



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VYUŽITÍ HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE LASER-TIG
PRO SVAŘOVÁNÍ BÓREM DOPOVANÝCH
VYSOKOPEVNOSTNÍCH OCELÍ**

USE OF LASER-TIG HYBRID TECHNOLOGY FOR BORON-DOPED HIGH-STRENGTH
STEELS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jaromír Kachlír

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jaromír Kachlíř**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, PhD.**
Akademický rok: 2018/19

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

Využití hybridní technologie Laser-TIG pro svařování bórem dopovaných vysokopevnostních ocelí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bórem dopované oceli se používají v konstrukci automobilové karoserie. Úkolem je provést analýzu vlivu parametrů předeřevu pomocí elektrického oblouku z TIG hořáku na vlastnosti laserového svaru vysokopevnostních ocelí dopovaných bórem. Vzniklé svary vyhodnotit z hlediska makro a mikrostruktury a z hlediska mechanických vlastností, svarových vad. Osvojit si technologii laserového svařování včetně techniky hybridního svařování laser-TIG.

Cíle bakalářské práce:

Osvojit si technologii laserového svařování včetně techniky hybridního svařování laser-TIG. Osvojit si problematiku svařování vysokopevnostních ocelí. Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu. Osvojit si základy metalografického vyhodnocování svaru. Osvojit si metody mechanických zkoušek svarového spoje. Osvojit si metody srovnání ekonomického hlediska rozdílných svařovacích metod.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

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

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

KACHLÍŘ Jaromír: Využití hybridní technologie laser-TIG pro svařování bórem dopovaných vysokopevnostních ocelí.

Tato práce se zabývá využitím obloukového přehřevu pro svařování vysokopevnostní, bórem dopované oceli 22MnB5 hybridní technologií laserTIG a jeho vlivu na výsledný svar v porovnání se svary zhotovenými samotným laserem nebo obloukovou metodou TIG. V rámci experimentu byly svařeny plechy výše zmíněné oceli o tloušťkách 1,3 mm a 1,9 mm. Mimo svarů zhotovených laserem a metodou TIG byla při využití technologie laserTIG jedinou proměnnou veličinou velikost proudu oblouku ($I = 20 \text{ A}, 40 \text{ A}, 60 \text{ A}$). Takto zhotovené svary byly posuzovány z hlediska mezí pevnosti zjištěných tahovou zkouškou. Dále pak byly hodnoceny dle metalografického šetření a průběhů tvrdosti svarem, zjištěných zkouškou tvrdosti dle Vickerse.

Klíčová slova: ocel 22MnB5, laserové svařování, přehřev, laser-TIG

ABSTRACT

KACHLÍŘ Jaromír: Use of laser-TIG hybrid technology for boron-doped high-strength steels.

This thesis deals with the usage of arc preheating for welding high strength boron enhanced steel 22MnB5 using hybrid technology known as laserTIG and also its impact on the final weld compared to welds welded by only the laser or the arc method. During the experiment I welded five sheets of the above mentioned steel 1,3 or 1,9 millimeters wide. Except for the welds fabricated by the laser and the TIG method was the only variable the electric current of the arc ($I = 20, 40, \text{ or } 60 \text{ A}$). Welds welded this way were compared based on strength limits measured by the tensile tests. Additionally were they compared according to the metalographic survey and the progress of weld hardness, calculated using the Vickers hardness test.

Keywords: steel 22MnB5, laser welding, preheating, laser-TIG

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KACHLÍŘ, Jaromír. *Využití hybridní technologie Laser-TIG pro svařování bórem dopovaných vysokopevnostních ocelí*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116800>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 24. 5. 2019

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto vřele děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, PhD. za vstřícný přístup, pomoc s uskutečněním experimentu a cenné rady a připomínky týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych rád Poděkoval panu Ing. Kamilu Podanému, PhD. za pomoc s vykonáním tahové zkoušky, panu Ing. Ondřeji Ambrožovi za zpracování metalografických vzorků a panu Ing. Petru Horníkovi za pomoc s přípravou a svaření vzorků. V neposlední řadě bych také rád poděkoval své rodině, přátelům a spolužákům za podporu během studia.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.1 Varianty řešení.....	11
2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ.....	15
2.1 Svařování laserem.....	15
2.1.1 Princip svařování laserem.....	16
2.1.2 Rozdělení laserů.....	18
2.1.3 Hybridních technologie laseru.....	21
2.1.4 Svarové vady laseru].....	22
2.2 Svařování metodou TIG.....	24
2.2.1 Rozdělení metody TIG.....	25
2.2.2 Ochranné plyny pro metodu TIG.....	26
2.2.3 Svařovací hořáky a elektrody pro TIG.....	26
2.3 Využití přehřevu.....	28
2.4 Bórem dopované oceli.....	31
2.4.1 Chemické složení bórových ocelí.....	31
2.4.2 Tepelné zpracování bórových ocelí.....	31
2.5 Zkoušky svaru.....	33
2.5.1 Zkouška tahem.....	34
2.5.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse.....	36
2.5.3 Metalografické šetření.....	37
2.5.4 Nedestruktivní zkoušky.....	38
3 EXPERIMENT.....	41
3.1 Volba materiálu.....	41
3.2 Vyhotovení zkušebních svarů.....	42
3.3 Tahová zkouška.....	45
3.4 Metalografické šetření.....	48
3.4.1 Vyhodnocení makrostruktury.....	49
3.4.2 Vyhodnocení mikrostruktury.....	52
3.5 Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse.....	54
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	58
5 ZÁVĚRY.....	60
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam grafů	
Seznam příloh	

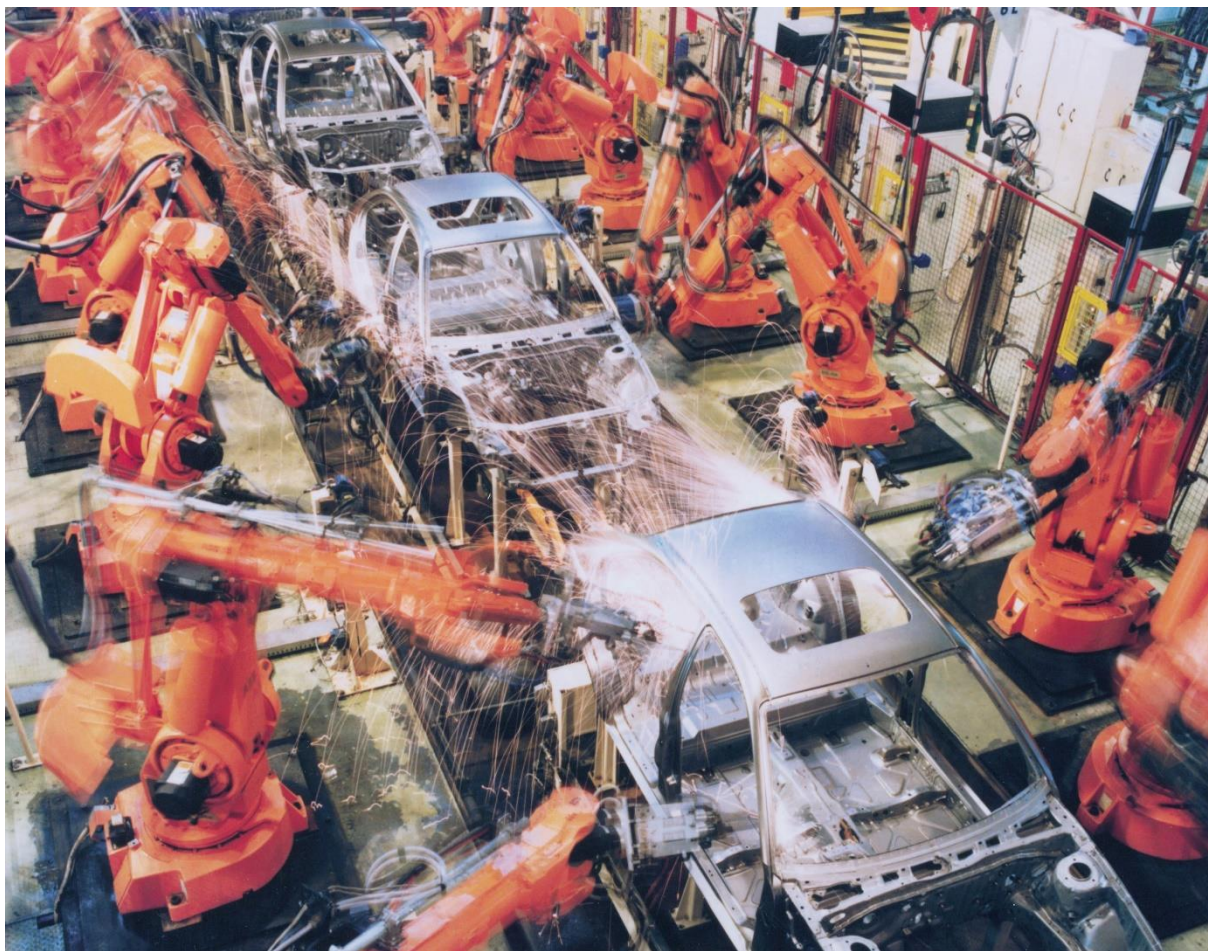
ÚVOD [2], [3]

S rychlým rozvojem průmyslu se zvyšují nároky jak na aplikované technologie, tak i na jimi zpracovávané materiály. Jinak tomu není ani v automobilovém průmyslu. Na karoserie, ale i výrobu automobilů obecně jsou v dnešní době kladeny vysoké nároky a to jak z hlediska bezpečnostního, tak i ekonomického a environmentálního. S tím souvisí i neustálý vývoj používaných materiálů a jejich zpracování.

Pro snížení hmotnosti karosérií, avšak zachování jejich pevnostních charakteristik jsou v posledních letech stále častěji využívány pro určité komponenty vysokopevnostní oceli dopované bórem. Tyto materiály jsou specifické svým zpracováním, kdy při tváření za tepla dojde k jejich prudkému ochlazení, čímž dojde k zakalení a zvýšení pevnostních charakteristik. Je tak dosahováno dobré tvařitelnosti při příznivých bezpečnostních parametrech.

Mimo vhodného materiálu je však důležitá i co nejefektivnější technologie jeho zpracování, a to i s ohledem na stále častější a intenzivnější automatizaci výroby. Právě z těchto důvodů jsou čím dál častěji využívány průmyslové lasery, jenž pro svou efektivitu a lehkou programovatelnost skýtají pro automobilový průmysl řadu výhod.

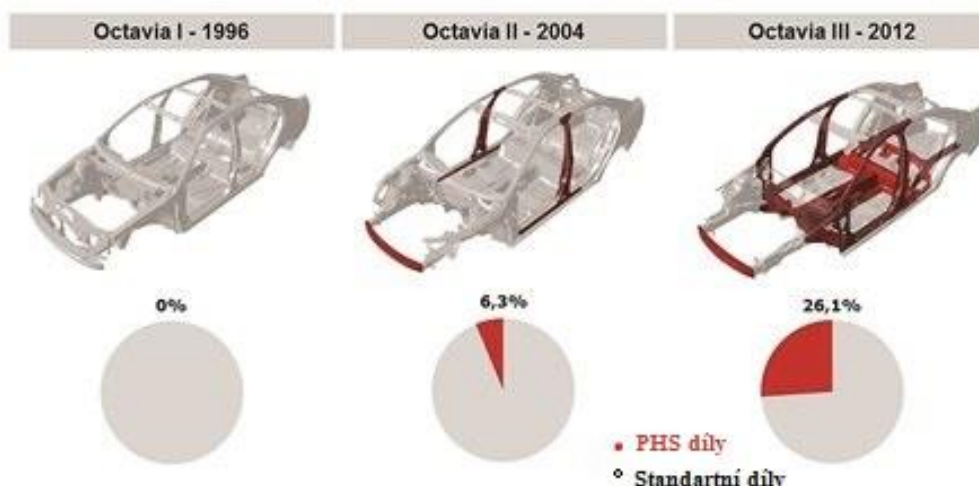
I v odvětví laserového svařování se však dají najít nedostatky. Je tedy nasnadě se s těmito vadami vypořádat. Jednou z cest mohou být hybridní technologie laseru využívající obloukových metod pro předehřev, jako je například laserTIG.



Obr. 1 Automatizovaná svařovací linka v automotive [4]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [2], [3], [5], [6], [7]

Se za tepla tvářenými vysokopevnostními oceli (PHS – Press Hardened Steel) se v dnešní době setkáváme především v automobilovém průmyslu. Díky svým výborným pevnostním a plastickým vlastnostem jsou využívány čím dál častěji pro výrobu bezpečnostních prvků karoserie, jako jsou nosníky, uchycení nárazníku nebo boční výztuhy, na které jsou kladeny vysoké nároky z hlediska odolnosti proti nárazu. Tyto oceli postupně nahrazují levnější, ale mnohem hůře zpracovatelnější a dražší slitiny hliníku. Využití těchto materiálů je čím dál masivnější, jak ilustruje obr. 2, jenž vykresluje zastoupení těchto ocelí v konstrukcích karoserie vozů Škoda.



Obr. 2 Podíl zastoupení PHS ocelí v karoseriích vozů Škoda [5]

Jednou z takovýchto ocelí je i jemnozrnná nízkouhlíková bórová ocel 22MnB5, jenž je předmětem experimentu. Tato ocel je při dodání tvořena feriticko-perlitickou strukturou a vykazuje mnohem nižší mechanické vlastnosti, než jsou pro bezpečnostní prvky karoserií požadovány. Požadovaných hodnot daných charakteristik je dosahováno až následným tepelným tvářením tohoto materiálu a to vlivem přítomnosti malého množství bóru ve struktuře (tab. 1).

Tab. 1 Chemické složení oceli 22MnB5 dle normy [7]

Prvek	C	Mn	Si max.	S max.	P max.	Al	Ti	B
Obsah (hm. %)	0,19 až 0,25	1,10 až 1,40	0,40	0,015	0,025	0,02 až 0,06	0,020 až 0,050	0,0008 až 0,005

Jak již bylo zmíněno, svých vysokých pevnostních charakteristik dosahují tyto oceli až při tepelném tvářením, kdy docházejí k jejich kalení při lisování a změně struktury, čímž dochází ke zvýšení meze kluzu a meze pevnosti (tab. 2). Tento fakt umožňuje zmenšování tloušťky použitých plechů, což má za následek snížení hmotnosti karoserie. Z toho vycházejí další přednosti, jako je úspornější provoz automobilů a příznivý dopad na životní prostředí.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli 22MnB5 [2]

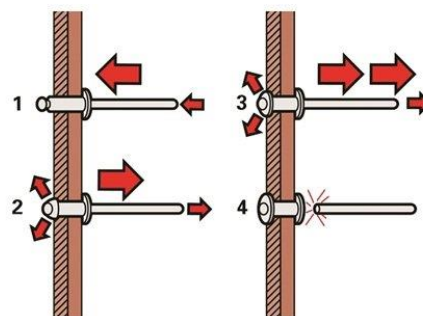
Mechanické vlastnosti vyžíhané oceli 22MnB5	Mechanické vlastnosti zakalené oceli 22MnB5
Mez kluzu $R_{p0,2} = 350$ až 550 MPa	Mez kluzu $R_{p0,2} = 950$ až 1205 MPa
Mez pevnosti $R_m = 500$ až 700 MPa	Mez pevnosti $R_m = 1300$ až 1650 MPa
Tažnost A_{80mm} min. = 10 %	Tažnost A_{80mm} min. = 4,5 %
	Tažnost A_{50mm} min. = 5 %

1.1 Varianty řešení [3], [6], [8], [10], [12], [15], [17]

Karoserie automobilů jsou vyráběny z různorodých materiálů s odlišnými vlastnostmi a proměnlivými tloušťkami. Tyto komponenty je nutno spolehlivě spojit tak, aby jejich spojení nedegradovalo vlastnosti samotných materiálů a byla zaručena požadovaná bezpečnost. Mimo to je v automobilovém průmyslu kladen velký důraz i na estetickou stránku věci, což je dalším významným faktorem ve volbě vhodné technologie.

Pro spojování výše popsaného materiálu lze využít celá řada technologií (PŘÍLOHA 1) a to ať už se jedná o tvorbu spojů rozebíratelných či nerozebíratelných, přičemž každá z metod skýtá výhody i nevýhody. Je tedy nutné vybrat vhodnou metodu spojení daných komponent a popřípadě i způsob tepelného ovlivnění materiálu (přehřev) pro maximální kvality spoje, zvýšení produktivity a ekonomickou výhodnost.

- Spojení pomocí šroubů či nýtů (obr. 3) – pro požadované spojení komponentů je možné využít mechanických spojů za pomoci nýtů či šroubů. V případě nýtů se jedná o nerozebíratelné spoje a lze se setkat s celou řadou variant nýtování. Jeho princip vychází ze spojení pomocí dřívku a hlavy na každé jeho straně, přičemž k vykování závěrné hlavy dojde po průchodu nýtu příslušnými otvory. Spoj s využitím šroubů může být buď rozebíratelný nebo nerozebíratelný, dle použitého typu šroubu.



Obr. 3 Princip nýtování [8]

- Lepení (obr. 4) – jednou z nekonvenčních metod spojování materiálů je lepení, kdy je pro vytvoření spoje dvou materiálů aplikováno lepidlo, jenž se vyznačuje dobrou přilnavostí k oběma těmto povrchům. Pevnost takovýchto spojů závisí pak mimo jiné na vhodné volbě lepidla, jenž se projevuje na následujících čtyřech parametrech:

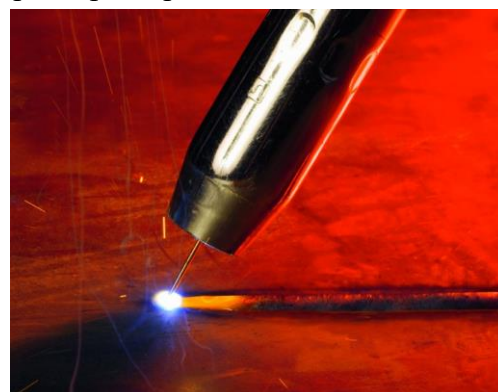
- Adheze – přilnavost lepidla k lepenému povrchu
- Koheze – soudržnost lepidla (vnitřní pevnost)
- Smáčivost povrchu
- Pevnost lepeného povrchu



Obr. 4 Příklad lepeného spoje [9]

Na trhu existuje celá škála lepidel. Mimo vhodného výběru je pro vytvoření kvalitního spoje důležitá i správná příprava lepených ploch, vhodná tloušťka lepidla a vhodná metoda jeho nanášení.

- Svařování metodou MAG (obr. 5) - „Metal Active Gas“ je jednou z nejrozšířenějších svařovacích technologií v průmyslu, zejména pak pro plně automatizované či poloautomatizované linky. Lze ji však aplikovat i ručně. Svařování probíhá v atmosféře aktivního plynu (např. CO₂), který ovlivňuje chemické děje během procesu. V praxi je tato technologie využívána pro celou řadu ocelí a to jak ocelí nelegovaných, nízkolegovaných, tak i vysokolegovaných.



Obr. 5 Svařování metodou MAG [11]

- Odporové bodové svařování (obr. 6) – tato metoda tlakového svařování využívá průtok elektrického proudu svařovaným místem, čímž dochází k natavení materiálů a jejich následným stlačením dochází ke vzniku spoje. Tato technologie se vyznačuje vysokou rychlostí svařování,

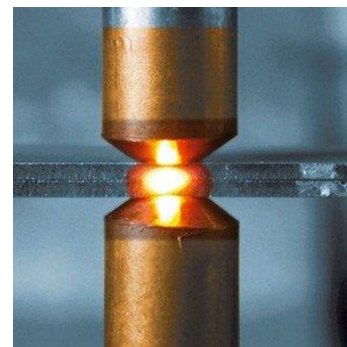
univerzálností z hlediska spojovaných materiálů, možností svařovat ve všech polohách nebo vhodností pro malosérie i velkovýrobu. Takto vytvořený svar je složen z bodových svarů o velikostech průměru použité elektrody.

- Svařování laserovým paprskem (obr. 7) – je jednou z nejmodernějších a nejprogresivnějších technologií svařování. Principem této metody je zaostření laserového svazku, zaměřující velmi malou plochu, přesně do místa svaru a následnému přenosu tepla.



Obr. 7 Svařování laserem [14]

Dochází k natavení a svaření materiálu, přičemž díky vysoké plošné hustotě výkonu laserového paprsku je dosahováno velmi štíhlých svarů při minimální tepelně ovlivněné oblasti, čímž tato metoda převyšuje obloukové technologie svařování. Mezi její další přednosti se řadí vysoké svařovací rychlosti, snadná automatizace a s tím spojená přesnost a kvalitní svary. Své uplatnění nachází jak při svařování dobře svařitelných ocelí, slitin zirkonu nebo titanu, plastů, ale i pro materiály obtížně svařitelných. Nevýhodné jsou vysoké pořizovací náklady a složité přípravkování. Je tedy určena primárně pro velkosériové výroby.



Obr. 6 Příklad odporového bodového svařování [13]

Z výše uvedených technologií byla jako neoptimálnější vyhodnocena metoda svařování laserovým paprskem a to pro svou schopnost tvorby svarů s minimální TOO. Dále pak pro možnost tvorby liniových svarů, čímž na rozdíl od svarů bodových dochází ke zvýšení pevnosti svaru. Tato technologie je ve většině případů využívána bez přídavného materiálu. Její snadná automatizace a vysoká rychlost svařování bude mít příznivý dopad na ekonomické hledisko výroby zejména velkých sérií.

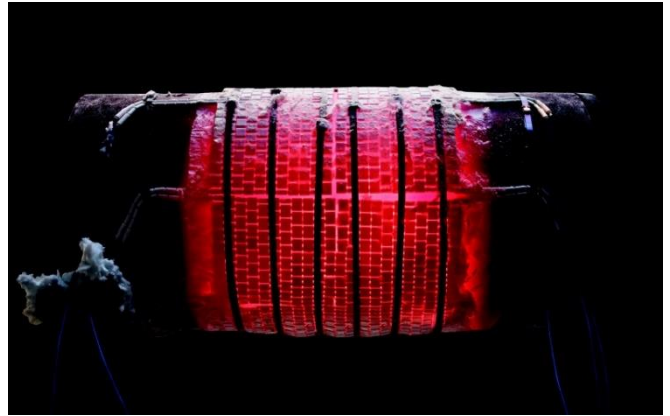
Jedná se o metodu tavného svařování, jenž vnesené teplo soustředí na velmi malou plochu. S tím pak souvisí vysoká rychlost ochlazování takto tepelně ovlivněného materiálu, přičemž hrozí negativní ovlivnění jeho struktury. Aby se těmto nežádoucím změnám zabránilo, je využíváno předehřevu, který snižuje rychlost ochlazování. Pro předehřev materiálu je možno využít některou z těchto metod:

- Předehřev plamenem (obr. 8) – jedná se o nejjednodušší aplikaci lokálního předehřevu. Je často využívána pro své jednoduché použití, levné a dostupné vybavení a univerzálnost, jelikož nevyžaduje zdroj elektrické energie. Zdrojem tepla je plamen kyslíko-acetylenový či propanbutanový. Nevýhodou je špatná fokusace plamene, čímž dochází k teplotnímu ovlivnění zbytečně velké plochy součásti. Dál to jsou špatná obtížná regulace teploty plamene a nebezpečí oxidace povrchu materiálu. Je využíván pro předehřev kotlů, zásobníků nebo tlakových nádob.



Obr. 8 Předehřev plamenem [16]

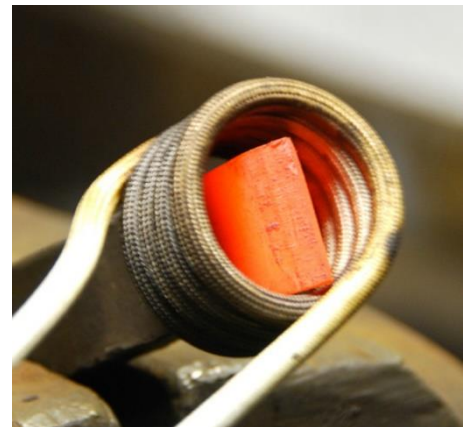
- Předehřev v peci – tato metoda využívá odporového ohřevu, kdy je teplo generováno průchodem elektrického proudu odporovým drátem. Velikost tohoto tepla je pak závislá na elektrickém odporu materiálu drátu. Teplo je přenášeno vedením a dochází k ohřevu celé součásti, což vede k dlouhým časům ohřívání. To je eliminováno pomocí přenosných zdrojů (obr. 9), jako jsou například keramické tvarovky, které jsou vyplněny odporovými dráty. Ty jsou přikládány k součásti a lze tak alespoň částečně lokalizovat ohřev. Pro lokální ohřev je dále možné využít topných pásů, spirál nebo deček. Tyto metody jsou též využívány při ohřevu



Obr. 9 Odporový předehřev [17]

rozměrných součástí, které by komora pece nepojala. Výhodou této metody je přesná korekce požadované teploty. Je tedy vhodná pro aplikace, kde je na tento aspekt kladen důraz. Mimo to je možné odporové pece využít i pro další operace, jako je například žihání svařenců. Je však nevhodná pro operace, kde je požadován rychlý lokální ohřev. Nevhodně nastavené parametry ohřevu pak mohou způsobovat nežádoucí hrubnutí zrna materiálu, což může negativně ovlivnit jeho mechanické vlastnosti.

- Indukční předehřev (obr. 10) – principem této technologie je generování tepla za pomoci vířivých proudů, jenž jsou vyvolávány elektromagnetickým polem induktoru, například cívky, kterým protéká střídavý proud. Pro menší součásti lze využít indukčních pecí, kde dochází k prohřátí celého povrchu daného komponentu. Indukční předehřev je využíván zejména u trubek a profilů v automobilovém, mechanickém či leteckém průmyslu. Jedná se o bezemisní, tichou technologii. Je možné využívat i mobilních zařízení pro předehřev, což je využíváno například v těžbařském průmyslu pro předehřátí svarů velkých součástí přímo v místě. Tato metoda předehřevu vyniká svou rychlostí a efektivitou, jelikož nedochází k přenosu tepla, ale součástka je přímo zahřívána v důsledku působení již zmíněných vířivých proudů. Další výhodou je minimální riziko oxidace povrchu a snadná lokalizace místa předehřevu. V neprospěch této metody hovoří vysoké pořizovací náklady a obtížná aplikace u tvarově složitých součástí.



Obr. 10 Indukční ohřev [18]

- Předehřev elektrickým obloukem – pro předehřev elektrickým obloukem je využíváno zejména technologie TIG (obr. 11) nebo MIG/MAG. Tyto metody vynikají svou rychlostí, dobrou fokusovatelností a snadnou operativností. Výhodou je možnost kombinace např. s laserovým paprskem do jedné svařovací hlavy, čímž je celý proces předehřevu (či dohřevu) ještě zefektivněn. Důležitá je však správná konfigurace parametrů laseru i obloukové technologie tak, aby nedocházelo k nadměrnému ohřevu či dokonce natavování materiálu obloukem. Kombinováním těchto metod došlo k vývoji tzv. hybridních svařovacích technologií.



Obr. 11 Elektrický oblouk TIG [15]

Z výše uvedených metod předehřevu byla zvolena technologie elektrického oblouku, konkrétně metodou TIG. Ve prospěch této technologie hovoří jak možnost fokusace vnášeného tepla a snadná korekce svařovacích parametrů, tak i možnost kombinace metody TIG s laserovým paprskem. Bude tedy využíváno hybridní technologie LASTIG. Předehřev i samotné svařování tedy budou probíhat v jednom technologickém postupu. Tím dojde k zefektivnění celého procesu, což by mimo jiné mělo mít pozitivní vliv i na ekonomické hledisko daného problému.

2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ [6], [10], [12], [19]

Svařování patří spolu s tvářením, obráběním a povrchovými úpravami mezi základní strojírenské technologie. Ačkoliv mezi těmito technologiemi nezaujímá z hlediska rozsahu primární postavení, určitě lze říct, že zpracovává největší objem materiálů.

Po dlouhou dobu bylo jedinou známou metodou nerozebíratelného spojení dvou kovů tzv. kovářské svařování. Teprve na konci 19. století a v průběhu století 20. došlo k prudkému rozvoji tohoto odvětví. Nejprve došlo k rozmachu elektrického oblouku a obalovaných elektrod, což dalo vzniknout technologiím, jako jsou například bodové nebo švové svařování. Následoval objev svařování v ochranné atmosféře inertních plynů, které bylo využíváno pro svařování slitin hliníku či hořčíku. Opravdového boomu se toto odvětví dočkalo ve druhé polovině 20. století s vývojem nekonvenčních svařovacích metod – laseru, elektronového paprsku nebo svařování plazmou.

Principem svařování je vytvoření pevného nerozebíratelného spojení za působení koncentrovaného tepla, tlaku, případně obojím s možností použití přídavného materiálu o daném chemickém složení. Působením meziatomových sil na plochách aktivovaných teplem či tlakem dochází ke vzniku tohoto spojení. Pro správné svařování je nutné ovládat znalosti chemie, fyziky, metalurgie a dalších odvětví.

S využitím nových technologií, jež příznivě ovlivňují proces výroby, stále roste i význam svařování. S tím jsou však spojeny zvyšující se nároky na tyto technologie a výrobky jimi zhotovenými. To vede k neustálému vývoji a posouvání zejména nekonvenčních svařovacích metod kupředu.

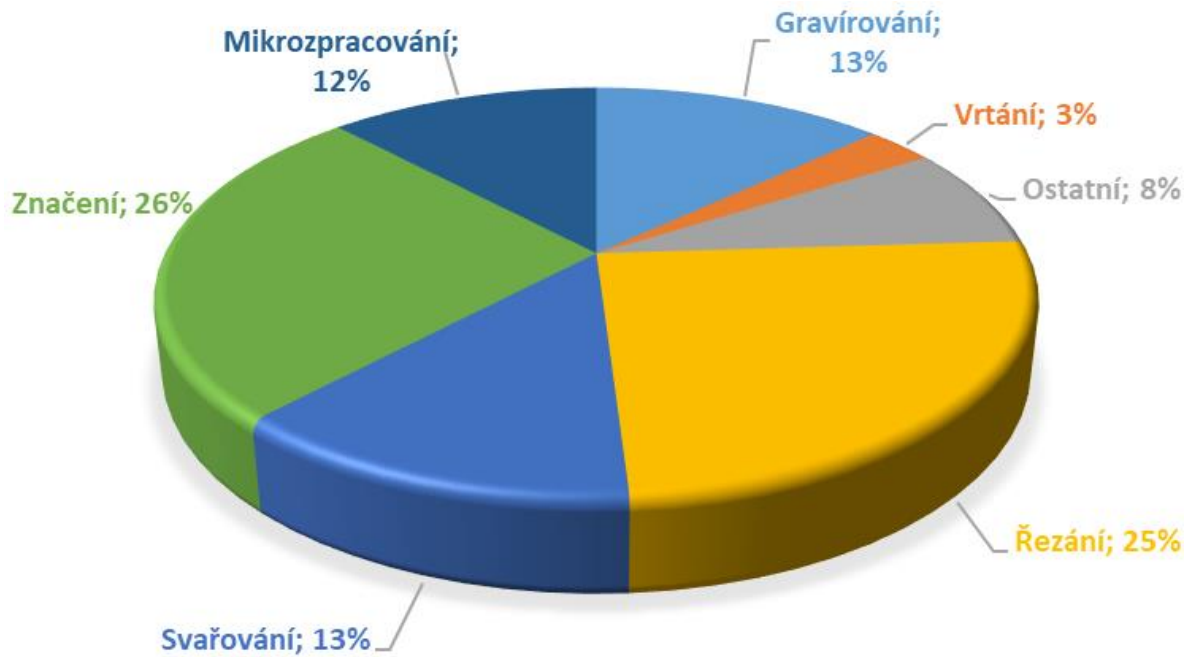
2.1 Svařování laserem [10], [20], [21]

Historie laseru sahá až do počátku 20. století, kdy byly pány Planckem, Bohrem a Einsteinem popsány základy kvantové fyziky. Následně popsal Albert Einstein vynucenou emisi záření, na již je princip laseru založen. V průběhu padesátých let sestrojili fyzici Basov, Prochorov a Townes zařízení zvané maser. To pracuje na podobném principu jako laser, ovšem v oblasti rádiových (mikrovlnných) vln. Za tento počín byla trojice fyziků oceněna Nobelovou cenou. První laser spatřil světlo světa v roce 1960. Byl zkonstruován americkým vědcem T. Maimanem, který jako aktivní prostředí využil krystalu rubínu.

Slovo LASER je odvozeno z prvních písmen anglické popisu samotného principu – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – ve volném českém překladu: zesílení světla stimulovanou emisí záření.

Laser nachází široké využití v technologických aplikacích. Je využíván pro řezání, svařování, děrování, povrchové kalení a mnoho dalších úkonů a operací (obr. 12). Využití laseru umožňuje soustředit energii na velmi malou plochu, čímž se zvyšuje hustota působící energie. Při tomto procesu potlačován vliv odvodu tepla do materiálu, z čehož pramení výhody využití laseru.

Díky laserovému svařování je dosahováno vysoce kvalitních a spolehlivých nerozebíratelných svarových spojů. Tyto spoje vznikají při absenci přídavného materiálu a jsou charakteristické čistým povrchovým vzhledem. U svarů je kladen důraz na celistvost spojů, mechanické a fyzikálně-metalurgické vlastnosti a na minimální deformace. Obecně je požadován svar co nejúžší a nejhlubší při daném výkonu stroje, tzv. štíhlost svaru. Předností laseru je schopnost svařovat jím i materiály, které jsou jinými metodami nesvařitelné nebo se svařují velmi těžce. Stejně tak je vhodné jej použít i pro svařování různých druhů materiálů. V praxi se využívají pro spojování ocelí, ale též plastů, mosazi, mědi nebo hliníku.



Obr. 12 Procentuální podíl laserových aplikací [20]

Výhody laserového svařování značně převyšují nevýhody a právě proto jsou laserové technologie stále na vzestupu. Za nevýhodné lze označit poměrně vysoké počáteční investice a složité přípravování. Naproti tomu výhod laseru je celá řada; vysoká rychlost svařování, svar s vysokou štíhlostí, vzájemná svařitelnost různorodých materiálů, svařování bez přídavného materiálu, snadná automatizace, kvalitní spoj, estetičnost svaru atd.

Pro zachování těchto výhod je tato metoda automatizována a robotizována. Svařování pak probíhá za pomoci CNC systémů s vlastními polohovacími systémy. Svařovací hlava je pak vedena robotickým ramenem s různým počtem stupňů volnosti. Tím je dosaženo přesného vedení paprsku po naprogramované dráze. S tím je však spojeno riziko odchýlení z požadovaného místa svaru v důsledku posunutí přípravku, křivosti plechů atd. Z tohoto důvodu jsou svařovací roboty vybaveny doplňkovými systémy, které navádějí paprsek do místa svaru za využití zpětnovazebních systémů. Dále je také udržována konstantní vzdálenost svařovací hlavy od povrchu materiálu, což je podmínkou pro správnou tvorbu svaru. Je tak udržováno správné zaostření.

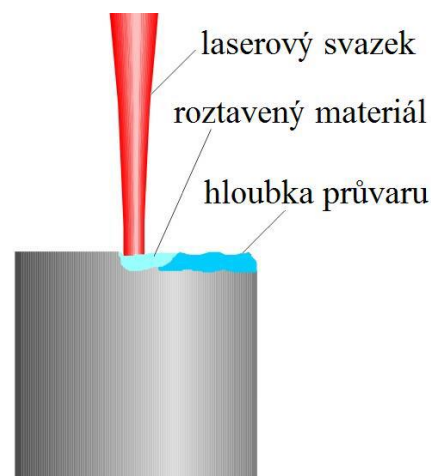
2.1.1 Princip svařování laserem [10], [20], [22], [23]

Pod pojmem laser rozumíme záření v podobě úzkého paprsku o malém průměru, vyznačující se charakteristickými vlastnostmi. Těmi jsou monochromaticnost (paprsek má jednu barvu), koherentnost (jen jedna synchronizovaná vlna) a fokusace (zaostření) svazku do bodu. Těmito vlastnostmi se liší od klasického zdroje světla, jakým je třeba žárovka.

Při působení toho paprsku absorbuje materiál část energie laserové záření, což vede ke zvyšování teploty svařence. Tímto procesem může být zapříčiněno buď odpaření, nebo natavení materiálu. V závislosti na probíhajícím procesu rozlišujeme dva režimy svařování:

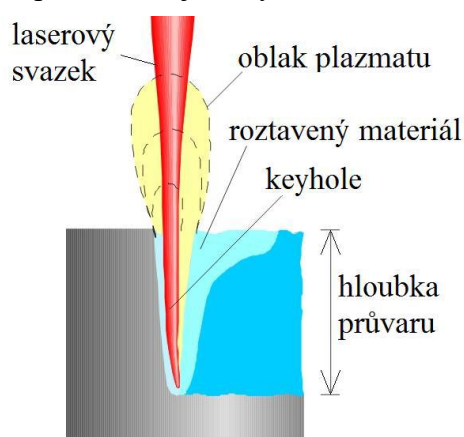
- Kondukční režim – přeměna energie laseru na teplo jen na povrchu (teplo se do materiálů šíří vedením – kondukcí)
- Penetrační režim – energie laseru se mění na teplo na stěnách keyhole (dutina vytvořená laserovým svazkem), která penetruje materiál do hloubky

Vliv na to, který z těchto dvou režimů nastane má především plošná hustota výkonu laseru. Při kondukčním režimu je využíváno hodnot do $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Dochází při něm zejména k povrchovému tavení materiálu, odpaření je minimální. Svar vzniklý použitím tohoto režimu je obvykle širší než hlubší a jeho tepelně ovlivněná oblast je v porovnání s penetračním režimem značně větší. Při tomto režimu je využíván přídavný materiál, který je natavován společně s materiálem základním. Dochází k promíchávání taveniny, což vede k vytvoření sváru. Takto zhotovený spoj bývá zaoblený a hladký bez nutnosti dalšího obrábění. Je využíván především pro svařování tenkostěnných plechů. I když umožňuje tvorbu především mělkých průvarů (desetiny milimetru až 1 milimetr), výhodou je jeho rychlost, proto se využívá právě tam, kde je přednější rychlost svařování před hloubkou průvaru. Princip kondukčního režimu je vyobrazen na obr. 13.



Obr. 13 Schéma kondukčního režimu [23]

Při penetračním režimu bývá dosahováno mnohem vyšších hodnot plošné hustoty výkonu a to až $10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Rovnoběžný paprsek laseru je ostřen za použití vhodné optiky do místa dopadu, které je nazýváno ohnisko. Dochází k předání mnohem většího množství energie a tím i ohřevu, než je materiál schopen odvádět ve formě tepla.



Obr. 14 Schéma penetračního režimu [23]

To vede ke tvorbě par kovu, které dále interagují s laserovým paprskem za vzniku plazmy (plazmový obláček). Tlak těchto par vytlačuje taveninu ze spáry, čímž vzniká hluboká kapilára vyplněná parami kovů, která přímo sousedí s taveninou. Tento efekt se nazývá *key hole*. Do taveniny a následně pak i tuhého materiálu je energie laserového paprsku přenášena vedením, což umožňuje pronikat do velké hloubky, čímž vznikají štíhlé a hluboké svary, typické pro tuto metodu. Roztavený kov je v důsledku energetické a tlakové rovnováhy sil paprsku a par vytlačován na zadní stranu kolem kapiláry, kde vyplňuje vzniklou štrbinu, následně tuhne a tvoří svar. Princip penetračního režimu je vyobrazen na obr. 14. Při tomto režimu je využíváno ochranných atmosfér, nejčastěji za použití argonu, helia nebo směsi argonu s oxidem uhličitým. Při použití helia je dosahováno vyšších rychlostí svařování, argon zase podporuje vznik plazmatu. Tyto plyny slouží k vytlačování oblaku plazmatu, který se tvoří nad taveninou a odchyluje část energie laserového paprsku. To je využíváno především u CO_2 laserů. Tím zhoršuje podmínky svařování a negativně působí na tvar kapiláry. Ochranná atmosféra navíc brání oxidaci svaru v atmosféře, zabraňuje nežádoucím projevům vyvolanými okolním vzdušným prostředím.

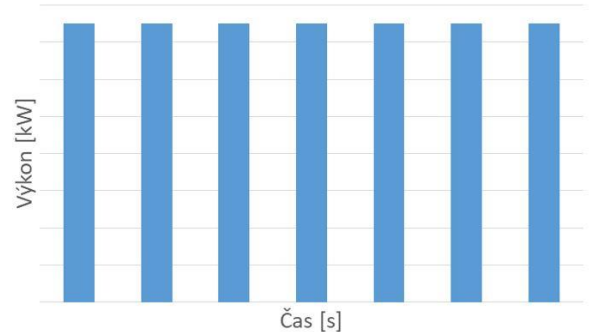
Svařování laserem je možno provádět ve dvou režimech a to kontinuálním nebo pulzním. Při kontinuálním režimu je chod paprsku spojitý a jeho energie se tak přibližuje průměrné hodnotě (obr. 15a). Výkon má v závislosti na čase lineární charakter, čímž jsou potlačeny výkonové výkyvy a energie se pak ve zdroji skokově nekumuluje. Zato při pulzním režimu dochází k vyzářování energie v krátkých impulzech (obr. 4b). Tato energie je ve zdroji shromažďována během delšího časového úseku a následně uvolněna s vyšším výkonem. Takto

uvolněné paprsky vychází ze zdroje v pravidelných mezech po akumulaci daného množství energie. Rozhodující je přitom především energie pulzu, která ovlivňuje množství vneseného tepla. Dále pak i délka pulzu neboli čas působení paprsku na materiál, při kterém dochází k jeho ohřevu a natavení. Tyto délky pulzu jsou různé dle svařovaného materiálu a jeho tloušťky.

Podstatnou roli při svařování laserem hrají svařovací parametry, které mají výrazný vliv na výslednou kvalitu svaru, ale také na efektivitu využití této metody. V porovnání s konvenčními



Obr. 15a Kontinuální režim svařování



Obr. 15b Pulzní režim svařování [20]

metodami však nehraje tak výraznou roli čistota povrchu. Veškeré nečistoty jsou během procesu s vysokou intenzitou energie, jež je materiálem pohlcována, odpařeny dříve, než dojde k jeho samotnému natavení.

Proces svařování ovlivňují tyto parametry:

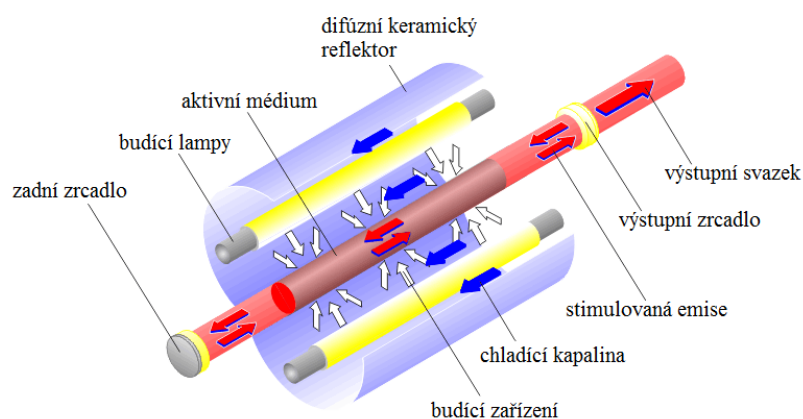
- Parametry a vlastnosti základního materiálu
- Svařovací rychlost
- Ochranný plyn a jeho objem
- Vlnová délka svazku
- Optika svařovací hlavy
- Výkon laseru
- Poloha ohniska vzhledem k materiálu

2.1.2 Rozdělení laserů [10], [20], [23], [24], [25], [26]

Technologie laserů je na světě již téměř 60 let a za tu dobu prošla značným vývojem. Od prvních rubínových laserů se postupně dostala až na takové stádium, že se v mnoha činnostech dá označit za nepostradatelnou a těžko by se nahrazovala jinými metodami. Během tohoto vývoje byla vyvinuta celá řada typů laserů, se kterými se dnes můžeme setkat v běžné strojírenské praxi.

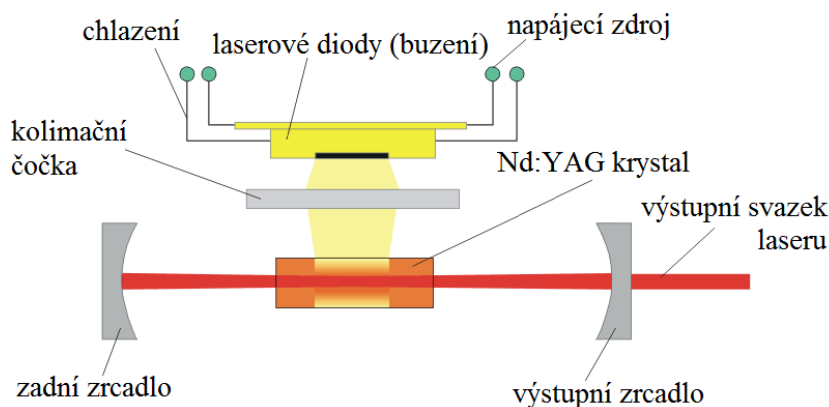
- Pevnolátkové lasery – jako aktivní prostředí pevnolátkových laserů slouží monokrystalické nebo amorfni látky obohacené o přísady aktivačních prvků. Dochází ke změnám energetických stavů těchto přísadových atomů, čímž je vyvoláno absorbování i vyzařování energie. Základní matrice se těchto dějů neúčastní. Pro aktivní látky platí tyto požadavky:
 - Maximální homogenizace aktivního prostředí (minimum přísad a defektů zapříčínující absorpci nebo rozptyl záření).
 - Široké absorpční pásmo aktivního prostředí, které zajistí pohlcení dodané energie.
 - Dostatečně velká pravděpodobnost zářivých přechodů na provozní frekvenci.

Často využívanými aktivátory jsou lanthanoidy jako například neodym, samarium nebo gadolinium, dále pak přechodové kovy jako jsou chrom, nikl nebo kobalt. Tyto aktivní látky musí dále zaručovat dané technologické požadavky, kterými jsou například možnost mechanického opracování a leštění nebo fotochemická odolnost. Většina pevnolátkových laserů pracuje v pulzním režimu a jako čerpací zdroj jsou využívány plynové výbojky.



Obr. 17 Konstrukce Nd:YAG laseru [25j]

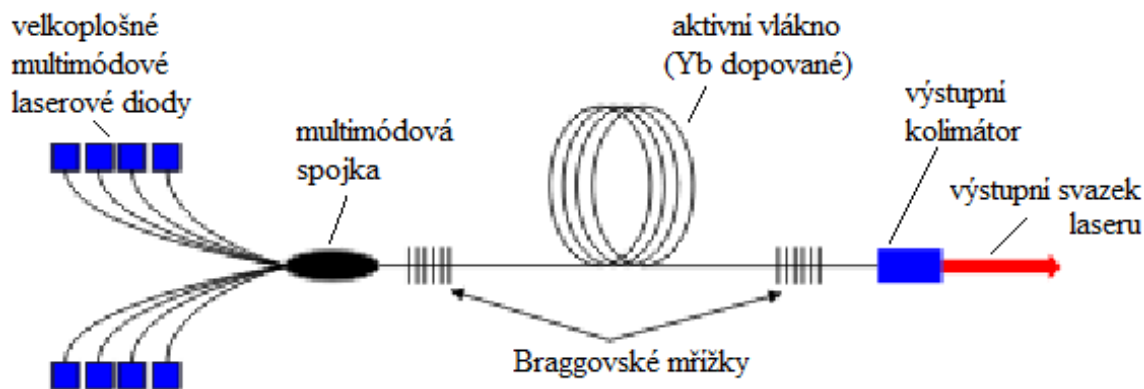
Nejrozšířenějším pevnolátkovým laserem je Nd:YAG laser (obr. 17). Tomuto zařízení slouží jako aktivní prostředí izotropní krystal Yttrium Aluminium Granát ($Y_3Al_5O_{12}$), která je dopována kationty neodymu (Nd^{3+}). Z počátečních písmen potom dostáváme název tohoto typu laseru. Ten pro svůj provoz může využít pulzní i kontinuální svařovací režim, emituje záření s délkou vlny $1,06 \mu m$ a jeho elektrická účinnost se pohybuje pod 5 % (obvykle 2 až 3 %). Lze emitovat i záření o jiných vlnových délkách, ovšem na úkor účinnosti. Lasery využívající pulzní a kontinuální režim se navzájem odlišují způsobem buzení, kdy se pro pulzní režim využívá kryptonových zábleskových lamp, zatímco pro kontinuální jsou používány obloukové lampy nebo stále častější diod. Toto čerpání za pomoci diod (obr. 16) dosahuje vyšší účinnosti a spotřeba elektrické energie klesá v řádově.



Obr. 16 Konstrukce Nd:YAG laseru buzeného diodami [25]

V praxi se běžně setkáváme s Nd:YAG lasery, jejichž průměrný výkon paprsku nepřesahuje 100 W. Tyto pulzní lasery jsou vybaveny speciálními výkonovými jednotkami umožňující vysokovýkonného impulsu při nízkých hodnotách průměrného výkonu. Velikost impulsů takových laserů pak mohou dosahovat až hodnot k 10 kW a jsou využívány jak pro svařování nebo řezání. Obecně jsou Nd:YAG lasery využívány v automobilovém a elektronickém průmyslu, kde slouží ke značení komponentů. Lze jej využívat i pro pájení. Jeho nevýhodou je nutnost vodního chlazení. Další z řady pevnolátkových laserů je laser vláknový (obr. 18). Jeho aktivní prostředí je tvořeno

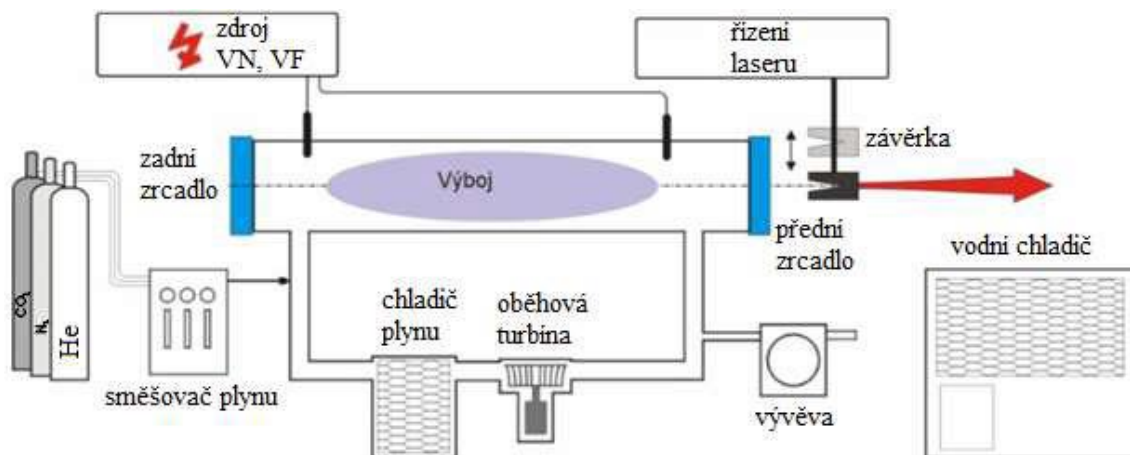
optickým vláknem, jež je dopováno ytterbiem. Celé zařízení je tvořeno laserovými moduly. Ty mohou být vzájemně spojovány, čímž lze zvýšit výkon přístroje a to až na 80 kW. Za pomoci laserových diod je přes optickou spojku buzen paprsek do aktivního optického vlákna. Pro vychylování paprsku je využívána Braggova mřížka v optickém vlákne, která nahrazuje zrcadla. Mimo kontinuálního a pulzního režimu rozlišujeme u tohoto typu laseru i tzv. kvazipulzní režim. Toto zařízení je výhodné pro svou jednoduchost a kompaktnost a stabilitu. Tyto lasery disponují vysokou účinností (až 48 %) a také vysokou životností (až 150 000 hodin). V porovnání s Nd:YAG lasery také pozorujeme větší hloubky průvaru při



Obr. 18 Základní konstrukce vláknového laseru [25]

vyšších svařovacích rychlostech. V extrémních případech lze dosahovat při kontinuálním režimu výkonu až 500 kW, což nachází uplatnění spíše než v běžném strojním průmyslu v oblasti armády. Pracuje s vlnovou délkou 1,07 μm . Vyznačuje se vysoce kvalitním modem, tedy tvarem paprsku. Jeho velkou nevýhodou je však poměrně velká technická náročnost výroby optického vlákna. V praxi slouží ke svařování ale i řezání materiálů.

- Plynové lasery – tato skupina laserů nachází v oblasti strojírenství velmi široké uplatnění. Aktivní prostředí těchto zařízení je tvořeno plyny nebo směsí plynů a par. Tyto lasery mohou pracovat jak v pulzním, tak i v kontinuálním režimu. Tím je však značně ovlivněn jejich výkon. Zatímco výkony při pulzním režimu dosahují hodnot do stovek wattů, při kontinuálním režimu lze pracovat s širokým rozpětím výkonů a to od mW až po desítky kW. Vlnové délky emitovaného záření pak pokrývají širokou škálu světelného spektra.



Obr. 19 Konstrukce CO₂ laseru [26]

Typickým představitelem plynových laserů je CO₂ laser (obr. 19). Jeho aktivní prostředí je tvořeno směsí He + N₂ + CO₂, při nejběžnějším poměru složek 82 : 13,5 : 4,5. Funkcí aktivního prostředí je jak ovlivňování rozptylu světla, tak i tvorba energie potřebné k buzení. To je zajišťováno zpravidla elektrickým výbojem. Je však možné využít i elektronového svazku nebo chemické reakce. Pro vyzařovaný paprsek je charakteristická

vlnová délka 10,6 μm , čímž spadá mezi infračervené záření. Tato poměrně velká hodnota vlnové délky je nevhodná z důvodu širší stopy fokusovaného paprsku. Ten nemůže být veden optickým vláknem a pro jeho přenos tak bývá využívána soustava zrcadel, s čímž souvisí i nákladné operace jako je jejich čištění, kalibrace nebo výměna optických čoček. Tím jsou kompenzovány jinak nízké provozní náklady těchto zařízení. Účinnost CO₂ laserů se pohybuje mezi 10 a 15 %, někdy až 20 %. Jsou schopny vyvíjet velmi vysoké výkony (řádově desítky kW) při kontinuálním režimu. Přístroje o nižších výkonech jsou v technické praxi využívány pro operace, jako jsou značení, řezání nekovů (plast, plexisklo apod.) nebo gravírování. Ty s vyššími výkony jsou používány pro svařování nebo řezání.

2.1.3 Hybridních technologie laseru [27], [28], [29]

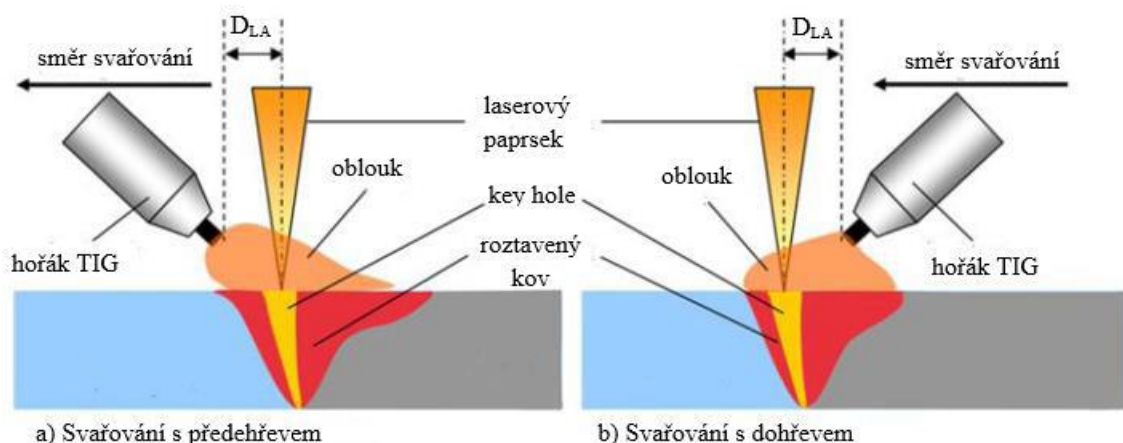
Svařování laserem s sebou nese celou řadu výhod a předností. Mimo to je však zatíženo i některými vlastnostmi, které se za daných podmínek jeví jako nevhodné či dokonce nežádoucí. Jednou z těchto vlastností je rychlé ochlazování svarové lázně související s tvorbou nežádoucích struktur ve svaru nebo ke vzniku vad ovlivňující mechanické vlastnosti spoje.

Pro eliminaci nedostatků laserového svařování je využíváno jeho spojení s některou ze svařovacích metod elektrickým obloukem. Jednou z těchto hybridních technologií je tzv. lasTIG neboli laser-TIG (obr. 20). Jedná se o kombinaci laserového svařování s metodou TIG, tedy využití netavící se wolframové elektrody, jež drží elektrický oblouk. Tímto spojením obou metod dochází ke vzájemné kompenzaci obou technologií.

V praxi se lze setkat se dvěma typy mechanismů této hybridní technologie. V prvním případě předchází TIG elektroda laserovému svazku. Při tomto uspořádání dochází k nahřívání povrchu materiálu obloukem a paprsek laseru pak následně svařuje již předehřátý nebo částečně natavený svarový kov. Tím je dosaženo podobných podmínek svařování, jako při použití předehřevu. Takovéto využití předehřevu pak vede k výraznějšímu provaření kořene a je dosahováno hlubších průvarů.

V druhém případě předchází laserový paprsek před elektrickým obloukem, čímž dochází k aplikování dohřevu. Tohoto uspořádání se využívá především pro svařování slitin hliníku, jelikož je působením laseru zapříčiněn rozpad oxidické vrstvy. Takto ošetřený materiál je následně svařen elektrickým obloukem.

Takovouto aplikací předehřevu či dohřevu lze výrazně zlepšit vlastnosti svaru. Je dosaženo pomalejšího tuhnutí svarové lázně. Tím je usnadněna difuze nežádoucího vodíku ze svarové lázně, čímž klesá riziko pórovitosti svaru a negativního ovlivnění jeho mechanických vlastností. Dalšími výhodami laser-TIG jsou vysoké svařovací rychlosti a účinnost při dobré stabilitě procesu, malá tepelně ovlivněná oblast nebo všestranné využití. Za nevýhodné lze označit poměrně velkou pořizovací cenu a komplikované nastavení svařovacích parametrů.



Obr. 20 Princip LaserTIGu [27]

Oproti běžnému laserovému svařování je tato hybridní technologie mnohem náročnější na správnou konfiguraci procesních parametrů. Mimo těch klasických, jako je poloha ohniska nebo výkon laseru je dále nutné zabývat se průměrem elektrody, množstvím ochranného plynu, velikostí proudu a v neposlední řadě vzdálenosti elektrody od svařovací hlavy laseru (D_{LA}), která ovlivňuje vzájemné působení mezi paprskem a obloukem. Při nedostatečně velké vzdálenosti může být elektroda laserovým svazkem spalována. Tím je negativně ovlivňována stabilita oblouku, což může vést k vadám ve svaru.

2.1.4 Svarové vady laseru [12], [29], [30], [31]

Na spoj vzniklý svařováním jsou kladeny vysoké nároky z hlediska mechanických a fyzikálních charakteristik. Je kladen důraz jak na kvalitu svaru, tak mnohdy i na jeho estetičnost. Vlastnosti tohoto spojení dvou kovů jsou ovlivňovány vadami svaru. Za vadu svaru lze označit jakékoliv odchylení od vlastností stanovenými normami, podmínkami nebo smluvním vzorkem. Tyto vady se stávají koncentrátory napětí, negativně působí na velikost meze únavy a iniciují křehký lom.

Lze je rozdělit na přípustné a nepřípustné, dále pak na opravitelné a neopravitelné. Toto rozdělení je individuální dle konkrétního typu svaru nebo technických podmínek. Dle způsobu odhalení vady je možné je dále dělit na vnější, které je možno odhalit vizuálně pouhým okem a vady skryté neboli vnitřní, pro jejichž identifikaci je využíváno specifických zařízení a laboratorních zkoušek. Mezi vnější defekty řadíme trhliny a póry nebo neprovařený kořen. Za vnitřní vady lze považovat plynové dutiny, vměstky, póry nebo staženiny.

Dle tvaru defektu se dále užívá rozdělení na vady bodové, plošné a objemové. Za bodové jsou označovány defekty typu mikropóru nebo malého vměstku, z plošných jsou to pak trhliny, studené spoje nebo neprůvody. Skupina objemových vad je tvořena dutinami, vruby, zápaly, vměstky, ale i nepravidelným povrchem svaru. Typy svařovaných materiálů a metody svařování následně ovlivňují druh projevujících se svarových defektů. Rozdělení vad dle charakteru popisuje norma ČSN ISO 6520, která tyto defekty řadí do šesti skupin. V praxi se pak setkáváme s těmito typy vad:

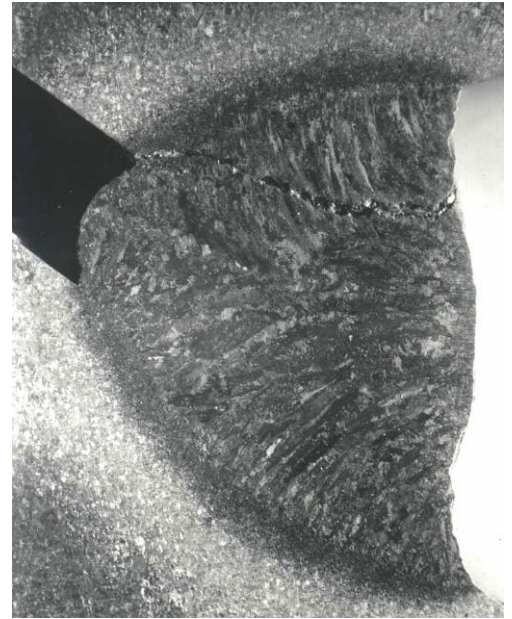
- Studené trhliny – k jejich vzniku dochází po procesu svařování, při chladnutí, kdy teplota svarového kovu klesá pod 300 až 200 °C. Jejich výskyt je nejčastější v podhousenkových oblastech svaru a v tepelně ovlivněné oblasti (obr. 21). Dle orientace se rozdělují na trhliny podélné a příčné, jejich povrch je lesklý, neoxidovaný, čímž se liší od trhlín za horka. Hlavní příčinou jejich vzniku je vzájemné působení tří faktorů. Jedná se o vodík ve svarovém spoji, přítomnost struktury citlivé na přítomnost vodíku a zbytková tahová napětí. Zdroji nežádoucího vodíku může být vzdušná vlhkost, nedokonale ošetřený materiál atd. Studeným trhlinám se předchází předehřevem a náchylnost materiálu k nim se určuje pomocí uhlíkového ekvivalentu CE.



Obr. 21 Studená trhlina [31]

- Trhliny za horka (obr. 22) – vznikají jak ve svarovém kovu, tak i v tepelně ovlivněné oblasti při vysokých teplotách kolem 800 až 900 °C. Náchylnost materiálu k trhlinám za horka je ovlivněna zejména jeho chemickým složením, kdy negativně působí vysoký obsah uhlíku, síry nebo některých legur. Trhliny za horka se dále dělí na 3 podskupiny:

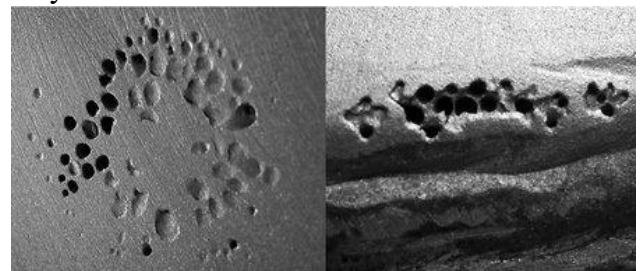
- Krystalizační trhliny – vznikají ve svarovém kovu v průběhu tuhnutí (krystalizace)
- Likvační trhliny – charakteristické především pro tepelně ovlivněnou oblast ve vysoko ohřátém podhousenkovém pásmu. Ve svarovém kovu vznikají jen při mnohavrstevném svařování.
- Polygonizační trhliny – též označovány jako trhliny z poklesu tažnosti. Mohou vznikat v TOO obdobně jako trhliny likvační, ale i ve svarovém kovu. Jsou charakteristické pro vysokolegované oceli.



Obr. 22 Trhlina za horka [31]

- Žíhací trhliny – jsou iniciovány při velkých rozdílech teplot mezi středem a povrchem svarového spoje. Jsou způsobeny malou plasticitou materiálu, kdy během natáčení zrn dochází ke vzniku trhlin. Vyskytují se jak v TOO i ve SK. Vytváří se při teplotách okolo 300 °C. U ocelí s obsahem chromu a vanadu dochází k jejich tvorbě při teplotách vyšších (500 až 600 °C). Jedná se o podnávarové trhliny.
- Lamelární trhliny – vznikají v základním materiálu i v TOO při vysokých teplotách. Vyznačují se kaskádovitým tvarem a většinou jsou rovnoběžné s povrchem materiálu. Jsou iniciovány ve vměstcích při působení velké napjatosti. Nejnepříznivěji pak působí vměstky síry.
- Kráterové trhliny – jedná se o jakýsi poddruh trhlin za horka. Jejich vznik je vyvolán smrštěním tuhnoucího kovu při náhlém teplotním šoku (ochlazení).
- Vměstky – nejčastěji se vyskytují ve spoji při nedostatečném očištění materiálu od strusky, písku a jiných nečistot mezi svarovými vrstvami. Tento typ vměstků je označován jako vměstky exogenní, ty vedou k iniciaci trhlin. Dále rozlišuje vměstky endogenní, které jsou tvořeny chemickými reakcemi uvnitř taveniny.

- Bubliny (obr. 23) – jsou vytvořeny plyny, které se dostaly do taveniny, ale před jejím ztuhnutím nestačily difundovat z materiálu. Tento typ defektu má kulovitý tvar a může se vyskytovat v podobě shluku, ale i řad. Bubliny jsou nejčastěji vyplněny kyslíkem, vodíkem nebo dusíkem, přičemž kyslík může být v některých případech prospěšný. Naopak, vodík způsobuje tzv. vodíkovou křehkost. Dusík pak zapříčiňuje deformační stárnutí, což vede ke snížení plasticity. Bubliny a jejich řetězce jsou charakteristické pro laserové svařování, kdy se uzavírají uvnitř spoje v důsledku rychlého kmitání key hole.



Obr. 23 Pórovitost svaru [32]

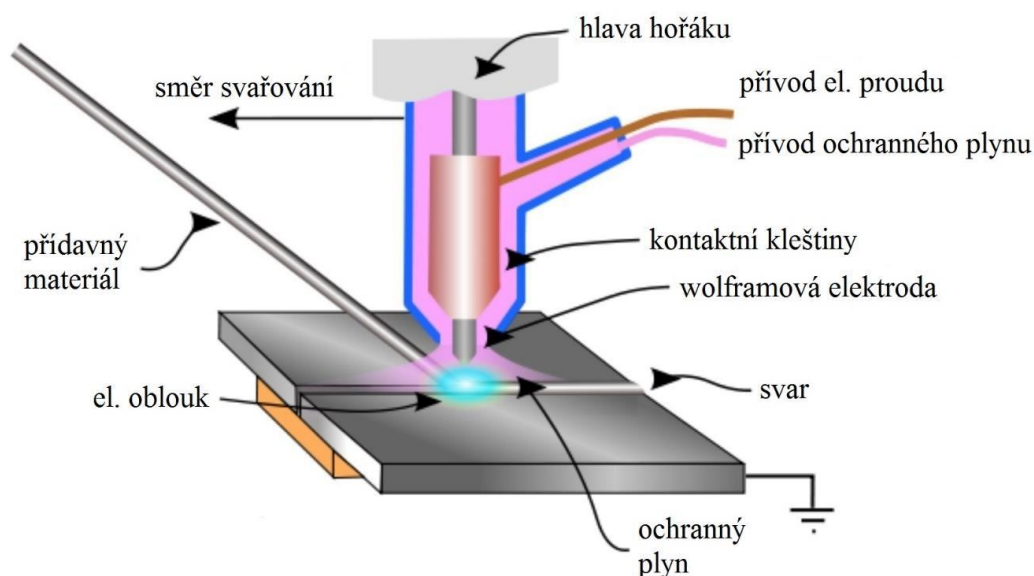
- Neprůvary – dochází k nim při částečném, nedokonalém natavení ZM a housenek. Mohou být zapříčiněny vysokou svařovací rychlostí, předběhnutím svarové lázně nebo nevhodně zvolenými úkosy svařovaného materiálu.

- Studené spoje – jedná se o nedokonalé tavné spojení základního materiálu se svarovým kovem. K jeho tvorbě dochází při nevhodných svařovacích parametrech (vysoká svařovací rychlost, špatné vedení elektrody).
- Zápaly – jsou typické pro koutové svary. Vznikají na hranicích mezi svarovou housenkou a základním materiálem. Lze je popsat jako ostrá natavená prohloubení na této hranici. Vznikají při užívání dlouhého oblouku, příliš velkého proudu svařování nebo při špatném vedení elektrody.
- Kořenové vady – souvisí s deformací kořenu svaru. Ta se může projevat například jeho propadem, špatně provařeným koncem svaru.

Zda-li je vada přípustná je dáno vždy konkrétním druhem, velikostí nebo četností dané vyskytující se vady. Svou roli hraje také stav napjatosti svařence, orientace vady, mechanické vlastnosti spoje, pracovní prostředí atd. Při hodnocení přípustnosti daného typu vady je dbáno zkušeností, že vada nejvíce ovlivňuje porušení křehkým lomem a porušení únavové. To platí zejména pro trhliny. Hodnocení jejich přípustnosti je dáno normou ČSN EN ISO 5817, která rozlišuje tři stupně jakosti: B, C a D, kdy B označuje svařence nejvyšší jakosti, C značí střední kvalitu svaru a skupina D označuje nízkou kvalitu svaru.

2.2 Svařování metodou TIG [6], [15], [19], [33]

TIG, neboli Tungsten Inert Gas (svařování netavící se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu) spadá mezi technologie tavného svařování, kdy je využíváno hoření elektrického oblouku (obr. 24). Tento oblouk hoří v ochranné atmosféře inertního plynu, jak již sám název metody napovídá. Funkcí ochranného plynu je ochrana soustavy elektroda – svařenec před působením vzdušného kyslíku a dalších nepříznivě působících plynů.



Obr. 24 Princip metody TIG [15]

Metoda je vhodná pro celé spektrum materiálů dle použitého proudu svařování. Zvláště je pak využívána pro vysokolegované oceli, slitiny hliníku a hořčíku nebo pro svařování různorodých materiálů. Není příliš vhodná pro spojování uhlíkatých ocelí, jelikož hrozí nebezpečí tvorby pórů ve svaru.

Vzhledem k netavící se elektrodě je přídavný materiál při jeho aplikaci přiváděn do svarové lázně externě a to buď ve formě drátu nebo tyčinek. Princip metody TIG s užitím přídavného materiálu je znázorněn na obr. 11. Technologii však lze využít i bez užití přídavného materiálu, kdy dochází pouze k natavení materiálu základního a jeho následovnému slití dohromady.

Samotná soustava pro svařování se pak skládá mimo hořák s netavící se elektrodou ze zdroje proudu, zásobníku s ochranným plynem a jeho vedení, podavače přídavného materiálu,

řídící jednotkou, chlazením atd. Výbava soustavy a uspořádání komponentů se liší dle používaného proudu nebo využití přídavného materiálu.

Svařování netavící se elektrodou nabízí řadu výhod. Lze jmenovat například efektivní ochranu lázně bez nutnosti užití tavidla, vysokou stabilitu elektrického oblouku (je využíváno stabilizátorů), jednoduchá regulace parametrů svařování nebo malá tepelně ovlivněná oblast. Za nevýhodné lze považovat poměrně složité systematické uspořádání zařízení, s čímž souvisí i vysoké pořizovací náklady. Další nevýhodou může být v některých případech nízká produktivita.

2.2.1 Rozdělení metody TIG [27], [33], [34]

Metodu využití netavící se elektrody lze rozdělit dle použitého proudu, přičemž každý z nich má svá specifika a je využíván pro jiné typy materiálů.

- Svařování stejnosměrným proudem
- Svařování střídavým proudem

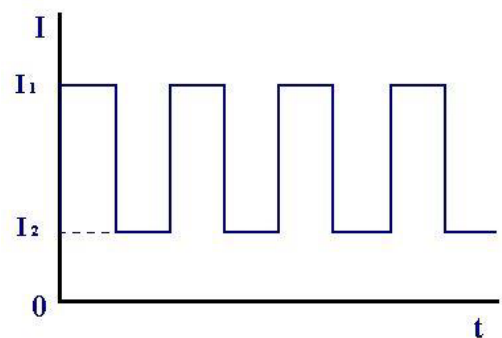
Při svařování stejnosměrným proudem je rozlišována přímá a nepřímá metoda. Metoda přímá spočívá v zapojení elektrody k zápornému pólu a svařenec ke kladnému. Při tomto zapojení dochází k nerovnoměrnému rozdělení tepla, kdy na elektrodu připadá zhruba 30 % tepla, na základní materiál pak zbytek. Tím je dosahováno velkých hloubek závaru, přičemž nedochází k přehřívání elektrody. Svařování nepřímou metodou není v praxi tolik zastoupeno. Lze jej využít například pro svařování tenkých hliníkových plechů.

Využití střídavého proudu nachází v praxi své uplatnění při svařování slitin hliníku nebo hořčíku. Polarity zapojení se periodicky střídají, čímž dochází ke kombinaci výše zmíněné přímé a nepřímé metody. Každá půlperioda je pak specifická daným jevem, kdy v první půlperiodě (elektroda je připojena ke kladnému pólu) nastává čistící efekt. V druhé půlperiodě (elektroda je připojena k zápornému pólu) pak dochází k natavení materiálu.

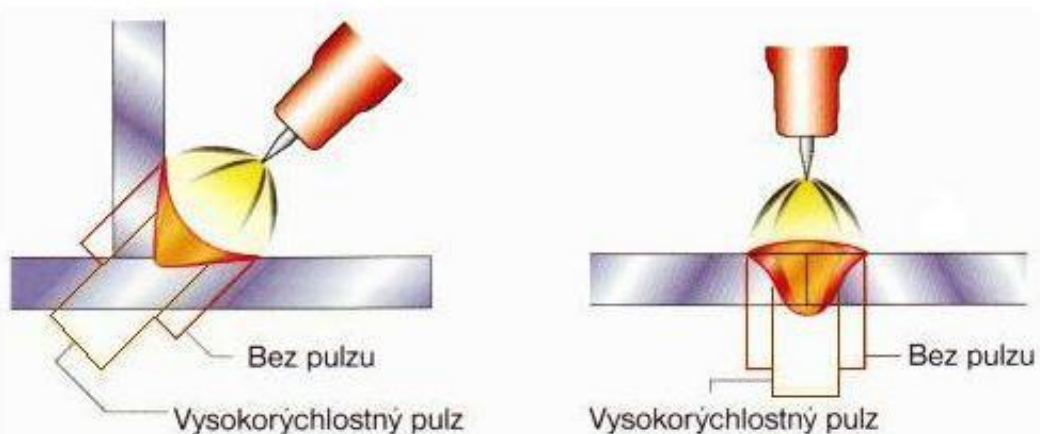
Tohoto mechanismu je pak využíváno u materiálu, jenž jsou chráněny na povrchu oxidickou vrstvou s rozdílnou teplotou tavení než má samotný materiál. Názorným příkladem může být například hliník. Při čistícím efektu je využíváno kinetické energie iontů, které narážejí do oxidické vrstvy na povrchu, čímž ji rozbourávají. Dopad elektronů v následující půlperiodě zapříčiní natavení očištěného základního materiálu, čímž postupně dochází ke svaření.

Nejmodernější variantou metody TIG je tzv. impulsní svařování (obr. 26). Dochází při něm ke skokovým změnám svařovacího proudu mezi dvěma hladinami (obr. 25); základní a impulsovou. Rozlišujeme lichoběžníkovou, sinusovou a pravoúhloú závislost proudu na čase.

Natavení lázně a přídavného materiálu probíhá při impulsní hladině. Charakteristikami, jakými jsou



Obr. 25 Průběh pulzního proudu [34]



Obr. 26 Svary zhotovené pulzním svařováním a klasicky [34]

amplituda impulsu a doba trvání je následně ovlivněna výsledná podoba svaru. Tím je umožněna kontrola svařovacího procesu. Hodnoty proudu základní hladiny jsou voleny buď manuálně (jako hodnoty impulsní hladiny) nebo jsou automaticky přepočítány z hodnoty



hladiny impulsu. Zpravidla se tyto hodnoty pohybují okolo 20 až 50 %. Úkolem základního proudu je ionizace svarové lázně. Dochází k prodloužení hoření oblouku, čímž je oddalováno tuhnutí svaru. Tím je dosahováno malé tepelně ovlivněné oblasti a je minimalizováno mísení materiálu.

Touto metodou je vytvářen tzv. penízkový svar (obr. 27), jehož překrytí dosahuje 50 až 70 %.

Obr. 27 Penízkový svar [27]

2.2.2 Ochranné plyny pro metodu TIG [6], [19], [33]

V průběhu svařování metodou TIG je svarová lázeň chráněna inertním plynem. Ten má za úkol vytlačit okolní atmosféru, jejíž složky mohou nepříznivě ovlivnit kvalitu a vlastnosti svaru. Chrání ho tak především proti oxidaci nebo naplynění. Další funkcí inertního plynu je pak zajištění příznivých podmínek pro zapálení a hoření oblouku a následný přenos tepla do svaru.

V praxi se nejčastěji setkáváme s plyny, jako jsou argon nebo helium, popřípadě s jejich směsmi. Nejběžněji je používán právě argon, jelikož je možné ho využít po všechny typy svařitelných materiálů a v porovnání s ostatními plyny je levný. Jeho další předností je vysoká čistota (až 99,999 %), což zaručuje efektivní ochranu. Je těžší než vzduch, což také napomáhá jeho ochranným vlastnostem. Těž zapálení a hoření oblouku v jeho atmosféře je bezproblémové.

Další možností inertního plynu pro metodu TIG je použití helia. V jeho neprospěch hraje především jeho nízká hustota. Jelikož je lehčí než vzduch, snadno uniká z místa svaru, čímž klesá efektivita jeho ochrany. To je kompenzováno zvýšením průtoku plynu do místa svaru tak, aby ochrana byla dostatečná. Oblouk se v jeho atmosféře špatně zapaluje, proto je pro zapalování využíváno atmosféry argonu. Výhodou helia je jeho vysoká tepelná vodivost, což umožňuje svařování materiálů s vysokou teplotní vodivostí, například hliník nebo měď. Jeho aplikace je spojena především s mechanizovaným svařováním.

Použitím směsi argonu s heliem dochází ke kompenzaci nevýhod obou zmíněných plynů. Pro metodu TIG se nejčastěji používají směsi v poměru 7:3, 5:5, 3:7 (Ar : He). S rostoucím obsahem helia ve směsi je zvyšován i tepelný výkon oblouku a jeho napětí. To se projevuje především na rozměrech a tvaru svaru. Další výhodou použití směsi je výrazné zvýšení rychlosti svařování nebo hloubky svaru. Využívají se především pro svařování hliníku nebo mědi a to jak ručním způsobem, tak i při mechanizovaném svařování.

V technické praxi se dále setkáváme s dalšími směsmi plynů. Pro svařování vysoce legovaných ocelí či niklu a jeho slitin je využívána směs argonu s vodíkem, která se svými vlastnostmi podobá směsi argonu s heliem. Vodík díky svým redukčním vlastnostem příznivě ovlivňuje čistotu povrchu svaru. Tato směs je však nevhodná pro martenzitické CrNi oceli, jelikož může docházet k praskání za studena právě vlivem vodíku. Dále je nevhodná pro měď a hliník z důvodu vysoké pórovitosti svaru. Pro měď a její slitiny je naopak aplikována směs argonu s dusíkem, jenž má vysokou teplotní vodivost, čímž dochází k většímu přenosu tepla do svarové lázně.

2.2.3 Svařovací hořáky a elektrody pro TIG [6], [19], [35], [36]

Funkcí svařovacího hořáku je přívod elektrického proudu k elektrodě, dále pak zajišťují přísun a usměrnění inertního plynu, přívod a odvod chladiva (např. vody) a v neposlední řadě fixování elektrody v konstantní poloze od povrchu materiálu. Hořák lze označit za nejzatěžovanější součást celé sestavy pro svařování. Lze je rozdělit dle několika hledisek.

Například dle chlazení na hořáky chlazené proudícím plynem (do 150 A) nebo na hořáky chlazené kapalinou (až do 500 A). Dále je lze rozdělit na hořáky pro svařování ruční nebo strojní.

Samotný hořák (obr. 28) se pak mimo elektrody a samotného těla skládá z plynové trysky, kleštiny, ochranného krytu, spínače a držáku. K napájení wolframové elektrody dochází ve vyměnitelné kleštině, kde je elektroda pevně upnuta. Pro maximální snížení přechodového odporu mezi elektrodou a kleštinou je nutné pevné upnutí mezi těmito komponentami.

Plyn je usměrňován do místa svaru plynovou tryskou, jenž je další z tepelně zatížených součástí. Trysky se používají keramické nebo kovové. Zatímco keramické jsou využívány pro ruční svařování a jsou chlazeny protékajícím plynem, u strojních hořáků je využíváno trysek kovových, které jsou chlazené vodou. Průměr dané trysky je pak závislý na rozměru chráněné plochy. Pro zefektivnění ochrany a zmenšení spotřeby plynu bývají aplikovány tzv. plynové čočky, které prodlužují laminární proudění plynu a snižují jeho celkovou spotřebu až o 50 % (obr. 29). Průtok plynu je kontrolován průtokoměrem a jeho optimální množství je závislé na mnoha parametrech:

- Typ inertního plynu
- Velikost svařovacího proudu
- Úhel sklonu hořáku
- Velikost trysky
- Druh svařovaného materiálu



Obr. 28 Schéma svařovacího TIG hořáku [36]

Elektrody využívané při metodě TIG jsou vyráběny ze spékaného wolframu, jehož teplota tání činí 3380 °C a teplota varu pak 5700 °C. Díky tomu pak elektrody odolávají vysokým teplotám během procesu svařování a nedochází k jejich tavení. Jsou vyráběny buď bez příměsí, z wolframu o čistotě 99,9 % nebo s obsahem různých příměsí. Pro ovlivnění vlastností elektrod se využívá legovaných oxidů kovů, jako je thorium, zirkon nebo lanthan. Tento typ elektrod se vyznačuje delší životností, lépe zapaluje oblouk, která následně hoří s větší stabilitou a teplota ohřevu je snížena až o 1000 °C.

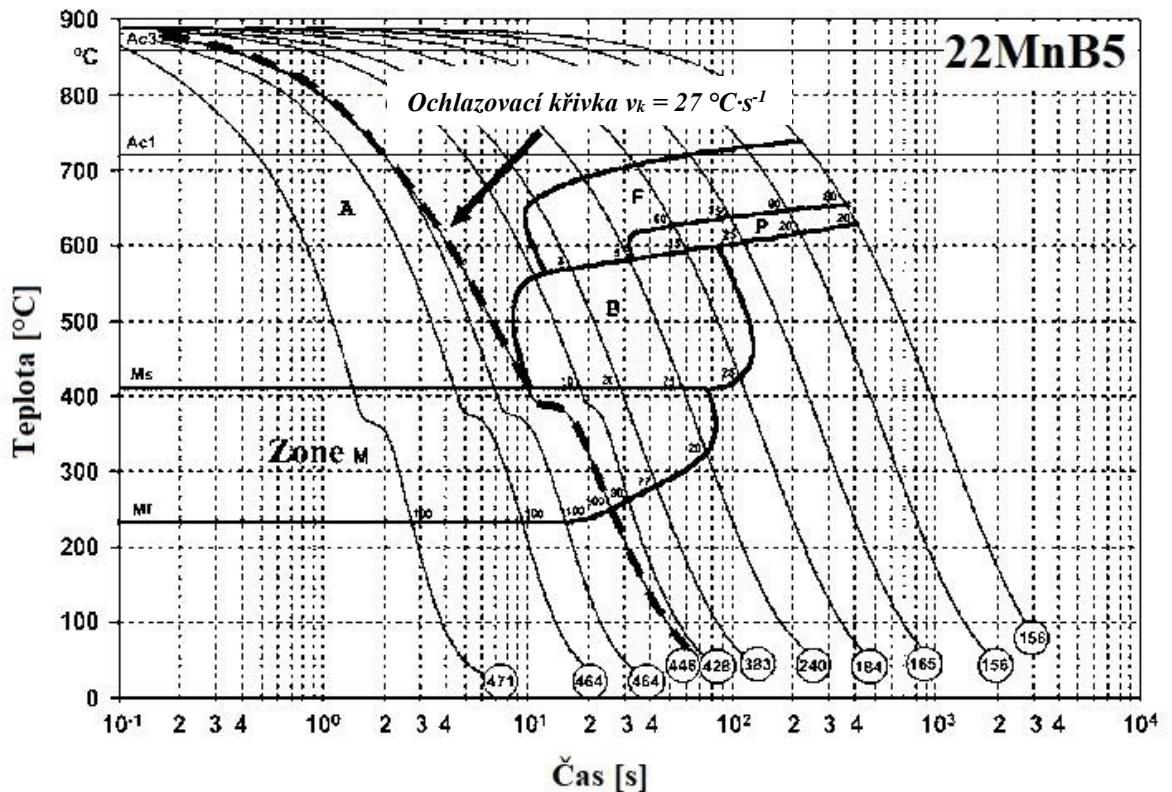
Ačkoliv se během svařování elektrody netaví, dochází k jejich opotřebení vlivem vypalovacího efektu. Je tedy nutná údržba v podobě broušení elektrod do požadovaného tvaru. Ten je ovlivněn a závisí na používaném svařovacím proudu. Pro střídavý proud je elektroda broušena do tupého konce, zatímco pro stejnosměrný je to tvar kužele s vrcholovým úhlem odpovídajícím dané hodnotě proudu. Při broušení se tvoří rýhy, jejichž orientace musí být v podélném směru. Tím je podmíněno hoření elektrického oblouku od konce elektrody.



Obr. 29 Vliv plynové čočky na tok plynu [37]

2.3 Využití přehřevu [1], [2], [6], [7], [12], [28], [30], [38], [39]

Přehřev materiálu je v oblasti svařování používán jako prevence před vznikem nežádoucích struktur a s tím spojenými studenými trhlinami (kap. 2.1.4). Při tomto procesu je materiál před svařováním samotným přehříván na určitou teplotu. Tím je zpomalen následné ochlazování svarové lázně a tepelně ovlivněné oblasti. Toto zpomalení tuhnutí se projevuje posunutím křivky v ARA diagramu vpravo a nárůstem času $t_{8/5}$, který udává dobu mezi zchlazením materiál z 800 °C na 500 °C.



Obr. 30 ARA diagram oceli 22MnB5 [39]

Právě průběh křivky tuhnutí v ARA diagramu (obr. 30) popisuje přeměnu fází při ochlazování austenitu. Výsledná struktura je rozdílná v závislosti na rychlosti ochlazování. Feritických struktur se u bórem dopovaných ocelí dosahuje při velmi pomalém a pozvolném ochlazování. V praxi se však vyskytují především struktury martenzitické nebo feriticko-martenzitické. Vznik martenzitických struktur je mimo jiné ovlivněn množstvím uhlíku v oceli. Obecně platí, že se zvyšujícím se obsahem uhlíku rostou hodnoty pevnosti a tvrdosti ocelí. Nejvyšší hodnoty tvrdosti jsou pak sledovány právě v tepelně ovlivněné oblasti, jelikož ta je ochlazována nejrychleji, což vede k bohatšímu zastoupení martenzitu v matici.

Mimo výsledné struktury jsou teplotou přehřevu ovlivňovány další vlastnosti a aspekty svarů. Ovlivnění teplotního cyklu a nárůst času $t_{8/5}$ má příznivý dopad na difuzi vodíku, čímž je snížen jeho obsah ve svarovém kovu. To vede ke zlepšení vlastností svaru, jako je mez pevnosti nebo mez kluzu. Toto opatření se dále může projevit na úrovni a rozložení zbytkových napětí, což souvisí s tvorbou trhlin.

Teplota přehřevu je závislá na více faktorech, zejména však na chemickém složení oceli, jenž je charakterizováno uhlíkovým ekvivalentem. Dalšími aspekty mohou být například očekávaný obsah difuzního vodíku nebo příkon při svařování. Výpočet této teploty je pak odvozen ze zkoušek praskavosti. V praxi se pak setkáváme s celou škálou vzorců pro výpočty těchto teplot a souvisejících parametrů. Zahrnují vliv chemického složení, které může být charakterizováno velikostí uhlíkového ekvivalentu C_e , kdy svou roli hraje také tloušťka materiálu. Tento výpočet je upraven normou ČSN EN 1011.

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot s \quad [\text{hm. \%}] \quad (2.1)$$

kde: s ... tloušťka materiálu [mm]

Hodnota ekvivalentu C_e nesmí překročit hodnotu 0,5 %, aby mohla být ocel považována za svařitelnou. Vztah (2.1) lze použít pouze pro oceli, jejichž chemické složení dosahuje maximálních hodnot uvedených v tabulce (tab. 3).

Tab. 3 Maximální množství prvků v oceli pro použití výpočtu C_e dle (2.1) [7]

Prvek	C	Mn	Cr	Ni	V	Cu
Max. obsah [hm. %]	0,22	1,6	1,0	3,0	0,14	0,30

Vzorec vyhovující ocelím s obsahem uhlíku nad 0,18 hm. % byl zaveden mezinárodním svařečským institutem (IIW/IIS). Je využíván pro oceli nelegované, jemnozrnných nebo nízkolegovaných.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad [\text{hm. \%}] \quad (2.2)$$

Tento vztah lze použít pro oceli s maximálním zastoupením uvedených prvků (tab. 4):

Tab. 4 Maximální množství prvků v oceli pro použití výpočtu CE dle (2.2) [1]

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	Ni	V
Max. obsah [hm. %]	0,25	0,80	1,70	0,90	1,00	0,75	2,50	0,20

Pro vysokopevnostní oceli nízkolegované je pak často využito ekvivalentu CET:

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\text{hm. \%}] \quad (2.3)$$

Výpočet pro zjištění uhlíkového ekvivalentu CET lze použít u oceli s následujícím maximálním množstvím jednotlivých prvků (tab. 5):

Tab. 5 Maximální množství prvků v oceli pro použití výpočtu CET dle (2.3) [1]

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Ti	B	Nb
Max. obsah [hm. %]	0,25	0,80	1,7	1,50	0,70	0,75	2,50	0,18	0,12	0,005	0,06

Uhlíkový ekvivalent, respektive jeho hodnota má vypovídající hodnotu o sklonu zkoumaného materiálu k zakalení ve svarovém kovu či tepelně ovlivněné oblasti, s čímž souvisí již zmíněný vznik trhlin za studena. Mimo to lze dle hodnot také přibližně určit tvrdost materiálu v tepelně ovlivněné oblasti. Samotná hodnota těchto ekvivalentů je pak následně počítána pro stanovení teploty předehřevu.

Teplotu předehřevu lze určit několika odlišnými cestami. Jednou z nich je její experimentální stanovení, například zkouškami praskavosti Tekken nebo CTS testem. Vzhledem však k omezenému použití takto získaných výsledků a náročnosti a nákladnosti experimentu je v praxi volena spíše cesta určení teploty předehřevu výpočtem za pomoci empirických vztahů či diagramů, jenž berou ohledy na širší škálu vstupních aspektů.

Jednou z možností je výpočet T_p dle Séferiána, jenž je využíván zejména u nízkolegovaných ocelí, jejichž obsah uhlíku překračuje hodnotu 0,1 hm. %.

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{(C_c + 0,005 \cdot s \cdot C_c) - 0,25} \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.4)$$

kde: s ... tloušťka materiálu [mm]

C_c ... parametr chemického složení vyjádřen vzorcem:

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \quad [\%] \quad (2.5)$$

Další výpočetní metoda je popsána normou ČSN EN 1011 – 2B, která je určena pro technologie využívající pro svařování elektrického oblouku a to nízkolegovaných vysokopevnostních ocelí. Tato metoda zohledňuje celou řadu vstupních aspektů, jako je uhlíkový ekvivalent CET, tloušťka materiálu, obsah difuzního vodíku nebo tepelný příkon. Výsledná teplota předehřevu je pak dána sumou dílčích hodnot pro jednotlivé vstupní parametry.

Norma ČSN EN 1011 – 2A zase popisuje stanovení teploty předehřevu založené na zkušenostech s uhlíko-manganovými ocelmi. Metoda je určena nelegovaným, jemnozrnným a nízkolegovaným ocelím. Je dána hodnotou uhlíkového ekvivalentu $C_e(\text{IIW})$ (lze též značit CE), ale i obsahem difuzního vodíku nebo tepelným příkonem.

Je nutné si uvědomit, že výše zmíněné metody popsané uvedenou normou jsou vztaženy k předehřevu při svařování elektrickým obloukem. Nelze z nich tedy doslovně vycházet při aplikaci jiné technologie, například právě laseru, jenž se vyznačuje podstatně vyšší rychlostí ochlazování. Podobné empirické vztahy pro svařování laserem však nejsou k dispozici, proto je nutné prozatímní využití vztahů, jež jsou k dispozici.

Při praktických aplikacích je teplota předehřevu využívána od 100 °C, popřípadě od 150 °C a to v závislosti na typu svařované ocele. Pokud je tedy teoreticky vypočítaná hodnota nižší, lze svařovat bez předehřevu. Toto pravidlo je omezeno minimální hodnotou okolní teploty, která by neměla klesnout pod 5 °C.

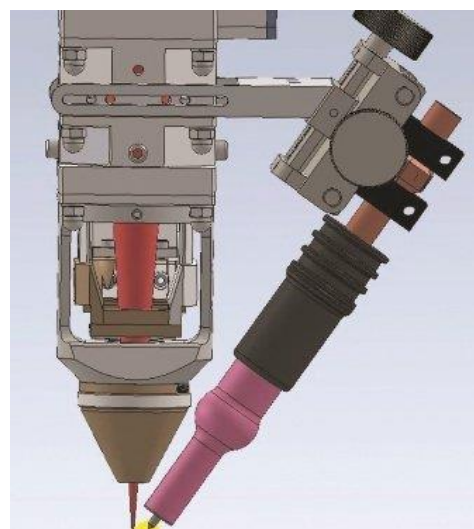
S rychlostí ochlazování svarového spoje úzce souvisí i velikost vneseného tepla neboli tepelný příkon, čímž ovlivňuje vlastnosti svarového spoje. Právě toto teplo je do materiálu vnášeno laserovým svazkem a zapříčiňuje natavení a svaření materiálu. Se snížením tohoto tepla souvisí i pokles deformací a zbytkových napětí a současně i zúžení tepelně ovlivněné oblasti. Je definováno množstvím tepla přivedeného do svaru vztažené na jednotku délky:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I \cdot 60}{v_s \cdot 1000} = k \cdot \frac{P \cdot 60}{v_s \cdot 1000} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2.6)$$

kde: Q ... tepelný příkon [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$]
k ... koeficient účinnosti postupu svařování [-]
U ... svařovací napětí zdroje [V]
I ... svařovací proud [A]
 v_s ... rychlost svařování [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
P ... výkon svařovacího zdroje [W]

V praxi je k předehřátí, ale i dohřátí materiálu při procesu svařování využívána celá řada technologií, jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1. Ocel je předehřívána v pecích, plamenem, indukčně nebo za pomoci hybridních technologií, kdy je k předehřevu využíváno elektrického oblouku. Takovým případem je například laserTIG, viz kap. 2.1.3.

Nespornou výhodou laserTIGu (obr. 31) je to, že je předehříváno pouze nejbližší okolí svaru, tudíž nedochází k tepelnému ovlivňování celého objemu svařence. Jak předehřev, tak i samotné svařování pak probíhá v jednom technologickém kroku, jelikož je využívána jedna svařovací hlava, čímž je zároveň šetřena energie vynaložená k předehřevu urychlen celý proces. Obecně je využíváno při této technologii vysokých svařovacích rychlostí. Komplikací však může být správné nastavení parametrů metody TIG, kdy při špatně zvolených parametrech může docházet k natavování povrchu materiálu obloukem, což může vést k degradaci vlastností svaru.

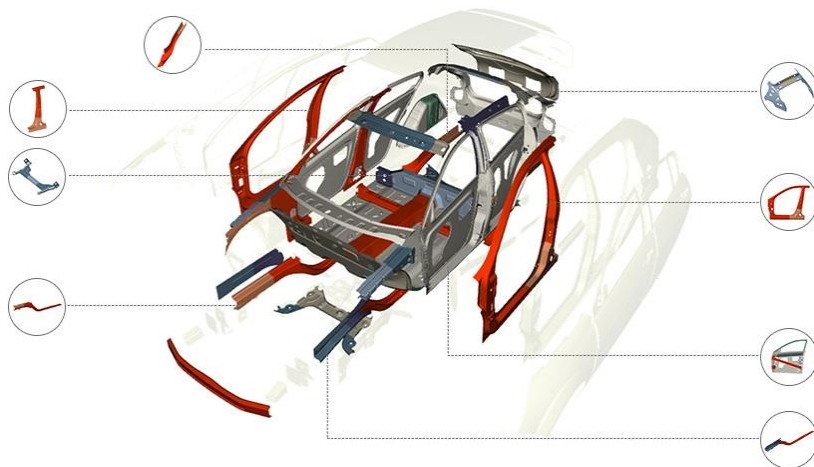


Obr. 31 Princip obloukového předehřevu TIG v kombinaci s laserovým paprskem [28]

2.4 Bórem dopované oceli [2], [3], [5], [41]

Vývoj průmyslu s sebou přináší další a další nároky na materiál. Tyto požadavky jsou zvláště zjevné v automobilovém odvětví, kde je poptávka po ocelích značné plasticity, přitom s vysokými pevnostními charakteristikami. Tyto požadavky jsou splněny jemnozrnnými nízkouhlíkovými ocelmi dopovanými bórem, jež jsou zpracovávány ve formě tyčí, drátů, pásů nebo dutých profilů a svých vlastností dosahují po vhodném zušlechtnění.

V technické praxi jsou tyto materiály pro své vlastnosti využívány především jako pevnosti součásti automobilů, jako například rámy nebo nosníky, uchycení nárazníků, výztuhy nebo boční sloupky (obr. 32).



Obr. 32 Využití USIBORU v automotive [40]

2.4.1 Chemické složení bórových ocelí [2], [3], [41], [42]

Chemické složení těchto martenzitických ocelí je poměrně jednoduché, což příznivě ovlivňuje i jejich ekonomické hledisko. Obsah uhlíku se pohybuje mezi 0,1 až 0,3 hm. %. Tím je zajištěna velmi dobrá svařitelnost, obzvláště pak při obsazích uhlíku pod 0,25 hm. %. Mimo to se tyto materiály vyznačují zastoupením manganu a bóru. Zatímco mangan se vyskytuje v množství do 2 hm. %, bór je zastoupen jen nepatrně a to řádově tisícinami hm. %.

Přitom je to právě bór, který disponuje schopností vytvrzovat strukturu ocelí a to až téměř ke 2000 MPa, což řadí tyto materiály k vysoko pevnostním ocelím. Takovéto nízkouhlíkové oceli pak dosahují prokalitelnosti srovnatelné s prokalitelností ocelí o obsazích uhlíku nad 0,4 hm. % a dalších prvků, jako je chrom, molybden nebo vanad. Z pohledu prokalitelnosti lze tedy říci, že bór má minimálně stonásobnou účinnost, než výše uvedené prvky.

Příliš velká koncentrace bóru naopak vede ke snížení prokalitelnosti a tím i k poklesu meze pevnosti a odolnosti proti rázu. To je způsobeno jeho vylučováním na hranicích zrn austenitu ve formě borokarbidů. Účinnost bóru závisí na obsahu uhlíku v oceli. Se zvyšujícím se obsahem C je snižována účinnost bóru. Při obsazích okolo 0,8 hm. % C lze jeho vliv zanedbat a při 1,6 hm. % C již zcela zanikne. Nejintenzivněji pak ovlivňuje pevnost, tvrdost a prokalitelnost nízkouhlíkových ocelí, tedy při obsazích do 0,35 hm. % uhlíku.

Zakalitelnost ocelí dopovaných bórem je ovlivněna obsahy kyslíku, dusíku a uhlíku. S těmito prvky bór reaguje za vzniku oxidu boritého B_2O_3 , nitridu bóru BN a borokarbidů železa $Fe_{23}(CB)_6$. Prvky jako například křemík nebo titan mají k těmto třem výše zmíněným prvkům vyšší afinitu než právě bór. Proto je potřeba jejich dostatečné množství v oceli, aby došlo k vytvoření jejich sloučenin s kyslíkem a dusíkem. Tím nedojde k navázání bóru, čímž by došlo k ochuzení oceli.

2.4.2 Tepelné zpracování bórových ocelí [2], [3], [41], [42], [43], [44]

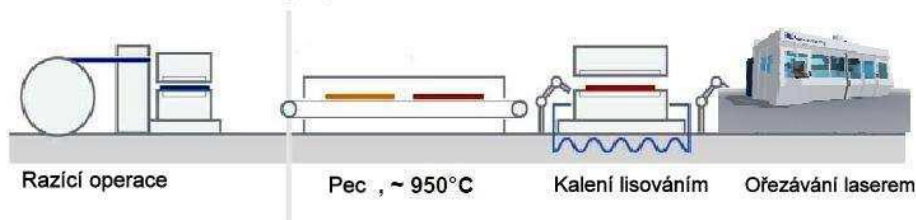
Při dodání nedosahují bórem dopované oceli zdaleka takových mechanických vlastností, jaké jsou od nich požadovány. K výraznému zvýšení meze kluzu a meze pevnosti, a to až o 2,5 násobek, dochází teprve po vhodném tepelném zpracování.

V technické praxi je proto využíváno metody kalení při lisování, neboli též *hot stamping*. Jsou rozlišovány dvě metody, přímá a nepřímá. Přímé lisování je využíváno pro materiály bez

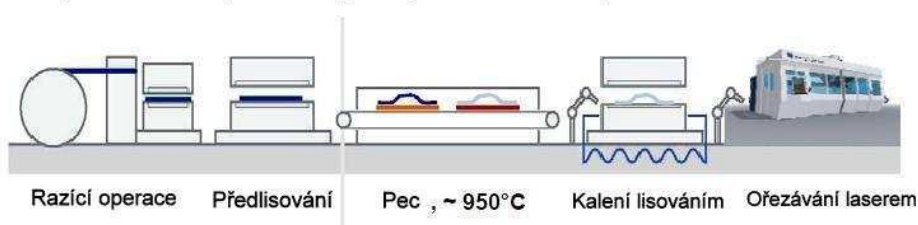
povrchových ochranných vrstev, zatímco nepřímá je určena materiálům s povrchovou úpravou. Od přímé metody se liší zařazením předlisování za studena.

Princip spočívá ve změně struktury oceli během jejího tváření. Nejprve je materiál zahřát nad teplotu A_{c3} , čímž dochází k přeměně původní feriticko-perlitické struktury na austenitickou. Při austenitizaci jsou rozhodujícími faktory správná teplota a čas. Následně dochází k prudkému poklesu teploty, čímž je austenit transformován a vzniká výsledná martenzitická struktura o požadovaných pevnostních vlastnostech.

► Přímá metoda, materiály s povrchovou vrstvou



► Nepřímá metoda, materiály bez povrchové vrstvy



Obr. 33 Postup zpracování bórem dopovaných ocelí [43]

Dochází tedy k tvarování austenitické struktury, která je zakalena v průběhu tváření. Toto vytvrzení je způsobeno stykem rozehřáté oceli se studeným povrchem nástroje. Úplná přeměna martenzitu je podmíněna dosažením kritické rychlosti ochlazování v_k . Pokud by byl materiál ochlazován pomaleji, dojde k transformaci austenitu na ferit či bainit, což by vedlo ke snížení pevnostních charakteristik materiálu (obr. 30).

Pro lisování za tepla jsou rozhodujícími faktory teplota a čas. Samotná výroba je rozdělena celkem do tří kroků a metody přímé. U metody nepřímé do čtyř, jelikož je zařazeno předlisování výrobku (obr. 33).

Nejprve je materiál ohříván v pecích nad teplotu nad A_{c3} , což je například pro ocel 22MnB5 cca $850\text{ }^\circ\text{C}$. Vzhledem k následné manipulaci s materiálem, při které je ochlazován, zahřívá se zhruba na teplotu o $100\text{ }^\circ\text{C}$ vyšší, aby byly tyto tepelné ztráty kompenzovány. Na této teplotě setrvává po dobu 4 až 7 minut, čímž dojde ke kompletní austenitizaci. Pro tyto účely je využíváno pecí s odporovým či indukčním ohřevem, příkladem je například Vozokomorová pec na obr. 34.



Obr. 34 Vozokomorová pec [45]

Následně je materiál přemístěn z pece do nástroje hlubokotažného lisu. Vzhledem k ochlazování materiálu je nutné, aby byl tento transport, který probíhá na volném vzduchu, co

nejrychlejší. Tepelné ztráty jsou pak závislé na tloušťce materiálu, přičemž platí, že čím tenčí plech, tím rychleji se ochlazuje.

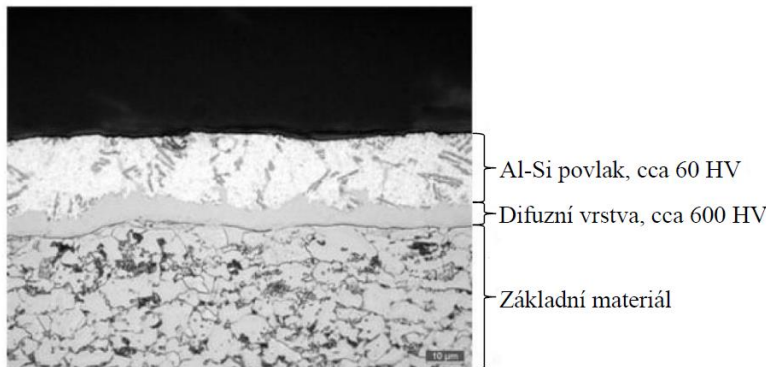
Nakonec dochází k samotnému tváření pomocí speciálního lisovacího přístroje. Pro zachování co největší tvárnosti materiálu jsou požadovány co nejkratší uzavírací časy lisu, což vede k minimálním teplotním ztrátám. Tyto uzavírací časy se pohybují mezi 1 až 2 sekundami.

Během tváření jsou požadovány minimální tepelné ztráty z důvodu zachování tvárných vlastností stávající struktury. Při uzavření lisu je však žádoucí maximální tepelná výměna mezi rozehrátým materiálem a studeným nástrojem. Tím dochází k zakalení materiálu a transformace na požadovanou martenzitickou strukturu. V současné době jsou vodou chlazené nástroje schopny dosáhnout chladicího účinku až $100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, čímž je dostatečně překonána kritická rychlost ochlazování v_k .

Při austenitizaci jsou tyto vysokopevnostní oceli vystaveny teplotám okolo $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, což s sebou nese riziko vysokoteplotní oxidace, tedy tvorby okujů. Pro potlačení tohoto jevu jsou takto zpracovávané materiály chráněny ochrannými povlaky na bázi Al-Si (obr. 35). Ty jsou na plechy nanášeny především technologií žárového pokovování. A jsou složeny z hliníku (87 %), křemíku (10 %) a železa (3 %). V průběhu tváření za tepla se však složení a struktura povlaku výrazně mění.

Výše uvedený povlak má teplotu tání okolo $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, tudíž by při teplotách austenitizace byl nevyhovujícím. V procesu ohřívání však difundují prvky základního materiálu do povlaku a naopak, čímž dochází k tvorbě fází na bázi Al-Fe. Tyto fáze se vyznačují mnohem vyšší teplotou tání, než původní povlak. Rychlost difuze je závislá na rychlosti ohřevu.

V důsledku difuze nelze u těchto povlaků zaručit homogenní chemické složení, což má podstatný vliv na tvařitelnost a svařitelnost takto ošetřených plechů. Struktura povlaku se mění



Obr. 35 Povlak na bázi Al-Si v nevytvrzeném stavu [41]

v závislosti na velikosti austenitizační teploty a době výdrže na této teplotě a dochází k růstu pásem vykazující zvýšený obsah železa a křemíku, čímž dochází ke změnám mechanických vlastností. To může zapříčinit praskání povlaku a vznik trhlin, což negativně ovlivňuje svařitelnost.

Z těchto důvodů jsou hledány alternativy pro ošetření ocelí tvářených za tepla. Jako jedna z možných variant se jeví využití ochranných olejů, jenž na materiálu vytvoří ochranný film, jenž ho chrání před pronikáním kyslíku. Další variantou jsou povlaky na bázi zinku, které lze kvůli jeho nízké teplotě tavení využít pro zpracování vysokopevnostních ocelí pouze metodou nepřímou. V poslední době je pak zaváděna modifikace přímé metody, při které lze tyto povlaky též využít. Vyznačují se homogennější strukturou bez mikrotrhlin v porovnání s povlaky na bázi Al-Si.

2.5 Zkoušky svaru [19], [30], [46], [47], [48]

Svařováním jsou vytvářeny nerozebíratelné spoje při současném tepelném ovlivnění materiálu. Takto vytvořený spoj je specifický jak svojí strukturou, tak i mechanickými vlastnostmi. Vzhledem k důrazu na bezpečnost a spolehlivost takovýchto komponent je nutné, aby byly tyto vlastnosti ověřovány a testovány standardizovanými zkouškami.

Snáze zjištělnými jsou vady makroskopické. Pro jejich odhalení je využíváno klasických prostředků, jakým je například ultrazvuk. Lze je identifikovat i vizuálně pomocí mikroskopů atd. K odhalení vad mikroskopických je třeba využít sofistikovanějších zařízení, čímž se stává jejich odhalení obtížnějším.

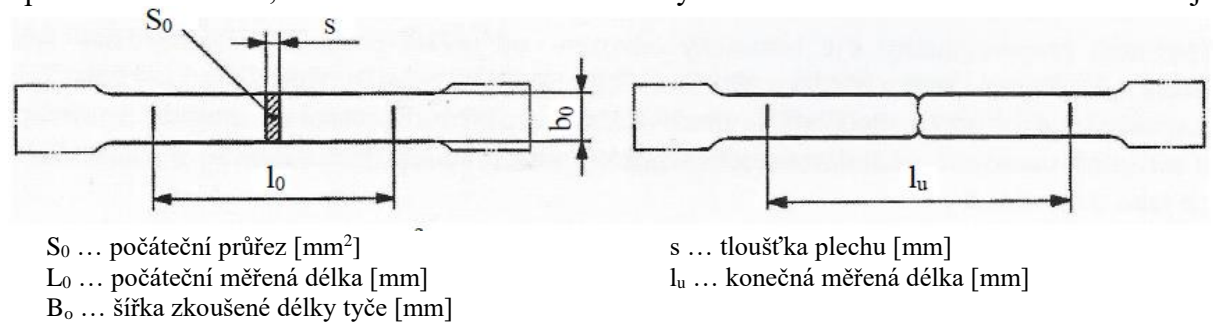
V technické praxi jsou zkoušky svaru rozdělovány do dvou skupin (tab. 1), a to na zkoušky destruktivní, kdy je zkoumaný vzorek porušen a zkoušky nedestruktivní, které zkoumaný vzorek nijak nenaruší. Zkoušky destruktivní jsou aplikovány ve velkých, sériových výrobcích, kdy je na mechanické a metalografické zkoušky kladen velký důraz s ohledem na soudržnost a kvalitu výrobků a stanovení jejich pevnostních limitů. Nedestruktivní zkoušky jsou pak spojené s vysokými pořizovacími náklady potřebných přístrojů a jejich následnou kalibrací a provoz.

Tab. 6 Rozdělení zkoušek svarů [48]

Destruktivní zkoušky	Nedestruktivní zkoušky
Zkouška tahem	Vizuální kontrola
Zkouška lámavosti	Zkouška rentgenovým zářením
Zkouška tvrdosti	Zkouška ultrazvukem
Zkouška rázem v ohybu	Zkouška magnetickou metodou práškovou
Zkouška makro a mikrostruktury	Kapilární (penetrační) zkouška

2.5.1 Zkouška tahem [30], [46], [47], [48], [49]

Zkouška tahem je jednou ze základních mechanických, statických zkoušek využívající se k ověření plastických a pevnostních charakteristik. Princip spočívá v namáhání materiálu pomalu vzrůstající silou až do mezní hodnoty, kdy dojde k poruše materiálu. Je využíváno normalizované zkušební tyče (obr. 36), která je namáhána tahovým napětím. Zkušební tyč je buď kruhového průřezu, nebo se jedná o plochou tyč v případě zkoušení plechů. Tato tyč je opatřena hlavou, která slouží k uchycení vzorku v trhačím stroji.



Obr. 36 Plochá zkušební tyč pro tahovou zkoušku [15]

K natahování tyče dochází za definované teploty a rychlosti deformace, kdy je kontinuálně zvyšována velikost působícího napětí. Výstupem této zkoušky je pak tahový diagram vyjadřující závislost mezi zatížením a deformací vzorku. Zavádí se smluvní diagram tahové zkoušky, kdy jsou veškeré hodnoty napětí vztaheny k původnímu průřezu zkušební tyče. Jeho průběh pak následně charakterizuje následující materiálové vlastnosti:

- Hookův zákon (lineární závislost deformace na napětí)

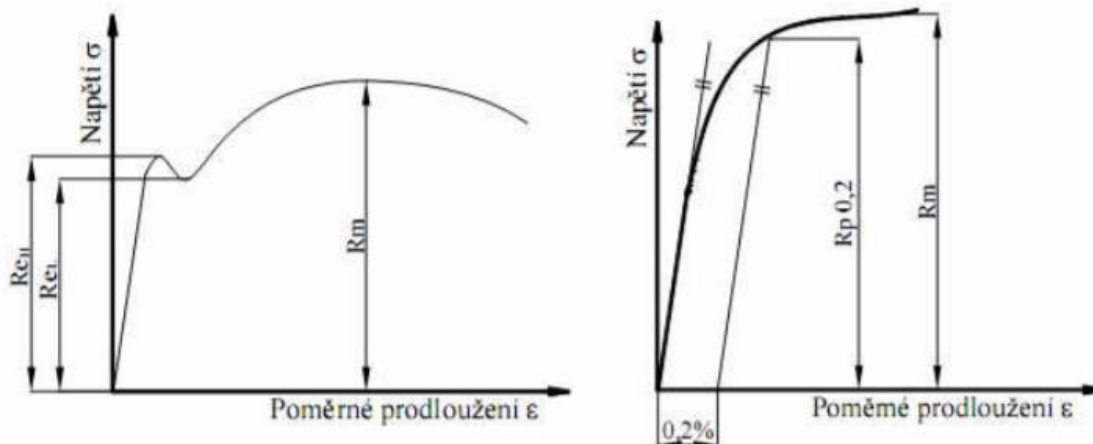
$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad [\text{MPa}] \quad (2.3)$$
 kde:
 - σ ... napětí [MPa]
 - ε ... deformace [%]
 - E ... modul pružnosti v tahu [MPa]
- Mez kluzu R_e

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.4)$$
 kde:
 - F_e ... zatížení na mezi kluzu [N]
 - S_0 ... výchozí průřez zkušební tyče [mm²]

Průběh tahového diagramu a jeho mez kluzu je charakteristický pro dané materiály. Zatímco u měkkých ocelí je pozorována výrazná horní a dolní mez kluzu (obr. 37 a),

u vysocepevných ocelí je mez kluzu nevýrazná. Na lineární závislost (dle Hookova zákona) pak v těchto případech volně navazuje parabolický průběh vedoucí k mezi pevnosti R_m . Proto se zavádí tzv. smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (obr. 37 b). Ta je zjišťována průnikem rovnoběžky s lineární závislostí zatěžování ve vzdálenosti 0,2 % deformace. Takto získaná hodnota meze kluzu je při výpočtech plnohodnotně využívána namísto reálné meze kluzu.

c) Mez pevnosti R_m



Obr. 37 a) Tahový diagram s výraznou mezí kluzu

b) Tahový diagram se smluvní mezí kluzu [50]

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.5)$$

kde: F_m ... maximální zatížení [N]
 S_0 ... výchozí průřez zkušební tyče [mm^2]

V tahovém diagramu prezentuje mez pevnosti R_m maximální zatížení. Při jeho dosažení následuje pokles napětí při současné tvorbě krčku a to až do přetržení tyče, tzv. lomu. Průběh tvorby krčku závisí na plastických vlastnostech zkoušeného materiálu.

d) Tažnost A_5, A_{10}

$$A = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100 \% \quad [\%] \quad (2.6)$$

kde: l ... měřená délka zkušební tyče po přetržení [m]
 l_0 ... výchozí měřená délka zkušební tyče [m]

Tažnost je jednou ze základních plastických charakteristik materiálů. V praxi jsou rozlišovány pro kruhové zkušební tyče dvě varianty A_{10} a A_5 . V případě pro dlouhou tyč (A_{10}) odpovídá měřená délka tyče hodnotě $10 \cdot d_0$, přičemž d_0 je výchozí průměr zkušební tyče. U krátké tyče (A_5) je pak měřená délka rovna $5 \cdot d_0$.

e) Zúžení (kontrakce) Z

$$Z = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 \% \quad [\%] \quad (2.7)$$

kde: S ... průřez zkušební tyče (krčku) po přetržení [mm^2]
 S_0 ... výchozí průřez zkušební tyče [mm^2]

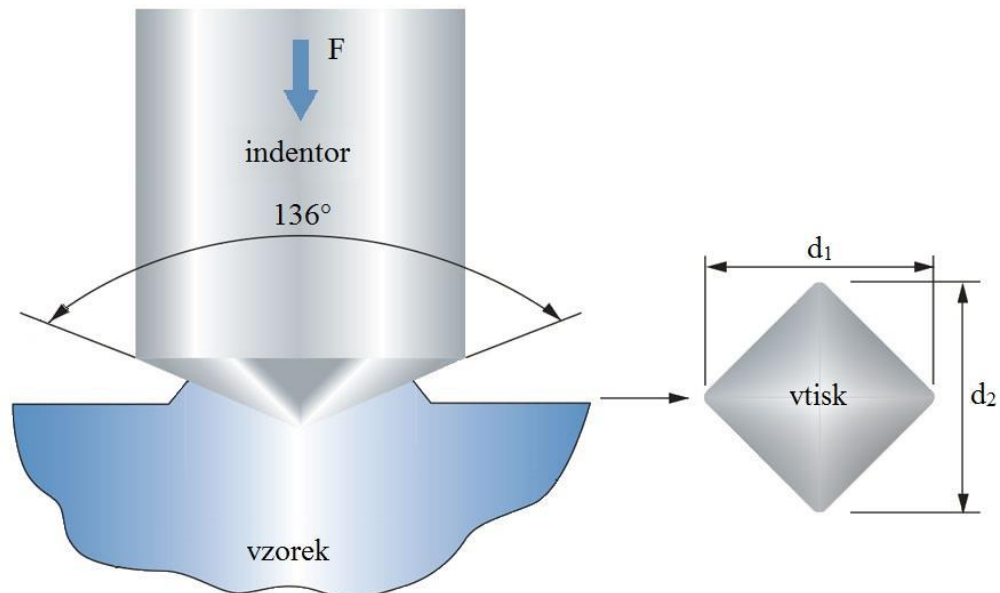
Tahová zkouška, její průběh, podmínky a vyhodnocení se zápisem do protokolu jsou popsány normou ČSN EN ISO 6892-1. Výše popsané získané charakteristiky touto zkouškou

jsou základními pevnostními a plastickými vlastnostmi materiálů. Jejich zkoušení a testování je zařazeno prakticky do všech strojírenských výrob.

2.5.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [29], [30], [49], [51]

Zkouška tvrdosti dle Vickerse je jednou ze statických zkoušek tvrdosti. Ty jsou využívány ke zjišťování odporu materiálu proti statickému vníkaní cizího tělesa, tzv. indentoru. Spolu s dalšími mechanickými zkouškami, jako je například zkouška vrubové houževnatosti nebo zkoušky pevnosti patří mezi základní zkoušky mechanických vlastností materiálů.

Princípem zkoušky tvrdosti dle Vickerse je vtlačování indentoru (obr. 38), tzv. Vickersova jehlanu, jenž je vsazen do speciálně upraveného objektivu optického mikroskopu. Vrcholový úhel tohoto diamantového jehlanu je přesně definován, nejčastěji je využíváno jehlanu s vrcholovým úhlem 136° . Indentor je do materiálu vtlačen zatěžující silou působící kolmo na povrch testovaného povrchu. Zatěžující síly a doba zatížení se volí dle zkoumaného materiálu. Hodnoty zatěžující síly se mohou pohybovat od 10 do 1000 N, doba zatížení pak v rozmezí 10 až 180 s. Je nutné, aby hodnota použitého zatížení a doba trvání byla uvedena ve výsledném označení tvrdosti. Pokud se však doba zatěžování pohybuje mezi 10 a 15 s, pak se neuvádí.



Obr. 38 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [15]

Po zatížení a následném odlehčení následuje změření obou úhlopříček vtisku (obr. 22), z nichž je následně počítána jejich střední hodnota uvažovaná pro výpočet. Tvrdost dle Vickerse je udána bezrozměrnou hodnotou a je dána poměrem mezi zatěžovací silou a plochou vtisku.

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} [-] \quad (2.8)$$

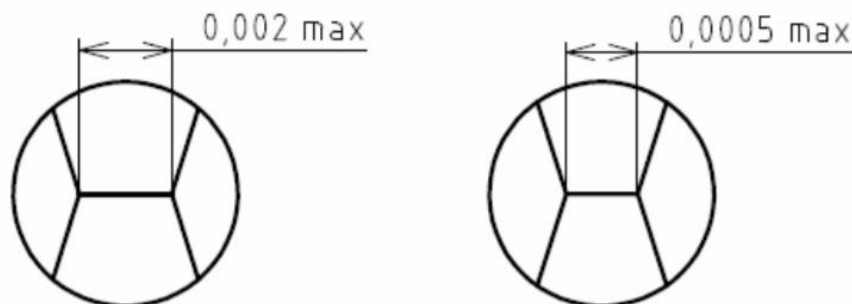
kde: F ... zatěžující síla [N]
 d ... střední délka úhlopříčky vtisku [μm]

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} [\mu\text{m}] \quad (2.9)$$

kde: d_1 ... délka první úhlopříčky [μm]
 d_2 ... délka druhé úhlopříčky [μm]

V technické praxi je pro rychlejší zjištění hodnot tvrdosti využíváno tabulek. Z nich je pomocí zatěžující síly a změřené střední délky úhlopříčky vtisku zjistit odpovídající tvrdost materiálu. Jedná se o velmi univerzální a přesnou metodu, kterou lze využít pro všechny tvrdosti včetně měření na tenkých vrstvách.

Zvláštním případem je pak tzv. měření mikrotvrdomosti dle Vickerse. Princip zkoušky je stejný jako u klasické tvrdosti, ovšem za použití indentoru s menší délkou příčného ostří (obr. 39) za působení menších zatěžujících sil. Tím jsou zapříčiněny malé vtisky, které jsou pak obtížněji měřitelné.



Obr. 39 a) Indentor pro měření makrotvrdomosti

b) Indentor pro měření mikrotvrdomosti [51]

Na takto testovaný materiál jsou kladeny vysoké nároky. Povrch musí být dokonale ošetřen do podoby metalografického výbrusu. To zajistí co nejdokonalější vtisk indentoru a usnadní měření úhlopříček vtisku. Tloušťka zkoušeného materiálu musí dosahovat alespoň 1,5 násobku střední délky úhlopříčky vtisku. Důležité jsou také minimální rozestupy mezi jednotlivými vtisky a vzdálenosti vtisků od okrajů, které jsou závislé na druhu měřeného materiálu.

Hodnoty zkušebního zatížení se dle normy ČSN EN ISO 6507-1 pohybují v rozmezí $0,09807 \div 1,961$ N. Samotné zatížení pak probíhá v časových intervalech od 2 do 8 s při maximální rychlosti zatěžování $0,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

2.5.3 Metalografické šetření [29], [30], [53]

Metalografické zkoušky jsou běžným doplňkem mechanických zkoušek při zkoumání stavu struktury materiálů, popřípadě svarových spojů. Dle použitého zvětšení jsou tyto zkoušky rozdělovány na sledování makrostruktury a mikrostruktury. Pro provedení analýz struktury je nutný vhodně zvolený a odebraný reprezentant materiálu, která je následně broušen, leptán a leštěn. Tako ošetřený vzorek je následně podroben metalografickému šetření, jehož výstupem bývá zpravidla fotodokumentace s popisem a komentářem.

Makrostrukturní rozborů spočívají ve vizuální kontrole zkoumaného vzorku za použití přístrojů o relativně malém zvětšení, jako je například lupa nebo optický mikroskop se zvětšením do 30x. Rozbor makrostruktury je využíván pro posouzení tvaru svaru, odmíšení svarového kovu, hranic ztavení nebo k posouzení šířky, tvaru a charakteru TOO. V praxi je možné setkat se například s těmito metodami:

- Baumannův otisk – jedná se o kvalitativní zkoušku vyhodnocující charakter vyloučení sulfidických vměstků, konkrétně sulfidů manganu nebo železa. Principem je chemická reakce mezi vměstkou síry nacházející se v řezu výbrusu a fotografickým bromostříbrným papírem. K opakování tohoto testu je nutné opětovné broušení a leštění zkoumaného povrchu.
- Makrolept – tato zkouška slouží k vyhodnocení charakteru makrostruktury příslušného výbrusu. Její princip spočívá v naleptání vybroušeného povrchu vzorku činidlem, což zapříčiní vyvolání struktury. Nejčastěji je využíváno leptadel, jako je persíran amonný nebo vodní roztoky kyseliny dusičné. V praxi je u ocelí touto metodou zjišťována celá řada charakteristik, jako například:
 - Hloubka nauhličených či oduhličených vrstev
 - Jakost svarových spojů
 - Průběh vláken (u tvářených dílců)
 - Rozdělení prvků nebo nečistot
 - Příčiny porušení celistvosti

Pro rozborů mikrostruktury je nutno využít sofistikovanějších zařízení, jako jsou výkonné skenovací optické mikroskopy, popřípadě mikroskopy elektronové. Tato pozorování kladou

velmi vysoké požadavky na správnou přípravu zkoumaného povrchu, který musí být dokonale vybroušen, vyleštěn a vyleptán, bez mechanických poškození, jako škrábance či nerovnosti. Slouží k vyhodnocení struktury a fází materiálu. Mezi mikrostrukturní šetření spadají následující úkony:

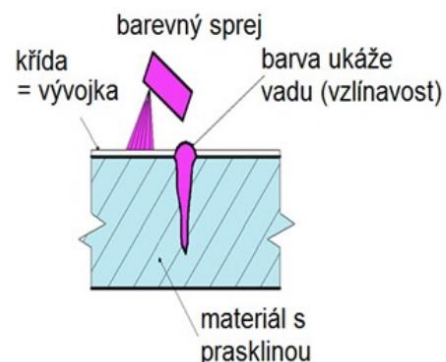
- Kvalitativní mikrostrukturní rozbor – vyhodnocují mikrostrukturu vzorku při zvětšení do 2000x. Mimo samotné pozorování zahrnují také přípravu vzorků, jež zahrnuje jejich vhodné oddělení a zalití do pecek pryskyřice a následné broušení, leštění a leptání. Všechny tyto operace jsou pravidelně prokládány důkladným oplachem vodou či lihem, sušením a čištěním v ultrazvukové pračce. Ač by bylo možné vyhodnocovat pouze vyleštěné povrchy, je zařazeno i leptání, po jehož aplikaci dochází k výraznému vystoupení mikrostruktury. Použité leptadlo závisí na druhu zkoumaného materiálu. V laboratorních podmínkách je pro litiny, nelegované a nízkolegované oceli používáno Nitalu, což je roztok HNO_3 v etylalkoholu. Pro oceli vysokolegované je pak využíváno speciálních leptadel. Výstupem takového rozboru je posouzení přítomnosti a zastoupení jednotlivých strukturních fází nebo složek a celkový vzhled mikrostruktury.
- Stanovení plošného podílu strukturních fází (složek) – za použití světelného mikroskopu o dostatečném zvětšení je určován bodovou metodou. Zvětšení musí být natolik velké, aby bylo možné bezpečně rozeznat jednotlivé strukturní fáze. K vyhodnocení je využívána transparentní fólie s vyrytou mřížkou uložená na matnici mikroskopu.
- Stanovení velikosti zrn – je využívána k vyhodnocení zrnitosti struktury. V případě svarů je posuzována míra zhrubnutí TOO i svarového kovu zapříčiněna tepelným působením. Lze ji využít i pro posouzení zhrubnutí původní austenitické struktury vlivem tepelných procesů během výroby. K jejímu stanovení dochází k porovnávání s příslušnými etalony, jež upravuje norma ČSN 42 0462. Pro důkladné porovnání musí být zkoumaný vzorek řádně ošetřen, tzn. leptán speciálními leptadly.
- Stanovení množství nekovových vměstků – tato zkouška vychází z porovnání vzorku snímaného mikroskopem s příslušným etalonem. Je jí vyhodnocována tzv. vměstkovitost, což obsahuje charakteristiku typu, velikosti i rozložení jednotlivých vměstků vyskytujících se ve zkoumaném vzorku.

2.5.4 Nedestruktivní zkoušky [19], [30], [54]

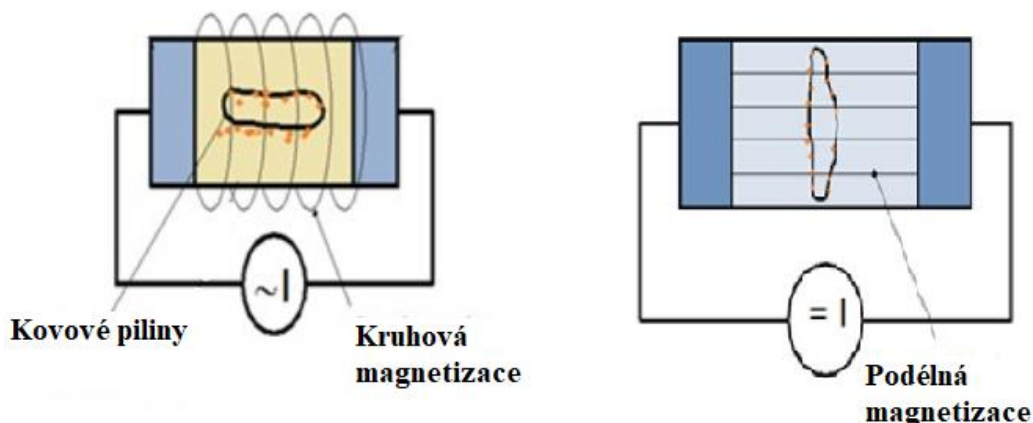
Nedestruktivní metody zkoušení svarů se využívají pro kontrolu kvality spojů na základě daných požadavků. Nedestruktivní metody lze rozdělit na zkoušky pro zjišťování povrchových nebo vnitřních vad. Zatímco k identifikaci vad povrchových slouží kontroly vizuální, penetrační, magnetická prášková nebo pomocí vířivých proudů, ke zjištění vad vnitřních je využíváno ultrazvuku nebo prozáření rentgenovým zářením.

- Vizuální zkouška – tuto nejjednodušší defektoskopickou kontrolu lze rozdělit na metodu přímou a nepřímou. Zatímco při přímém pozorování je objekt zkoumán pouhým okem nebo za použití lupy, při metodě nepřímé je využíváno speciálních televizních kamer s CCD čipem. Tato zkouška klade vysoké nároky na pracovníka a to jak na jeho dostatečnou zrakovou schopnost, tak i na jeho technické znalosti. Pro kvalitní posouzení materiálu musí být jeho povrch dokonale očištěn. Touto metodou je možné identifikovat vady, jakými jsou póry, nedovařené svary, zápaly nebo rozstřik.

- Kapilární (penetrační) metoda – využívá kapilárních vlastností kapalin, tzv. penetrantů, které se skládají ze směsí ropných produktů. Je aplikována pro odhalení povrchových vad, jakými jsou trhliny nebo studené spoje. Důležité je důkladné vyčištění povrchu před samotnou penetrací. Poté následuje aplikace penetrantu, který vyplní nečistoty v povrchu vzorku. Po tomto procesu je povrch očištěn a následně je na něj nanесena vývojka, jenž napomáhá svými absorpčními vlastnostmi vztlínání penetrantu z dutin v povrchu. Následuje inspekce, při níž jsou odhaleny lokality s porušením povrchu materiálu. Princip metody je znázorněn na obr. 40. V je využíváno více variant této zkoušky – metody barevné indikace, fluorescenční metody atd.
- Magnetická prášková zkouška – tuto metodu lze využít pouze u feromagnetických materiálů pro zjištění trhlin na povrchu nebo těsně pod povrchem. Princip je založen na vytvoření magnetického pole ve zkoušeném materiálu. Tím dojde k vytvoření pólů v místě trhlin. Následně je zkoumaná součást polita detekční kapalinou, kterou tvoří olej s železným prachem. Tento prach se uchytí v místě pólů, čímž dojde k vytvoření obrazu vady. Přebytečný prach je z povrchu smyt olejem. U této metody je rozhodující použitý proud. Zatímco pro indikaci podélných vad je používán proud střídavý, pro příčné vady proud stejnosměrný (obr. 41).

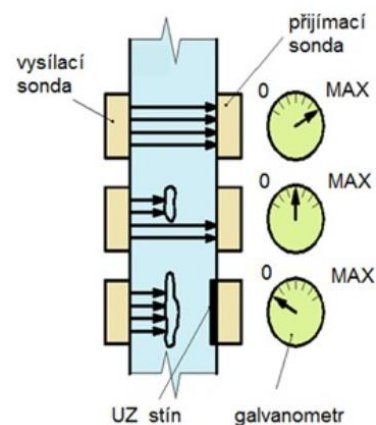


Obr. 40 Princip kapilární metody [54]



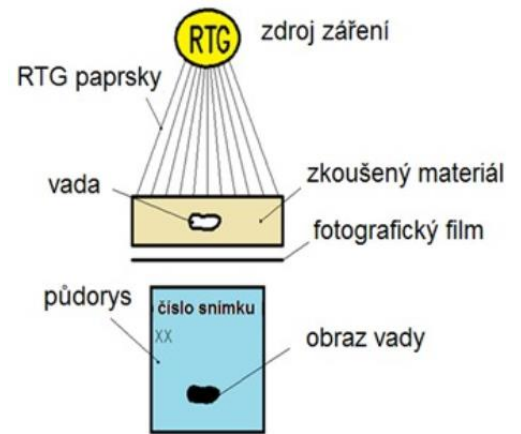
Obr. 41 Magnetická prášková zkouška [54]

- Zkouška svarů ultrazvukem – je využívána pro tlustostěnné součásti, jenž jsou obtížně prozářitelné. Je aplikován ultrazvuk, což je mechanické kmitání s velmi vysokou frekvencí (v praxi 1,5 až 5 MHz). Metoda vychází z poznatku, že vady svarů, jakými mohou být póry, bubliny či trhliny se chovají jako akustická rozhraní, čímž dochází k odrazu části vlny. V praxi je využíváno dvou variant této metody a to odrazové a průchodové (obr. 42). Obě metody jsou založeny na vysílání pulzů do materiálu a následném zachycení buď odražených nebo prošlých vln pomocí galvanometrů nebo osciloskopů. Následně dochází k vyhodnocení zpracovaných signálů, což přináší informaci, v jaké hloubce se vada nachází. Pro správný průběh a vyhodnocení této zkoušky je důležité důkladné očištění výrobku od veškerých nečistot, jako jsou okuje, rez nebo barva.



Obr. 42 Průchodová metoda ultrazvuku [54]

- Zkouška rentgenovým zářením (obr. 43) – metoda využívá průchodu RTG záření materiálem, čímž dochází k zeslabování jeho intenzity. Tím je možné lokalizovat vnitřní vady, které se projeví zčernáním obrazu o různé intenzitě na fotografickém filmu. V místě vady je totiž materiál zeslaben, což vede k nižšímu poklesu intenzity záření. Tím je způsobeno intenzivnější ozáření fotografického filmu, což má za následek vykreslení tmavé skvrny v místě defektu. Rozeznatelnost vad je posuzována měrkou a udávána v procentech prozařované tloušťky. Nevýhodou této metody je zdraví ohrožující RTG záření. Je tedy nutné dokonalé odstínění pro ochranu obsluhy, která musí být příslušně proškolená. V praxi se tato zkouška používá u tlakových nádob, potrubí nebo konstrukcí.



Obr. 43 Princip zkoušky RTG zářením [54]

3 EXPERIMENT

Náplní práce bylo vyhotovení zkušebních svarů daného materiálu za použití hybridní technologie Laser-TIG. Zatímco hodnoty charakteristik laserového svazku zůstávaly konstantní, velikosti proudu elektrického oblouku se měnily. Tyto svary byly následně vyhodnoceny z hlediska mechanických vlastností a to tahovou zkouškou. Následovalo vyhodnocení mikrotvrdoosti dle Vickerse a metalografické šetření.

3.1 Volba materiálu [1], [2], [3], [5], [7]

Pro experiment byly použity plechy jemnozrné vysokopevnostní manganbórové oceli 22MnB5 o tloušťkách 1,9 a 1,3 mm. Tato ocel se při dodání vyznačuje feriticko-perlitickou strukturou a mezi pevnosti okolo 600 MPa. Vyšších mechanických vlastností je dosahováno díky austenitizaci nad teploty 880 °C. Po tomto ději následuje tzv. tváření za tepla, kdy při působení chlazeného nástroje dochází k prudkému poklesu teploty, čímž je dosahováno martenzitické struktury, jenž souvisí se zvýšením meze pevnosti materiálu. Blíže byly tyto oceli popsány v kapitolách 1 a 2.4.

Tab. 7 Chemické složení oceli 22MnB5 dle atestu

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Cr	Mo	B
Obsah [hm. %]	0,213	2,140	1,100	0,017	0,001	0,038	0,030	0,185	0,002	0,002

Pro potřeby experimentu byla použita ocel, jejíž chemické složení popisuje tabulka 4. Jelikož byl materiál dodán ve výchozí feriticko-perlitické struktuře, bylo tváření za tepla nahrazeno ohřevem plechů na teplotu 940 °C po dobu 5 minut. Následně byly materiály zakaleny v olejové lázni, čímž došlo k vytvoření požadované vysokopevnostní martenzitické struktury. Takto ošetřené materiály byly dále zpracovávány dle osnovy experimentu. Mechanické vlastnosti oceli ve feriticko-perlitickém stavu při dodání jsou shrnuty v tabulce 5. S ohledem na hodnoty mechanických vlastností udávající norma (tab. 2) leží hodnoty použité oceli v přípustných intervalech.

Dle výše zmíněného chemického složení byla posouzena svařitelnost zkoumané oceli 22MnB5 za pomoci vyjádření uhlíkového ekvivalentu. Ten byl vyjádřen dle vzorců (2.2) a (2.3) popsanych v kapitole 2.3. Tyto vzorce bylo možné použít, jelikož obsah uhlíku v oceli leží pod hranicí 0,25 hm. %, čímž je aplikace těchto vzorců podmíněná.

$$CE = 0,213 + \frac{1,1}{6} + \frac{0,185+0,002}{5} = 0,43 \text{ hm. \%}$$

$$CET = 0,213 + \frac{1,1+0,002}{10} + \frac{0,185}{20} = 0,33 \text{ hm. \%}$$

Podmínka pro svaření oceli bez aplikace předehřevu, tedy $CE < 0,45$ hm. %, byla splněna. I přes to však s ohledem na strukturu a mechanické vlastnosti byla teplota předehřevu stanovena, jelikož využití předehřevu a jeho vliv na mechanické vlastnosti a strukturu je hlavním cílem tohoto bádání. Pro její výpočet byl využit Séferiánův vzorec (2.4), pro mezivýpočet byl použit vzorec (2.5), jenž vyjadřuje vliv chemického složení. Vzhledem k rozdílným tloušťkám vzorků musí být stanoveny tyto teploty zvlášť.

$$C_c = \frac{360 \cdot 0,213 + 40 \cdot (1,1 + 0,185) + 28 \cdot 0,002}{360} = 0,356 \text{ hm. \%}$$

$$T_{p,1,9} = 350 \cdot \sqrt{(0,356 + 0,005 \cdot 1,9 \cdot 0,356) - 0,25} = 116 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{p,1,3} = 350 \cdot \sqrt{(0,356 + 0,005 \cdot 1,3 \cdot 0,356) - 0,25} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$$

Výsledná teplota předehřevu se pohybuje okolo 115 °C pro obě tloušťky materiálů. Je tedy zřejmé, že jejich rozdíl, 0,6 mm, není tak velký, aby měl výrazný vliv na tuto veličinu. Ačkoliv se předehřev v praxi využívá až od hodnot kolem 150 °C a výš, nejsou velikosti zjištěných hodnot právě zanedbatelné. Proto bude předmětem dalšího zkoumání vliv předehřevu na

charakteristiky svaru a jeho optimálních parametrů. Zároveň by mělo být opodstatněno jeho využití pro testovaný materiál o daných tloušťkách a chemickém složení.

Tab. 8 Mechanické vlastnosti oceli 22MnB5 dle atestu

Mechanická charakteristika	Hodnota
Mez kluzu $R_{p0,2}$	437 MPa
Mez pevnosti R_m	622 MPa
Tažnost A	20 %

Dle atestu (PŘÍLOHA 2) je materiál ošetřen povlakem AS150. Tento povlak na bázi siluminů chrání plech před tvorbou okují, tedy před vysokoteplotní oxidací. Intermetalické fáze povlaku vytvořené během tepelného zpracování plechu ovlivňují tvrdost i strukturu povrchové vrstvy. Projevují se i z hlediska svařitelnosti materiálu, kdy mohou degradovat pevnost svaru. Tato problematika je blíže popsána v kapitole 2.4.

3.2 Vyhotovení zkušebních svarů [10], [19], [20], [54]

Z dodané tabule plechu oceli 22MnB5 byly vyřezány zkušební vzorky o rozměrech 150 x 150 mm. Nutno dodat, že výchozí tabule plechu s délkami hran 1125 x 1250 mm byla určena pro výrobu konkrétního dílce a tudíž již při dodání vykazovala rozdílné tloušťky v různých místech. Pořízené vzorky tedy dosahovaly dvojí tloušťky a to buď 1,9 mm, nebo 1,3 mm.

Svařování vzorků probíhalo v laboratoři Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně. Pro samotné svaření byla využita svařovací soustava sestávající se z následujících přístrojů a zařízení:

- Yb-YAG laser YLS 2000 (obr. 44) – jedná se o pevnolátkový laser využívající pro přenos laserového svazku optického vlákna dopovaného ytterbiem s poměrně vysokou účinností od firmy IPG Photonics. V rámci svařování lze dosáhnout průvaru až do hloubky 5 mm. Díky vyměnitelné svařovací hlavě lze tento přístroj využít i k řezání, či gravírování. Je schopen pracovat jak v pulzním, tak i kontinuálním režimu a jeho chlazení je zajišťováno vodou. Technické parametry zařízení shrnuje tabulka 6.



Obr. 44 Yb-YAG laser YLS 2000 [15]

Tab. 9 Technické parametry Yb-YAG laser YLS 2000 [15]

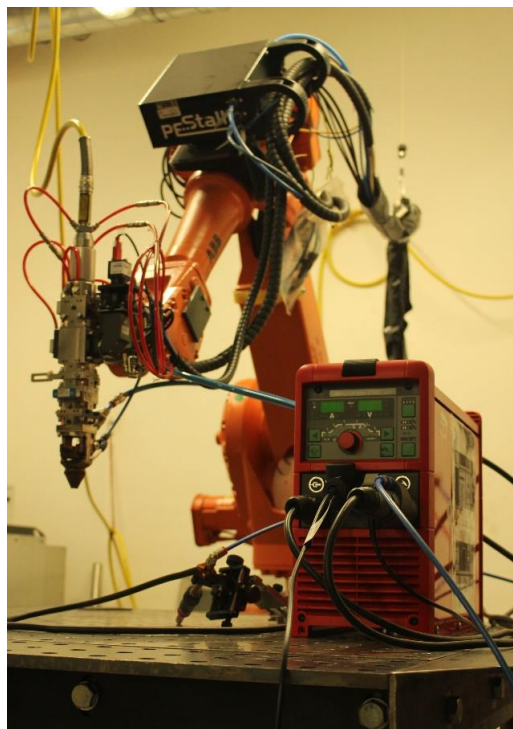
Výkon[W]	2000
Účinnost [%]	cca 30 %
Režim	kontinuální / pulzní
Vlnová délka [nm]	1070 – 1080
Rozměry (d x v x š) [mm]	1106 x 856 x 806

- MagicWave 1700 (obr. 45) – tento digitálně řízený svařovací zdroj od firmy Fronius byl použit pro tvorbu elektrického oblouku metodou TIG zajišťující předehřev. Toto zařízení vyniká širokým rozsahem nastavitelných hodnot proudu i možností volby mezi proudem stejnosměrným a střídavým. Lze využít jak pracovního postupu se stejnosměrným proudem DC, tak i kombinací AC/DC. Díky své nízké hmotnosti a malým rozměrům je zdroj lehký a manipulovatelný, lze jej také řídit dálkovým ovládním. Technické parametry tohoto invertoru shrnuje tabulka 7. Výrobce je doporučován pro svařování, hliníku, oceli nebo i speciálních kovů. V praxi je využíván v automobilovém nebo leteckém průmyslu, dále pak pro kovové konstrukce nebo potrubní vedení.

Tab. 10 Technické parametry zdroje MagicWave 1700 [55]

Síťové napětí [V]	230
Účinnost	0,99
Svařovací proud [A]	3 až 170
Síťové jističení [A]	16
Napětí naprázdno [V]	88
Hmotnost [kg]	15
Rozměry (d x v x š) [mm]	485 x 180 x 344

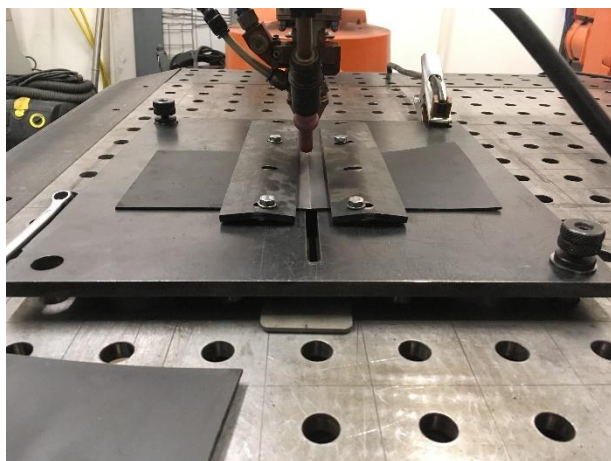
- Robot IRB 2400 (obr. 45) – Tento manipulační přístroj firmy ABB nese svařovací hlavu pevnolátkového laseru i TIG hořák pro předehřev. Pro experiment byla použita svařovací hlava Precitec YW30 a hořák s wolfram-thoriovou elektrodou o průměru 2,4 mm. Dále byl zajištěn přísun inertního plynu v daném průtoku. Konkrétně argonu, jenž vytvářel ochrannou atmosféru. Přístroj vyniká svou rychlostí, přesností i spolehlivostí, díky čemuž je v oblasti strojírenství velmi rozšířeným zařízením. Technické parametry robota popisuje tabulka 8. Rameno robota se pohybuje nad dvousosým polohovacím stolem o nosnosti do 200 kg.



Obr. 45 Zdroj MagicWave 1700 a manipulační robot IRB 2400 [54]

Tab. 11 Technické parametry robota IRB 2400 [56]

Dosah [mm]	1 550
Nosnost [kg]	10
Hmotnost [kg]	380
Počet stupňů volnosti	6 + 2 (přídavná zařízení)
Přesnost polohování [mm]	0,03
Přesnost trajektorie pohybu [mm]	0,11 až 0,15
Napájecí napětí [V]	200 až 600
Rozměry (d x v x š) [mm]	600 x 1564 x 723



Obr. 46 Upnutí vzorků

Před samotným svařováním bylo okolí hran určených ke svaření ručně očištěno smirkovým papírem od okují vzniklých při kalení a dále ručně odmaštěno pomocí acetonu. Jednalo se celkem o 11 zkušebních vzorků. Bylo tedy rozhodnuto, že dojde ke svaření deseti tabulek plechu, čímž vznikne 5 zkušebních svarů. Vzorky byly řádně upnuty pomocí upínek (obr. 46). Toto upnutí mělo velký vliv na výslednou podobu a přesnost svaru, jelikož zkušební plechy byly po tepelném zpracování značně deformovány, což je patrné i z přiloženého obrázku. Po tomto kroku následovalo vycentrování

svařovací hlavy a kontrola její trajektorie, tzn., že hlava projela nad vzorky vypnutá. Před samotným svařováním dle předem stanovených parametrů proběhlo vždy na okrajích plechu jejich bodové svaření za pomoci laseru. Toto opatření zabránilo rozevírání spáry mezi plechy, které by mohlo být zapříčiněno v důsledku náhlých teplotních změn materiálu.

Celkem bylo tedy provedeno pět liniových, zkušebních svarů za daných svařovacích parametrů. Ty blíže popisuje tab. 12:

Tab. 12 Parametry svařování

Číslo vzorku	Tl. mat. [mm]	Technologie	Výkon laseru [W]	Proud oblouku [A]	Vnesené teplo [J·mm ⁻¹]
1	1,9	Laser	1 100	-	40,15
2	1,9	Laser + TIG	1 100	20	49,15
3	1,9	Laser + TIG	1 100	40	58,15
4	1,3	Laser + TIG	1 100	60	67,15
5	1,3	TIG	1 100	65	117,0

Pozn.: Svary zhotovené pomocí laserové technologie probíhaly za konstantní rychlosti svařování $v_s = 20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (1200 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$), svařování metodou TIG pak při rychlosti $v_s = 5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (300 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$) za použití stejnosměrného proudu (DC). Ochranná atmosféra je zajištěna argonem (průtok: 16,5 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$). Geometrie svařovací sestavy LaserTIGu, viz PŘÍLOHA 3.

Se změnami proudu oblouku nebo svařovací rychlosti souvisí také změny hodnot vneseného tepla. O této problematice blíže pojednává kapitola 2.3. Pro výpočet těchto hodnot bylo použito více variant vzorců, a to jak vzorce pracující s výkonem (laser), tak s proudem a napětím (TIG). Při výpočtu vneseného tepla hybridní technologií bylo nutné tyto dílčí výsledky spojit. Vycházelo se ze vzorce (2.6).

- a) Výpočet vneseného tepla laserem – parametry laseru byly po celou dobu konstantní. Výkon laseru byl nastaven na 1100 W a svařovací rychlost odpovídala hodnotě $v_s = 20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Svařování probíhalo v kontinuálním režimu, přičemž tepelná účinnost laseru byla určena $k = 0,73$. Ochranná atmosféra byla zajištěna argonem s průtokem 16,5 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$.

$$Q_{\text{Laser}} = \frac{0,73 \cdot 1100}{1000 \cdot 20} = 40,15 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

- b) Výpočet vneseného tepla obloukovou metodou TIG – tato technologie byla využita pro aplikaci předehřevu u vzorků 2 až 4, pro vzorek č. 5 pak byl zkušební svar zhotoven výhradně touto technologií. Pro výpočet vneseného tepla byl aplikován vzorec využívající hodnot proudu a napětí oblouku. Hodnoty proudu uvádí tab. 12, pro napětí je pracováno s jeho střední hodnotou, která činí pro všechny vzorky: $U = 15 \text{ V}$. Rozhodující pro vnesené teplo touto metodou tedy bude použitý proud a rychlost svařování.

$$Q_{\text{TIG}} = \frac{0,60 \cdot 65 \cdot 15}{1000 \cdot 5} = 117,0 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

- c) Výpočet vneseného tepla hybridní metodou LaserTIG – pro výpočet vneseného tepla touto technologií bude nutné zkombinovat oba dva výše využitě vzorce. Jelikož jsou svařovací parametry laseru konstantní, bude se vnesené teplo měnit v závislosti na změně použité velikosti proudu pro předehřev obloukovou metodou TIG. Výsledné vnesené teplo pak bude součtem vnesených tepel oběma technologiemi.

$$Q_{\text{LASTIG}} = Q_{\text{Laser}} + Q_{\text{TIG}} = \frac{0,73 \cdot 1100}{1000 \cdot 20} + \frac{0,60 \cdot 20 \cdot 15}{1000 \cdot 20} = 49,15 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Tento postup byl použit pro vzorky č. 2, 3 a 4, přičemž vždy došlo ke zvýšení proudu o 20 A. Jelikož byl zbytek vstupních hodnot konstantní, došlo vždy k navýšení vneseného tepla o + 9 $\text{J}\cdot\text{mm}^{-1}$.

3.3 Tahová zkouška [30], [46], [47], [48]

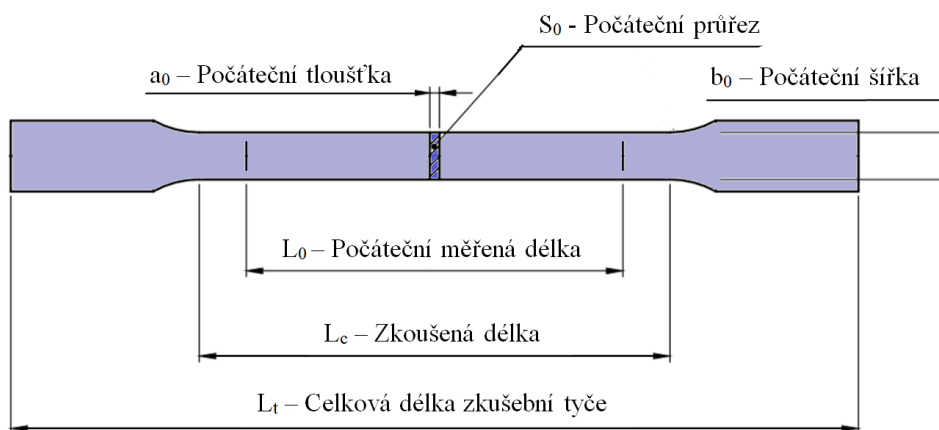
Tahová zkouška je jednou ze základních mechanických vlastností. Celý její průběh je přesně popsán normou ČSN EN ISO 6892-1 (dříve také ČSN EN 10002-1, dnes neplatná). Probíhá se pokojové teploty a její princip spočívá v deformaci zkušební tělesa v důsledku tahových napětí. Výsledkem je průběh závislosti napětí na přetvoření vzorku. Pro svou jednoduchost a praktičnost je velmi rozšířená. Blíže byla tato zkouška popsána v kapitole 2.5.1.

Jelikož zkoumaným tělesem byly svařené tabule plechu, bylo jako zkušebních těles využito plochých tyčí (obr. 47) s hlavami na uchycení v čelistech. Ty zároveň zabraňují přetržení vzorku poblíž míst upnutí. Pro zkoumanou ocel 22MnB5 o tloušťkách 1,9 mm a 1,3 mm byly použity zkušební tyče s geometrií, jež vykresluje obr. 48, hodnoty jednotlivých velikostí jsou následně zaznamenány v tab. 13.



Obr. 47 Zkušební tyč pro tahovou zkoušku

Na zkušební tyče byly před zahájením zkoušky nanесeny měrné rysky, jež ohraničují měrnou oblast. Bylo nutné tyto rysky nanést nedestruktivním způsobem. To znamená, že nemohly být realizovány vyrytím do materiálu, jelikož by tak mohly ovlivnit průběh zkoušky a její výstupy. Byly proto zhotoveny pomocí permanentního fixu na kov. Tyto rysky jsou navzájem vzdáleny 80 mm a 40 mm od středu tyče, tedy od svaru. Slouží k vymezení měrné oblasti a následnému zhodnocení tažnosti materiálu.



Obr. 48 Geometrie zkušební tyče [54]

Tab. 13 Rozměry zkušebních tyčí

Měřený parametr	Hodnota [mm]
Počáteční měřená délka L_0	80
Zkoušená délka L_c	110
Celková délka zkušební tyče	250
Počáteční šířka b_0	11,9 – 12,66
Tloušťka materiálu	1,3 / 1,9
<i>Pozn.: V závislosti na tloušťce materiálu se měnil i počáteční průřez S_0.</i>	

Tahová zkouška probíhala na hydraulickém trhacím stroji ZD 40 v dílnách VUT UST v Brně. Toto zařízení je určeno k provádění tahových i tlakových zkoušek a to až do zatížení 400 kN, přičemž rychlost zatěžování lze korigovat. Pro záznam o průběhu působící síly je

přístroj vybaven snímačem síly. Jeho součástí je řídicí jednotka EDC 60, která je určena právě pro hydraulické zkušební stroje. Získaná data jsou následně vyhodnocována a graficky zpracována pomocí softwaru M-TEST a tabulkového editoru MS Excel 2010. Podrobnější popis trhacího stroje a jeho parametry a charakteristiky, viz PŘÍLOHA 4.

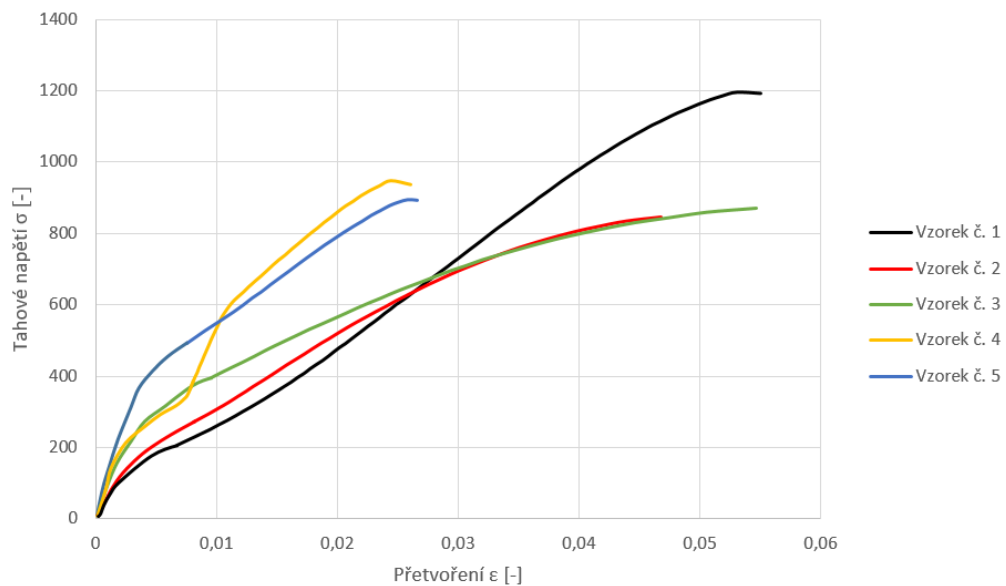


Obr. 49 Upnutí vzorku v kleštinách

Prvním krokem průběhu zkoušky bylo upnutí vzorků do kleštin za rozšířené konce zkušebních tyčí (obr. 49). Po upnutí je stroj spuštěn a postupně zvětšující se zatěžující síla působí na vzorek. Rychlost zatěžování byla zvolena $v_t = 15 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Zatěžování probíhá až do momentu porušení zkušební tyče lomem. Data byla výše zmíněným softwarem M-TEST ihned zpracována a graficky vykreslena závislost mezi zatěžující silou a dráhou. Po vyjmutí vzorku z kleštin byly obě části přiloženy k sobě a byla změřena vzdálenost měrných rysek pro stanovení tažnosti materiálu.

Samotná tahová zkouška byla provedena celkem pro 14 zkušebních tyčí, přičemž vzorky č. 1 až 4 byly reprezentovány třemi zástupci, vzorek č. 5 pak jen dvěma. Provedení zkoušky bylo z důvodů vysoké tvrdosti zkoumaného materiálu a malé tloušťce plechů značně komplikované, jelikož nedocházelo k dostatečnému zakousnutí kleštin do materiálu. Ten v nich následně prokluzoval, což ovlivnilo průběh závislosti napětí na přetvoření. Toto zkrácení

Závislost tahového napětí na přetvoření vzorku



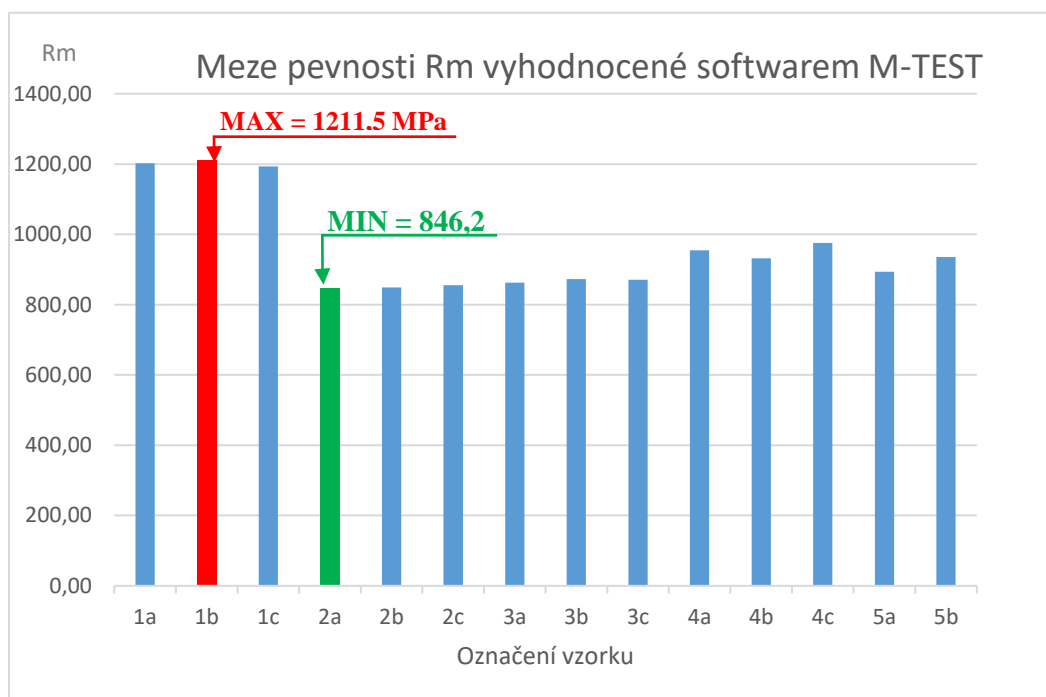
Graf 1 Průběh tahového napětí v závislosti na přetvoření

muselo být následně manuálně upraveno. I přes tyto úpravy jsou však průběhy napětí do jisté míry zkrácené. Pro důkladnější prozkoumání meze pevnosti v tahu by bylo třeba testovat plechy o větší a nejlépe konstantní tloušťce pro všechny vzorky. Výsledek zkoušky by mohlo také příznivě ovlivnit zdrsnění rozšířených hlav pro upnutí, čímž by se zvýšilo tření a došlo by k eliminaci prokluzu v čelistech. Průběh napětí na přetvoření pro reprezentativní vzorek od každého ze zkušebních svarů prezentuje graf 1. Lze pozorovat, že zejména vzorky č. 1 – 3 se víceméně potkávají v lineární oblasti Hookova zákona. Tento úsek je však příliš krátký, jak je patrné z hodnot poměrného přetvoření i hodnot tažnosti, viz tab. 14. Vzhledem k těmto okolnostem nebyla vyhodnocována mez kluzu $R_{p0,2}$, která se svými hodnotami určenými softwarem M-TEST velmi blížila hodnotám meze pevnosti v tahu R_m .

Kompletní souhrn výsledků všech svarových tyčí pak obsahuje tabulka 14, která popisuje naměřené hodnoty pevnosti v tahu a tažnosti softwarem M-TEST, grafické vyhodnocení těchto výsledků pak graf 2. Je možné pozorovat, že vzorek č. 1, tedy vzorek s nejmenším vneseným teplem jasně ostatní vzorky převyšuje z hlediska pevnosti v tahu. Co se týká tažnosti, jsou naměřené hodnoty pro zakalenou ocel 22MnB5 velmi malé, ovšem dá se říci, že ve většině případech se hodnoty potkávají. Výjimkou jsou již zmíněné vzorky č. 4 a 5.

Tab. 14 Hodnoty naměřené softwarem M-TEST pro jednotlivé zkušební tyče

Vzorek	S0[mm ²]	Fm[N]	Rm[MPa]	A[%]
1a	23,75	28553,60	1202,26	1,25
1b	23,66	28657,20	1211,46	0,63
1c	23,75	28337,20	1193,15	1,25
2a	23,22	19647,20	846,21	1,25
2b	23,75	20154,80	848,62	1,25
2c	22,61	19336,80	855,23	0,63
3a	24,05	20756,80	862,93	1,25
3b	23,66	20644,00	872,71	1,25
3c	23,94	20841,60	870,58	1,25
4a	16,43	15678,00	954,11	1,25
4b	16,25	15142,00	931,82	0,63
4c	16,44	16044,80	975,66	0,63
5a	16,32	14577,60	893,51	0,12
5b	15,99	14963,20	935,78	0,12



Graf 2 Porovnání mezí pevností Rm vyhodnocených softwarem M-TEST pro jednotlivé vzorky

Součástí tahové zkoušky byla i tzv. fraktografie, kdy byly zkoumány lomové plochy zkušebních tyčí. Během zkoušek byly vizuální kontrolou posouzeno, že veškerá porušení nastala ve svaru, konkrétně v tepelně ovlivněné oblasti. To se fraktografickou analýzou potvrdilo, když byl pozorován křehký lom v důsledku zhrubnutí zrna v subzóně tepelně ovlivněné oblasti, tzv. oblasti přehřátí. Ta je charakteristická právě hrubozrnnou strukturou, jelikož v této oblasti dochází k překročení teploty intenzivního růstu zrn, což vede ke vzniku zrn nových, až 100x větších. Obecně dochází k praskání právě v tomto pásmu. Dále zde bývá pozorován pokles houževnatosti a výrazné zhoršení plasticity. Příklad křehkého lomu vzorku č. 1 a č. 5, viz tab. 15:

Tab. 15 Snímky fraktografické analýzy



3.4 Metalografické šetření [29], [30], [48], [57]

Makro i mikrostruktura byly pozorovány na metalografických výbrusech, jenž by měly co nejdokonalěji reprezentovat celý vzorek. Zhotovení těchto výbrusů bylo provedeno v metalografické laboratoři UPT AV v Brně. Pro co nejdokonalější metalografické šetření je důležité správné zpracování těchto vzorků. To probíhalo následujících krocích:

- Po vybrání vhodné, reprezentativní části svaru byla oddělena řezáním na metalografické pile MTH Mikon 110 (obr. 52). Toto zařízení je vybaveno intenzivním chlazením v podobě chladicí emulze, čímž je předcházeno tepelnému ovlivnění vzorků v důsledku řezání. Po tomto úkonu následoval oplach vodou, sušení, vybroušení pozorovaných ploch do roviny a na závěr oplach v technickém lihu a praní v ultrazvukové pračce.
- Dalším procesem bylo lisování do pryskyřice. Ošetřené a zbroušené vzorky byly položeny na etanol, tedy dokonale rovinnou plochu a zasypány granulátem pryskyřice. Zahřátím a postupným stlačováním došlo k vytvoření pecek se vzorky. Celý proces trval přibližně 5 minut, kdy byl granulát 210 s zahříván a stlačován a zbylých 90 s byla pecka ochlazována.



Obr. 50 Metalografická pila MTH Mikon 110 [54]

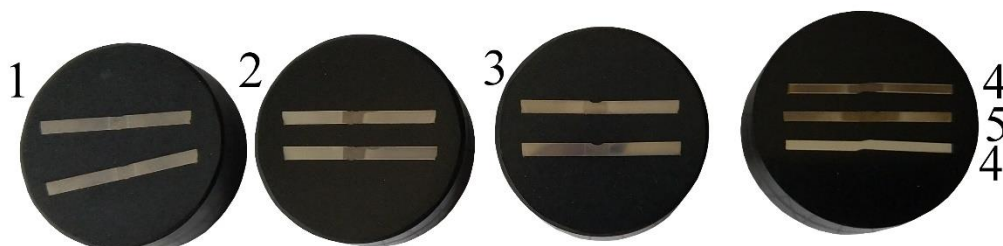


Obr. 51 A) Brousící zařízení Struers Tegamin – 20

B) Zařízení pro lisování pecek Struers CitoPress – 1 [15]

- Následovala série strojních, automatických broušení a leštění na zařízení Struers Tegamin – 20 (obr. 53), za použití brusných kotoučů a suspenzí. Každý z procesů broušení trval okolo

3 minut, leštění pak zabralo vždy po 2 minutách. Otáčky i časy broušení byly zadávány dle volených programů. Kotouče byly postupně obměňovány od nejhrubšího k jemnějším. Poté byly aplikovány diamantové suspenze o zrnitosti 9, 3 a 1 μm . Při broušení byly vzorky oplachovány vzorkem vody, což primárně sloužilo k jejich chlazení, sekundárně pak k odvodu nečistot. Mezi každou operací broušení i leštění proběhl oplach vodou a lihem a následné praní v ultrazvukové pračce (Ulsonix Proclean 2.0M) v lihové lázni po dobu 30 s. Je nutné, aby do tohoto zařízení byly vzorky vkládány vždy povrchem vzorku nahoru, čímž se předejde jeho poškrábání. Po ultrazvukové lázni vždy proběhl ještě opětovný oplach vodou, lihem a následně sušení za pomoci horkého proudu vzduchu.



Obr. 52 Metalografické výbrusy v pryskyřicových peckách

- Posledním úkonem pro přípravu metalografických výbrusů bylo leptání. Jako leptadlo byl použit Nital, což je 3% roztok HNO_3 v ethanolu, který je běžně používán pro nízkolegované oceli. Toto leptadlo bylo zvoleno na základě chemického složení leptaného materiálu, přičemž v této volbě hraje nejzásadnější roli obsah chromu a niklu, dále pak molybdenu a vanadu. Samotné leptání bylo velmi rychlé, cca 3s. Ihned po vyjmutí vzorku z leptadla proběhl oplach vodou a ponor do lihové lázně. Následoval proces praní v ultrazvukové pračce, oplach a sušení. Na závěr byly vzorky opticky zhodnoceny.

Vzhledem k množství vzorků byly vyhotoveny celkem 4 pecky s metalografickými výbrusy, přičemž vzorky 1 až 4 reprezentovaly vždy dva výbrusy, vzorek č. 5 pak pouze jen jeden výbrus, viz obr. 54. Pořízené vzorky byly následně použity pro zkoumání makro a mikrostruktury a pro provedení šetření průběhu mikrotvrdosti v oblasti základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu.

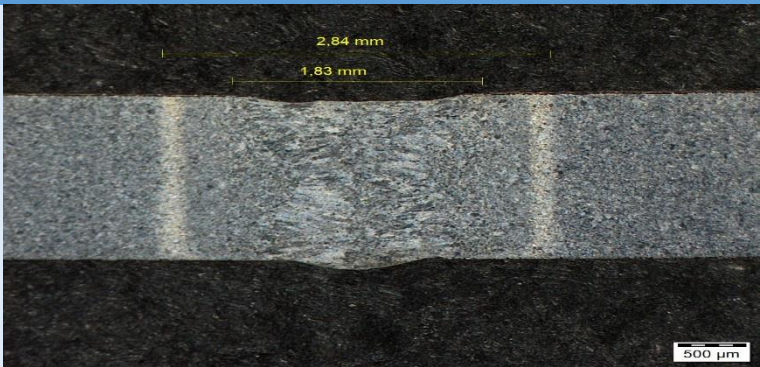
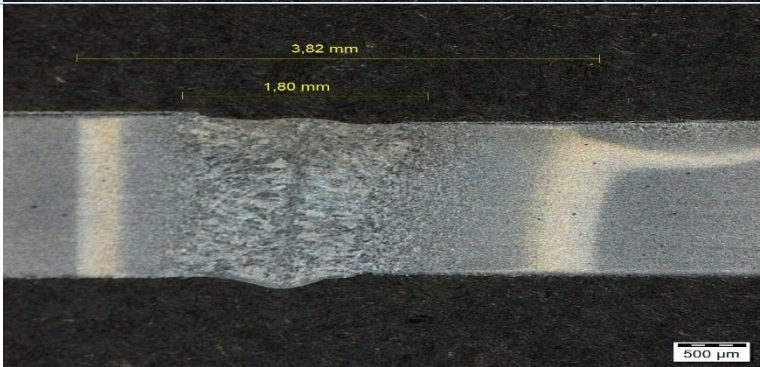
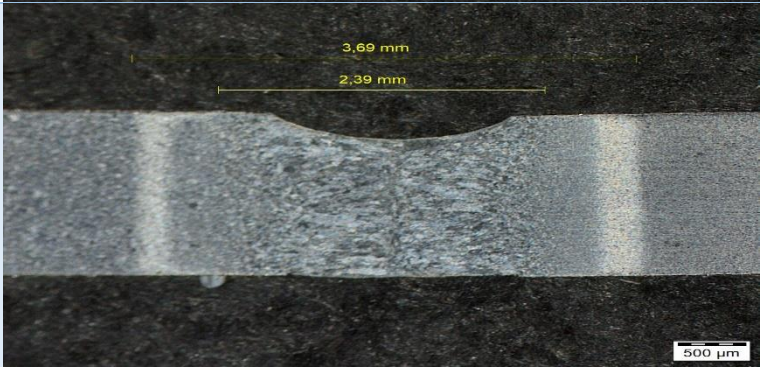
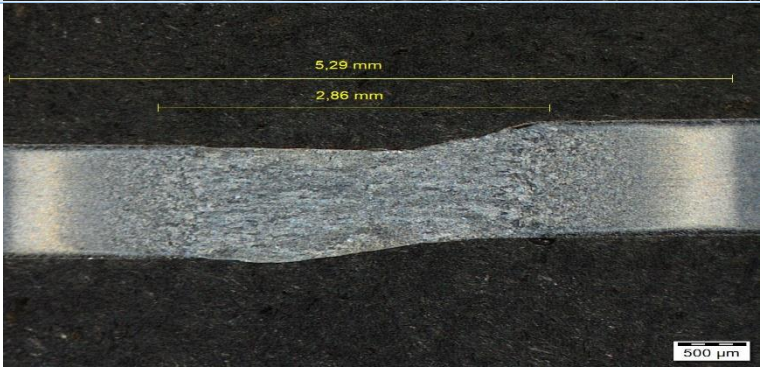
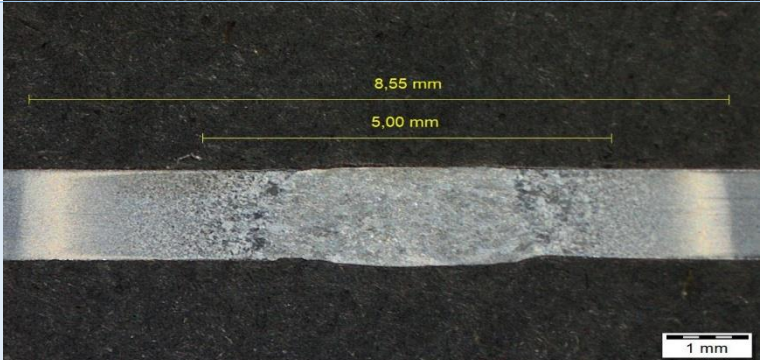
3.4.1 Vyhodnocení makrostruktury [29], [30], [48]

Z hlediska makrostruktury jsou vyhodnocovány především rozměry tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu, dále pak tvar svaru a některé typy vad, jako například propadlý kořen svaru, pórovitost nebo výskyt vměstků. Pro pořízení makroskopických snímků zkušebních svarů byl využit optický mikroskop Olympus SC 50 (obr. 55) v laboratoři Ústavu přístrojové techniky Akademie věd. Vzhledem k použití různých tloušťek plechů není možné mezi sebou vzájemně porovnat všechny zhotovené zkušební svary. Jejich makrostruktura je vyobrazena v tabulce 16:

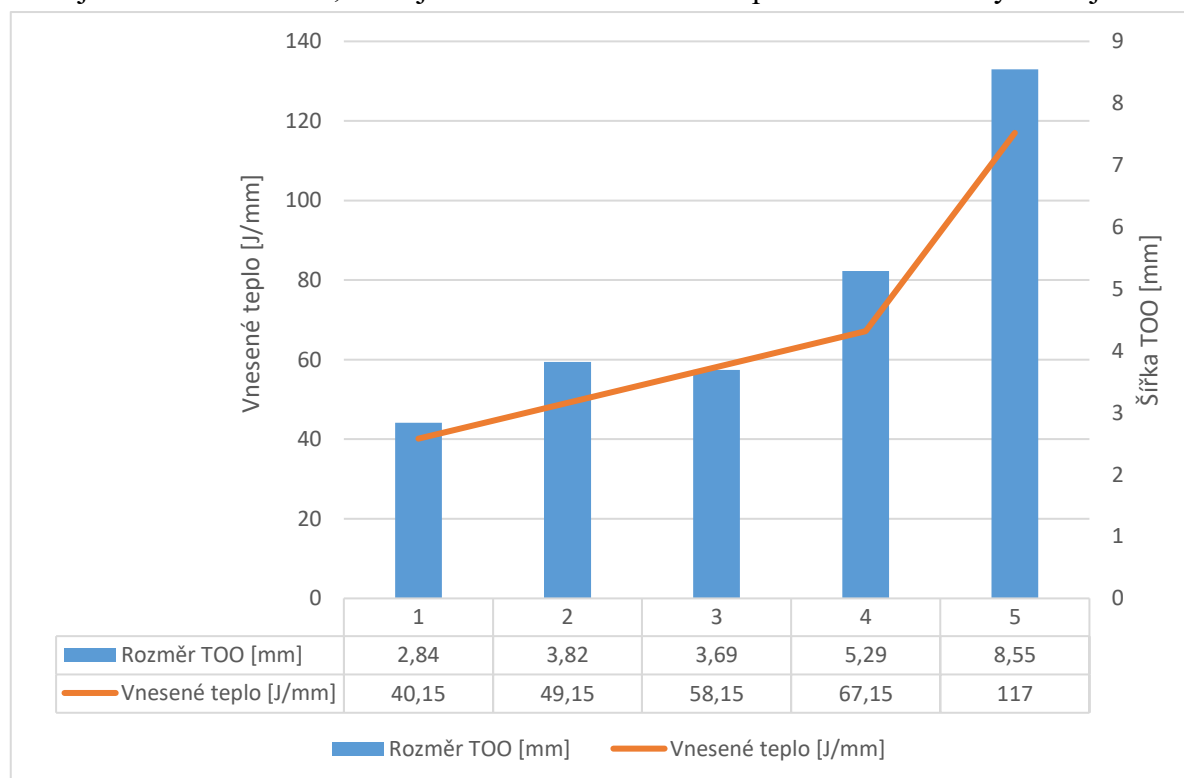


Obr. 53 Optický mikroskop Olympus SC 50 [54]

Tab. 16 Makrostruktura svarů

Metoda svařování / Rozměry SK a TOO	Makrostruktura s rozměry TOO a SK
<p>LASER</p> <p>SK = 1,83 mm TOO = 2,84 mm</p>	
<p>LASER + TIG 20 A; DC</p> <p>SK = 1,80 mm TOO = 3,82 mm</p>	
<p>LASER + TIG 40 A; DC</p> <p>SK = 2,39 mm TOO = 3,69 mm</p>	
<p>LASER + TIG 60 A; DC</p> <p>SK = 2,86 mm TOO = 5,29</p>	
<p>TIG</p> <p>65 A; $v_s = 5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$</p> <p>SK = 5,00 mm TOO = 8,55 mm</p>	

U vzorků 1 – 3 (tl. 1,9 mm) má svarový kov v řezu tvar přesýpacích hodin. S rostoucím vneseným teplem dochází přirozeně k růstu šířky svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti, zejména ve středu materiálu (pas přesýpacích hodin). Tento trend je u vzorku č. 2 narušen zřejmým vychýlením elektrického oblouku vůči ose svaru. To mohlo být zapříčiněno nestabilitou oblouku při malém proudu, chybou sestavy experimentu apod. U tohoto vzorku lze navíc pozorovat, že plechy nemají stejnou tloušťku. U vzorku č. 3 je evidentní propadlý svar. K poměrně velkému lineárnímu přesazení svařovaných dílů došlo u vzorku č. 4. Do vzorku č. 5, který byl svařen metodou TIG bylo největší vnesené teplo, což se projevuje na značně větších rozměrech svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Závislost mezi rozměrem tepelně ovlivněné oblasti a vneseným teplem vykresluje graf 3. Je však nutné si uvědomit, že vzorky nemají totožnou tloušťku, a tak je nelze z tohoto hlediska porovnávat všechny navzájem.

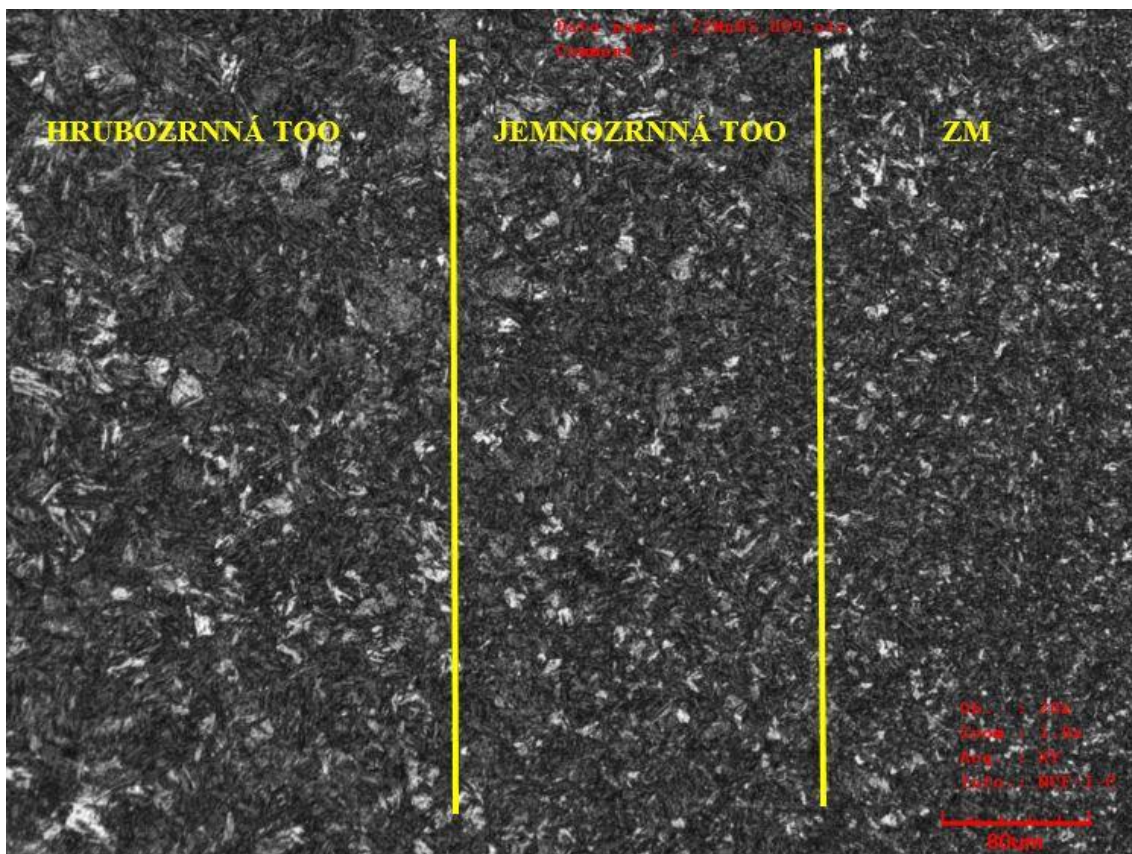


Graf 3 Závislost rozměrů TOO na vneseném teple Q

V grafu lze vypořadovat skutečnost, že ačkoliv bylo vzorku č. 2 dodáno menší teplo, přesto je rozměr jeho TOO větší, než-li šířka TOO vzorku č. 3, a to i přes to, že mají oba materiály stejnou tloušťku. Tato anomálie je způsobena již výše zmíněným vychýlením elektrického oblouku.

Svarový kov vzorků má lici strukturu s převážně kolumnárními zrn, jenž jsou orientovány kolmo na hranici závaru. To je zřetelné především u vzorků č. 1 – 3. Velikost zrn by měla růst se zvětšujícím se vneseným teplem, ovšem působí zde více faktorů. Z pořízených vzorků to však není stoprocentně prokazatelné.

Ze snímků lze rozlišit několik subzón tepelně ovlivněné oblasti (obr. 54). Nejbliže svarovému kovu je tzv. oblast přehřátí, jenž je charakteristická hrubozrnnou strukturou. Velikost zrn klesá se vzdáleností od hranice závaru. Následuje jemnozrnná část tepelně ovlivněné oblasti (teplota nad A_{c3}), dále oblast částečné austenitizace (rekrytalizace) (pro teploty mezi A_{c1} a A_{c3}) a těsně pod A_{c1} pak oblast, kde nedošlo k austenitizaci, ale pouze k popuštění výchozího martenzitu. Je zde tedy možné nalézt temperovaný martenzit.

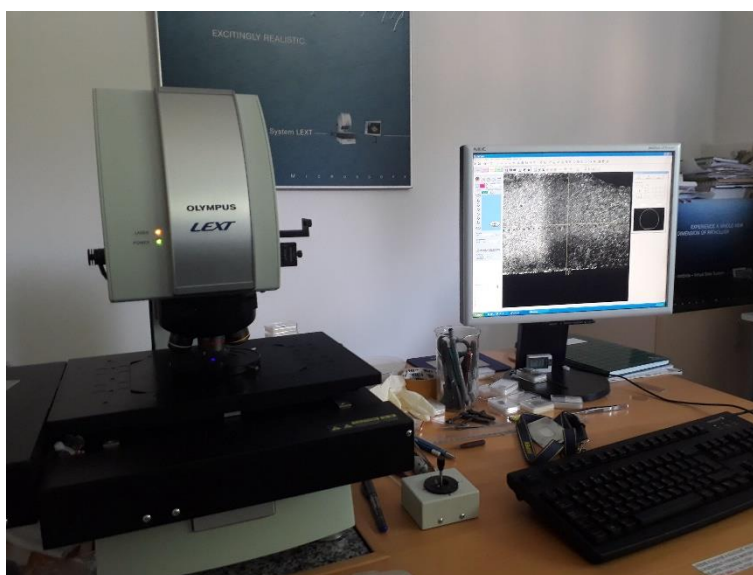


Obr. 54 Subzóny TOO (vzorek č. 2)

3.4.2 Vyhodnocení mikrostruktury [29], [30], [48]

Pro pořízení snímků mikrostruktury byl využit skenovací optický mikroskop Olympus LEXT OLS 3100 (obr. 55). Snímky byly pořizovány v zobrazovacím režimu NCF a to při 480x až 1200x zvětšení. Postupně bylo nafoceno všech pět vzorků, přičemž byly zvláště nafoceny oblasti základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu. Pro pořízení kvalitních fotografií a následnou bezpečnou a spolehlivou mikrostrukturální analýzu je nutné dokonalé vybroušení a vyleptání pecek s reprezentativní vzorky. Jakékoliv mechanické poškození na povrchu pecky brání identifikaci a rozboru mikrostruktury.

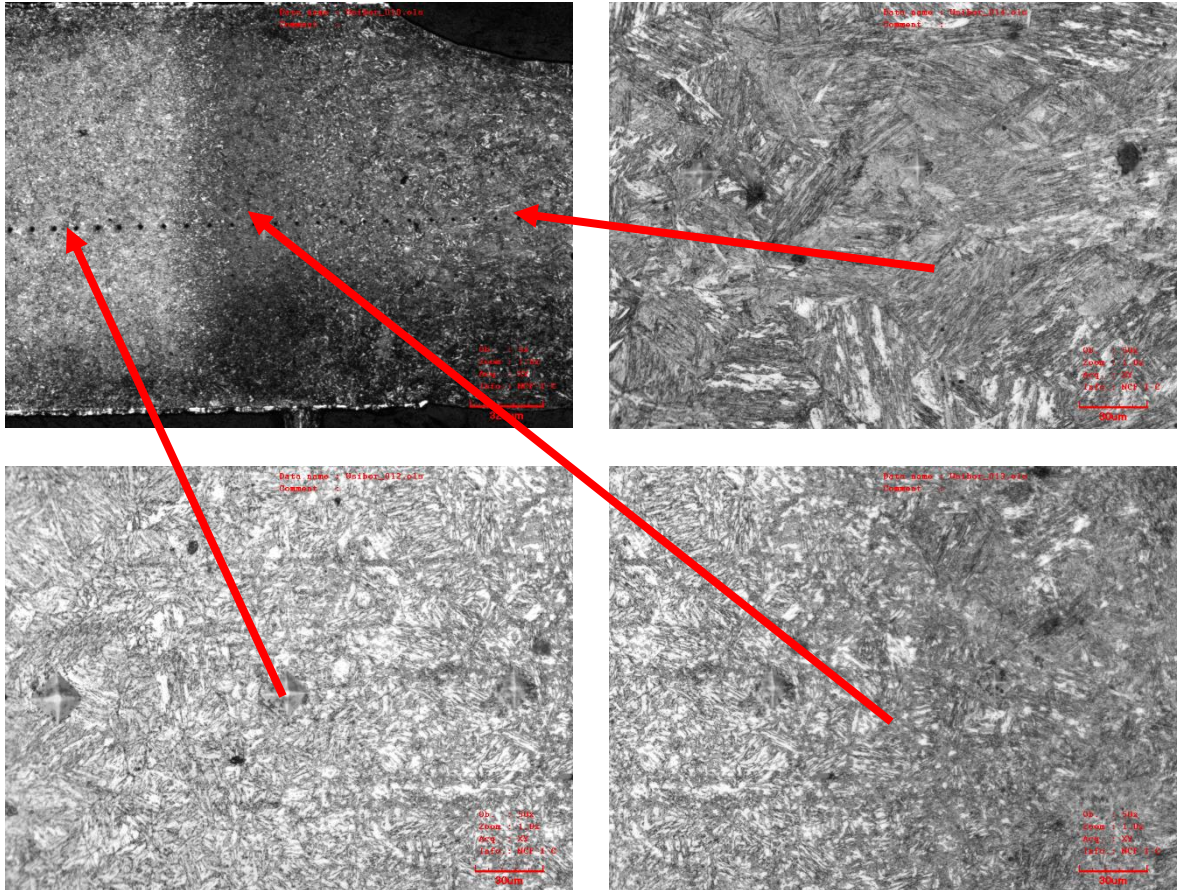
Základní materiál by měl být při dodání feriticko-perlitický. Zkoumaná ocel je však již v kaleném stavu, a proto se vyznačuje plně martenzitickou strukturou. Stejně tak i svarový kov a tepelně ovlivněná oblast je tvořena výhradně martenzitickou strukturou. Detail všech oblastí (SK, TOO i ZM) pak lze pozorovat v tab. 17. Pro posouzení velikosti výchozího austenitického zrna ve svarovém kovu jsou hranice na pořízených snímcích málo zřetelné. Pro důkladnější analýzu by tak bylo vhodné modernější pořizovací zařízení. Snímky mikrostruktury jednotlivých oblastí svaru všech vzorků, viz PŘÍLOHA 5.



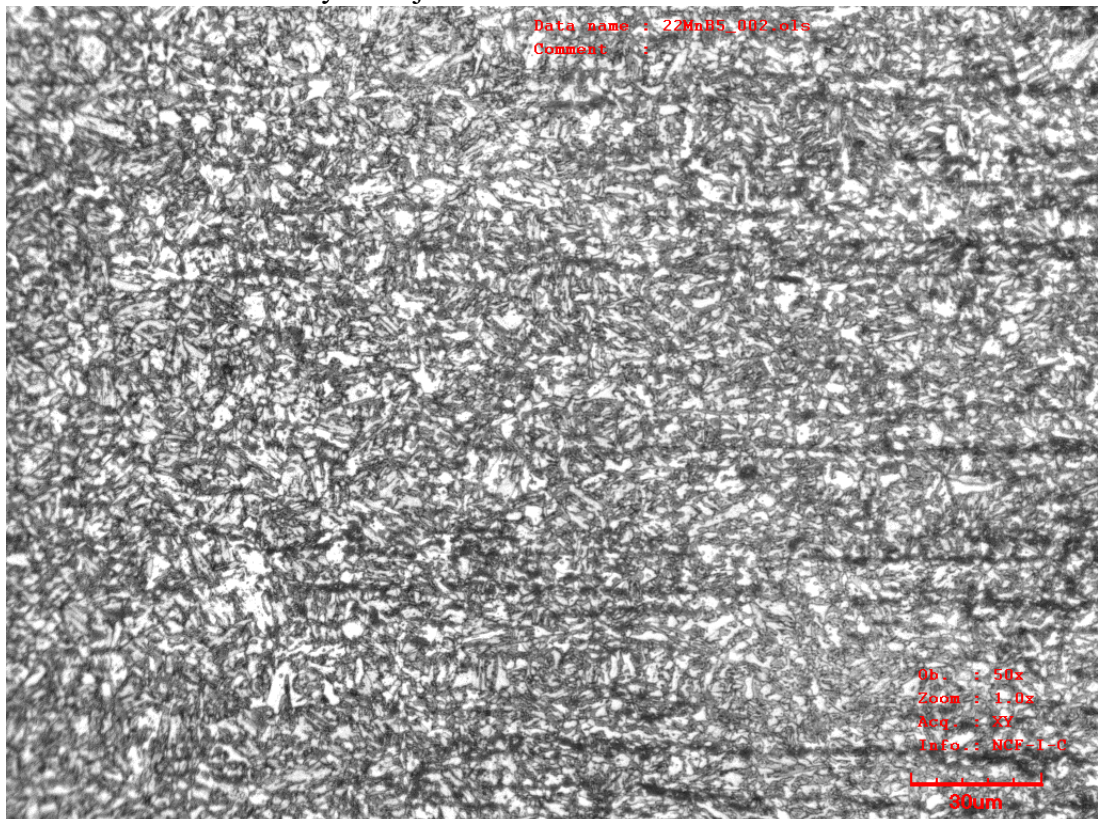
Obr. 55 Olympus LEXT OLS 3100

Detail všech oblastí (SK, TOO i ZM) pak lze pozorovat v tab. 17. Pro posouzení velikosti výchozího austenitického zrna ve svarovém kovu jsou hranice na pořízených snímcích málo zřetelné. Pro důkladnější analýzu by tak bylo vhodné modernější pořizovací zařízení. Snímky mikrostruktury jednotlivých oblastí svaru všech vzorků, viz PŘÍLOHA 5.

Tab. 17 Mikrostruktura vzorku č. 3

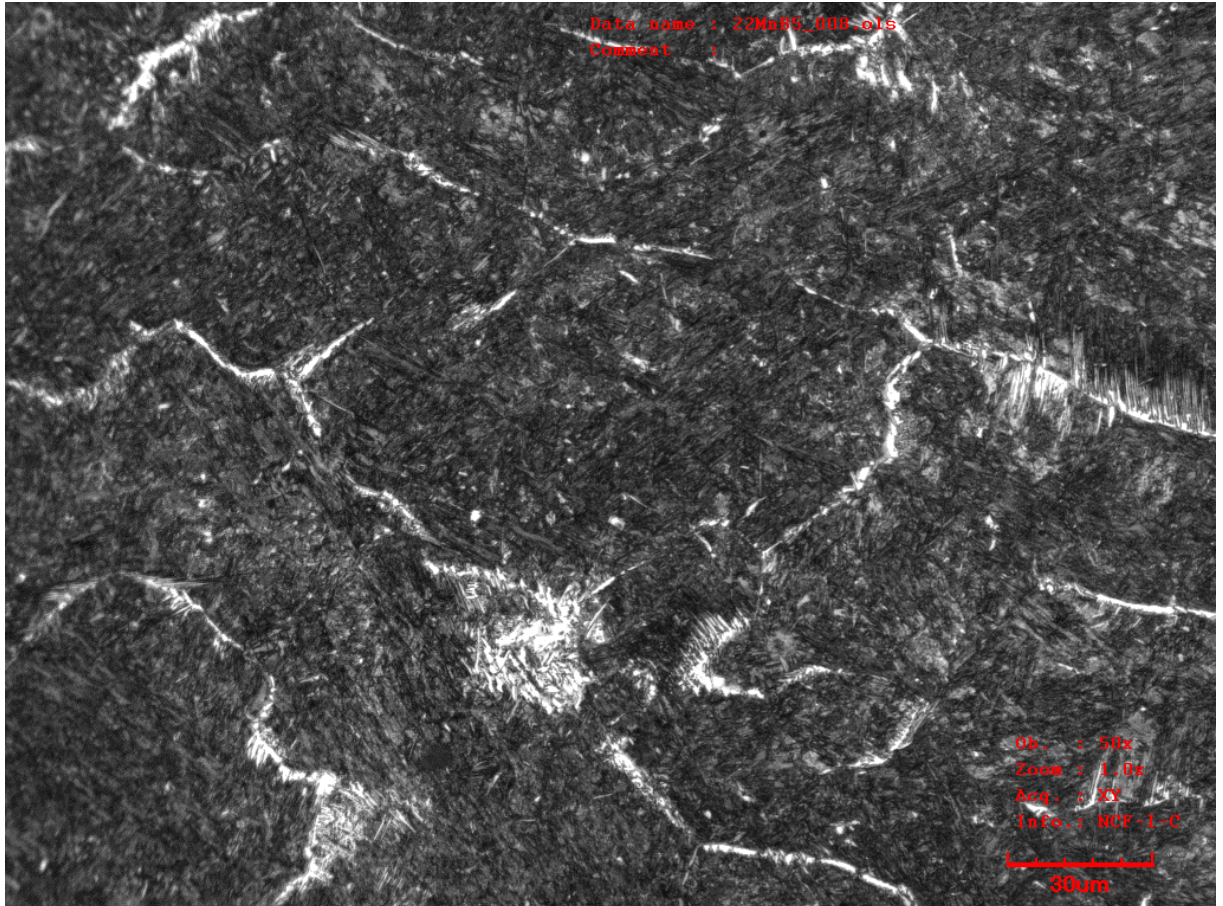


Výrazně se odlišují vzorky č. 4 a 5. U vzorku č. 4 je pozorovaný martenzit spíše deskový. Pro detailnější vyhodnocení by bylo třeba snímku pořízeným elektronovým mikroskopem, který by umožnil zjistit vzdálenost jednotlivých desek nebo hustotu dislokací. Detailní pohled na tepelně ovlivěnou oblast vzorku č. 4 vykresluje obr. 56.



Obr. 56 Tepelně ovlivněná oblast vzorku č. 4 (zvětšení 1200x)

U vzorku č. 5 (obr. 57) je možné na hranicích výchozího austenitu pozorovat delta ferit. To je zapříčiněno zřejmě přítomností hliníku Al z ochranného povlaku. Pokud se totiž Al dostane do svarového kovu, dochází k posuvu křivek v rovnovážném diagramu a z taveniny nevzniká rovnou austenit, ale nejdříve delta ferit a austenit následně až peritektickou reakcí. To je příčinou, proč delta ferit zůstává ve svarovém kovu i po ztuhnutí. Austenit transformuje na martenzit, jelikož rychlost ochlazování je nadkritická. Jelikož byly povlakem na bázi Al – Si ošetřeny všechny vzorky, ale delta ferit byl pozorován pouze u vzorku č. 5, nabízí se, že jeho výskyt je spojen s rychlostí ochlazování, která je u metody TIG řádově menší, než u laseru.



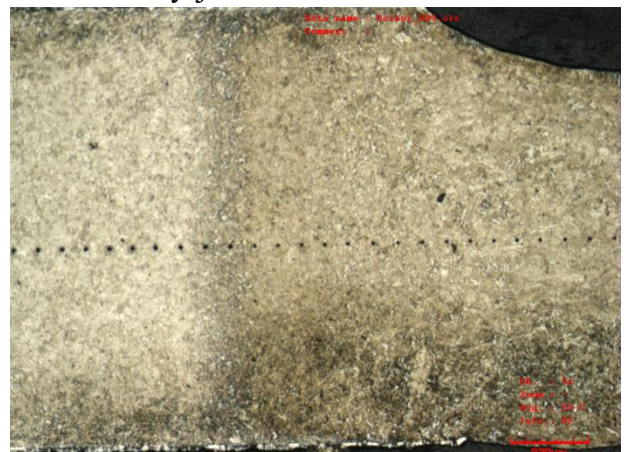
Obr. 57 Svarový kov s výskytem delta feritu (vzorek č. 5, zvětšeno 1200x)

3.5 Zkouška mikrotvrdomosti dle Vickerse [29], [30]

Zkouška tvrdosti dle Vickerse je definována normou ČSN EN ISO 6507-1. Principem je vtlačování indentoru, kterým je v tomto případě diamantový jehlan do materiálu a následné vyhodnocení rozměrů vtisku. Podrobný popis této metody byl vysvětlen v kap. 2.5.2.

Pro potřeby experimentu byla mikrotvrdomost měřena za využití tvrdoměru Zwick 3212, při zatížení 0,1 kg, což odpovídá zatěžující síle $F = 1 \text{ N}$ po dobu 10 s. Byla tedy měřena mikrotvrdomost HV0,1. Zkouška tvrdosti probíhala automatizovaně po kroku 0,1 mm, čemuž odpovídal i počet nutných vpichů, aby byla zabráněna celá struktura svaru i jeho neovlivněné okolí.

Rozdílnou tvrdost jednotlivých zón struktury svaru lze vyčíst již z pohledu na

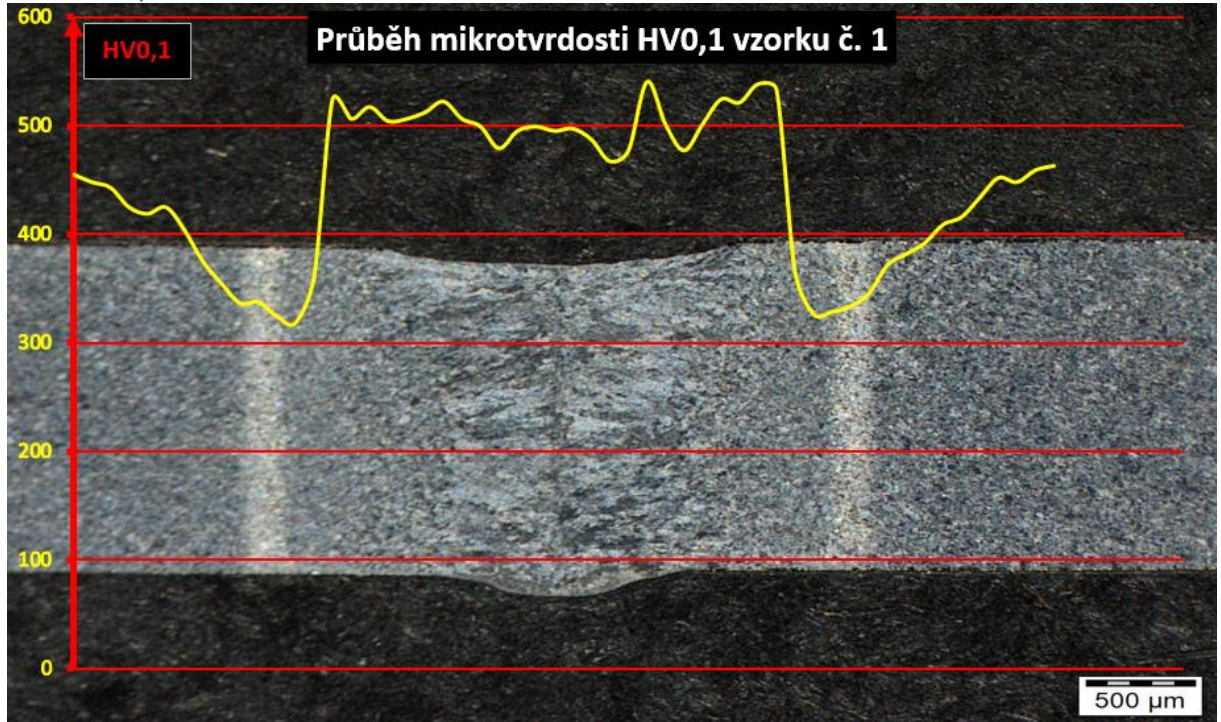


Obr. 58 Vpichy indentoru na makroskopickém snímku

makrostrukturu svaru, kdy je zjevné, že vpichy v základním materiálu jsou větší, nežli vpichy ve svarovém kovu, což svědčí o zvýšené tvrdosti v této oblasti (obr. 58).

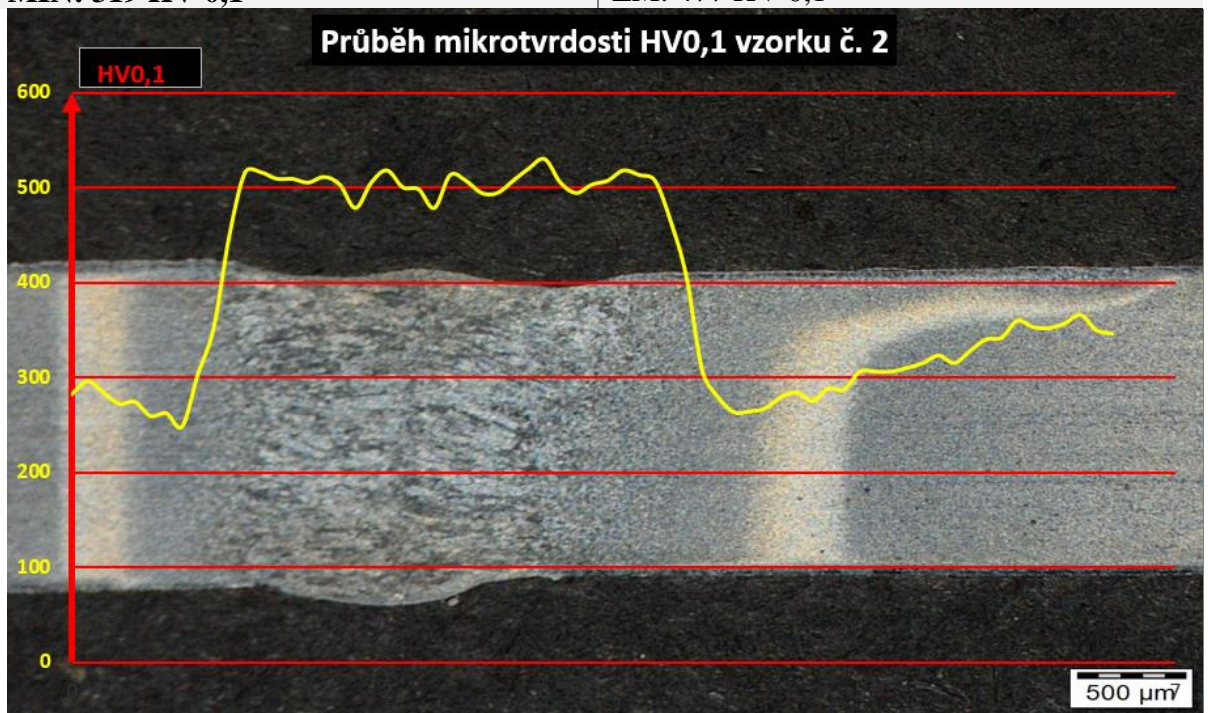
Naměřená data tvrdoměru byla exportována do softwaru MS Excel 2010 a následně graficky zpracována a zanesena do makroskopických snímků (tab. 18). Mimo průměrné hodnoty tvrdosti svarového kovu bylo vyhodnocováno i maximum (SK) a minimum (TOO), dále pak tvrdost základního materiálu, která byla měřena ve vzdálenosti 2 mm vlevo od výrazného rozhraní s tepelně ovlivněnou oblastí.

Tab. 18 Průběhy mikrotvrdostí



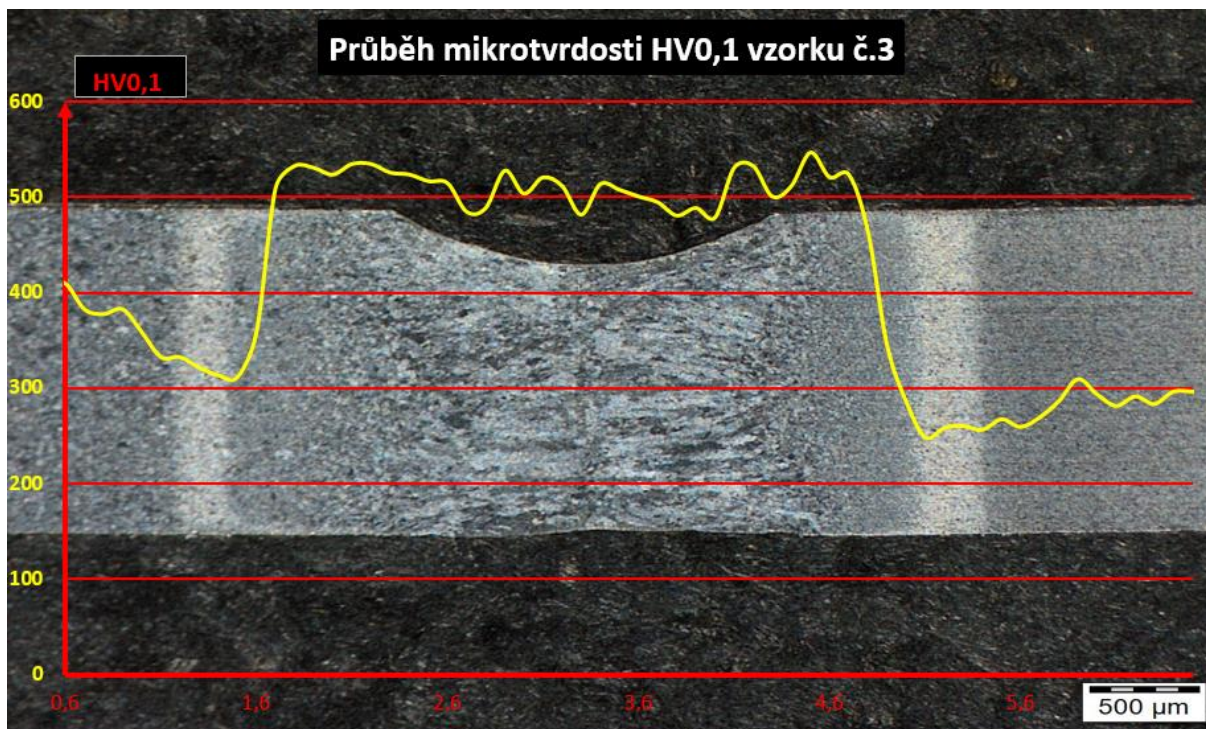
VZOREK Č. 1:
MAX: 540 HV 0,1
MIN: 319 HV 0,1

Ø SK: 505 HV 0,1
 ZM: 477 HV 0,1



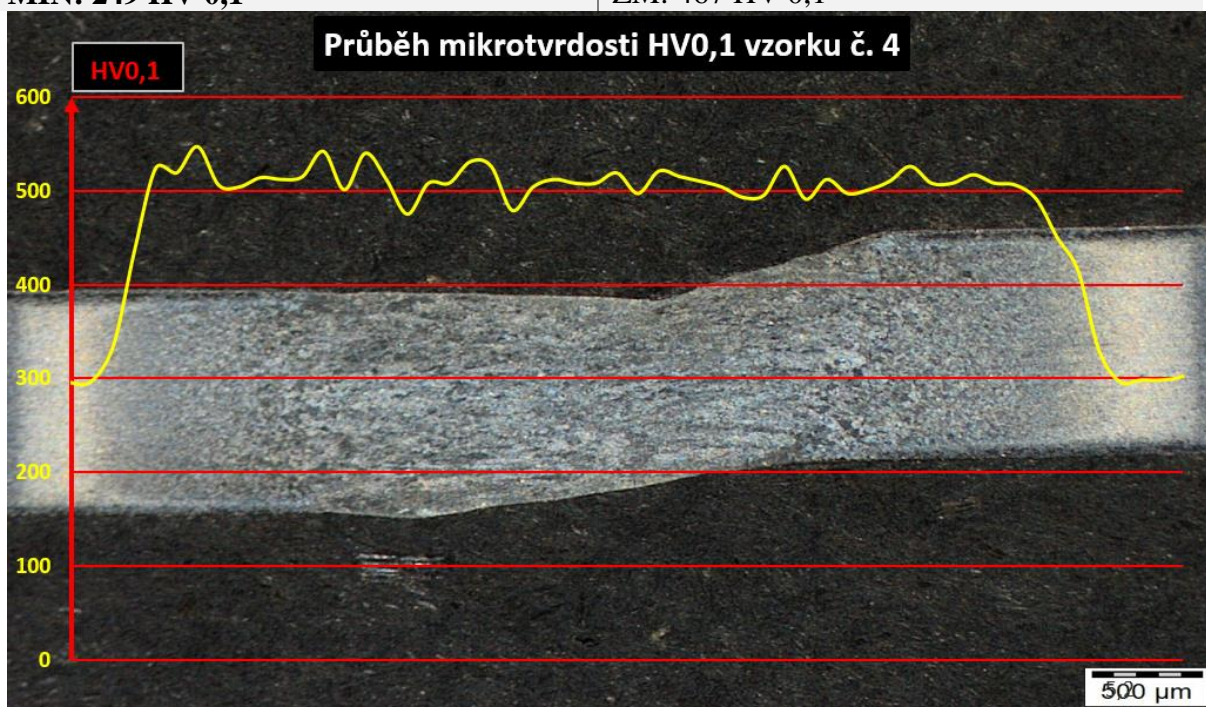
VZOREK Č. 2:
MAX: 531 HV 0,1
MIN: 248 HV 0,1

Ø SK: 507 HV 0,1
 ZM: 328 HV 0,1



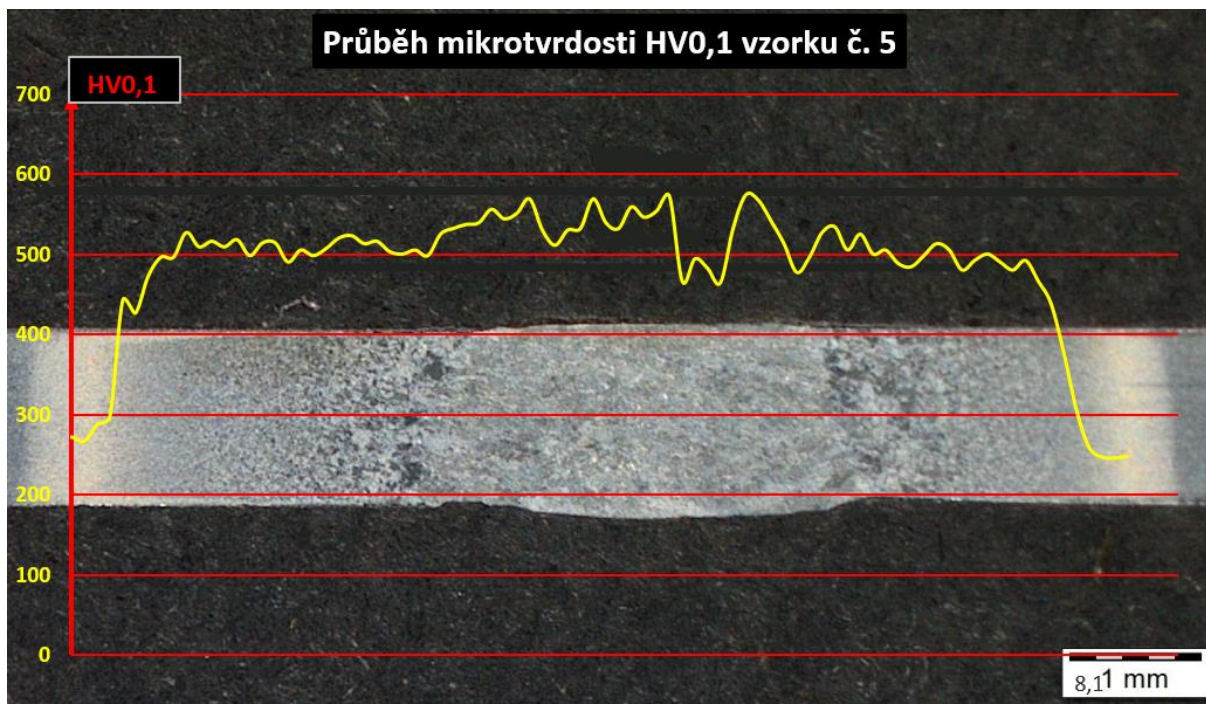
VZOREK Č. 3:
MAX: 547 HV 0,1
MIN: 249 HV 0,1

Ø SK: 513 HV 0,1
ZM: 467 HV 0,1



VZOREK Č. 4:
MAX: 547 HV 0,1
MIN: 295 HV 0,1

Ø SK: 511 HV0,1
ZM: 457 HV 0,1



VZOREK Č. 5:

MAX: 575 HV 0,1

MIN: 246 HV 0,1

Ø SK: 517 HV 0,1

ZM: 440 HV 0,1

Z průběhů tab. 18 je patrné, že průběhy tvrdosti měly ve všech případech podobný průběh, kdy počáteční tvrdost zakalené oceli prudce klesala v tepelně ovlivněné oblasti, načež následoval výrazný růst v oblasti svarového kovu. Průměrné hodnoty tvrdosti dle Vickersse ve svarovém kovu se pohybovaly v rozmezí od 505 HV 0,1 do 517 HV 0,1, což činí odchylku od celkového průměru všech vzorků zhruba 1,2 %. Výrazný rozdíl však může být pozorován při porovnání hodnot tvrdosti v tepelně ovlivněných oblastech, kde výrazně vyčnívá vzorek č. 1, jehož tvrdost v TOO ostatní vzorky značně převyšuje.

Naopak největší změkčení v TOO je pozorováno u vzorku č. 5, tedy u svaru zhotoveného obloukovou metodou TIG, což může souviset s větším vneseným teplem a možností výskytu nemartenzitických struktur v okolí svaru. Bylo zde naměřeno 246 HV 0,1. Tato hodnota je však srovnatelná s minimálními tvrdostmi u vzorků č. 2 a 3, které byly jen nepatrně vyšší.

Z průběhu poklesů tvrdosti v TOO lze usoudit, že tato oblast zasahuje dále, než bylo určeno vizuální kontrolou při makrostrukturní analýze. Tento jev je ještě umocňován při zvýšení vneseného tepla, což je dobře viditelné např. na průběhu mikrotvrdosti vzorku č. 3.

Ačkoliv je tvrdost určena fázovým rozhraním a prakticky všude se vyskytuje martenzit, může se lišit například velikostí desek nebo množství zbytkového austenitu v závislosti na rychlosti ochlazování. Obecně lze říci, že při vyšších rychlostech ochlazování (menším vneseném teple) bude martenzit tvrdší. Roli však hraje i kalící teplota, popřípadě teplota v TOO, která může zapříčinit její popuštění. Je pak tedy možné, že nejvyšší hodnoty tvrdosti v SK byly zaznamenány u svaru zhotoveného metodou TIG, tedy s největším vneseným teplem.

Změny tvrdosti v TOO souvisí s tvrdostí ZM a maximální dozažené teploty. Zde ovšem může výraznou roli hrát rozdílná tloušťka plechů, jelikož je možné, že byl každý z plechů zakalen jinak. Výrazné rozdíly mikrotvrdosti svarového kovu v závislosti na vneseném teple nejsou u tohoto materiálu pozorovány.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [15], [54]

Náplní této práce je výzkum a aplikace hybridní technologie svařování a vytvoření tak jakostních spojů. Není však definována žádná konkrétní součást, což komplikuje výsledné technicko-ekonomické zhodnocení. I s ohledem na tuto skutečnost však lze kalkulovat s náklady spojenými na zařízení, jejich provoz, servis, režie a mzdy pracovníků. Z tohoto pohledu lze určit přibližné náklady na jednotku délky svaru jednotlivými metodami.

Svařování laserem lze obecně považovat za nákladné z hlediska pořizovacích nákladů a složitého přípravování. Na druhou stranu je nutné brát zřetel na to, že právě tyto přípravky mohou vést k výraznému snížení vedlejších pracovních časů pro správné uchycení svařence. S tím souvisí i následné zvýšení produktivity, čímž dochází k návratnosti této investice. Mimo přípravků lze využít i technologii navádějící laserový paprsek, jako je například skener. Toto nákladné zařízení je výhodné jen pro velkosériovou výrobu, např. automotive.

Cena je ovlivněna také použitím předehřevu a jeho volbou. Jelikož dochází ke kombinaci dvou svařovacích technologií, je nutné najít správnou konfiguraci svařovacích parametrů, kterou by bylo docíleno co možná nejlepších vlastností svaru. Obecně lze použitou technologii pro předehřev TIG považovat za levnou, jelikož je v průmyslu hojně rozšířena a cenově dostupná.

Tab. 19 Ekonomické zhodnocení použitých technologií [15], [24]

Počet pracovních týdnů v roce		50	
Počet pracovních dní v týdnu		5	
Denní počet směn		2	
Počet hodin za směnu		8	
Celkový počet pracovních hodin za jeden rok		4000	
<i>Doba odpisů je uvažována na 5 let</i>		Náklady na 1 hodinu provozu	
Laserová stanice	10 000 000 Kč	500 Kč	
Elektrická energie	2,50 Kč/kWh (příkon 8 kW)	20 Kč	
Ochranný plyn	2500 Kč/lahev; 16,5 l/min	247 Kč	
Údržba a servis	150 000 Kč/rok	37,5 Kč	
Mzda pracovníka	200 Kč/hod + 32% odvody	264 Kč	
Celkové hodinové náklady na provoz laseru		1 068,5 Kč	
Náklady na 1 m svaru ($v_s = 20 \text{ mms}^{-1}$)		14,8 Kč/m	
Invertor TIG	50 000 Kč	2,5 Kč	
Elektrická energie	2,50 Kč/kWh (příkon 3,5 kW)	8,75 Kč	
Ochranný plyn	2500 Kč/lahev; 16,5 l/min	247 Kč	
Provozní náklady		0,30 Kč	
Mzda pracovníka	200 Kč/hod + 32 % odvody	264 Kč	
Celkové hodinové náklady na provoz TIG invertoru		522,6 Kč	
Náklady na 1 m svaru ($v_s = 5 \text{ mms}^{-1}$)		29 Kč/m	
Celkové hodinové náklady na provoz laseru s TIG předehřevem*		1 080 Kč	
Náklady na 1 m svaru ($v_s = 20 \text{ mms}^{-1}$)		15 Kč/m	
Celková hodinová sazba včetně zohlednění režii (200 %) a předpokládaného zisku (10 %) - LASER		2 350,7 Kč	32,6 Kč/m
Celková hodinová sazba včetně zohlednění režii (200 %) a předpokládaného zisku (10 %) - TIG		1 148,4 Kč	63,8 Kč/m
Celková hodinová sazba včetně zohlednění režii (200 %) a předpokládaného zisku (10 %) - LASTIG		2 376 Kč	33 Kč/m
*Pozn.: Při výpočtu hodinových nákladů laserTIGu byla uvažována jen jedna mzda pracovníka a jen jedny náklady spojené s výdajem za ochranný plyn.			

Ekonomické zhodnocení použitých technologií popisuje tabulka 17. Z výsledných cen za metr svaru, jenž zahrnují náklady na zařízení, provoz, mzdu, ochranný plyn atd. je zřejmé, že zásadní finanční rozdíl mezi využitím přehřevu metodou TIG a svařováním samotným laserem je nepatrný. Na druhou stranu, cena za metr svaru pořízeného obloukovou metodou TIG je dvojnásobná. To je zapříčiněno 4x menší rychlostí svařování při využití této technologie.

V nákladech na provoz jednotlivých technologií hrají významnou roli zejména náklady na mzdu pracovníka a ochranný plyn, jenž je spotřebován v objemu 990 l/hod, což činí téměř jednu desetinu lahve. Při svařování laserem nebo hybridní technologií je pak nejmarkantnější položkou náklady spojené s odpisy z pořizovací ceny.

5 ZÁVĚRY

Řešeným problémem bylo využití předehřevu obloukovou metodou TIG v kombinaci s laserovým svařováním bez aplikace na konkrétní součásti. Z rozboru zadání vyplynula tato hybridní technologie jako vyhovující a vhodnější než jiné, běžně využívané technologie. Svařovaným materiálem byla vysokopevnostní, bórem dopovaná ocel 22MnB5. Ta svými vysokými pevnostními charakteristikami dosahuje tepelným zpracováním a právě nevhodné tepelné ovlivnění by je mohlo degradovat.

Pro ověření efektivnosti a účelnosti výše zmíněné hybridní technologie byl proveden experiment, kdy byly vyhotoveny zkušební svary vzorků plechů již zmíněné oceli o tloušťkách 1,3 mm a 1,9 mm. Ta byla nejprve svařena samotným laserem, následovala série svarů využívající obloukový předehřev, kdy byl jedinou proměnnou hodnotou proud oblouku ($I = 20 \text{ A}, 40 \text{ A}, 60 \text{ A}$) a na závěr následovalo zhotovení zkušebního svaru pouze metodou TIG. Z takto zhotovených svarů byly následně vyřezány a příslušně zpracovány reprezentativní vzorky pro metalografické šetření a zkoušku mikrotvrdomosti dle Vickerse a zkušební tyče pro mechanickou zkoušku tahem.

Tahovou zkouškou bylo zjištěno, že u všech vzorků, bez ohledu na použitou metodu svařování došlo ke křehkému lomu v tepelně ovlivněné oblasti. To je způsobeno hrubozrnnou subzónou TOO, kde došlo k přehřátí a růstu nových, větších zrn. Samotný průběh tahové zkoušky byl velmi komplikovaný, jelikož se tenké a tvrdé plechy špatně uchyťovaly v kleštinách trhacího přístroje. I přes to byly vyhodnoceny meze kluzu R_m , jejichž hodnoty se pohybovaly zhruba mezi 850 až 1200 MPa, přičemž výrazně převyšovala mez pevnosti vzorků svařených pouze laserem. V rámci experimentu bohužel nebyla měřena pevnost v tahu základního materiálu, proto nelze porovnat rozdíl zkušební, svařeného tělesa se zakalenou ocelí. Lze pouze vycházet z norem, že tepelně zpracovaná ocel 22MnB5 má pevnost v tahu $R_m = 1300 - 1650 \text{ MPa}$ v závislosti na podmínkách tepelného zpracování. Byla pozorována velmi nízká tažnost zakalených plechů, jejichž maximální hodnoty dosahovaly $A = 1,25 \%$.

Z hlediska makrostruktury byla pozorována jistá závislost mezi rozměry tepelně ovlivněné oblasti a hodnotou vneseného tepla. Tento trend byl narušen při použití předehřevu s proudem $I = 20 \text{ A}$, kdy zřejmě vlivem malého proudu došlo k vychýlení oblouku, což vedlo k ovlivnění tvaru tepelně ovlivněné oblasti. Vzhledem k rozdílné tloušťce je obtížné zkoumané plechy navzájem blíže hodnotit. Při mikrostrukturním rozboru bylo prokázáno maximální zastoupení martenzitické struktury jak ve svarovém kovu, tak i v tepelně ovlivněné oblasti. Byla pozorována již výše zmíněná hrubozrnná subzóna přehřátí TOO, jenž vede ke křehkým lomům. Ve vzorku s nejvyšším vneseným teplem, tedy svařeným metodou TIG byl ve svarovém kovu pozorován delta ferit, což je příkládáno vlivu ochranného povlaku plechů na bázi Al-Si a vnesenému teple.

Měření mikrotvrdomosti dle Vickerse byly pozorovány její obdobné průběhy u všech vzorků. Tedy výrazný pokles tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti a následnému prudkému růstu ve svarovém kovu. Výrazně se nelišily ani hodnoty naměřených tvrdostí, alespoň co se průměrných hodnot ve svarovém kovu týká. Jelikož je možné, že v důsledku rozdílných tloušťek plechů došlo k jejich rozdílnému zakalení, není vhodné ze vzájemného posouzení tvrdostí dělat ukvapené závěry.

Na základě výše zmíněných výsledků nelze jednoznačně prohlásit metodu laserTIGu jako nejvýhodnější. Úskalím je zejména výrazné snížení meze pevnosti oproti laserovému svařování. Zde svůj vliv však může hrát také rozdílná tloušťka materiálů a s tím související odlišný stupeň zakalení. Předmětem dalšího bádání by tedy mělo být porovnání stejných vzorků při aplikaci více konfigurací vstupních parametrů, jako jsou hodnota proudu, použitý proud, vzdálenost mezi elektrodou a laserovým paprskem a podobně.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [59]

- 1 KACHLÍŘ, Jaromír. *Vliv chemického složení na svařitelnost konstrukčních ocelí*. Brno, 2017. 49s, 3 přílohy, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Mojmír Vaněk.
- 2 FOREJTOVÁ, Lucie, Ladislav KOLAŘÍK, Jan SUCHÁNEK, Marie KOLAŘÍKOVÁ a Tomáš PILVOUSEK. Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2017, 8. 3. 2017, 2017(3) [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>
- 3 ŠANOVEC, Jan a Tomáš PILVOUSEK. Trendy ve výrobě plochých polotovarů tvářených za tepla. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2017, 10. 5. 2017, 2017(5) [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-ve-vyrobe-plochych-polotovaru-tvarenych-za-tepla.htm>
- 4 *ABB robot IRB 6400* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.abb.fr/cawp/seitp202/5c32783f3b598c29c125759800301eef.aspx>
- 5 PILVOUSEK, Tomáš, Jaroslav P PETR-SOINI a Vojtěch KUČERA. Moderní způsoby ochrany vysokopevných ocelí. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2019, 6. 2. 2019, 2019(1) [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-zpusoby-ochrany-vysokopevných-oceli.html>
- 6 AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-857-7181-0.
- 7 MACHEK, Václav a Libor BENEŠ. Bórové oceli - Oceli budoucnosti. *Engineering.sk* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravy/5320-borove-oceli-oceli-budoucnosti>
- 8 CHRÁŠŤANSKÝ, Lukáš a Michal VALEŠ. Metody spojování využívající principy plastické deformace. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2018, 7. 2. 2018, 2018(1) [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/metody-spojovani-vyuzivajici-principy-plasticke-deformace.html>
- 9 *ADHESIVE WELDING METAL* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www2.afinitica.com/afinitica/metal>
- 10 MRŇA, Libor. Speciální technologie svařování [soubor přednášek]. *VUT Brno, 2019*.
- 11 *MIG-MAG Welding Process* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.saf-fro.com/processes/mig-mag-welding-process>
- 12 DANĚK, Ladislav. Technologie svařování [soubor přednášek]. *VUT Brno, 2016*.
- 13 *Vše pro odporové svařování - stroje, konzultace, zaškolení | Artweld* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://artweld.cz/odporove-svarovani/>
- 14 *SPI Lasers: The top 5 benefits of Laser welding* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.spilasers.com/application-welding/the-top-5-benefits-of-laser-welding/>
- 15 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 Libor Mrňa.
- 16 Autogenschweißen. In: *Metallteile verbinden* [online]. 2015, 4. 6. 2015 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://metallteile.ezplast.ru/autogenschweien/>
- 17 HERMAN, Petr. Řízení tepelné zpracování v procesu svařování. *Konstrukce* [online]. 21. 11. 2011 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/rizene-tepelne-zpracovani-v-procesu-svarovani/>
- 18 *Svářečky - elektrody: Indukční ohřev DAWELL DHI - 15* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.svarecky-elektrody.cz/indukcni-ohrev-dawell-dhi-15/d-12265?fb_comment_id=1333253733419713_1460813190663766
- 19 SIGMUND, Marián. Teorie a technologie svařování [soubor přednášek]. *VUT Brno, 2019*
- 20 BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. 1. vyd. Bratislava: STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
- 21 DULEY, Walter W. *Laser welding*, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-47-24679-4.

- 22 ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění – 4. díl: Obrábění paprskem fotonů – laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, 19. 3. 2008, 2008(3) [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- 23 KOŘÁN, Pavel. Laserové svařování I (laser welding). *Lasery a optika* [online]. 2013 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserovesvarovani-i-laser-welding-134>
- 24 MRŇA, Libor. Laserové technologie v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, 11. 2. 2015, 2015(1) [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-technologie-v-prumyslove-praxi.html>
- 25 KOŘÁN, Pavel. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Lasery a optika* [online]. 2013 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-vprumyslu-128>
- 26 MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky* [online]. In: [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf
- 27 DRÁPELA, Petr. *Studium pórovitosti svaru hliníkové slitiny řady 5000 při hybridním svařování Laser-TIG*. Brno, 2017. 48s, 3 příloh, CD. Bakalářská 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.
- 28 MRŇA, Libor. Aktuální možnosti v laserovém svařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2018, 7. 2. 2018, 2018(1) [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-moznosti-v-laserovem-svarovani.html>
- 29 KLAJKURKOVÁ, Lenka. Tepelné zpracování materiálů [soubor přednášek]. *VUT Brno, 2018*
- 30 Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy *svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. : il. ; 30 cm. ISBN 8085771853.
- 31 BARTÁK, Jiří. CWS ANB: Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení. In: *CWS ANB* [online]. Plzeň, 2012, 1. 3. 2012 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- 32 HETO, Jan. Pórovitost svarů oceli svařovaných metodou MIG/MAG. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2016, 10. 2. 2016, 2016(1) [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/porovitost-svaru-oceli-svarovanych-metodou-mig-mag.html>
- 33 TIG svařování I - základní principy. In: *Svarinfo.cz* [online]. 2009, 7. 1. 2009 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008011702>
- 34 TIG svařování II - AC nebo DC?. In: *Svarinfo.cz* [online]. 2009, 6. 2. 2009 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008122801>
- 35 Wolframové elektrody pro TIG svařování. In: *Svarinfo.cz* [online]. 2006, 6. 11. 2006 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2006111201>
- 36 MIG AND TIG WELDING ACCESSORIES. *Standard Welding & Tools* [online]. 2017 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/standardweldingtools/mig-andtig-welding-accessories.html>
- 37 *Eastwood TIG GAS Len Components and Kit* [online]. In: . [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.frost.co.uk/eastwood-tig-welder-gas-lens-components-kit.html>
- 38 HAMERNÍK, Jan. Základy tepelného zpracování kovů [online]. In: . Pelhřimov, 2006 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm
- 39 SALARI, Sina, Wolfgang BLECK a Malek Naderi. The CCT diagram of the investigated 22MnB5 steel. In: *Research Gate* [online]. 2015 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/The-CCT-diagram-of-the-investigated-22MnB5-steel_fig1_269222502
- 40 *Applications for laser welded blanks* [online]. In: . [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://automotive.arcelormittal.com/LWB_applications
- 41 VOTAVA, Pavel. *Odporové svařování martenzitických ocelí s variantním tepelným zpracováním*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Marie Kolaříková.
- 42 PTÁČKOVÁ, Eva. *Tepelné zpracování dutých tyčí z bórové oceli 22MnB5 na rámy automobilových sedaček*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Libor Beneš.
- 43 *Vliv vodíku na pevnost a svařitelnost vysokopevných martenzitických ocelí pro automobilové aplikace*. Pardubice, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Eva Schmidová.
- 44 HRIVŇÁK, Ivan. Zvaritelnost ocelí. 1. vyd. *Bratislava: Alfa*, 1979, 235 s.
- 45 Žihací pece: EGT Servis s.r.o. In: *EGT servis s.r.o.: Výroba a servis pecí* [online]. 2008, 2008 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.egt-servis.cz/cs/menu/prumyslove-pec/zihaci-pec/>

- 46 PILOUS, Václav. *Zkoušky materiálů a svarů*. ZČU, 2001. ISBN 80-7092-0.
- 47 TREJTAR, Josef. *Destruktivní zkoušky svarových spojů* [online]. In: . 2017, 18. 9. 2017 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/destruktivni-zkousky-svarovych-spoju-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EuvDzS7ep4R2Wh5CTKyYaSk/>
- 48 ŠTORKÁN, Zdeněk. Problematika hodnocení svarových spojů. *Konstrukce: Odborná časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. 2014, 9. 12. 2014 [cit. 2019-05-22]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
- 49 PTÁČEK, Luděk, Jaroslav CIHLÁŘ, Eduard DORAZIL, Rudolf FORET, Bohumil PACAL, Josef STEIDL, Jaroslav ŠENBERGER a Jiří ŠVEJCAR. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 1999, 350 s. ISBN 8072041304.
- 50 ZÁŠKODA, D. Zjišťování mechanických vlastností tvářených materiálů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 28s. Vedoucí bakalářské práce Kamil Podaný
- 51 MACHÁČ, M. Měření tvrdosti materiálů a zpracování zjištěných hodnot.. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 57 s., 4 přílohy. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.
- 52 JAREŠ, Vojtěch. Metalografie ocele. 1. vyd. *Praha: Nakladatelství ČSAV, 1960, 275 s. : il.*
- 53 PALÁT, Hynek. *Nedestruktivní zkoušky materiálu I* [online]. In: . Opava, 2011 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/11271011/release/woothee>
- 54 KOSINKA, Jakub. *Studium vlastností laserový svarů materiálu Domex 700 MC při využití obloukového předehřevu*. Brno, 2018. 73s, 2 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Libor Mrňa.
- 55 Svářecí zdroj FRONIUS - MagicWave 1700. In: *Weldtech* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.weldtech.cz/produkty/produkt/svareci-zdroj-fronius-magicwave-1700>
- 56 IRB 2400. *Průmyslové roboty ABB* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-2400>
- 57 AMBROŽ, Ondřej. Ústní sdělení (zaměstnanec UPT AV Brno, Královopolská 174/62, Brno), dne 22.3. 2019
- 58 HANKE, Petr. *AUDI SPACE FRAME - Mix materiálů* [online]. In: . 2017, 30. 5. 2017 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/clanky/technika/audi-space-frame-mix-materialu_45805.html
- 59 Citace PRO [online]. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
AC	Střídavý proud	[-]
b_0	Šířka zkoušené délky tyče	[mm]
C_c	Ekvivalent pro výpočet T_p	[%]
C_e	Uhlíkový ekvivalent	[%]
CE	Uhlíkový ekvivalent dle IIW/IIIS	[%]
CET	Uhlíkový ekvivalent	[%]
č.	Číslo	[-]
ČSN	Česká státní norma	[-]
d	Délka úhlopříčky vtisku	[μ m]
d_1	Délka první úhlopříčky	[μ m]
d_2	Délka druhé úhlopříčky	[μ m]
DC	Stejnoseměrný proud	[-]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
EN	Evropská norma	[-]
F	Zatěžující síla	[N]
F_m	Maximální zatížení	[N]
I	Proud	[A]
L_0	Počáteční měřená délka tyče	[mm]
L_c	Zkoušená délka tyče	[mm]
L_t	Celková délka zkušební tyče	[mm]
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation	[-]
MAG	Metal Active Gas	[-]
MIG	Metal Inert Gas	[-]
Q	Vnesené teplo	[J·mm ⁻¹]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
SK	Svarový kov	[-]
S_0	Počáteční průřez tyče	[mm ²]
S_u	Konečný průřez tyče	[mm ²]
s	Tloušťka materiálu	[mm]
TIG	Tungsten inert gas	[-]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	[-]
T_p	Teplota předehřevu	[°C]
U	Napětí	[V]
v_s	Svařovací rychlost	[mm·s ⁻¹]
YAG	Yttrium aluminium granát	[-]
Z	Kontrakce	[%]
ZM	Základní materiál	[-]
ε	Poměrné prodloužení	[-]
η	Tepelná účinnost přenosu tepla	[-]
λ	Vlnová délka	[nm]
σ	Napětí	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Automatizovaná svařovací linka v automotive [4]	9
Obr. 2	Podíl zastoupení PHS ocelí v karoseriích vozů škoda [5]	10
Obr. 3	Princip nýtování [8]	11
Obr. 4	Příklad lepeného spoje [9]	11
Obr. 5	Svařování metodou MAG [11]	11
Obr. 6	Příklad odporového bodového svařování [13]	12
Obr. 7	Svařování laserem [14]	12
Obr. 8	Přehřev plamenem [16]	12
Obr. 9	Odporový přehřev [17]	13
Obr. 10	Indukční ohřev [18]	13
Obr. 11	Elektrický oblouk TIG [15]	13
Obr. 12	Procentuální podíl laserových aplikací [20]	16
Obr. 13	Schéma indukčního režimu [23] [23]	17
Obr. 14	Schéma penetračního režimu [23]	17
Obr. 15a	Kontinuální režim svařování	18
Obr. 15b	Pulzní režim svařování [20]	
Obr. 16	Konstrukce Nd:YAG laseru buzeného diodami [25]	19
Obr. 17	Konstrukce ND:YAG laseru [25j]	19
Obr. 18	Základní konstrukce vláknového laseru [25]	20
Obr. 19	Konstrukce CO ₂ laseru [26]	20
Obr. 20	Princip LaerTIGu [27]	21
Obr. 21	Studená trhlina [31]	22
Obr. 22	Trhlina za horka [31]	23
Obr. 23	Pórovitost svaru [32]	23
Obr. 24	Princip metody TIG [15]	24
Obr. 25	Průběh pulzního proudu [34]	25
Obr. 26	Svary zhotovené pulzním svařováním a klasicky [34]	25
Obr. 27	Penízkový svar [27]	26
Obr. 28	Schéma svařovacího TIG hořáku [36]	27
Obr. 29	Vliv plynové čočky na tok plynu [37]	27
Obr. 30	ARA diagram oceli 22MnB5 [39]	28
Obr. 31	Princip obloukového přehřevu TIG v kombinaci s laserovým paprskem [28]	30
Obr. 32	Využití USIBORU v automotive [40]	31
Obr. 33	Postup zpracování bórem dopovaných ocelí [43]	32
Obr. 34	Vozokomorová pec [45]	32
Obr. 35	Povlak na bázi Al-Si v nevytvrzeném stavu [41]	33
Obr. 36	Plochá zkušební tyč pro tahovou zkoušku [15]	34
Obr. 37 a)	Tahový diagram s výraznou mezí kluzu	35
Obr. 37 b)	Tahový diagram se smluvní mezí kluzu [50]	
Obr. 38	Zkouška tvrdosti dle Vickerse [15]	36
Obr. 39 a)	Indentor pro měření makrotvrdosti	37
Obr. 39 b)	Indentor pro měření mikrotvrdosti [51]	
Obr. 40	Princip kapilární metody [54]	39
Obr. 41	Magnetická prášková zkouška [54]	39
Obr. 42	Průchodová metoda ultrazvuku [54]	39
Obr. 43	Princip zkoušky RTG zářením [54]	40
Obr. 44	Yb-YAG laser YLS 2000 [15]	42
Obr. 45	Zdroj MagicWave 1700 a manipulační robot IRB 2400 [54]	43
Obr. 46	Upnutí vzorků	43
Obr. 47	Geometrie zkušební tyče [54]	45
Obr. 48	Zkušební tyč pro tahovou zkoušku	45
Obr. 49	Upnutí vzorku v kleštinách	46

Obr. 51 Metalografická pila MTH Mikon 110 [54].....	48
Obr. 50 A) Brousící zařízení Struers Tegramin – 20 B) Zařízení pro lisování pecek Struers CitoPress – 1 [15]	48
Obr. 52 Metalografické výbrusy v pryskyřicových peckách.....	49
Obr. 53 Optický mikroskop Olympus SC 50 [54]	49
Obr. 54 Subzóny TOO (vzorek č. 2).....	52
Obr. 55 Olympus LEXT OLS 3100	52
Obr. 56 Tepelně ovlivněná oblast vzorku č. 4 (zvětšení 1200x).....	53
Obr. 57 Svarový kov s výskytem delta feritu (vzorek č. 5, zvětšeno 1200x)	54
Obr. 58 Vpichy indentoru na makroskopickém snímku	54

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení oceli 22MnB5 dle normy [7]	10
Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli 22MnB5 [2]	10
Tab. 3 Maximální množství prvků v oceli pro použití výpočtu Ce dle (2.1) [7]	29
Tab. 4 Maximální množství prvků v oceli pro použití výpočtu CE dle (2.2) [1]	29
Tab. 5 Maximální množství prvků v oceli pro použití výpočtu CET dle (2.3) [1]	29
Tab. 6 Rozdělení zkoušek svarů [48]	34
Tab. 7 Chemické složení oceli 22MnB5 dle atestu	41
Tab. 8 Mechanické vlastnosti oceli 22MnB5 dle atestu	42
Tab. 9 Technické parametry Yb-YAG laser YLS 2000 [15]	42
Tab. 10 Technické parametry zdroje MagicWave 1700 [55]	43
Tab. 11 Technické parametry robota IRB 2400 [56]	43
Tab. 12 Parametry svařování	44
Tab. 13 Rozměry zkušebních tyčí	45
Tab. 14 Hodnoty naměřené softwarem M-TEST pro jednotlivé zkušební tyče	47
Tab. 15 Snímky fraktografické analýzy	48
Tab. 16 Makrostruktura svarů	50
Tab. 17 Mikrostruktura vzorku č. 3	53
Tab. 18 Průběhy mikrotvrdostí	55
Tab. 19 Ekonomické zhodnocení použitých technologií [15], [24]	58

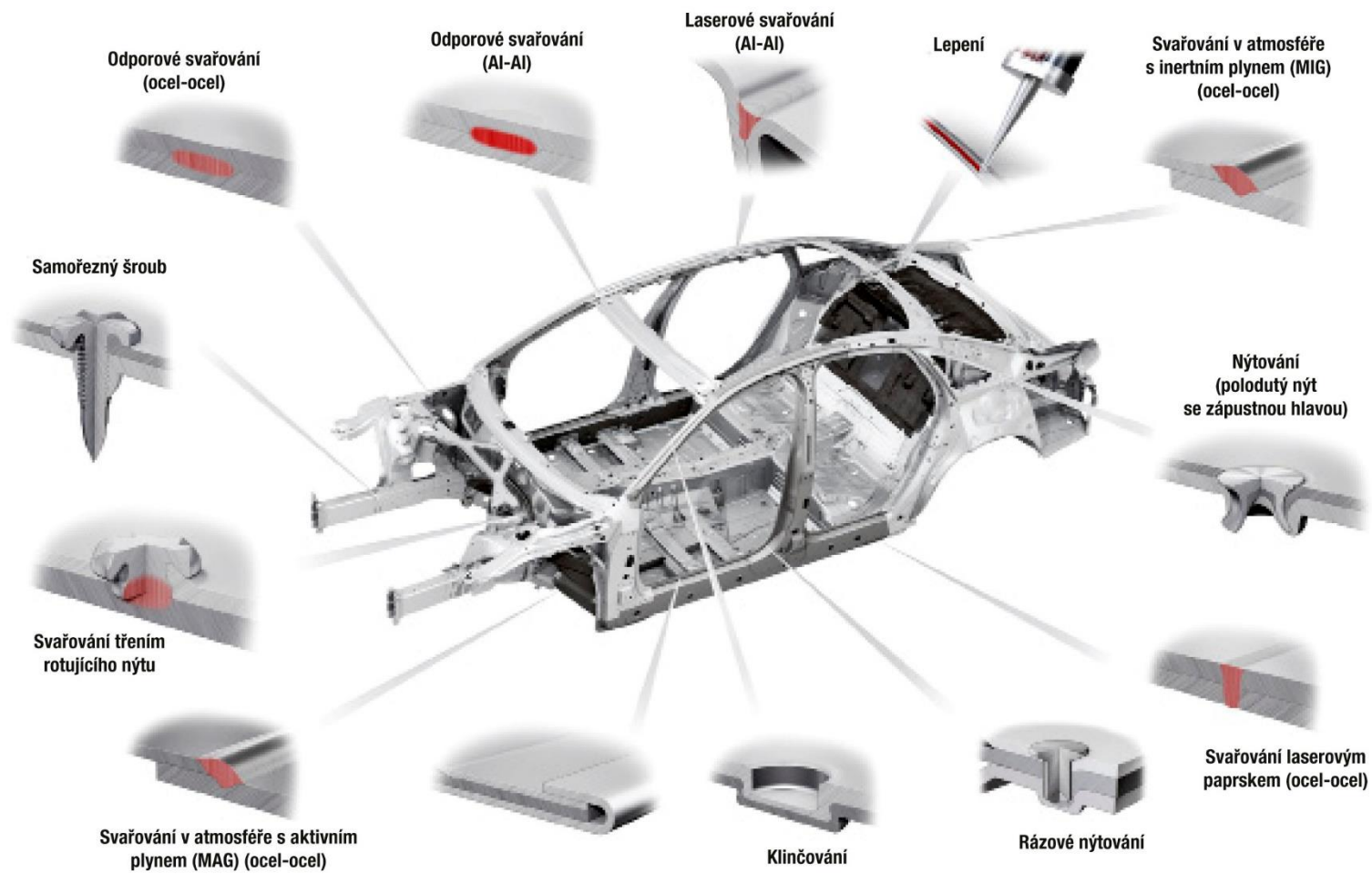
SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Průběh tahového napětí v závislosti na přetvoření	46
Graf 2 Porovnání mezi pevností R_m vyhodnocených softwarem M-TEST pro jednotlivé vzorky.....	47
Graf 3 Závislost rozměrů TOO na vneseném teple Q	51

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Spoje v autokaroserii
- Příloha 2 Atest zkoumané oceli 22MnB5
- Příloha 3 Geometrie svařovací sestavy LasTIGu
- Příloha 4 Parametry trhacího stroje pro tahovou zkoušku
- Příloha 5 Snímky mikrostruktury jednotlivých vzorků

Příloha 1 [58]



ESB - European Steel Business Deutschland GmbH - Lerchenfeldstr. 76 - 47877 Willich



Kovovyroba Hoffmann s.r.o.
Dedina 959
68722 Ostrozka Nova Ves
Czech Republic

Your Order (PO) No.:
161759
Auftrag-/ Lieferschein Nr.:
ESBD 1224801
Gedruckt auf
25/08/2016

CERTIFICATE OF ANALYSIS acc. DIN EN 10204/3.1

Description of material / Dimensions	Weight in kg.
Bleche, feuerverzinkt 22MnB5 (Werksnorm), AS150, uncoiled 1,20 x 1125,0 x 1250 mm	533

Chemical properties in %

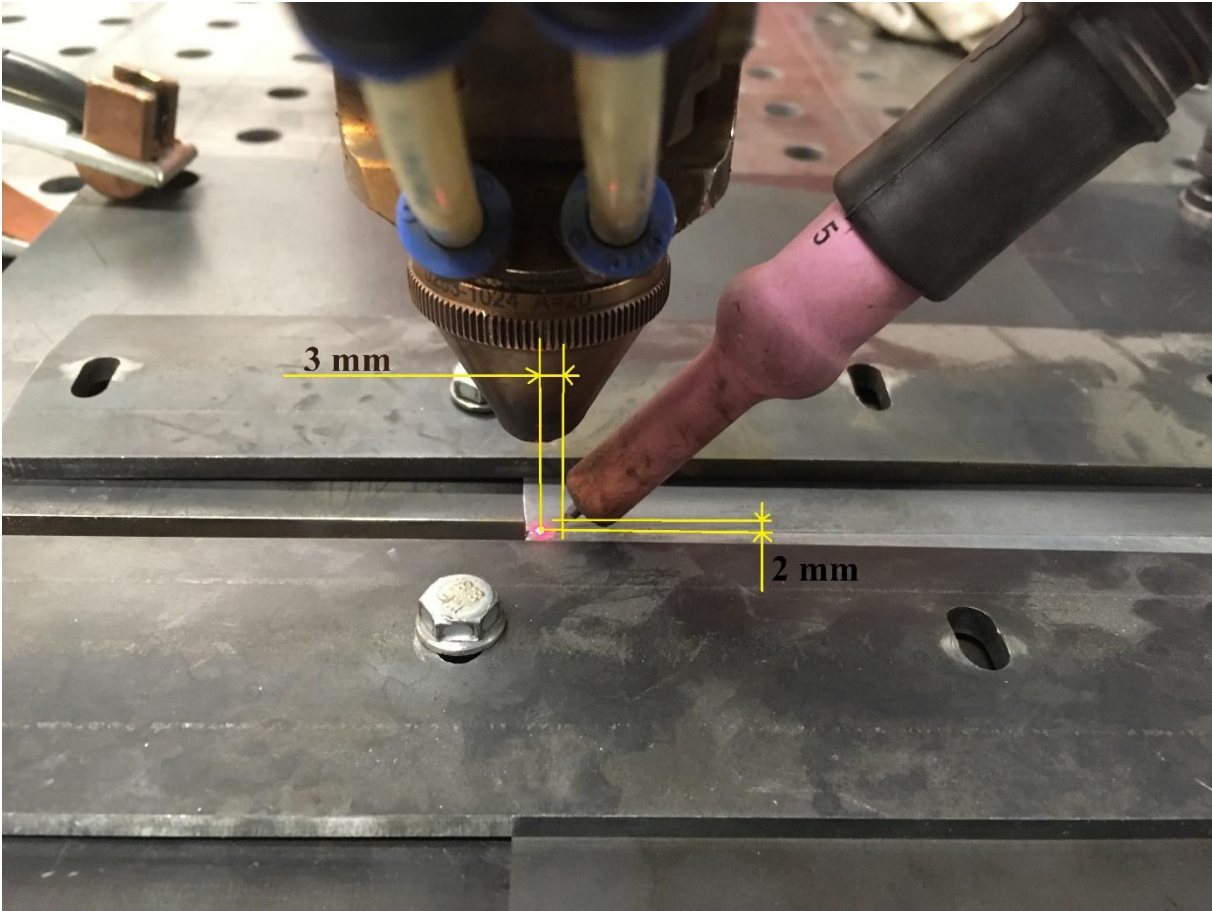
C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Cr	Mo	B
0,213	2,140	1,100	0,017	0,001	0,038	0,030	0,185	0,002	0,002

Mechanical and physical properties

Yield Point	Tensile Strength	Elongation	Sample direction	Parent trace Coil No
437 N/mm ²	622 N/mm ²	20 %	Q	1606/11269 C:R205183421/P:706

Trace	Coil No	Weight in kg.
1608/17692	C:R205183421/P:706	533 KG

Příloha 3: Geometrie svařovací sestavy LasTIG



Příloha 4: Hydraulický zkušební stroj ZD40/400 kN/

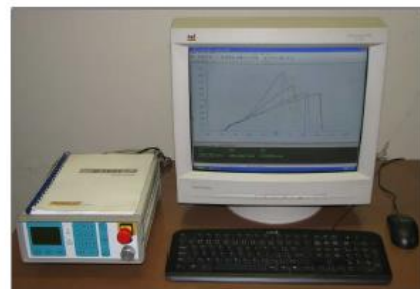
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 KN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

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 evropští výrobci universálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

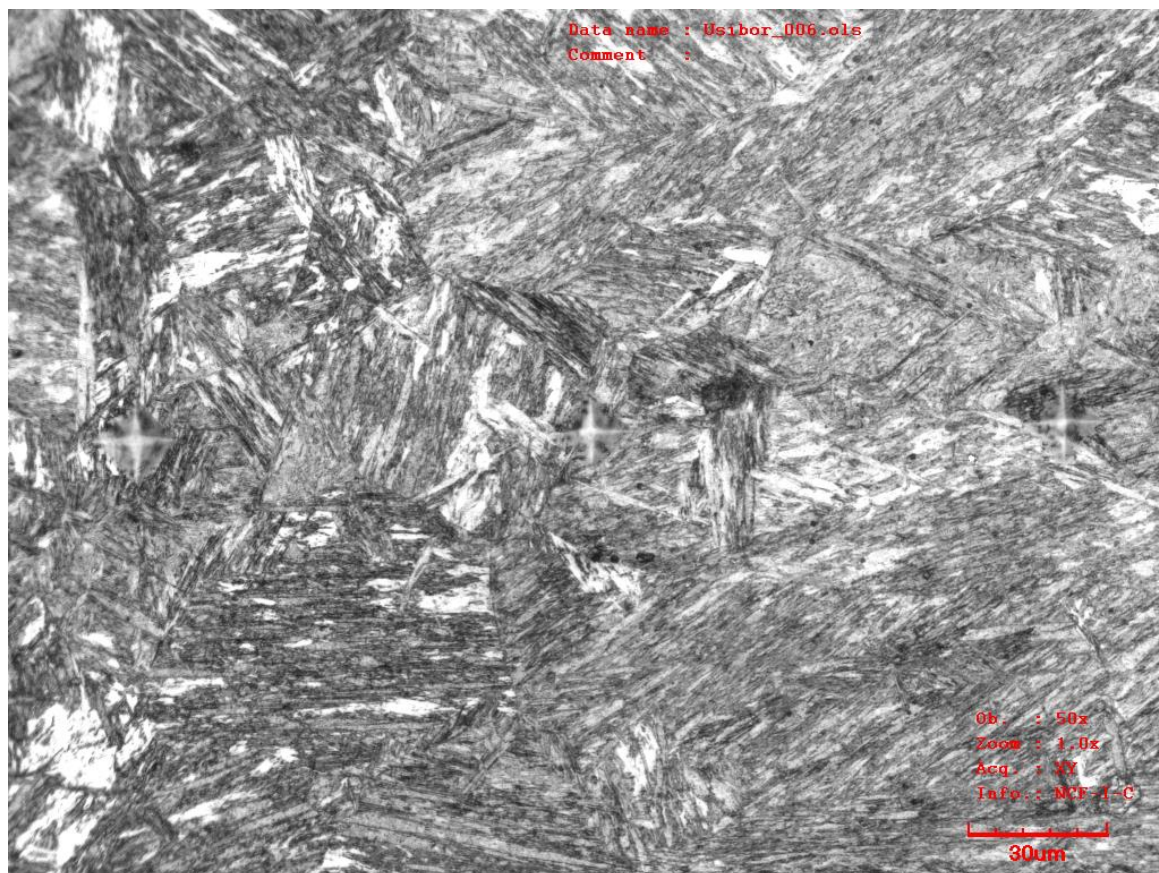
- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s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

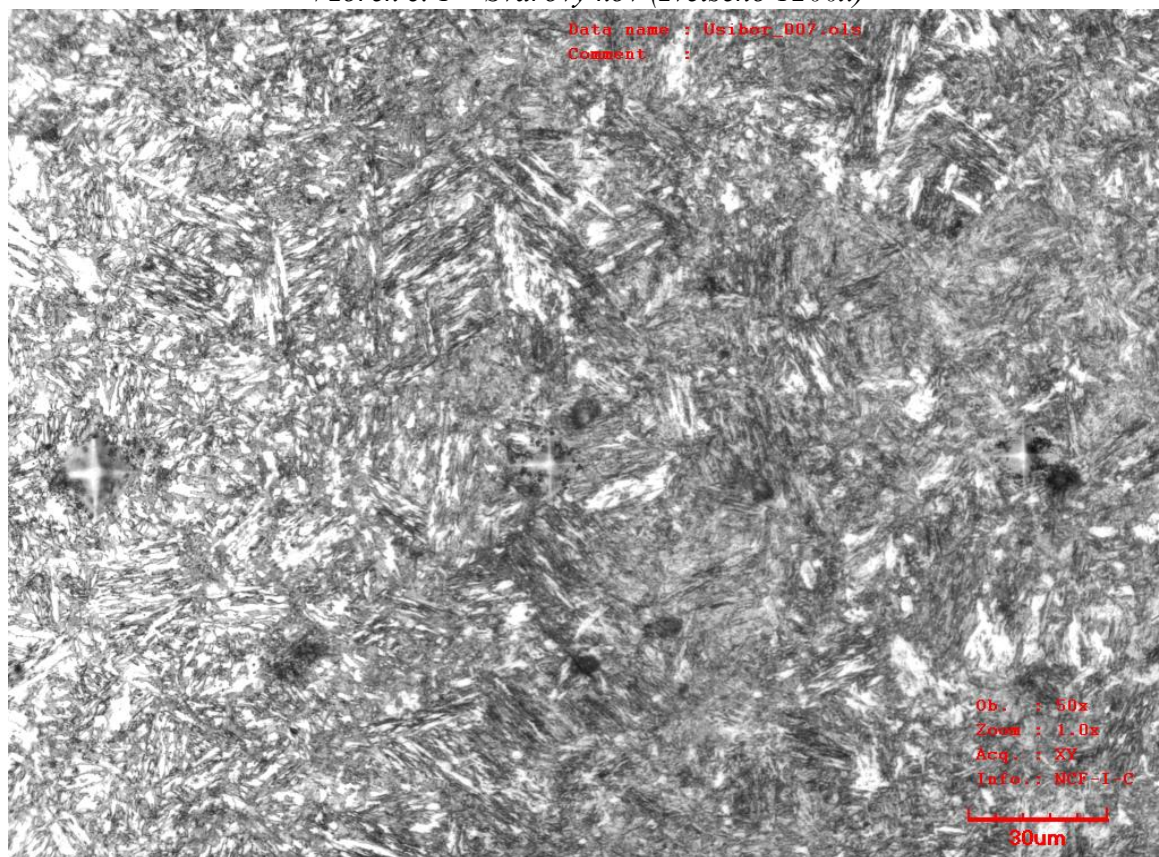


Řídicí jednotka EDC 60

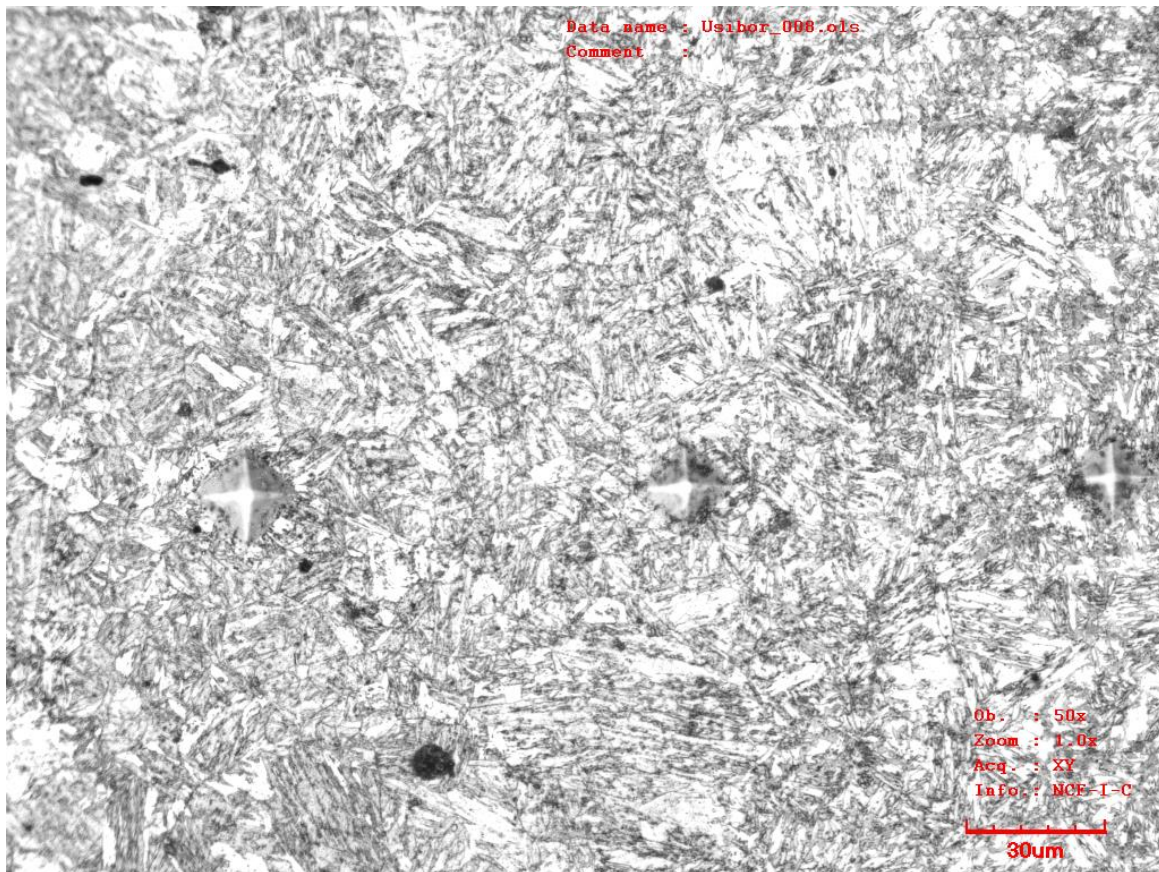
Příloha 5



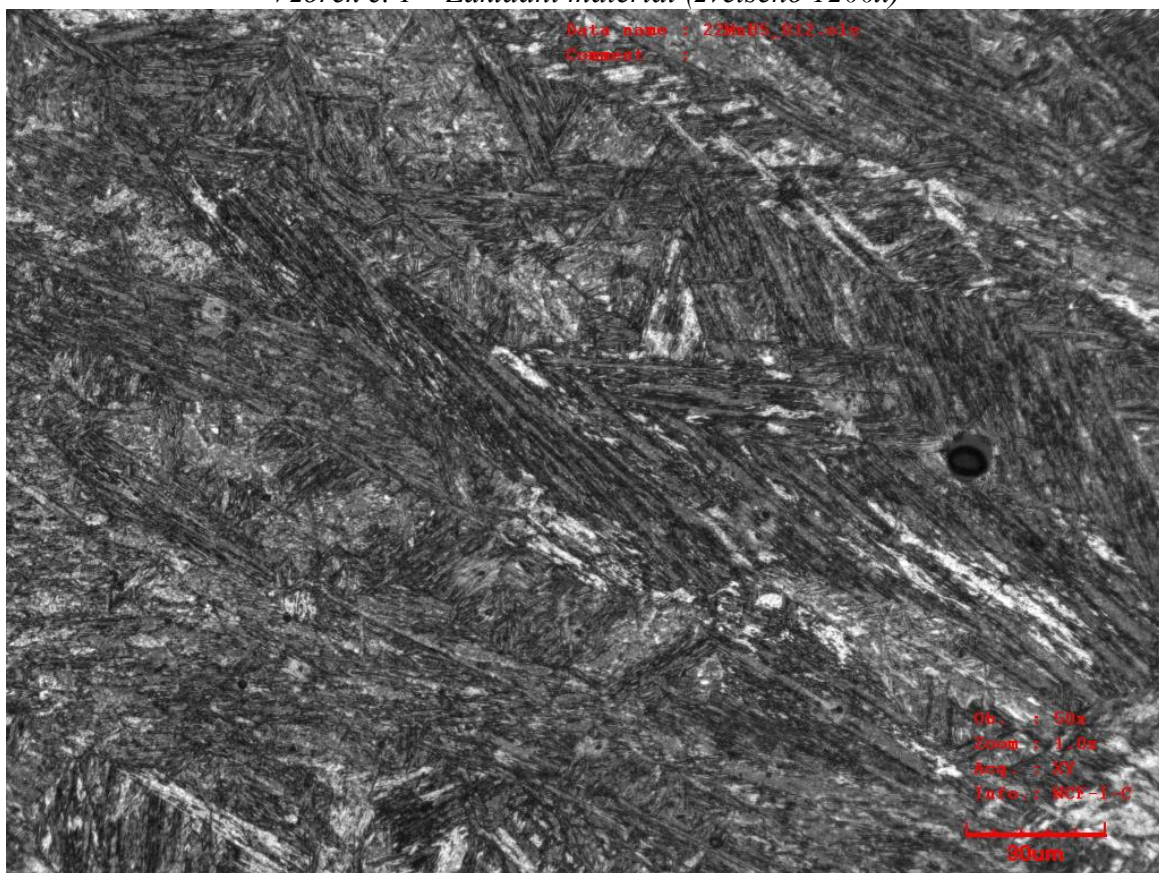
Vzorek č. 1 – Svarový kov (zvětšeno 1200x)



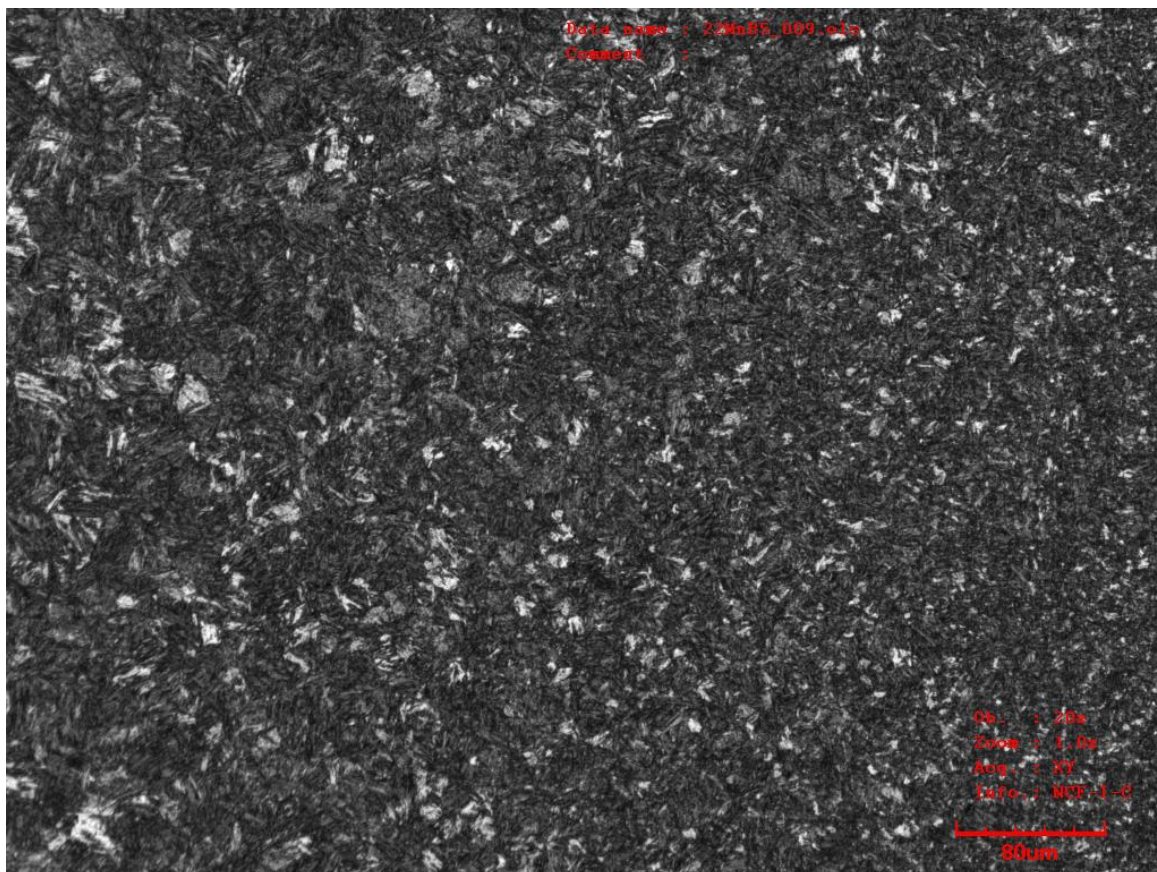
Vzorek č. 1 – TOO (zvětšeno 1200x)



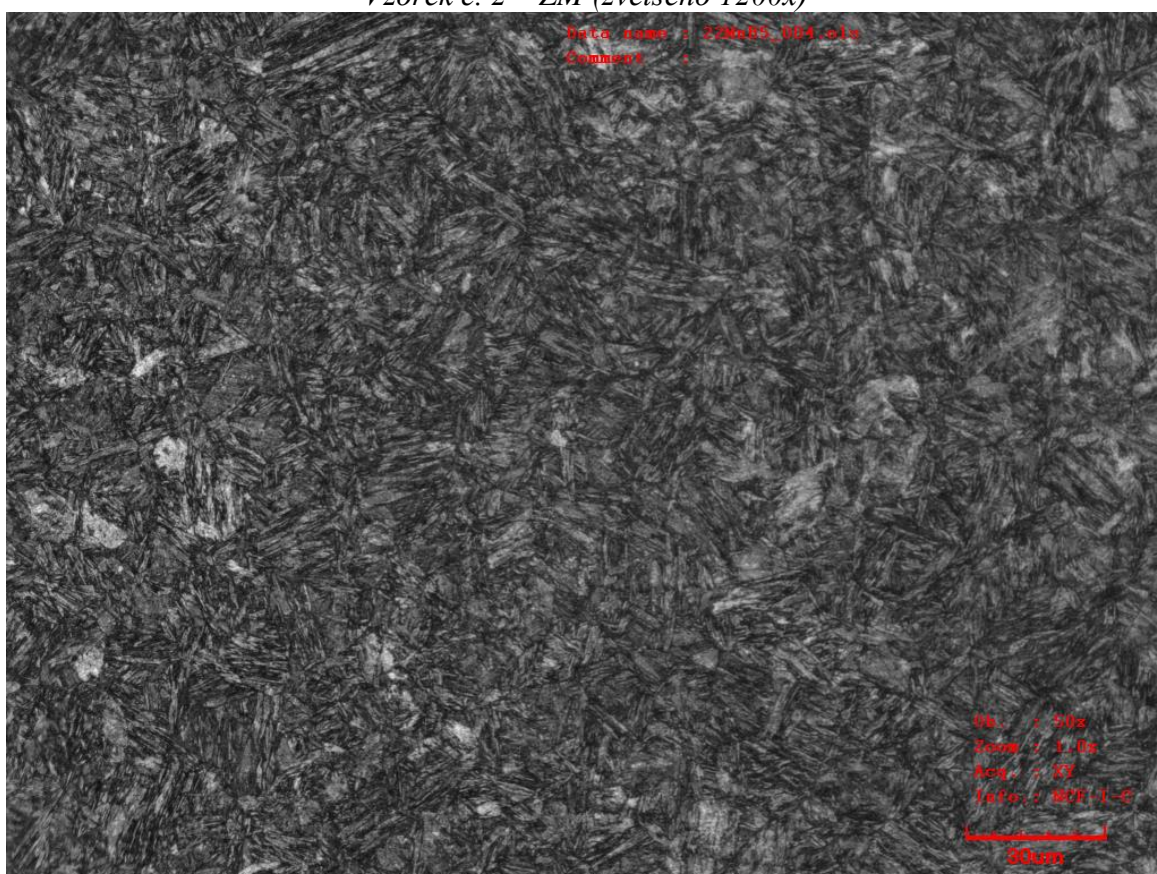
Vzorek č. 1 – Základní materiál (zvětšeno 1200x)



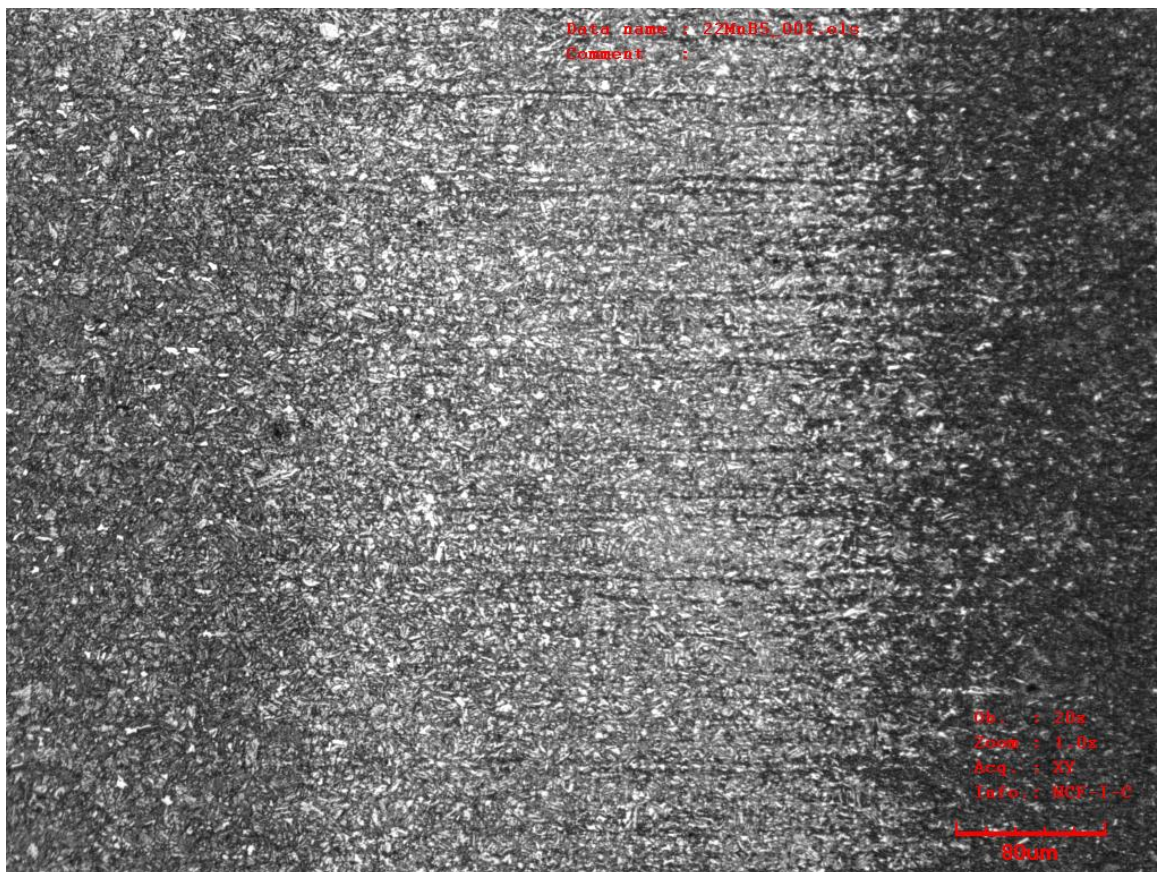
Vzorek č. 2 – Svarový kov (zvětšeno 1200x)



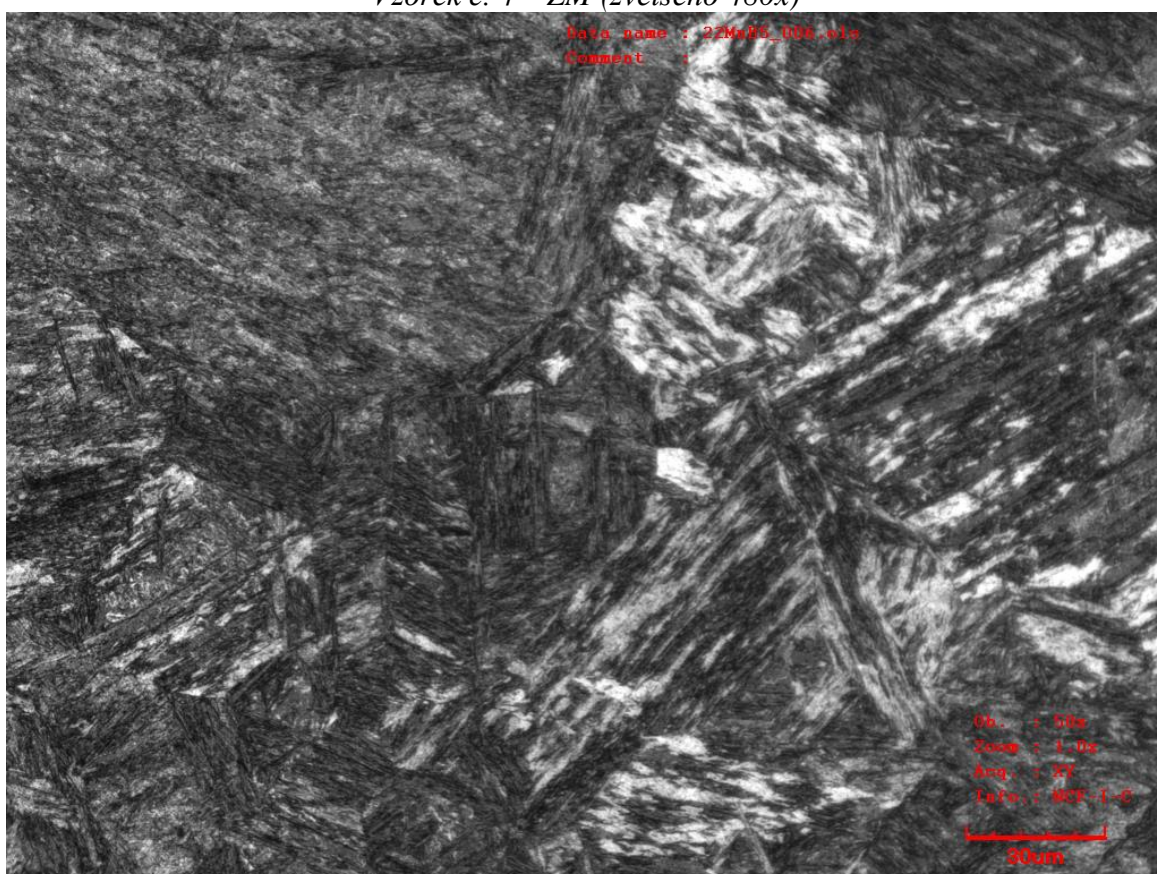
Vzorek č. 2 – ZM (zvětšeno 1200x)



Vzorek č. 4 – Svarový kov (zvětšeno 1200x)



Vzorek č. 4 – ZM (zvětšeno 480x)



Vzorek č. 5 – TOO (zvětšeno 1200x)