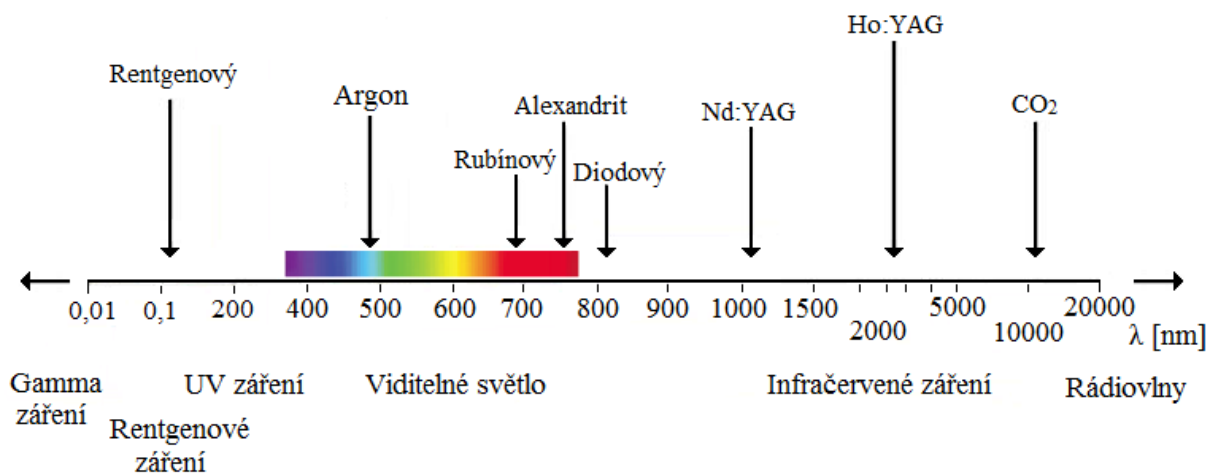
Podle oblasti použití:

- měřicí
- výzkumné
- lékařské
- technologické
- vojenské

Další rozdělení:

- diskové
- polovodičové
- vláknové
- tyčové
- diodový

Podrobnější přehled o rozdělení laserů z hlediska vyzařované vlnové délky je vyobrazeno na obrázku níže.



Obr. 14 Rozdělení laserů podle vlnové délky záření [22] [41]

2.1.2 Pevnolátkové lasery [7], [9], [25], [34], [35], [39], [43], [57], [60], [65], [71], [79]

Charakteristickým prvkem pevnolátkového laseru je aktivní prostředí tvořené dielektrikem, tedy z pevné opticky propustné látky. Značnou část technických vlastností dielektrika (krystalu) ovlivňuje u pevnolátkových laserů matrice. Na matici jsou kladeny vysoké nároky. Je důležité, aby byla opticky homogenní, průzračná a dala se uměle vyrobit pomocí technologických postupů. Tyto podmínky splňují a pro pevnolátkové lasery se využívají materiály jako:

- krystaly,
- keramika,
- skla.

V matici jsou s malou koncentrací rozmístěny stechiometricky uložené ionty aktivátoru. Veškeré druhy aktivního prostředí pevnolátkových laserů jsou zároveň velice efektivní luminofovy, tedy látky, které mají schopnost absorbovat energii a poté ji vyzářit ve formě světla. Nejvýznamnější představitelé pevnolátkových laserů jsou:

- rubínový laser – vhodný pro lékařství, lokaci družic, vrtání tvrdých materiálů
 - větší využití v pulzním režimu
 - aktivní prostředí je krystal, který produkuje záření (694 nm)
 - v dnešní době nahrazován Nd:YAG laserem
- Nd:sklo laser – využití v pulzním režimu
 - vhodný pro vysokoenergetické pulzy
 - vlnová délka paprsku 1064 nm
- Nd:YAG laser – nejpoužívanější typ pevnolátkového laseru
 - vlnová délka laserového svazku 1064 nm

Aktivním prostředím tohoto nejrozšířenějšího pevnolátkového Nd:YAG laseru je matrice uměle vytvořeného YAG krystalu, který je zachycen na obr. 15. Krystal je tvořen sloučeninou $Y_3Al_5O_{12}$ (yttrium aluminium granát) dopovaný ionty Nd (neodym). Nd:YAG laser může být používán jak v kontinuálním, tak i v pulzním režimu. Vlnová délka laserového záření je 1064 nm. Značnou výhodou tohoto pevnolátkového laseru je možnost vedení paprsku optickým vláknem. Optická vlákna lze ohýbat a mohou mít jakoukoli délku, čehož se využívá hlavně u svařecích robotů. Nd:YAG lasery prošly dlouhým vývojem a lze je rozdělit do tří generací.



Obr. 15 Příklady Nd:YAG krystalů [60]

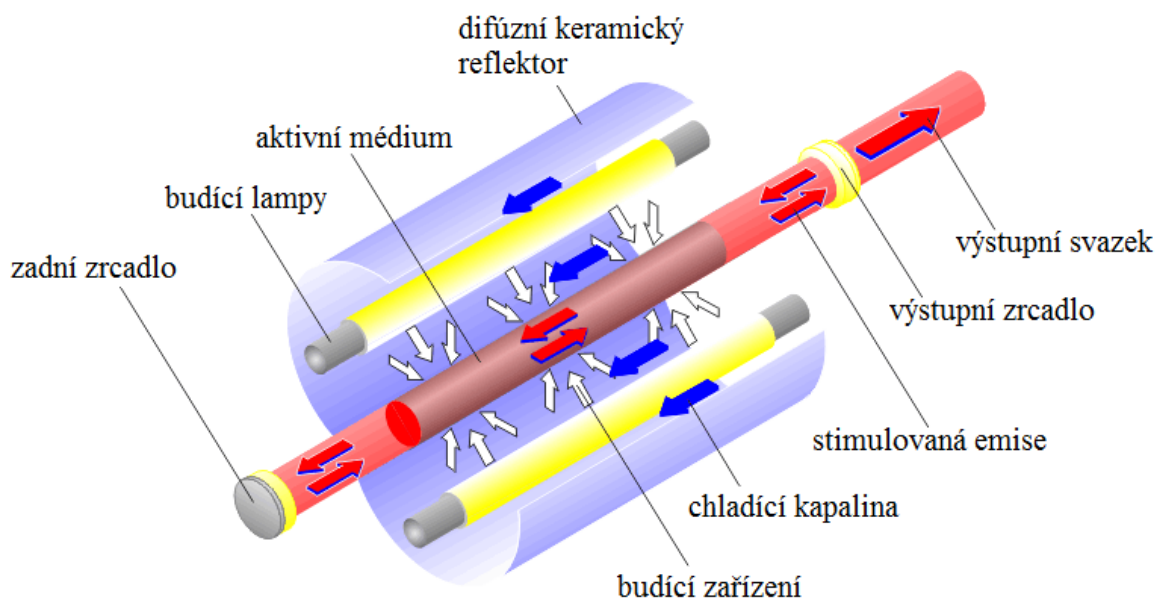
Nejstarší, první, generace pevnolátkových Nd:YAG laserů má výbojkové buzení. Nd:YAG lasery první generace se převážně používají na vrtání a svařování. Výhodou těchto laserů je poměrně nízká investiční náročnost a pracuje s velkou energií v pulzu. Mezi nevýhody lze zařadit potřeba intenzivního chlazení, nízká účinnost nebo vyšší provozní náklady kvůli časté potřebě měnit výbojky. Základní konstrukce pevnolátkového Nd:YAG laseru první generace je popsána na obrázku 16.

Výhody:

- velká pulzní energie
- nízká investiční náročnost
- vedení paprsku optickým vláknem

Nevýhody:

- potřeba chlazení
- nízká účinnost
- vysoké provozní náklady
- častá údržba



Obr. 16 Konstrukce Nd:YAG laseru první generace [35]

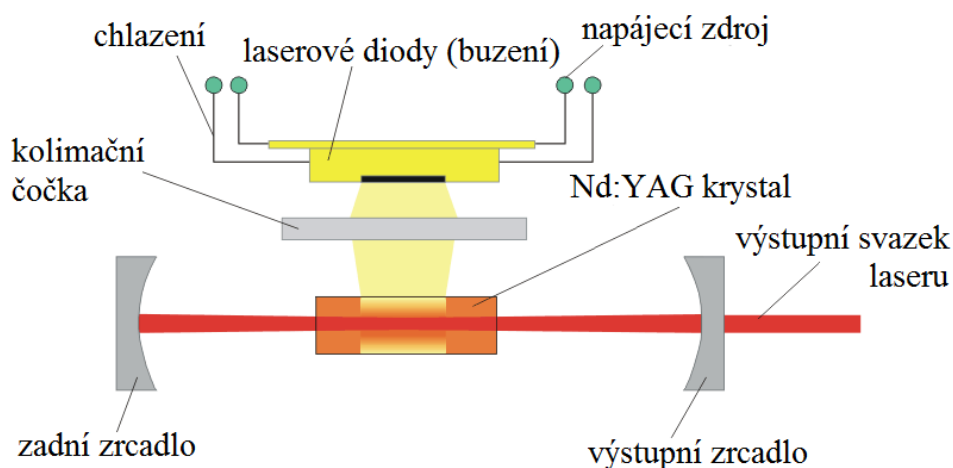
Do druhé generace pevnolátkových Nd:YAG laserů patří lasery buzené polovodičovými diodami, jehož základní konstrukce je na obr. 17. Tyto lasery mají velký rozsah použití. Lasery s menším výkonem jsou nejvhodnější pro laserové gravírování a značení. Výkonnější Nd:YAG lasery druhé generace se nejvíce využívají pro svařování a řezání.

Výhody:

- vyšší účinnost
- nízké provozní náklady
- delší životnost
- menší požadavky na chlazení
- vedení paprsku optickým vláknem

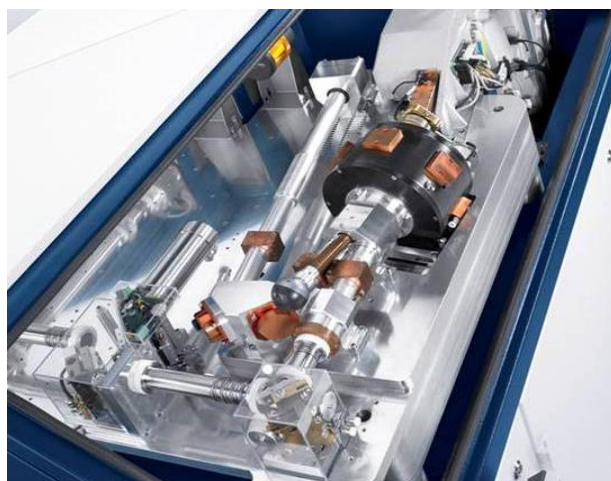
Nevýhody:

- vysoká počáteční investice



Obr. 17 Konstrukce Nd:YAG laseru druhé generace [57]

Do nejnovější třetí generace pevnolátkových Nd:YAG laserů je zařazen diskový laser, pro který je charakteristický tvar aktivního prostředí ve tvaru úzkého disku. Tvar aktivního prostředí umožňuje laserům získat vysoké výkony a to až 16 kW s výbornou kvalitou výstupního paprsku. Tohoto se dosahuje díky rovnému teplotnímu profilu v celém průřezu disku. Na druhou stranu mezi nevýhody patří nižší životnost v porovnání s vláknovými lasery a menší účinnost. Lasery třetí generace se používají díky vysokým výkonům pro náročnější operace jako je svařování nebo řezání.



Obr. 18 Diskový rezonátor Nd:YAG laseru [43]

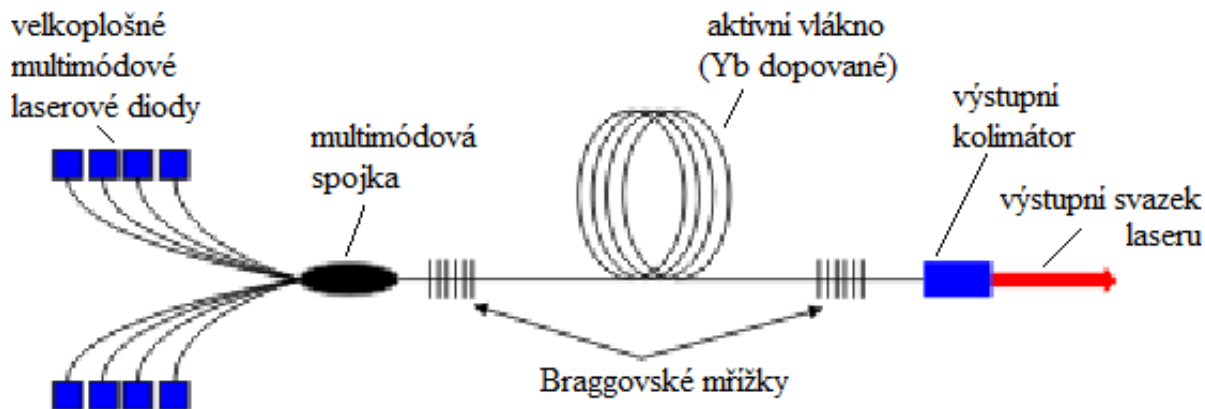
Výhody:

- vysoký výkon
- výborná kvalita výstupního paprsku
- vedení paprsku optickým vláknem
- kompaktní konstrukce

Nevýhody:

- vysoká počáteční investice
- nižší životnost
- nižší účinnost

Technologicky nejmodernější pevnolátkové lasery jsou lasery vláknové. Aktivní prostředí u toho vláknového laseru je optické vlákno dopované ytterbiem buzené laserovými diodami, které jsou přivedeny přes optickou spojku do aktivního vlákna. Další rozdílností je, že se u těchto typů laserů používají tzv. Bragovské mřížky na rozdíl od zrcadel používaných u ostatních laserů. Bragovské mřížky jsou struktury, které jsou vyrobeny přímo na optickém vlákně. Výstupní laserový paprsek je vyzářen pomocí optického kolimátoru. Vlnová délka takto vyzářeného laserového paprsku je 1070 nm. Schéma vláknového laseru je vyobrazeno níže.



Obr. 19 Základní konstrukce vláknového laseru [57]

Vláknové lasery mohou pracovat v různých pracovních režimech jako je kontinuální, pulzní či kvazipulzní. Toho se využívá při velkých operacích, například u svařování a řezání nebo u méně náročných, tedy gravírování, mikroobrábění nebo značení. Nesmírnou výhodou vláknových laserů je jeho konstrukční jednoduchost, kdy v podstatě celý laser představuje optické vlákno, modularita a robustnost. Díky již zmíněné modularitě, lze laser skládat z více laserových modulů a vytvořit tak laser o vyšším výkonu. Spojováním modulů může laser navýšit svůj výkon až na 100 kW. Vysoká účinnost až 35 %, dlouhá pracovní životnost až 100 000 h, vysoká kvalita výstupního laserového paprsku, nejnižší provozní náklady z pevnolátkových laserů a další výhody řadí vláknový laser mezi špičku průmyslových laserů.

Výhody:

- modularita
- vysoký výkon
- výborná kvalita výstupního paprsku
- kompaktní konstrukce
- nízké provozní náklady a nároky na údržbu

Nevýhody:

- vysoká počáteční investice

2.1.3 Plynové lasery [3], [7], [9], [35], [59], [71], [79], [82]

Další významnou skupinu průmyslových laserů tvoří plynové lasery. Aktivní prostředí těchto laserů tvoří plyn, popřípadě směs plynů a par. Chod plynových laserů může být jak kontinuální, tak i impulzní. Plynové lasery pracující v impulzním režimu s maximálním výkonem ve stovkách W. Oproti tomu v kontinuálním režimu lze využít výkon od mW, až po desítky W. Mezi typické reprezentanty této kategorie se řadí CO₂ lasery, argonový laser nebo heliumneonový laser.

Aktivní prostředí CO₂ laserů tvoří především molekuly oxidu uhličitého a dále helia a dusíku. Helium v aktivním prostředí zamezuje rozptylu tepla a dusík vytváří energii, která je potřeba k nabuzení. Pro buzení se používá elektrický výboj, který tuto směs plynů zapaluje. CO₂ lasery vyzařují laserový svazek o vlnové délce 1060 nm a jeho energetická účinnost dosahuje 10 až 15 %. U CO₂ laserů je problematické vedení laserového paprsku. Zde již není možné využít vedení laserového svazku pomocí optických kabelů, ale musí se paprsek dopravit do místa záření soustavou zrcadel. Kvůli složitějšímu optickému vedení je zapotřebí pravidelná kalibrace, čištění a údržba zrcadel nebo i drahá výměna optických čoček, viz obr. 20.



Obr. 20 ZnSe optické čočky [59]

Díky vysokým výkonům a jejich širokému rozsahu se CO₂ lasery využívají ve velkém v technologických operacích. CO₂ lasery do výkonu 1,5 kW se využívají pro značení, gravírování a řezání nekovů (plexi, papíry, skla, plasty). Nejrozšířenější CO₂ lasery v průmyslu jsou lasery s vyšším výkonem do 20 kW, které se používají pro svařování a řezání kovů.

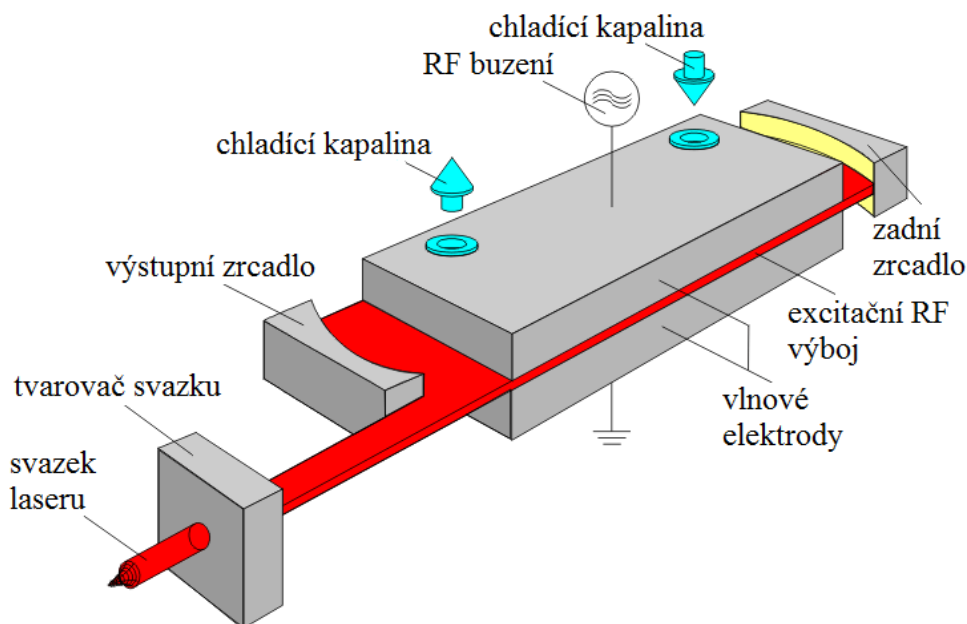
Výhody:

- vysoký výkon
- vysoká spolehlivost
- dlouhá životnost
- nízké provozní náklady

Nevýhody:

- složité vedení paprsku
- nutný odvod tepla
- častá údržba a kontrola zrcadel

Nejmodernější model CO₂ laseru je difúzně chlazený SLAB laser. Pro buzení SLAB laserů se využívá vysokofrekvenčního vlnění. K buzení dochází mezi dvěma velkoplošnými měděnými elektrodami, které slouží i k odvodu tepla. Odvod tepla je zapříčiněn rozptylem vody na měděné elektrody a dochází tak k plošnému difúznímu chlazení plynu v rezonátoru. Výhodou diskového SLAB laseru je vysoce kvalitní výstupní laserový paprsek a hlavně velmi nízké náklady na provoz a údržbu. Nově vyvinutá konstrukce rezonátoru umožnila zmenšení zdroje laserů u laseru s vyšším výkonem. Konstrukce a princip deskového SLAB laseru je znázorněna na obrázku níže.



Obr. 21 Základní konstrukce SLAB laseru [35]

Výhody:

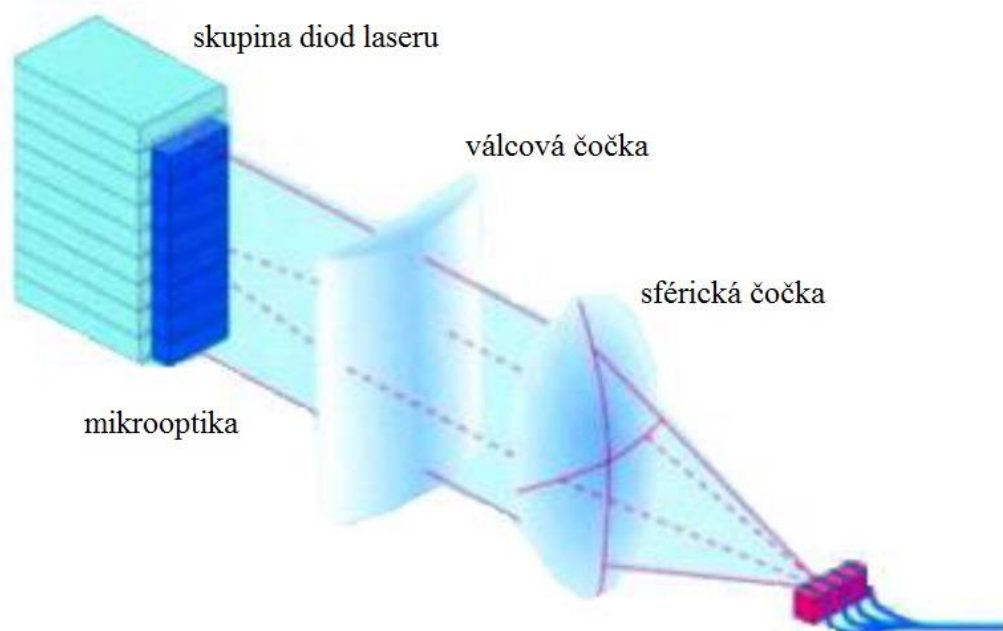
- nízká spotřeba energie
- výborná kvalita výstupního paprsku
- nízké provozní náklady
- vysoká spolehlivost
- dlouhá životnost

Nevýhody:

- výkon do 5 kW

2.1.4 Polovodičové lasery [3], [7], [9], [64], [65], [71], [79], [82]

Charakteristické pro polovodičové lasery je jejich aktivní prostředí, které se skládá z polovodičového materiálu, kde jsou aktivní částice nerovnovážné elektrony a díry, tedy volné nosiče náboje. Jako polovodičový materiál se využívá elektricky čerpaná polovodičová dioda. Toto aktivní prostředí generuje laserový paprsek o vlnové délce mezi 800 až 980 nm a výkon paprsku se pohybuje v rozmezí od 50 W do 6 000 W. Díky přímé přeměně elektrického proudu na laserový paprsek mají tyto lasery vysokou účinnost, která dosahuje až 60%. Díky menší vlnové délce svazku může být paprsek veden pomocí optického vlákna. Značně výhodné u polovodičových laserů je jejich hmotnost v porovnání s ostatními lasery a poměrně malé rozměry, čehož se využívá pro osazení těchto laserů na robotická ramena. Na druhou stranu nevýhodou polovodičových laserů je, že pracují pouze v kontinuálním režimu a poměrně nekvalitní výstupní laserový svazek má hranatý profil a nelze jej zaostřit do malého bodu. Této nevýhody hranatého profilu paprsku se využívá pro kalení, kde je to výhodné, a nemusí být použita speciální optika pro modifikaci laserového svazku. V průmyslu se využívají polovodičové lasery s výkonem do 250 W k svařování a řezání plastů a tenkých fólií. Naopak lasery s vyššími výkony až několik kW se používají pro kalení, navařování a svařování kovů a plastů. Zjednodušená konstrukce polovodičového laseru je popsána na obrázku níže.



Obr. 22 Základní konstrukce polovodičového laseru [64]

Výhody:

- paprsek vhodný pro kalení
- malé rozměry a hmotnost
- vysoká účinnost
- nízké provozní náklady

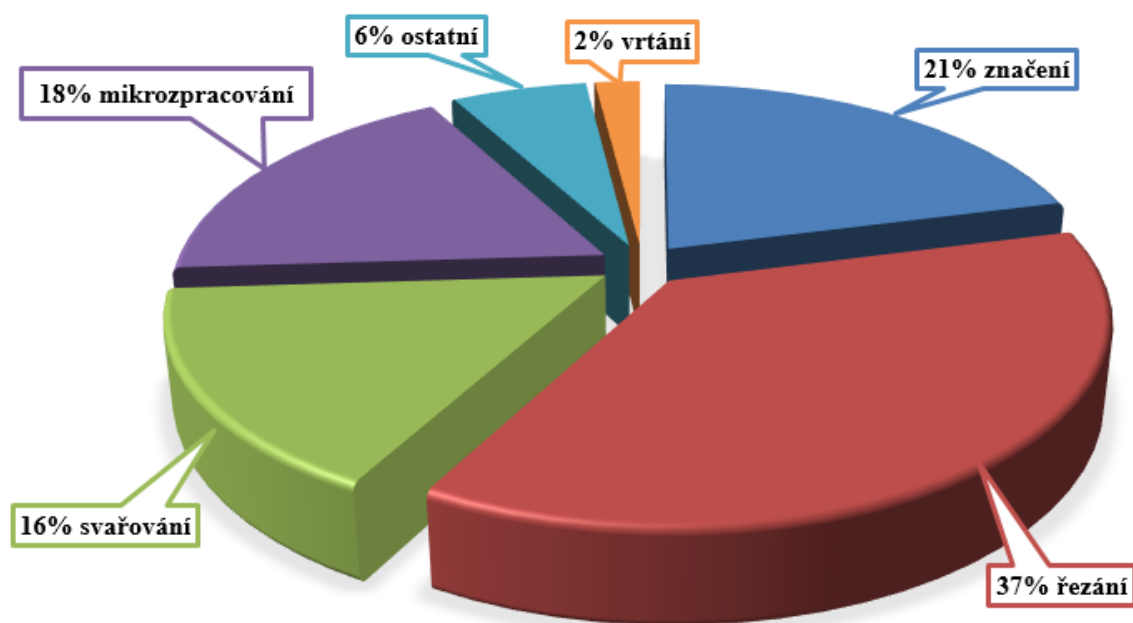
Nevýhody:

- nízká kvalita paprsku
- pouze kontinuální režim

2.2 Použití laserů v průmyslových aplikacích [7], [9], [40], [42], [44], [46], [55], [66], [80]

Laser se ve strojírenské technologii začal využívat od konce 60. let 19. století. Za celou dobu prošel vývoj průmyslového laseru nepřetržitou inovací. Vývoj průmyslových laserů je převážně zaměřen na zlepšení technologických možností a snížení provozních nákladů.

Charakteristickou předností pro aplikaci laserových operací v průmyslu je využití schopnosti opracovávat obrobek bez potřeby mechanického kontaktu. Výhodou laseru oproti ostatním konvenčním metodám je obrábění těžkoobrobitelných materiálů a složité přístupných částí obrobku. Ve strojírenských aplikacích se laser využívá pro řezání, svařování, vrtání, tepelné zpracování, povrchové úpravy, povlakování, značení a pro podporu konvenčního obrábění. Podíl využití jednotlivých technologií v průmyslu lze vidět na grafu níže. Každá z výše zmíněných aplikací má různé požadavky na druh a vlastnosti použitého laseru. Obecně platí, že obrobitelnost materiálu při interakci s laserem zejména ovlivňuje schopnost materiálu absorbovat vyzářenou světelnou energii, tepelnou vodivost a odrazivost paprsků laseru. Ideální obráběný materiál laserem má vysokou absorpci světelné energie, malou tepelnou vodivost a odrazivost. Podíl využití laserových technologií v průmyslu je zobrazeno na grafu níže.



Obr. 23 Graf využití laserových technologií v roce 2014 [9]

- Řezání – je v dnešní době nejrozšířenější technologický laserový proces v průmyslu. Lasery pro řezání využívají velkou energii, která je soustředěná do místa řezu. Díky této velké koncentraci energie lze laserem řezat veškeré technické materiály, nehledě na jejich fyzikální, chemické a tepelné vlastnosti. Zaostřený paprsek do místa řezu ohřeje řezaný materiál na teplotu varu a malé okolí materiálu je pouze

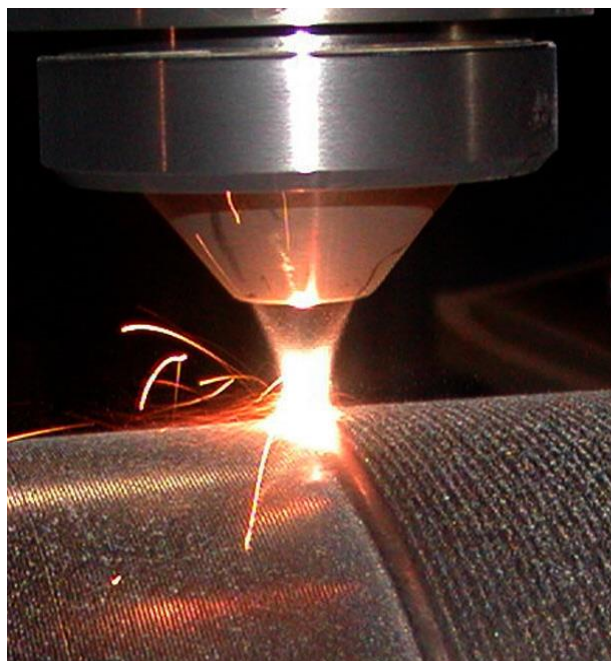


Obr. 24 Řezání laserem [44]

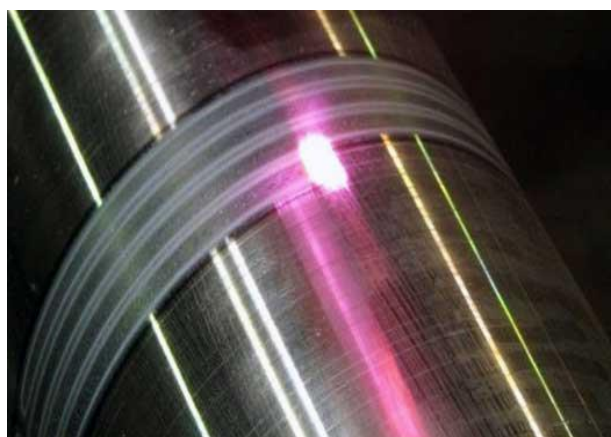
nataveno. K vyplavení roztaveného kovu se používá pracovní plyn, který je pod vysokým tlakem vháněn do místa řezu. Laserové řezání lze rozdělit do dvou skupin podle použitého pracovního plynu – tavné a oxidační řezání. Tavné řezání používá jako pracovní plyn proud inertního plynu (N_2). Řezné plochy při tavném řezání jsou kovově lesklé, bez oxidů a oxidického zbarvení. Tento typ řezání je poměrně pomalý a využívá se pro řezání vysokolegovaných ocelí, mědi, hliníku a i nekovových materiálů jako je keramika nebo plexisklo. Druhá skupina laserového dělení je oxidační řezání, kdy se jako pracovní plyn využívá kyslík, díky čemuž roztavený kov v řezné spáře shoří. Výhodou oxidačního dělení je značně vyšší řezná rychlost na rozdíl od tavného řezání, ale výsledná řezná plocha je zoxidovaná a řezná spára výrazně větší. Oxidační řezání se používá pro dělení nelegované a středně legované oceli. Další specifickou metodou laserového dělení je sublimační řezání. Tato metoda využívá k řezání pulzní laserový paprsek, který materiál ohřívá na teplotu varu a dochází k odpařování materiálu. Sublimační dělení se používá pro řezání tenkých plechů nebo vrtání.

- Navařování – je druh nanášení kvalitních povlaků bez defektů a trhlin. Při této metodě slouží laser jako zdroj tepla, který natavuje přídavný materiál ve formě prášku či drátu a následně jej přivádí do místa navařování.
- Kalení – využívá všechny druhy laserů s možností modifikace paprsku a vysokého výkonu, kdy je potřebí velmi rychlý ohřev materiálu, a to více než $1\,000\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ a následné setrvání na teplotě řádově v rozmezí od 10^{-3} až 10 sekund. Laserové kalení obvykle probíhá na vzduchu za normálních podmínek a teplo je odváděno do materiálu a okolí na základě tepelné vodivosti. Pro zamezení oxidace povrchu se používá ochranný plyn. Výhodou laserového kalení oproti běžným metodám je možnost přesného lokálního kalení, kdy nedochází k tepelnému ovlivnění okolí materiálu. Výsledná tvrdost a hloubka zakalené vrstvy se velmi dobře reguluje pomocí teplotní kamery, která snímá kalený povrch a dosahuje tak přesně daných kalících teplot s přesností $\pm 10\text{ K}$.

Laser se dále využívá pro další technologické aplikace jako je rapid prototyping, kdy se laser používá pro roztavení a vytvrzení jednotlivých vrstev práškového materiálu. Neméně důležité jsou aplikace využívající laser pro texturování, gravírování či leštění povrchů.



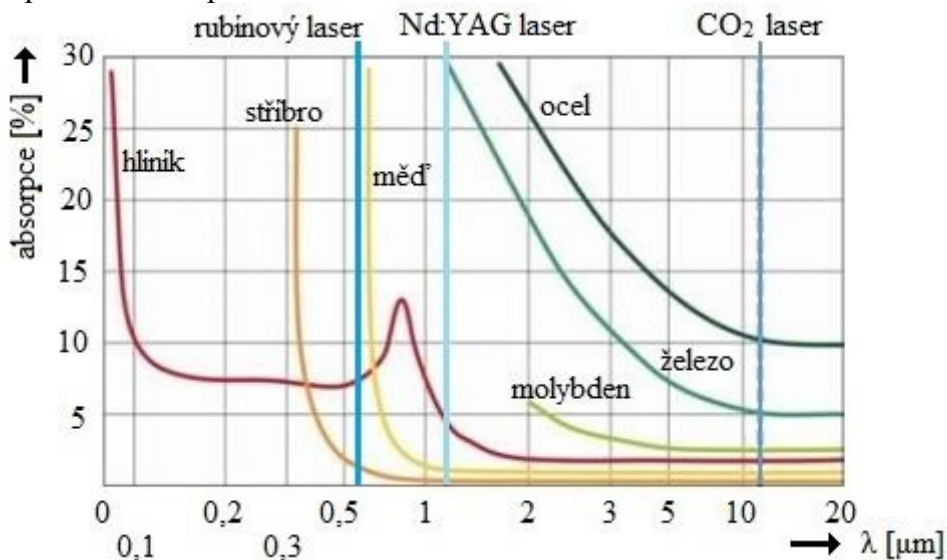
Obr. 25 Laserové navařování [46]



Obr. 26 Laserové kalení [42]

2.2.1 Interakce laseru s povrchem materiálu [3], [9], [25], [36], [37], [63]

Při práci s průmyslovým laserem je hlavní předpoklad interakce zpracovávaného materiálu s laserovým zářením. Materiál musí mít vlastnost absorpce, kde se poté přemění energie na teplo. Při dopadu fotonů na povrch materiálu nedochází přímo k přeměně kinetické energie na tepelnou, ale energie dodaná svazkem fotonů zvyšuje frekvenci vibrací mřížky a tím se materiál v místě dopadu začne rychle ohřívat. Energie svazku dopadajících fotonů se od povrchu částečně odrazí, další část fotonů materiál pohltí a zvýší tak frekvenci mřížky a tedy i teplotu materiálu. Velmi malá část svazku, která není pohlcena ani odražena materiálem prochází. Absorpce záření je závislá na vlnové délce laserového paprsku, teplotě a na stavu povrchu materiálu. Obecně platí, že s rostoucí teplotou materiálu roste i schopnost pohltit záření a naopak s rostoucí vlnovou délkou absorpce klesá. Tato závislost je vyobrazena na obrázku níže. Leštěný povrch materiálu má menší absorpci záření než hrubý povrch, od kterého se méně fotonů odrazí. Koeficient absorpce lze tedy zvýšit nanesením matné černé barvy na materiál, zdrsněním povrchu nebo předehřevem.



Obr. 27 Velikosti absorpce v kovech v závislosti na vlnové délce záření [63]

2.3 Laserové svařování [7], [9], [25], [38], [66], [68], [76]

Pomocí moderní technologie svařování laserem lze získat nerozebíratelný svarový spoj součástí o vysoké kvalitě a spolehlivosti. Svarový spoj vzniká bez přídavného materiálu a vyznačuje se pěkným povrchovým vzhledem. Svařování laserem je pro strojírenský průmysl velmi důležitý, protože laserem lze svařovat materiály, které se běžnými konvenčními metodami svařují velmi těžko, nebo je jimi nelze svařit vůbec. Laserem se tedy svařují veškeré druhy ocelí, plastů nebo složitě svařitelné materiály jako je hliník, měď nebo mosaz.

Výhody:

- vysoká svařovací rychlost
- svařování bez přídavného materiálu
- svar s vysokou štíhlostí
- vzájemná svařitelnost různých materiálů
- snadná automatizace
- vysoká přesnost
- kvalitní a čistý svarový spoj
- průvarové spoje

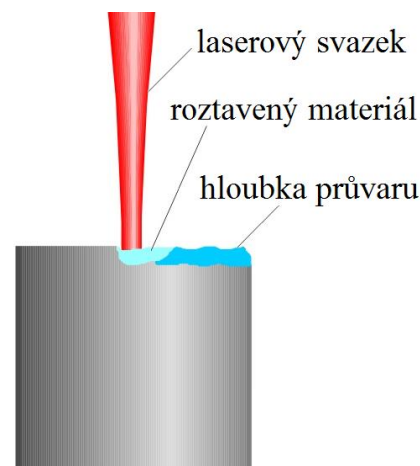
Nevýhody:

- vysoká počáteční investice
- složité přípravkování

2.3.1 Princip laserového svařování [7], [9], [38], [39], [40], [68]

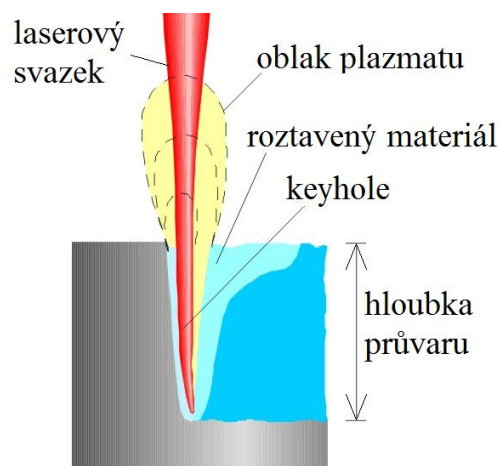
Laserové svařování se dělí na dva typy svařování – kondukční a penetrační. Toto dělení vychází z účinku laserového paprsku na spojovaný materiál.

Kondukční svařovací režim využívá při práci nižší plošnou hustotu výkonu než u penetračního režimu, a to do $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Při těchto hodnotách dochází k přenosu tepla a tvarování svarové lázně kondukcí. Odpaření materiálu při kondukční metodě je minimální. Charakteristické pro tento typ svařování je svar, který má větší šířku než hloubku a tepelně ovlivněná oblast je větší v porovnání s penetračním režimem. Výhodou této metody je velká rychlost svařování na úkor menší hloubky průvaru, čehož se využívá v případech, kdy je rozhodující rychlost svařování například u svařování tenkých plechů a fólií. Schéma tohoto režimu je na obrázku 28.



Obr. 28 Kondukční režim [38]

Penetrační režim se získá zvyšováním plošné hustoty výkonu (až $5 \cdot 10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$), čímž je dosaženo kritické hodnoty a nad svařovaným povrchem materiálu se začnou tvořit páry kovů. Při vzájemné interakci vysoké energie z laserového svazku a pár kovů se vytvoří plazma, díky které dojde k hlubokému provaření. Laserový svazek vytvoří ve svarové lázni kapiláru, ze které pod vysokým tlakem vystupují plyny, které zabraňují uzavření kapiláry. Průměr kapiláry se pohybuje mezi 1,5 až 2 násobkem průměru ohniska laserového paprsku. Tvar kapiláry ovlivňuje plazma nad povrchem materiálu. Energie vnesená laserovým paprskem do stěn kapiláry je vedením dopravena do taveniny a následně i do tuhého materiálu. Tento celý proces umožňuje pronikat svazkem laseru hluboko do materiálu a zároveň se vytváří tzv. keyhole neboli v překladu „klíčová dírka“. Keyhole je úzká a hluboká dutina, která obsahuje kovové páry, které hraničí s roztaveným kovem. Růst kapiláry je zastaven, když plošná hustota výkonu klesne pod kritickou hodnotu. Pokles plošného výkonu je zapříčiněn divergencí paprsku, absorpcí stěnami kapiláry a ztrátami tepla, kterými se rozumí odvod tepla do okolí materiálu a jeho vypařování. Vzniká tak úzký a hluboký svar, který je charakteristický pro tento typ svařování. Při svařování materiálu do velké hloubky vzniká tavenina na čele a v důsledku dynamické rovnováhy sil tekutého kovu, plynů a par teče tavenina na zadní stěnu materiálu okolo stěn kapiláry. Tavenina na zadní stěně vyplňuje volný prostor a začne tuhnout a tím vzniká kvalitní svar. Schematicky je penetrační režim zobrazen na obr. 29.



Obr. 29 Penetrační režim [38]

Plazma vzniklá na povrchu negativně ovlivňuje tvar kapiláry a velkou část záření pohlcuje a tím zabraňuje pronikání fotonů do svarové spáry a znatelně snižuje hloubku průvaru. Pro odstranění nebo částečnému odchylení plazmy nad materiálem se využívá ochranný plyn Ar, N₂, He nebo směs plynů Ar + CO₂. Vháněním ochranného plynu na materiál se zároveň zabraňuje oxidaci vzdušným kyslíkem. Nejvhodnější plyn pro ochranu svarové lázně a vychylování plazmatu je He.

Laserové svařování může probíhat ve dvou režimech – kontinuálním a pulzním. Kontinuální režim probíhá ve spojitém chodu paprsku, jehož energie paprsku se velmi blíží průměrné hodnotě. Závislost výkonu na čase má lineární charakter, nedochází tedy k výkonovým výkyvům, a tak se ve zdroji skokově neakumuluje energie.

Pulzní režim je charakteristický vyzařováním energie paprsků ve formě krátkých impulzů. Ve zdroji je energie nashromážděována delší časový úsek, až poté vychází s vyšším výkonem. Paprsky vystupují ze zdroje v pravidelných intervalech po akumulaci potřebné energie.

2.3.2 Parametry svařování [7], [9], [25], [68]

Svařovací parametry do jisté míry značně ovlivňují kvalitu výsledného svaru. Správné nastavení svařovacích parametrů se odrazí i v efektivnosti a využití laseru v jednotlivých technologických procesech. Na rozdíl od svařování konvenčními metodami u svařování laserem čistota povrchu neovlivňuje svařovací parametry, protože při vysoké intenzitě energie, kterou materiál pohlcuje, jsou všechny nečistoty a tuky odpařeny ještě před natavením svarové lázně.

Parametry ovlivňující proces svařování:

- rychlost svařování
- vlnová délka laserového svazku
- vlastnosti a parametry svařovaného materiálu
- typ svařovacího plynu a jeho objem
- výkon, plošná hustota výkonu nebo energie paprsku
- optika ve svařovací hlavě
- poloha ohniska zaostřovaného paprsku v poloze vůči trysce a povrchu materiálu
- polarizace laserového zařízení

2.4 Svařování metodou TIG [1], [2], [7], [13], [52], [54], [73], [74]

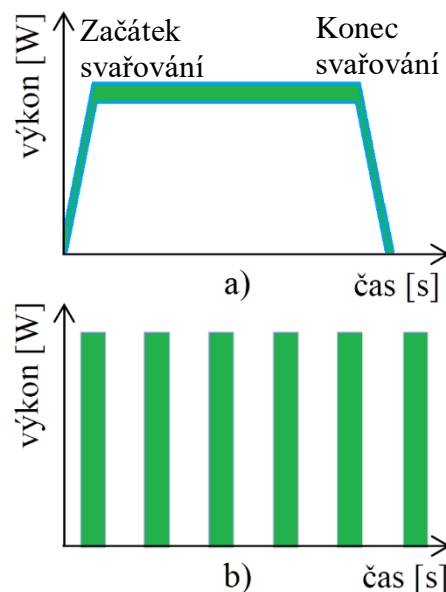
Svařování metodou TIG patří do skupiny tavného svařování. Jedná se o obloukovou metodu svařování v ochranném plynu, kdy oblouk hoří v ochranném plynu. Ochranný plyn v těchto případech chrání elektrodu, oblouk a svarovou lázeň proti interakci se vzdušným kyslíkem a dusíkem. Název metody TIG je vytvořen zkratkou anglického spojení „Tungsten Inert Gas“ v překladu svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu. Lze se setkat i s označením této metody zkratkou WIG, která pochází z německého spojení „Wolfram Inert Gas“.

Oblouk u metody TIG hoří mezi netavící se elektrodou a základním materiálem. Svařování může probíhat jak s přídavným materiálem, který je dodáván ve formě drátu, tak bez přídavného materiálu.

Svařování metodou TIG se dělí na dvě skupiny, podle druhu svařovacího proudu na:

- svařování střídavým proudem
- svařování stejnosměrným proudem

Střídavý svařovací proud se používá na svařování hliníku, hořčíku a jeho slitin. Stejnosměrný zdroj je výhodný pro svařování vysokolegovaných ocelí, mědi, niklu, titanu



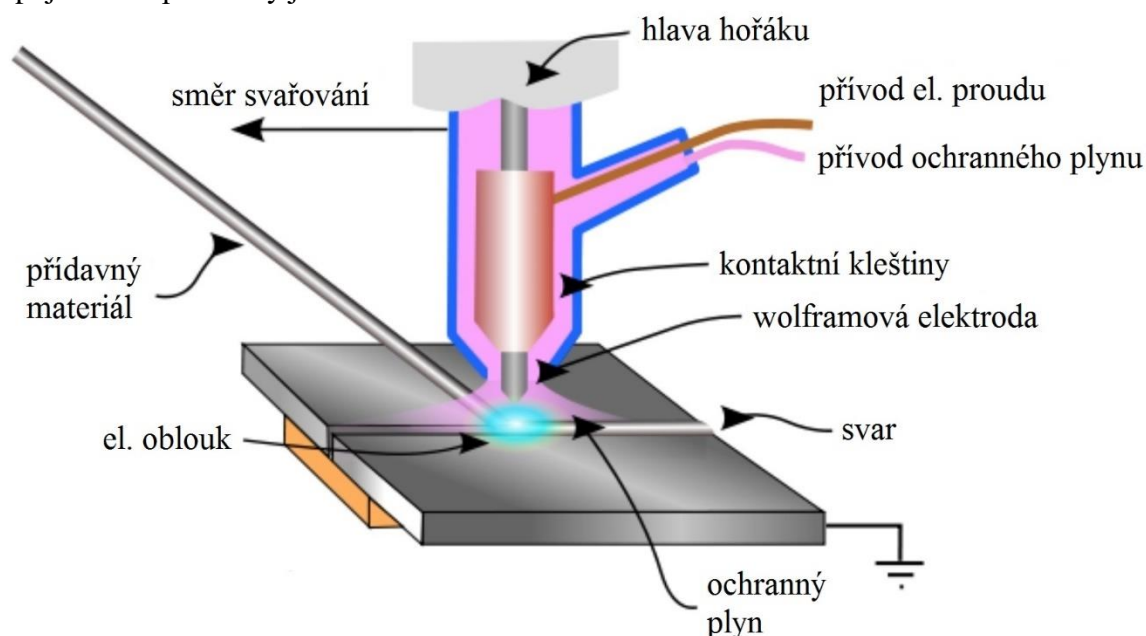
a) kontinuální b) pulzní
Obr. 30 Svařovací režimy [9]

a dalších. Uhlíkaté oceli se metodou TIG svařují méně, protože hrozí vznik pórů ve spoji. Velkou výhodou této metody je možnost svařovat i různorodé materiály například ocel s mědí, bronzem a dalšími materiály. Metoda TIG se používá i v renovaci při tvorbě návarů.

2.4.1 Princip metody TIG [7], [13], [52], [54], [73], [74]

Pro metodu TIG se používá svařovací hořák s neodtavující se teplotně stálou wolframovou elektrodou. Oblouk, který vznikne mezi elektrodou a základním materiálem, ohřívá svařovaný materiál až do teploty varu, kdy se materiál dostane do kapalného stavu. Při svařování s přídavným materiálem se nyní dodává do svarové lázně svařovací drát, a to buď ručně, nebo pomocí podavače. Oblouk se obvykle zapálí bez dotyku wolframové elektrody s obrobkem, díky zdroji s vysokým napětím. Poté probíhá vlastní svařování pomocí střídavého nebo stejnosměrného proudu.

Okolo wolframové elektrody je připevněna tryska, která vhání ochranný plyn do svarové lázně. Vháněním ochranného plynu je zaručena požadovaná pevnost a houževnatost svarového spoje. Princip metody je znázorněn na obrázku níže.



Obr. 31 Princip svařování metodou TIG [13]

Výhody svařování metodou TIG:

- efektivní ochrana svarové lázně inertním plynem
- velmi dobré formování svarové housenky
- není potřeba použít tavidlo
- vysoká stabilita elektrického oblouku
- jednoduché ovládání a regulace parametrů svařování
- svarová lázeň je dobře ovladatelná
- není nutné používat přídavných materiálů
- vzniká malá tepelně ovlivněná oblast

2.4.2 Ochranné inertní plyny [7], [54]

Inertní plyn, který se používá jako ochranná atmosféra, musí splňovat podmínku o vysoké čistotě minimálně 99,995 %. Nejčastěji jako netečný plyn se používá argon, helium, popřípadě jejich směsi. Argon se používá z důvodů, že se v jeho atmosféře dobře zapaluje oblouk a sloupec

oblouku může dosáhnout vysokých teplot a oblouk má vysokou stabilitu i při větších vzdálenostech. V ochranné argonové atmosféře lze svařovat všechny svařitelné materiály a z ekonomického hlediska je to nejlevnější ochranný plyn.

Jako další netečný plyn se pro svařování používá helium. Efektivita použití helia je nižší než při použití jiného ochranného plynu, protože je helium velmi lehký plyn. Tato nevýhoda se kompenzuje vhnáním vyššího průtoku plynu na materiál, čímž je zaručena dokonalá ochrana. Při použití helia se oblouk špatně zapaluje. V čistém heliu je zapotřebí zapalovací napětí až 100 V, proto se zapalování oblouku provádí v jiné atmosféře například argonu. Dále je oblouk při větší délce hoření nestabilní, ale helium má vysokou tepelnou vodivost, čehož se využívá při svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí a vysokých tlouštěk jako je u hliníku, mědi a jejich slitin. Tento plyn se nejčastěji používá pro mechanizované svařování.

Směs argonu a helia při svařování spojuje výhodné vlastnosti obou plynů. V ochranné atmosféře směsi helia a argonu lze svařovat vyššími rychlostmi a zároveň se pozitivně zvýší hloubka závaru. Se vzrůstajícím obsahem helia ve směsi se zvyšuje napětí na oblouku a jeho tepelný výkon, díky tomu lze snižovat předehřev u materiálů s vysokou tepelnou vodivostí. Tato směs se používá při svařování hliníku, mědi nebo svařitelných materiálů větších tlouštěk.

Další ochranná směs plynů, která se využívá pro svařování, je směs argonu a vodíku, která má podobné vlastnosti jako směs argonu a helia. Vodík má redukční vlastnosti a díky tomu zlepšuje čistotu povrchu svaru. Argon a vodík je vhodný pro svařování vysoce legovaných austenitických a austeniticko-feritických CrNi ocelí nebo niklu a jeho slitin. Směs je nevhodná pro svařování martenzitických a feritických CrNi ocelí, protože vodík zapříčiňuje praskání svaru za studena. Dále se nedoporučuje používat pro svařování hliníku a mědi, protože způsobuje vysokou pórovitost svaru.

Pro svařování mědi a jeho slitin se používá jako ochranný plyn směs argonu a dusíku. Tato směs má vysokou tepelnou vodivost a díky tomu přenáší větší část tepla do svarové lázně.

2.4.3 Svařovací hořáky TIG [7], [13], [52], [53], [54]

Nejvíce zatěžované a velice důležité součásti svařovacích zařízení jsou svařovací hořáky, které mají mnoho funkcí. Mezi hlavní funkce patří zajištění přívodu elektrického proudu k elektrodě, vhnání a regulování ochranného plynu, upevnění wolframové elektrody a vedení chladicí kapaliny. Schéma svařovacího hořáku je popsáno na obr. 32. Podle chlazení rozdělujeme hořáky na chlazené proudícím plynem do 150 A a kapalinou chlazené hořáky až do 500 A.

Pevné upnutí a napájení wolframové elektrody proudem dochází ve vyměnitelné kleštině. Upnutí mezi elektrodou a kleštinou musí být velice pevné, protože výrazně snižuje přechodový odpor. Kleština s elektrodou je vtlačována do kuželového otvoru těla hořáku. Hloubka vtlačení může být ručně regulována pomocí šroubované matice s krytem elektrody.

Ochranný plyn je do místa svařování vhnán pomocí plynové trysky, která patří mezi výrazně tepelně zatíženou část hořáku. Velikost trysky je závislá na velikosti plochy, která má být chráněna před okolní atmosférou. Ke zlepšení plynné ochrany a snížení využití jeho množství se používá plynová čočka. Tato čočka prodlouží laminární proudění plynu a sníží množství využitého plynu až o 50 %.



Obr. 32 Schéma svařovacího hořáku TIG [53]

Průtok plynu závisí na několika parametrech:

- druh ochranného plynu
- druh svařovaného materiálu
- velikost proudu a plynové trysky
- typ spoje a svařovací poloha

2.4.4 Wolframové elektrody [2], [7], [13], [52], [54]

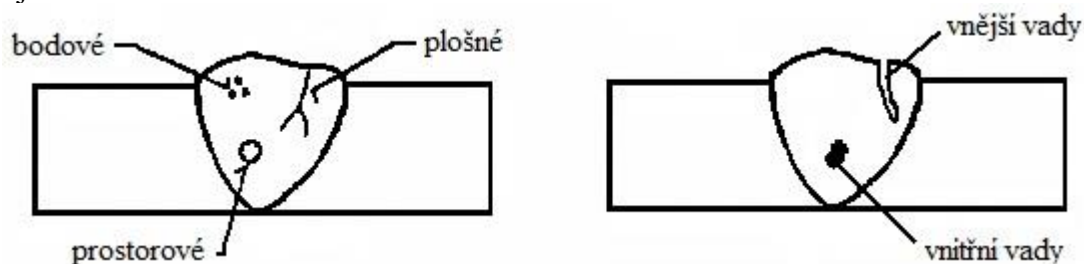
Pro svařování metodou TIG se netavicí se elektrody vyrábí spékáním wolframu. Teplota tavení wolframu je 3380 °C, odolává tedy vysokým teplotám, které se při svařování vytváří. Vyrábí se dva typy wolframových elektrod. První druh elektrody je čistá bez příměsí, o čistotě 99,9 % wolframu. Druhý typ jsou wolframové elektrody s různými příměsí, jedná se o legované oxidy kovů thoria, zirkonu, lanthanu nebo ceru. Tyto oxidy jsou v elektrodě rovnoměrně rozmístěny a ovlivňují vlastnosti elektrody. Elektrody legované oxidy mají sníženou teplotu ohřevu až o 1000 °C, delší životnost, dochází k lepšímu zapálení oblouku a oblouk má vyšší stabilitu.

Wolframové elektrody nejsou přímo při svařovacím procesu spotřebovány, ale dochází k ubývání kvůli vypalovacímu efektu či erozi. Z tohoto důvodu se musí elektrody přebroušovat po použití do požadovaného tvaru podle použitého svařovacího proudu. Při svařování stejnosměrným proudem se elektroda brousí do tvaru kužele vrcholovým úhlem, který odpovídá svařovacímu proudu. Elektroda pro střídavý proud je broušena do tupého konce. Rýhy, které vznikají na elektrodě při broušení, musí být orientovány v podélném směru, čímž je zaručeno hoření oblouku z konce elektrody.

2.5 Svarové vady [26], [27], [33], [61], [76], [81]

Při svařování dochází ve svarovém spoji k vadám, které jsou nebezpečné, protože slouží jako koncentrátoři napětí. Dále svarové vady negativně ovlivňují velikost meze únavy R_e a stávají se iniciátory křehkého lomu. Za svarovou vadu lze považovat každou odchylku od vlastností danými technickými normami, podmínkami nebo smluvním vzorkem. Vada může být jasně viditelná, kterou lze odhalit vizuálním pohledem, nebo skrytá. Skrytou vadu nelze odhalit pouhým okem, ale musí se použít přístroje nebo laboratorní zkoušky. Dále lze vady rozdělit na přípustné nebo nepřípustné, posléze na opravitelné nebo neopravitelné. Toto hodnocení svarů závisí na typu svaru a technických podmínkách.

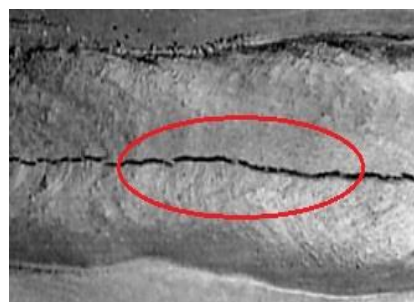
Rozdělení svarových defektů lze rozdělit do skupin podle polohy nebo tvaru vady. Skupina podle polohy umístění se dělí na povrchové a vnitřní. Do povrchových vad se řadí např. trhliny, póry, neprovařený kořen nebo studené trhliny na svarové ploše a do vad vnitřních bubliny, plynové dutiny, staženiny či vměstky. Defekty podle tvaru se dělí na vady bodové, plošné a objemové. Bodové vady jsou mikropóry či malé vměstky. Do druhé skupiny plošných vad patří trhliny, neprůvary nebo studené spoje. Do poslední skupiny vad jsou zařazeny plynové dutiny, vměstky, staženiny, vruby, zápaly nebo i nepravidelný povrch svaru. Toto rozdělení svarů je znázorněno na obrázku níže.



Obr. 33 Rozdělení svarových vad podle tvaru a umístění [76]

Druh svarových defektů je závislý na typu svařovaného materiálu a na metodě svařování a jeho parametrech. Trhliny ve svarových vadách se vyskytují jako trhliny horké, studené, žíhací, lamelární nebo kráterové.

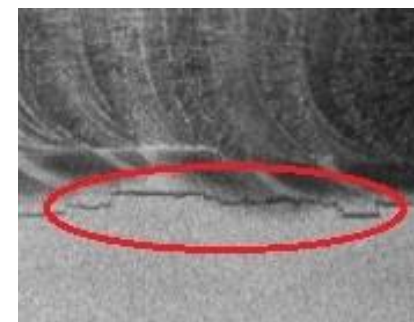
- Horké trhliny – se vytváří v materiálu při vysokých teplotách v rozmezí 800 až 900 °C, viz obr. 34. Vznik horkých trhlín je závislý na chemickém složení základního materiálu. Materiály náchylné na horké trhliny obsahují vysoký obsah uhlíku, manganu a dalších legur nebo vyšší množství síry.
- Studené trhliny – vznikají po skončení svařování, kdy teplota materiálu klesne pod 300 °C, viz obr. 35. Oceli s vyšším obsahem uhlíku a legované oceli mají sklon k vytvoření studených trhlín po svařování především v důsledku působení vodíku.
- Lamelární trhliny – vznikají za vysokých teplot jak v základním materiálu, tak i v tepelně ovlivněné oblasti, jak je na obr. 36. Šíření trhlín může probíhat i za nižších teplot, popřípadě za studena. Lamelární trhliny se tvoří v materiálech v místech, kde působí velká napjatost a kde jsou rozprostřeny nečistoty typu oxidických nebo siřnkových vměstků.
- Žíhací trhliny – vznikají v materiálu z důvodu velkých teplotních rozdílů mezi povrchem a středem svarového spoje. U běžných ocelí se vytváří žíhací trhliny v nízkoteplné oblasti do 300 °C. Oceli, které obsahují chrom a vanad, jsou náchylné na žíhací trhliny v oblasti dolních žíhacích teplot, tedy v rozmezí 500 – 600 °C.
- Kráterové trhliny – jsou zvláštní druh horkých trhlín. Tyto trhliny vznikají v dutině kráteru v důsledku smrštění tuhajícího svarového kovu při náhlém ukončení svařovacího procesu.



Obr. 34 Trhlina za horka [33]



Obr. 35 Trhlina za studena [76]



Obr. 36 Lamelární trhlina [81]

Klasifikace svarových defektů probíhá dle normy ČSN EN ISO 5817 a dělí se na skupiny dle jakosti. Značení skupin je B, C, D. Označení B odpovídá vysoké kvalitě svaru, C střední kvalitě svaru a D nízké kvalitě svaru.

Ve skupině objemových defektů se jedná o:

- Vměstky – jsou svarové vady různého tvaru, které nejčastěji vznikají ve svarovém spoji při nedokonalém odstranění strusky mezi svarovými vrstvami. V tomto případě je jako vměstek brána struska. Při svařování špatně očištěného povrchu vnikají do svarového kovu oxidické vměstky, zejména u oxidů hořčíku a hliníku. Porušením plynové ochrany, dotykem elektrody se svarovou lázní či použitím vysokých proudů se mohou do materiálu dostat i kovové vměstky.
- Plynové dutiny – tvoří shluk dutin, bublin nebo póry, které se mohou vyskytovat i v rádcích. Tyto defekty mají kulovitý tvar a jsou vyplněné plynem. Plynové



Obr. 37 Shluk pórů [26]

dutiny vznikají při svařování s nedostatečně vysušenou elektrodou, ve vlhkém prostředí nebo při svařování vysokou rychlostí. Bubliny a řetězce bublin jsou typickým znakem svařování laserem, které vznikají rychlým kmitáním „key hole“, kdy se bubliny uvnitř svarového kovu uzavírají a zůstávají uvnitř spoje.



Obr. 38 Studený spoj [26]

- Studené spoje – vznikají při nedokonalém tavném spojení svarového kovu a základního materiálu. Studené spoje se tvoří při nesprávném nastavení svařovacích parametrů, jako je vysoká svařovací rychlost nebo špatné vedení elektrody. Ukázka této vady je zobrazena na obr. 38.
- Neprůvary – jsou svarové defekty, ke kterým dochází při pouze částečném natavení základního materiálu a svarových housenek. Neprůvary vznikají při vysoké svařovací rychlosti, předběhnutí svarové lázně nebo při špatné přípravě svarových úkosů.
- Zápaly – jsou typickým svarovým defektem koutových svarů. Jedná se o ostrá natavená prohloubení, která vznikají na hranici mezi základním materiálem a svarovou housenkou. Příčinou vzniku zápalů je použití příliš velkého svařovacího proudu, dlouhého oblouku nebo špatně vedená elektroda.
- Kořenové vady – se dělí na propadený svar v kořenu, krápníky nebo špatně provařený konec kořene svaru, který vzniká při neúplném provaření svařovaných ploch v celé tloušťce.
- Vady na povrchu svaru – vznikají při přílišném převýšení svaru nad svarové plochy nebo naopak při nadměrném prohloubení svaru pod svarovou plochu. Převýšení svaru je znázorněno na obr. 39.



Obr. 39 Převýšení svaru [26]

2.6 Zkoušky svarů a materiálů [19], [21], [27], [48], [61], [84]

Základní požadavek na vyrobené součásti je bezpečnost a spolehlivý provoz. Tento požadavek úzce souvisí s kontrolou vlastností použitých materiálů a jejich svarových spojů. Pro kontrolu a zaručení požadovaných vlastností slouží standardizované zkoušky.

Makroskopické vady lze zjistit pomocí běžných technických prostředků, tedy vizuálně, ultrazvukem apod. Pro zjištění mikroskopických vad je už zapotřebí specializovaných pracovišť a přístrojů. Zkoušení svarových spojů se dělí na dvě hlavní skupiny, a to zkoušky nedestruktivní a zkoušky destruktivní. Při nedestruktivních metodách nedochází k porušení vzorku materiálu. Tyto metody jsou nákladné na periodické školení obsluhy, pořízení přístrojů a jejich servis a kalibraci. Destruktivní metody jsou metody, kdy dojde k porušení zkoumaného vzorku. Destruktivní metody se využívají při hodnocení výrobků určených pro sériovou výrobu, kdy metalografické a mechanické zkoušky jsou důležité pro určení pevnostních mezí konstrukce a následného technologického postupu.

Nedestruktivní zkoušky:

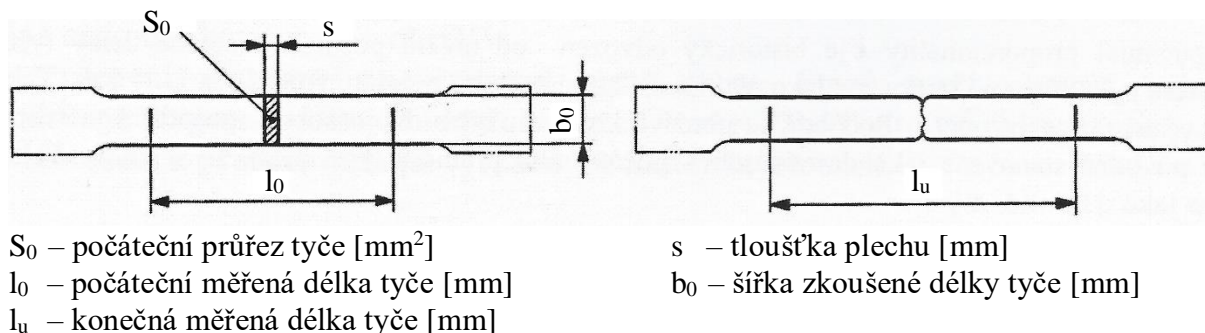
- vizuální kontrola
- zkouška ultrazvukem
- zkouška prozářením
- zkouška kapilární
- zkouška magnetická prášková

Destruktivní zkoušky:

- zkouška tahem
- zkouška tvrdosti
- zkouška makro a mikrostruktury
- zkouška lámavosti
- zkouška rázem v ohybu

2.6.1 Zkouška tahem [20], [21], [27], [48]

Zkouška tahem slouží jako základní mechanická zkouška pro zjištění pevnostních a plastických charakteristik. Jako zkušební vzorek se používá normalizovaná tyč kruhového průřezu, nebo při zkoušce plechového vzorku se používá plochá tyč, která má na krajích umístěnou část pro uchycení v trhacím stroji. Vzorek ploché tyče je popsán na obrázku níže.



Obr. 40 Plochá zkušební tyč pro tahovou zkoušku [48]

Princip zkoušky tahem spočívá v natahování zkušební tyče v trhacím stroji. Zkušební tyč je upevněna mezi dvěma příčnicí v trhacím stroji, kde dochází k natahování zkušební tyče. Tyč je namáhána od nulového zatížení až do přerušení tyče. Aby výsledky z takové zkoušky byly směrodatné, tak se zkouška provádí pouze za přesně definovaných podmínek – teplota, tlak, deformace. Výsledkem tahové zkoušky je tzv. klasický tahový diagram, tedy závislost zatížení vzorku na prodloužení. Z tahového diagramu lze získat tyto charakteristické materiálové vlastnosti:

- a) platnost Hookova zákona – lineární závislost deformace na napětí

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \text{ [MPa]} \quad (2.1)$$

kde: σ – napětí [MPa]
 ε – poměrné prodloužení [-]
 E – modul pružnosti v tahu [MPa]

- b) mez kluzu

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (2.2)$$

kde: F_e – zatížení na mezi kluzu [N]
 S_0 – počáteční průřez tyče [mm²]

Materiály lze podle meze kluzu rozlišit na materiály se zřejmou horní a dolní mezí kluzu a na materiály s nevýraznou mezí kluzu. Materiály s nevýraznou mezí kluzu jsou především vysoce pevné materiály. Pro tyto materiály se stanovuje tzv. smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. Prakticky změřená smluvní mez kluzu je rovnocenná náhrada reálné meze kluzu. Mez kluzu se určuje pomocí konstrukcí v tahovém diagramu, kdy je proložena rovnoběžka s lineární částí diagramu ve vzdálenosti 0,2 % deformace. Vzniklý průsečík rovnoběžky a průběhu diagramu udává velikost smluvní meze kluzu.

c) mez pevnosti

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (2.3)$$

kde: F_m – maximální zatížení [N]

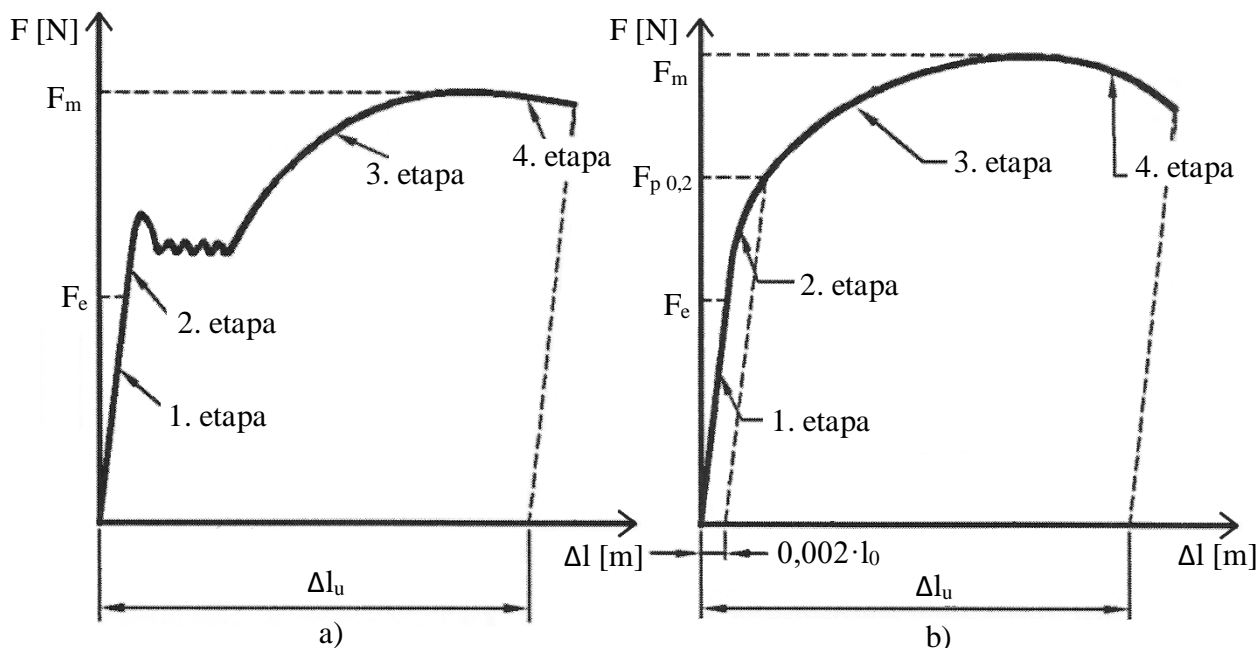
d) kontrakce (zúžení)

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.4)$$

kde: S_u – konečný průřez tyče [mm²]

e) tažnost

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.5)$$



Tahový diagram se dělí do čtyř etap: 1. etapa – oblast pružných deformací
 2. etapa – oblast od meze úměrnosti do meze kluzu
 3. etapa – oblast rovnoměrných trvalých deformací
 4. etapa – oblast nerovnoměrných trvalých deformací

a) s výraznou mezí kluzu

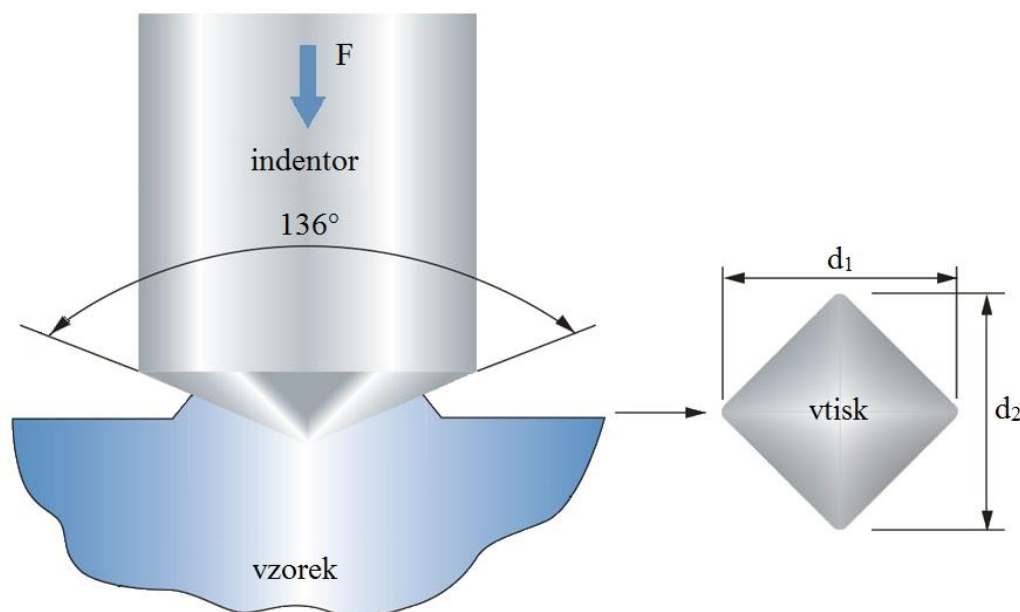
b) s nevýraznou mezí kluzu

Obr. 41 Tahový diagram [48]

Podmínky a průběh tahové zkoušky specifikuje norma ČSN EN ISO 6892-1. Dále tato norma specifikuje vyhodnocení a zápis výsledků do zkušebního protokolu. Výsledkem zkoušky jsou základní pevnostní a plastické vlastnosti materiálu jako je mez kluzu, pevnosti, tažnost a kontrakce.

2.6.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [19], [27], [28], [48], [77], [83], [84]

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je specifikována normou ČSN EN ISO 6507-1. Princip zkoušky spočívá ve vtlačování diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu zatěžující silou, která působí kolmo k ploše vzorku, po danou dobu. Vrcholový úhel diamantového jehlanu je mezi protilehlými stěnami přesně definován, nejčastěji se používá vrcholový úhel 136°. Po vtisku diamantu a následném odlehčení se změří střední délka obou úhlopříček vtisku. Podle zkoumaného materiálu vzorku se volí zatěžující síla z rozmezí od 10 do 1000 N a doba zatížení se pohybuje od 10 do 180 s. Zvolená zatěžovací síla je zapsána ve výsledném označení. Nejčastěji se používá zatěžovací síla o hodnotě 300 N a doba zatížení od 10 do 15 s. Tomuto zatížení odpovídá výsledné označení HV. Schéma zkoušky tvrdosti podle Vickerse je popsáno na obrázku níže.



Obr. 42 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [28]

Výsledná hodnota tvrdosti podle Vickerse je určena bezrozměrnou hodnotou. Tvrdost pro tuto zkoušku je stanovena jako poměr vtlačované síly F na plochu vtisku.

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad [-] \quad (2.6)$$

kde: F – vtlačovací síla [N]
 d – délka úhlopříčky vtisku [μm]

Pro délku úhlopříčky vtisku platí:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad [\mu\text{m}] \quad (2.7)$$

kde: d_1 – průměr vtisku v první úhlopříčce
 d_2 – průměr vtisku v druhé úhlopříčce

Pro rychlejší vyhodnocení se v praxi používají tabulky, kde podle použité zatěžující síly F a zjištěné délky úhlopříčky vtisku d , je uvedena výsledná tvrdost. Pro ulehčení častého měření se používá vylepšených Vickersových tvrdoměrů, tzv. diatestorů, které promítají zvětšený obraz vtisku na matrici, kde je ulehčeno čtení úhlopříček vtisku.

Měření tvrdosti podle Vickerse je minimálně závislé na zatížení a přitom velmi přesné. Metoda má velký rozsah použití, protože lze použít pro všechny tvrdosti a lze i měřit tvrdost na velmi tenkých vrstvách.

2.6.3 Metalografické zkoušky [48], [51], [61], [78]

Metalografické zkoušky se používají jako doplňující kontrola při zjišťování mechanických vlastností. Při těchto zkouškách se zkoumají struktury materiálů, tedy i svarových spojů. Podle použitého zvětšení při zkoumání vzorků se dělí metalografické zkoušky na kontroly makrostruktury nebo mikrostruktury.

Materiálové vzorky jsou náročné na přípravu. Příprava vzorku začíná výběrem vhodného reprezentativního místa vzorku a následném mechanickém dělení, které neovlivní zkoumanou oblast. Poté se vzorek postupně brousí pomocí metalografických papírů s rostoucí jemností papíru. Následně se vzorek prostřednictvím diamantových past mechanicky nebo elektronicky leští. Vyleštěný povrch je chemicky či elektrolyticky naleptán. Takto připravený vzorek je připraven k hodnocení. Hodnocení metalografických zkoušek jsou z pravidla podloženy fotografií zkoumané struktury.

Makrostrukturní zkouška – většinou probíhá vizuální kontrolou vzorku pouhým okem, případně za pomoci relativně malých zvětšení do 30x, tedy za pomoci lup nebo optického mikroskopu. Při kontrole svarových spojů se při této kontrole především vyhodnocuje tvar svaru, způsob kladení svarových vrstev, tvar a šířka tepelně ovlivněné oblasti, odmíšení svarového kovu a v neposlední řadě hranice natavení.

- Baumannův otisk – je zkouška, která slouží k určení rozložení síry ve slitinách železa. Síra se ze slitin železa vylučuje formou sulfidů, a to sulfidu železa FeS a manganu MnS. Podstata zkoušky je založena na reakci sulfidů s kyselinou sírovou. Při této reakci dochází k uvolnění sirovodíku. Při interakci citlivého fotografického bromostříbrného fotopapíru a sirovodíku dochází k vzniku stabilního sulfidu stříbrného, který má charakteristickou hnědou barvu. Hnědé skvrny sulfidu stříbrného dokazují přítomnost sirníku v železe. Výsledek Baumannova otisku je na obr. 43.



Obr. 43 Baumannův otisk [78]

- Makrolept – je makroskopická zkouška, která slouží k hodnocení makrostruktury výbrusu vzorku. Vybroušený vzorek je naleptán vhodným činidlem, díky kterému je vyvolána hodnocená makrostruktura. Jako leptadlo se běžně používá persíran amonný nebo vodní roztok kyseliny dusičné. Při hodnocení oceli se při zkoušce makroleptem sleduje její primární krystalizace, důvody narušení celistvosti, rozdělení přítomných prvků a vměstků, určení oduhličených a nauhličených vrstev. U svarových spojů se převážně touto metodou hodnotí jakost spojů.

Mikrostrukturní zkoušky – jsou prováděny na zkušebních vzorcích orientovaných k ose svaru stejně jako makroskopické zkoušky. Při mikroskopické kontrole se posuzuje základní struktura a fáze materiálu. Tyto zkoušky probíhají na vhodně připraveném vzorku při největším zvětšení až 2000x.

- Kvalitativní mikrostrukturní testy – jsou testy, při kterých se používají optické mikroskopy při zvětšení od 30 do 2000x. Podstatou testů je zhodnocení vzhledu mikrostruktury, určení výskytu a množství základních strukturních fází (ferit, martenzit,

austenit, cementit) nebo strukturních složek (bainit, perlit). Hodnocení je podloženo fotodokumentací.

- Určení plošného podílu strukturních složek – je prováděno bodovou metodou za pomoci světelného mikroskopu. Světelný mikroskop musí mít dostatečné zvětšení, při kterém dochází k rozeznání jednotlivých strukturních složek. Vyhodnocení se uskutečňuje na matici mikroskopu, na které je rozprostřena transparentní fólie s vyobrazenou mřížkou. Další možnost hodnocení je s využitím statických integrátorů.
- Určení množství nekovových vměstků v oceli – je důležitý údaj pro posouzení druhu, velikosti a rozmístění jednotlivých vměstků, tedy tzv. vměstkovitost. Tato vměstkovitost se určuje porovnáním množství vměstků v zorném poli mikroskopu s etalony příslušných norem.
- Určení velikosti zrna – slouží k hodnocení zrnitosti struktury, velikosti zhrubnutí austenitického zrna ovlivněné technologií výroby, čímž se chápe ohřev na tvářecí teplotu, tepelné zpracování atd. Při posuzování svarových spojů se hodnotí rozsah zhrubnutí zrna vlivem tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu. Tato metoda patří do skupin srovnávacích. Po naleptání vzorku speciálními leptadly se srovnávají zrna s etalony vhodných norem.

2.7 Svařitelnost uhlíkových ocelí [7], [18], [27]

Vlastnosti uhlíkových ocelí jsou závislé na obsahu uhlíku. Obsah uhlíku u ocelí se pohybuje v rozmezí od velmi nízkých procent až do 1,7 hm. %, ale tento obsah uhlíku je u technických ocelí ojedinělý. Uhlík v ocelích zvyšuje mez kluzu, pevnosti a tvrdost, ale naopak snižuje plastické vlastnosti oceli.

Při svařování uhlíkových ocelí vzniká problém, kdy obsah uhlíku v oceli je přibližně 0,25 hm. % a více. V těchto případech není zaručena svařitelnost oceli. Pro možnost svařování těchto ocelí je potřeba zajistit speciální podmínky pro svařování. Při rostoucím obsahu uhlíku nad 0,25 hm. % mohou ve struktuře vznikat nežádoucí struktury, především větší množství martenzitu. Nejvyšší tvrdost při svařování bývá v tepelně ovlivněné oblasti, protože tato oblast chladne nejrychleji.

Nízkouhlíkové oceli s obsahem uhlíku do 0,25 hm. % lze svařit bez zajištění specifických podmínek při svařování. Oceli s obsahem uhlíku nad 0,25 hm. % jsou podmíněně svařitelné a je nutné pro jejich svařování zajistit předehřev materiálu. Velikost teploty předehřevu je závislá na tloušťce stěny materiálu, obsahu uhlíku a legujících prvků a v neposlední řadě i na tvaru svarového spoje. Využitím předehřevu se snižuje rychlost ochlazování materiálu po ukončení svařování a tím se sníží riziko vzniku zakalené struktury, tedy struktury s větším obsahem martenzitu jak 50 %. Pro určení potřeby použití předehřevu, případně velikosti teploty předehřevu, slouží výpočet uhlíkového ekvivalentu.

2.7.1 Uhlíkový ekvivalent [7], [18], [27]

Specifikace výpočtu uhlíkového ekvivalentu a velikosti předehřevu se zabývá norma ČSN EN 1011. Svařitelnost nelegovaných, nízkolegovaných a středně legovaných ocelí se informativně určuje pomocí uhlíkového ekvivalentu C_e . Oceli jsou svařitelné, pokud uhlíkový ekvivalent $C_e \leq 0,50$ hm. % a počítá se dle rovnice:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot t \quad [\text{hm. \%}] \quad (2.8)$$

kde: t – tloušťka svařovaného plechu [mm]

C, Mn, Cr, Ni, Mo, Cu, P – hmotnostní procenta jednotlivých prvků [hm. %]

Tento vzorec platí pro materiály s obsahem prvků do: C = 0,22 hm. %, Mn = 1,6 hm. %, Cr = 1 hm. %, V = 0,14 hm. %, Ni = 3,0 hm. %, Cu = 0,30 hm. %.

Další možností ke zjištění svařitelnosti ocelí slouží vzorec navržený Mezinárodním svářečským institutem (IIW/IIS), který se používá pro oceli splňující podmínku $C > 0,18$ hm. %. Navržený vzorec C_e (IIW) zní takto:

$$C_e (IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad [\text{hm. \%}] \quad (2.9)$$

kde: V – hmotnostní procento odpovídajícího prvku [hm. %]

Ocel lze svařovat bez předehřevu, platí-li:

- $C_e \leq 0,45$ hm. % pro materiál tloušťky 4 mm
- $C_e \leq 0,40$ hm. % pro materiál tloušťky 6,5 mm
- $C_e \leq 0,35$ hm. % pro materiál tloušťky 25 mm
- $C_e \leq 0,30$ hm. % pro materiál tloušťky 50 mm

V dnešní době se nejčastěji používá uhlíkový ekvivalent CET:

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\text{hm. \%}] \quad (2.10)$$

Tento vzorec platí pro materiály s obsahem prvků v rozmezí: C = 0,05 – 0,25 hm. %, Mn = 0,5 – 1,9 hm. %, Cr = max. 1,5 hm. %, V = max. 0,18 hm. %, Ni = max. 2,5 hm. %, Cu = max. 0,7 hm. %, Si = max. 0,8 hm. %, Mo = max. 0,75 hm. %, Nb = max. 0,06 hm. % a B = max. 0,005 hm. %.

2.7.2 Velikost teploty předehřevu [7], [18], [27]

Po zhodnocení aspektu svařitelnosti, se určuje velikost teploty předehřevu. Pro získání teploty předehřevu existuje více způsobů výpočtů nebo určení z normalizovaných grafů, kde v závislosti tloušťky materiálu, tepelného příkonu, uhlíkového ekvivalentu a stupně obsahu vodíku, lze vyčíst teplota předehřevu. Jeden ze způsobů výpočtů teploty předehřevu je výpočet podle Séferiána, který zní:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.11)$$

kde: T_p – teplota předehřevu $[^\circ\text{C}]$

$$C_p = C_c + C_s \quad [-] \quad (2.12)$$

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn+Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \quad [-] \quad (2.13)$$

$$C_s = 0,005 \cdot t \cdot C_c \quad [-] \quad (2.14)$$

Určení teploty předehřevu výpočtem podle Séferiána je možné využít pro uhlíkové a nízkoaliované oceli s obsahem uhlíku $C > 0,10$ hm. %.

Další metodou výpočtu je metoda podle Ita a Bessya:

$$T_p = 1440 \cdot P_W - 392 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.15)$$

kde:

$$P_W = P_{CM} + \frac{HD}{60} + \frac{K}{40 \cdot 10^4} \quad [-] \quad (2.16)$$

kde: HD – objem difúzního vodíku [ml.100 g⁻¹]

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B \quad [-] \quad (2.17)$$

kde: B – hmotnostní procento odpovídajícího prvku [hm. %]

$$K = K_0 \cdot t \quad [\text{MPa}] \quad (2.18)$$

kde: K – intenzita tuhosti spoje
K₀ – koeficient pro typ spoje

Stanovení velikost teploty přehřevu z uhlíkového ekvivalentu CET se získá pomocí součtu skupiny vzorců:

- Teplota T_{pCET} v závislosti na uhlíkovém ekvivalentu

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.19)$$

- teplota T_{pd} v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{t}{35}\right) - 110 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.20)$$

- teplota T_{pHD} v závislosti na obsahu difúzního vodíku

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.21)$$

- teplota T_{pQ} v závislosti na tepelném příkonu

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.22)$$

kde: Q – vnesené teplo [kJ.mm⁻¹]

Celková velikost přehřevu T_p je výsledkem součtu jednotlivých teplot:

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.23)$$

3 EXPERIMENT

V experimentální části jsou popsány přístroje, které se využívají pro provedení experimentu, a další jednotlivá pracoviště. V této části je zahrnuta výpočtová část, kde se určí, zda je daný materiál možné svařovat bez využití přehřevu, případně určení velikosti přehřevu. Poté dojde ke svaření vzorků, které se pak jednotlivě vyhodnotí. Pro vyhodnocení vzorků byly použity tahové a metalografické zkoušky, zkouška tvrdosti podle Vickerse.

3.1 Volba materiálu [7], [17], [18], [27]

Pro experiment byl vybrán ocelový plech 1.1191, tloušťky 2 mm, jehož materiálové složení odpovídá normě ČSN EN 10083-2: 2007. Pro přesné určení uhlíkového ekvivalentu a teploty přehřevu bylo zjištěno přesné chemické složení pomocí certifikátu 3.1 společnosti Acroni d.o.o. Zjištěné chemické složení a mechanické vlastnosti ocelového plechu pro experiment je v tabulce níže. Chemické složení a mechanické vlastnosti zkoumaného plechu odpovídají mezím určených normou ČSN EN 10083-2: 2007, jedná se tedy skutečně o plech 1.1191. Certifikát 3.1 od společnosti Acroni d.o.o. je přiložen v příloze 2.

Tab. 4 Chemické složení oceli 1.1191 dle Atestu

Chem. prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Obsah [hm. %]	0,47	0,27	0,75	0,011	0,002	0,25	0,04	0,21

Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli 1.1191 dle Atestu

Mechanické vlastnosti	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Tvrdost [HV]
	331	522	26	145

Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu nemohou být použity vzorec (2.8), protože lze tento vzorec použít pouze pro oceli s obsahem uhlíku do $C = 0,22$ hm. %, a vzorec (2.10), který se používá pro oceli s obsahem uhlíku v intervalu $C = 0,05 - 0,25$ hm. %. Pro ocel 1.1191, která má obsah uhlíku $C = 0,47$ hm. %, lze tedy využít pouze vzorec navržený Mezinárodním svářečským institutem (IIW/IIS). Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu je použit vzorec (2.9):

$$C_e (IIW) = 0,47 + \frac{0,75}{6} + \frac{0,25+0,04}{5} + \frac{0,21}{15} = \underline{0,667 \text{ hm. \%}}$$

Pro svaření oceli bez přehřevu musí být splněna podmínka, že pro daný materiál do tloušťky 4 mm musí být uhlíkový ekvivalent $C_e \leq 0,45$ hm. %. Tato podmínka u oceli 1.1191 nebyla splněna, protože uhlíkový ekvivalent u této oceli je větší než požadovaná mez, tedy $0,667 > 0,45$. Pro svaření oceli 1.1191 musí být tedy použito přehřevu.

K výpočtu teploty přehřevu byl vybrán vzorec podle Séferiána, který je určen pro uhlíkové a nízkoalokované oceli s obsahem uhlíku $C > 0,10$ hm. %. Podmínka byla ocelí 1.1191 splněna a pro výpočet velikosti přehřevu je použit vzorec (2.11) a potřebné mezivýpočty podle (2.12), (2.13) a (2.14):

$$C_c = \frac{360 \cdot 0,47 + 40 \cdot (0,75 + 0,25) + 20 \cdot 0,21 + 28 \cdot 0,04}{360} = \underline{0,5958}$$

$$C_s = 0,005 \cdot 2 \cdot 0,5958 = \underline{5,958 \cdot 10^{-3}}$$

$$C_p = 0,5958 + 5,958 \cdot 10^{-3} = \underline{0,6018}$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{0,6018 - 0,25} = \underline{207,61 \text{ } ^\circ\text{C} \doteq 208 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Velikost teploty přehřevu byla vypočtena z přesného chemického složení oceli metodou podle Séferiána na teplotu 208 °C. Hodnota vypočteného přehřevu byla zaokrouhlena na vyšší celé číslo, protože při přehřívání materiálů pro svařování se materiál přehřívá na vyšší teplotu blízké vypočtené hodnotě, protože se počítá s přirozeným chladnutím materiálu.

Při svařovacím procesu dochází ke krátkodobému intenzivnímu ohřevu materiálu na vyšší teploty díky působením koncentrovaného zdroje tepla. Toto vnesené teplo okamžitě natavuje materiál v malém objemu a pomocí tepelné vodivosti se teplo šíří materiálem dále a ohřívá místo základního materiálu a jeho okolí.

Vnesené teplo lze měnit změnou nastavených svařovacích parametrů. Teplo vnesené do spoje materiálu má zásadní vliv na vlastnosti svaru, velikost svaru a tepelně ovlivněné oblasti a také na následnou dobu ochlazování. Vnesené teplo je definované jako množství tepla dodaného do svarového spoje na jednotku délky a lze jej vypočítat dle vztahu:

$$Q_s = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} = \eta \cdot \frac{P}{10^3 \cdot v_s} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (3.1)$$

kde: η – tepelná účinnost přenosu tepla [-]
 U – svařovací napětí [V]
 I – svařovací proud [A]
 v_s – rychlost svařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]
 P – svařovací výkon [W]

Po optimalizaci svařovacích parametrů je vypočítáno vnesené teplo pro všechny typy svařovacích metod. Zvolené parametry jsou popsány v tabulce 6. Koeficient tepelné účinnosti přenosu tepla byl zvolen pomocí odborné literatury.

Tab. 6 Parametry pro výpočet vneseného tepla [7]

Zdroj tepla	Tepelná účinnost přenosu tepla [-]	Svařovací napětí [V]	Svařovací proud [A]	Svařovací výkon [W]	Rychlost svařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	Svařovací impulz cyklu [%]
Laser	0,76	-	-	1000	10	-
TIG – DC	0,60	13	80	-	10	-
TIG – AC	0,60	13	80	-	10	50

Vnesené teplo je vypočítáno dle vzorce (3.1). Pro výpočet tepla vneseného laserem je použit upravený vzorec se svařovacím výkonem:

$$Q_s = 0,76 \cdot \frac{1000}{10^3 \cdot 10} = \underline{0,076 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}} = \underline{76 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}}$$

Vnesené teplo elektrickým zdrojem TIG je vypočteno pomocí klasického vztahu (3.1), kdy je známo svařovací napětí a proud:

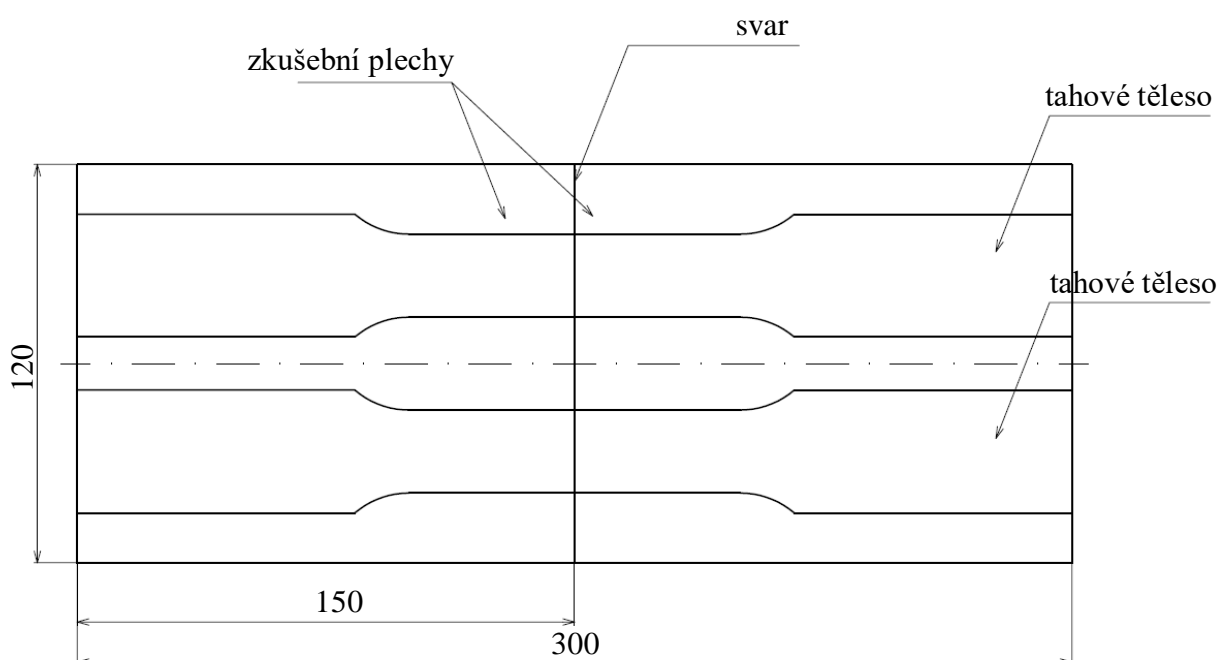
$$Q_s = 0,60 \cdot \frac{13 \cdot 80}{10^3 \cdot 10} = \underline{0,0624 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}} = \underline{62,4 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}}$$

Při výpočtu vneseného tepla elektrickým zdrojem TIG, který pracuje v režimu střídavého proudu, se musí vzorec (3.1) vynásobit koeficientem, který odpovídá svařovacímu impulzu cyklu. V tomto případě odpovídá při svařovacím impulzu cyklu 50 % koeficient 0,5:

$$Q_s = 0,60 \cdot \frac{13 \cdot 80}{10^3 \cdot 10} \cdot 0,5 = \underline{\underline{0,0312 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} = 31,2 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}}}$$

Z vypočtených hodnot vneseného tepla jednotlivými metodami lze vyčíst, že nejvíce tepla vnese do materiálu paprsek laseru, protože tento zdroj tepla je z hlediska typu svařování nejdůležitější, jelikož vytváří svar mezi základními materiály. Teplu vnesené elektrickým zdrojem TIG je nižší, protože zastává pouze roli zdroje tepla pro předehřátí materiálu a nemusí základní materiál roztavit v celé tloušťce. Při použití elektrického zdroje TIG v režimu střídavého proudu je hodnota vneseného tepla poloviční, protože elektrický oblouk je vytvořen pouze v 50 % procentech svařovaného času.

3.2 Příprava a svařování vzorků [6], [20], [49], [67], [85], [86]



Obr. 44 Schéma rozmístění svarů a tahových těles na zkušební vzorku

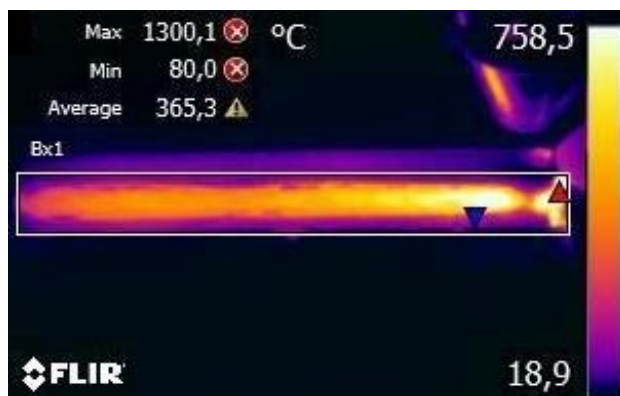
Materiálové vzorky z oceli 1.1191 jsou vyřezány z tabule plechu laserem na rozměr 150 x 120 x 2. Tyto vyřezané, řádně očištěné a odmaštěné, vzorky jsou poté upnuty na svařovací stůl pomocí upínek, aby bylo zamezeno náhodnému pohybu a trajektorie svařovací hlavy přesně vymezena. Vzorky jsou svařeny tupým svarem, kdy mezera mezi vzorky je 0,0 mm. Této mezery je opět dosaženo pomocí upínek na svařovacím stole. Svařování vzorků bude probíhat za různých svařovacích parametrů. Počet svařovaných vzorků je určen v závislosti na různých svařovacích podmínkách. Schéma svaření plechů a následné rozmístění tahových vzorků je vyobrazeno na obr. 44.

Svařovací parametry jsou zvoleny tak, aby došlo ke správnému provaření vzorku plechu a aby bylo dosaženo požadované teploty předehřevu materiálu. Nastavení svařovacích parametrů pevnolátkového laseru YLS 2000 bylo zvoleno na základě zkušenosti se svařováním oceli pomocí daného laseru na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Parametry nastavení svařovacího zdroje Fronius MagicWave 1700 byly určeny experimentálně v rámci příprav experimentu, kdy za pomoci sledování svařovaného procesu termokamerou a následného metalografického šetření a určení mikrotvrdosti u vzorků s různě nastavenými parametry svařovacího zdroje TIG, bylo získáno optimální nastavení tohoto zdroje.

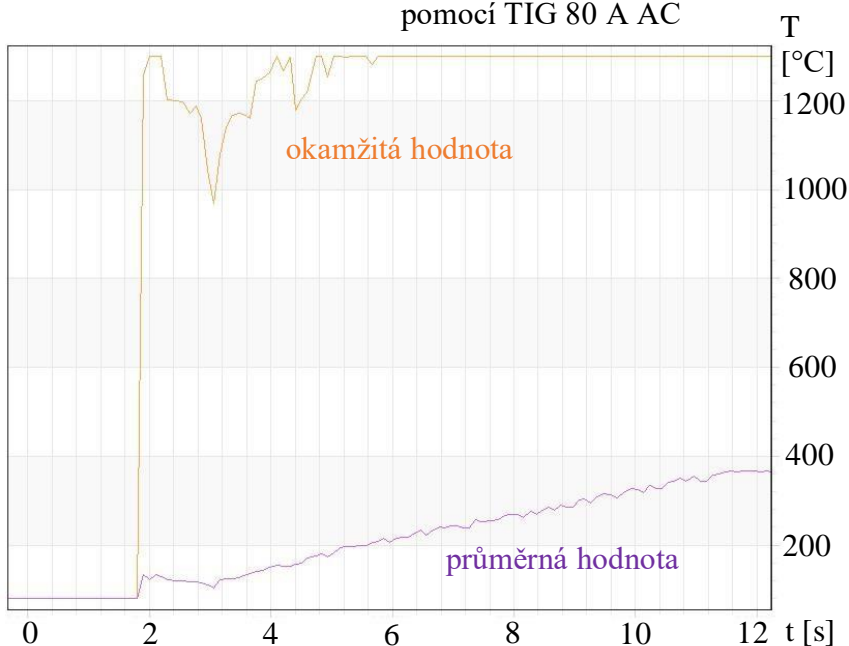
Pro sledování procesu byla využita termokamera FLIR A310, která se používá na Ústavu přístrojové techniky. Jedná se o profesionální stacionární termokameru, která pořizuje záznam v rozlišení 320x240 pixelů s vysokou citlivostí a přesností menší než 0,05 °C. Rozsah zaznamenávaných teplot v základním provedení je od -20 °C do 350 °C. Pro snímání povrchu s větší teplotou je zapotřebí osadit termokameru speciálním filtrem, který snímá povrchy až do teplot 1200 °C s určitou chybou přesnosti. Kamera umožňuje pořídít záznam, streamovat video v reálném čase s obrazovou frekvencí až 8 Hz nebo provádět analýzu.

Na obrázku 45 lze vidět snímek zahřátého materiálu pomocí elektrického zdroje TIG s parametrem 80 A AC. Tento snímek je orientační pro znázornění nejvíce ohřátých míst.

Vývoj teploty materiálu v reálném čase je znázorněn v grafu na obrázku 46. Teplota nad 1200 °C již není přesně zaznamenána kvůli omezení filtru termokamery.



Obr. 45 Snímek zahřátého materiálu vzorku pomocí TIG 80 A AC



Obr. 46 Graf průměrné a okamžité hodnoty teploty materiálu



a) laseru 1000 W

b) TIG 100 A DC

Obr. 47 Snímek zahřátého materiálu vzorku pomocí různých parametrů

Na snímku 47 je porovnání ohřátého materiálu vzorku při svaření laserem o výkonu 1000 W a ohřátí materiálu pomocí stejnosměrného elektrického zdroje TIG s parametrem 100 A. V porovnání i se snímek 45, lze vyčíst, že oblast ohřátá zdrojem TIG s parametrem 80 A AC je tepelně ovlivněná oblast širší než u oblasti ohřáté stejnosměrným zdrojem TIG 100 A.

Provedení experimentu bylo uskutečněno na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Pro svaření vzorků byl využit pevnolátkový Yb-YAG laser YLS 2000, který slouží pro svařování a řezání na Akademii věd. Laser je vyobrazen na obr. 48. Pro přenos laserového svazku je u tohoto pevnolátkového laseru využíváno optické vlákno dopované ytterbiem. Další technické parametry pevnolátkového laseru YLS 2000 jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 7 Technické parametry pevnolátkového laseru YLS 2000 [86]

Výkon [W]	2 000
Účinnost	> 30%
Režim	kontinuální/ pulzní
Vlnová délka [nm]	1 070 – 1 080
Rozměry (d x v x š) [mm]	1 106 x 856 x 806

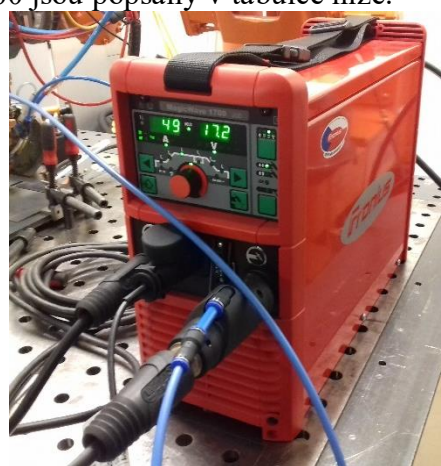


Obr. 48 Laser systém YLS 2000

Pro tvorbu elektrického oblouku, který předehřívá vzorek z plechu, je využit svařovací zdroj TIG od firmy Fronius modelový typ MagicWave 1700, který je na obrázku 49. Jedná se o digitálně řízený svařovací zdroj TIG s možností volby svařování stejnosměrným nebo střídavým proudem. Tento zdroj je především rozšířen pro svařování nelegovaných, nízkolegovaných a vysokolegovaných ocelí, případně hliníku nebo barevných kovů. Fronius MagicWave 1700 se díky jeho nízké hmotnosti snadno přemísťuje a rozsahu nastavení svařovaného proudu od 3 do 170 A, se využívá v různých strojírenských odvětvích. Další parametry svařovacího zdroje TIG Fronius MagicWave 1700 jsou popsány v tabulce níže.

Tab. 8 Technické parametry svařovacího zdroje Fronius MagicWave 1700 [49]

Síťové napětí [V]	230 V
Účinník	0,99
Svařovacího proudu [A]	3 – 170
Síťové jištění [A]	16
Napětí naprázdno [V]	88
Zapalovací napětí U_p [kV]	10
Krytí	IP 23
Chlazení	AF
Hmotnost [kg]	15
Rozměry (d x v x š) [mm]	485 x 180 x 344



Obr. 49 Fronius MagicWave 1700

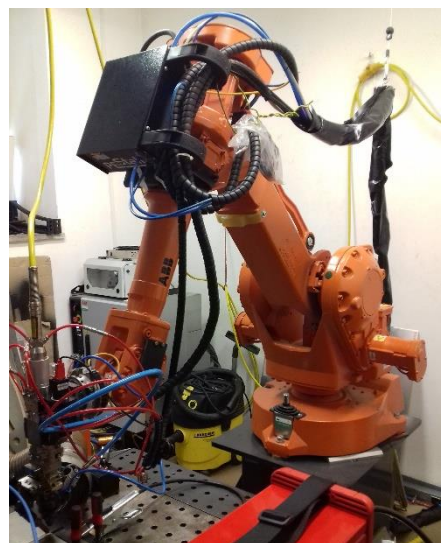
Pevnolátkový YLS 2000 laser může být osazen řezací i svařovací hlavou, která je připevněna na průmyslového robota od firmy ABB společně s hořákem TIGu pro předehřev. Jedná se o velmi rozšířený model průmyslového robota IRB 2400/10, který je pro svou spolehlivost, přesnost a rychlost často využíván pro strojírenské aplikace v průmyslu. Technické parametry tohoto robota jsou popsány v tabulce níže. Průmyslový robot IRB 2400/10 je znázorněn na obr. 50.

Tab. 9 Technické parametry průmyslového robotu IRB 2400/10 [85]

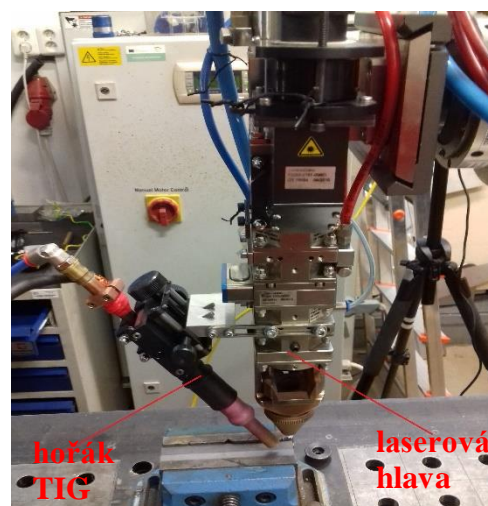
Dosah [m]	1,55
Nosnost [kg]	10
Hmotnost [kg]	380
Počet stupňů volnosti	6 + 2 přídavné zařízení
Přesnost polohy [mm]	0,03
Přesnost dráhy [mm]	0,11 – 0,15
Napájecí napětí	200 – 600 V, 50/60 Hz
Rozměry (d x v x š) [mm]	600 x 1564 x 723

Počet svařovaných vzorků byl stanoven na 4 kusy. Všechny svařované vzorky mají stejné svařovací parametry laseru a rychlost pohybu průmyslového robotu je stejná a po celou dobu konstantní, ale nastavení svařovacího zdroje Fronius MagicWave 1700 je pro každý vzorek rozdílné. Tyto nastavené svařovací parametry jsou popsány v tabulce 10 a jsou vždy pro daný vzorek konstantní.

Na průmyslovém robotu IRB 2400/10 je připevněna laserová hlava s hořákem TIG, což je znázorněno na obrázku 51. Zároveň se svařovací hlavou je do místa svařování přiveden i ochranný plyn argon. Hořák TIG je připevněn k laserové hlavě speciálním držákem, který je umístěn ve směru pohybu svařování tak, aby ohnisko laseru a hořáku TIG bylo ve vzájemné blízkosti a ohřátý materiál byl ihned kvalitně svařen. Pro nastavení výšky hořáku TIG je držák osazen regulačními šrouby, díky čemuž je možno ovlivnit zapálení oblouku.



Obr. 50 Robot IRB 2400/10



Obr. 51 Laserová hlava s hořákem TIG

Tab. 10 Svařovací parametry

Vzorek č.	Výkon laseru [W]	Rychlost svařování [mm·s ⁻¹]	TIG – AC/DC	TIG – svařovací proud [A]	TIG – frekvence [Hz]	TIG – Svařovací impuls cyklu [%]	Ochranný plyn [l·min ⁻¹]
1	1 000	10	-	-	-	-	Argon 18
2	1 000	10	AC	80	100	50	Argon 18
3	1 000	10	AC	80	500	50	Argon 18
4	1 000	10	DC	80	-	-	Argon 18

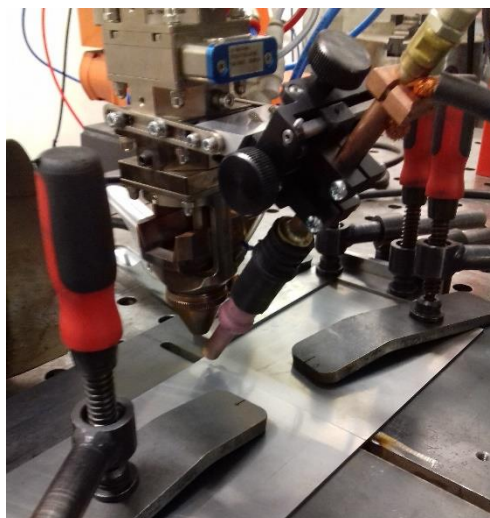
Předpokládá se, že vzorek č. 1, který je svařen pouze laserem bez předehřevu, by neměl být řádně svařen a tento svár by neměl vydržet zatížení. Na rozdíl vzorky s použitým předehřevem pomocí svařovacího zdroje TIG by měl být svařen v plné délce a kvalita svaru by měla odpovídat požadovaným mechanickým vlastnostem svaru.

Před spuštěním svařovacího procesu je připravený a upnutý vzorek zkontrolován a následně je upravena startovací pozice svařování, aby odpovídala místu svaření. Upnutí vzorku lze vidět na obrázku 52. Poté je zkontrolována trajektorie svařování pomocí projetí svařovacího robotu bez spuštění svařovací hlavy a hořáku TIG. Těmito kroky je zcela vyloučeno případné vychýlení z trajektorie, které by mohlo vzniknout při upínání a posouvání vzorku.

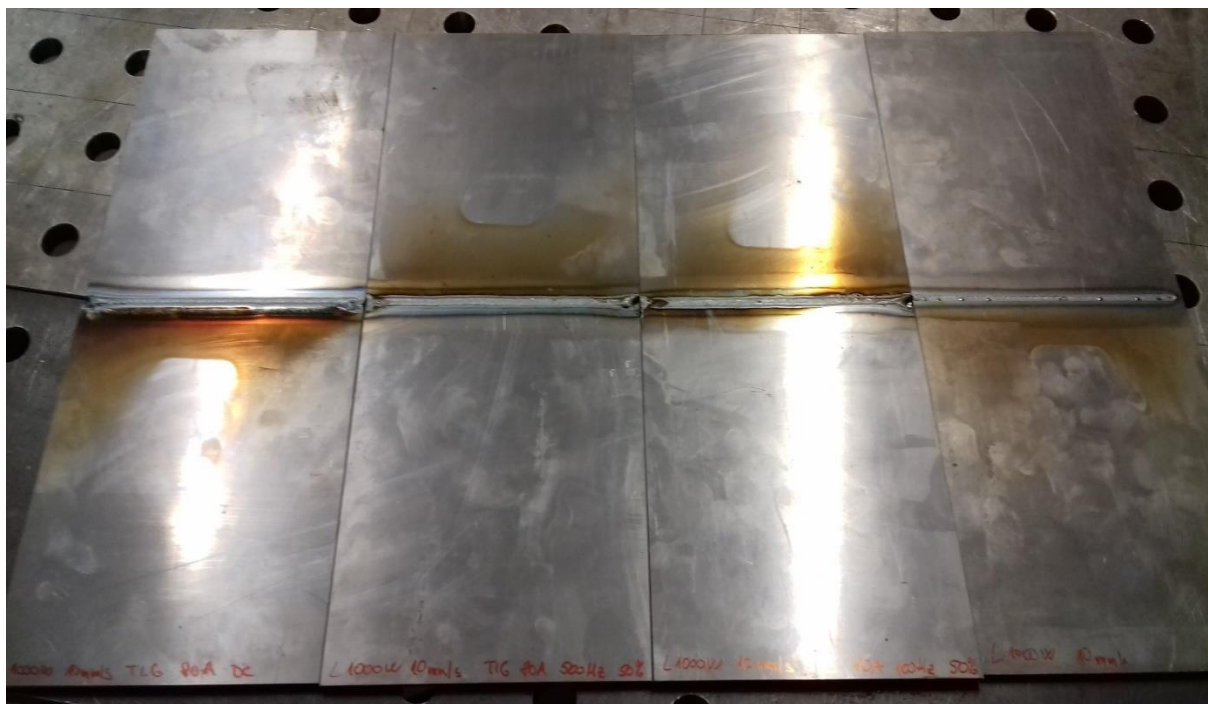
Po upnutí a následné kontrole jsou vzorky připraveny pro svaření za daných svařovacích parametrů, které vychází ze zkušeností se svařováním na Ústavu přístrojové techniky Akademie Věd České republiky a částečně z dříve proběhlých experimentů při přípravě. Spuštění laserového svařovacího procesu

a pohybu průmyslového robotu je řízeno pomocí připraveného programu, ale spuštění svařovacího zdroje Fronius MagicWave 1700 pro vytvoření elektrického oblouku pro předehřev je spuštěno ručně pomocí dálkového ovládání tohoto zdroje.

Svařené vzorky zachycené na obrázku 53 jsou dále podrobeny mechanickým zkouškám, kdy z takto svařených vzorků jsou pomocí laseru vyřezány zkušební tahová tělesa a dále jsou tyto vzorky podrobeny dalším zkouškám metalografie nebo mikrotvrdosti.



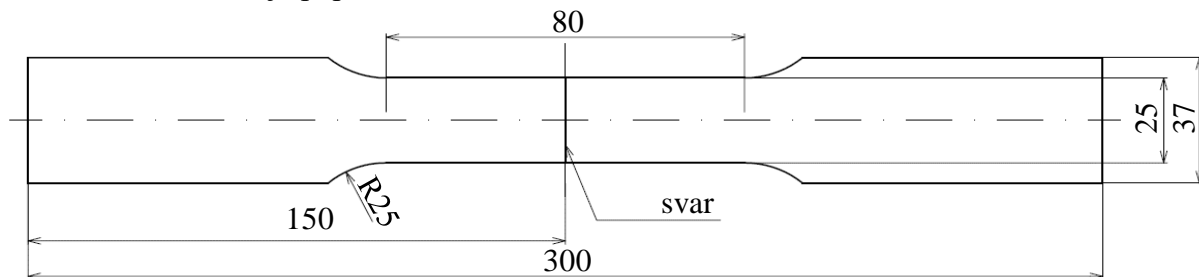
Obr. 52 Upevnění vzorků



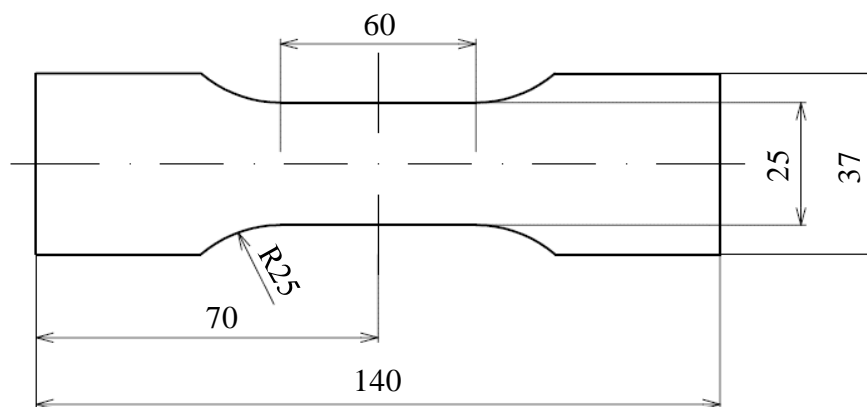
Obr. 53 Svařené vzorky z materiálu 1.1191

3.3 Zkouška tahem [20], [27], [48], [62]

Pro zkoušku tahem jsou vyřezány vždy dvě zkušební tělesa z každého svařeného vzorku pomocí laseru. Geometrie tahových těles je navržena v závislosti na tloušťce materiálu a na použitém zkušebním stroji tak, aby odpovídala normě ČSN EN ISO 4136. Rozměry zkušebních těles jsou popsány na obrázku 54. Pro ověření mechanických vlastností základního materiálu jsou ze zbylého materiálu laserem vyřezána dvě menší tahová tělesa, tak aby byly stále reprezentativní a bylo možné tyto vzorky vyhodnotit na daném zkušebním stroji. Rozměr těchto menších těles je popsána na obrázku 55.



Obr. 54 Rozměry svařeného zkušebního tahového tělesa



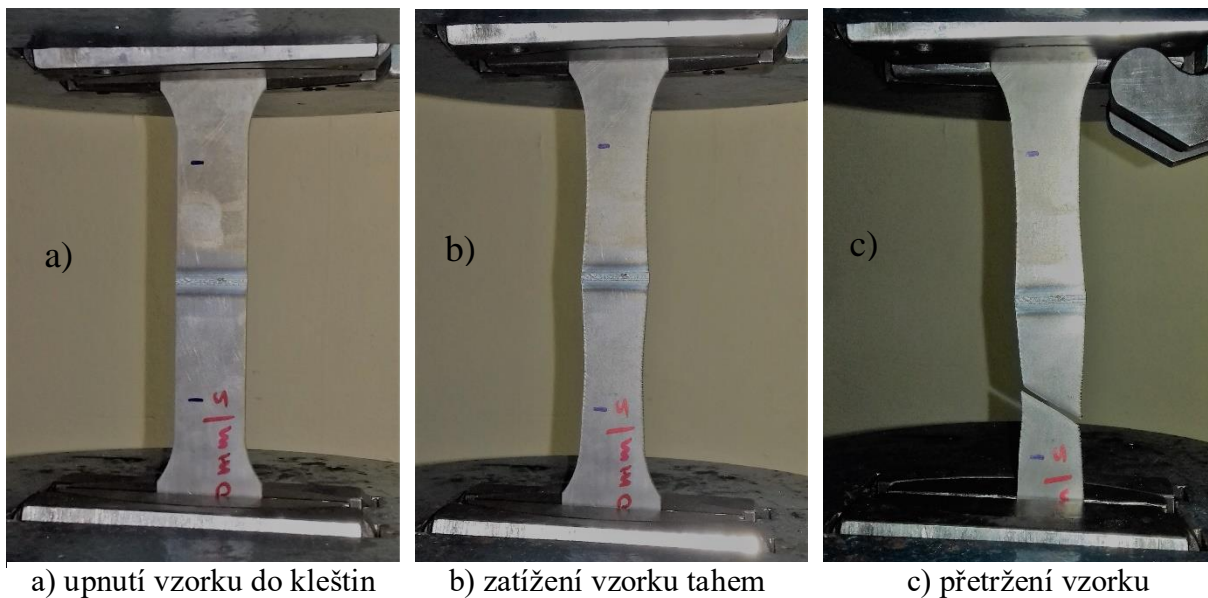
Obr. 55 Rozměry zkušebního tahového tělesa ze základního materiálu

Tahové zkoušky jsou provedeny na zkušebním stroji ZD40/400kN/. Jedná se o hydraulický stroj, na kterém je možno provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů s omezením do 400 kN. Rychlost zatěžování lze řídit a dále lze zkoušky programově zpracovávat. Pro zaznamenávání průběhu síly je tento stroj opatřen snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60, která je speciálně konstruována pro ovládání servo-hydraulických zkušebních strojů. Rychlost zkoušky je zvolena dle normy v rozmezí mezi $2 - 20 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ na $10 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Výsledky zkoušky jsou vyhodnoceny pomocí programu M - TEST v počítači, který zároveň graficky zpracovává průběh zkoušky. Podrobnější informace a technické parametry zkušebního stroje jsou v příloze č. 1. Vzorky připravené na tahovou zkoušku jsou zachyceny na obr. 56.



Obr. 56 Připravené vzorky na tahovou zkoušku

Průběh zkoušky je schematicky popsán na obrázku 57. Prvním krokem tahové zkoušky je upnutí vzorku do zkušebního stroje pomocí kleštin, které vzorek pevně uchytí díky zvětšující zatěžující síle. Poté rovnoměrně zvětšující se zatěžující síla tahově namáhá zkušební těleso až do momentu jeho přetržení. Průběh zatížení a deformace zkušební tělesa je zaznamenáváno pomocí programu do počítače, který průběh graficky vykresluje a vyhodnotí jednotlivé mechanické vlastnosti tělesa.



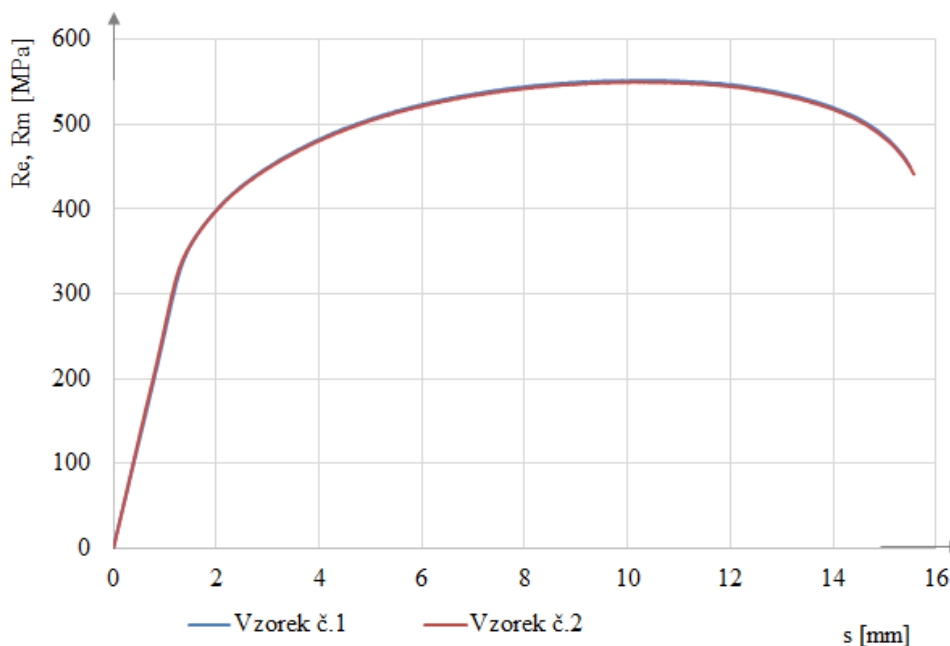
a) upnutí vzorku do kleštin

b) zatížení vzorku tahem

c) přetržení vzorku

Obr. 57 Průběh tahové zkoušky

Na obrázcích níže jsou vyhodnoceny tahové zkoušky jednotlivých vzorků. Obrázky jsou doplněny tabulkami naměřených hodnot, které popisují mechanické vlastnosti vzorků. Na obrázku 58 je vynesena průběh tahové zkoušky vzorků bez svaru, které ověřují základní mechanické vlastnosti zkoumaného materiálu 1.1191. Z naměřených hodnot v tabulce 11 lze vyčíst, že neměřená mez kluzu R_e se pohybuje v hodnotách kolem 353 – 356 MPa a mez pevnosti R_m v intervalu 552 – 554 MPa a zároveň tažnost základního materiálu je 25 – 26 %.



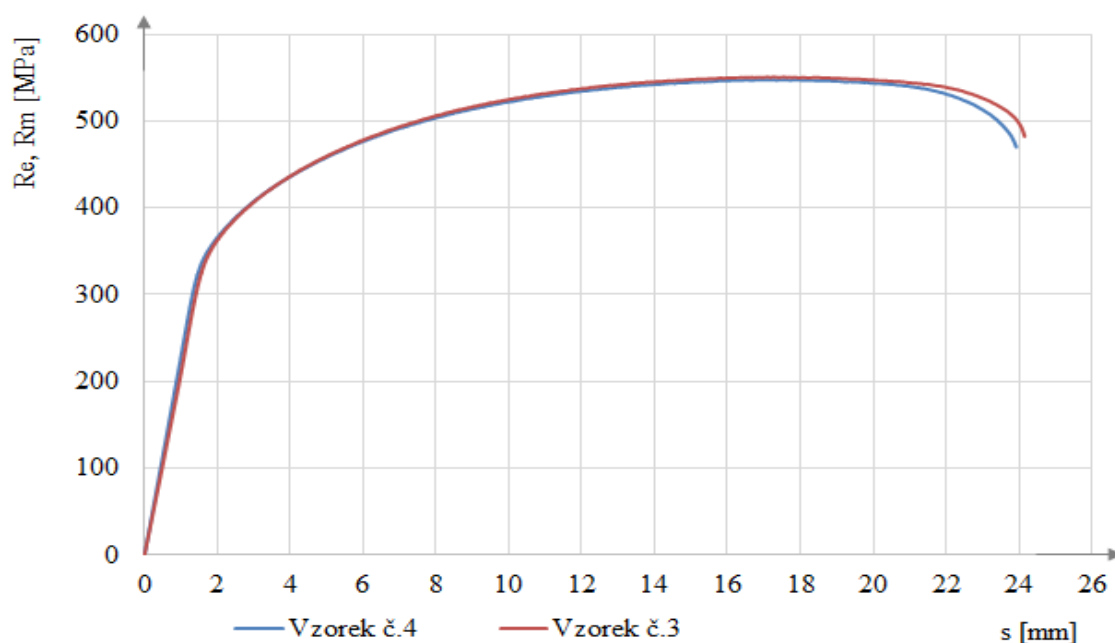
Obr. 58 Tahový diagram vzorků bez svaru

Tab. 11 Naměřené hodnoty vzorků bez svaru

Vzorek č.	S_0 [mm ²]	F_m [N]	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Lom
1	49,40	27370,40	356,80	554,06	25	Základní materiál
2	49,40	27276	353,56	552,15	26	Základní materiál

Na snímku níže je vykreslen průběh tahové zkoušky u vzorků svařené pouze laserem 1000 W bez předehřevu. Vzorek byl přetržen v základním materiálu a svar tedy vydržel, což může být zapříčiněno příliš pomalou rychlostí zatížení, kdy v takovýchto případech svar vydrží. Při rychlejším průběhu zkoušky, popřípadě při zkoušce rázem, by svar vytvořený pouze laserem bez předehřevu vydržet neměl.

Z naměřených hodnot získaných tahovou zkouškou je vidět, že mez kluzu R_e a mez pevnosti R_m odpovídá hodnotám základního materiálu, a to 346 – 348 MPa, respektive 547 – 550 MPa. Vlivem vnesení tepla do materiálu a zjemněním struktury mírně klesla tažnost na 21,25 %. Přehled naměřených hodnot tahovou zkouškou je v tabulce 12.

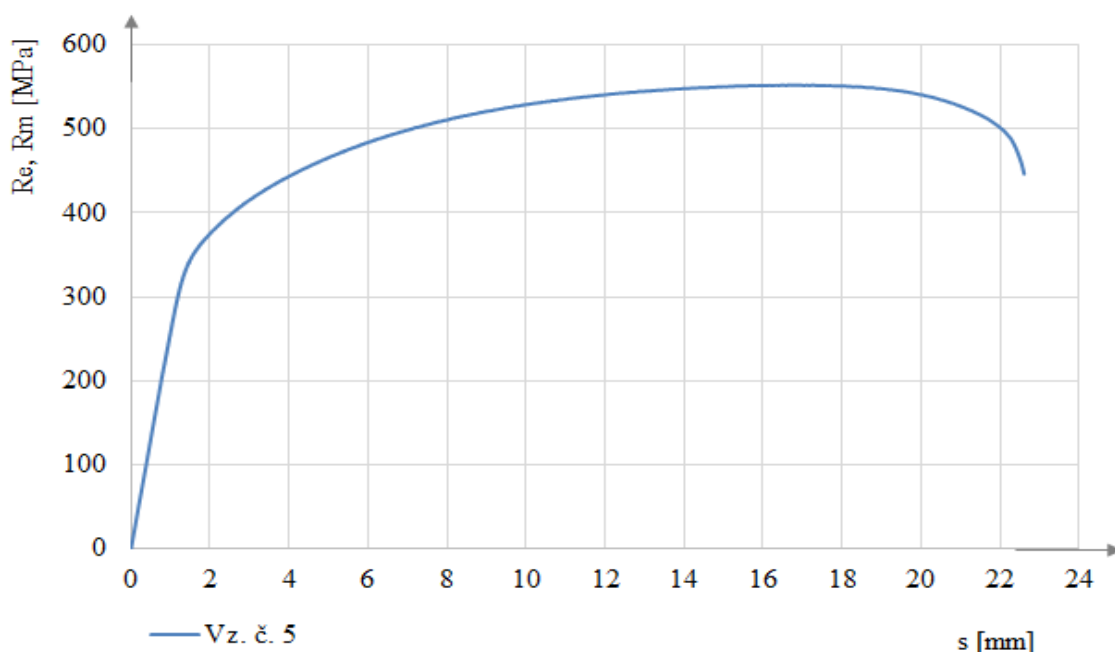


Obr. 59 Tahový diagram vzorků svařených laserem 1000 W

Tab. 12 Naměřené hodnoty vzorků svařených laserem 1000 W

Vzorek č.	S_0 [mm ²]	F_m [N]	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Lom
3	49,60	27323,20	348,73	550,87	21,25	Základní materiál
4	49,60	27172,80	346,45	547,84	21,25	Základní materiál

Vzorek č. 5 a č. 6 byl svařen laserem s předehřevem TIG 80 A AC 100 Hz. Na obrázku níže je popsán průběh tahovou zkouškou vzorku č. 5, kde lom nastal v základním materiálu. Hodnoty změřené tahovou zkouškou odpovídají vlastnostem základního materiálu převážně mez kluzu R_e , jehož hodnota je 348 MPa a mez kluzu R_m s hodnotou 552 MPa. Tažnost u tohoto vzorku klesla oproti materiálu bez svaru a svařeného jen pomocí laseru na hodnotu 20,63 %. Jedná se o nejnižší tažnost, která je zapříčiněna větší šířkou tepelně ovlivněné oblasti a zjemnění struktur.



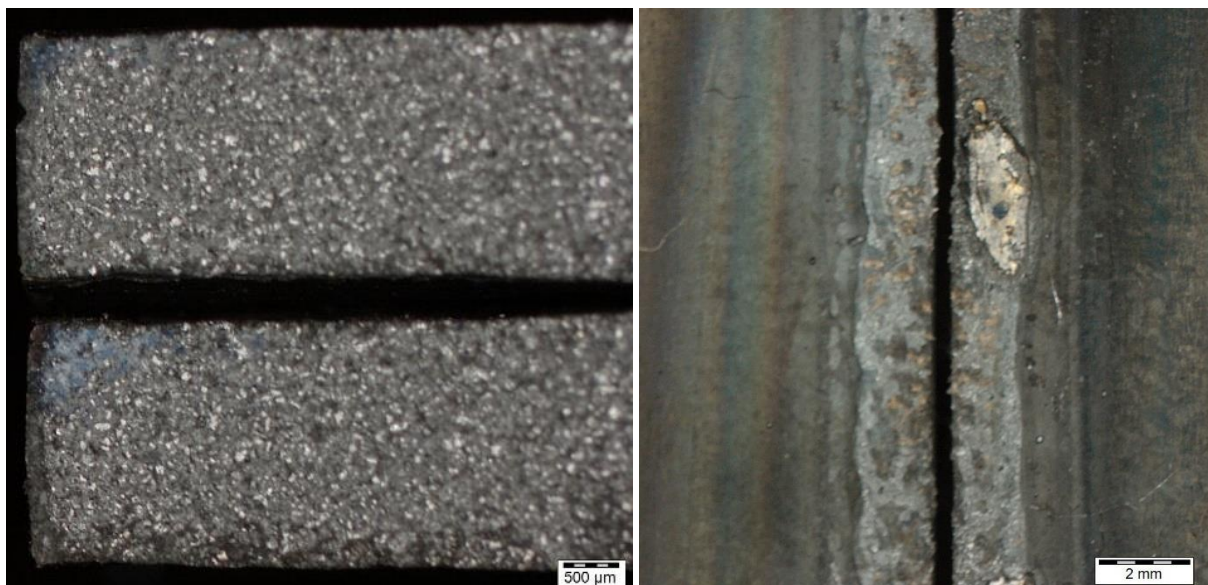
Obr. 60 Tahový diagram vzorků svařených laserem 1000 W + TIG 80 A DC

Tab. 13 Naměřené hodnoty vzorků svařených laserem 1000 W + TIG 80 A DC

Vzorek č.	S_0 [mm ²]	F_m [N]	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Lom
5	49,60	27398,40	348,54	552,39	20,63	Základní materiál

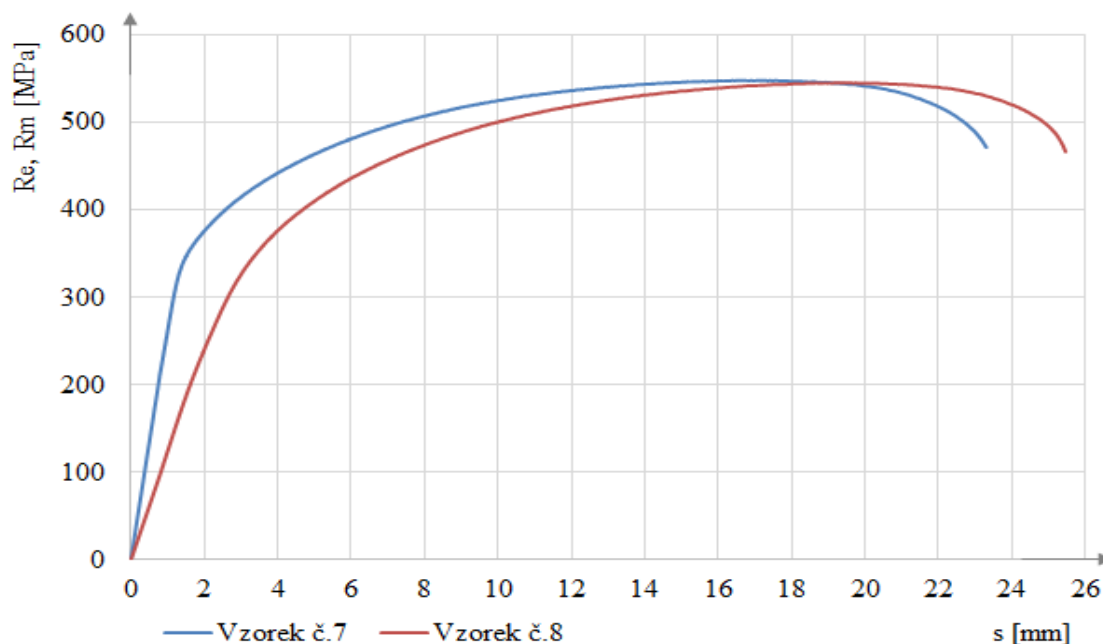
Vzorek č. 6 nevydržel zatížení zkušebního stroje a došlo ke vzniku lomu uprostřed svaru. Lom nastal při minimálním zatížení vzorku a nedošlo tedy k žádné plastické deformaci vzorku a naměřené hodnoty tahovou zkouškou jsou neprůkazné.

Po makroskopickém prozkoumání lomové struktury, lze pozorovat vznik svarové vady, která zapříčinila vznik lomu ve svaru. Vrub je vidět na obrázku 61, kde je tato svarová vada zachycena. Vlevo nahoře jde vidět zašedlou část struktury a vytvoření oxidu. Zašedlá část, je místo, kde vznikl počátek lomu. Tato trhlinka za tepla vznikla při přípravě tahových vzorků, které byly vyřezány laserem, a tepelné ovlivnění laseru negativně ovlivnilo materiály vzorku.



Obr. 61 Svarová vada a lom vzorku č. 6

Vyhodnocení vzorků č. 7 a č. 8, které byly svařeny pomocí laseru s předehřevem TIG 80 A AC 100 Hz, je popsáno na obrázku níže. U těchto vzorků nastalo přerušení vzorku v základním materiálu, takže hodnoty naměřené tahovou zkouškou odpovídají převážně vlastnostem základního materiálu. Mez kluzu R_e byla naměřena v intervalu 330 – 351 MPa, a mez pevnosti R_m v mezích 545 – 548 MPa. Tažnost materiálu byla změřena na 22,50 %, která je ovlivněna vneseným teplem do materiálu, kdy došlo ke zjemnění struktur materiálu, ale není to výrazný rozdíl oproti vzorku bez svaření. Přehled naměřených hodnot z tahové zkoušky jsou zaznamenány v tabulce 14.

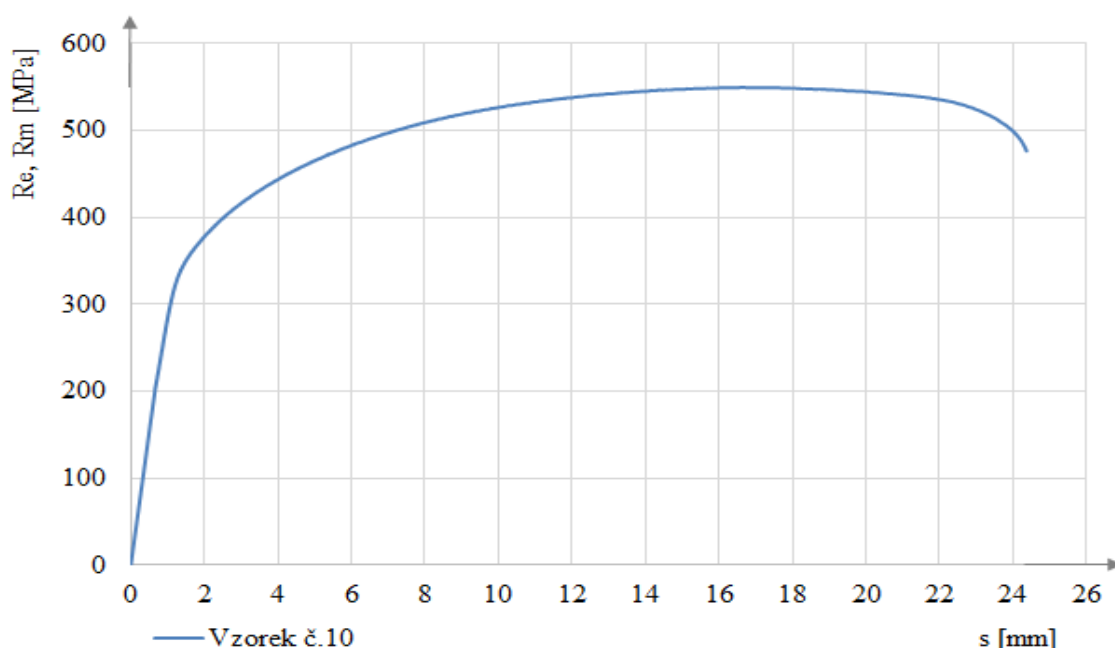


Obr. 62 Tahový diagram vzorků svařených laserem 1000 W + TIG 80 A AC 100 Hz

Tab. 14 Naměřené hodnoty vzorků svařených laserem 1000 W + TIG 80 A AC 100 Hz

Vzorek č.	S_0 [mm ²]	F_m [N]	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Lom
7	49,60	27210,40	351,19	548,60	22,50	Základní materiál
8	49,60	27069,20	330,90	545,75	22,50	Základní materiál

Poslední vzorky č. 9 a č. 10 byly svařeny laserem s předehřevem vytvořeným elektrickým zdrojem TIG 80 A AC 500 Hz. Na grafu níže je vyhodnocen průběh tahové zkoušky pro vzorek č. 10, kde nastalo přerušení vzorku v základním materiálu. Z tohoto důvodu naměřené výsledné hodnoty ze zkoušky převážně odpovídají mechanickým vlastnostem základního materiálu, a to mez kluzu R_e byla změřena 345,12 MPa a mez pevnosti 549,92 MPa. Tažnost vzorku byla ovlivněna tepelným ovlivněním materiálu a následným zjemněním struktury. Tažnost byla změřena na 22,50 %. Zbýlé naměřené hodnoty jsou zapsány v tabulce 14.



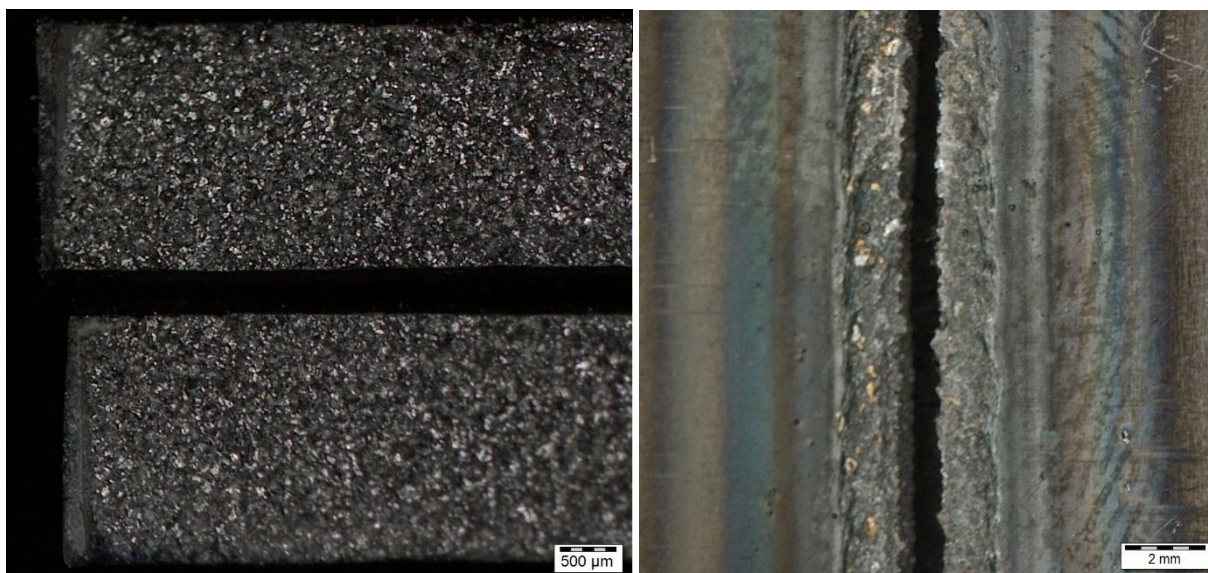
Obr. 63 Tahový diagram vzorků svařených laserem 1000 W + TIG 80 A AC 500 Hz

Tab. 15 Naměřené hodnoty vzorků svařených laserem 1000 W + TIG 80 A AC 500 Hz

Vzorek č.	S_0 [mm ²]	F_m [N]	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Lom
10	49,60	27276,00	345,12	549,92	22,50	Základní materiál

Svar vzorek č. 9 nevydržel prvotní zatížení zkušebního stroje a lom nastal uprostřed svaru. Lom nastal při zatížení vzorku na začátku zkoušky, kdy vzorek byl upnut do zkušebního stroje, a zatížení vzorku bylo malé. Z tohoto důvodu nedošlo k žádné plastické deformaci vzorku a naměřené hodnoty tahovou zkouškou jsou neprůkazné.

Struktura lomu byla po roztržení makroskopicky zkoumaná a lze pozorovat vzniklou svarovou vadu, kde započalo šíření lomu ve svaru. Tato svarová vada je zachycena na obrázku 64, kde v levé části vzorku, lze vidět vrub a zašedlou část struktury, kde vznikl oxid. V tomto místě trhliny za tepla vznikl počátek lomu. Trhlina za tepla vznikla při přípravě tahových vzorků, protože byly vyřezány ze vzorků laserem, a došlo k tepelnému ovlivnění tahového tělesa, což negativně ovlivnilo materiál vzorku.



Obr. 64 Svarová vada a lom vzorku č. 9

3.4 Metalografické šetření [4], [48], [62]

Pro vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury je zapotřebí dokonale připravit vzorky pro zkoumání. Jako první krok je třeba vybrat reprezentativní část svaru, která je poté vyřezána na metalografické pile s intenzivním chlazením, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorku. Vyřezané vzorky se za tepla zalisují do plastu pro lepší manipulaci při další práci. Důležitý mezikrok při přípravě vzorku je broušení. Vzorek se brousí, aby se odstranily veškeré nerovnosti povrchu vzorku a tepelně ovlivněná vrstva vytvořená při dělení. Tato příprava probíhala v metalografické laboratoři Akademie věd ČR, která je na obrázku 65.



a) broušící a leštící stroj Struers Tegamin – 20 b) Zalisovací stroj Struers CitoPress – 1

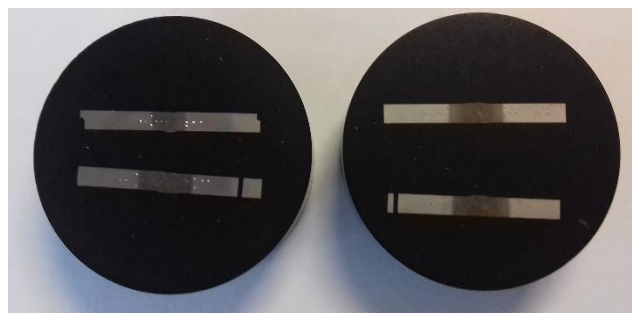
Obr. 65 Metalografická laboratoř Akademie věd ČR

Broušení probíhá podle nastaveného programu s danými otáčkami a broušícím časem, kdy se nejdříve brousí pomocí brusných kotoučů s větší drsností a postupně se drsnost brusných kotoučů snižuje. Brusné kotouče jsou vyobrazeny na obr. 66. Tato operace probíhá pod vodou, aby byly odplaveny veškeré vytvořené nečistoty a aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorků. Poté jsou vzorky leštěny pomocí diamantové suspenze DiaDuo-2.



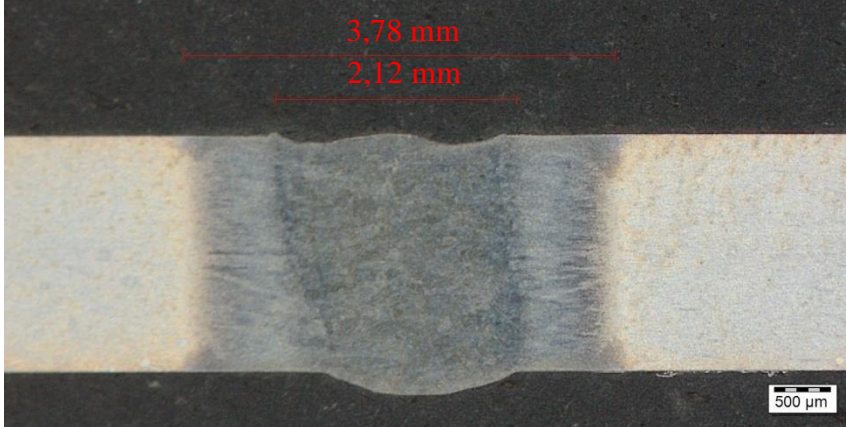
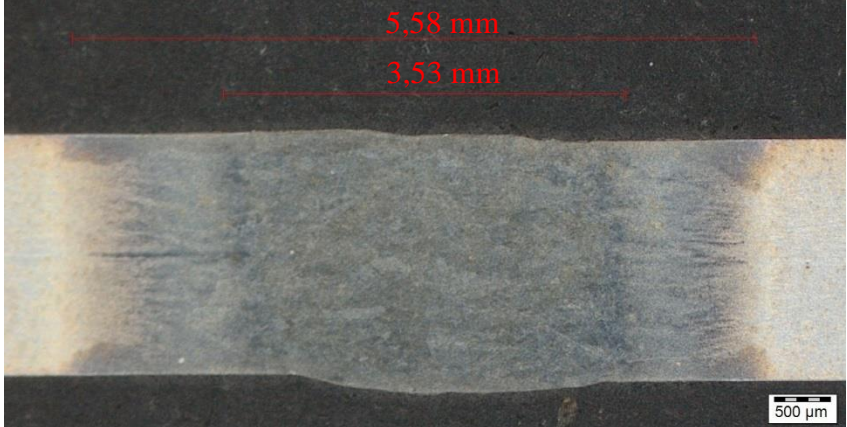
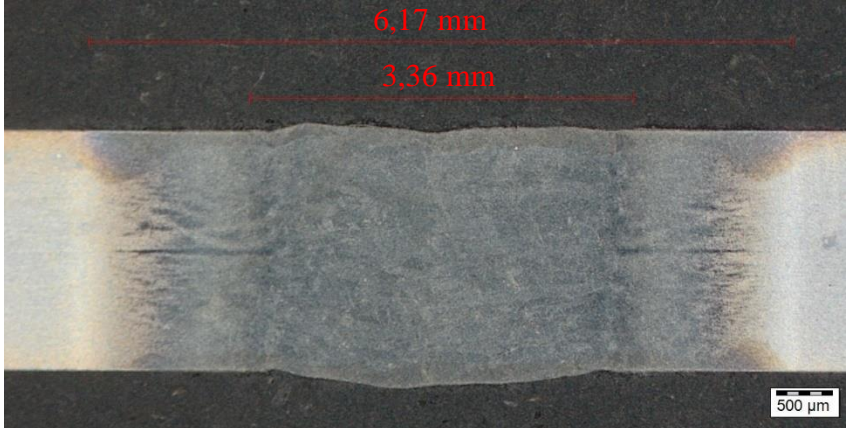
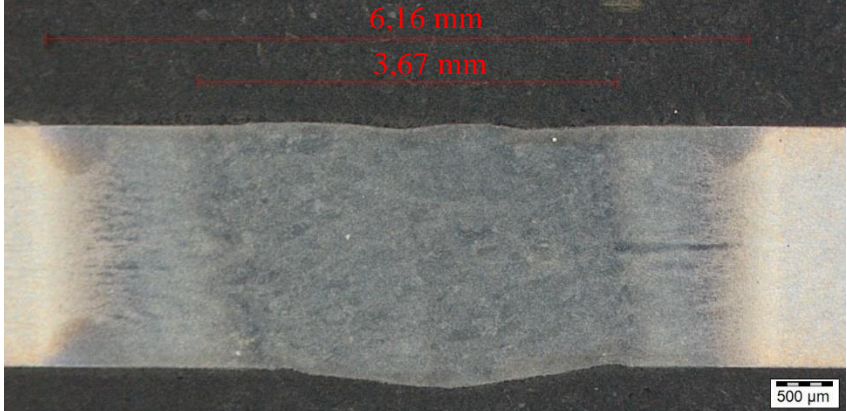
Obr. 66 Brusné a leštící kotouče

Jako poslední operace je zařazeno leptání. Vzorky jsou leptány kvůli odstranění povrchové vrstvy, která je vytvořena na vzorku po leštění, a pro zlepšení viditelnosti struktury vzorku. Vzorek je leptán pomocí leptadla Nital, což je nízkoprocentní roztok kyseliny dusičné. Vyleštěné a naleptané vzorky připravené pro vyhodnocení jsou znázorněny na obrázku 67.



Obr. 67 Vyleštěné a naleptané vzorky

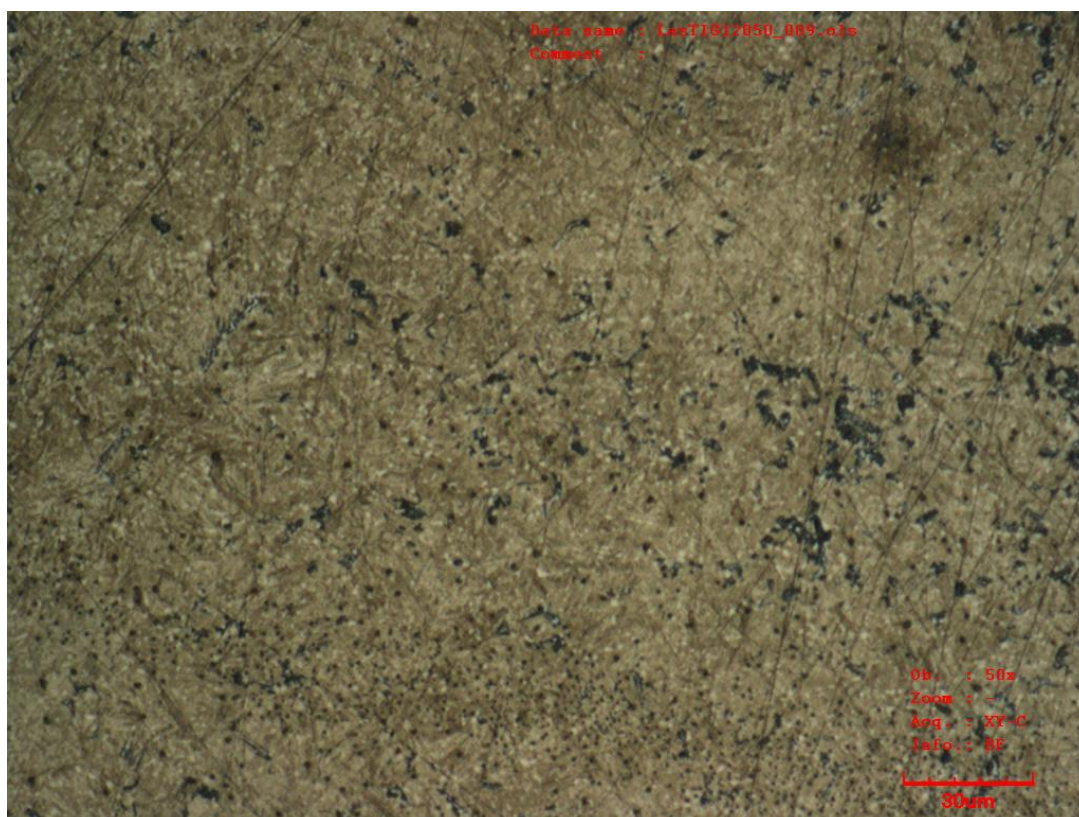
Tab. 16 Makrostruktura vzorku s rozměry svaru a tepelně ovlivněné oblasti

Druh svaření	Makrostruktura vzorku s rozměry svaru a tepelně ovlivněné oblasti
Laser 1000 W	 <p>3,78 mm 2,12 mm</p> <p>500 µm</p>
Laser 1000 W TIG 80 A DC	 <p>5,58 mm 3,53 mm</p> <p>500 µm</p>
Laser 1000 W TIG 80 A AC 100 Hz	 <p>6,17 mm 3,36 mm</p> <p>500 µm</p>
Laser 1000 W TIG 80 A AC 500 Hz	 <p>6,16 mm 3,67 mm</p> <p>500 µm</p>

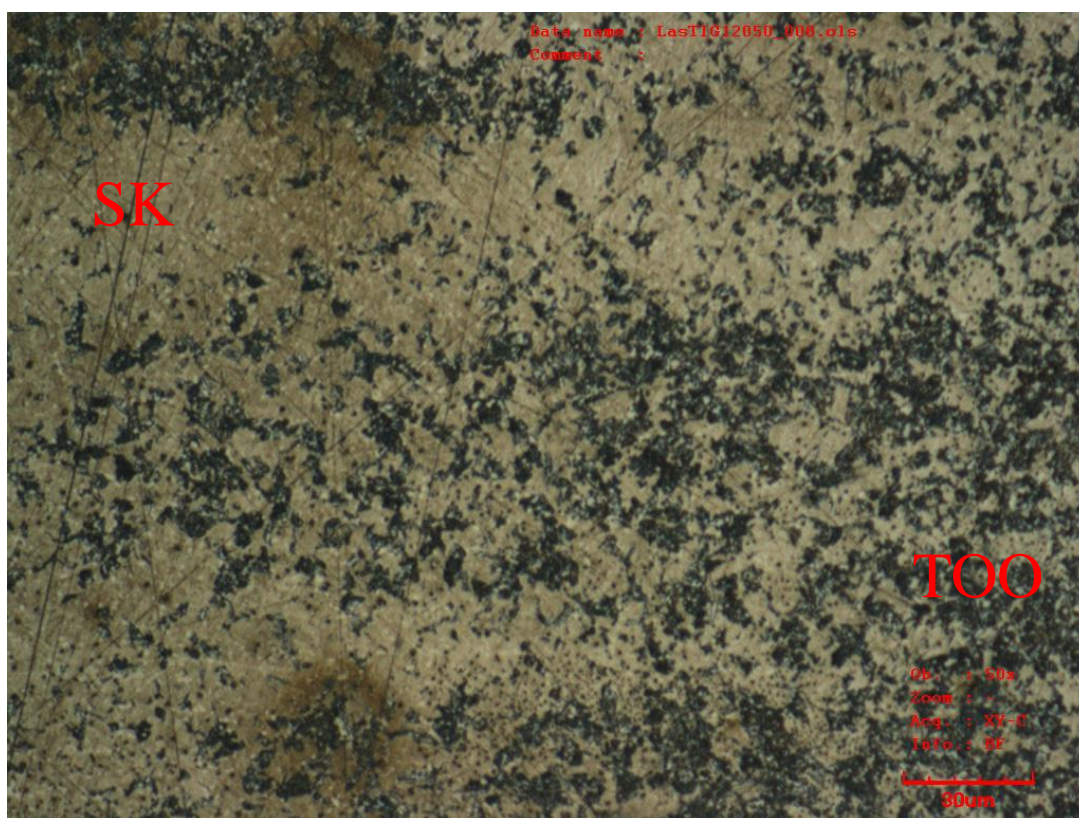
V tabulce 15 je znázorněna makrostruktura vzorků, na kterých byla změřena pomocí programu na vyhodnocení vzorku pod mikroskopem šířka svaru a následně i tepelně ovlivněné oblasti. Z obrázku je zřejmé, že při svařování laserem je svar téměř o polovinu užší než u ostatních vzorků svařených s předehřevem TIG. Tento svar je široký 2,12 mm. Nejširší svar je vytvořen při svaření s předehřevem TIG 80 A AC 500 Hz, a to 3,67 mm.

Svar vytvořený bez předehřevu je nedostatečně překrytý a zároveň je svar v místě kořenu mírně převýšený. Oproti tomu vzorky, které jsou vytvořené s předehřevem, mají také kořen mírně převýšený, ale v porovnání se svary bez předehřevu je převýšení kořenu minimální. Hlava svaru u vzorků s předehřevem je převýšená velmi málo. Převýšení svaru se vytvoří při ochlazování a následném tuhnutí svarového kovu, kdy se materiál smršťuje a působením vnitřních sil se materiál přibližuje a kov, který není v tuhé fázi, je vytlačován ven ze svaru a vznikne vyboulení. Tato vlastnost je pro svar pozitivní.

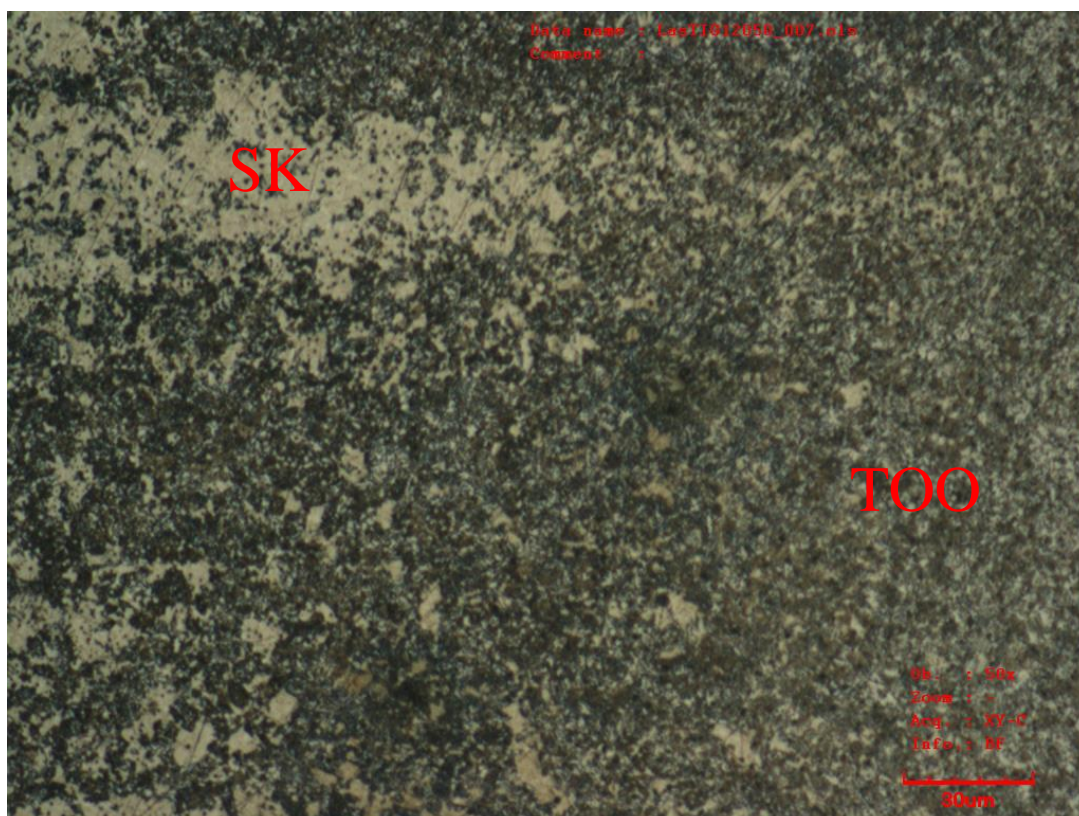
Tepelně ovlivněná oblast u všech vzorků je znatelná. Nejmenší tepelně ovlivněná oblast je u vzorku svařeného pouze laserem, protože do materiálu je vneseno nejméně tepla, které je koncentrováno do malého místa svaru. Tato oblast je široká včetně se svarem 3,78 mm. Oproti tomu vzorky svařené s předehřevem mají tepelně ovlivněnou oblast větší o více než polovinu, což je důsledek vnesením více tepla, který je vnesen laserem a elektrickým zdrojem TIG zároveň pro předehřátí materiálu na danou teplotu. Největší tepelně ovlivněnou oblast mají svary vytvořené laserem s předehřevem elektrického zdroje se střídavým proudem TIG 80 A AC, a to 6,16 mm a 6,17 mm. Vzorek s předehřevem se stejnosměrným zdrojem TIG 80 A DC má ze svařených vzorků s předehřevem nejmenší tepelně ovlivněnou oblast – 5,58 mm.



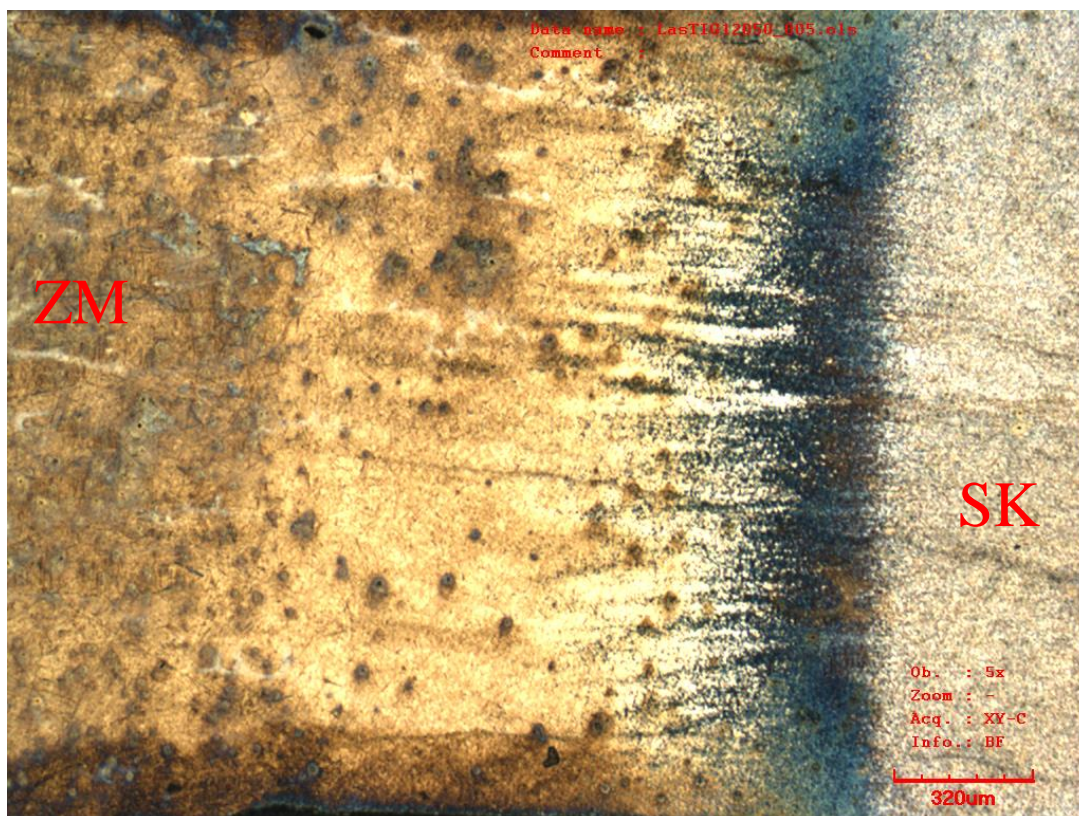
Obr. 68 Mikrostruktura svarového kovu – laser 1000 W TIG 80 A DC



Obr. 69 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – laser 1000 W TIG 80 A DC



Obr. 70 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – laser 1000 W TIG 80 A DC



Obr. 71 Mikrostruktura přechodové oblasti – laser 1000 W TIG 80 A DC

Na snímcích 68 až 71 jsou zobrazeny mikrostruktury vzorku svařeného laserem s předehřevem stejnosměrného zdroje TIG 80 A DC. Na obr. 71 je vyobrazena přechodová oblast ze základního materiálu přes tepelně ovlivněnou oblast až do svaru. Na tomto snímku lze rozpoznat, že se v základním materiálu objevují skvrny vzniklé přeleptáním. Také lze z obrázku vyčíst, že vnesením tepla do materiálu došlo k zjemnění struktury směrem do svarového kovu, kde je struktura nejjemnější. Velikost zrna ve svarovém kovu se pohybuje v rozmezí 1 – 2 μm , přičemž v tepelně ovlivněné oblasti se zrno pohybuje v intervalu 5 – 10 μm v závislosti, kde se zrno nachází. Zrno blíže svarovému kovu je jemnější než u základního materiálu, což je ovlivněno velikostí vneseného tepla a rychlostí ochlazování. Na obrázcích 69 a 70 je zachyceno rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti, kde je patrná změna struktury materiálu po svaření. V těchto strukturách, které jsou rychle ochlazeny převažuje martenzitická struktura. Vlevo na snímku je svarový kov a vpravo tepelně ovlivněná oblast. Snímky struktur ostatních vzorků jsou umístěny v příloze č. 3.

Na snímcích lze rozpoznat, že vzorek svařený laserem má ostřejší hranice tepelně ovlivněné oblasti než u ostatních vzorků, kde tepelně ovlivněná oblast je větší. Lze pozorovat i zjemnění zrna, které je pozvolnější u vzorků s předehřevem, oproti tomu u vzorků svařených pouze laserem je zjemnění zrna skokové.

3.5 Zkouška mikrotvrdomsti podle Vickerse [19], [48], [62], [83]

Tvrdomsti byla změřena na všech svařených zalisovaných vzorcích materiálu 1.1191 pomocí Vickersova tvrdoměru modelu Zwick 3212, který je zachycen na obrázku 72. Povrch vzorku je snímán CCD kamerou, která je umístěna na objektivu tvrdoměru. Z kamery je obraz vtisku převeden do počítače, kde je vyhodnocen pomocí měřícího softwaru testXpert, kdy jsou ručně v počítači označeny uhlopříčky vtisku a následně software vyhodnotí změřenou tvrdost. Na vzorek působí indentor zatížený 5 kg po dobu 20 s. Měřená tvrdost tedy vychází v jednotkách HV5. Vtisky jsou umístěny v přibližné rozteči 1 mm, aby jednotlivé vtisky nebyly vzájemně ovlivněny. Tvrdomsti byla měřena přes celý vzorek, tak aby byla změřena tvrdost základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti, svarového kovu i vzájemných přechodových oblastí.

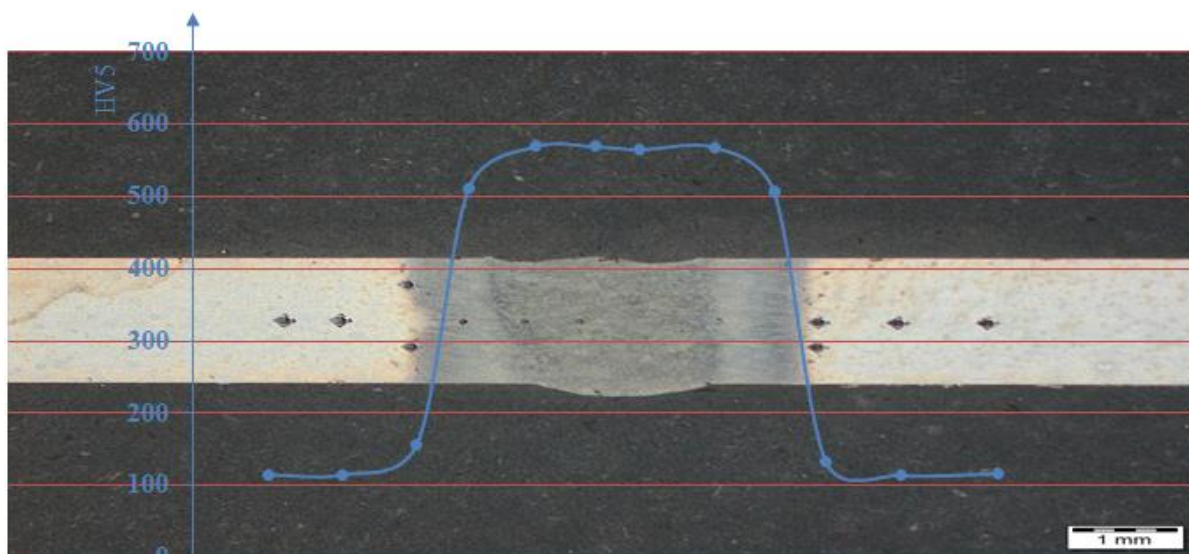


Obr. 72 Měřící zařízení Zwick 3212 s vyhodnocením vtisku

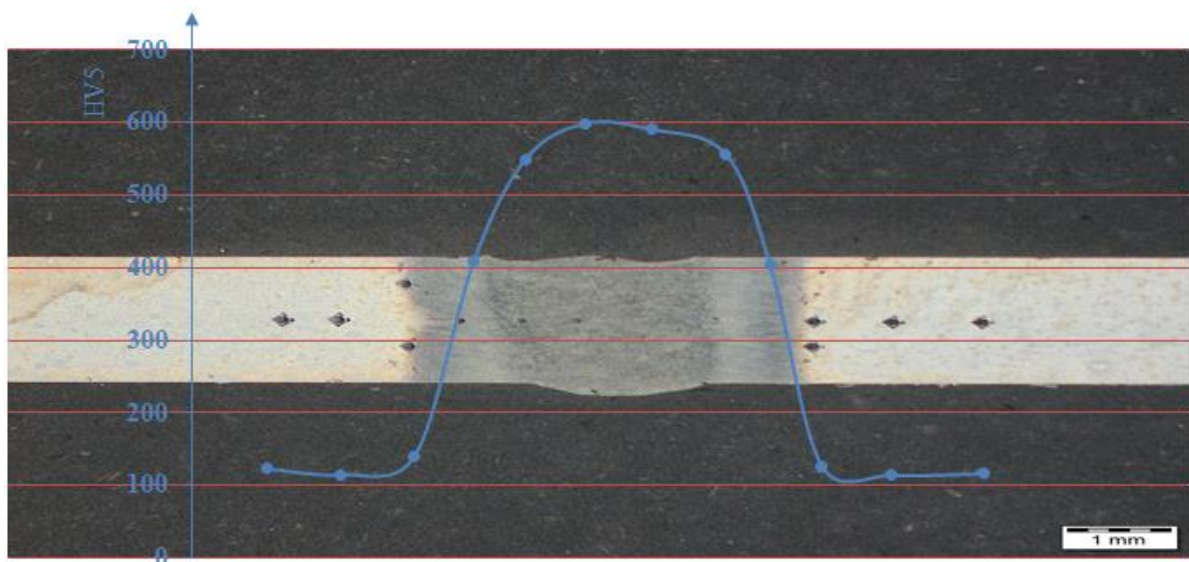
Průběh a naměřené hodnoty tvrdosti jsou uvedeny na obrázcích a tabulce níže.

Tab. 17 Naměřené hodnoty tvrdosti materiálu 1.1191

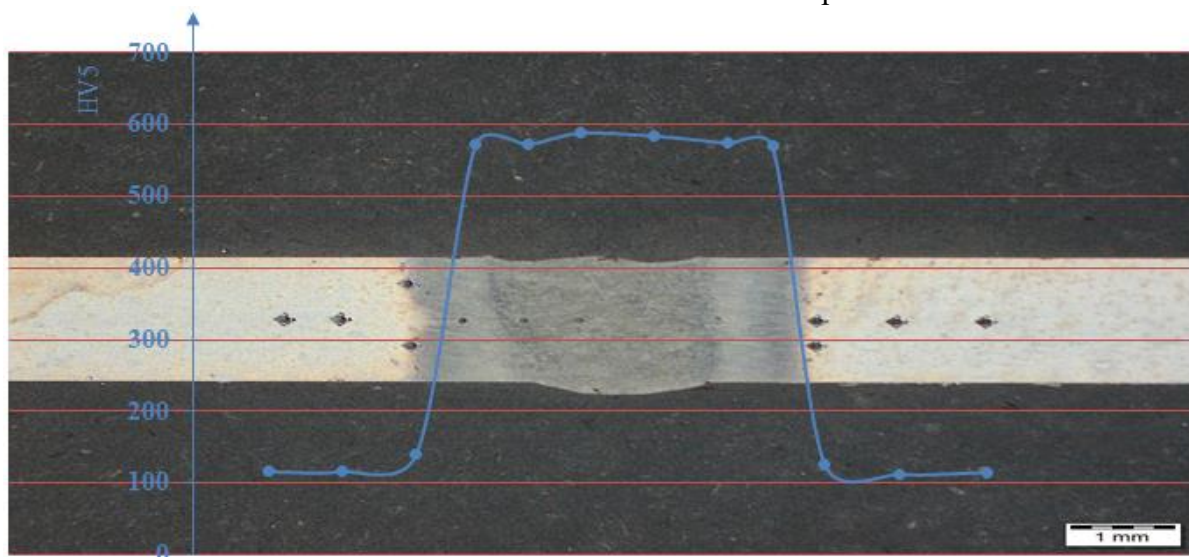
Laser 1000W		L1000 80A DC		L1000 80A AC 100Hz		L1000 80A AC 500Hz	
vtisk č.	Tvrdomsti [HV5]	vtisk č.	Tvrdomsti [HV5]	vtisk č.	Tvrdomsti [HV5]	vtisk č.	Tvrdomsti [HV5]
1	115	1	123	1	116	1	106
2	115	2	115	2	116	2	115
3	157	3	141	3	141	3	152
4	512	4	410	4	572	4	553
5	569	5	550	5	572	5	562
6	569	6	599	6	588	6	582
7	133	7	127	7	127	7	125
8	114	8	114	8	112	8	116
9	116	9	116	9	115	9	116



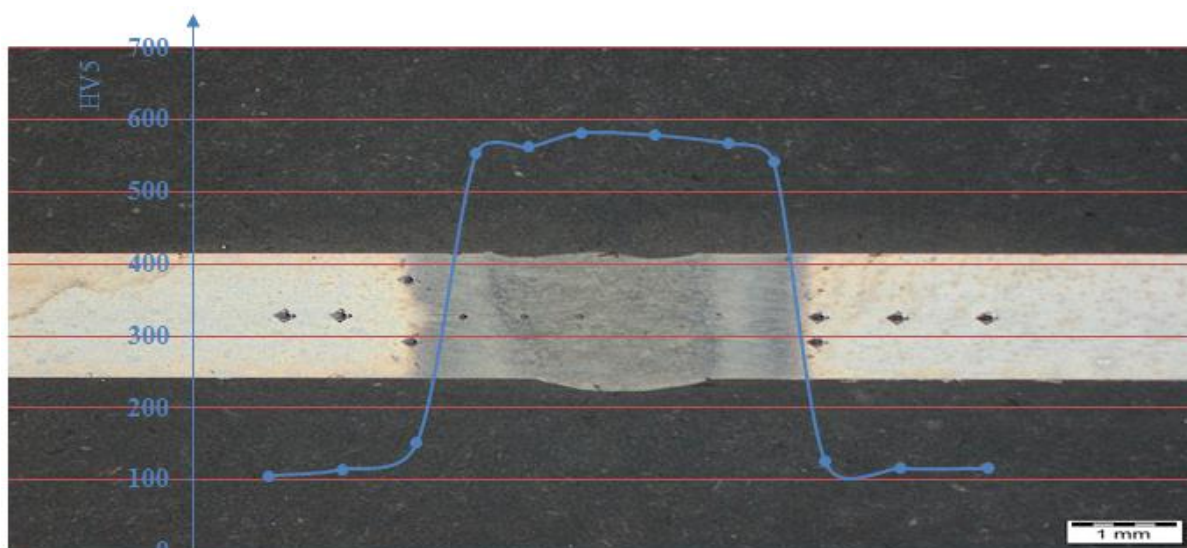
Obr. 73 Průběh tvrdosti vzorku svařeného laserem 1000 W



Obr. 74 Průběh tvrdosti vzorku svařeného laserem 1000 W s předehřevem TIG 80 A DC



Obr. 75 Průběh tvrdosti vzorku svařeného laserem 1000W s předehřevem TIG 80 A AC 100 Hz



Obr. 76 Průběh tvrdosti vzorku svařeného laserem 1000W s předehřevem TIG 80 A AC 500 Hz

Ze znázornění průběhu grafů je zřejmé, že tvrdost strmě roste od základního materiálu do svarového kovu, kde je dosaženo přibližně pětinasobku tvrdosti oproti základnímu materiálu, kdy se tvrdost základního materiálu pohybuje u hodnoty 115 HV5. Největší tvrdost je naměřena ve vzorku svařeném laserem s předehřevem TIG 80 A DC, kde je dosaženo tvrdosti až 599 HV5. U tohoto vzorku je náběh tvrdosti přes tepelně ovlivněnou oblast nejvíce pozvolné, naopak tvrdost vyrostla nejrychleji u vzorku svařeného laserem s předehřevem elektrickým zdrojem TIG 80 A AC. Tvrdost svarového kovu se pohybuje u všech vzorků svařených laserem s předehřevem kolem hodnoty tvrdosti 590 HV5, naopak při svaření materiálu bez předehřevu je dosaženo hodnoty tvrdosti 569 HV5. Nejnižší tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti je změřena u vzorku s předehřevem TIG 80 A DC, a to 410 HV5, oproti tomu nejvyšší tvrdost je u vzorku svařených s předehřevem TIG 80 A AC 100 Hz, a to 572 HV5.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [30], [49], [75], [85], [86], [87]

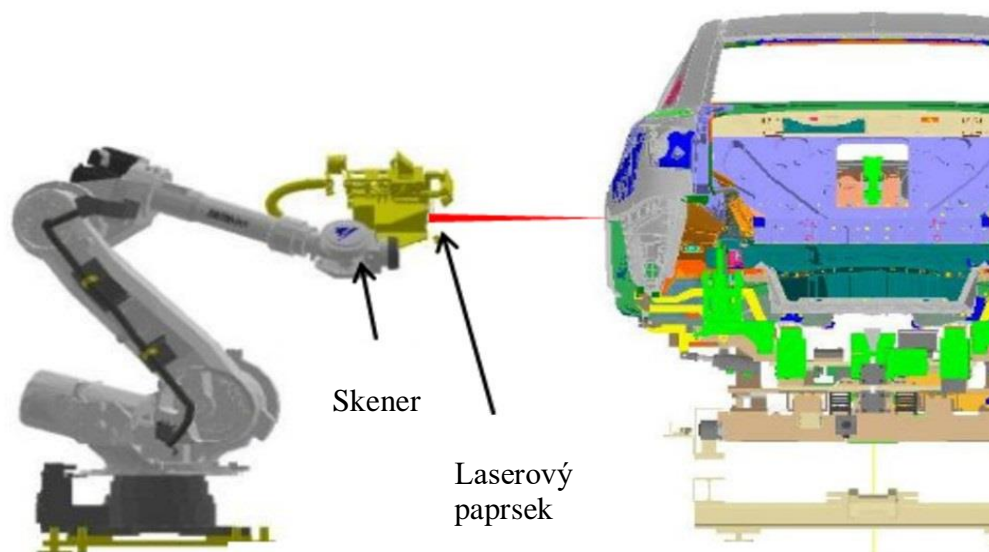
Stanovení přesné ekonomiky není možné, protože nebyla zadána určitá součást pro řešení v rámci diplomové práce. Diplomová práce řeší prvotní experimenty výzkumu pro oblast využití laserového svařování s dalším zdrojem tepla jako předehřevu. Tato svařovací metoda je převážně určena pro svařování plechů s rozdílnými vlastnostmi v automobilovém průmyslu nebo v dalších průmyslových odvětvích, kde je zapotřebí svaření ocelí s předehřevem s cílem vytvoření kvalitního svaru.

Laserové svařování je ekonomicky náročnější z hlediska využití složitějšího přípravkování, protože se vyžaduje vyšší přesnost, zejména v automobilovém průmyslu. Díky aplikování přípravku je zajištěna správná poloha jednotlivých svařovaných dílů a je zaručena nezaměnitelnost při svařování složitějších svařenců. Při využití přípravků je snížena časová náročnost svařování, protože usazování a vyjmutí jednotlivých dílů je urychleno.

Cenu přípravkování lze snížit použitím univerzálních mechanických upínačů, které jsou cenově výhodnější než užití pneumatických upínačů. Tímto způsobem, ale dojde k prodloužení vedlejších časů svařování kvůli delší a složitější manipulaci a zároveň i k nárůstu ceny. Cena a provedení přípravku tedy má vliv na ovlivnění ceny technologie. Druhá varianta, která je cenově náročnější, je využití aktivního zařízení, které automaticky upravuje zacílení výstupního paprsku, díky čemuž trajektorie svaru nemusí být pevně daná. Jako aktivní zařízení se využívá skener. Tato metoda je zobrazena na obrázku níže.

Při svařování vysokouhlíkových ocelí ovlivňuje cenu i použitý typ předehřevu. Při využití laserového svařování je složité určení předehřevu, které by efektivně využívalo výhodnou rychlost tohoto typu svařování. Při svařování laserem s předehřevem elektrického zdroje TIG dojde ke zpomalení rychlosti svařování než při svařování bez předehřevu, přičemž i tak tato technologie je výhodnější a rychlejší než ostatní konvenční metody svařování. Využitím zdroje TIG pro předehřev je výhodné, protože zdroj TIG je v průmyslu velice rozšířený a cenově dostupný z toho lze říci, že je to levný zdroj pro předehřev.

Přidáním druhého zdroje tepla dojde k nárůstu vstupních parametrů a tím i k složitějšímu nastavení a seřízení obou zdrojů tepla a následně optimalizaci, čímž dojde ke zvýšení časové náročnosti z důvodů simulací a zkoušek, tedy i předvýrobních nákladů. Alternativou elektrického zdroje TIG pro předehřev je využití induktoru, který je nabídkou společnosti Dawell, přičemž cena předehřevu je srovnatelná se zdrojem TIG, ale rychlost ohřevu je pomalejší.



Obr. 77 Využití aktivní zařízení pro úpravu trajektorie při svařování [75]

Pro výpočet 1 m svaru vytvořeného laserem s různými druhy přehřevu je bráno v úvahu, že rok má 50 pracovních týdnů a pracovní týden má 5 dní. Jedná se o dvousměnný pracovní provoz, tedy rok má 4 000 pracovních hodin. Doba odpisů strojů je 5 let. Cena pevnolátkového laseru YLS 2000 je stanovena výrobcem na 2 200 000 Kč a průmyslového robotu ABB IRM 2400/10 na 2 000 000 Kč. Ze zkušenosti na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky náhradní díly a servis laseru činí 15 000 Kč a robotu 20 000 Kč. Cena zdroje pro přehřev Fronius MagicWave 1700 je 90 000 Kč a induktorového Dawell DHI3-F1 je 64 000 Kč.

Tab. 18 Výpočet hodinové ceny provozu laseru a 1 m svaru [30] [49] [85] [86] [87]

	YLS 2000 + ABB IRM 2400/10	YLS 2000 + ABB IRM 2400/10 + Fronius MagicWave 1700	YLS 2000 + ABB IRM 2400/10 + Dawell DHI3-F1
Cena [Kč]	4 200 000	4 290 000	4 264 000
Odpisy [Kč/hod]	210	215	214
Ochranný plyn argon (18 l/min) [Kč/hod]	173	173	173
Elektrická energie [Kč/hod]	100	120	120
Mzda operátora [Kč/hod]	238	238	238
Náhradní díly + servis [Kč]	15 000 + 20 000	15 000 + 20 000	15 000 + 20 000
Náhradní díly + servis [Kč/hod]	9	9	9
Celkem [Kč/hod]	730	755	754
Režie – 200 % [Kč/hod]	1460	1510	1508
Zisk – 20 % [Kč/hod]	1752	1812	1810
Cena za 1 m svaru – rychlost 10 mm/s [Kč]	48,67	50,33	50,27

Cena za 1 m svaru narostla ze 48,67 Kč při laserovém svařování bez přehřevu na 50,33 Kč při svařování laserem s přehřevem pomocí zdroje TIG. Nárůst ceny za metr je tedy o 3,3 %, což je pro využívání v průmyslu přijatelné. Cena 1 m svaru laserového svařování s indukčním přehřevem je zvolena na 50,27 Kč, tedy nárůst o 3,18 % oproti svařování bez přehřevu. V porovnání cen 1 m svaru při použití přehřevu je elektrický zdroj TIG o 0,12 % dražší, ale při použití induktorového zdroje musí být snížena rychlost svařování, protože induktorový ohřev je pomalejší a ohřev celého průřezu materiálu trvá delší dobu než u elektrického oblouku, který prohřeje průřez celého materiálu rychleji. Tedy po snížení rychlosti svařování, při induktorovém ohřevu, je cenově výhodnější jako zdroj přehřevu elektrický oblouk. Pořizovací cenu elektrického zdroje TIG lze ještě snížit koupí přesně specifikovaného stejnosměrného zdroje TIG bez možnosti přenastavení zdroje na střídavý zdroj TIG.

5 ZÁVĚRY

Předmětem diplomové práce je zkoumání využití předehřevu elektrickým obloukem při laserovém svařování oceli s vyšším obsahem uhlíku. Pro provedení experimentu byl vybrán materiál s vyšším obsahem uhlíku, a to 1.1191 o tloušťce 2 mm. Po zjištění přesného chemického složení daného materiálu, byl vyhodnocen uhlíkový ekvivalent oceli, přičemž bylo rozhodnuto, že pro svaření tohoto typu oceli je potřeba předehřev. Předehřev byl vypočítán pomocí vzorců podle Séferiána, kdy teplota předehřevu byla určena minimálně na 208 °C.

Jako zdroj elektrického oblouku pro předehřev byl zvolen zdroj TIG, který je v průmyslu velmi rozšířen a jednou z mála možností pro vytvoření předehřevu při svařování laserem. Nastavení vstupních parametrů dalšího zdroje tepla bylo zjištěno pomocí prvních experimentů, kdy byl materiál sledován pomocí termokamery a následně byla vyhodnocena výsledná teplota předehřátého materiálu. Svařovací parametry laseru byly nastaveny na základně zkušeností svařování vysokouhlíkových ocelí na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Svařené vzorky byly testovány pro zjištění kvality svaru, a to tahovou zkouškou, zkouškou mikrotvrdomosti podle Vickerse a dále zkoumáním mikrostruktury a makrostruktury.

Při zkoumání vzorků z hlediska makrostruktury je zřejmé, že při použití zdroje TIG jako předehřevu dojde k rozšíření tepelně ovlivněné oblasti, a to o více než polovinu z důvodu většího množství vneseného tepla do materiálu. Největší tepelně ovlivněná oblast vznikne při použití střídavého elektrického zdroje TIG, a to 6,16 mm a 6,17 mm. Tepelně ovlivněná oblast při použití stejnosměrného zdroje je 5,58 mm. V mikrostruktuře lze pozorovat velké množství vzniklého martenzitu a z důsledku většího rozšíření tepelně ovlivněné oblasti i výrazné zjemnění struktury materiálu.

Z průběhu vyhodnocení mikrotvrdomosti jednotlivých vzorků je patrné, že nárůst tvrdosti svaru oproti základnímu materiálu je až pětinasobný. Změřená tvrdost základního materiálu se pohybuje kolem hodnoty 115 HV5 a tvrdost svaru se pohybuje v rozmezí od 569 do 599 HV5, přičemž tvrdost svarového kovu bez předehřevu je nejmenší – 569 HV5 a při použití stejnosměrného zdroje dosahuje tvrdost až hodnot 599 HV5.

Při tahové zkoušce praskly všechny vzorky v základním materiálu až na vzorky č. 6 a č. 9, které praskly uprostřed svaru z důvodu svarových, konkrétně trhlin vzniklých za tepla, které vznikly při řezání tahových vzorků laserem. Vzorky, které byly roztrženy v základním materiálu, vykazují dobré vlastnosti svaru, protože vydržely zatížení zkušebního stroje a výsledné naměřené hodnoty odpovídaly vlastnostem základního materiálu. Vzorek č. 3 a č. 4 svařené pouze laserem bez předehřevu neměl zatížení zkušebního vydržet, což mohlo být zapříčiněno příliš pomalou rychlostí zatížení.

Experimentem bylo zjištěno, že využití elektrického zdroje TIG pro svařování vysokouhlíkových ocelí v průmyslu je optimální řešení, protože jiný typ předehřevu pro laser není tak výhodný, cenově vyjde metr svaru na 50,33 Kč, což je nárůst jen o 3,3 %. Alternativou je využití induktoru pro předehřev materiálu, která je v nabídce společnosti firmy Dawell, ale jedná se o pomalejší ohřev materiálu, což ovlivní i rychlost svařování a zvýší cenu svaru za metr. Přidáním druhého zdroje tepla dojde k obtížnější optimalizaci a nastavení parametrů svařování. Pro minimalizování ovlivnění tahových vzorků řezáním, doporučuji vzorky vyřezávat pomocí jiné metody, která by tepelně neovlivnila vzorky, například vodní paprsek. Dále by svařené vzorky měly být zkoušeny rychlejší zátěžovou metodou, aby nedošlo ke zkreslení výsledků vzorků svařených bez předehřevu. Na základě experimentu pro průmysl doporučuji používat laserové svařování s předehřevem stejnosměrným zdrojem TIG, jelikož vyhodnocené svary s tímto předehřevem vykazují lepší vlastnosti. Tato práce řeší prvotní experimenty tohoto typu předehřevu a laserového svařování a bude tématem dalšího výzkumu Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [10]

1. GANG, Song, Liu LIMING, Chi MINGSHENG a Jifeng WANG. Investigations on laser-TIG hybrid welding of magnesium alloys. Dalian University of Technology, Dalian, China: State Key Laboratory of Material Surface Modification by Laser, Ion, and Electronic beams, Depart. of Material Engineering, 2008, **2008**(09), 5.
2. CHEOLHEE, Kim, Choi WOONGYONG, Kim JEONGHAN a Sehun RHEE. Relationship between the Weldability and the Process Parameters for Laser-TIG Hybrid Welding of Galvanized Steel Sheets. *Materials Transactions*. The Japan Institute of Metals, c2008, **2008**(49), 179-186.
3. KESSE, Martin Appiah. *Laser-TIG hybrid welding process*. Lappeenranta, 2013, 114 s. Degree of Master of Science in Technology. Lappeenranta University of Technology, Faculty of Technology, Mechanical Engineering, Laboratory of Welding Technology. Vedoucí práce Jukka Martikainen, Paul Kah.
4. LIMING, Liu, Wang a Song JIFENG. Hybrid laser-TIG welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of AZ31B magnesium alloy. Department of Material Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 9.
5. SCHIMEK, M., A. SPRINGER, S. KAIERLE, D. KRACHT a V. WESLING. Laser-welded dissimilar steel-aluminum seams for automotive lightweight construction. *Physics Procedia*. Hannover, Germany: Lane, 2012, **2012**(39), 43-50.
6. ZONGYU, Gao, Fang JIANJUN, Zhang YINONG, Ran GUOWEI a Zhang SHIDE. Welding Characteristic Analysis of Hybrid Welding on 2014 Aluminum Alloy. *International Journal of Electrochemical Science*. 2013, **2013**(8), 13.
7. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
8. BENDA, Jan. *Porovnání indukčního a přímého odporového ohřevu*. Plzeň, 2014, 27 s. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Stanislav Jiřinec.
9. BENKO, Berndard, Peter FODEREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000, 122 s. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
10. *CITACE PRO: Generátor citací* [online]. 2017 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
11. Co byste rádi věděli o průmyslových laserech. *MegaBlog* [online]. 2012 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/co-byste-radi-vedeli-o-prumyslovych-laserech/>
12. Co je laser a jak funguje? *Fotona: vyberte si dokonalost* [online]. 2015 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.fotona.cz/cs/technologie/co-je-laser-a-jak-funguje/>

13. Co je metoda TIG? *Svářečky-elektrody.cz* [online]. 2017 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-124>
14. CO2 Teac Welding. *Stock footage & Video effects* [online]. c2017 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <https://videohive.net/item/co2-teac-welding/10852062>
15. *CTEK Engineering* [online]. c2016 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.ctekengineering.com/>
16. ČERNÝ, Václav. Elektrický ohřev – odporový, dielektrický, obloukový, elektronový a laserový. *Odborné časopisy* [online]. c2014-2017 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/elektricky-ohrev-odporovy-dielektricky-obloukovy-elektronovy-a-laserovy-4--13742>
17. ČSN 41 2050. *Ocel 12 050*. 4. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1994.
18. ČSN EN 1011-2. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002.
19. ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse: Část 1: Zkušební metoda*. 3. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
20. ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
21. ČSN EN ISO 6892-1. *ČSN EN ISO 6892-1*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
22. DESIATE, A., S. CANTORE, D. TULLO, G. PROFETA, Fr. GRASSI a A. BALLINI. 980 nm diode lasers in oral and facial practice: current state of the science and art. In: *International Journal of Medical Science* [online]. 2009 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.medsci.org/v06p0358.htm>
23. Development of a laser welding process for titanium fairings. *The Manufacturing Technology Centre* [online]. [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.the-mtc.org/our-case-studies/development-of-a-laser-welding-process-for-titanium-fairings>
24. *Document Publishing* [online]. c2017 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <https://readgur.com/doc/961377/obrazek-svarevani-tig>
25. DULEY, Walter. W. *Laser welding*. I. Title. New York: A. Wiley-Interscience publication, c1999, 230 s. ISBN 04-712-4679-4.
26. DUŠEK, Robert. Vady svarů. *Slideplyer* [online]. 2012 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2035171/>
27. FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFFER, Věra OLŠAROVÁ, et al. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3.

28. Hardness-Testing Machine Shopping Tips. *Industrial heating* [online]. 2016 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://www.industrialheating.com/articles/93000-hardness-testing-machine-shopping-tips>
29. Indukce, Indukční ohřevy, Indukční tavicí pece. *Indukce* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://indukce.cz>
30. MRŇA, Libor. Ekonomika technologií. *Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/cviceni_soubory/ekonomika_technologii_mrna.pdf
31. Jak vybrat správný světelný zdroj do domácnosti? *Odborné časopisy* [online]. 2015 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/jak-vybrat-spravny-svetelny-zdroj-do-domacnosti-cast-1--873>
32. Klempíři a topenáři. *GCE Group Czech Region* [online]. 2017 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://czech.gcegroup.com/industry/plumbing>
33. KOLAŘÍK, Ladislav a Karel KOVANDA. Svařitelnost hliníkových slitin. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, **2011**(4), [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-hlinikovych-slitin.html>
34. KOŘÁN, Pavel. Základní princip laseru a jejich dělení. *Lasery a optika* [online]. 2013 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
35. KOŘÁN, Pavel. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Lasery a optika* [online]. 2013 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-vprumyslu-128>
36. KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (5): Laserové řezání. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, **2012**(10), [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html>
37. KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (3): laserové svařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, **2012**(5), [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-3-laserove-svarovani.html>
38. KOŘÁN, Pavel. Laserové svařování I (laser welding). *Lasery a optika* [online]. 2013 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
39. KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (2): svařovací lasery. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, **2012**(4), [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>
40. KRUTINA, Jiří. Laserové technologie v průmyslu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010, **2010**(3), [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-technologie-v-prumyslu.html>

41. Laser beam's wavelength determines its 'color'. *PhotoMachining, Inc.* [online]. 2013 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://photomachining.com/mm-Laserbeam-wavelength-determines-its-color.html>
42. Laser Heat Treatment. *Laser Cladding Services* [online]. c2013-2017 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.lasercladdingservices.com.au/laser-heat-treatment.html>
43. Laser welding or electron beam? *Engineering Capacity* [online]. 2011 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.engineeringcapacity.com/news101/process-news/forming-and-fabrication/laser-welding-or-electron-beam>
44. Laserové gravírování. *Euroargine* [online]. c2006-2017 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://www.euroargine.cz/p/laserove-gravirovani-gravirovani-olomouc/32>
45. Laserové svařování. *AWL - Techniek* [online]. c2017 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: http://www.awl.nl/cz/technologies/laser_welding/laser-welding
46. Laserové navařování. *LaserTherm* [online]. c2017 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-navarovani/>
47. MACEK, Karel, Petr ZUNA a Jiří JANOVEC. *Tepelné zpracování kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 133 s. ISBN 978-800-1041-864.
48. MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014, 139 s. ISBN 978-800-1055-274.
49. MagicWave 1700: Produkty obloukové svařování. *Fronius* [online]. c2006-2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-E441839D-F2EFDCD7/fronius_ceska_republika/hs.xml/29_1251.htm#.WRrnK-WLTIV
50. *MEGA HEAT: Post Weld Heat Treatment, Stress Relieving, Heat Treatment of Steel* [online]. c2017 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <https://www.megaheatingservices.com/>
51. Metalografická laboratoř. *TÜV NORD CZECH* [online]. c2017 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <https://www.tuv-nord.com/cz/cs/laboratore-a-zkusebny/metalograficka-laborator-736.htm>
52. Metoda TIG. *AEK svařovací technika s.r.o.* [online]. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.aek-svareci-technika.cz/odbornik-radi-metoda-tig.html>
53. MIG AND TIG WELDING ACCESSORIES. *Standard Welding & Tools* [online]. 2017 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/standardweldingtools/mig-and-tig-welding-accessories.html>
54. MINAŘÍK, Václav. *Obloukové svařování*. 3. vyd. Praha: Scientia, 2007, 241 s. ISBN 978-808-6960-289.
55. Navařování laserem. *Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__navarovani_laserem__mrna.pdf

56. NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (1): princip laseru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>
57. NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (4): Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, **2012**(9), [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
58. Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu MAG/MIG. *Schinkmann* [online]. c1991-2017 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/obloukove-svarovani-v-ochranne-atmosfere-plynu>
59. Optika (čočky, zrcadla) pro CO2 lasery. *EU Technologies* [online]. c2003-2017 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <https://eu-technologies.cz/zapchasti/optika-cocky-zrcadla-pro-co2-lasery>
60. Optiques Spéciales. *Laser Components* [online]. c2017 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.lasercomponents.com/de-fr/produit/barreaux-laser/>
61. Problematika hodnocení svarových spojů. *Konstrukce* [online]. 2014 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
62. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
63. RÜTERING, Marus. Co rozhoduje při volbě typu laseru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, **2011**(9), [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
64. ŘASA, Jaroslav a Radka JINDROVÁ. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006, **2006**(7), [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
65. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění: 4. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, **2008**(3), [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
66. Řezání laserem. *Ústav strojírenské technologie* [online]. 2013 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__rezani_laserem_2013__mrna.pdf
67. Stacionární termokamery FLIR A300 a FLIR A310. *Termokamery FLIR* [online]. c2017 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-a300-flir-a310/>
68. Svařování laserem. *Ústav strojírenské technologie* [online]. 2013 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_laserem_2013__mrna.pdf
69. Svařování MIG/MAG. *BV Group floor steela a. s.: Průmyslové podlahy* [online]. c2009 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.bvgroup.cz/svarovani-mig-mag.php>

70. ŠMÍD, Jiří. Indukční ohřev a nové hybridní technologie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, **2004**(10), [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/indukcni-ohrev-a-nove-hybridni-technologie.html>
71. ŠMÍD, Jiří. Lasery pro průmysl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, **2008**(7), [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
72. Technologie tailored blanks. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, **2002**(7), [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-tailored-blanks.html>
73. TIG - svařování, sváření, svářecí metody. *Svářecí technika Schinkmann.cz* [online]. c1991-2017 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/tig>
74. TIG/WIG svařování. *Fronius* [online]. c2006-2017 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-48E32D67-70A72504/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3920.htm#.WRrpdeWLTIU
75. Toyota to “Pause” and “Reduce Resources” in Factories. *ENGINEERING.com* [online]. 2015 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/9959/Toyota-to-Pause-and-Reduce-Resources-in-Factories.aspx>
76. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. *CWS ANB - česká svářečská společnost* [online]. c2006-2017 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
77. Tvrdost. *Tvrdoměry Rockwell, Brinell, Vickers, SHORE, přenosné stolní* [online]. 2011 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.merentvrdosti.cz/tvrdost.html>
78. VODÁREK, Vlastimil. *Metody studia struktury: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 172 s. ISBN 978-80-248-2559-5.
79. VOJTA, Filip. Princip laseru. *Pedagogická fakulta Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích* [online]. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>
80. Využití výkonových laserů ve strojírenské praxi svařování, dělení a další technologie. *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. 2012 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2012/F5900/um/prezen/mrna_dendero.pdf
81. Welding defects. *Slideshare* [online]. 2015 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/VlastimirNovakovic/welding-defects-45427484>
82. Základy laserové techniky. *Ústav strojírenské technologie* [online]. 2013 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techniky_2013__mrna.pdf
83. Zkoušky tvrdosti. *ELUC* [online]. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1105>
84. Zkouška tvrdosti dle Vickerse. *ConVERTER* [online]. c2002 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-vickers.htm>

85. IRB 2400. *Průmyslové roboty ABB* [online]. 0117n. 1. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-2400>
86. Laser cutting. *Thailandlaser* [online]. [cit. 201-03-23]. Dostupné z: <http://www.thailandlaser.com/laser-machine/laser-cutting/cs2513-yag500x-24>
87. DHI3-F1 Indukční řízený předehřev. *Dawell* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.dawell.cz/produkt/dhi3-f1/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
AC	střídavý proud	[-]
Ag	stříbro	[-]
B	bór	[-]
b ₀	šířka zkoušené délky tyče	[mm]
C	uhlík	[-]
Ce	uhlíkový ekvivalent	[hm. %]
Ce (IIW)	uhlíkový ekvivalent dle IIW	[hm. %]
CET	uhlíkový ekvivalent dle CET	[hm. %]
CO ₂	oxid uhličitý	[-]
Cr	chrom	[-]
CrNi	chrom-niklová	[-]
Cu	měď	[-]
č.	číslo	[-]
ČSN	Česká státní norma	[-]
d	délka úhlopříčky vtisku	[μm]
d ₁	průměr vtisku v první úhlopříčce	[μm]
d ₂	průměr vtisku v druhé úhlopříčce	[μm]
DC	stejnoseměrný proud	[-]
DIN	Německá národní norma (Deutsche Industrie-Norm)	[-]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
EN	Evropská norma	[-]
F	vtlačovací síla	[N]
FeS	sulfid železa	[-]
F _e	zatížení na mezi kluzu	[N]
F _m	maximální zatížení	[N]
HD	objem difúzního vodíku	[ml.100 g ⁻¹]
He	helium	[-]
I	svařovací proud	[A]
ISO	International organization for standardization	[N]
k	intenzita tuhosti spoje	[-]
k ₀	koeficient pro typ spoje	[-]
l ₀	počáteční měřená délka tyče	[mm]
l _u	konečná měřená délka tyče	[mm]
LASER	light amplification by stimulated emission of radiation	[-]
MAG	metal active gas	[-]
max.	maximálně	[-]
MIG	metal inert gas	[-]
min.	minimálně	[-]
Mo	molybden	[-]
Mn	mangan	[-]
MnS	sulfid manganatý	[-]
N	dusík	[-]
Nd	neodym	[-]
Ni	nikl	[-]
Obr.	obrázek	[-]
P	svařovací výkon	[W]
p	tlak	[Pa]
Q _s	vnesené teplo	[kJ·mm ⁻¹]
R _e	mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti	[MPa]

$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
Si	křemík	[-]
SK	svarový kov	[-]
S_0	počáteční průřez tyče	[mm ²]
S_u	konečný průřez tyče	[mm ²]
s	tloušťka plechu	[mm]
TIG	tungsten inert gas	[-]
Tab.	tabulka	[-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	[-]
T_p	teplota přehřevu	[°C]
t	tloušťka svařovaného plechu	[mm]
U	svařovací napětí	[V]
V	vanad	[-]
v_s	svařovací rychlost	[mm·s ⁻¹]
WIG	Wolfram Inert Gas	[-]
YAG	yttrium aluminium granát	[-]
$Y_3Al_5O_{12}$	yttrium aluminium granát	[-]
Z	kontrakce	[%]
ZM	základní materiál	[-]
ZnSe	Zirkon Selenid	[-]
ε	poměrné prodloužení	[-]
η	tepelná účinnost přenosu tepla	[-]
λ	vlnová délka	[nm]
σ	napětí	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Odporové svařování karoserie auta [15]	10
Obr. 2 Foto vzorků a sváru plechu 1.1191	11
Obr. 3 Svařování metodou MIG/MAG [69]	12
Obr. 4 Svařování metodou TIG [14]	12
Obr. 5 Svařování laserovým paprskem [23]	13
Obr. 6 Ohřev plamenem [32]	13
Obr. 7 Indukční ohřev [29]	13
Obr. 8 Sestava keramických tvarovek [50]	14
Obr. 9 Elektrický oblouk metodou TIG [24]	14
Obr. 10 Schéma fázi spojení a svaření dvou povrchů [7]	15
Obr. 11 Porovnání světla žárovky a laseru z pohledu [12] [45]	16
Obr. 12 Základní konstrukce laseru [11]	17
Obr. 13 Princip stimulované emise [34]	18
Obr. 14 Rozdělení laserů podle vlnové délky záření [22] [41]	19
Obr. 15 Příklady Nd:YAG krystalů [60]	20
Obr. 16 Konstrukce Nd:YAG laseru první generace [35]	20
Obr. 17 Konstrukce Nd:YAG laseru druhé generace [57]	21
Obr. 18 Diskový rezonátor Nd:YAG laseru [43]	21
Obr. 19 Základní konstrukce vláknového laseru [57]	22
Obr. 20 ZnSe optické čočky [59]	23
Obr. 21 Základní konstrukce SLAB laseru [35]	23
Obr. 22 Základní konstrukce polovodičového laseru [64]	24
Obr. 23 Graf využití laserových technologií v roce 2014 [9]	25
Obr. 24 Řezání laserem [44]	25
Obr. 25 Laserové navařování [46]	26
Obr. 26 Laserové kalení [42]	26
Obr. 27 Velikosti absorpce v kovech v závislosti na vlnové délce záření [63]	27
Obr. 28 Kondukční režim [38]	28
Obr. 29 Penetrační režim [38]	28
Obr. 30 Svařovací režimy [9]	29
Obr. 31 Princip svařování metodou TIG [13]	30
Obr. 32 Schéma svařovacího hořáku TIG [53]	31
Obr. 33 Rozdělení svarových vad podle tvaru a umístění [76]	32
Obr. 34 Trhlina za horka [33]	33
Obr. 35 Trhlina za studena [76]	33
Obr. 36 Lamelární trhlina [81]	33
Obr. 37 Shluk pórů [26]	33
Obr. 38 Studený spoj [26]	34
Obr. 39 Převýšení svaru [26]	34
Obr. 40 Plochá zkušební tyč pro tahovou zkoušku [48]	35
Obr. 41 Tahový diagram [48]	36
Obr. 42 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [28]	37
Obr. 43 Baumannův otisk [78]	38
Obr. 44 Schéma rozmístění svarů a tahových těles na zkušebním vzorku	44
Obr. 45 Snímek zahřátého materiálu vzorku pomocí TIG 80 A AC	45
Obr. 46 Graf průměrné a okamžité hodnoty teploty materiálu	45
Obr. 47 Snímek zahřátého materiálu vzorku pomocí různých parametrů	45
Obr. 48 Laser systém YLS 2000	46

Obr. 49 Fronius MagicWave 1700	46
Obr. 50 Robot IRB 2400/10	47
Obr. 51 Laserová hlava s hořákem TIG	47
Obr. 52 Upevnění vzorků	48
Obr. 53 Svařené vzorky z materiálu 1.1191	48
Obr. 54 Rozměry svařeného zkušebního tahového tělesa	49
Obr. 55 Rozměry zkušebního tahového tělesa ze základního materiálu	49
Obr. 56 Připravené vzorky na tahovou zkoušku	49
Obr. 57 Průběh tahové zkoušky	50
Obr. 58 Tahový diagram vzorků bez svaru	50
Obr. 59 Tahový diagram vzorků svařených laserem 1000 W	51
Obr. 60 Tahový diagram vzorků svařených laserem 1000 W + TIG 80 A DC	52
Obr. 61 Svarová vada a lom vzorku č. 6	52
Obr. 62 Tahový diagram vzorků svařených laserem 1000 W + TIG 80 A AC 100 Hz	53
Obr. 63 Tahový diagram vzorků svařených laserem 1000 W + TIG 80 A AC 500 Hz	54
Obr. 64 Svarová vada a lom vzorku č. 9	54
Obr. 65 Metalografická laboratoř Akademie věd ČR	55
Obr. 66 Brusné a leštící kotouče	55
Obr. 67 Vyleštěné a naleptané vzorky	55
Obr. 68 Mikrostruktura svarového kovu – laser 1000 W TIG 80 A DC	57
Obr. 69 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – laser 1000 W TIG 80 A DC	58
Obr. 70 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – laser 1000 W TIG 80 A DC	58
Obr. 71 Mikrostruktura přechodové oblasti – laser 1000 W TIG 80 A DC	59
Obr. 72 Měřicí zařízení Zwick 3212 s vyhodnocením vtisku	60
Obr. 73 Průběh tvrdosti vzorku svařeného laserem 1000 W	61
Obr. 74 Průběh tvrdosti vzorku svařeného laserem 1000 W s předehřevem TIG 80 A DC ..	61
Obr. 75 Průběh tvrdosti vzorku svařeného laserem 1000W s předehřevem TIG 80 A AC 100 Hz	61
Obr. 76 Průběh tvrdosti vzorku svařeného laserem 1000W s předehřevem TIG 80 A AC 500 Hz	62
Obr. 77 Využití aktivní zařízení pro úpravu trajektorie při svařování [63].....	63

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení oceli 1.1191 dle normy [17]	11
Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli 1.1191 dle normy [17]	11
Tab. 3 Porovnání laseru a klasického zdroje světla [82]	16
Tab. 4 Chemické složení oceli 1.1191 dle Atestu	42
Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli 1.1191 dle Atestu	42
Tab. 6 Parametry pro výpočet vneseného tepla [7]	43
Tab. 7 Technické parametry pevnolátkového laseru YLS 2000 [86]	46
Tab. 8 Technické parametry svařovacího zdroje Fronius MagicWave 1700 [49]	46
Tab. 9 Technické parametry průmyslového robotu IRB 2400/10 [85]	47
Tab. 10 Svařovací parametry	47
Tab. 11 Naměřené hodnoty vzorků bez svaru	51
Tab. 12 Naměřené hodnoty vzorků svařených laserem 1000 W	51
Tab. 13 Naměřené hodnoty vzorků svařených laserem 1000 W + TIG 80 A DC	52
Tab. 14 Naměřené hodnoty vzorků svařených laserem 1000 W + TIG 80 A AC 100 Hz	53
Tab. 15 Naměřené hodnoty vzorků svařených laserem 1000 W + TIG 80 A AC 500 Hz	54
Tab. 16 Makrostruktura vzorku s rozměry svaru a tepelně ovlivněné oblasti	56
Tab. 17 Naměřené hodnoty tvrdosti materiálu 1.1191	60
Tab. 18 Výpočet hodinové ceny provozu laseru a 1 m svaru [49] [86] [87] [88]	64

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN/
- Příloha 2 Atest materiálu 1.1191, tl. 2 mm, 1000 x 2000
- Příloha 3 Mikrostruktura svařených vzorků

Příloha č.1 Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

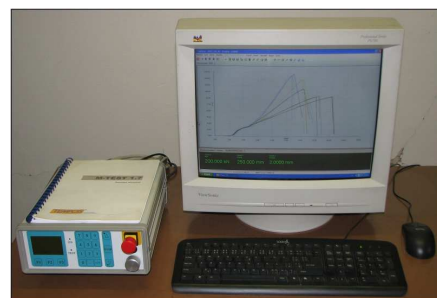
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropské výrobci univerzálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60

 ACRONI d.o.o., Cesta Borisa Kidriča 44, SI-4270 Jesenica		Izdajatelj certifikata Aussteller der Bescheinigung Originator of the document		KONTROLA KAKOVOSTI Telefon: +386 4 584 10 40 Telefax: +386 4 584 10 68 http://www.acroni.si E-mail: miran.pirnat@acroni.si					
		Potrdilo o prevzemu 3.1/ Abnahmeprüfzeugnis 3.1/ Inspection certificate 3.1 Stran/Seite/Page 1 / 2 EN 10 204 3.1 St. / Nr. / No. Datum / Datum / Date 406072720-2 01.08.2014							
Narocilo / Bestellung Nr. / Order No. 4510088393 disp.0		Dobavni list / Lieferschein / Despatch note 406072720 z/vom/from 31.07.2014		Narocnik / Kunde / Customer KOVINTRADE PRAHA SPOL. S R.O. KOVINTRADE HOLECKOVA 39/777 15000 PRAHA 5 CZECH REPUBLIC					
Izdelek / Erzeugnis / Product COLD ROLLED COILS		Vrsta pecl / Erschmelzungsart / Melting furnace E + VD		Znak izvedenca TK Zeichen des sachverständigen Inspectors' stamp 					
Specifikacije / Vorschriften / Specifications EN 10132-3:2000		Tip / W.nr. / Type C 45 E W.Nr. 1.1191		Pov / Fläche / Finish EN 10139					
Obseg dobave / Umfang der Lieferung / Extent of material delivery									
Poz. Pos. Item	St. sarže Schmelzen Nr. Heat No.	St. plošce - kolobarja Walztafel - Band.nr. Plate No. - Strip no.	Teža neto Gewicht Weight kg	Dimenzije Abmessungen Dimensions mm	St. kom. Stückzahl Quantity	St. vzorca Probe Nr. Sample No.			
14	289234	953133	3039	1.5 / 1000 / 2000	1	95313			
15	289234	953143	1979	2 / 1000 / 2000	1	95314			
Mehanske lastnosti / Mechanische Eigenschaften / Mechanical properties									
St. vzorca Probe Nr. Sample No.	Smer vzorca Proben lage Position	Nap.tecenja Dehn grenze Yield % MPa	Nap.tecenja Dehn grenze Yield % MPa	Nat.trdnost Zugfestigkeit Tensile str. % MPa	Raztezek / Bruchdehnung / Elongation AS % ASD % A50 %	Trdota Härte Hardness HV	Eriksen Zilavost / Kerbschlag / Impact pri / smer bei / lage z/posit. °C		
Zahteve Anforderung. Requirem.	MIN MAX	455	570	18	180				
95313	P	323	528	26.0	146				
95314	P	331	522	26.0	145				
G - Glava / Kopf / Top S - Sredina / Mitte / Middle N - Noga / Fuss / Bottom V - Vzdolžno / Längs / Longitudinal P - Precno / Quer / Transverse Upogib / Biege / Bend :									
Kemična analiza / Chemische Zusammensetzung / Chemical Composition									
Sarža/Schmelzen Nr./ Heat No.	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	Ferrite
289234	0.470	0.27	0.75	0.011	0.002	0.25	0.21	0.04	
Opombe / Bemerkungen / Remarks DELIVERY CONDITIN : SPHEROIDISE ANNEALED RADIOACTIVITY CONTAMINATION MEASURED WITH EXPLORANIUM GR - 320 LAB: NO CONTAMINATION We confirm herewith that the delivered material complies with the terms of the order.									
Nákupní objednávka ⁽¹⁾  									

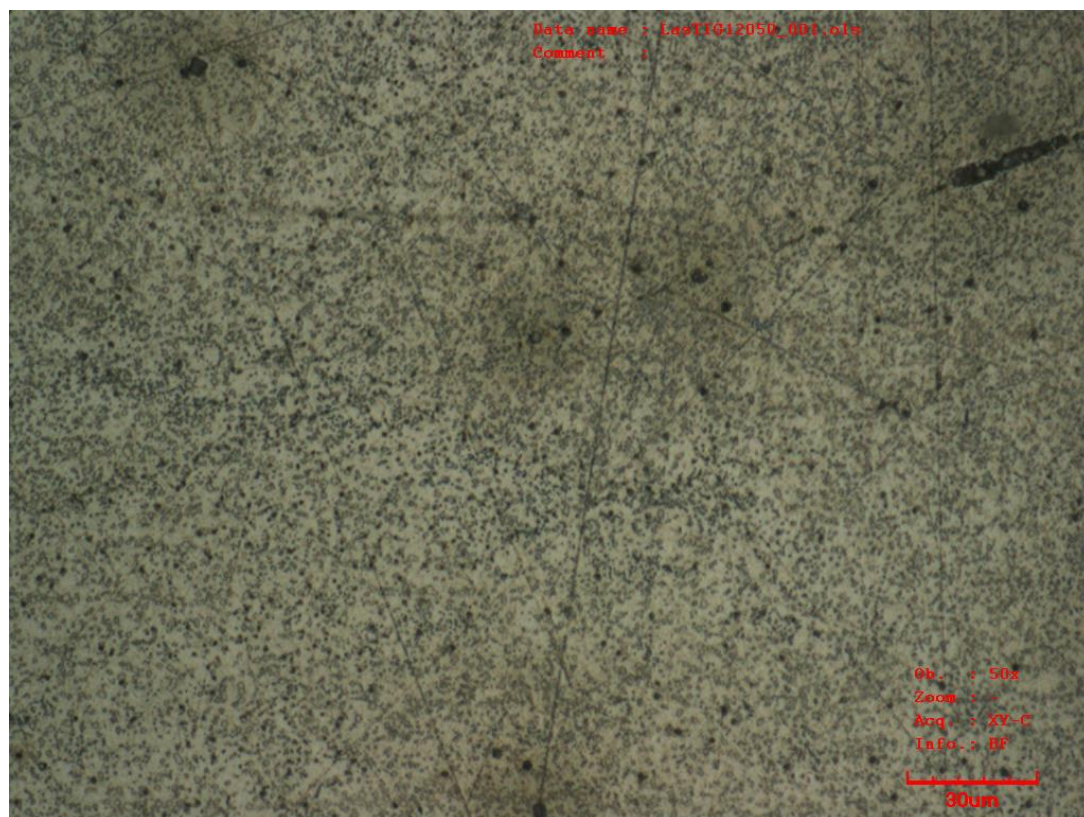
To potrdilo, ki ga izdajamo z uporabo poslovno-informacijskega sistema, je v skladu EN 10204, ods.5 in velja brez podpisa.
 Diese Bescheinigung wurde durch ein geeignetes Datenverarbeitungssystem erstellt und ist gemäss EN 10204, abs.5 ohne Unterschrift gueltig.

ACRONI

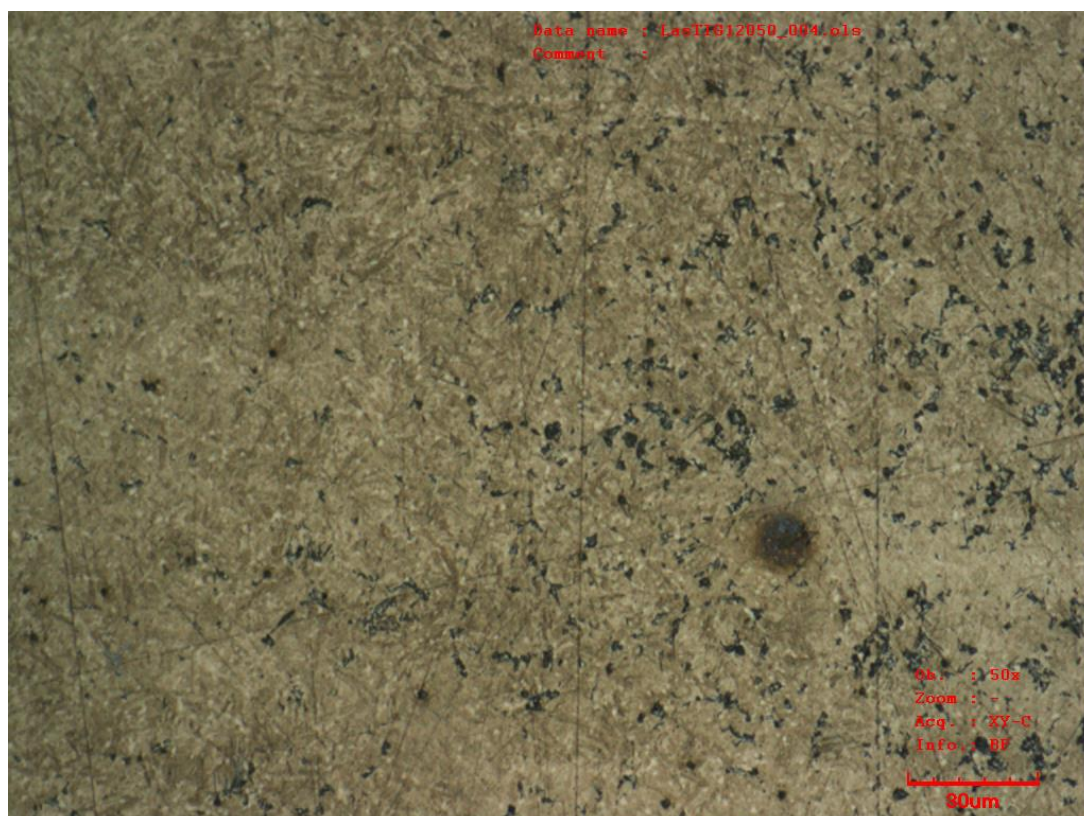
ACRONI d.o.o., Cesta Borisa Kidriča 44, SI-4270 Jesenice

Izdajatelj certifikata
Aussteller der Bescheinigung
Originator of the documentKONTROLA KAKOVOSTI
Telefon: +386 4 584 10 40
Telefax: +386 4 584 10 68
<http://www.acroni.si>
E-mail: miran.pirnat@acroni.si

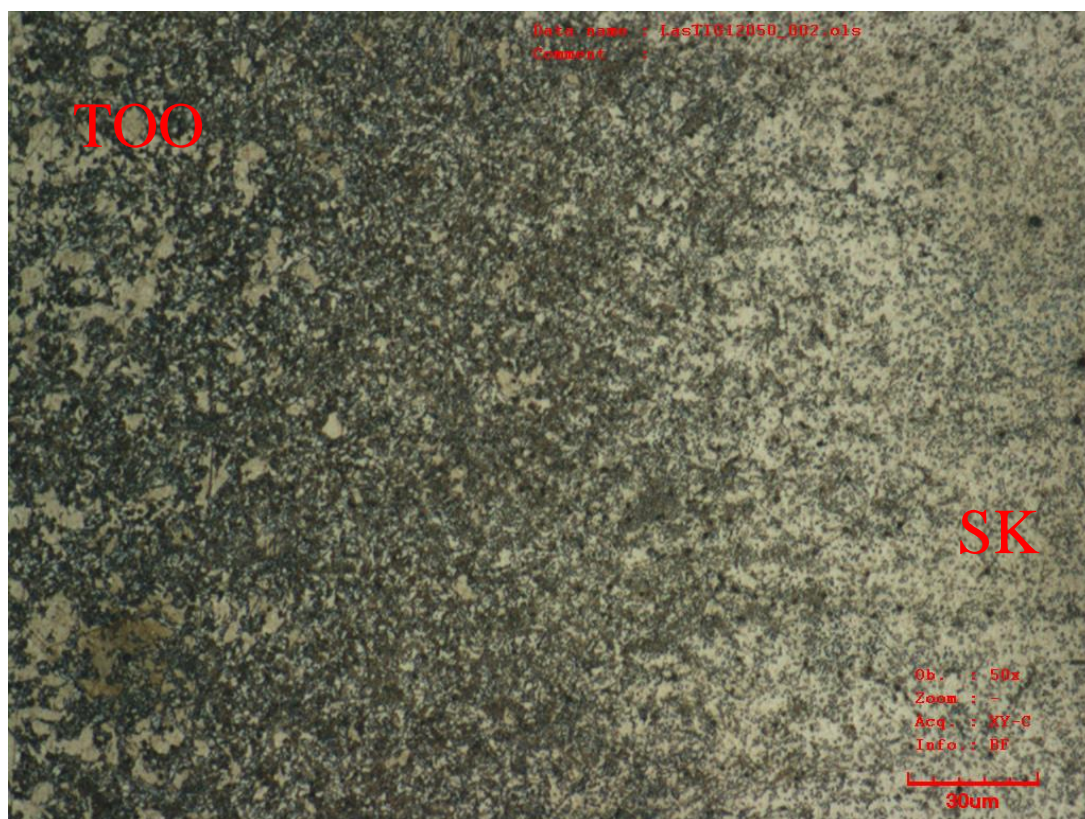
This Certificate has been issued by a qualified Electronic Data System and is valid acc. to EN 10204, para.5 without Signature.
Odgovorna oseba / Werkssachverstaendiger / Works Expert : Miran Pirnat



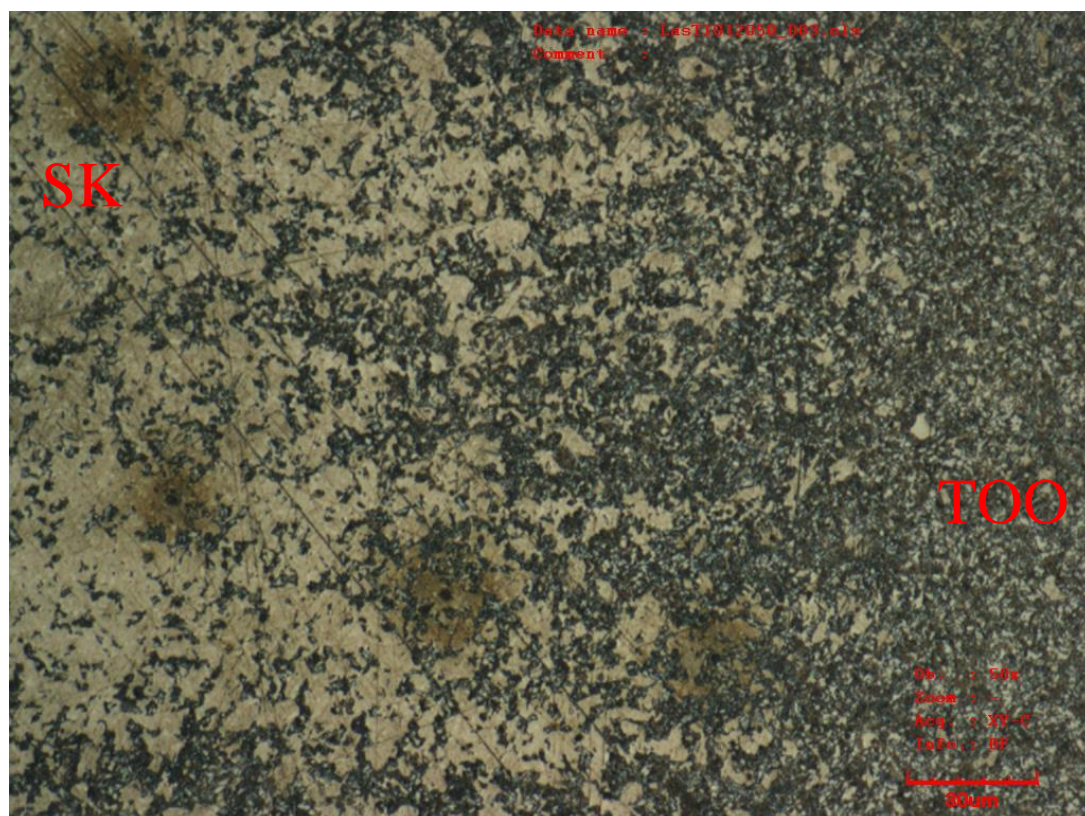
Obr. 1 Mikrostruktura základního materiálu 1.1191



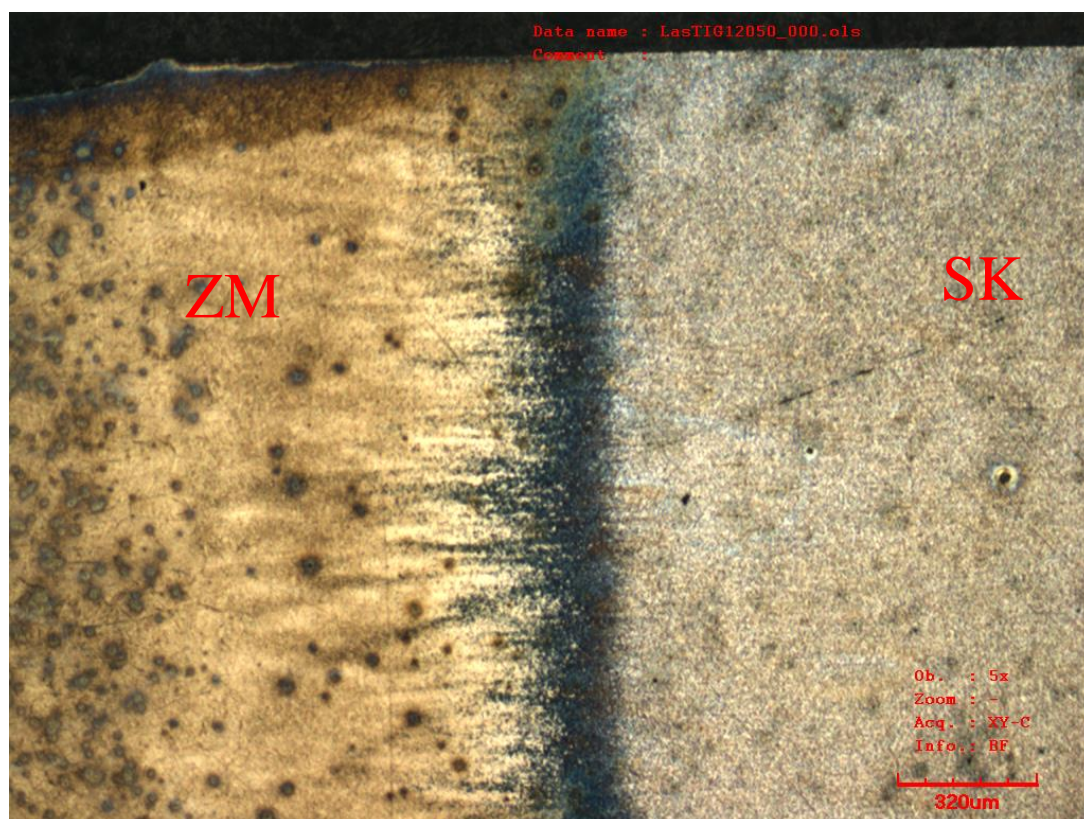
Obr. 2 Mikrostruktura svarového kovu – laser 1000 W



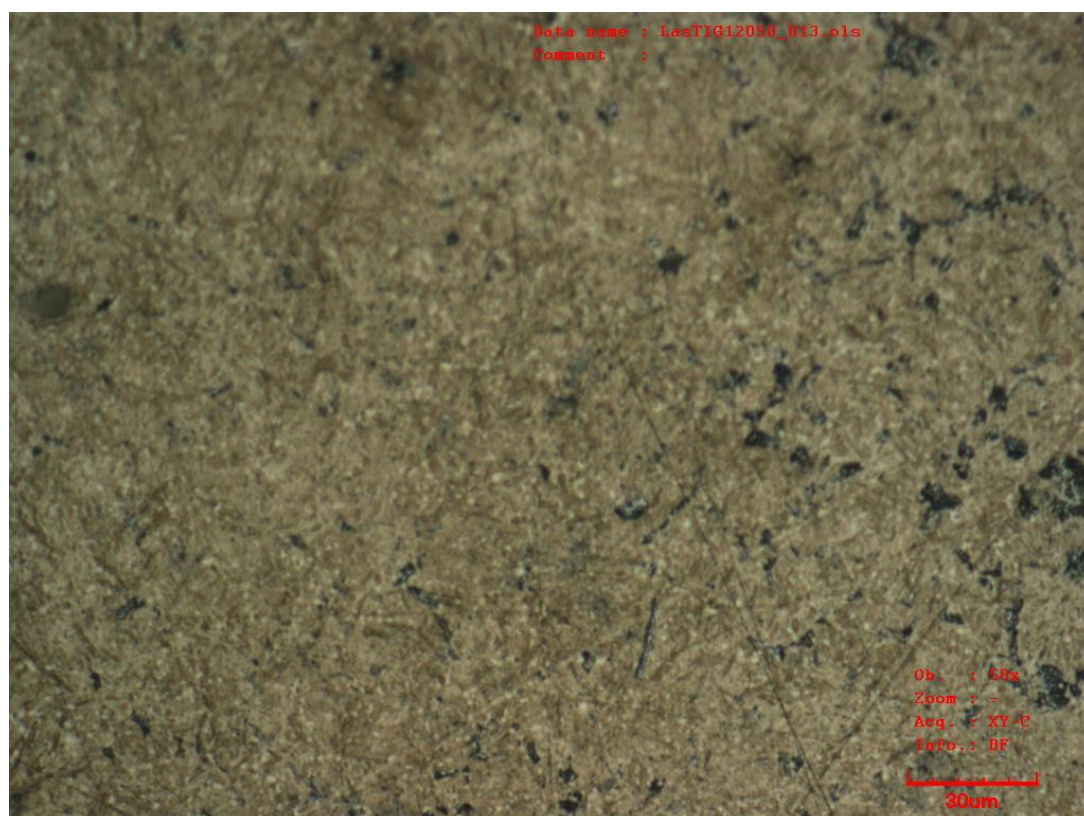
Obr. 3 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – laser 1000 W



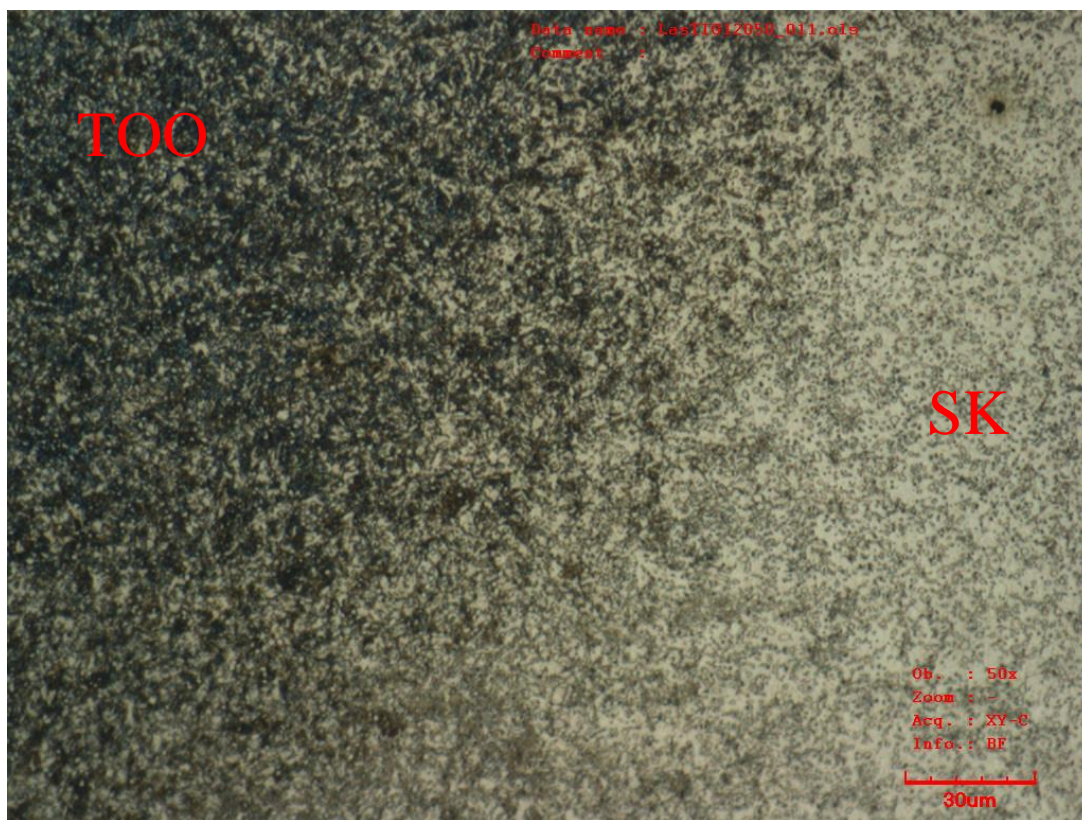
Obr. 4 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – laser 1000 W



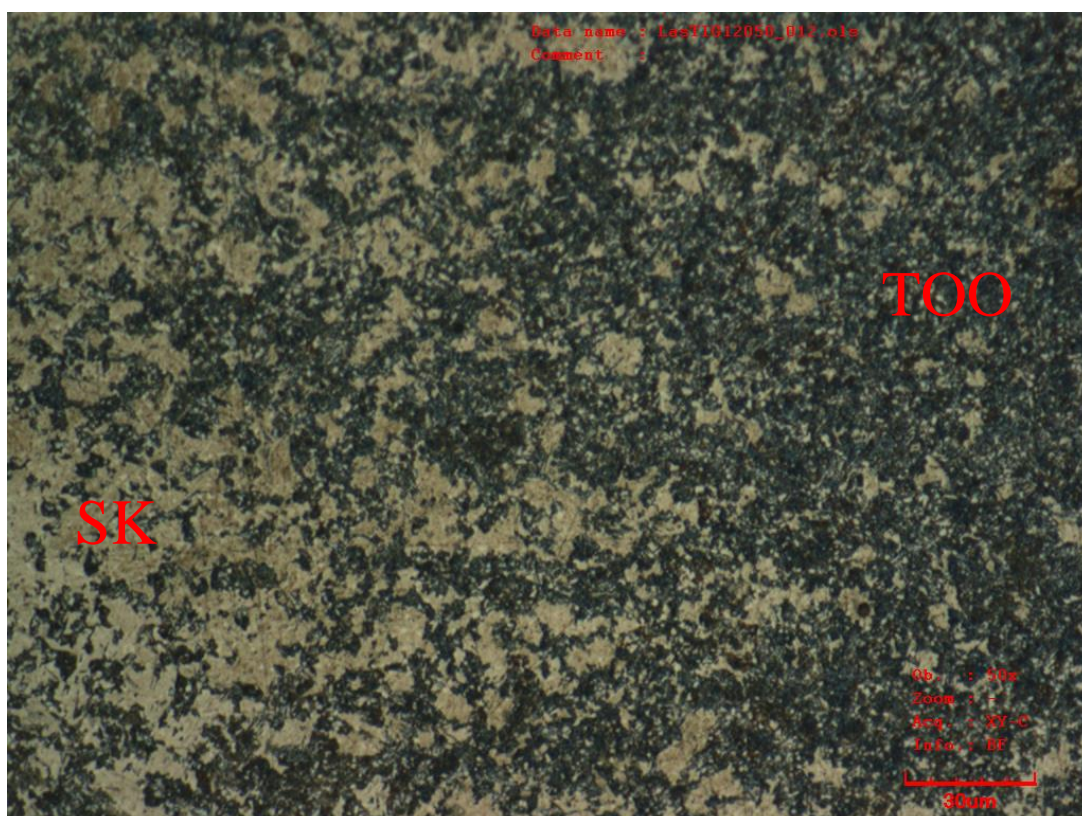
Obr. 5 Mikrostruktura přechodové oblasti – laser 1000 W



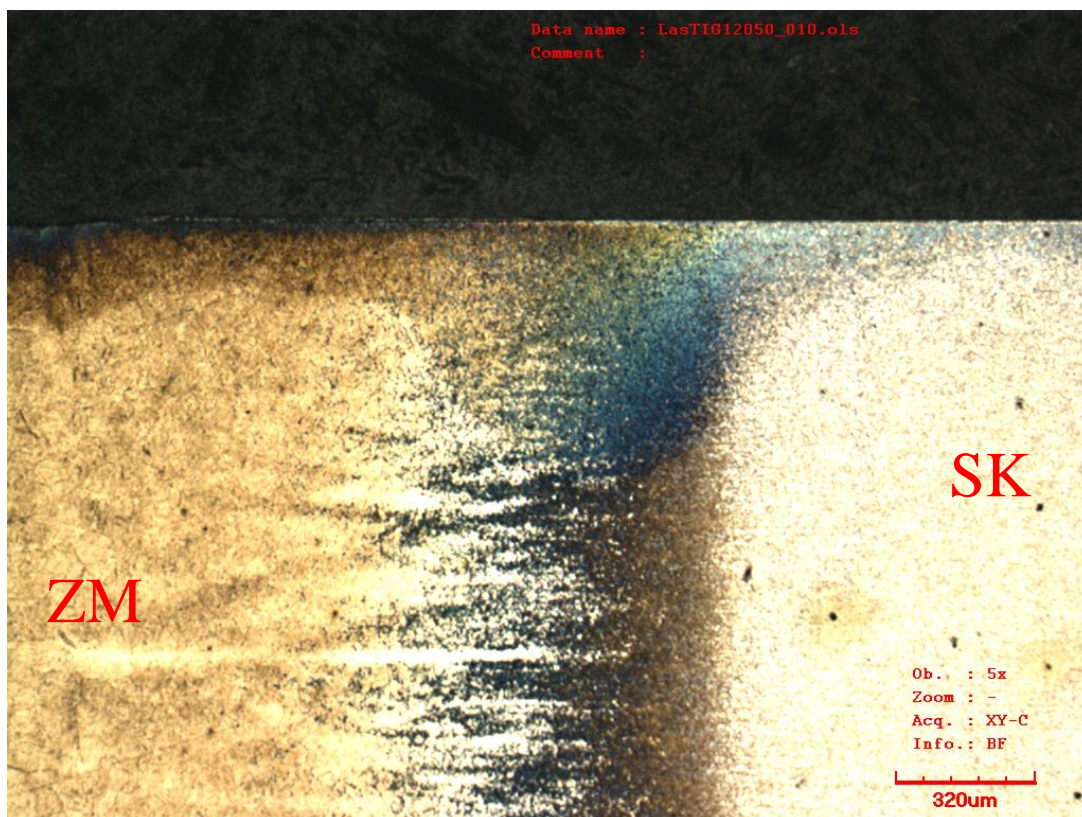
Obr. 6 Mikrostruktura svarového kovu – laser 1000 W TIG 80 A AC 100 Hz



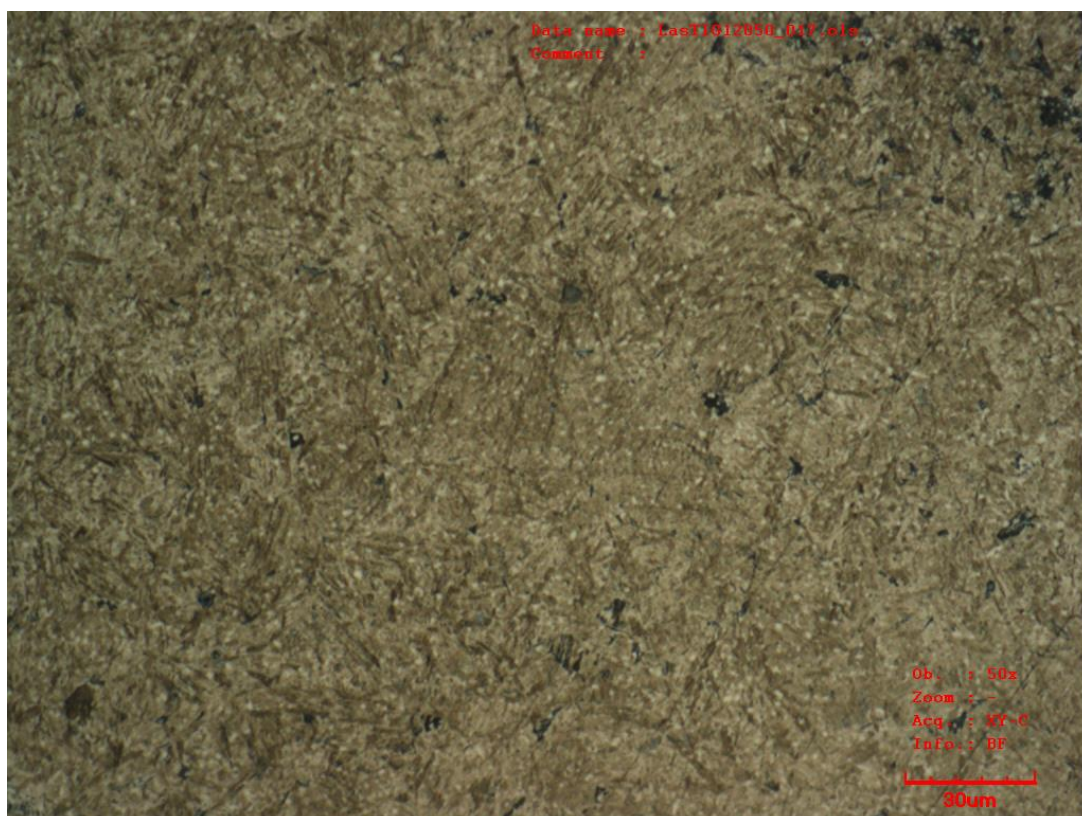
Obr. 7 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – laser 1000 W TIG 80 A AC 100 Hz



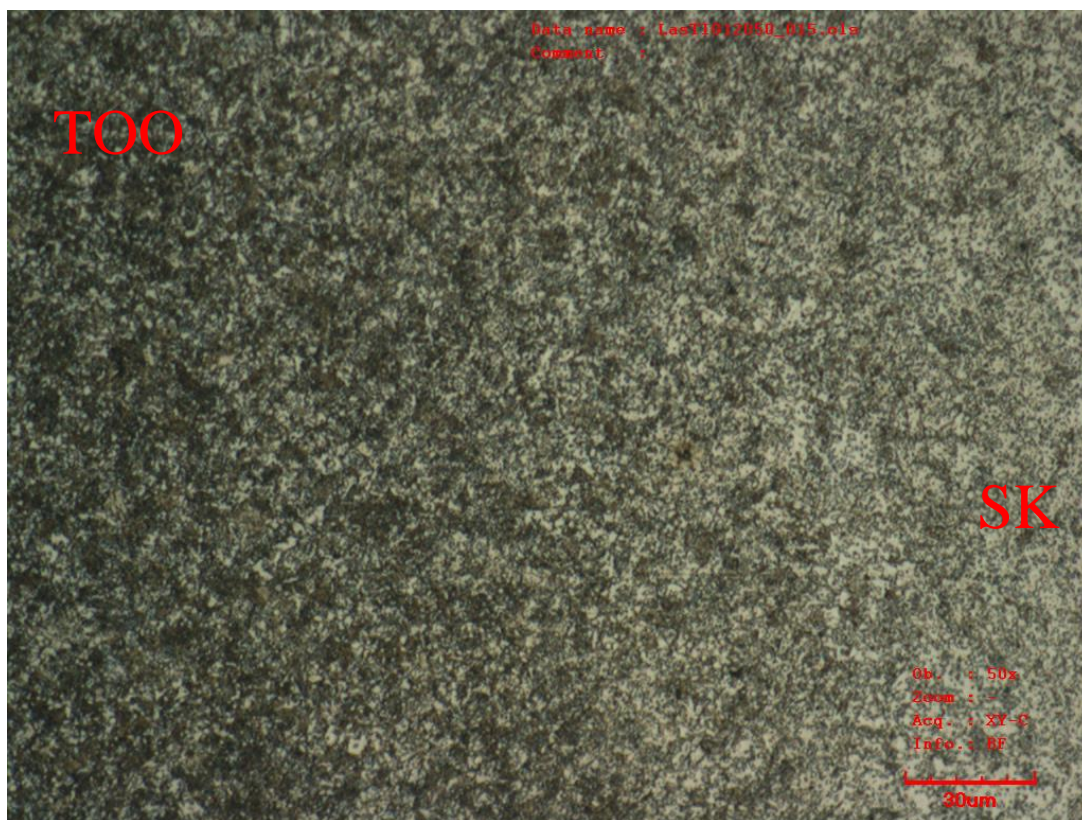
Obr. 8 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – laser 1000 W TIG 80 A AC 100 Hz



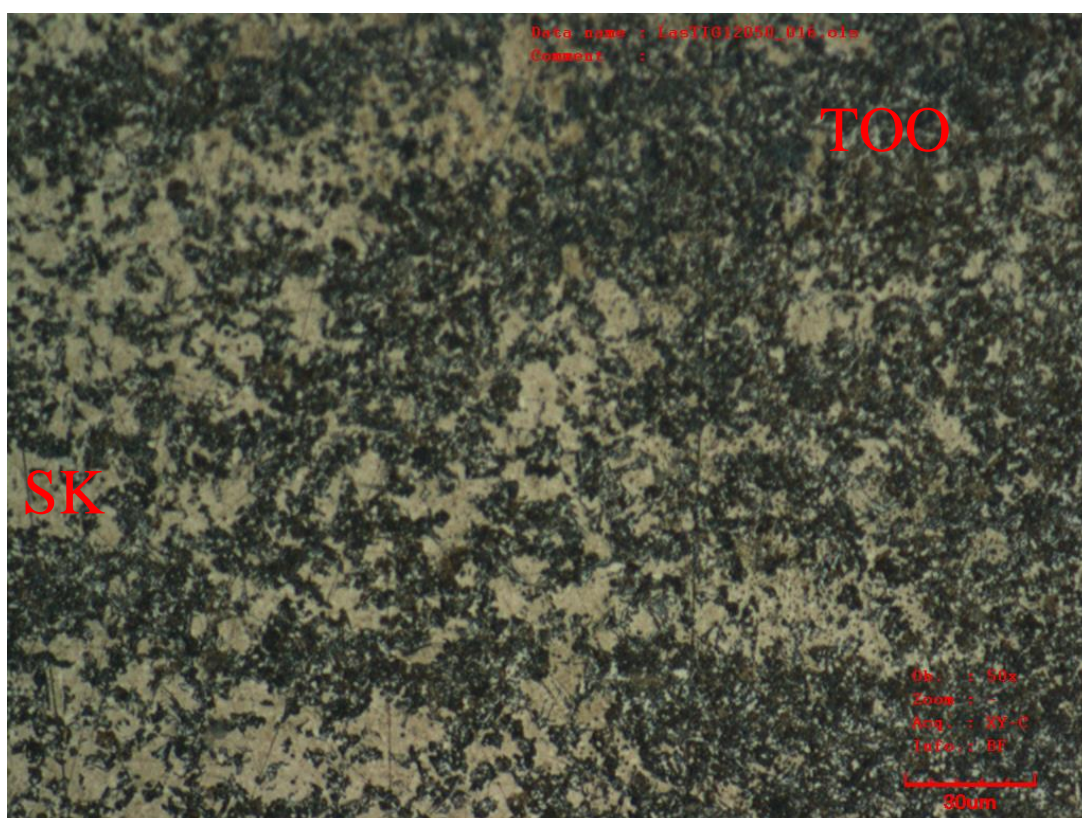
Obr. 9 Mikrostruktura přechodové oblasti – laser 1000 W TIG 80 A AC 100 Hz



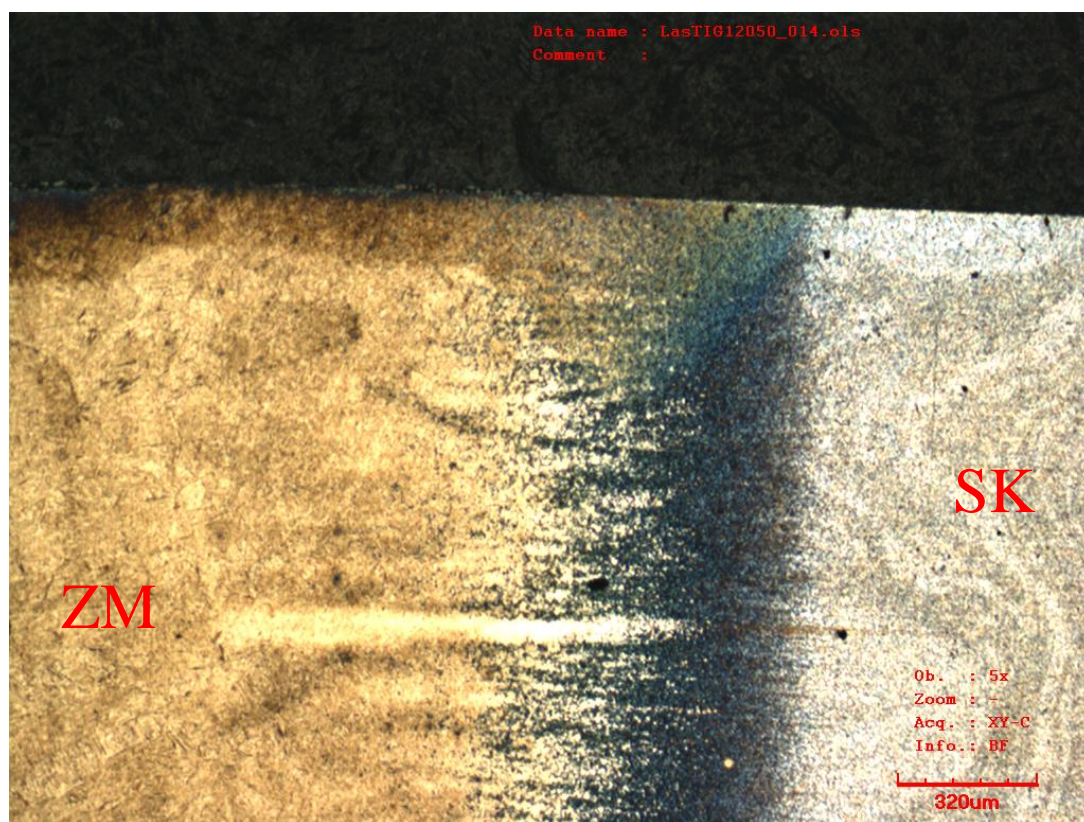
Obr. 10 Mikrostruktura svarového kovu – laser 1000 W TIG 80 A AC 500 Hz



Obr. 11 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – laser 1000 W TIG 80 A AC 500 Hz



Obr. 12 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – laser 1000 W TIG 80 A AC 500 Hz



Obr. 13 Mikrostruktura přechodové oblasti – laser 1000 W TIG 80 A AC 500 Hz