

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ MARTENZITICKÉ KOROZIVZDORNÉ OCELI POMOCÍ HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE LASER - TIG

WELDING OF MARTENSITIC STAINLESS STEEL USING HYBRID TECHNOLOGY LASER - TIG

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Novotný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jan Novotný**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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

Svařování martenzitické korozivzdorné oceli pomocí hybridní technologie Laser – TIG

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ověřit svařování korozivzdorné martenzitické oceli X20CrMoV 12–1 pomocí hybridní technologie Laser–TIG. Optimalizovat procesní parametry s ohledem na mechanické vlastnosti svaru.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii hybridního laserového svařování Laser–TIG.

Osvojit si aplikaci této technologie pro svařování korozivzdorné martenzitické oceli X20CrMoV 12–1.

Optimalizovat procesní parametry s ohledem na mechanické vlastnosti svaru.

Osvojit si metalografické vyhodnocování svarového spoje, mechanické zkoušky svaru a vyhodnocení svarových vad.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

NOVOTNÝ, Jan: Svařování martenzitické korozivzdorné oceli pomocí hybridní technologie Laser – TIG

Teoretická část práce obsahuje přehled technologie svařování laserem a možnosti kombinace s obloukovými technologiemi pro dosažení požadovaných vlastností svaru. Dále je proveden popis mechanických a metalografických zkoušek svarů.

V experimentální části je provedena optimalizace procesních parametrů hybridní technologie laser – TIG pro svařování martenzitické korozivzdorné oceli, používané v energetickém průmyslu s ohledem na její mechanické vlastnosti svaru a strukturu materiálu, včetně návrhu technologických podmínek.

Klíčová slova: Svařování, martenzitická korozivzdorná ocel, X22CrMoV12–1, laser, TIG, LATIG procesní parametry

ABSTRACT

NOVOTNÝ, Jan: Welding of martensitic stainless steel using hybrid technology Laser – TIG

Theoretical part of this thesis includes overview of laser welding technology and possible combinations with arc welding methods for meeting desired properties of the weld. It also explains mechanical testing and metallographic examination on welds.

The experimental part deals with optimisation of process parameters during welding of martensitic stainless steel, used in energetic industry using hybrid laser - TIG technology in regard of mechanical properties of the weld, its structure and proposal of technological parameters.

Keywords: Welding, martensitic stainless steel, X22CrMoV12–1, laser, TIG, LATIG, process parameters

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVOTNÝ, Jan. *Svařování martenzitické korozivzdorné oceli pomocí hybridní technologie Laser - TIG* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124899>. 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 25.6.2020

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce, Ing. Mgr. Haně Šebestové Ph.D. za pomoc s vyhodnocením struktur, Ing. Pavlu Doležalovi Ph.D. za provedení měření tvrdosti svarů, dále pracovníkům ÚPT AV ČR za poskytnuté zázemí a pomoc s experimentální částí a také mým blízkým za podporu při studiu.

OBSAH

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
1.1 Varianty řešení	11
2 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ	13
2.1 Lasery využívané pro svařování	13
2.2 Princip svařování laserem	17
2.3 TIG svařování	19
2.4 Hybridní svařování laser-TIG	20
3 SVAŘOVANÝ MATERIÁL	22
3.1 Svařitelnost	23
3.2 Vady svaru	25
3.3 Zkoušení svarů	27
3.3.1 Destruktivní metody zkoušení	27
3.3.2 Nedestruktivní metody zkoušení	29
4 VLIV PROCESNÍCH PARAMETRŮ NA VLASTNOSTI SVAROVÉHO SPOJE ...	32
4.1 Procesní parametry při experimentu	33
4.2 Metalografický rozbor	35
4.2.1 Makrostruktura	36
4.2.2 Mikrotvrdost	43
4.3 Mikrostruktura	48
4.3.1 Základní materiál	48
4.3.2 Tepelně ovlivněná oblast	49
4.3.3 Svarový kov	52
4.3.4 Hodnocení mikrostruktury elektronovou mikroskopií	54
4.4 Technicko-ekonomické zhodnocení	55
5 ZÁVĚRY	56

Seznam literatury

Seznam symbolů a zkratk

Seznam tabulek

Seznam obrázků

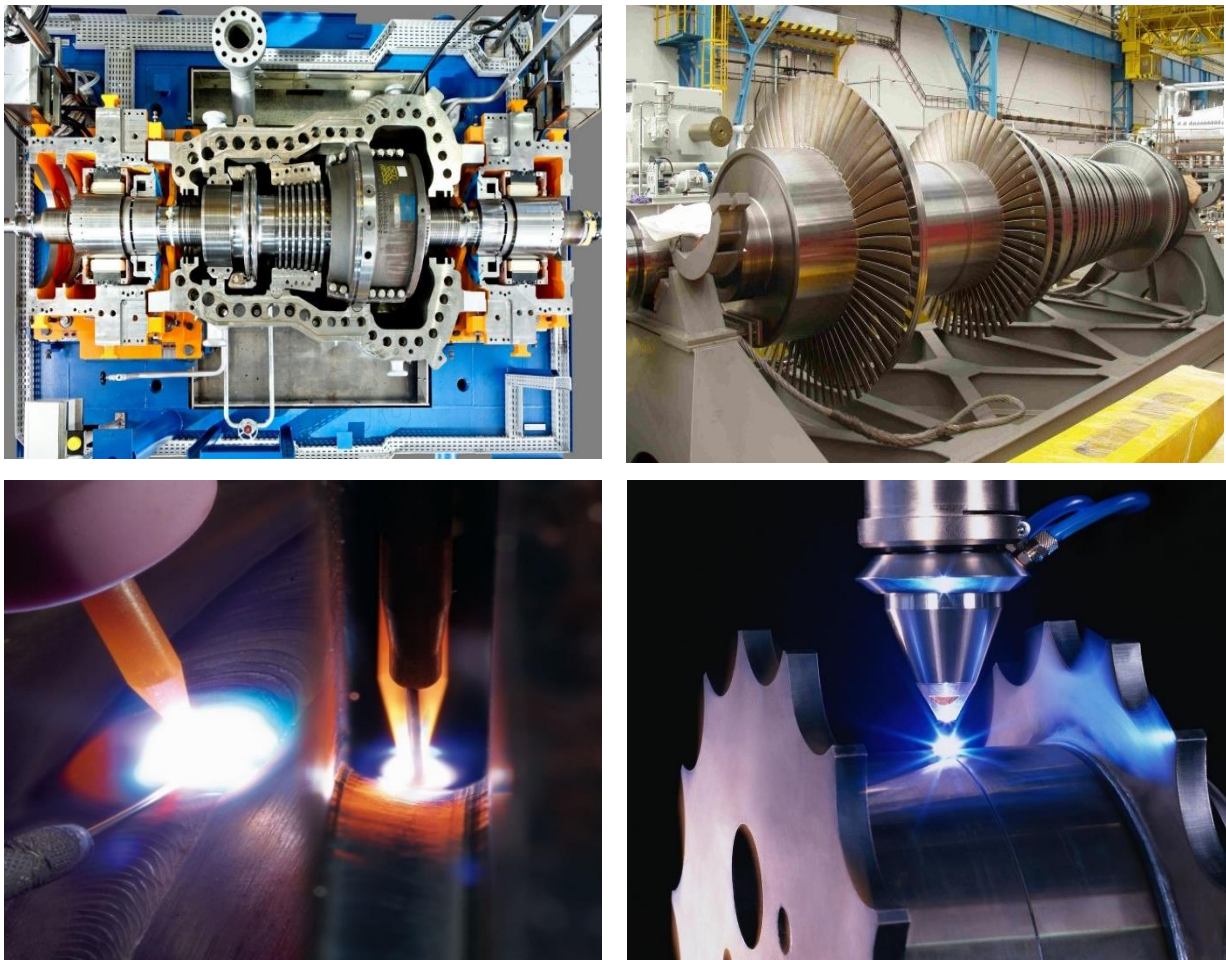
Seznam příloh

ÚVOD [1], [2], [3] [4], [5]

Ve všech oborech lidské činnosti dochází k rychlému vývoji. Stejně tak je tomu i v oblasti energetiky, kde stále zvyšující se požadavky na výkon a efektivitu zařízení kladou nové nároky na materiály a způsoby výroby. Zároveň se stále více zohledňují ekonomické požadavky na výrobu. Z tohoto důvodu jsou hledány nové způsoby umožňující výrobu v co nejkratších výrobních časech, s minimem dokončovacích prací a v požadované kvalitě.

Stejně tak dochází i k růstu spotřeby energie. Velmi důležitým prvkem její výroby jsou parní turbíny, v roce 2018 bylo v ČR díky nim vyrobeno minimálně 81 % elektrické energie, používány jsou také pro pohon čerpadel, kompresorů a v dopravě pro pohon lodí. V současnosti jsou u nás vyráběny parní turbíny několika výrobci, mezi něž patří Siemens Industrial Turbomachinery, Ekol nebo První brněnská strojírna. Turbíny, zejména pak části ústrojí přicházející do styku s párou, patří mezi extrémně namáhané součásti, neboť pracují za vysokých teplot a tlaků, proto jsou zpravidla vyráběny z vysoce legovaných žárupevných ocelí.

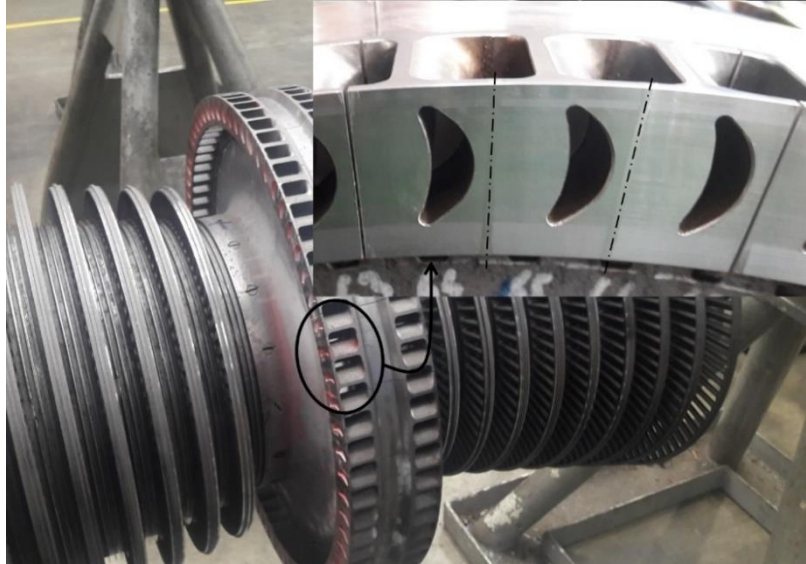
Proces svařování žárupevných ocelí je velmi náročný zejména z důvodu vysokého obsahu legur a požadavku na zachování struktury nutného pro dosažení požadovaných vlastností. Byť současné metody poskytují obvykle vyhovující výsledky, jsou s nimi spojeny mnohé nežádoucí jevy, jako jsou například deformace a zbytková napětí, a také značná ekonomicko-technologická náročnost, proto jsou hledány nové cesty pro svařování jednotlivých lopatek jako je například svařování laserem, případně kombinace s jinými metodami (obr. 1).



Obr. 1: TIG a laserové svařování, parní turbína [6], [7], [8], [9]

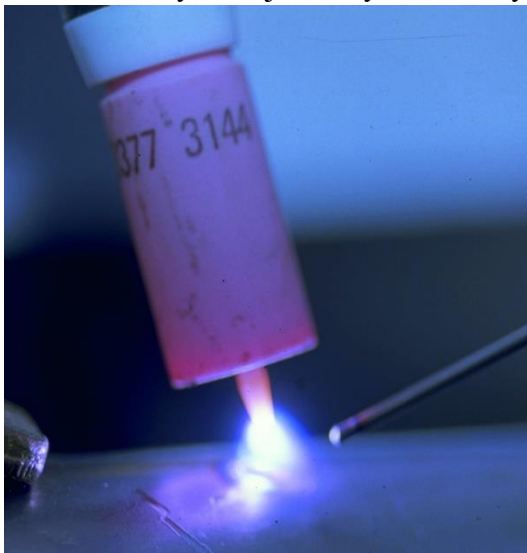
1 ROZBOR ZADÁNÍ [2], [3], [4], [10]

Parní turbíny se skládají z několika základních částí – zejména pak skříně a rotoru (obr. 2). Rotor se sestává z hřídele a rotorových lopatek. Právě tyto lopatky jsou nejvíce namáhány vlivem tlaku páry, odstředivých sil, vibrací a také vysoké teploty v okolí 500 °C, a z nich pramenících creepových jevů. Z tohoto důvodu jsou vyráběny z žárupevných martenzitických ocelí (v tomto případě X22CrMoV12-1) schopných odolávat značnému zatížení za těchto podmínek. Vzhledem k tvarové složitosti a rozměrům není prakticky možná výroba rotoru vcelku, z tohoto důvodu jsou zhotovovány jednotlivé lopatky, které jsou následně svařeny do skupin po třech. Tyto segmenty jsou montovány na unašec se zámky. Svařovány jsou plochy na bocích lopatek tloušťky cca 5 mm, délka svaru činí asi 40 mm, typ svaru natupo.



Obr. 2: Obrobené rotorové kolo s umístěním svarů (čerchovaně) [3]

V současnosti jsou jednotlivé segmenty svařovány metodou TIG (netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu) (obr. 3), kdy jsou na jednotlivých částech vytvořeny úkoso, které jsou následně vyplněny přídatným materiálem. Toto řešení sice vyhovuje po stránce funkční, ale je velmi náročné na dodržování technologické kázně (např. čistota a kvalita přípravy svařovacích ploch), klade vysoké požadavky na pracovníky a je časově náročné. Současná metoda se vyznačuje velkým vneseným teplem do místa svaru, což vede ke značným deformacím a tepelnému ovlivnění materiálu.



Obr. 3: Svařování metodou TIG [11]

Vzhledem k tomu, že celý proces je značně ovlivněn lidským faktorem, dochází k výskytu vad jako jsou například vady kořene, nedostatečné převýšení či nevyplněné koncové staženiny, které jsou vzhledem ke způsobu namáhání součástí nepřijatelné, navíc některé prakticky neopravitelné, takže vedou ke vzniku neshodných výrobků. Vzhledem k velkým deformacím také často dochází ke vzpříčení ve svařovacím přípravku a následnému poškození při vytlačování z něj nebo obtížné montáži segmentů do zámek unašecího kola. Z výše popsaných důvodů je výroba za současného stavu sice proveditelná, avšak značně neekonomická, proto jsou hledány alternativní možnosti jejího provedení.

1.1 Varianty řešení [10], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20]

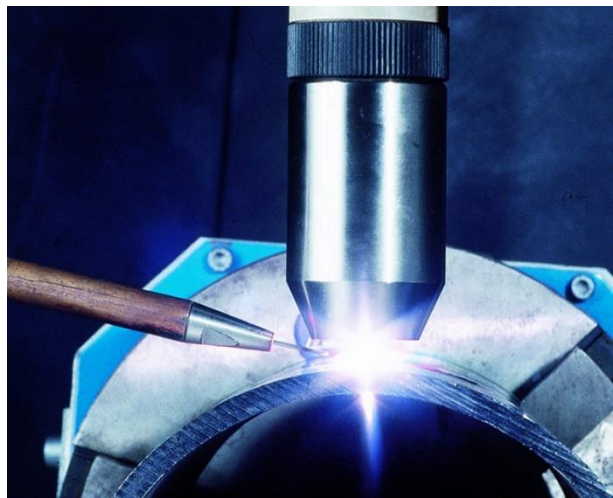
V oblasti svařování je dostupná široká škála technologií patřících do dvou hlavních skupin – tlakové a tavné. Vzhledem k požadavkům na provedení svaru, tzn. bez vad, omezení deformací, minimalizace či odstranění přídavků, možnost snadné automatizace procesu a druhu svařovaného materiálu (martenzitická korozivzdorná ocel) jsou v následujícím výčtu zahrnuty pouze nejvhodnější tavné metody, a to od konvenčních až po speciální:

- MAG – svařování tavící se kovovou elektrodou v aktivním plynu (obr. 4) je v současnosti nejčastěji používaná oblouková metoda svařování. Mezi její výhody patří poměrně jednoduché strojní vybavení, různorodost přídavných materiálů i ochranných plynů a jejich dobrá dostupnost. Poměrně snadno je možné provést i robotizaci procesu svařování. Pravděpodobně by vhodnou kombinací technologických parametrů, přídavného materiálu a ochranného plynu bylo dosaženo adekvátního svarového spoje, avšak v energetice není obecně příliš využívána vzhledem k riziku vzniku studených spojů. Nebyla by též odstraněna potřeba přípravy svarových ploch, ani značné tepelné ovlivnění materiálu, tedy ani omezeny deformace a nutnost značných technologických přídavků. Zároveň by bylo stále nutné aplikovat předehřev, dohřev, případně tepelné zpracování dílců pro dosažení potřebné struktury a mechanických vlastností dílce.



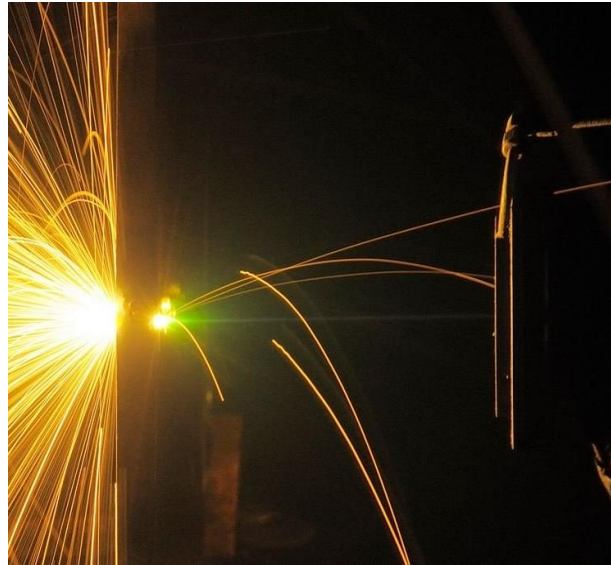
Obr. 4: Svařování MIG/MAG [12]

- Plazmové svařování – metoda patří mezi metody s vysokou koncentrací energie, běžně je využívána v energetickém průmyslu, neboť poskytuje velmi kvalitní svary bez porozity a s kvalitním provařením kořenu i v obtížně svařitelných materiálech. Dynamický účinek plazmatu umožňuje provádět svary natupo díky tzv. keyhole i při tloušťce materiálu okolo 6 mm bez úpravy svarových ploch. Běžně je využíváno svařování bez nebo s použitím přídavného materiálu (obr. 5). Oproti svařování metodou TIG je dosahováno vyšších svařovacích rychlostí. I přes výhodnější poměr šířky ku hloubce svaru oproti TIG je svarová lázeň i tepelně ovlivněná oblast poměrně velkých rozměrů, takže touto metodou by nebyla zaručena dostatečná rozměrová stálost, která by kompenzovala složitější zařízení oproti současnému postupu pomocí metody TIG.



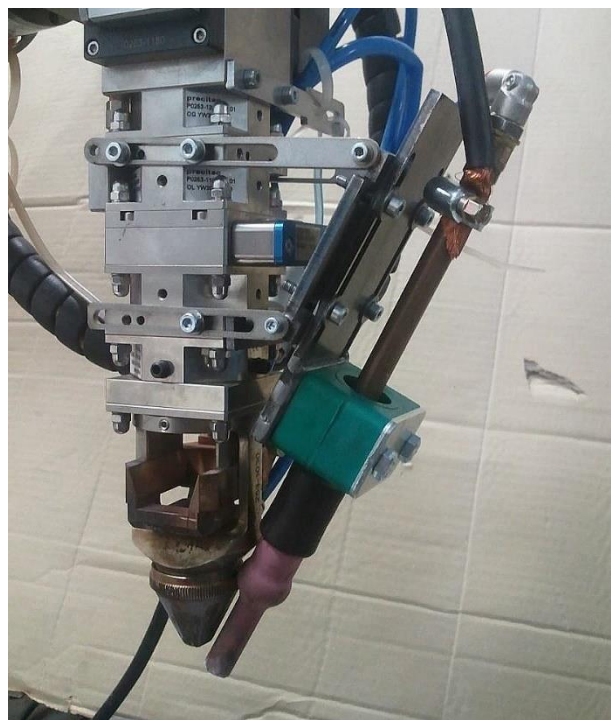
Obr. 5: Plazmové svařování [14]

- Svařování svazkem elektronů (obr. 6) – tato metoda poskytuje svary velmi vysokého štíhlostního poměru (díky keyhole lze svařovat materiály tl. 50 mm), nutnost úprav svarových ploch a použití přídavného materiálu by tak byla odstraněna. Rařinační schopnost vakua umožňuje svařování většiny materiálů ve výborné kvalitě, protože nedochází ke vzniku porozity, případně reakcím s okolním prostředím. Díky velmi vysoké energetické hustotě dochází pouze k minimálnímu tepelnému ovlivnění materiálu, tepelně ovlivněná oblast je velmi úzká a deformace svařence minimální. Svařovací rychlosti jsou vysoké. Vzhledem k umístění ve vakuové komoře je proces automatizován. Nevýhodou je však vysoká cena a značná komplexnost celého zařízení (vývěvy, manipulátor), náročná údržba, časy potřebné k výměně dílů v komoře a nutnost přípravkování pro manipulaci se svařencem uvnitř komory. Vzhledem ke značným rozměrům svařenců je zásadním omezujícím faktorem rozměr komory. Problémem by mohl být vznik nežádoucích struktur ve svaru v důsledku vysokých teplotních gradientů.



Obr. 6: Svařování svazkem elektronů [16]

- Svařování laserem – tato vysokoenergetická metoda se vyznačuje minimální velikostí tepelně ovlivněné oblasti a vysokým štíhlostním poměrem (až 10:1), deformace a strukturální změny ve svařenci jsou tedy minimální. Využitím energie fotonů je umožněno svařování za atmosférického tlaku ochranného plynu a maximální velikost dílce není prakticky omezena. Touto technologií lze svařovat většinu běžně dostupných materiálů včetně korozivzdorných ocelí s výbornými výsledky. Nevýhodou je vysoká cena zařízení oproti konvenčním způsobům, avšak ta je obvykle kompenzována značnou produktivitou a kvalitou. Proto bude tato technologie použita pro zhotovení požadovaných svarů. S vysokou energetičností procesu souvisí velké rychlosti ohřevu a ochlazování svarového kovu, i okolního základního materiálu, vlivem kterých by mohlo docházet ke vzniku vysokých zbytkových napětí a praskání. Z tohoto důvodu bude pro ovlivnění tepelného cyklu (snížení rychlosti ochlazování) svaru doplněn dohřev svaru pomocí TIG do jedné svarové lázně laser – TIG hybrid (obr. 7).



Obr. 7: Hlava pro hybridní svařování [17]

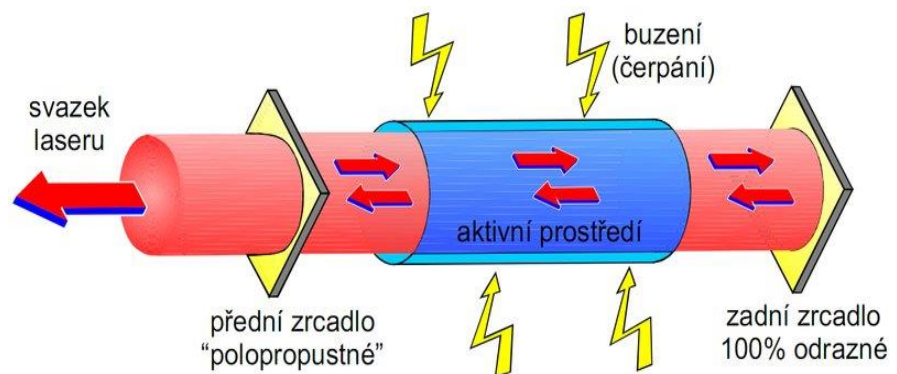
2 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ [3], [18], [19]

Laserové svařování (dle ČSN EN ISO 4063 metoda 52) je tavná metoda svařování využívaná v průmyslu již od 70. let minulého století k vytváření pevného, nerozebíratelného spoje – tedy svaru. Díky zvýšení dostupnosti laserů a zvyšování uživatelské přívětivosti zařízení došlo v posledních letech k jeho masivnímu rozšíření, podobně jako například u dělení nebo povrchových úprav. Pro své výhody, zejména v sériové výrobě, vytlačuje tradičně využívané obloukové technologie. Jedná se primárně o roboticky vedenou technologii, ačkoli se objevují i zařízení pro ruční svařování laserem.

2.1 Lasery využívané pro svařování [10], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29]

Fyzikálním principem funkce laseru je stimulovaná emise záření – od tohoto principu je i původně odvozena zkratka „LASER“ (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Fotony laserového paprsku jsou vyzařovány při přechodu elektronu z vyššího do nižšího energetického stavu atomu. Elektrony v obalech atomů aktivního prostředí jsou nejprve excitovány pomocí buzení (obr. 8) do vyšších energetických stavů.



Obr. 8: Schéma principu laseru [23]

Při přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu vyzáří foton s energií odpovídající rozdílu stavů – jedná se o spontánní emisi. Pokud je excitovaný atom vystaven elektromagnetickému záření s energií odpovídající rozdílu výše zmíněných stavů, pak dojde k vyzáření fotonu s identickou frekvencí i fází. Takto vzniklé záření se odráží od koncových zrcadel rezonátoru, čímž dochází k lavinovitému efektu a zesílení takto vyzařovaného záření, jehož část opouští rezonátor skrz polopropustné zrcadlo.

Způsob vzniku laserového paprsku určuje jeho jedinečné vlastnosti. Mezi ně patří monochromaticnost, tzn. veškeré záření paprsku spadá do velmi úzkého intervalu vlnových délek. Dále koherence (vlny paprsku kmitají se stejnou počáteční fází) a vysoká rovnoběžnost paprsku. Díky výše zmíněným vlastnostem lze fokusovat paprsek do velmi malého prostoru a dosahovat tak hustot výkonu řádově až 10^9 W.cm^{-2} .

Nejběžněji jsou lasery rozdělovány podle druhu aktivního prostředí na pevnolátkové, polovodičové, plynové, kapalinové a volné elektronové. Pro praktické aplikace v průmyslu jsou využívány první tři jmenované, zbylé jsou využívány například v aplikacích z oblasti fyziky. Dále je možné dělení podle druhu energie využité při buzení na lasery buzené opticky (např. výbojkou či laserem), elektricky (např. výboj v plynu), chemicky či termodynamicky. Z pohledu oboru vyzařovaného záření lze rozlišovat na infračervené, pracující ve viditelném oboru, ultrafialové a rentgenové. Posledním často používaným kritériem dělení je režim provozu – lasery pracující kontinuálně (CW), pulzně (PW) nebo kvazikontinuálně (QCW). Při provozu v pulzním režimu je dosahováno výkonu řádu MW, ovšem po velmi krátký čas. V současnosti existují technologické možnosti pro provoz v obou režimech u všech užívaných typů. Základní typy průmyslových laserů s přehledem základních technických parametrů jsou uvedeny v tabulce 1.

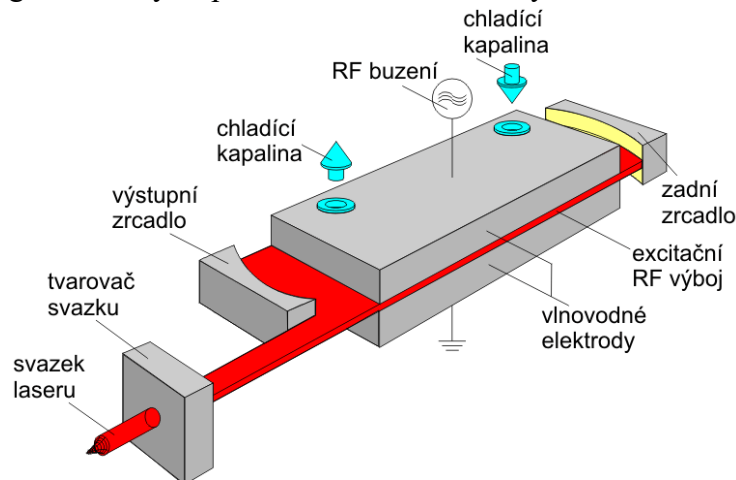
Tab. 1: Vlastnosti vybraných druhů laseru [21]

Označení	Vlnová délka [μm]	Způsob buzení	Účinnost [%]	Max. výkon [kW]	Životnost [hod.]
CO ₂	10,6	elektrický výboj	25	20	neomezeno
		radiofrekvenční	10	5	20 000
Vláknový	1,07	laserové diody	40	500	100 000
Diskový	1,03	laserové diody	15	16	10 000
Diodový	0,808 – 0,98	elektrický proud	60	10	15 000

Vývojově nejstarším v průmyslu běžně používaným typem zdroje laserového záření je CO₂ laser. Jedná se o zařízení s aktivním prostředím v plynné fázi (obvykle směs helia, dusíku a oxidu uhličitého). Buzení je prováděno vysokofrekvenčně nebo doutnavým elektrickým výbojem. Pracuje v oblasti dlouhovlnného infračerveného záření s vlnovou délkou 10,6 μm. Toto záření není možné vést optickými vlákny, proto je nutné využívat reflexivní optiku nebo speciální čočky ze ZnSe.

Z pohledu konstrukce se jedná spíše o celou rodinu zařízení. Pro nejmenší výkony v řádech několika set wattů jsou využívány uzavřené rezonátory. Aktivní prostředí však podléhá degradaci a z tohoto důvodu mají omezenou životnost.

Pro střední výkony do cca 5 kW jsou využívány slab lasery (obr. 9), kdy aktivní prostředí je geometricky uspořádáno do tvaru desky. Toto řešení omezuje problémy s jevy spojenými



s tepelným gradientem uvnitř aktivního prostředí. Výsledkem je záření s poměrně vysokou kvalitou paprsku. Buzení je prováděno vysokofrekvenčně pomocí měděných elektrod, které jsou chlazené, a slouží i pro chlazení aktivního prostředí. Oproti průtočným CO₂ laserům je zařízení zjednodušeno díky chlazení prostřednictvím elektrod. Z tohoto důvodu mají i příznivější pořizovací náklady a nároky na údržbu než průtočné lasery.

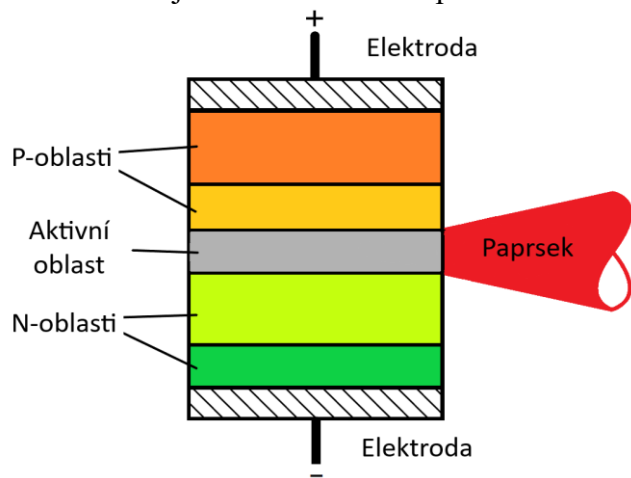
Obr. 9: Slab laser [25]

Nejvyšších výkonů (až 20 kW) dosahují tzv. průtočné lasery. Plyn aktivního prostředí proudí trubící v uzavřeném oběhu. Při vysokých výkonech nastávají problémy s distorzí prostředí a degradací kvality paprsku, proto je nutné intenzivní chlazení. Vzhledem k omezení výkonu na jednotkovou délku trubice je zařízení realizováno jako soustava více jednotlivých trubic uspořádaných například do tvaru U, O nebo jiných vhodných tvarů. Průtočné lasery se dále dělí podle směru proudění na zařízení s prouděním podélným a příčným. Plyn je nutné stále obnovovat (doplňovat), aby nenastala jeho nepřijatelná degradace.

I přes částečný ústup z trhu zůstávají aplikace, ve kterých jsou CO₂ lasery nejvýhodnější variantou. Jednou z nich je dělení organických materiálů, neboť je díky vlnové délce minimalizován opal hrany řezu. Jsou také využívány pro zpracování skla nebo dělení materiálů větších tlouštěk, kde nejsou jiné technologie zatím ekonomicky výhodné.

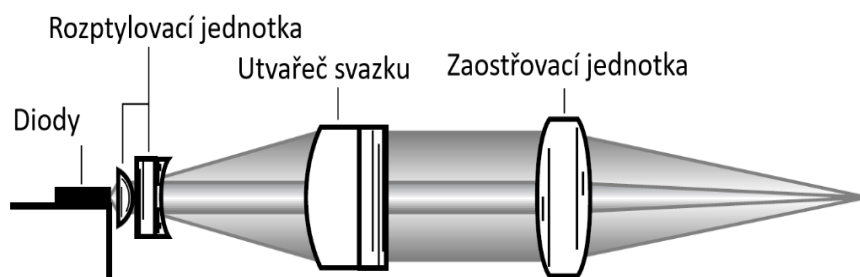
V současnosti nejběžněji používanou skupinou laserů jsou pevnolátkové. Jejich první podskupinou jsou diodové (polovodičové lasery). Pracují na principu přechodu elektronů z vodivostního pásu do valenční sféry elektronového obalu v oblasti P-N přechodu (obr. 10) v polovodiči v důsledku průchodu proudu. Častými materiály pro výrobu jsou například arsenid hlinitý nebo arsenid gallito-hlinitý. Vlnová délka záření je závislá na druhu polovodičového materiálu a pohybuje se v rozsahu celého viditelného i infračerveného pásma. Je možné ji v poměrně širokém rozsahu řídit. Nejvyužívanější jsou lasery pracující na vlnové délce 0,75–1 μm .

Maximální výkon poskytovaný jednou diodou je v řádu stovek miliwattů, jsou tedy spojovány do jednotlivých řad a větších celků dle požadovaného výkonu v řádech kW. Účinnost polovodičových laserů se u vysoce výkonných diod pohybuje okolo 50-60 %. Mezi jejich další výhody patří mechanická jednoduchost, velmi malé rozměry a dlouhá životnost bez nutnosti větší údržby.



Obr. 10: Schéma diodového laseru [20]

Zásadní nevýhodou, která omezuje jejich přímé použití, je nízká kvalita paprsku a jeho velká divergence, kterou lze však částečně korigovat optickou soustavou (obr. 11). Nejčastější využití v průmyslu proto nalézají jako zdroje energie pro buzení jiných typů laserů, kdy je plně využito vysoké účinnosti oproti jiným typům světelného buzení (například výbojkami) a poměrně



Obr. 11: Soustava pro korekci divergence paprsku [20]

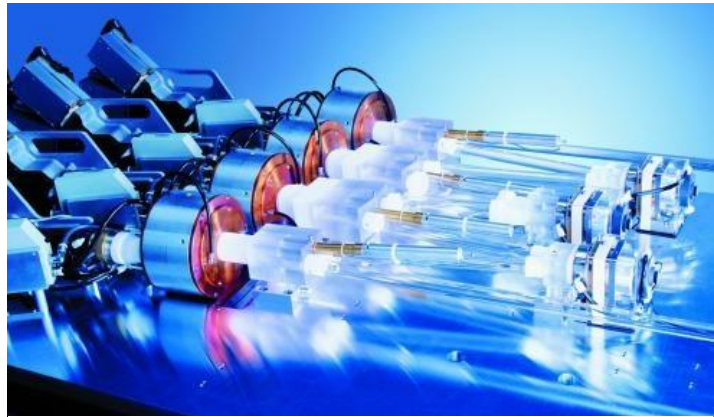
úzkého vyzařovaného spektra. Dále se využívají v aplikacích, u kterých není větší velikost laserového spotu rozhodujícím faktorem, jako je čištění povrchů, povrchové úpravy, kalení nebo svařování.

Druhou podskupinou skupinou jsou lasery, u kterých je aktivní prostředí zhotoveno z yttrito-hlinitého granátu nebo skla dopovaného ionty neodymu nebo ytterbia. Hlavní oblast vyzařovaného spektra leží v oblasti krátkovlnného infračerveného záření okolo vlnové délky 1 μm . Toto spektrum záření lze vést prostřednictvím optických vláken, odpadá tedy poměrně složitá a na údržbu poměrně náročná optická cesta z reflexivní optiky využívaná u CO₂ laserů. Výhodou je zpravidla vyšší absorpce laserového záření kovovými materiály na těchto vlnových délkách oproti vlnové délce CO₂ laseru.

Historicky nejstarším zástupcem pevnolátkových laserů je tyčový Nd:YAG pracující na vlnové délce 1,06 μm . Aktivní prostředí ve formě tyče je buzeno výbojkou, nověji diodami a je umístěno v chladicí kapalině. Vzhledem k prostorovému řešení dochází k výraznému efektu tzv. tepelné čočky, tedy změně optických vlastností aktivního prostředí v důsledku tepelného gradientu. Další nevýhodou těchto laserů je nízká účinnost v řádu jednotek procent. Tyčové lasery jsou využívány v jednodušších aplikacích s nižšími požadavky na výkon i kvalitu paprsku, jako je například gravírování.

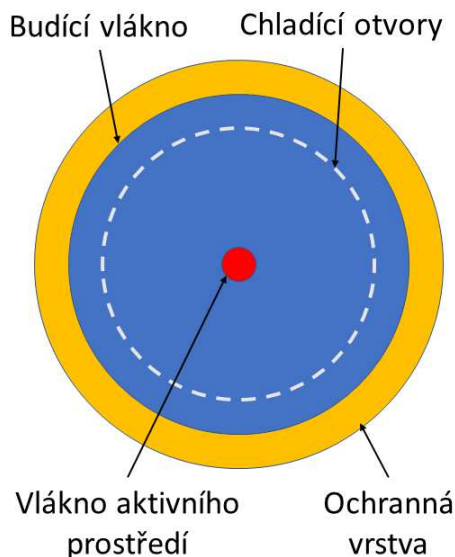
Vývojově novější je diskový laser. Aktivní prostředí Yb:YAG, tzn. vlnová délka $1,03 \mu\text{m}$ (využíváno je i Nd:YAG), je zhotoveno ve formě tenkého disku tloušťky cca $0,15 \text{ mm}$ při průměru 15 mm . Teplotní gradient je prakticky jednorozměrný, nedochází tak k degradaci kvality paprsku. Zadní strana disku je připojena k chladiči, čímž je zabezpečeno adekvátní chlazení. Čerpání probíhá pomocí laserových diod a parabolického zrcadla, které přivádí na disk čerpací záření a umožňuje jeho násobný průchod aktivním prostředím vedoucí k zvýšení účinnosti. Diskové lasery dosahují velmi dobré kvality paprsku.

Kontinuálně dosažitelný výkon při zachování kvality paprsku činí asi $0,5 \text{ kW}$ na jeden disk, pro dosažení vyšších výkonů se moduly spojují do větších celků (obr. 12). Prakticky lze získat výkon až 4 kW z jednoho disku, avšak za cenu multimodálnosti výsledného paprsku – celkový výkon až 16 kW . Diskové lasery jsou dobře zavedenou a stále používanou technologií využívanou pro dělení i svařování. Díky vysokým energiím dosahovaným v pulzním režimu jsou také vhodné pro mikroobrábění.



Obr. 12: Sestava čtyř diskových laserů [27]

Nejmodernějším pevnolátkovým druhem laseru je vláknový, často také zvaný fiber laser. Aktivní prostředí je ve formě optického vlákna, dopovaného obvykle neodymem nebo ytterbiem, jehož průměr se pohybuje zhruba v rozmezí $0,05\text{--}0,3 \text{ mm}$. Vlnová délka (u nejběžnějších dopovaných Yb) činí $1,07 \mu\text{m}$. Buzení je prováděno pomocí koaxiálního vnějšího vlákna, ke kterému jsou připojeny prostřednictvím optických spojek diodové budící lasery. Povrch je potažen pro dosažení požadovaných mechanických vlastností a ochranu plastem (obr. 13). Vláknové aktivního prostředí bývá dlouhé řádově desítky metrů, na jeho koncích jsou zhotoveny oblasti s měnícím se indexem lomu, tzv. Braggovské mřížky, sloužící jako koncová zrcadla. Na toto vlákno se následně napojuje výstupní vlákno pro přenos záření do místa využití (obr. 14).

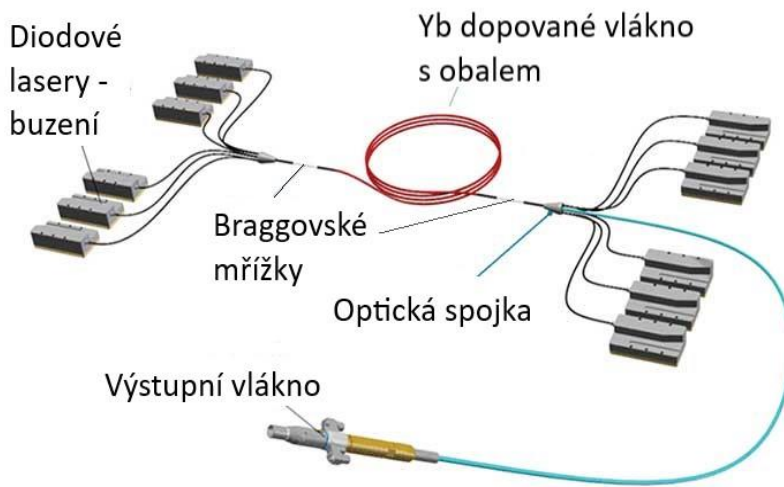


Obr. 13: Příčný řez vláknem [24]

Díky velmi tenkému vláknové aktivního prostředí je dosahováno výborných kvalit paprsku, který je velmi rovnoběžný a má kvalitní Gaussovský mód. Navíc nedochází k ovlivňování paprsku vlivem tepelného gradientu v aktivním prostředí. Další výhodou je velká plocha pláště vlákna, která je využitelná pro chlazení, a zařízení nižších výkonů je tak možné chladit vzduchem, výkonnější zařízení jsou chlazena vodou.

Výkon paprsku získaného jedním vláknem se pohybuje zpravidla okolo 1 kW , jednotlivá vlákna lze však jednoduše spojovat a dosahovat tak požadovaného výkonu. Běžně se dodávají zařízení o výkonu až 20 kW (CW, single mode), avšak spojením modulů je možné dosahovat až výkonu 500 kW (CW, multimode). Využití takto vysokých výkonů však leží spíše v oblasti obranného průmyslu než v průmyslovém zpracování materiálů.

Účinnost vláknových laserů dosahuje až 60 %. K efektivnímu využití energie také napomáhá modulárnost zařízení, kdy výkon je možné navrhnout přesně dle konkrétní aplikace. Tyto lasery



jsou využívány pro prakticky všechny aplikace a díky svým výhodám jsou nejprodávanějším typem. Použitím nelineární optiky lze získat ze základní vlnové délky 1070 nm záření kratších vlnových délek ve viditelném spektru (532 nm nebo 355 nm) za cenu poměrně značeného snížení účinnosti. Takové zdroje obvykle pracují v PW nebo QCW režimu a jsou výhodné zejména pro zpracování materiálů s nižší absorpcí v infračervené oblasti.

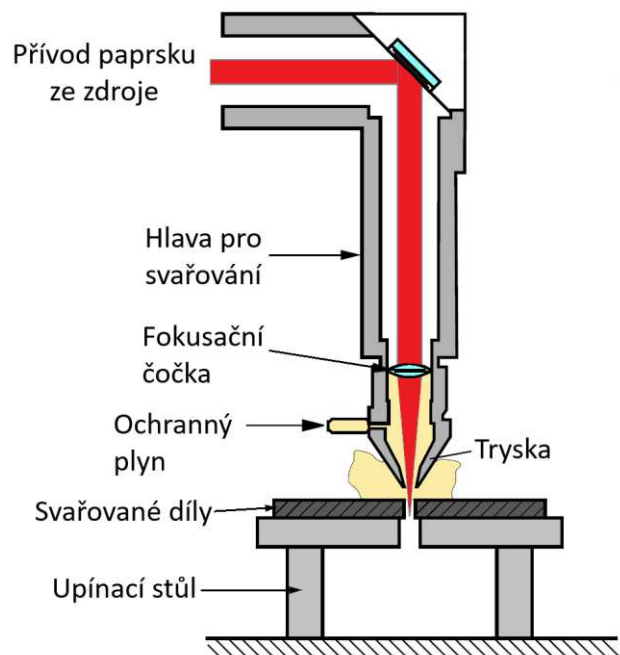
Obr. 14: Schéma vláknového laseru [28]

Další výhodou vláknových laserů je jejich vysoká životnost výrobci udávaná v řádech vyšších desítek tisíc hodin provozu při minimálních nárocích na údržbu. Kombinací výše popsaných vlastností dosahují vláknové lasery nejnižších hodinových nákladů ze všech dostupných technologií na trhu.

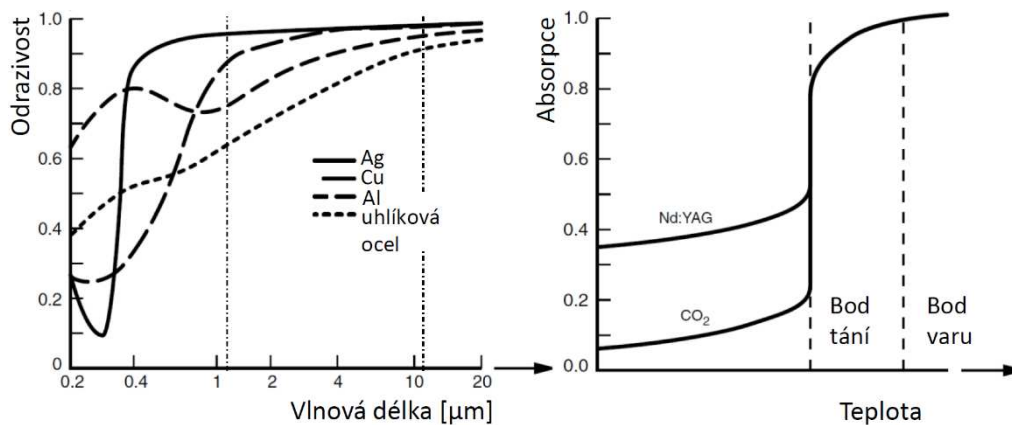
2.2 Princip svařování laserem [10], [18], [20], [21], [24], [30], [31]

Svařování laserem je dle ČSN EN ISO 4063 číselně označováno jako metoda 52 a dále se dělí na svařování pevnolátkovým laserem (521) a plynovým laserem (522). Jedná se o tavnou metodu svařování využívající k ohřevu absorpci laserového paprsku svařovaným materiálem. Díky vysoké plošné hustotě energie řádově až 10^8 W.cm^{-2} dochází k velmi rychlému lokálnímu ohřevu, což minimalizuje velikost tepelně ovlivněné oblasti. Svařování zpravidla probíhá bez přídavného materiálu v atmosféře ochranného plynu, přiváděného tryskou svařovací hlavy (obr. 15) nebo přídavným zařízením, který chrání tavnou lázeň před oxidací. Existují ale i varianty laserového svařování, které ochranný plyn nevyužívají.

Důležitou materiálovou vlastností při svařování laserem je absorpce. Její hodnota vyjadřuje část záření pohlcenou materiálem vůči celkovému záření. S rostoucí absorpcí roste i účinnost přenosu energie do oblasti svaru. Podobným ukazatelem je odrazivost, která udává odraženou část energie paprsku. Absorpce je závislá na mnoha faktorech. Mezi hlavní patří vlnová délka záření (obr. 16 vlevo), drsnost povrchu a teplota (obr. 16 vpravo).



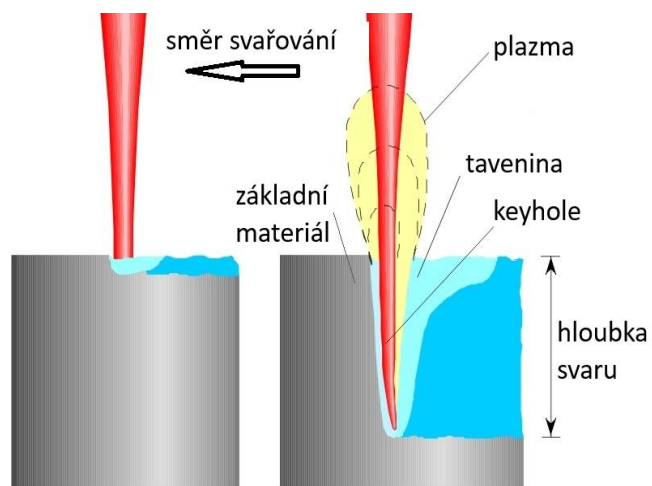
Obr. 15: Schéma laserového svařování [20]



Obr. 16: Vliv vlnové délky a teploty na odrazivost a absorpci [20]

V případě nevyhovujících hodnot je možné absorpci zvýšit například předeřevem materiálu, zdrsněním povrchu nebo povrchovou úpravou. Díky vyšší absorpci záření jsou pro svařování kovů vhodnější pevnolátkové lasery, pracující v krátkovlnné infračervené oblasti případně viditelném světle než CO₂ s dlouhovlnným zářením.

Z pohledu účinku záření na svařovaný materiál se rozlišuje svařování kondukční (obr. 17 vlevo) a penetrační (hluboké průvarové) (obr. 17 vpravo). Kondukční režim nastává při hodnotách hustoty výkonu nižších než řádově $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Povrch materiálu je ohříván do tekutého stavu, avšak jeho vypařování je minimální. Vzniklé teplo se dále šíří prostřednictvím vedení a proudění taveniny. Výsledkem je poměrně široký svar (štíhlostní poměr 3:1) s poměrně velkou tepelně ovlivněnou oblastí. Využito je asi 20 % energie záření. Tento režim se využívá například pro svařování folií a tenkých plechů.



Obr. 17: Režimy svařování laserem [18]

Při vyšších hustotách výkonu dochází po roztavení základního materiálu v důsledku pomalého odvodu tepla k intenzivnímu ohřevu a následnému vypařování kovu ze svarové lázně. Vzniká obláček par (plazmatu), který vytváří otevřenou dutinu většího průměru, než je průměr ohniska, tzv. keyhole, a umožňuje průnik paprsku do větších hloubek. V této dutině navíc dochází k mnohonásobným odrazům paprsku, což značně zvyšuje absorpci záření. Materiál roztavený na náběžné straně paprsku obtéká keyhole a za paprskem vytváří svarovou lázeň. Stabilita keyhole je závislá zejména na těchto faktorech: povrchovém napětí na rozhraní taveniny a par kovu, hydrostatickém tlaku taveniny a hydrodynamických silách. Vzniká svar s velkým štíhlostním poměrem až 10:1 a velmi úzkou tepelně ovlivněnou oblastí.

Při penetračním svařování je obvykle používána ochrana proti oxidaci svaru inertním plynem. U CO₂ laserů je kromě ochrany svaru zásadní také funkce odstraňování a ředění přebytečného plazmatu, které by mohlo bránit průchodu záření do materiálu. Při použití pevnolátkových laserů však není absorpce záření v parách kovu podstatným jevem a plyn plní funkci především ochrannou. Běžně se užívají průtoky 5-30 l/min v závislosti na výkonu laseru, rychlosti svařování a materiálu. Při vyšších průtocích může docházet k vyfukování taveniny ze svarové lázně. Nejčastěji používaným plynem je argon, který dobře formuje svarovou lázeň,

díky čemuž vzniká svar s kvalitním povrchem. Druhým používaným plynem je helium, které zvyšuje hloubku průvaru při vyšších výkonech, avšak je drahé. Ochranný plyn zároveň částečně chrání fokusační optiku svařovací hlavy před případným rozstříkáním a kondenzací par kovu.

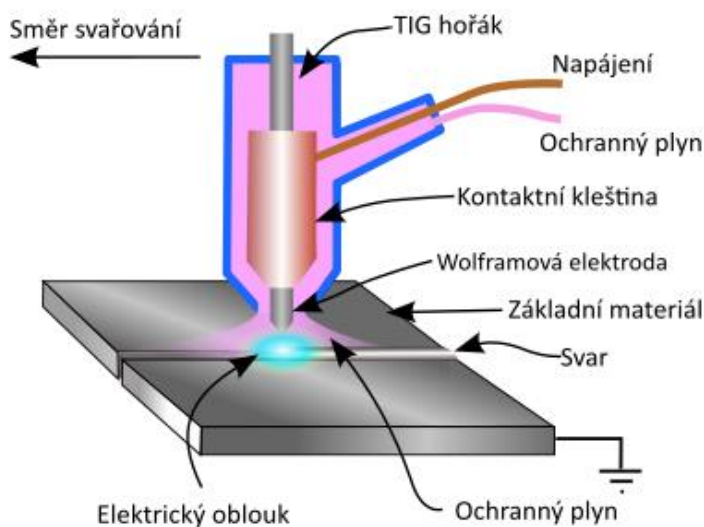
Důležitou podmínkou pro kvalitní svaření je příprava a upnutí jednotlivých svařovaných dílů tak, aby co nejvíce doléhaly (běžně uváděná přípustná mezera mezi díly činí max. 0,1-0,2 mm), jinak hrozí vznik vad v důsledku nedostatku materiálu. Zejména u svařování tzv. natupo je vzhledem k malému průměru paprsku nutné přesné polohování tak, aby byla dodržena symetrická pozice paprsku vůči linii svaru. Je také možné zhotovovat koutové a průvarové svary (překládané a T spoje).

Pro svařování může být použit jak kontinuální, tak pulzní režim provozu laseru. Pulzní režim poskytuje vyšší hloubky průvaru a svařovací rychlost při nižším průměrném výkonu laseru než CW režim. Důležitá je volba frekvence opakování pulzů, neboť může způsobovat vznik většího množství porozity než kontinuální režim.

Mezi zásadní výhody laserového svařování patří vysoký štíhlostní poměr u penetračního svařování a minimální velikost tepelně ovlivněné oblasti. Dále velké množství materiálů, které lze s úspěchem svařovat a vhodnost i pro heterogenní spoje. Ekonomičnosti procesu přispívá vysoká svařovací rychlosti, možnost svařování bez přídavného materiálu a snadná automatizovatelnost procesu. Nevýhodami jsou zejména poměrně vysoké náklady na pořízení zařízení a nutnost zabezpečit prostor proti ohrožení zdravím odraženým laserovým zářením.

2.3 TIG svařování [10], [24], [30], [32], [34]

Jedná se o obloukovou metodu svařování netavící se wolframovou elektrodou v ochranném plynu, dle ČSN EN ISO 4063 metoda 141, často je také označováno zkratkou GTAW. Teplo vzniká hořením oblouku mezi základním materiálem a elektrodou (obr. 18). Ochrana svarového kovu je realizována pomocí inertního plynu velmi vysoké čistoty přiváděného do místa svarové lázně. Proces může probíhat s i bez přídavného materiálu.



Obr. 18: Schéma svařování TIG [33]

vysokofrekvenčního výboje, který vytváří počáteční kanál ionizovaného plynu. U moderních invertorových zdrojů, které jsou jako jediné využívány pro svařování touto metodou se používá přednostně druhého způsobu zapalování oblouku. Běžně dostupné zdroje a hořáky jsou schopné pracovat s proudy zhruba 20 – 500 A, pro větší proudy od zhruba 150 A se používá vodního chlazení hořáků, hořáky pro malé proudy jsou chlazeny proudem plynu. Při využití pulzního proudu lze svařovat materiály již od tloušťky 0,2 mm.

Oblouk může být napájen jak střídavým, tak stejnosměrným proudem při přímé i nepřímé polaritě. Nepřímá polarita a střídavý proud se používají zejména pro svařování lehkých kovů z důvodu čistícího efektu. Pro svařování ocelových materiálů se nejčastěji využívá přímé polarity stejnosměrného napětí (elektroda je připojena na záporný pól zdroje). Většina tepla je vytvářena v tzv. anodové skvrně na povrchu svařovaného materiálu a elektroda je méně zatížena teplem, v důsledku čeho má delší životnost. Zapálení oblouku může probíhat buďto kontaktně, nebo pomocí

Nejčastěji používaným ochranným plynem je argon, jedná se o inertní plyn. Jeho předností je poměrně nízká ionizační energie a tepelná kapacita, což umožňuje snadné zapálení oblouku a jeho vysokou stabilitu. Vzhledem k vyšší hustotě, než je hustota vzduchu, dobře chrání svarový kov i při nižších průtocích. Běžně se využívá v čistotě 4.5 (99,995 %), pro speciální aplikace i 4.8 nebo 5.0.

Druhým používaným plynem je helium. Také se jedná o inertní plyn, oproti argonu má však výrazně vyšší ionizační energii a tepelnou vodivost, proto se při jeho použití hůře zapaluje oblouk, který je méně stabilní při větších délkách. Výhodou je však vyšší přenos tepla obloukem, takže je vhodné pro použití při svařování materiálů s vyšší tepelnou vodivostí a větších tloušťkách. Vzhledem k jeho nízké hustotě rychle stoupá z místa svaru, je tak nutné ho přivádět ve větším množství. Nevýhodou oproti argonu je také jeho vyšší cena. Nejčastěji se používá pro svařování hliníku a mědi ve směsích s argonem pro snížení ceny.

Dále lze využívat směsi s vodíkem, který zvyšuje přenos tepla obloukem, avšak u chrom-niklových feritických a martenzitických ocelí způsobuje praskavost za studena a u hliníku pórovitost. Přenos tepla zvyšuje i dusík, který se využívá zejména pro slitiny mědi.

Svařování metodou TIG se vyznačuje dobrou ochranou svarové lázně a jejího okolí před oxidací a také dobrou ochranou proti propalu legujících prvků. Zároveň příznivě formuje kořen i hlavu svaru, výsledkem jsou pohledové svary (obr. 19) vysokých kvalit. Při ručním svařování je kladen vysoký důraz na zručnost svářeče – zejména dodržení čistoty okolí svaru. Je možné také využít automatizovaného vedení hořáku a podavače drátu. Využívá se pro svařování vysokolegovaných ocelí,



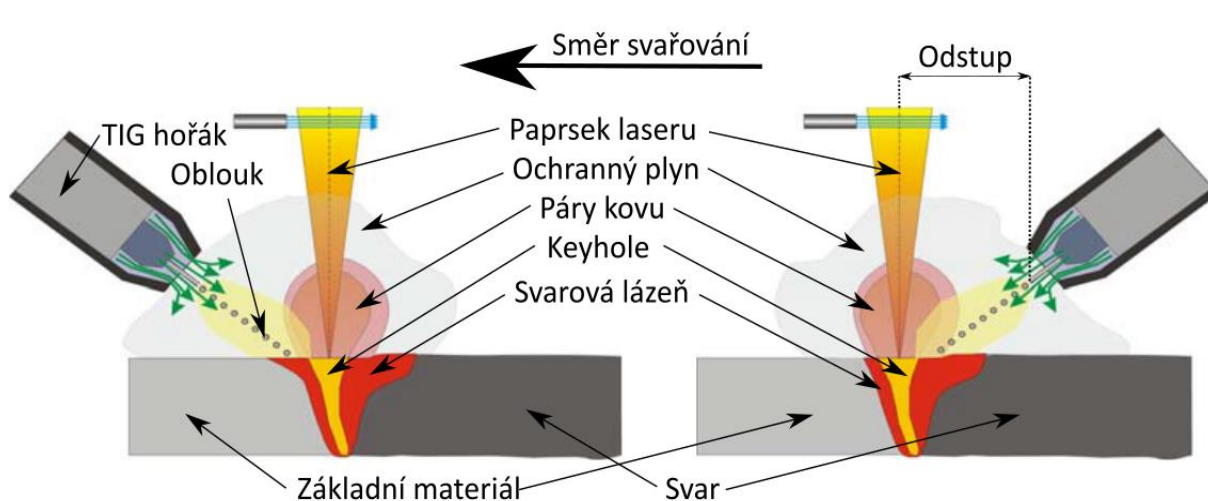
Obr. 19: Svar korozivzdorné oceli metodou TIG [35]

žáruvzdorných a žárupevných ocelí v energetice, chemickém, potravinářském i farmaceutickém průmyslu. Dále i pro svařování slitin titanu či hliníku v oblasti letecké a kosmické techniky. Pro svařování konstrukčních ocelí je sice tuto metodu s úspěchem možné použít také, avšak vzhledem k poměrně nízké rychlosti svařování není tato možnost obvykle ekonomicky výhodná.

2.4 Hybridní svařování laser-TIG [10], [20], [24], [30], [36], [37]

Laserovým hybridním svařováním se rozumí využití kombinace laseru a obloukové technologie v jedné svarové lázni s cílem potlačit nedostatky a využít pozitiva obou technologií. Nejčastější jsou kombinace laseru s MIG/MAG, případně TIG, existují však i varianty s využitím technologií svařování plazmou nebo pod tavidlem. V případě kombinace s technologií MIG se obvykle používá označení LAMIG (LAGMAW), při kombinaci s TIG svařováním LATIG nebo LAGTAW. Dále se rozlišuje svařování s vedoucí obloukovou technologií (leading arc, obr. 20 vlevo) a s vedoucím laserem (leading laser, obr. 20 vpravo) podle metody, která je první ve směru svařování.

Hlavním zdrojem tepla při svařování LATIG je laser, TIG slouží jako pomocný zdroj tepla. Při jejich kombinaci dochází k vzájemné interakci, oblouk se přimyká k laserovému paprsku a interakcí s parami kovu zvyšuje absorpci záření uvnitř keyhole. Páry kovu snižují potřebnou

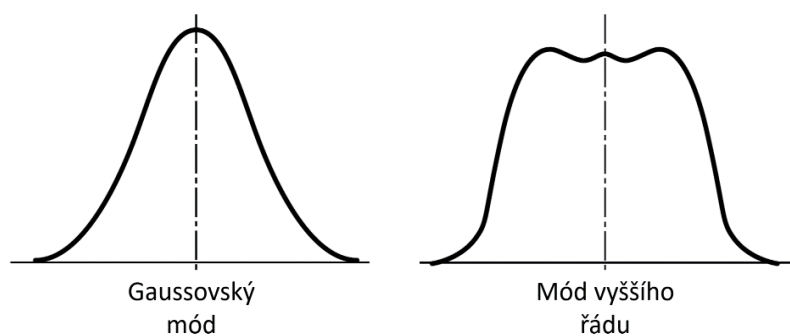


Obr. 20: Možnosti svařování LATIG [36]

ionizační energii, což vede k poklesu napětí na oblouku a jeho stabilizaci, jinak by byl oblouk zejména při malých proudech vzhledem k vysokým svařovacím rychlostem nestabilní. Kromě zvýšení svařovací rychlosti je hybridního svařování využito k úpravě tepelného cyklu, tedy jako předehřev nebo dohřev. Při použití oblouku jako druhého zdroje ve směru svařování je výsledkem lépe vypadající a hladší svarová housenka.

Vzhledem ke kombinaci metod vstupuje do procesu celá řada procesních parametrů. První skupinou jsou parametry obloukové technologie. Zásadní parametry při použití TIG technologie jsou proud a napětí na oblouku, které mají přímý vliv na vnesené teplo. Za další parametry je možné považovat typ a polaritu napájení.

Druhou skupinou jsou parametry laserového zdroje. Vnesené teplo je ovlivňováno zejména režimem provozu a výkonem laseru. Dalšími parametry jsou pozice ohniska, která je obvykle volena pod vrchním povrchem materiálu a také průměr paprsku (ovlivňuje hustotu výkonu), s kterým je spojen tzv. beam product parameter (BPP), který udává rozbíhavost paprsku. Mód paprsku charakterizuje rozložení energie v ploše (obr. 21), Gaussovský mód (ozn. TEM_{00})



Obr. 21: Řez rozložením energie v paprsku - módem [20]

poskytuje svary vyššího štíhlostního poměru, módy vyšších řádů umožňují snížit nároky na přesnost slícování jednotlivých dílů na úkor hloubky průvaru. Za parametr lze považovat i vlnovou délku, ačkoli ta je většinou dána dostupným zařízením. Značný vliv na svar má také volba ochranného plynu.

Třetí skupinou jsou parametry hybridního svařování. Geometrické uspořádání je charakterizováno odstupem elektrody od paprsku laseru, vzdáleností elektrody od svařovaného materiálu a pozicí hořáku vůči paprsku. Jako u většiny metod je i u LATIG svařování významným parametrem svařovací rychlost (zpravidla udávaná v $mm \cdot s^{-1}$), která značně ovlivňuje vnesené teplo a hloubku průvaru. Její hodnoty se pohybují v širokém rozsahu od jednotek do desítek až stovek $mm \cdot s^{-1}$ v závislosti na svařovaném materiálu, výkonu laseru a požadované hloubce svaru. Například korozivzdorná ocel tl. 3 mm je svařována rychlostí $50 \text{ mm} \cdot s^{-1}$ při výkonu laseru 4 kW a proudu 165 A, což je více než trojnásobek oproti použití samotného laseru.

3 SVAŘOVANÝ MATERIÁL [38], [39], [40], [41], [42], [43], [45]

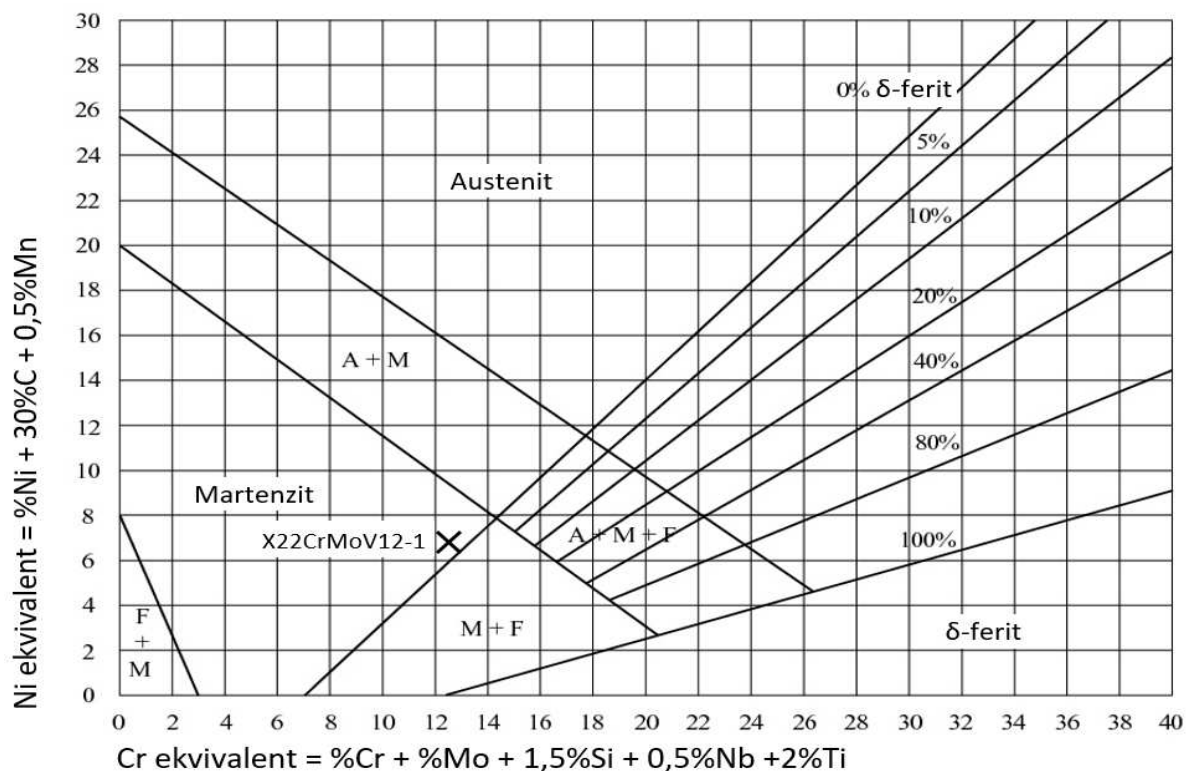
X22CrMoV12-1, (dle ČSN EN 10088-1), číselným označením 1.4923 je martenzitická korozivzdorná ocel odolná proti creepu. Tato žárupevná ocel patří k vývojově starším typům (s počátkem výroby v 60. letech minulého století), používána je pro teploty do cca 580 °C a tlaky do 29 MPa. Jedná se o méně náročné aplikace z pohledu zatížení teplotou a tlakem než pro moderní oceli jako např. P91/P92, které mají vyšší creepovou odolnost, avšak za cenu horší korozní odolnosti a horších vlastností při zpracování za tepla. Využívána je především v energetickém průmyslu na výměníky tepla, přehříváky a také části turbín. V tabulce č. 2 je uvedeno její chemické složení a vybrané mechanické parametry. Na obrázku č. 22 je zobrazen Schaefflerův diagram s vyznačením materiálu.

Tab. 2: Chemické složení a mechanické vlastnosti [39], skutečnost dle příloh 1 a 2

X22CrMoV12-1+QT2 (1.4923)									
	C	Cr	Mo	V	Si	Ni	Mn	P	S
min. %	0,18	11	0,8	0,25		0,3	0,4		
max. %	0,24	12,5	1,2	0,35	0,50	0,8	0,9	0,025	0,015
skutečnost	0,21	11,3	0,85	0,28	0,22	0,61	0,61	0,014	0,004
	R _m [MPa]		R _{p0,2} [MPa]		A [%]		KV [J]		
dle normy	900-1050		700		min. 11		20		
skutečnost	986		830		17		32		

Přípona +QT2 znamená kaleno, popuštěno. Kalení probíhá z teploty 1020–1070 °C na vzduchu nebo do oleje, popuštění minimálně 2 hodiny při teplotě 660–720 °C. Struktura se skládá z matrice popuštěného martenzitu, žárupevnost je zajištěna hlavně precipitáty M₂₃C₆,

Schaefflerův diagram



Obr. 22: Schaefflerův diagram [44]

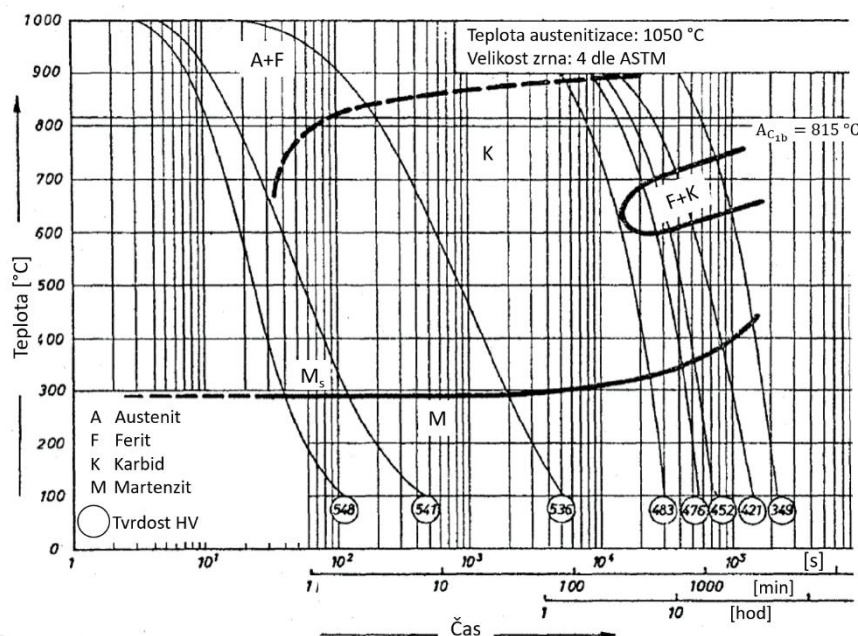
případně karbonitridy (nitridy) MX, které zabraňují pohybu dislokací a hranicím zrn. V některých případech může být přítomen ve struktuře δ -ferit, který je považován za nežádoucí.

V průběhu životnosti součástí dochází vlivem zvýšených teplot ke změnám morfologie a mikrostruktury precipitátů, což vede ke snížení mechanických vlastností a ztrátě creepové odolnosti. Hlavním precipitátem při provozní teplotě je tzv. Lavesova fáze, která nepřispívá k precipitačnímu zpevnění a dochází u ní k výraznému hrubnutí, tedy degradaci vlastností.

3.1 Svařitelnost [10], [39], [41], [42], [46], [47], [48], [49], [50], [52]

Svařitelnost je komplexní charakteristikou materiálu, vyjadřující jeho schopnost poskytovat svary požadovaných vlastností za daných technologických podmínek. Norma ČSN EN 1011-2 řadí mezi faktory ovlivňující svařitelnost návrh spoje, houževnatost a tvrdost TOO, korozi a různé druhy praskání. Zásadním faktorem je samotná technologie svařování a je nutné hodnotit svařitelnost konkrétního materiálu při použití konkrétní technologie.

Martenzitické žárupevné oceli jsou v praxi běžně svařovány, avšak pro dosažení požadované kvality spojů je nutné přesné dodržení předepsaných postupů. Obtížnost svařování těchto ocelí



Obr. 23: ARA diagram X22CrMoV12-1 [50]

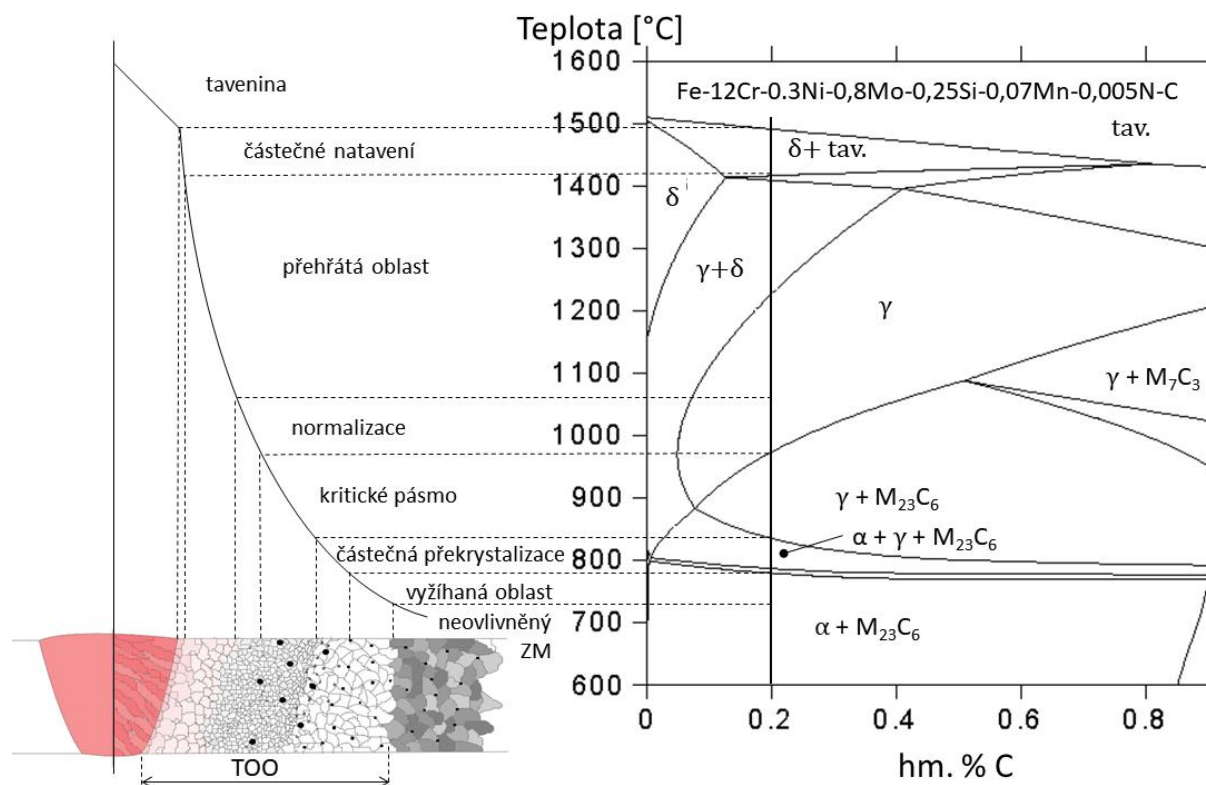
pramení z vysokého obsahu legur, v jehož důsledku dochází ke vzniku martenzitické struktury za většiny podmínek ochlazování, viz ARA diagram oceli X22CrMoV12-1 na obrázku č. 23. Výsledkem je vysoká tvrdost svaru a nízká vrubová houževnatost v tepelně ovlivněné oblasti. Nejčastějším problémem při svařování martenzitických ocelí jsou trhliny za studena a vysoká vnitřní pnutí ve svaru.

Prvním opatřením při svařování martenzitických materiálů je maximální omezení zdrojů difúzního vodíku, který vede ke vzniku zmiňovaných studených trhlin. Z tohoto důvodu je důležité přesušení přídavných materiálů a tavidel. Dalším zdrojem vodíku ve svarovém kovu je okolní atmosféra, případně kontaminace ochranných plynů. Druhým opatřením je pak předepsání a dodržování vhodného tepelného režimu – tedy teploty předehřevu (T_p), interpass (T_i) a případně dohřev. Jejich aplikace vede k umožnění difúze vodíku a také zrovnomnění vnitřních pnutí ve svaru, což omezuje zmiňované trhliny za studena. Norma ČSN EN 1011-3 v příloze D doporučuje ihned po svaření zařadit žihání, případně kompletní tepelné zpracování. Zpravidla se volí dvojí žihání k odstranění poměrně vysokých obsahů zbytkového austenitu.

Teplota předehřevu a interpass se stanovuje dle dvou metodik. První je tzv. austenitická – tedy T_p i T_i nad teplotou M_s , v případě oceli X22CrMoV12-1 cca 350 °C. V současnosti je preferována tzv. martenzitická metoda, kdy T_p i T_i jsou asi o 100 °C nižší než teplota M_s , tedy okolo 200 °C (maximální T_i je v ČSN EN 1011-2 doporučována 300 °C). V případě tloušťky materiálu do 8 mm lze snížit teplotu předehřevu na 150 °C. Důležité je však použití technologie

s velmi nízkým obsahem vodíku. Vzhledem k vysokému množství legujících prvků, hlavně Cr, není možné stanovit teplotu předehřevu pomocí výpočtu.

Kromě výše zmiňovaných trhlin za studena mají martenzitické oceli poměrně velkou vrubovou citlivost, je tedy vhodné při přípravě svarových ploch omezit možné vruby na minimum. Řádově méně častým problémem při svařování těchto materiálů jsou trhliny za horka a křehnutí vlivem σ -fáze. Nejkritičtější z pohledu struktury materiálu je rozsah teplot cca 820–1000 °C, ve kterém dochází k sferoidizaci a hrubnutí precipitátů, což vede ke zhoršení mechanických vlastností, zejména creepové odolnosti. Jednotlivá pásma TOO a jejich souvislost s rovnovážným diagramem jsou na obrázku č. 24. Při vysokých rychlostech ochlazování jsou však tyto pásma spíše orientační, neboť se nejedná o rovnovážný děj.



Obr. 24: Efekt teploty na strukturu svařovaného materiálu [46], diagram [51]

Přídavné materiály lze využívat dvojího druhu. Prvním jsou austenitické, které mají vyšší rozpustnost vodíku, což snižuje náchylnost k tvorbě trhlin za studena, a vyšší houževnatost, avšak zpravidla nedosahují pevnostních charakteristik základního materiálu. Druhou skupinou jsou materiály obdobného/stejného chemického složení jako základní materiál. Tyto dosahují stejných mechanických vlastností, avšak je zpravidla nutné následně aplikovat tepelné zpracování k jejich dosažení.

Zejména teploty předehřevu a interpass uvedené ve výše zmiňovaných normách se týkají svařování elektrickým obloukem. Při svařování laserem dochází k odlišným pochodům v materiálu vzhledem k řádově vyšším rychlostem ohřevu a ochlazování (vyjádřeno například parametrem $t_{8/5}$ [s]) a nižšímu vnesenému teplu. Norma zabývající se svařováním laserovým paprskem (ČSN EN 1011-6) uvádí, že při vhodné volbě parametrů je dosahováno svarů, u kterých dochází pouze k minimálnímu ovlivnění okolního materiálu a TOO se prakticky nevyskytuje v tradičním slova smyslu, avšak za cenu zvýšené tvrdosti svarového kovu. U žárupevných ocelí je uvedeno, že lze svařovat i bez předehřevu a používat bez dalšího tepelného zpracování. U precipitačně zpevněných ocelí může docházet ke snížení pevnostních vlastností ve svaru oproti základnímu materiálu a v případě nutnosti je možno provést opětovné tepelné zpracování.

3.2 Vady svaru [10], [20], [32], [46], [47], [53], [54]

Vady svaru jsou běžnou součástí svařovacího procesu. V principu jsou nežádoucí, neboť mohou negativně ovlivňovat pevnost a spolehlivost součástí při jejich provozu, protože jsou obvykle místem iniciace lomu. Důležité je stanovit kritéria pro jejich hodnocení a rozlišení jejich přípustnosti pro danou součást. U opravitelných vad je také nutné stanovit postup opravy tak, aby nedošlo k degradaci okolního materiálu. Důležitým faktorem při posuzování vad je jejich umístění a případný efekt na rozložení napětí v materiálu.

Vady svaru vznikající při hybridním svařování popisuje norma ČSN EN ISO 12932, která je použitelná pro oceli, nikl a jeho slitiny od tloušťky 0,5 mm, na základě normy ČSN EN ISO 6520-1. Svary rozděluje do tří stupňů kvality označených písmeny B, C, D, kde B jsou svary s nejvyšší požadovanou kvalitou, stupeň D svary s nejnižšími nároky na kvalitu. K těmto stupňům dále přiřazuje kritéria přípustnosti jednotlivých vad, včetně jejich mezních hodnot.

Vady lze dělit mnoha způsoby. Možné je například dělení dle geometrie vady na plošné a objemové, či dle původu vzniku na metalurgické a spjaté s procesem svařování. Další možné rozdělení uvádí norma ČSN EN ISO 12932. Jednotlivé vady svaru jsou rozřazeny do kategorií a je jim přiřazeno referenční číslo z ČSN EN ISO 6520-1 pro snazší orientaci. Kategorie jednotlivých vad dle výše zmíněné normy jsou uvedeny v tabulce č. 3. Dále se rozlišují vady krátké a dlouhé. Jako krátká vada se (zjednodušeně) určují vady, jejichž součet délky nepřesahuje 25 % délky svaru.

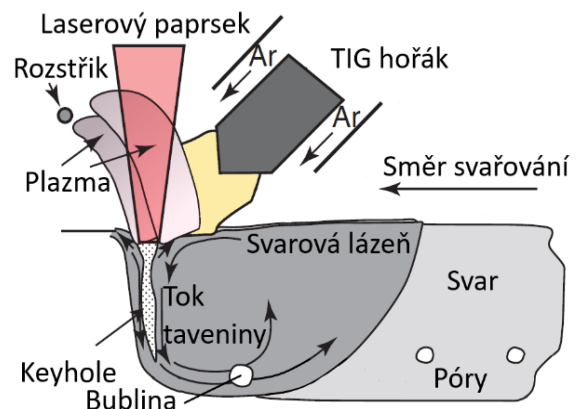
Tab. 3: Dělení vad dle ČSN EN ISO 12932 [53]

Číslo skupiny	Vady
1	Povrchové vady
2	Vnitřní vady
3	Vady v geometrii spoje
4	Vícenásobné vady

Do první skupiny patří vady, které se projevují na povrchu materiálu, tedy zejména trhliny, póry otevřené na povrch, koncové staženiny, vady kořene, chybné velikosti svaru, zápaly a nadměrné převýšení svarů. Druhá skupina obsahuje zejména trhliny, různé druhy pórů, staženiny, vměstky, studené spoje a neprůvary. Do třetí skupiny spadají vady typu přesazení či špatného sestavení dílců u koutových svarů. Čtvrtá skupina vad je kombinací tří výše zmíněných. Dělení vad se liší dle potřeb jednotlivých norem a je uzpůsobeno konkrétnímu procesu svařování.

Jednou z nejčastějších vad při laserovém (i LATIG) svařování je porozita. První příčinou je změna rozpustnosti plynů ve svarovém kovu, kdy rozpustnost v tuhé fázi je zpravidla řádově nižší než v tavenině a přebytečný plyn se vyloučí právě ve formě pórů. Hlavním zdrojem plynů je především kontaminace povrchu (oleje, barvy, oxidy, vlhkost), případně nečistoty v ochranném plynu nebo atmosféra okolního prostředí.

Druhou příčinou porozity jsou dynamické děje v okolí keyhole (schematicky na obr. 25), jako je například tok taveniny ve svarové lázni nebo změna velikosti keyhole. Celý proces vzniku je poměrně komplikovaný, dochází také ke spojování jednotlivých bublin do větších. Výsledky testů ukazují, že množství pórů klesá se zvyšující se rychlostí svařování a klesajícím výkonem laseru.



Obr. 25: Vznik porozity vlivem keyhole [32]

Z pohledu rizik při provozu svařovaných dílů jsou trhliny nebezpečnější vadou než porozita. Na základě teplot a mechanismu jejich vzniku se zpravidla rozlišují trhliny vznikající za horka, tedy krystalizační, likvační a polygonizační. Dále mohou vznikat lamelární, vznikající vlivem

namáhání ve směru tloušťky plechu, a žíhací trhliny, způsobené napětím při větších rychlostech ohřevu. Posledním typem trhlin jsou studené trhliny indukované vodíkem.

Trhliny za horka se objevují zpravidla ihned, nebo v krátkém časovém úseku, po přechodu teploty likvidu. Polygonizační trhliny jsou problémem především austenitický ocelí a niklových slitin. Vznikají v důsledku poklesu tažnosti ve svarovém kovu nebo tepelně ovlivněné oblasti. Likvační trhliny se vytváří zpravidla v oblasti částečného natavení nebo přehřáté zóny v důsledku vylučování intermetalických fází na hranicích zrn, kde vytváří křehké oblasti, které při zatížení iniciují lom.

Krystalizační trhliny vznikají zejména ve svarovém kovu, případně v pásmu částečného natavení, tedy v oblastech s alespoň částečným výskytem tekuté fáze. Při tuhnutí dochází k vylučování nízkotavitelných eutektik (u ocelí zejména vlivem P a S). Jejich tuhnutí probíhá jako poslední, často dochází k jejich vyloučení zhruba uprostřed svaru (obr. 26), kde je obvykle nejvyšší teplota. Vzhledem k působení vysokých teplot je lze poznat dle zoxidovaného povrchu uvnitř trhliny. Prevencí jejich vzniku ve slitinách železa je maximální snížení obsahu fosforu a síry, případně zvýšení obsahu manganu, který tvoří se sírou eutektikum s vyšší teplotou tavení. Stejně jako u ostatních horkých trhlin je vhodným opatřením k jejich zamezení snížení vneseného tepla do svaru a obecně snížení množství tekuté fáze.



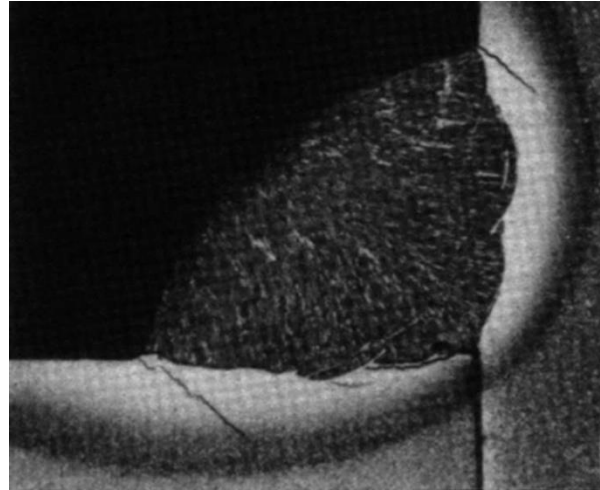
Obr. 26: Krystalizační trhliny (Al slitina) [55]

Lamelární trhliny mohou vznikat v tepelně ovlivněné oblasti i v základním materiálu u materiálů s nízkou plasticitou ve směru tloušťky a výraznou texturou, především válcovaných plechů. Názory na jejich původ se různí, mohou vznikat jednak při teplotách 200–300 °C nebo také pochody v TOO. Omezit je lze vhodnějším řešením svaru tak, aby k namáhání docházelo mimo směr tloušťky materiálu a používáním polotovarů se zaručenou kontrakcí ve směru tloušťky.

Žíhací trhliny vznikají při žíhání svařenců, případně při vícevrstevném svařování nebo také pod plošnými návary, v tomto případě se nazývají podnávarovými trhlinami. Oblastmi teplot pro jejich vznik jsou jednak teploty v rozmezí 200–300 °C, případně žíhací teploty. Lze je omezit zejména pozvolnějším ohřevem, podnávarové trhliny lze také omezit snížením vneseného tepla a použitím mezivrstev.

Velmi častým a nebezpečným typem trhlin jsou trhliny za studena indukované vodíkem, někdy také označované jako zbrzděné lomy. Dochází k nim při teplotách pod asi 150 °C v důsledku působení vodíku, vysokých vnitřních napětí a také přítomností tvrdých, křehkých struktur, jako je martenzit. Vyskytovat se mohou jak ve svarovém kovu, tak v tepelně ovlivněné oblasti. Ukázka vodíkem indukovaných lomů v tepelně ovlivněné oblasti je na obr. 27 (na další straně). Tyto trhliny mohou být příčné i podélné. Na rozdíl od přechodících druhů trhlin, které mají zpravidla interkrystalický charakter, jsou tyto lomy transkrystalické. Rozlišit je tedy lze podle lesklého, nezoxidovaného povrchu. Makroskopické lomy vznikají spojováním drobnějších trhlinek a následným uvolněním nahromaděné energie. Velkým nebezpečím je jejich vznik dlouhou dobu po dokončení svařování. Jejich prevencí je omezení

možnosti rozpouštění vodíku ve svarovém kovu ať již z nečistot v okolí svaru, nebo z okolní atmosféry. Dalším opatřením je řádné dodržování předehřevu a také případné žihání k odstranění vodíkové křehkosti při teplotách okolo 200 °C. Při laserovém svařování je obvykle výhodnější aplikovat druhý zdroj tepla ať v režimu předehřevu, nebo dohřevu, umožní se tak difuze vodíku z oblasti svaru a také sníží vnitřní pnutí.



Obr. 27: Příklad vodíkem indukovaných lomů [20]

Dle normy ČSN EN ISO 12932 jsou trhliny nepřijatelnou vadou ve svarech všech stupňů kvality a musí být opraveny nebo díly označeny jako neshodné. V případě mikroskopických trhlin viditelných pod mikroskopem je možné tuto vadu připustit po zhodnocení náchylnosti daného materiálu k šíření trhlin. Póry jsou méně závažnou vadou a ve většině případů jsou přípustné. Norma stanovuje bližší kritéria hodnocení na základě množství, velikosti a jejich rozložení ve svaru.

3.3 Zkoušení svarů [56], [57]

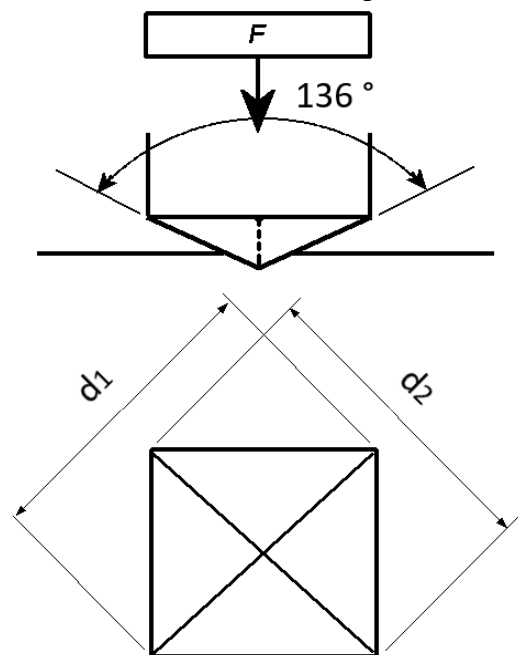
Vzhledem k velkému riziku vzniku vad při svařování jsou důležité metody pro jejich odhalení ve výrobcích před jejich uvedením do provozu tak, aby nebyla ohrožena bezpečnost a spolehlivost zařízení. V tomto hrají zásadní roli zkoušky svarů. V principu je lze rozdělit na zkoušky destruktivní (DT), při nichž dochází k porušení celistvosti výrobku a zkoušky nedestruktivní (NDT), při kterých k tomu nedochází. Ke každé zkoušce existuje zpravidla norma popisující její provedení, podmínky zkoušky a nároky na kvalifikaci personálu a také norma popisující vyhodnocení.

3.3.1 Destruktivní metody zkoušení [56], [58], [60]

Destruktivní zkoušky jsou důležitým nástrojem pro kvalifikaci postupu svařování a určení vlastností materiálů, jako jsou například mechanické vlastnosti nebo odolnost proti korozi. Mezi nejběžnější DT se řadí zkouška tvrdosti, tahová zkouška, zkouška rázem v ohybu, zkouška lámavosti a také zkoušky makro a mikrostruktury.

Zkoušky tvrdosti lze rozdělit na statické, například dle Vickerse, Rockwella, Brinella a dynamické, mezi něž se řadí Shoreho odrazová zkouška nebo Poldi kladívko. Principem zkoušky je kvantifikace odporu materiálu proti vnikání tělesa definované geometrie, případně vyhodnocení charakteristik vtisku po jeho vniknutí za určených podmínek (např. zatížení).

Nejběžnější zkouškou tvrdosti při vyhodnocování svarů je Vickersova zkouška tvrdosti (schematicky na obr. 28). Indentorem je diamantový pravidelný čtyřboký jehlan jehož protilehlé stěny svírají vrcholový úhel 136 °. Tvrdost materiálu je vypočítána na základě rozměrů úhlopříček vtisku v nezatíženém stavu. Zkouška je definována při třech rozsazích zatížení, dle kterého

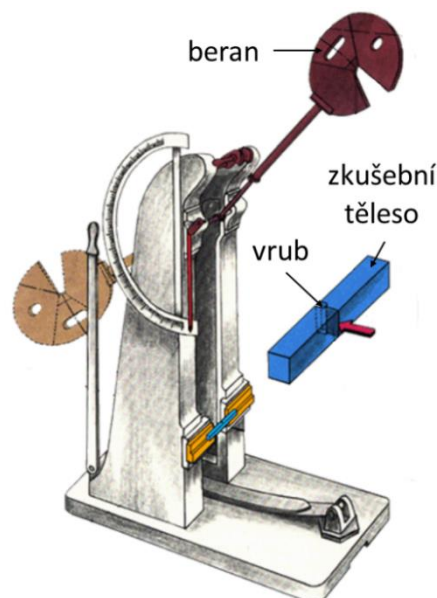


Obr. 28: Zkouška tvrdosti dle Vickerse [56]

se dělí na zkoušku tvrdosti dle Vickerse pro zatížení 49,03–980,7 N, zkoušku tvrdosti dle Vickerse při malém zatížení (1,961–49,07 N) a zkoušku mikrotvrdosti dle Vickerse (zatížení <1,961 N). Označení výsledku je ve formě např. 620 HV 1/20, kde první číslo je hodnotou tvrdosti, HV je označením zkoušky dle Vickerse, první číslo za HV vyjadřuje zkušební zatížení v kg a poslední číslo označuje dobu zatížení (v rozsahu 10–15 s se neuvádí). Při měření je důležité dodržet minimální vzdálenost jednotlivých vtisků a také vzdálenost vtisků od okraje. Pro platnost zkoušky je také důležité, aby rozměr úhlopříček patřil do intervalu 0,02–1,4 mm. Pro zkoušení svarů stanovuje podmínky norma ČSN EN 1043-1, využívá se zatížení 10 kg (HV 10), přičemž vtisky musí být voleny tak, aby byly umístěny minimálně tři ve svarovém kovu, tepelně ovlivněné oblasti i základním materiálu. V případě svarů větších tloušťek než 5 mm se zhotovují dvě řady vtisků.

Základní zkouškou pro ověření parametrů pevnosti a plasticity je tahová zkouška. Provádí se tahovým namáháním zkušebního tělesa zpravidla do přetržení, z této zkoušky je možné stanovit hodnoty meze kluzu a pevnosti v tahu, kontrakci a tažnost. Její provedení je popsáno normou ČSN EN ISO 6892, provádí se na zkušebních tyčích předepsaných rozměrů kruhového nebo obdélníkového průřezu.

Zkouška rázem v ohybu je určena ke zjišťování chování při zatěžování rázovou silou. Prováděna je pomocí Charpyho kladiva (obr. 29) na vzorcích rozměru 10 x 10 x 55 mm, pokud nelze provést výrobu takových vzorků, jsou stanoveny podmínky pro výrobu vzorků menších rozměrů, tzv. podrozměrných tyčí. Na vzorku je vytvořen vrub, který je při zkoušení umístěn proti straně dopadu kladiva. Zkušební tělesa se rozdělují podle tvaru vrubu na s vrubem ve tvaru U a s vrubem ve tvaru V. Pro zkoušení svarů je předepsán typ V, přičemž se vrub umísťuje jak do svarového kovu, tak do tepelně ovlivněné oblasti. Provedení zkoušky spočívá v přeražení zkušebního tělesa pomocí kladiva jedním rázem, vyhodnocení probíhá na základě energie spotřebované na přeražení, případně měřením bočního rozšíření. Vyhodnotit lze také procento houževnatého lomu na lomové ploše. Zkouška rázem v ohybu je definována normou ČSN EN ISO 148-1.

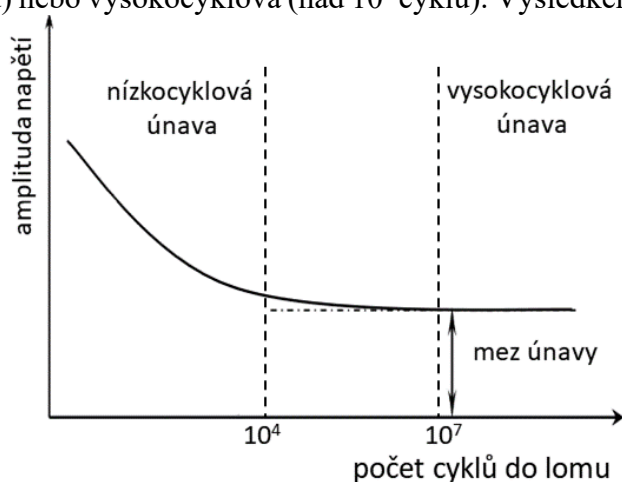


Obr. 29: Charpyho kladivo [59]

Zkouška ohybem je vhodným nástrojem ke zjišťování plastického chování materiálu. Nejčastější variantou je zkouška tříbodovým ohybem, kde se hodnotí schopnost materiálu dosáhnout požadovaného úhlu ohybu bez porušení, případně lze hodnotit typ porušení. Dále se využívá například zkouška řízeným ohybem dle ASTM.

Ke zjišťování a hodnocení struktur, případně vad ve svarovém kovu, tepelně ovlivněné oblasti i základním materiálu slouží kontrola makro a mikrostruktury. Provádí se na metalograficky připravených vzorcích odebraných ze svařence. Při kontrole makrostruktury je materiál pozorován v naleptaném i nenaleptaném stavu při malých zvětšeních (maximálně 30x), hodnotí se zejména přítomnost trhlin, porozity, vměstků a jiných vad. Dále velikost tepelně ovlivněné oblasti nebo velikost svarového kovu. Kontrola mikrostruktury probíhá při větších zvětšeních. Provádí se pomocí optických mikroskopů (zvětšení max. 1000x), případně lze použít moderní konfokální laserové mikroskopy (max. zvětšením řádově 10 000x). Největšího zvětšení lze dosáhnout pomocí elektronové mikroskopie (řádově 100 000x). Hodnotí se jednotlivé strukturální složky jak kvalitativně, tak i kvantitativně. Pomocí elektronové mikroskopie je také možné určovat složení a vlastnosti krystalové mřížky jednotlivých fází.

Pro cyklicky namáhané spoje jsou také důležité zkoušky únavové životnosti. Dle počtu cyklů se hodnotí únava nízkocyklová (do 10^4 cyklů) nebo vysokocyklová (nad 10^7 cyklů). Výsledkem těchto zkoušek je Wöhlerova křivka, (pro kovy s deformačním stárnutím viz obr. 30), která vyjadřuje závislost amplitudy napětí na počtu zatěžujících cyklů. Hodnotí se hodnota amplitudy napětí a počet cyklů, při kterém došlo k lomu, případně tzv. mez únavy udávající amplitudu napětí, při které nedojde k lomu ani při počtu opakování nad 10^7 cyklů, případně se jedná o oblast, kde Wöhlerova křivka již nemá klesající tendenci. Existují také další kritéria hodnocení, například amplituda deformace.



Obr. 30: Wöhlerova křivka [60]

3.3.2 Nedestruktivní metody zkoušení [57], [61], [62], [63], [65]

Nedestruktivní zkoušení je uplatňováno jak při kvalifikaci svařovacích postupů, tak i při další výrobě k průběžné kontrole kvality. Přehled metod nedestruktivního testování svarů a jejich použití je uveden v normě ČSN EN ISO 17635. V tabulce č. 4 jsou uvedené metody NDT a jejich zkratky dle této normy a také související normy určující bližší informace o provedení a vyhodnocení.

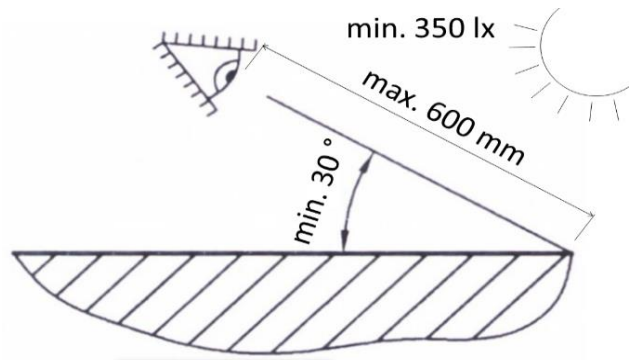
Tab. 4: Metody NDT dle ČSN EN ISO 17635 [62]

Název zkoušky	Zkratka	Technika zkoušení dle:
Vířivými proudy	ET	ČSN EN ISO 17643
Magnetická prášková	MT	ČSN EN ISO 17638
Kapilární (penetrační)	PT	ČSN EN ISO 3452-1
Radiologická	RT	ČSN EN ISO 17636
Ultrazvuková	UT	ČSN EN ISO 17604 (odrazová) ČSN EN ISO 10863 (průchodová)
Vizuální	VT	ČSN EN ISO 17637

Vizuální zkouška je základní metodou nedestruktivního zkoušení a provádí se v rámci celého procesu svařování, tedy při přípravě, vlastním svařování a po jeho dokončení i při případných opravách, a to na plochách pečlivě očištěných od případných nečistot a překážek v řádné kontrole oblasti svaru. Je využívána pro odhalení povrchových vad, například chyb při přípravě svařovacích ploch, vadných rozměrů svaru, zápalů, rozstříku, trhlin, vad kořene či chybného opracování svaru, pokud je předepsáno. Provádět ji lze jednak metodou přímou, při které nedochází k přerušení optické dráhy, tzn. pouhým okem, případně pomocí lupy. Druhá metoda je označovaná jako nepřímá, využívá zařízení přerušující optickou dráhu, tedy zejména zrcátka, endoskopy, fotografické přístroje či roboty a automatizované systémy.

Pro správné provedení vizuální zkoušky je důležité dodržet zejména minimální hodnotu osvětlení. Normou ČSN EN ISO 17637 je předepsáno minimálně 350 lx, avšak doporučeno je 500 lx, zvláště při použití ochranných brýlí. Vhodné je použití druhého světelného zdroje pro zvýraznění kontrastu. Druhou podmínkou je dodržení vzdálenosti od kontrolovaného místa maximálně 600 mm a minimálního úhlu pozorování 30° . Pokud tuto podmínku nelze splnit, například z důvodu omezeného přístupu, musí se využít nepřímé metody. Schematické

zobrazení podmínek při provádění vizuální zkoušky je na obr. 31. Důležitým předpokladem pro korektní provedení vizuální kontroly je dobrý zrak pracovníka. Pro kontrolu rozměrů svaru a jeho jednotlivých částí slouží různé měrky a pomůcky. Výhodou vizuální kontroly je její jednoduchost a obvykle instrumentální nenáročnost, avšak její výsledek je značně ovlivněn zkušeností a přístupem osoby ji provádějící.



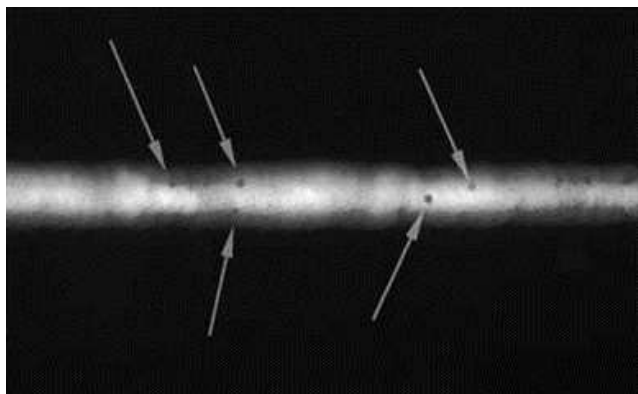
Obr. 31: Podmínky vizuální zkoušky [57]

Další metodou NDT používanou pro zjišťování povrchových vad (propojených s povrchem) je zkouška penetrační, někdy také zvaná kapilární. Jejím principem je vyplnění vady tekutinou (penetrantem), který po jeho odstranění z povrchu vlivem kapilárních jevů vzlíná na povrch dílce a indikuje tak přítomnost vady. Zkouška se skládá z pěti základních kroků. Prvně je pečlivě očištěn povrch zkoušeného dílce od nečistot a následně osušen. Následuje aplikace penetrantu a jeho působení, poté dojde k jeho omytí z povrchu. Poté je aplikována vývojka, což je zpravidla bílý prášek usnadňující rozpoznání penetrantu na povrchu dílce, může být ve formě prášku nebo rozptýlený ve vhodné kapalině. Posledním krokem je vyhodnocení zkoušky. Dle typu penetrantu je indikací vady barevná nebo fluorescenční skvrna na vývojce představující oblast, ve které se nachází vada. Její výhodou je poměrně snadné provedení pomocí finančně nenáročných pomůcek, avšak pro korektní výsledky je nutné dodržovat pečlivost ve všech fázích tak, aby nedocházelo k falešným indikacím případně neodhalení některých vad.

Ke zjišťování povrchových vad (i těsně podpovrchových) slouží magnetická prášková metoda, která je založena na změně tvaru magnetického pole ve feromagnetických látkách v okolí vad. Tato změna je zviditelněna pomocí feromagnetického prášku, který může být suchý nebo rozptýlený v kapalině. Magnetické pole ve zkoušeném výrobku je vytvářeno pomocí přiložení jádra elektromagnetu, případně přímým průchodem proudem. Výhodou jsou nižší nároky na přípravu povrchu a provedení než u penetrační zkoušky, avšak je aplikovatelná pouze na feromagnetické materiály, nikoli na austenitické oceli nebo lehké kovy. Ke zviditelnění dochází pouze u vad, které leží ve směru přibližně kolmém ke směru magnetického pole.

Zkouška vířivými proudy je používána, podobně jako předchozí jmenovaná, k detekci povrchových i blízko povrchu nacházejících se vad. Je založena na vzniku magnetického pole v okolí vady, které je indukováno procházejícím proudem. Proud ve výrobku je indukován zpravidla pomocí přiložené cívky. Zkoušení touto metodou je bezdotykové a je možné jej použít na všechny elektricky vodivé materiály. Další výhodou je možná automatizace a použití i pro nepřímé zjišťování fyzikálních charakteristik materiálu. Nevýhodou je však vyšší míra nepřesnosti ve srovnání s jinými metodami.

Radiologické metody (prozařovací) slouží pro zjišťování zejména vnitřních vad. Jejich principem je prozáření materiálu pomocí rentgenového (gama) záření a jeho záznam po průchodu zkoušeným dílem. Využívá jevu, kdy u různých materiálů dochází k různé úrovni pohlcení záření. Podle metody detekce prošlého záření se rozdělují metody radiografické (obr. 32), které zaznamenávají záření na fotografický



Obr. 32: Radiogram porézního svaru [64]

film, který je následně vyvolán, zároveň je tak pořízen doklad o stavu zkoušeného dílu. Tento způsob je stále velmi využíván i přes rozvoj digitálního pořizování snímků. Druhou metodou je radioskopie, která zobrazuje záření na stínítku (snímači), kontrolu je tak možné provádět v reálném čase.

Druhou metodou pro určování vnitřních vad je ultrazvuková kontrola. Využívá principu interakce mechanického vlnění s rozhraním a různé rychlosti šíření zvuku v daném prostředí. Podle způsobu provedení se dělí na průchodovou a odrazovou. Průchodová využívá měření intenzity procházejícího vlnění, neboť případné vady odstiňují část signálu a u které je vyžadován přístup z obou stran dílce. Pro zkoušení svarů je využívanější metoda odrazová, která využívá odrazu vlnění na rozhraní vady a materiálu. Vysílač i přijímač se umísťují na tutéž stranu dílce. Případné vady ve směru šíření vlnění jsou obtížně zaznamenatelné, proto se používají sondy úhlové, které umožňují detekci většího množství vad. Poměrně novou metodou využívanou pro zkoušení svaru je tzv. phased array, při které se zdroj ultrazvuku skládá z několika segmentů, které jsou řízeny pomocí elektroniky. Výsledné vlnění je možné směřovat a výsledkem je přesnější určení velikosti a místa vady, která je navíc zobrazena v obrazové formě pro její snadnější identifikaci. Výhodou ultrazvukového zkoušení je možnost určení hloubky vady.

4 VLIV PROCESNÍCH PARAMETRŮ NA VLASTNOSTI SVAROVÉHO SPOJE

Pro vlastní experiment byl dodán materiál ve formě dvou hranolů 150 x 44 x 32 mm, z nichž byly zhotoveny pomocí elektroerozivního obrábění destičky o rozměrech 150 x 32 x 5 mm. Tato metoda dělení byla zvolena z důvodu úspory materiálu, využití konvenčních metod dělení

(např. frézka) by vedlo k velké ztrátě materiálu prořezem, případně by nebyla dosažena přiměřená drsnost povrchu. Na obrázku 33 nahoře je vzorek po dělení, dole pak po očištění vrstvy oxidů. Skutečné složení materiálu je uvedeno v tabulce č. 2 na straně 22 a odpovídá složením normou určeným hodnotám.



Obr. 33: Vzorky po dělení

Vlastní svařování probíhalo v prostorách Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky na pracovišti výkonových laserů, které je vybaveno vláknovým laserem IPG YLS-2000. Jedná se o vláknový ytterbiový laser o maximálním výkonu 2 kW, pracující na vlnové délce 1070 nm, výrobce IPG Photonics. Maximálního výkonu je dosaženo spojením 4 modulů, každý s výkonem až 500 W. Jako zdroje elektrického proudu pro TIG hořák bylo využito invertorového zdroje MagicWave 1700 Job od firmy Fronius.

Polohování je řešeno pomocí robotického ramene IRB 2400, výrobce ABB, jehož pracovní rozsah činí asi 1600 mm, maximální rychlost pohybu do 10 m/min. Upínání dílů je řešeno pomocí stolu umožňujícího snadné upnutí pomocí upínek nebo přípravků. K dispozici je také dvouosé rotační polohovadlo. Pracovní prostor robotu a polohovadla je na obr. 34.

Na tomto pracovišti je možné provádět svařování plochých i tvarových dílů do max. hloubky svaru v oceli cca 5 mm, jak klasickým laserovým svařováním, tak hybridními metodami.

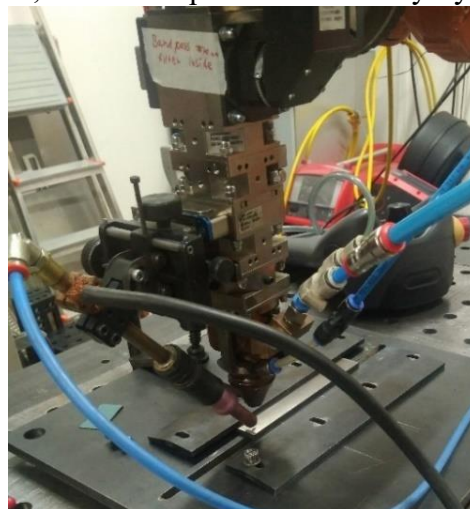
Prováděn je výzkum možností analýzy svařovacího procesu na základě charakteristik odraženého záření a chování keyhole. Je možné využít také skenovací hlavu pro svařování s rozmítáním svazku. Kromě svařování je prováděno i dělení plošného a profilového materiálu, tepelné zpracování a nově i 3D tisk kovových materiálů pomocí obloukové technologie MIG. Velmi často dochází k úzké spolupráci s průmyslem a k aplikaci laserových technologií pro konkrétní problémy z praxe.



Obr. 34: Prostor robotu

4.1 Procesní parametry při experimentu

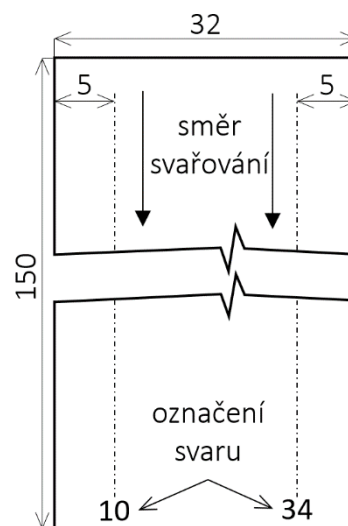
Zkoumán byl vliv svařovací rychlosti v_s (hodnoty 10 mm.s^{-1} , 20 mm.s^{-1} a 30 mm.s^{-1}) a proudu elektrického oblouku I_{TIG} v hodnotách 0 A, 40 A, 80 A. Pro porovnávací účely byl také zhotoven svar pouze technologií TIG (proud 160 A, rychlost svařování 3 mm.s^{-1}). Po dokončení svařování bylo odečteno skutečné napětí oblouku U_{TIG} ze svařovacího zdroje. Vzhledem k tloušťce materiálu 5 mm byl nastaven výkon laseru P_{las} na maximální hodnotu 2 kW, pro zvětšení průvaru bylo použito optické vlákno běžně určené pro dělení materiálů tl. $100 \mu\text{m}$ – vyšší hustota energie v důsledku zmenšení laserového spotu. Ohnisko laserového paprsku bylo nastaveno na horní povrch svařovaného materiálu. Špička elektrody TIG hořáku byla nastavena na vzdálenost 3 mm od paprsku i svařovaného materiálu. Hořák svíral s materiálem úhel asi 45° . Laserovou svařovací hlavu s upnutým hořákem TIG zobrazuje obrázek č. 35.



Obr. 35: Hlava pro svařování LATIG

Vzorky byly upnuty na jedné straně pomocí upínky, aby nedocházelo k jejich pohybu, avšak deformace materiálu omezena nebyla. Svařování probíhalo v poloze vodorovné shora (PA) do plného materiálu (tzv. bead on plate). Jako ochranný plyn byl použit argon čistoty 4.6. Před vlastním svařováním byla zkontrolována trajektorie pomocí zkušebního přejezdu a indikací paprsku pomocí červeného laseru.

Na jednotlivých destičkách byly provedeny dva svary délky 120 mm, vzdálenost svaru od okraje 5 mm (obr. 36). Před svařením každého svaru odpovídala teplota vzorku teplotě okolí. Po zhotovení byly svary označeny číslem, kdy první číslice udává rychlost svařování $v_s/10$ [mm.s^{-1}], druhá proud elektrickým obloukem $I_{TIG}/10$ [A] – např. označení „34“ znamená svařovací rychlost 30 mm.s^{-1} a proud 40 A. Souhrn parametrů pro jednotlivé svary a jejich označení je v tabulce č. 5. Hodnota Q_{inlas} označuje hodnotu vneseného tepla laserem, Q_{inTIG} hodnotu vneseného tepla metodou TIG a Q_{in} celkové vnesené teplo do svarového spoje, které byly vypočteny dle vzorců 4.1, 4.2 a 4.3.



Obr. 36: Umístění svarů na destičce

$$Q_{inlas} = \eta_{las} \cdot \frac{P}{v_s} [\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}], \quad (4.1)$$

kde: Q_{inlas} – teplo vnesené laserem,
 η_{las} – součinitel absorpce záření [-],
 P – výkon laseru [W],
 v_s – svařovací rychlost [mm.s^{-1}].

$$Q_{inTIG} = \eta_{TIG} \cdot \frac{U_{TIG} \cdot I_{TIG}}{v_s} [\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}], \quad (4.2)$$

kde: Q_{inTIG} – teplo vnesené metodou TIG,
 η_{TIG} – tepelná účinnost při svařování TIG [-],
 U_{TIG} – napětí zdroje [V],
 I_{TIG} – proud obloukem [A].

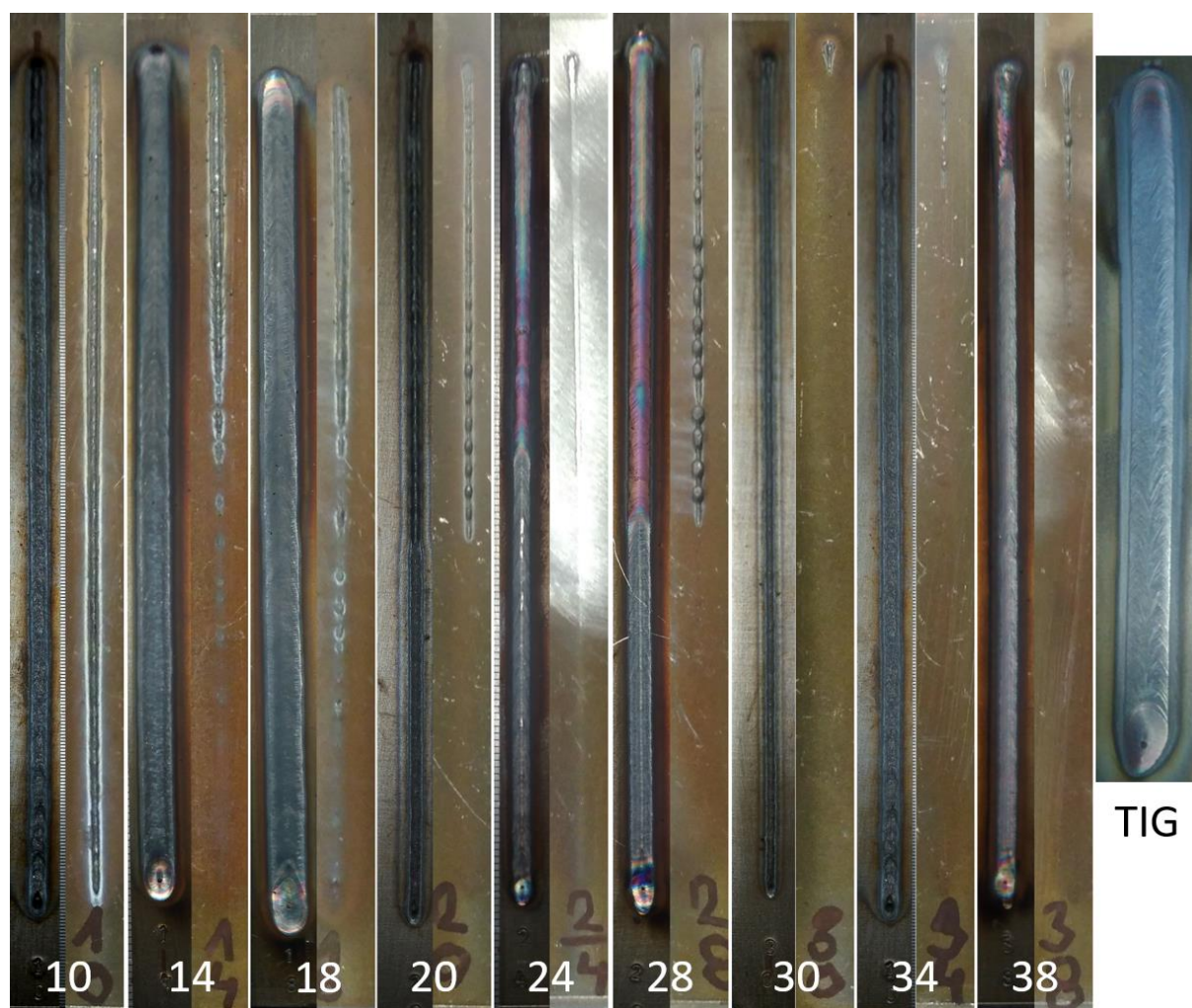
$$Q_{in} = Q_{inlas} + Q_{inTIG} [\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}]. \quad (4.3)$$

Součinitel absorpce záření η_{las} byl stanoven za základě [66], tepelná účinnost při svařování metodou TIG η_{TIG} dle [67].

Tab. 5: Parametry při experimentu

svar	v_s [mm.s ⁻¹]	P_{las} [W]	η_{las} [-]	I_{TIG} [A]	U_{TIG} [V]	η_{TIG} [-]	Q_{inlas} [J.mm ⁻¹]	Q_{inTIG} [J.mm ⁻¹]	Q_{in} [J.mm ⁻¹]
10	10	2000	0,8	0	0	0,6	160	0	160
14	10	2000	0,8	40	11,8	0,6	160	28	188
18	10	2000	0,8	80	11,8	0,6	160	57	217
20	20	2000	0,8	0	0	0,6	80	0	80
24	20	2000	0,8	40	11,8	0,6	80	14	94
28	20	2000	0,8	80	11,5	0,6	80	28	108
30	30	2000	0,8	0	0	0,6	53	0	53
34	30	2000	0,8	40	11,5	0,6	53	9	62
38	30	2000	0,8	80	10,9	0,6	53	17	70
TIG	3	0	-	160	14,3	0,6	0	458	458

Po svaření jednotlivých vzorků byla provedena vizuální kontrola pro zjištění zjevných nedostatků a vad, zejména viditelný trhlin, zápalů, rozstříku, případně vad kořene a také zhodnocení celkového vzhledu svarů. Jednotlivé svary zobrazuje obr. 37. Vlevo je strana hlavy



Obr. 37: Svary po svaření

svaru, vpravo kořene. (pozn.: u vzorku 24 bylo provedeno odbroušení převýšení kořene, z důvodu upnutí vzorku pro další svar, před pořízením fotografie). U svaru metodou TIG nedošlo k provaření kořene ani k žádným viditelným změnám na této straně materiálu, proto není na obr. 37 zobrazen snímek kořene. Z vizuální kontroly je patrné, že u vzorků svařovaných rychlostí $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ nebylo dosaženo plného průvaru ve významnější části svaru. Při rychlosti svařování $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ došlo k řádnému vytvoření svaru asi v polovině jeho délky, stejně tak u vzorků 14 a 18. K vytvoření plně provařeného svaru v celé jeho délce došlo pouze u vzorku č. 10. U vzorků 18 a 38 došlo k tzv. foukání oblouku zřejmě vlivem elektromagnetických jevů způsobených tokem elektrického proudu materiálem k zemnicí svorce.

Při porovnání jednotlivých vzorků je patrný pozitivní efekt TIG oblouku na kvalitu povrchu housenky, při jeho použití došlo k vyhlazení povrchu, avšak za cenu viditelného rozšíření svaru. Ani v jednom případě nejevily vzorky při pohledu z lícové strany stopy trhlin. Na žádném ze vzorků nebyly pozorovány viditelné deformace geometrie jak v podélném, tak v příčném směru. Taktéž nebyl zaznamenán rozstřík svarového kovu. I přes intenzivní ochranu inertní atmosférou došlo k v oxidaci okolí svaru (oranžově zabarvené oblasti okolo hranice svarového kovu), která však může být také způsobena příměsemi v ochranném plynu.

Nejčastější vadou svarů bylo značné převýšení v kořeni. Norma ČSN EN ISO 12932 stanovuje jeho maximální velikost pro nejpřísnější stupeň kvality B a pro tloušťky materiálu vyšší než 3 mm, vyjádřenou výrazem $(1 + 0,3\cdot b)$ mm, kde „b“ je šířka svaru v kořeni, maximálně pak 3 mm.

Další zaznamenanou vadou bylo neúplné vyplnění svaru, která je dle normy ČSN EN ISO 12932 přípustnou vadou pouze, pokud se jedná o krátkou vadu. V případě výskytu této vady však nebyla podmínka krátké vady splněna, tzn. vada se vyskytovala na více než 25 mm délky svaru na úseku 100 mm, a měla by být hodnocena jako nepřijatelná. S přihlédnutím k dalšímu obrábění sestaveného rotorového kola, které je prováděno pro dosažení požadovaných geometrických a rozměrových tolerancí, byla stanovena mez přípustnosti rozdílná od výše zmiňované normy na hodnotu 0,5 mm, při které dojde k odstranění případného propadu v rámci úběru materiálu.

Celkově se z hlediska vizuální kontroly jeví jako nejvhodnější svary provedené rychlostmi $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (posuzováno zejména dle oblastí délky 50 mm od počátku svaru, která odpovídá svaru na reálném dílci).

4.2 Metalografický rozbor

Příprava vzorků pro metalografické hodnocení struktur byla provedena v metalografické laboratoři Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Z každého svařeného vzorku byl odebrán jeden vzorek pro hodnocení struktury z oblasti asi 30 mm od počátku svaru tak, aby byly minimalizovány projevy jevů způsobených zapálením oblouku a vytvořením keyhole. Pro dělení vzorků bylo využito metalografické pily Struers Secotom-60 a probíhalo za intenzivního chlazení z důvodu minimalizace ovlivnění struktury materiálu vzorku teplem vznikajícím při procesu řezání.

Po dělení byly vzorky zalisovány do fenolové pryskyřice Struers MultiFast při teplotě $180 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku 25 MPa na lisu CitoPress-1 od téhož výrobce. Broušení a leštění bylo provedeno na automatické brusce a leštiče Struers Tegramin-20. K broušení byly použity diamantové kotouče MD-Piano hrubostí 220, 500 a 1200 a chlazení vodou. Hrubé leštění bylo provedeno pomocí suspenze DiaDuo, zrnitost $9 \mu\text{m}$. Následoval oplach ve vodě pomocí ultrazvukové čističky z důvodu zabránění kontaminace jemnozrnných leštících past nečistotami z předchozích operací a následnému poškrábání leštěného povrchu. K leštění bylo využito diamantových past zrnitosti $3 \mu\text{m}$ a následně $1 \mu\text{m}$ v kombinaci s isopropyl alkoholem. Poté následovalo omytí vzorků destilovanou vodou a isopropyl alkoholem.

Na nenaleptaných vzorcích bylo možné pozorovat rozložení a velikost pórů, případně trhliny, rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu však bylo velmi obtížně určitelné. Zvýraznění struktury základního materiálu i tepelně ovlivněné oblasti bylo provedeno pomocí činidla Vilella-Bain po dobu 30 s (95 ml etylalkohol, 5 ml koncentrované kyseliny chlorovodíkové a 1 g kyseliny pikrové). Toto činidlo je běžně využíváno pro zvýraznění struktur v martenzitických ocelích. Na obrázku č. 38 je zobrazen vzorek připravený pro pozorování.



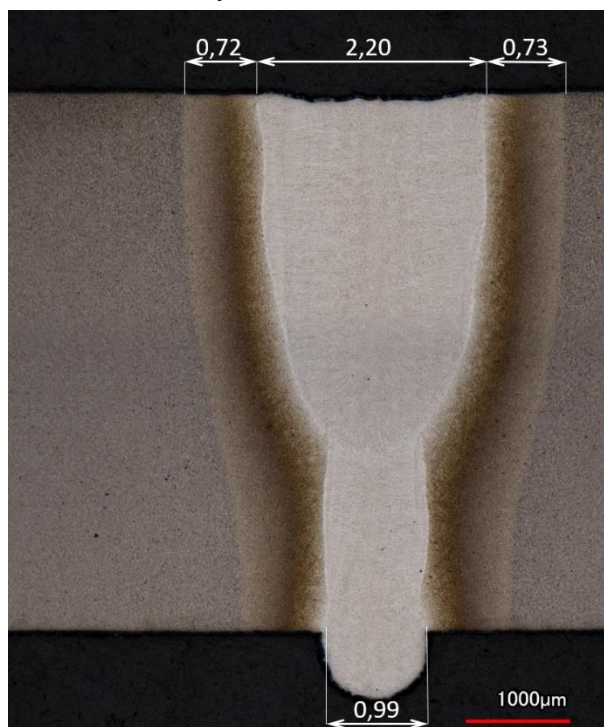
Obr. 38: Připravený, naleptaný vzorek

Vlastní pozorování bylo provedeno pomocí laserového skenovacího konfokálního mikroskopu Keyence VK-X1000 (taktéž ve vybavení ÚPT), který umožňuje pozorování jak při klasickém osvětlení, tak pomocí laseru. Hlavní výhodou je vyšší rozlišovací schopnost, vyšší kontrast ve srovnání s konvenčním mikroskopem a také možnost vyhodnocení výškové topologie vzorku, což je výhodné například pro určení rozdílů mezi nečistotou a pórem.

4.2.1 Makrostruktura

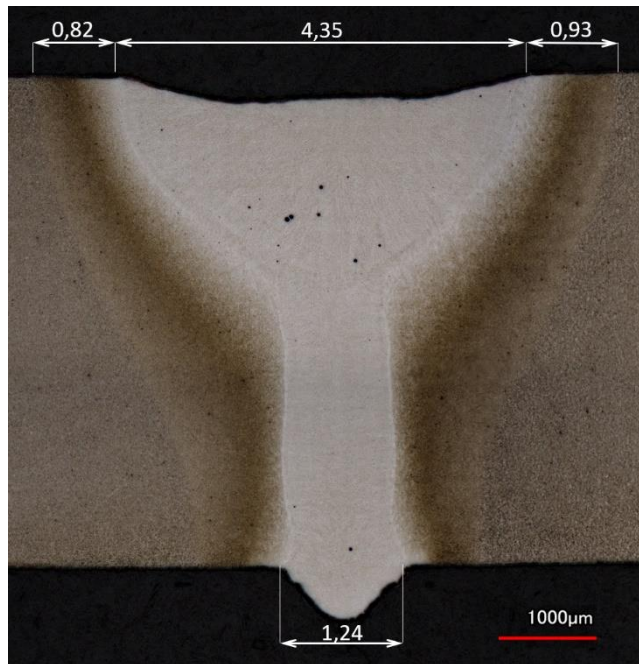
Hodnocení makrostruktury bylo provedeno na snímcích pořízených prostřednictvím objektivu se zvětšením 2,5x, měřítko velikosti je uvedeno v pravém dolním rohu makrosnímků. Hodnocena byla zejména šířka svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti v hlavové části svaru a také šířka svarového kovu v kořeni. Tyto parametry jsou vyneseny v mm na makrosnímcích svarů. Dále bylo hodnoceno rozložení pórů ve svarovém kovu a přítomnost trhlin. Na makrosnímcích je možné zřetelně odlišit svarový kov, základní materiál a některá pásma tepelně ovlivněné oblasti svaru, vzhledem k jemnozrnné struktuře z nich není možné bližší určení jednotlivých strukturních složek. Z téhož důvodu nebylo možné hodnotit rozložení karbidických, případně jiných vyprecipitovaných intermetalických částic, patrně není ani jejich předpokládané hrubnutí v kritickém pásmu tepelně ovlivněné oblasti.

Vzorek 10 (svar laserem bez elektrického oblouku TIG) na makrosnímku (obr. 39) nejsou pozorovatelné žádné trhliny. Pórovitost je velmi nízká a jedná se o jednotlivé póry průměru do 0,02 mm, maximální možný obsah pórů stanovený normou je určen hodnotou 1 % plochy vzorku, toto kritérium je splněno. Svar je poměrně dobře zaplněn. Převýšení kořene činí asi 0,7 mm a spadá do přípustných mezí pro tuto vadu. Na svaru jsou patrné dvě oblasti (směrem od horního povrchu zužující se část a téměř rovnoběžná část v oblasti kořene), ačkoli byl použit pouze jeden zdroj tepla, jak naznačují některé simulace (např. [66]), je možnou příčinou jejich vzniku proudění taveniny ve svarové lázni.



Obr. 39: Makrofoto vzorku 10

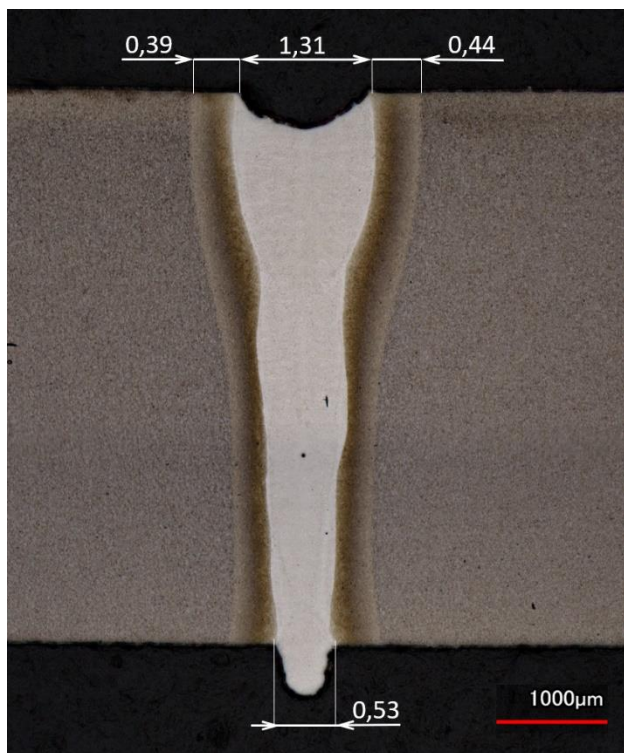
Vzorky 14 a 18 vykazují velmi podobné charakteristické znaky. Makrofoto vzorku 14 lze nalézt v příloze č. 3. Na obrázku č. 40 je zobrazeno makrofoto vzorku 18. Oba vzorky vykazují vyšší obsah pórů oproti vzorku 10. Příčinou tohoto jevu může být působení elektrických a magnetických sil vznikajících jako důsledek obloukem TIG a materiálem protékajícího elektrického proudu. Tyto síly nejspíše ovlivňují dynamiku svarové lázně, čímž dochází k nevhodnému proudění taveniny a vyššímu naplynění. Velikost pórů zachycených na fotografii se pohybuje maximálně okolo hodnoty 0,05 mm a vždy se jedná o poměrně kulovité útvary. I přes vyšší pórovitost je splněna podmínka maximální plochy pórů na vzorku.



Obr. 40: Makrofoto vzorku 18

U těchto vzorků došlo k významnému rozšíření svaru jak v hlavové, tak v kořenové části a také k rozšíření tepelně ovlivněné oblasti vlivem většího vneseného tepla oproti vzorku 10. Opět dochází k mírnému propadu v hlavové části svaru a k převýšení kořene svaru asi 0,5 mm. Trhliny nebyly na těchto výbrusech pozorovány.

Z výbrusu vzorku 20 (obr. 41) je patrné zúžení svaru v důsledku vyšší svařovací rychlosti a nižšího vneseného tepla oproti předchozím vzorkům. Jedná se o svar s nízkou porozitou, která je plně přípustná. V případě protáhlého útvaru uprostřed tloušťky materiálu se pravděpodobně jedná na základě analýzy výškového profilu vzorku o vměstek. Vzhledem k velikosti 0,1 mm splňuje podmínku přípustnosti pro vměstky dle normy ČSN EN ISO 12932 i pro stupeň kvality B – pro celkové zhodnocení přípustnosti by bylo nutné ověřit jeho celkovou délku na základě prozařovacích metod nebo ultrazvuku. Patrný je propad hlavy, který činí 0,35 mm, je tedy přípustný vzhledem k mezní hodnotě 0,5 mm stanovené výše. Převýšení kořene 0,49 mm také spadá do přípustných mezí pro tuto vadu.



Obr. 41: Makrofoto vzorku 20

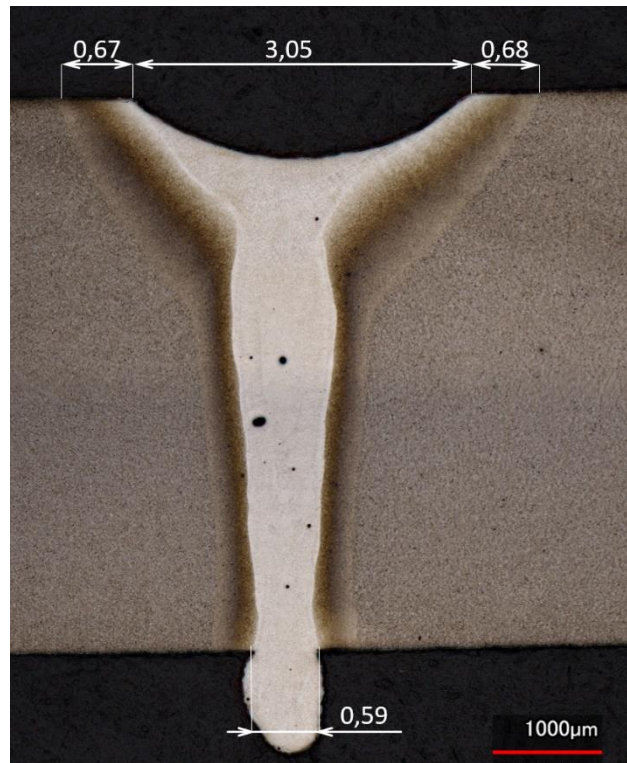
Vzorek 24 (příloha 3) je opět charakterizován vyšší šířkou svaru a TOO zejména v hlavové oblasti, oproti svaru bez ovlivnění obloukem, v důsledku působení tepla z oblouku. Pórovitost na daném výbrusu je poměrně malá, vyskytují se pouze jednotlivé kulové póry průměru do 0,05 mm. Trhliny nebyly na snímku zjištěny. Výška převýšení kořene činila asi 0,65 mm, patrný je propad hlavy asi 0,25 mm. Celkově se jedná o poměrně kvalitní svar.

Na vzorku ze svaru 28 (obr. 42) je viditelná poměrně vysoká pórovitost, velikost pórů dosahuje až 0,1 mm. Na výbrusu nebyly zjištěny žádné trhliny. Opět je patrná větší šířka svaru v hlavové části vlivem působení elektrického oblouku oproti svarům s nižším vneseným teplem. Došlo také k vyosení oblouku vůči ose svaru a mírné asymetrii v hlavové oblasti svarového kovu. U tohoto svaru je došlo k velmi výraznému převýšení kořene velikosti asi 0,95 mm. Zásadní vadou je však značný propad hlavy svaru o 0,6 mm, který je již nepřijatelný.

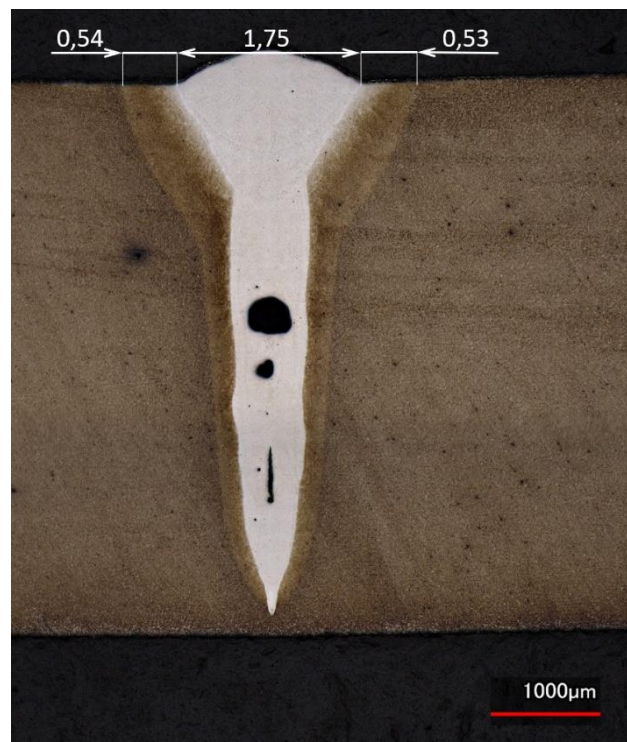
U vzorku 30 (obrázek viz příloha 3) nedošlo k provaření kořene svaru vlivem nízkého vneseného tepla v důsledku vysoké svařovací rychlosti. Ve spodní části svarového kovu došlo k vytvoření osové trhliny délky 0,7 mm. Vzhledem k nízkému vnesenému teplu, tedy vysokému tepelnému gradientu, lze usuzovat, že se pravděpodobně jedná trhlínu za horka. Obě vady jsou nepřijatelné. Porozita svaru je nízká, pouze s několika malými kulovitými póry. Celkově se jedná o svar s nejmenší šířkou svaru i tepelně ovlivněné oblasti. Odlišností oproti svarům s provařeným kořenem je převýšená hlava svaru.

U svaru 34 (obr. 43) došlo, podobně jako u vzorku 30, ke vzniku trhliny, pravděpodobně také v důsledku vysoké rychlosti ochlazování. Odlišností je však výskyt dvou poměrně velkých pórů velikosti 0,4 mm a 0,25 mm v ose svaru. Častou příčinou takových pórů je právě neprovařený kořen, kdy plynům vznikajícím ve spodní části svaru není umožněno vyloučení přes kořen, ale stoupají k povrchu, přičemž dojde k jejich uzavření tuhnoucí taveninou. Přítomny jsou také další drobnější póry. Podobně, jako u svaru 30, došlo i v tomto případě ke vzniku převýšení hlavy svaru.

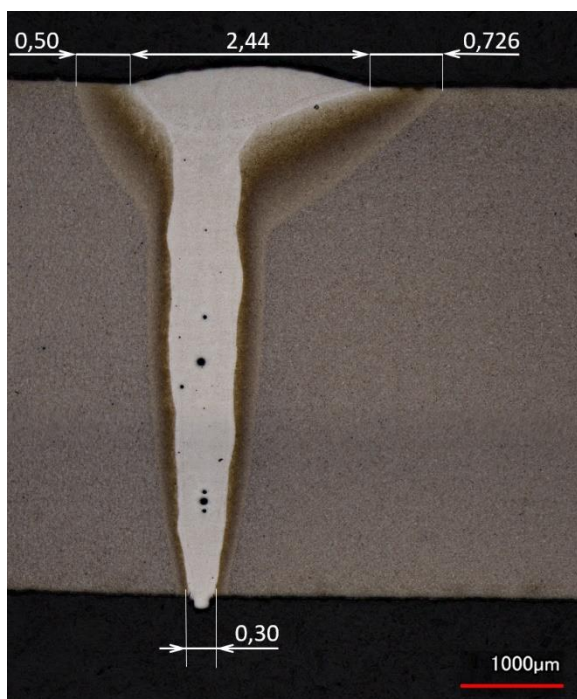
Na vzorku ze svaru 38 (obr. 44) je patrné značné vyosení oblouku vůči ose svaru. Patrné je ovlivnění obloukem pouze v části materiálu blízko u povrchu. Na tomto vzorku je patrný průvar v kořenové části kořene, avšak na velké části svaru nedošlo k provaření (viz obr. 38). Převýšení kořene je velmi malé, podobně jako šířka svaru v kořeni. Ve svarovém kovu je patrných několik pórů velikosti 0,05 – 0,08 mm v ose svaru i menší póry nalézající se mimo ni, avšak není překročena mez přípustnosti pro přítomnost porozity.



Obr. 42: Makrofoto vzorku 28



Obr. 43: Makrofoto vzorku 34

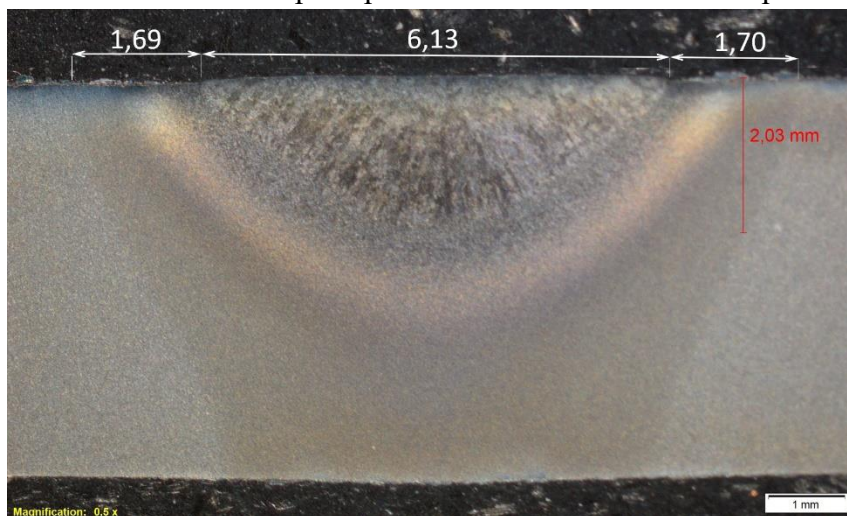


Obr. 44: Makrofoto vzorku 38

Z analýzy makrostruktury lze usuzovat, že použití dohřevu pomocí oblouku TIG způsobuje rozšíření šířky hlavové části svaru i TOO. Největší šířky mezi svarovým kovem a základním materiálem dosahují svary v oblasti na přechodu spodní, téměř rovnoběžné části a vrchní, rozšiřující se části svaru. V závislosti na vneseném teple se hloubka jeho účinku pohybuje zhruba od 1 mm do 2 mm tloušťky materiálu. Svařovací rychlost významně ovlivňuje šířku svaru v kořenové oblasti a také hloubku průvaru, kdy při výkonu laseru 2 kW je pro vznik plně provařeného svaru mezní hodnota svařovací rychlosti $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Z pohledu vad jsou vyhovující vzorky 10, 14, 18, 20, 24. Mírný propad hlavy svaru při svařování bez přídavného materiálu je běžnou záležitostí. Při rychlosti $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ nedošlo k vytvoření adekvátního svarového spoje u žádného ze vzorků, zejména z důvodu trhlin, porozity a neprůvaru v kořeni.

Při použití pouze metody TIG (bead on plate, bez přídavného materiálu) dochází i při vysoké hodnotě vneseného tepla oproti laserovému svařování k průvaru do hloubky pouze 2 mm.



Obr. 45: Makrofoto TIG svaru

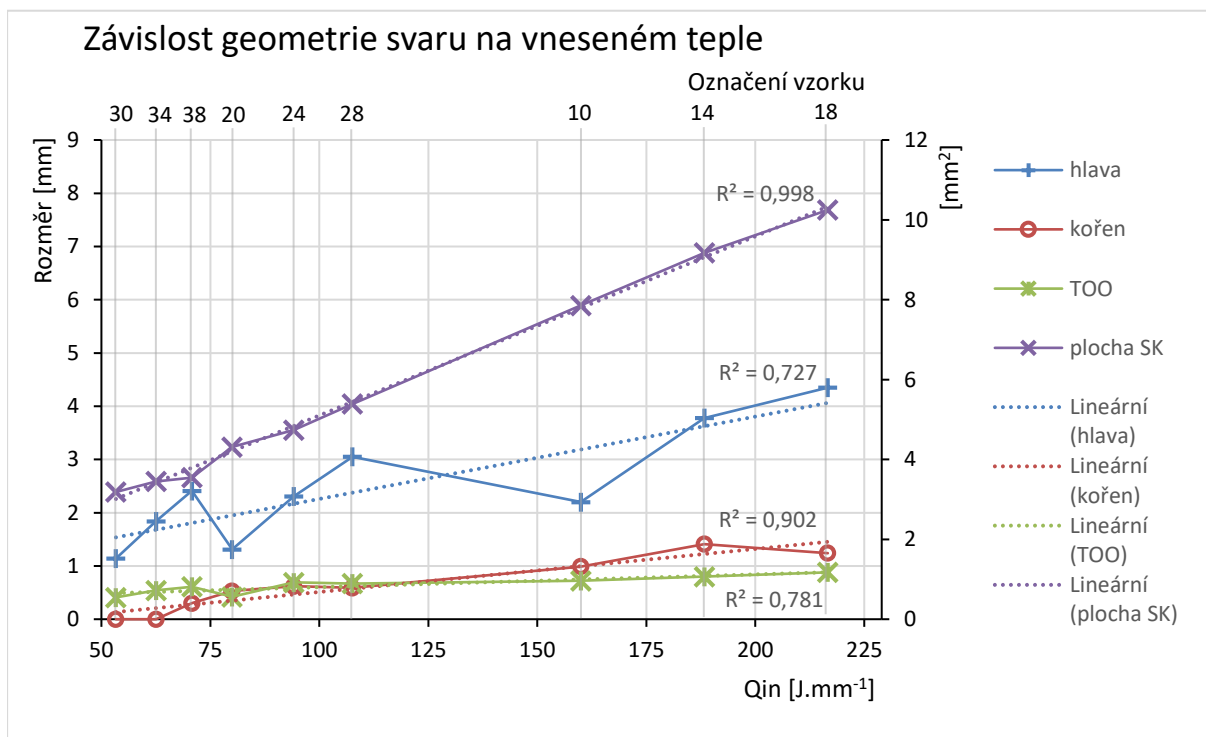
Dochází také ke vzniku širší tepelně ovlivněné oblasti oproti svarům laserem. Na makrosnímku tohoto svaru (obr. 45, leptáno činidlem Beraha, které slouží primárně pro zviditelnění mikrostruktury snímek pořízen prostřednictvím stereo mikroskopu Olympus SZ 61) je patrné ovlivnění materiálu v celé jeho tloušťce. Porozita ani trhliny nebyly zaznamenány.

Rozměry jednotlivých svarů a popis vad je souhrnně uveden v tabulce č. 6. Ve sloupci „Šířka kořene“ jsou uvedeny průměrné hodnoty šířky TOO. Zřejmý je efekt rychlosti svařování na šířku svaru ve všech jeho oblastech, kdy vyšší rychlosti svařování (nižší vnesené teplo) mají za následek zmenšení šířky svaru (při porovnání svarů se stejným proudem oblouku). Ovlivnění šířky svaru a tepelně ovlivněné oblasti teplem vneseným elektrickým obloukem lze pozorovat (v závislosti na rychlosti svařování a výkonu zdroje) zhruba do hloubky 1 až 2 mm.

Tab. 6: Rozměrové parametry a vady svarů na základě vyhodnocení makrostruktury

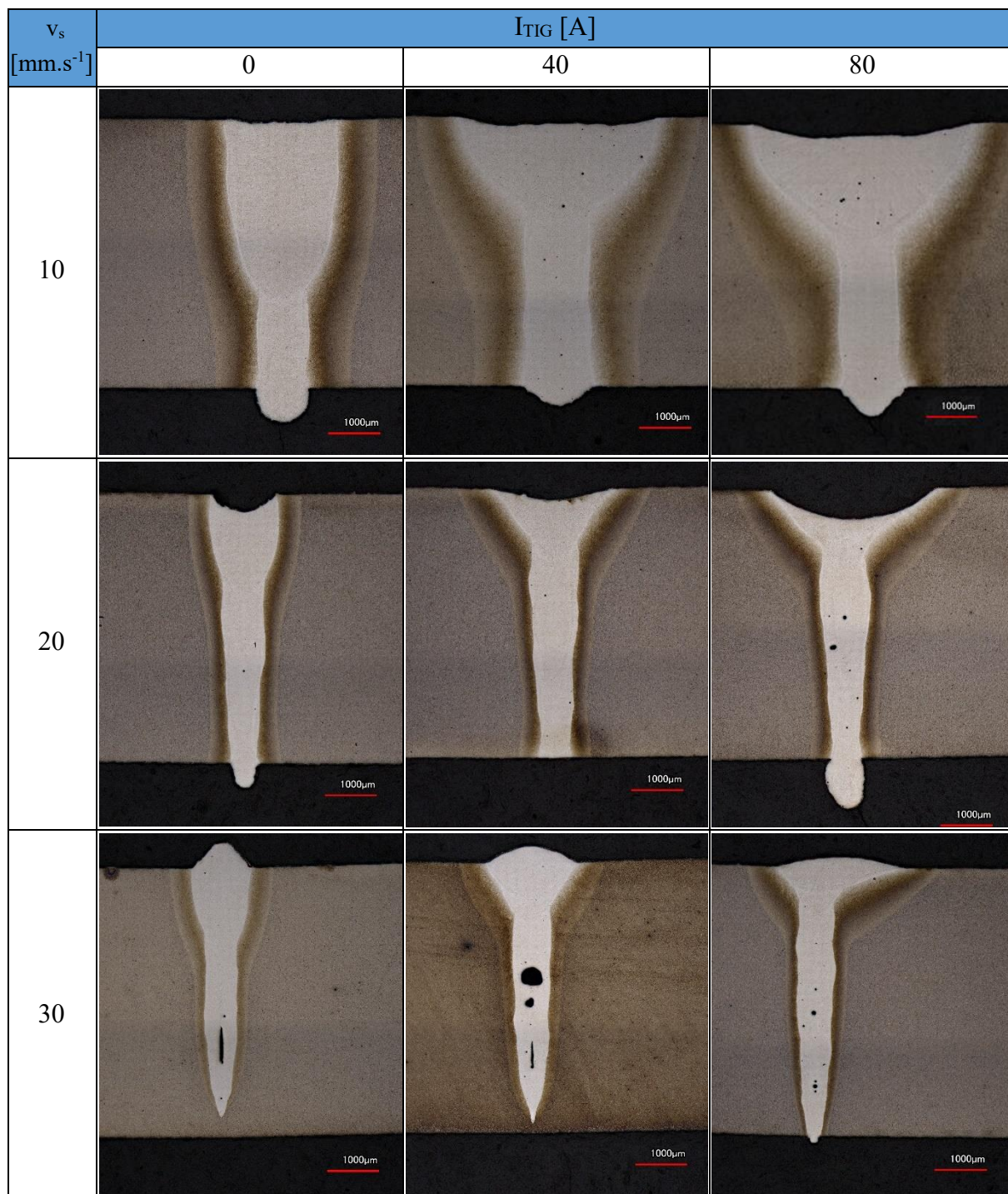
Označení svaru	Šířka hlavy [mm]	Šířka kořene [mm]	Šířka TOO [mm]	Plocha SK [mm ²]	Porozita	Nepřípustné vady
10	2,20	0,99	0,73	7,86	nízká	Ne
14	3,78	1,41	0,80	9,18	střední	Ne
18	4,35	1,24	0,88	10,25	střední	Ne
20	1,31	0,53	0,42	4,31	nízká	Ne
24	2,31	0,62	0,69	4,74	nízká	Ne
28	3,05	0,59	0,68	5,39	střední	Propad hlavy
30	1,15	-	0,41	3,19	nízká	Trhlina, neprovařený kořen
34	1,75	-	0,54	3,45	vysoká	Trhlina, neprovařený kořen
38	2,44	0,30	0,61	3,55	střední	Neprovařený kořen
TIG	6,13	-	1,70	-	nízká	-

Na obrázku č. 46 je zobrazena závislost geometrických parametrů na vneseném teple, na vodorovné ose je vyneseno vnesené teplo, na svislé ose jednotlivé geometrické parametry. Měřené hodnoty jsou proloženy lineární regresní přímkou, hodnoty R^2 udávají koeficient spolehlivosti. Plocha svarového kovu (v grafu a tabulce označováno „plocha SK“) vykazuje lineární závislost na vneseném teple. Druhou odpovídající charakteristikou je šířka svaru v kořeni, ačkoli pro její ověření by bylo nutné provést další experimenty. V případě šířky hlavy svaru a šířky tepelně ovlivněné oblasti není zřejmá závislost na celkovém vneseném teple.



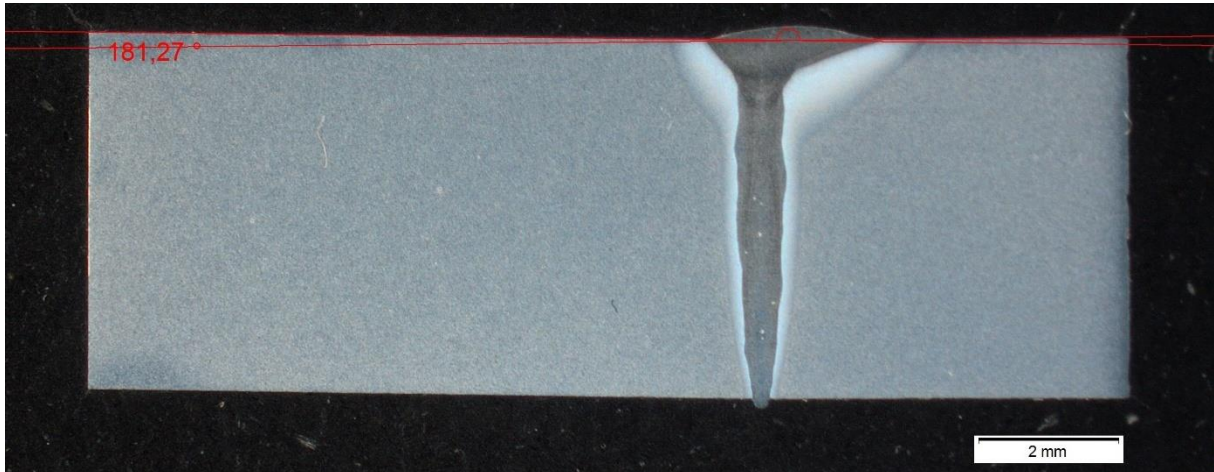
Obr. 46: Graf závislosti geometrie svaru na celkovém vneseném teple

Na obrázku č. 47 jsou zobrazeny makrosnímky všech provedených laserových svarů pro snadné vizuální srovnání výše uvedených skutečností ohledně šířek oblastí svaru a jejich celkového tvaru v kontextu svařovací rychlosti a proudu obloukem TIG. Délka měřítek na snímcích 1000 μm .



Obr. 47: Porovnání makrosnímků vzorků

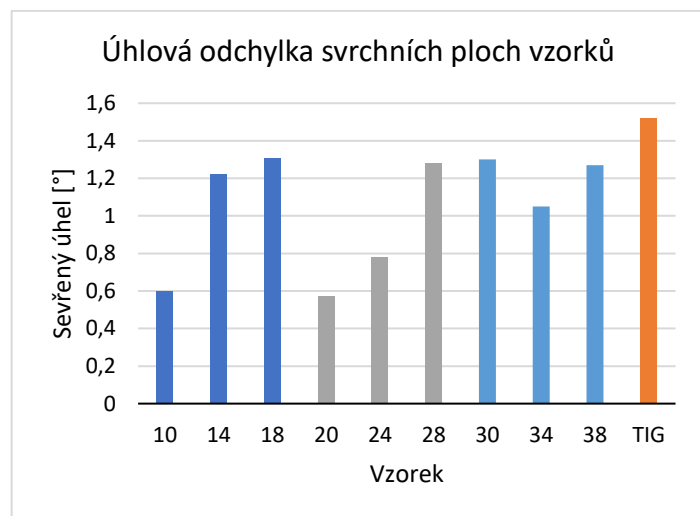
Pro zjištění vlivu procesních parametrů na deformace bylo provedeno na makrosním měření úhlu sevřeného vrchním povrchem základního materiálu vzorků. K vyhodnocení byl použit stereomikroskop Olympus SZ 61 (vybavení ÚPT AV ČR) a příslušný software. Měřena byla úhlová odchylka vrchního povrchu vzorku. Vzhledem ke způsobu dělení polotovaru na jednotlivé vzorky pomocí EDM je uvažována rovinnost původních vzorků. Na obrázku č. 48 je zobrazeno toto měření na vzorku 38, v jeho případě činí odchylka 1,27 °. Hodnoty úhlové odchyly jednotlivých vzorků jsou zobrazeny v tabulce č. 7. Zobrazeny jsou také graficky na obrázku č. 49.



Obr. 48: Úhlová odchylka povrchu vzorku 38

Tab. 7: Úhlová odchylka povrchu vzorků

Označení svaru	Odchylka [°]
10	0,60
14	1,22
18	1,31
20	0,57
24	0,78
28	1,28
30	1,30
34	1,05
38	1,27
TIG	1,52



Obr. 49: Porovnání úhlové odchyly vzorků

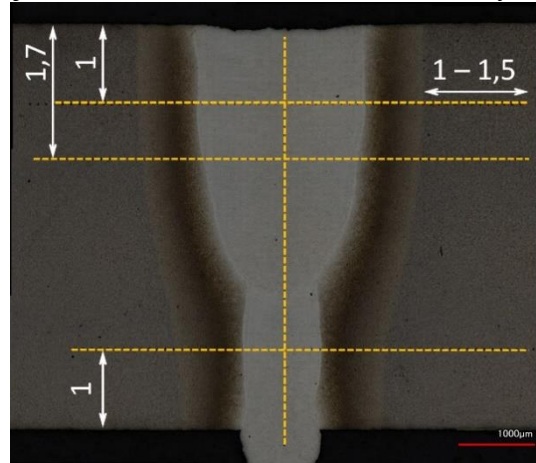
Všechny vzorky vykazují konkávní tvar, který je způsoben větší plochou (na příčném řezu svarem) svarového kovu v horní části vzorku, ve které vlivem smrštění při chladnutí dochází ke vzniku větší deformace a tahových napětí způsobujících deformaci svaru.

Jak je patrné z tabulky i z grafu, deformace vzrůstá zejména spolu se zvyšujícím se proudem elektrického oblouku, který má vliv zejména na šířku svarového kovu (tepelně ovlivněné oblasti) v hlavové části vzorku. Při svařování skutečných dílců však lze očekávat snížení deformací vlivem upnutí polotovarů do svařovacího přípravku. Omezením deformací však dochází ke vnesení přídavných vnitřních pnutí do oblasti svaru, která mohou mít vliv na praskavost. Velká deformace na svaru 30 je způsobena poměrně velkým neprůvarem v kořeni. Při použití svařování laserem (LATIG) dochází k omezení deformace ve srovnání s metodou TIG v důsledku užší oblasti svarového kovu a TOO.

4.2.2 Mikrotvrдость

Po hodnocení makrostruktury bylo provedeno měření mikrotvrđosti. Měření probíhalo na automatickém přístroji LECO LM 247AT v prostorách Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT v Brně. Vzhledem k malé celkové šířce tepelně ovlivněné oblasti bylo zvoleno měření mikrotvrđosti podle Vickerse při zatížení 100 g, tedy HV0,1, zatížení po dobu 10 s. Pro hodnocení svarových spojů je v ČSN EN 1043-1 předepsáno zatížení 10 kg, avšak při jeho použití by nebylo dosaženo potřebné hustoty vtisků pro hodnocení tvrdosti jednotlivých částí svaru.

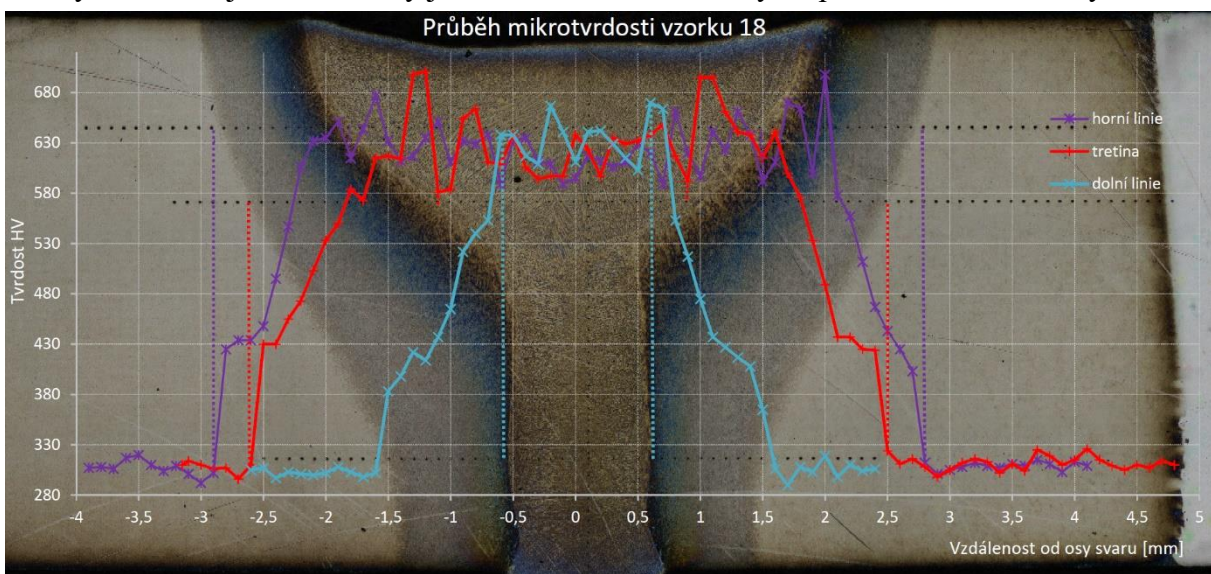
Rozsah měření byl volen tak, aby pokrýval oblasti asi 1 - 1,5 mm od viditelné hranice tepelně ovlivněné oblasti a byl tak dostatečně postižen i vývoj v základním materiálu. Provedeno bylo měření v horní oblasti svaru, asi 1 mm od horního povrchu „horní linie“, dále asi 1,7 mm od horního povrchu „třetina“. Měřena byla také spodní oblast vzorku, asi 1 mm od spodního povrchu vzorku „dolní linie“, provedeno bylo také měření v ose svaru pro zhodnocení vývoje tvrdosti v oblasti ovlivněné teplem vneseným elektrickým obloukem v porovnání se zbytkem svaru. Umístění linií vtisků na vzorku je zobrazeno na obr. č. 50, vzdálenost jednotlivých vtisků byla volena 0,1 mm. Při této vzdálenosti vtisků by mělo být dosaženo dostatečného rozlišení umožňujícího identifikaci jednotlivých částí tepelně ovlivněné oblasti a případný vývoj ve svarovém kovu.



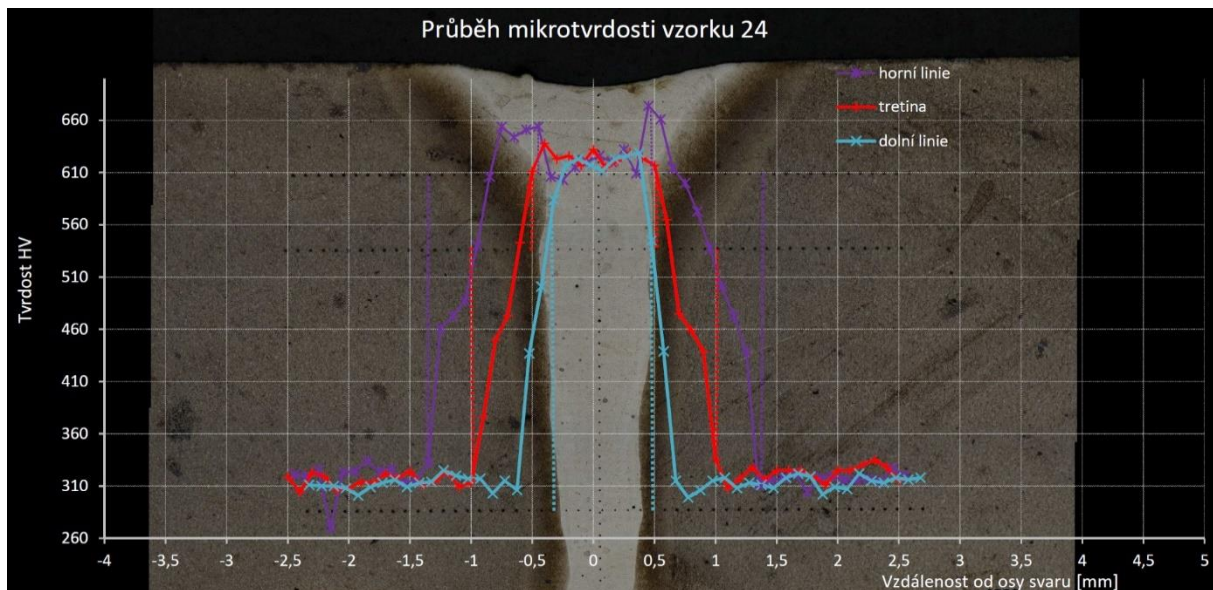
Obr. 50: Umístění linií vtisků

Po provedení měření byly zhotoveny snímky jednotlivých vzorků včetně vtisků pro možnost porovnání výsledků měření mikrotvrđosti s šířkou tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu v jednotlivých liniích. Snímky byly opět zhotoveny na ÚPT AV ČR na konfokálním mikroskopu Keyence VK-X1000 při zvětšení objektivu 10x. Vzhledem k následnému grafickému zpracování je rozhodující měřítko vyznačeno na osách grafů, případně snímcích.

Na obrázku č. 51 jsou v grafu zobrazeny výsledky měření pro vzorek 18, na obrázku č. 52 pro vzorek 24. Fialovou barvou jsou vykresleny hodnoty tvrdosti v linii 1 mm od horního povrchu, červeně 1,7 mm od horního povrchu a modře 1 mm od spodního povrchu vzorku. Vtisky indentoru jsou zobrazeny jako vodorovné linie černých, pravidelně rozmístěných bodů.



Obr. 51: Průběh mikrotvrđosti na vzorku 18



Obr. 52: Průběh mikrotvrlosti na vzorku 24

Patrná je rovnoměrná tvrdost v neovlivněném základním materiálu, která činí (314 ± 20) HV, což odpovídá (po přepočtu) hodnotám udávaným v protokolu o tepelném zpracování výchozího materiálu. Vzhledem ke způsobu tepelného zpracování zakončeného popouštěním při teplotách $720\text{ }^{\circ}\text{C} - 780\text{ }^{\circ}\text{C}$, lze usuzovat, že viditelný přechod z neovlivněného základního materiálu do tepelně ovlivněné oblasti prakticky odpovídá teplotě počátku překrystalizace, tedy asi $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při přechodu základního materiálu do tepelně ovlivněné oblasti nebyl zaznamenán výraznější pokles tvrdosti charakteristický pro vyžíhanou oblast. Vzhledem k tepelnému zpracování však není vyžívání materiálu na nižší tvrdost již možné, dalším faktorem je krátký čas výdrže na žíhací teplotě.

V TOO je pozorován prudký nárůst tvrdosti, který je pravděpodobně způsoben přeměnou austenitu na tetragonální martenzit s vysokou tvrdostí. Vzhledem ke zvyšující se teplotě směrem od základního materiálu ke svarovému kovu vzrůstá teplota materiálu, tedy i obsah austenitu a následně i martenzitu v dané oblasti. Tento efekt také může být podpořen růstem velikosti zrna v přehřáté zóně. K nárůstu tvrdosti dochází v celé šířce pásma mezi základním materiálem a svarovým kovem.

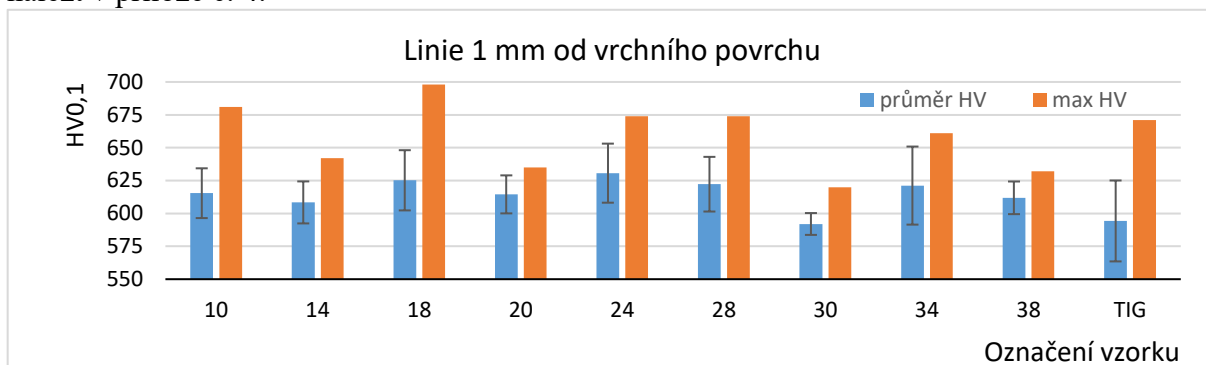
Nárůst tvrdosti však není lineární v celé šířce tepelně ovlivněné, zpravidla ve vzdálenosti 0,1 mm až 0,2 mm (jeden až dva vtisky) od přechodu neovlivněného základního materiálu do tepelně ovlivněné oblasti dochází ke zpomalení nárůstu tvrdosti, pravděpodobně se jedná o kritické pásmo TOO. Možnou příčinou je vyšší teplota austenitu, který se následně přeměňuje na martenzit. Tento jev není patrný zejména u svarů s nízkým vneseným teplem, tedy úzkou tepelně ovlivněnou oblastí, avšak pravděpodobně nebyl proveden vtisk právě v tomto pásmu z důvodu malé šířky, což je patrné i při porovnání obrázků č. 50 a č. 51 výše („dolní linie“).

Maximální tvrdost dosahují vzorky na rozhraní přehřáté oblasti a svarového kovu, v samotném svarovém kovu obvykle následuje pokles, či stagnace tvrdosti. Pro porovnání jednotlivých svarů byly určeny střední hodnoty tvrdosti ve svarovém kovu a jejich směrodatná odchylka, dále byly určeny maximální hodnoty na jednotlivých vzorcích, tyto údaje jsou zobrazeny na obrázcích č. 52, 53 a 54, modře jsou vyznačeny střední hodnoty tvrdosti, oranžově maximální měřené hodnoty, u středních hodnot je vyznačena směrodatná odchylka pomocí chybových úseček.

Průměrné hodnoty tvrdosti jednotlivých vzorků jsou v rámci nejistoty měření porovnatelné a dosahují hodnot $590\text{ HV}_{0,1} - 630\text{ HV}_{0,1}$. Pouze u vzorku 18 došlo na rozhraní svarového kovu a přehřáté oblasti k vytvoření velmi tvrdé struktury na rozhraní svarového kovu a tepelně

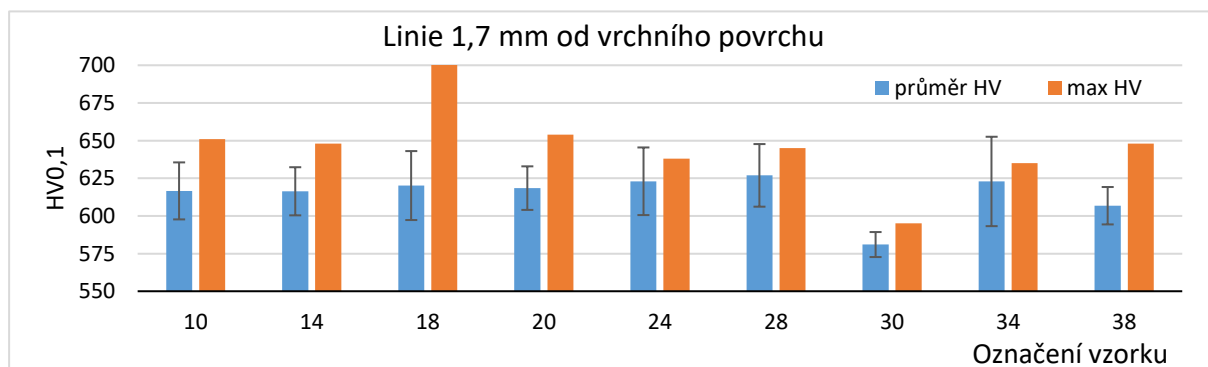
ovlivněné oblasti, což je patrné na obr. 53, případně také, v kontextu svaru, na obr. 51. Opačným extrémem je vzorek 30, který dosahuje nejnižší tvrdosti (590 HV_{0,1}) ze vzorků.

Ani při svařování metodou TIG s vysokým vneseným teplem (předpokládána nižší rychlost ochlazování) nedochází k výraznému snížení tvrdosti ve svarovém kovu, tvrdost činí (594±30) HV_{0,1}. Maximální tvrdost ve svaru 1 mm od vrchního povrchu (vzhledem k hloubce závaru provedeno pouze jedna linie vtisků rovnoběžná s povrchem a osový profil tvrdosti svaru) je porovnatelná s ostatními vzorky (671 HV_{0,1}). Průběh měřené tvrdosti svaru TIG je možné nalézt v příloze č. 4.



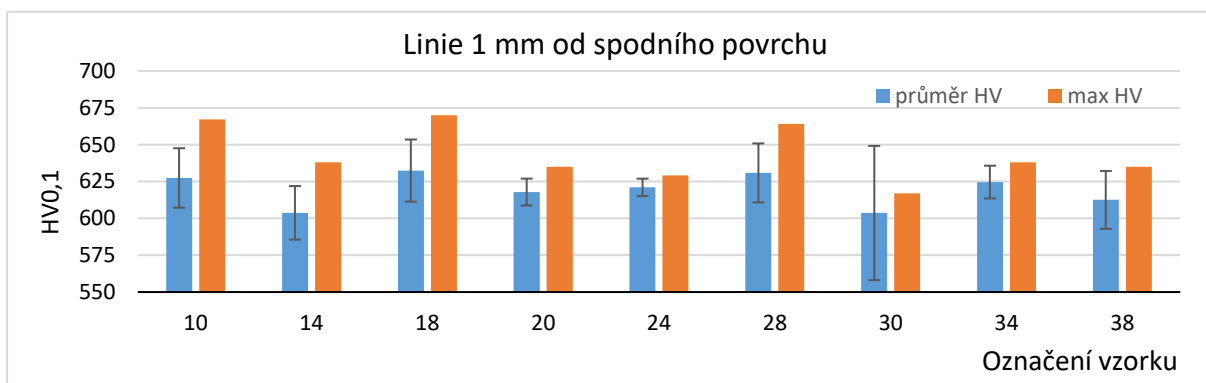
Obr. 53: Porovnání svarového kovu 1 mm pod vrchním povrchem

Linie vtisků 1,7 mm pod vrchním povrchem vzorku (obr. 54) vykazuje obdobné hodnoty jako výše uvedená, tedy střední hodnoty 605 HV_{0,1} až 630 HV_{0,1}, maximální tvrdost u svaru 18 a minimální u vzorku 30. Na svaru TIG již nebylo provedeno měření v této linii.



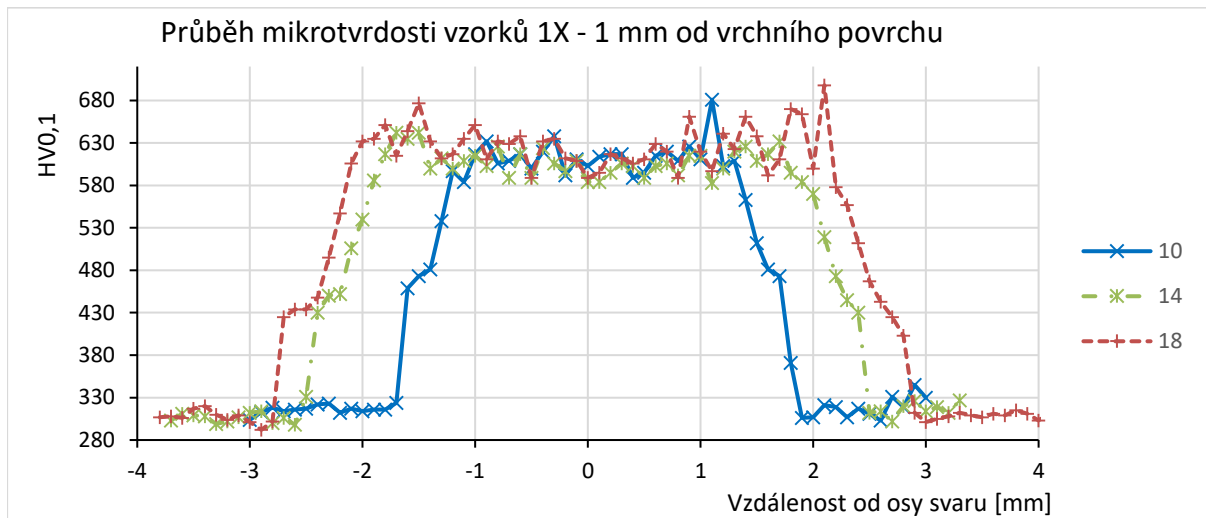
Obr. 54: Porovnání tvrdosti svarového kovu 1,7 mm pod vrchním povrchem

Z obrázku č. 55 je patrné, že ani v případě kořenové oblasti svaru neodchází ke vzniku významnějších rozdílů v tvrdosti jednotlivých vzorků při změně parametrů svařování. Střední hodnoty tvrdosti svarového kovu leží v intervalu 605 HV_{0,1} až 630 HV_{0,1}. Nejnižší hodnoty dosahuje vzorek 30, v rámci směrodatné odchylky jsou opět jednotlivé vzorky porovnatelné.

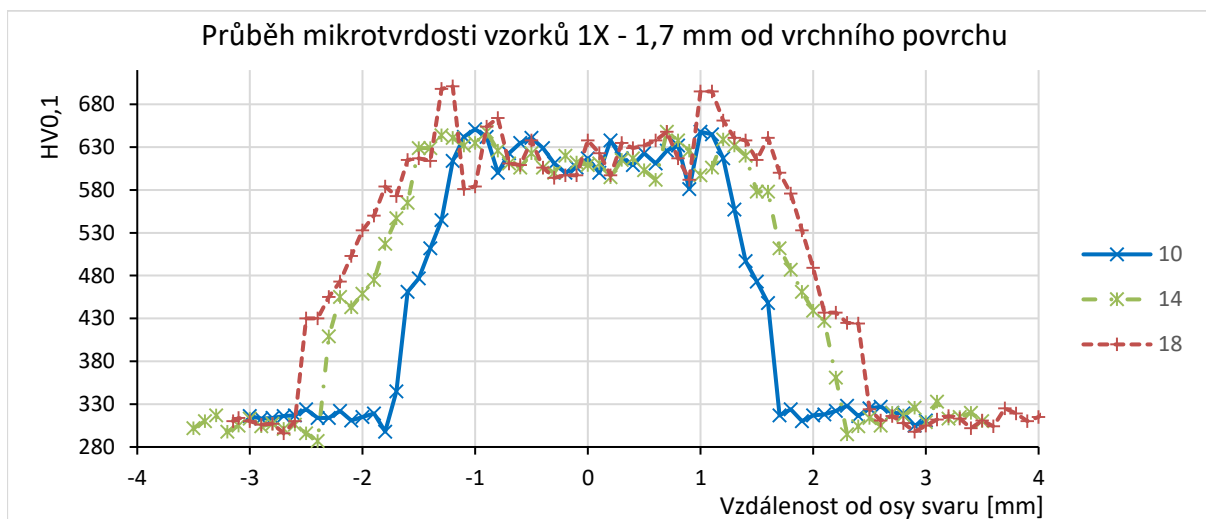


Obr. 55: Porovnání hodnot tvrdosti svarového kovu 1 mm nad spodním povrchem

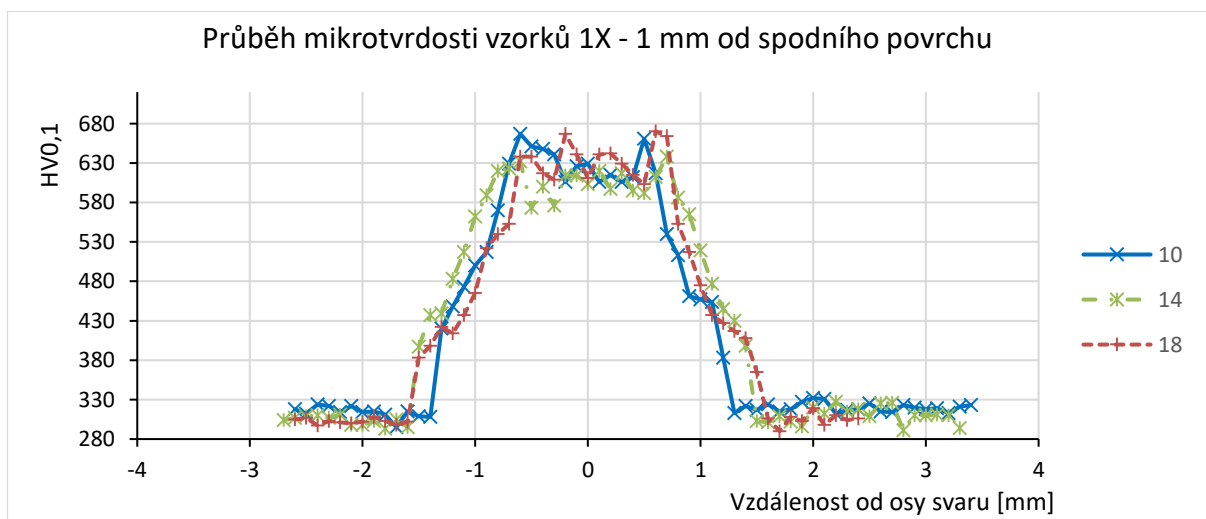
Na obrázku č. 56 jsou vyneseny hodnoty tvrdosti pro všechny vzorky svařované rychlostí 10 mm/s v linii 1 mm pod vrchním povrchem vzorku. Obdobný graf pro linii vtisků 1,7 mm od vrchního povrchu je zobrazen na obr. 57, pro linii 1 mm od spodního povrchu pak na obr. 58. Všechny vzorky vykazují velmi podobné průběhy tvrdosti.



Obr. 56: Srovnání tvrdosti svarů při $v_s = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ v linii 1 mm od vrchního povrchu



Obr. 57: Srovnání tvrdosti svarů při $v_s = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ v linii 1,7 mm od vrchního povrchu

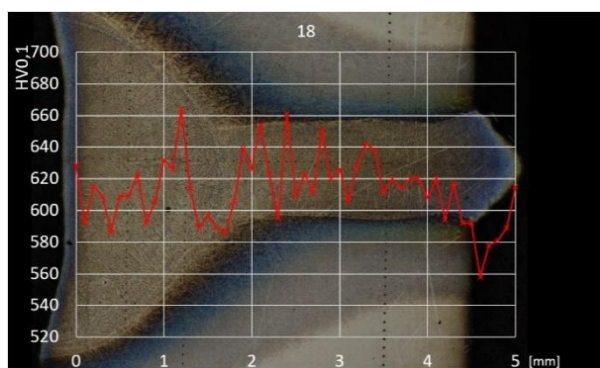


Obr. 58: Srovnání tvrdosti svarů při $v_s = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ v linii 1 mm od spodního povrchu

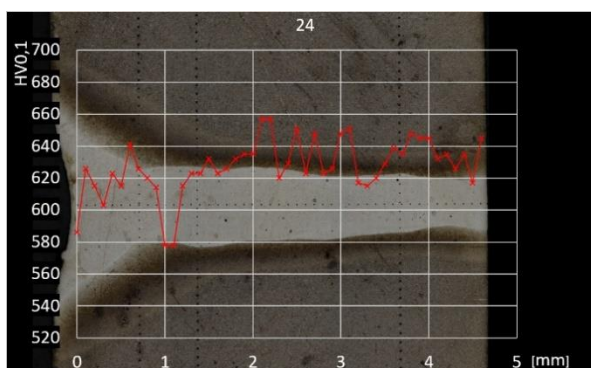
Zejména na průbězích tvrdosti vzorků svařovaných rychlostí 10 mm.s^{-1} je dobře patrný výše popsaný jev odlišné rychlosti nárůstu tvrdosti v jednotlivých pásmech tepelně ovlivněné oblasti.

Další průběhy tvrdosti pro vzorky svařované rychlostí 20 mm.s^{-1} a 30 mm.s^{-1} jsou k nalezení v přílohách č. 5 a č. 6. Lze v nich vysledovat podobné trendy, jako v případě vzorků 1X. Zejména pak rozšíření šířky TOO a svarového kovu vlivem tepla vneseného obloukem. I na grafech v přílohách je opět patrná dobrá shoda s makrostrukturou svarů. Například na grafu hodnot tvrdosti svarů 2X v linii 1 mm pod vrchním povrchem (příloha 5) je u vzorku 28 dobře viditelná asymetrie v pravé části profilu tvrdosti svaru, dokumentovaná na obrázku č. 42.

Dále byla vyhodnocena měřená tvrdost v ose svarového kovu Z jednotlivých průběhů není patrný vliv části svaru od povrchu vzorku na tvrdost SK. Pro ilustraci je na obrázcích č. 59 a č. 60 vynesena průběh osové tvrdosti vzorků 18 a 24. V oblasti hlavy svaru, která by měla být ovlivněna působením tepla vneseného obloukem, není ve srovnání s kořenovou částí patrný výraznější rozdíl. Jevem vyskytujícím se na vzorcích vytvořených za použití metody TIG je oblast svarového kovu s nižší tvrdostí na přechodu z vrchní, rozšiřující se oblasti (na obrázku vlevo) do téměř rovnoběžné (kořenové) části svaru.

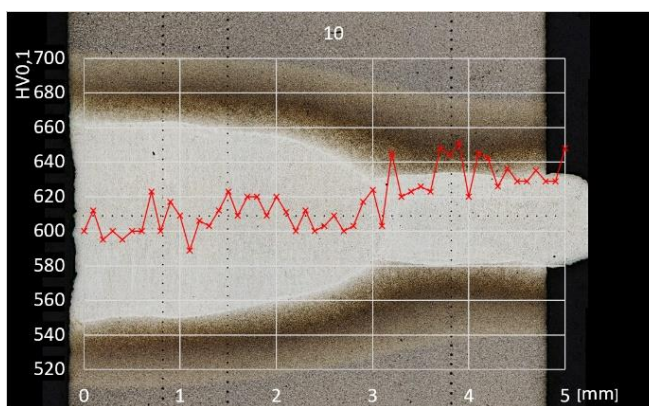


Obr. 59: Osový průběh tvrdosti vzorku 18



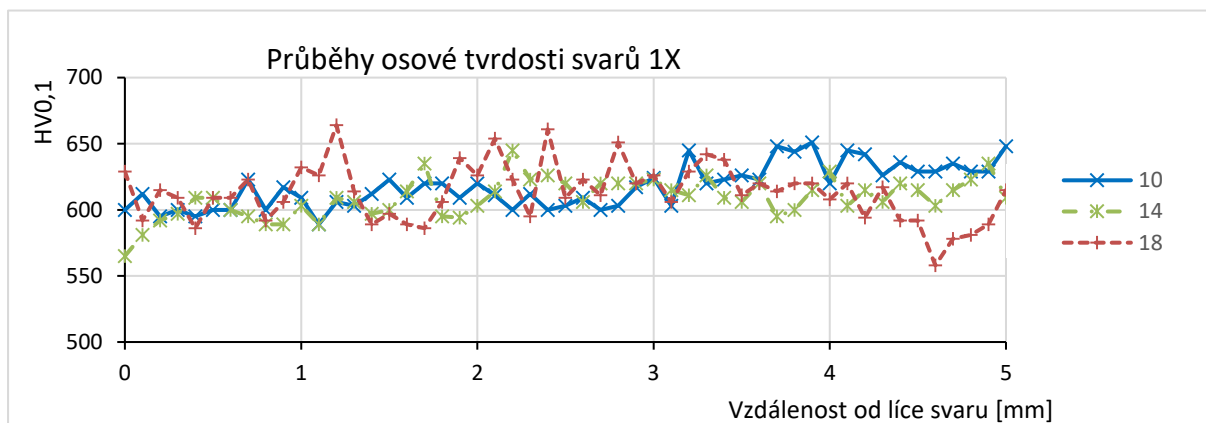
Obr. 60: Osový průběh tvrdosti vzorku 24

Na obrázku č. 61 je zobrazen vzorek č. 10 s průběhem osové tvrdosti svarového kovu. Jsou na něm patrné dvě oblasti s různou hodnotou tvrdosti, které zjevně souvisí s odlišnými pochody při tuhnutí a jsou dobře pozorovatelné na fotografii makrostruktury. Možná příčina výskytu dvou oblastí s (mírně) odlišnými vlastnostmi i při použití pouze jednoho tepelného zdroje je nastíněna u obrázku č. 39. Tento jev byl pozorován pouze u svaru 10.



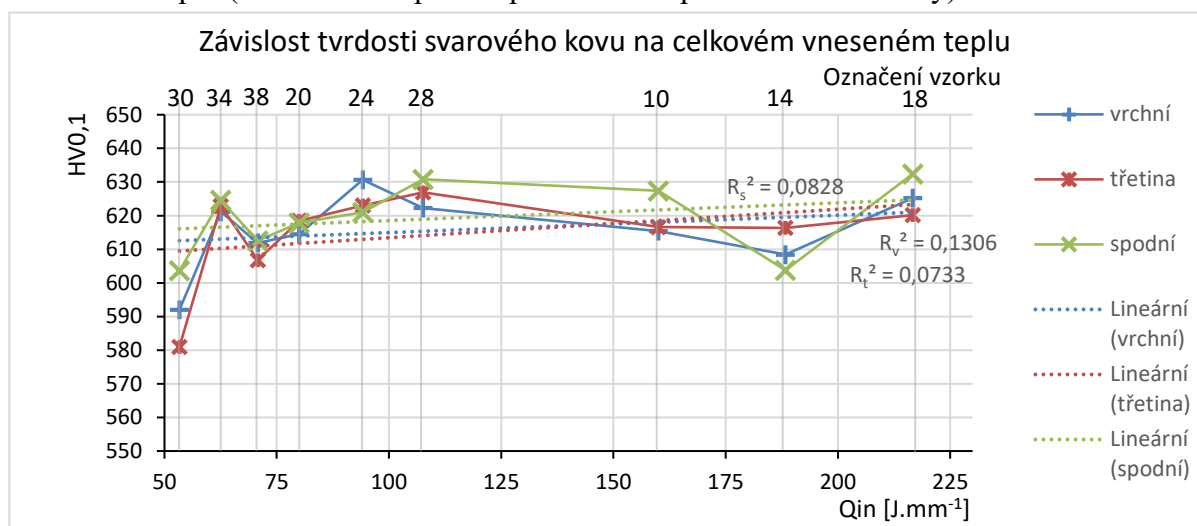
Obr. 61: Osový průběh tvrdosti vzorku 10

Pro porovnání vlivu různých hodnot tepla vneseného obloukem na tvrdost svaru jsou na obrázku č. 62 vyneseny osové tvrdosti svarů zhotovených při rychlosti svařování 10 mm.s^{-1} . Jak bylo zmíněno výše, není patrný žádný výraznější trend vývoje tvrdosti svarového kovu v závislosti na poloze vůči povrchu svaru. Příloha č. 7 zobrazuje obdobné grafy pro svařky zhotovené při svařovacích rychlostech 20 mm.s^{-1} a 30 mm.s^{-1} . Na žádném z grafů není patrný trend ve vývoji hodnot tvrdosti svarového kovu, hodnoty jsou velmi vyrovnané v celé tloušťce svaru a rozdíly mezi hodnotami prakticky odpovídají směrodatné odchylce jednotlivých souborů.



Obr. 63: Osová tvrdost svarů zhotovených při $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$

Na obrázku č. 63 je vynesena závislost střední tvrdosti svarového kovu na vneseném teple, body označují měřené hodnoty, tečkovaně jsou vyznačeny regresní přímky a vyznačena hodnota koeficientu spolehlivosti. Z tohoto grafu je patrné, že tvrdost svarového kovu velmi pravděpodobně, při odhadovaných rychlostech ochlazování v řádu stovek $^{\circ}\text{C.min}^{-1}$, nezávisí na vneseném teple (index u R^2 odpovídá počátečnímu písmenu datové řady).



Obr. 62: Závislost tvrdosti svarového kovu na celkovém vneseném teple

4.3 Mikrostruktura

Hodnocení mikrostruktury probíhalo opět na Ústavu přístrojové techniky AV ČR v Brně, snímky byly pořízeny laserovým skenovacím konfokálním mikroskopem Keyence VK-X 1000. Směrodatné měřítko velikosti je vždy uvedené v pravém dolním rohu snímku. Pro zviditelnění jednotlivých strukturních složek na vyleštěných (postup viz kapitola 4.2) vzorcích bylo využito několika leptacích činidel (vyzkoušeno 15 činidel a postupů) dle očekávaných struktur v dané oblasti svaru. Vzhledem k jejich velkému množství jsou uvedeny vždy u konkrétního snímku.

4.3.1 Základní materiál

Na nenaleptaném vzorku (obrázek viz příloha 8) základního materiálu bylo možné hodnotit zejména rozložení karbidů. Dobře viditelné karbidy dosahují velikosti až 550 nm, jejich relativní plošný obsah činí přibližně 3 %, pravděpodobně se jedná o karbidy typu $M_{23}C_6$ s velkým podílem chromu. Přítomny jsou také velmi drobné karbidy o velikosti asi 100 nm, u kterých však vzhledem k rozlišení mikroskopu (maximálně 95 nm/pixel) a fyzikálním

omezením světelné mikroskopie nelze velikost a plochu určit přesněji. Dále byly pozorovány nekovové inkluze). Mohlo na základě jejich kulovitěho tvaru jednat o oxidické vměstky.

Pro zvýraznění mikrostruktury byl vzorek naleptán elektrolyticky pomocí tzv. Wallnerova činidla. Struktura základního materiálu (obr. 64) odpovídá udávanému tepelnému zpracování +QT2, jedná se o temperovaný martenzit – na mikrofotu zobrazen jako bílé oblasti. Černě ohraničené oblasti jsou karbidy, jejichž hranice jsou více naleptány a rozptylují větší množství dopadajícího záření. Samotné karbidy vystupují na základě analýzy výškového profilu nad povrch vzorku v důsledku jejich vyšší chemické odolnosti. U nenaleptaných vzorků je však povrch karbidických částic naopak níže než povrch vzorku, možné je, že dochází k jejich částečnému vydrolení během broušení a leštění.



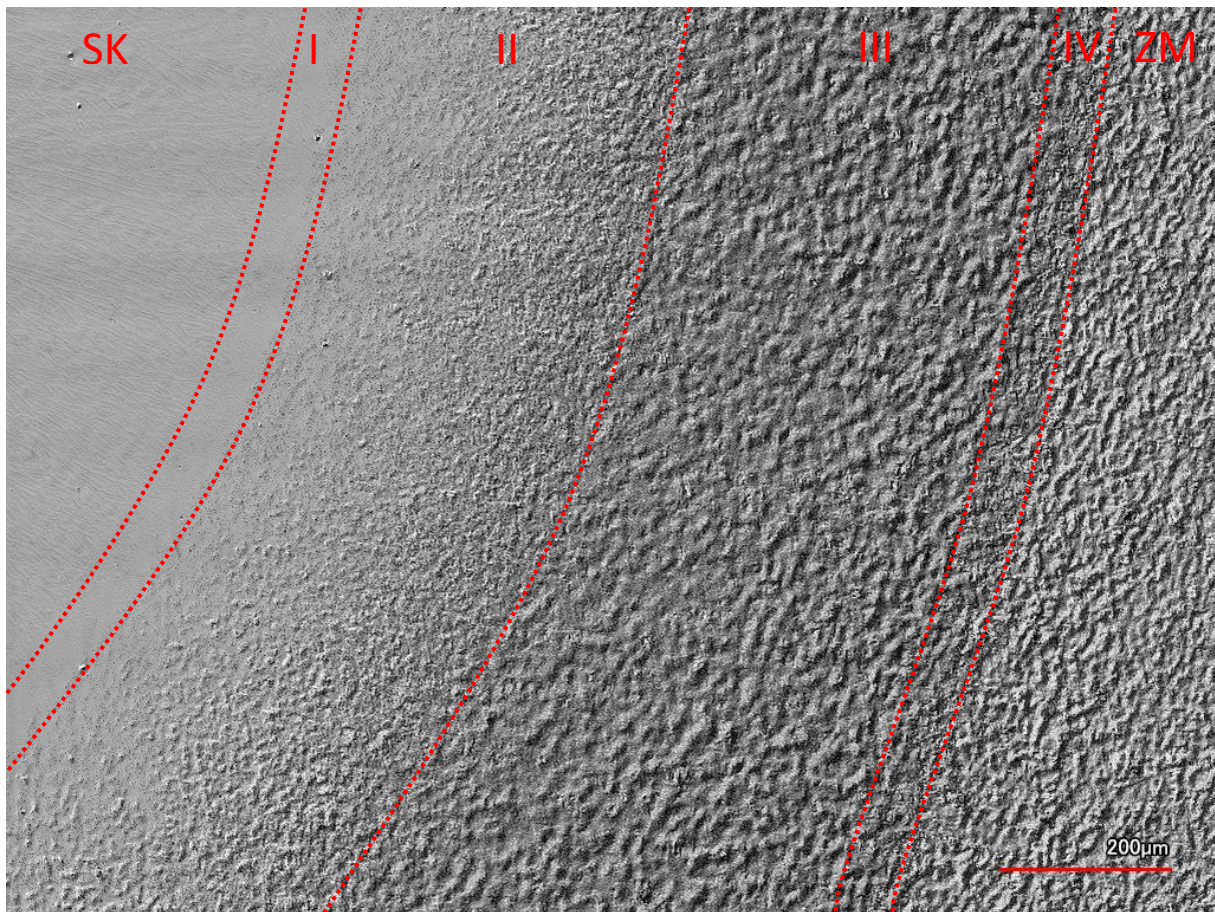
Obr. 64: Mikrostruktura základního materiálu X22CrMoV12-1

Na optických snímcích nejsou patrné oblasti zbytkového austenitu ani při použití odlišných leptadel. Pravděpodobně se rozměrově jedná o oblasti podobné karbidům, nelze je však jednoznačně odlišit. Pro určení jeho obsahu by mohlo být použito metod elektronové mikroskopie. V případě, že však není patrné ve struktuře síťoví, případně větší oblasti zbytkového austenitu, nedochází k výraznějšímu negativnímu ovlivnění mechanických vlastností materiálu.

4.3.2 Tepelně ovlivněná oblast

V tepelně ovlivněné oblasti svarů lze pozorovat 4 subzóny. Na obrázku č. 65 je zachycen přechod mezi základním materiálem a svarovým kovem v hlavové oblasti vzorku 18 (leptáno GE Turbo-martenzit, který napadá především temperovaný martenzit a difúzní produkty, tedy zejména karbidy). V příloze 9 je zachycen tentýž vzorek na snímku ve viditelném světle s ponechanými hranicemi oblastí pro srovnání. Fotografie je pořízena metodou Nomarského diferenciálního interferenčního kontrastu (DIC), který zobrazuje tvar povrchu vzorku. Červené tečkované linie značí přibližnou polohu jednotlivých strukturně odlišných oblastí. Strukturou

svarového kovu (na obrázku „SK“) se zabývá další kapitola, struktura základního materiálu („ZM“) je popsána v předchozí kapitole.



Obr. 65: Mikrostruktura TOO hlavy svaru 18

První ve směru od svarového kovu je zóna částečného natavení (označeno „I“). Materiál je zde při procesu svařování složen z δ -feritu a taveniny. Při ochlazování dochází k jeho přeměně na austenit. Tento proces je řízen difúzními pochody a při vysokých ochlazovacích rychlostech zpravidla nedochází k dokonalé transformaci, proto se ve struktuře této oblasti nachází δ -feritu i při pokojové teplotě. Austenit dále při ochlazování transformuje na martenzit, u kterého je očekávána poměrně jemná struktura, avšak v rámci světelné mikroskopie ji nelze s jistotou potvrdit. Kromě δ -feritu se ve struktuře může nacházet také zbytkový austenit. Na obrázku se tato oblast jeví jako prakticky plochá pravděpodobně díky přítomnosti velmi tvrdého martenzitu (vysoká teplota, vyšší obsah uhlíku vlivem rozpuštění karbidů)

Dále od svarového kovu se v tepelně ovlivněné oblasti nachází přehřáté (hrubozrnné) pásmo (označeno „II“). Vlivem vysokých teplot a absence precipitátů, které zabraňují růstu zrna dochází k hrubnutí struktury. Výsledná velikost zrna je závislá na teplotě a výdrži na ní, vzhledem k vysokým tepelným gradientům však lze předpokládat pouze mírné zhrubnutí zrna, zejména ve srovnání s konvenčními metodami svařování. Austenit v této oblasti transformuje na hrubý martenzit (vysoká počáteční teplota), rozpuštěné karbidy navíc obohacují tuhý roztok o uhlík zvyšující tvrdost vznikajícího martenzitu.

Jemnozrnná oblast je na fotografii označena „III“. Jedná se oblast, ve které vlivem precipitátů a nižší teploty nedochází k výraznému hrubnutí zrna. Struktura se skládá z austenitu, který následně transformuje na poměrně jemný martenzit. V rámci této oblasti lze na některých snímcích pozorovat postupný pokles obsahu karbidů ve směru ke svarovému kovu. Materiál

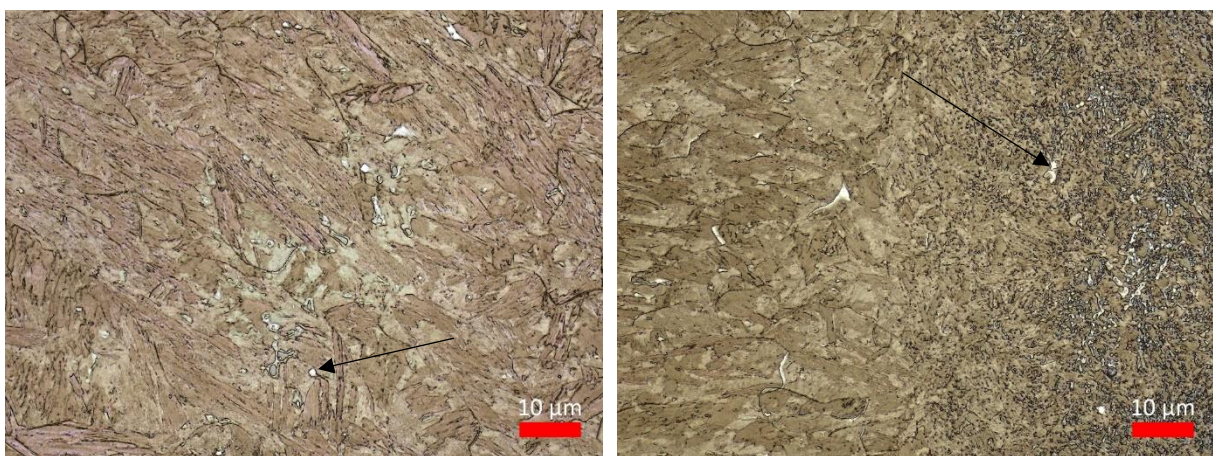
v této oblasti je nejvíce náchylný ke creepu, neboť obsahuje nižší množství precipitátů, menší zrna ve srovnání s hrubozrnnou oblastí také snižuje odolnosti proti creepu. Nejkritičtější je oblast nad teplotou A_{c3} , při které by mělo docházet k plnému rozpuštění hlavního precipitátu $M_{23}C_6$. Na obrázku se jeví jako oblast s hrubší strukturou pravděpodobně v důsledku odlišné struktury (karbidy, méně tvrdý martenzit).

V oblasti „IV“ dochází pouze k částečné přeměně výchozí struktury na austenit, který následně transformuje na jemný martenzit. V této oblasti lze pozorovat původní temperovaný martenzit v kombinaci s nově vzniklým martenzitem, jehož obsah vzrůstá směrem od základního materiálu ke svarovému kovu. Může také docházet k hrubnutí přítomných precipitátů, avšak vzhledem k času výdrže na teplotě nad A_{c1} lze očekávat malou intenzitu tohoto jevu.

Obvykle je do tepelně ovlivněné oblasti řazena i vyžíhaná zóna, ve které dochází vlivem teplot těsně pod teplotou A_{c1} k poklesu tvrdosti vlivem vyžíhání materiálu. Docházet může také k celkovému hrubnutí struktury. Vzhledem k tepelnému zpracování základního materiálu +QT2, které dle atestu materiálu zahrnovalo žíhání na teplotě 675 °C po dobu 175 minut, a době setrvání na této teplotě při svařování v řádu jednotek sekund, nelze očekávat výskyt této zóny. Při hodnocení mikrostruktury nebyly pozorovány změny struktury odpovídající popuštění materiálu oproti výchozímu stavu. Některé vzorky sice vykazují mírný pokles tvrdosti na hranici základního materiálu a TOO, avšak v rámci rozptylu hodnot měření nelze s jistotou tvrdit, že dochází k popuštění v této zóně.

Provedena byla také podrobnější analýza mikrostruktury částečně natavené oblasti s cílem identifikovat a určit případný obsah δ -feritu (případně zbytkového austenitu) pro účely porovnání jednotlivých svarů. Zviditelnění bylo provedeno pomocí barevného leptání činidlem Beraha. Bílou barvou by měly být po naleptání zobrazeny oblasti δ -feritu, hnědě/oranžově pak oblasti martenzitu. Na obrázku č. 66 jsou porovnány snímky oblastí na hranici svarového kovu a tepelně ovlivněné z hlavové a kořenové části svaru 28 (vlevo hlava, vpravo kořen).

Černou šipkou jsou na obrázku označeny (jako příklad) oblasti pravděpodobné ostrůvky δ -feritu. Tyto oblasti tvarem a rozložením poměrně dobře odpovídají příkladům v literatuře. V případě menších bílých oblastí, četnějších v tepelně ovlivněné oblasti kořene, se nejspíše nejedná o ostrůvky δ -feritu, ale o zbytkový austenit, pro potvrzení domněnky však bude nutné využít metod elektronové mikroskopie. Vzhledem k faktu, že však ani δ -ferit, ani zbytkový austenit netvoří souvislejší oblasti nebo sít'ové, nedochází pravděpodobně k výraznému negativnímu ovlivnění vlastností v této oblasti.



Obr. 66: Srovnání mikrostruktury hranice SK-TOO vzorku 28

Na několika svarech bylo určeno množství výše zmiňovaných fází prostřednictvím obrazové analýzy na naleptaném vzorku. Jejich relativní plocha se pohybovala v jednotkách procent,

příčemž u svarů s použitým dohřevem se v hlavové oblasti jeví tyto fáze četnější. Při porovnání jejich obsahu v rámci svaru je vyšší koncentrace zaznamenána v kořenové části než v oblasti hlavy, pravděpodobně z důvodu vyšší rychlosti ochlazování kořene. Vždy se však jedná o výsledky získané z vyhodnocení poměrně malé plochy, a i v rámci blízkých oblastí byly zaznamenány značné rozdíly.

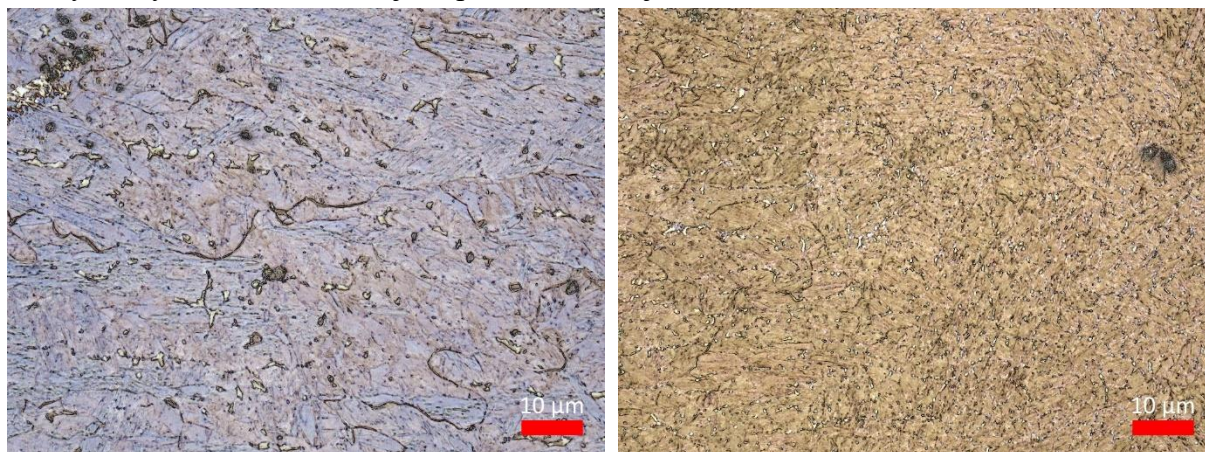
4.3.3 Svarový kov

Ve svarovém kovu (mikrostruktura viz. obr. 67, vzorek 28, leptáno 10 ml H₂O₂, 40 ml HCl, 50 ml H₂O pod dobu 2 s). Je pozorována dendritická struktura, orientovaná ve směru tepelného gradientu, v kořenové oblasti kolmo k ose svaru, v hlavové pak směrem k povrchu. Na snímcích je patrné strukturní rozhraní mezi vrchní, rozšiřující se částí a rovnoběžnou částí v oblasti kořene způsobené různými podmínkami při chladnutí.



Obr. 67: Dendritická struktura svarového kovu

Na obrázku 68 je zobrazena detailní mikrostruktura v oblasti hlavy (vlevo) a kořene (vpravo). Leptáno činidlem Beraha, doba leptání 13 s. Hnědé oblasti by měly označovat při tomto leptání oblasti bainitu, který se však vzhledem ke kritickým rychlostem ochlazování pro vznik martenzitu (viz ARA diagram) nedá ve struktuře předpokládat. Jedná se pravděpodobně o důsledek nerovnoměrného leptání, jehož pravděpodobné příčiny plynou z proměnlivého času leptání a také proměnlivého složení činidla při procesu leptání. Nerovnoměrným naleptáním vznikají na povrchu interferenční vrstvy různých tloušťek, které jsou pozorovatelné jako oblasti s odlišnou barevností.

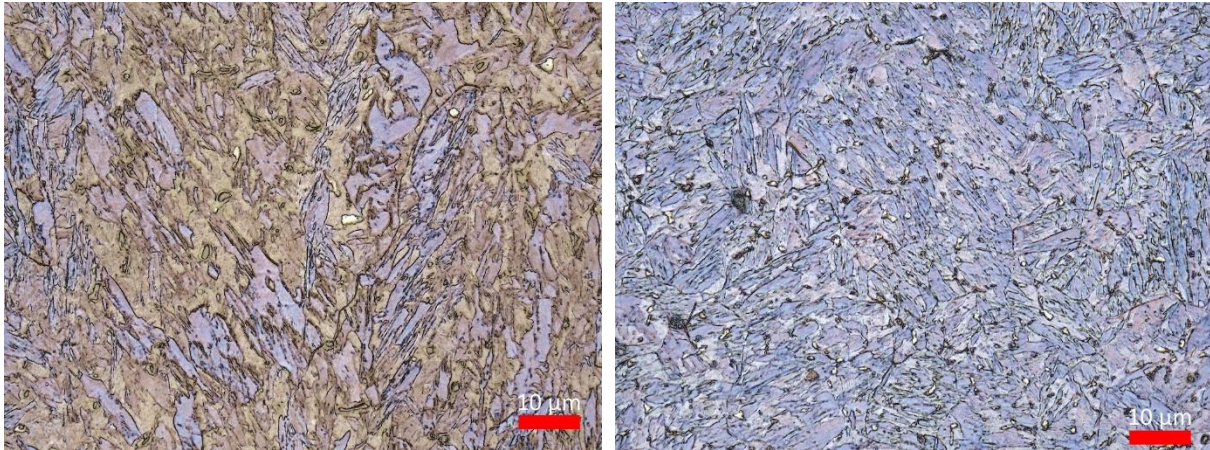


Obr. 68: Svarový kov svaru 30 v hlavové a kořenové oblasti

Ve svarovém kovu je opět patrná přítomnost ostrůvků δ -feritu, přičemž v oblasti hlavy se vyskytují hrubší, avšak v menším počtu než v kořenové oblasti. Nutné je však zmínit, že i v rámci konkrétní oblasti svaru je struktura značně heterogenní a značně se liší. Pro srovnání jednotlivých svarů je na obr. 69. snímek mikrostruktury z oblasti hlavy (v ose svaru) a kořene. Opět je patrná nerovnoměrná barevnost leptání, na jejím základě tak nelze v tomto případě vyvozovat žádné závěry.

V oblasti hlavy je viditelné menší množství δ -feritu (zbytkového austenitu) v matici jak ve srovnání s kořenem téhož svaru, tak se svarem 30. Nižší množství těchto fází (byť hrubších) bylo zaznamenáno i na dalších svarech ovlivněných teplem vneseným obloukem.

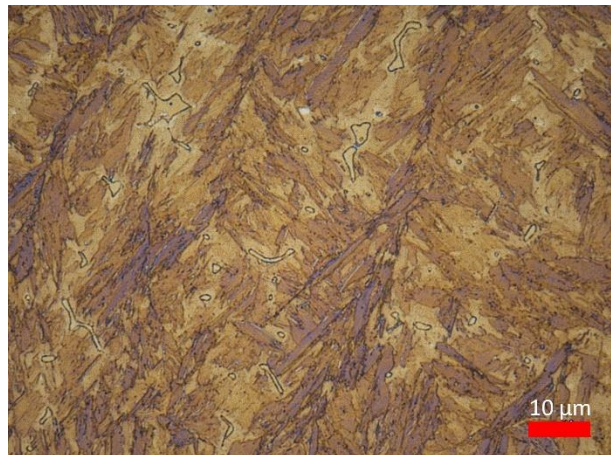
Pravděpodobnou příčinou je nižší rychlost ochlazování, která umožňuje delší výdrž na teplotě potřebné pro průběh transformačních řízených difúzí. I v oblasti kořene je pozorován nižší výskyt δ -feritu u svarů s vyšším vneseným teplem, avšak vzhledem k heterogenitě struktury ve svarovém kovu bude případně nutné tuto domněnku potvrdit obrazovou analýzou na více oblastech a statistickým vyhodnocením.



Obr. 69: Svarový kov svaru 14 v hlavové a kořenové oblasti

Při porovnání mikrostruktur na obrázcích 68 a 69 se jeví mikrostruktura svaru 14 jako hrubší, což je v souladu s očekávaným účinkem vyššího vneseného tepla oproti svaru 30. Ve struktuře svarového kovu lze pozorovat také černé body velikostí podobné karbidům přítomným v základním materiálu (i na vzorcích leptaných jinými metodami). Nejvíce zastoupený karbid $M_{23}C_6$ se však plně rozpouští již při teplotě normalizace okolo 1100 °C. Jednat se může o karbidy vanadu a molybdenu, které mají vyšší teplotu tavení (cca 2000 °C). Je také možné, že vzhledem k velmi krátkému času výdrže na teplotě, při které probíhá jejich rozpouštění, nemusí dojít k úplnému rozpuštění karbidů z původního materiálu. Možnost nové precipitace karbidů je pravděpodobně omezena velmi krátkým časem výdrže na potřebné teplotě.

Při porovnání mikrostruktury svarového kovu svaru metodou TIG (obr. 70) je patrná hrubší struktura ve srovnání se svary LATIG, což je způsobeno vyšším vneseným teplem, tedy delším časem výdrže v oblasti vysoké teploty. Opět leptáno činidlem Beraha s odlišným výsledkem, δ -ferit je pouze ohraničen, ovšem splývá barevně s matricí, jeho obsah se zdá porovnatelný předchozími vzorky, rozložení je v rámci svarového kovu také značně nerovnoměrné. Rozdílné barvy martenzitu v matrici jsou pravděpodobně způsobeny odlišnou orientací zrn, tedy různou tloušťkou interferenční vrstvy, na výsledek leptání tímto činidlem má také vliv postup oplachu vzorku před leptáním.

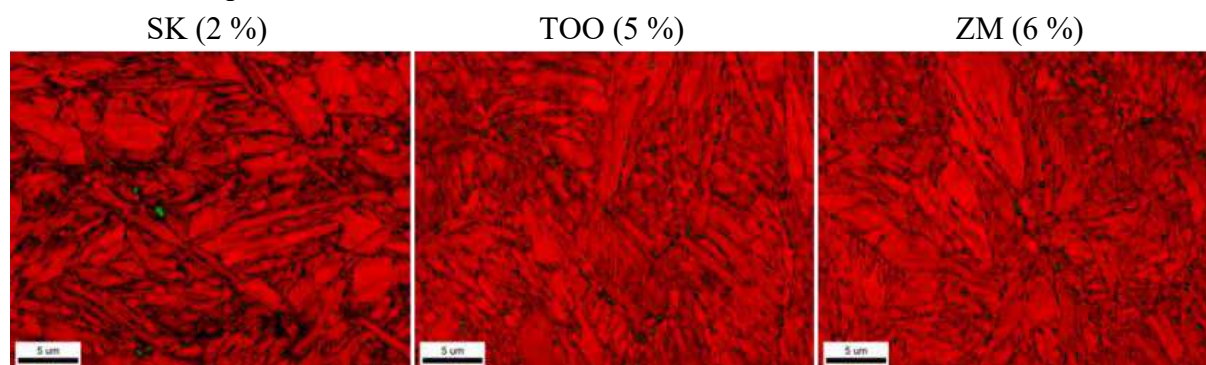


Obr. 70: Mikrostruktura SK TIG svaru

I když nebylo provedeno statistické vyhodnocení obsahu δ -feritu a zbytkového austenitu ve svarovém kovu, nebyly na žádném z pozorovaných vzorků nalezeny souvislejší oblasti, případně síťové těchto fází, které by mohlo negativně ovlivňovat mechanické vlastnosti svarového kovu.

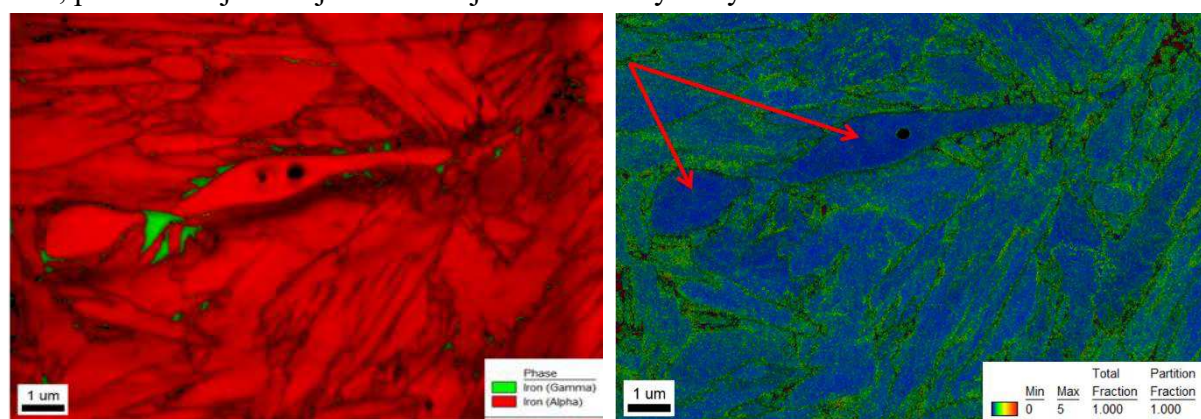
4.3.4 Hodnocení mikrostruktury elektronovou mikroskopií

Vzhledem k časové náročnosti pořízení snímků a času potřebnému k vyhodnocení byla provedena podrobnější analýza pouze na vzorku č. 24, zejména pro ověření domněnky a získání představy o množství δ -feritu a zbytkového austenitu v jednotlivých částech svaru. Na obrázku č. 71 je EBSD snímek oblastí ze svarového kovu, tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu, barevnost – červená BCC mřížka, zelená FCC, délka měřítka 5 μm . V závorce je vyjádřena relativní plocha struktury s FCC mřížkou (austenit). Jedná se však o hodnoty z konkrétního snímku a pro kvantitativní hodnocení zbytkového austenitu by bylo nutné hodnotit více vzorků. Z těchto snímků je patrná přítomnost zbytkového austenitu ve všech oblastech, přičemž v základním materiálu je rozložen rovnoměrně v malých oblastech, ve svarovém kovu spíše nerovnoměrně a ve větších celcích.



Obr. 71: EBSD snímky struktury svaru v jednotlivých oblastech (délka měřítka 5 μm)

Druhým cílem použití elektronové mikroskopie bylo odlišení oblastí, ve kterých se vyskytuje δ -ferit a zbytkový austenit. K tomuto účelu byla opět použita metoda EBSD, kdy na základě vyhodnocení krystalové mřížky lze odlišit austenit od martenzitu a feritu, ferit od martenzitu je odlišován pomocí tzv. Kernel average misorientation map, která zjednodušeně vyjadřuje hodnotu vnitřních napětí v mřížce. Na obrázku č. 72 je vlevo zobrazena mapa krystalové mřížky (BCC červeně, FCC zeleně), vpravo pak KAM mapa, modré oblasti dosahují nižší misorientace mřížky (nižších vnitřních napětí), přičemž δ -ferit má oproti martenzitu hodnotu tohoto parametru nižší. Na základě této analýzy byly označené oblasti určeny jako δ -ferit, poměrně zajímavá je dekorace jeho hranic zbytkovým austenitem.



Obr. 72: Analýza oblasti s předpokládaným výskytem δ -feritu

Pro statistické vyhodnocení obsahu δ -feritu ve svaru by však z hlediska časové náročnosti a vyhodnocení bylo vhodnější zvolit činidlo selektivně napadající pouze δ -ferit, avšak ani při otestování velkého počtu leptadel nebylo takové nalezeno.

4.4 Technicko-ekonomické zhodnocení

Z předchozího strukturního rozboru a vizuální kontroly se jeví jako nejvhodnější svary provedené rychlostí 20 mm.s^{-1} , na základě čehož bylo zpracováno také srovnání se současně využívanou technologií TIG. Dále je vycházeno z hodinových nákladů na zařízení a obsluhu, ve kterých jsou zahrnuty odpisy strojního zařízení, potřebné energie, procesní plyny, mzda operátora, odpisy, režie, daňové náklady a také ziskovost.

Tab. 8: Odhadované náklady na provedení 1 m svaru

		TIG	laser	LATIG
sazba svařování	[Kč.hod ⁻¹]	400	3500	3600
svařovací rychlost v_s	[mm.s ⁻¹]	2	20	20
sazba příprava	[Kč.hod ⁻¹]	200	200	200
příprava ploch	[mm.s ⁻¹]	2	0	0
přípravkování	[min.m ⁻¹]	10	15	15
přídavný mat.	[kg.m ⁻¹]	0,063	0	0
cena př. mat.	[Kč.kg ⁻¹]	200	0	0
sazba obrábění	[Kč.hod ⁻¹]	1500	1500	1500
obrábění	[min.m ⁻¹]	10	5	4,8
jednotková cena svařování	[Kč.m ⁻¹]	55,6	48,6	50,0
jednotková cena příprava	[Kč.m ⁻¹]	61,1	50,0	50,0
jednotková cena př. mat	[Kč.m ⁻¹]	12,5	0,0	0,0
jednotková cena obrábění	[Kč.m ⁻¹]	250,0	125,0	120,0
jednotková cena	[Kč.m ⁻¹]	379,1	223,6	220,0

V tabulce č. 8 jsou uvedeny odhadované náklady na zhotovení 1 m svaru. Zásadní výhodou svařování laserem je jeho násobně vyšší rychlost, která kompenzuje vyšší náklady na provoz zařízení. Dále jsou také náklady sníženy odstraněním přípravy svarových ploch, do ceny přípravy je zahrnuto i upnutí do svařovacího přípravku, které lze očekávat složitější v případě robotizované technologie než v případě ručního svařování. V případě obrábění je očekávána úspora v důsledku omezení přídavků na obrábění (úspora i laser x LATIG).

Z výše uvedených úvah se jeví jako nejvýhodnější svařování hybridní metodou laser-TIG, která má nejnižší cenu za 1 m svaru. Do úvahy nebyl zahrnut vliv lidského faktoru na kvalitu ručního svařování, který může mít za následek poměrně vysoké dodatečné náklady spojené se vznikem neshodných výrobků, který je v případě robotizovaných metod omezen.

5 ZÁVĚRY

V první části práce byla popsána technologie laserového hybridního svařování laser-TIG, včetně používaných zdrojů laserového záření. Dále byly shrnuty vlastnosti a charakterizována svařitelnost martenzitické oceli X22CrMoV12-1 a také popsány metody nedestruktivního a destruktivního zkoušení svarů.

Z výsledků provedených experimentů lze konstatovat, že při použití svařovací technologie laser-TIG lze docílit svarů vyhovujících požadavkům. Z testovaných parametrů se při výkonu laseru 2 kW a tloušťce materiálu 5 mm jeví jako optimální hodnoty procesních parametrů svařovací rychlost $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a proud obloukem TIG 40 A. Při této rychlosti dochází k dostatečně kvalitnímu provaření kořenové oblasti a zároveň se zbytečně nerozšiřuje tepelně ovlivněná oblast a oblast svarového kovu. Deformace tohoto svaru byly nízké.

Na provedených svarech nebyla i přes vysokou tvrdost v TOO a SK zjištěna zvýšená praskavost, která je jedním z hlavních problémů při konvenčním svařování tohoto materiálu. Pravděpodobně se tak děje v důsledku úzké oblasti svarového kovu a svařování na jeden průchod, což omezuje tepelné deformace a zbytková napětí.

Na základě rozboru geometrických parametrů svarů lze konstatovat lineární závislost plochy svarového kovu na vneseném teple. Šířky jednotlivých oblastí svaru jsou sice pravděpodobně také závislé na vneseném teple, avšak z uvedených výsledků nelze určit detaily závislosti. S rostoucím vneseným teplem dochází k rozšíření všech oblastí svaru, přičemž oblouk TIG má hlavní vliv na oblast do hloubky cca 2 mm pod vrchním povrchem vzorku.

V mikrostruktuře svaru byl pozorován výskyt δ -feritu a zbytkového austenitu celkově v řádu jednotek procent, což je v částečném rozporu se Schaefflerovým diagramem, který však není konstruován pro vysoké rychlosti ochlazování. Zbytkový austenit je běžnou součástí všech materiálů po martenzitické transformaci. Vzhledem k jejich nehomogennímu rozložení a malému počtu vzorků nelze jejich přesný obsah stanovit, avšak na základě jejich výskytu v poměrně malých, oddělených oblastech není očekáván jejich negativní vliv. Zásadnější ovlivnění struktury materiálu vzorku obloukem TIG nebylo pozorováno, snížení rychlosti ochlazování není pravděpodobně dostatečné k výraznému ovlivnění mikrostruktury.

Pro ověření dalších vlastností svaru a stanovení potřeby případného tepelného zpracování by bylo nutné provést další zkoušky. Jedná se zejména o zkoušku rázem v ohybu, avšak vzhledem k poměrně nízké hodnotě nárazové práce základního materiálu je očekávána i nízká houževnatost svarového kovu. Vhodné by bylo také provést zkoušky odolnosti proti creepu.

Použití hybridní technologie laser-TIG má zásadní efekt na podobu svaru, kdy jsou zachovány výhody laserového svařování, tedy vysoká štíhlost svaru a svary bez výraznějších vad, avšak vlivem obloukové technologie dochází k vytvoření hladkého, rovnoměrného povrchu svaru, což snižuje případné nároky na dodatečné úpravy svarů. Kvalitnější povrch také vede díky omezení vrubů k vyšší odolnosti proti únavě cyklickým namáháním.

SEZNAM LITERATURY [68]

1. Roční zpráva o provozu ES ČR 2018. In: *Energetický regulační úřad* [online]. Praha: Energetický regulační úřad, 2019, 2019 [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf/
2. KLÍMA, Petr. *Parní turbíny* [online]. Brno, 2013 [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/23938>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Jan Fiedler.
3. MRŇA, Libor. Konzultace s vedoucím práce. Brno, 2020-02-25
4. Parní kondenzační turbíny - PBS. *PBS - Mnoho podob přesného strojírenství* [online]. Praha: PBS GROUP, ©2017 [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <https://www.pbs.cz/cz/produkty/energetika/turbiny/parni-kondenzacni-turbiny>
5. Parní turbíny. EKOL, spol. s r.o. - Energetika a ekologie pro budoucnost [online]. Brno: EKOL, 2020 [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <https://www.ekolbrno.cz/cz/s1403/Produkty-a-sluzby/c2346-Parni-turbiny>
6. Turbína s levitujícím rotorem. *Energo online SIEMENS Česká republika* [online]. Praha, 2020, 2017 [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <https://www.siemens.cz/energo/turbina-s-levitujicim-rotorem>
7. Český Siemens dodá turbíny do Polska. *Tiskové centrum SIEMENS* [online]. Praha, 2020, 2006 [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <https://www.siemens.cz/press/cesky-siemens-doda-turbiny-do-polska>
8. Narrow-gap TIG welding of P92. In: *Joining Innovation with Expertise - TWI* [online]. Cambridge: TWI, c2020, 2013 [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/images/00022/844187.jpg>
9. Svařování laserovým paprskem. In: *TRUMPF GmbH + Co. KG* [online]. Ditzingen: TRUMPF, c2020 [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/
10. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s.: il. ISBN 80-85771-81-0.
11. TIG Welding Process | SAF-FRO. *SAF-FRO | the expert for industrial Welding and Cutting* [online]. SAF-FRO, c2020 [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: <https://www.saf-fro.com/processes/tig-welding-process>
12. DENAULT, Martin. Welding Well - Addressing Welding Challenges with 400-Series Stainless Steel. *MetalForming Magazine* [online]. Independence, Ohio: PMA Services, ©2020, July 1, 2018 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: https://www.metalformingmagazine.com/magazine/article/?/2018/7/1/Addressing_Welding_Challenges_with_400-Series_Stainless_Steel
13. Svařování MIG/MAG, svařovací vybavení. *Svařovací přístroje, svařovací techniku, svařovací hořáky - EWM AG* [online]. Mündersbach: EWM, ©2017 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://www.ewm-group.com/cs/fachwissen/mig-mag-schweissen-grundlagen.html>
14. Plasma Welding Process. *Oerlikon | The expert for industrial Welding and Cutting* [online]. Cleveland: Oerlikon, ©2020, 3. března 2020 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://www.oerlikon-welding.com/processes/plasma-welding-process>
15. MRŇA, Libor. *Dělení a svařování svazkem plazmatu* [online]. Brno: Odbor technologie svařování ÚST FSI VUT Brno, 2013 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_deleni_a_svarovani_plasmou_2013_mrna.pdf

16. VINCENT, Peter. Electron Beam Welding: Advantages & Disadvantages. *Electron Beam Welding Experts - Electron Beam Processes* [online]. Woking: Electron Beam Processes, ©2018, Oct 24, 2018 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <http://blog.ebpglobal.com/electron-beam-welding-advantages-disadvantages>
17. MRŇA, Libor. *Svařování svazkem elektronů* [online]. Brno: Odbor technologie svařování ÚST FSI VUT Brno, 2013 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_svazkem_elektronu_2013_mrna.pdf
18. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Laserové svařování I. In: *LAO - lasery a optika* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2014, 18. 02. 2013 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
19. NÁHLOVSKÁ, Marcela. Revoluce ve svařování laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2018, 07.02.2018, (1), 48 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/revoluce-ve-svarovani-laserem.html>
20. KANNATEY-ASIBU, Elijah. *Principles of laser materials processing*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2009. Wiley series on processing of engineering materials. ISBN 978-0-470-17798-3.
21. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIEALK. *Laserové technológie*. Bratislava: STU v Bratislave, 2000, 122 s. ISBN 80-227-1425-9.
22. REICHEL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Typy laserů. *Encyklopedie fyziky* [online]. ©2006-2020, 2006 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/785-typy-laseru>
23. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení. In: *LAO - lasery a optika* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2014, 19. 02. 2013 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-127>
24. STEEN, William M. *Laser Material Processing*. 2 ed. London: Springer, 1998, 346 s. ISBN 3-540-76174-8.
25. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *LAO - lasery a optika* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2014, 19. 02. 2013 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
26. VAN DIJK, Martien H. H. Disc versus fiber. *Industrial Laser Solutions*. PennWell Corporation, 2005, 20(1), 18-21. ISSN 15234266. Dostupné také z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=15741157&lang=cs&site=ehost-live>
27. PASCHOTTA, Rüdiger. Thin-disk Lasers. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology* [online]. 2017 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/thin_disk_lasers.html
28. RATH, Wolfram. Fiber Laser Welding Cuts Costs and Improves Results. *Photonics.com: Optics, Lasers, Imaging & Fiber Information Resource* [online]. Pittsfield: Laurin Publishing Co., 2018, 4.12.2017 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.photonics.com/a61928>
29. *IPG Photonics* [online]. Oxford, MA: IPG Photonics Corporation, ©2020 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en>
30. ČSN EN ISO 4063 (050011) *A Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
31. ZHANG, Yan-xi, Sang-woo HAN, Jason CHEON, Suck-joo NA a Xiang-dong GAO. Effect of joint gap on bead formation in laser butt welding of stainless steel. *Journal of*

- Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2017, 249, 274-284 [cit. 2020-04-01]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.05.040. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013617302145>
32. OLSEN, Flemming Ove. *Hybrid Laser-Arc Welding* [online]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009 [cit. 2020-03-31]. ISBN 978-1-84569-370-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHLAW0001/hybrid-laser-arc-welding/hybrid-laser-arc-welding>
 33. Gas tungsten arc welding. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001, 12 January 2006 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_tungsten_arc_welding
 34. KLAS, Weman. TIG Welding. *Welding Processes Handbook* [online]. 2nd Edition. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012, [cit. 2020-03-31]. ISBN 978-0-85709-518-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpWPHE0001/id:kt00BT3IXD/welding-processes-handbook/tig-welding?kpromoter=Summon>
 35. Svařování. *Fluxamat s.r.o.* [online]. Velká Bystrice: Fluxamat, ©2019 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://www.fluxamat.cz/svarovani>
 36. KAH, Paul, Antti SALMINEN a Jukka MARTIKAINEN. The effect of the relative location of laser beam with arc in different hybrid welding processes. *Mechanika* [online]. KAUNAS UNIV TECHNOL, 2010, 83(3), 68-74 [cit. 2020-03-31]. ISSN 1392-1207. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=52769115&lang=cs&site=ehost-live>
 37. YAN, Jun, Ming GAO a Xiaoyan ZENG. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser -TIG hybrid welding. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. Elsevier, 2010, 48(4), 512-517 [cit. 2020-04-06]. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.08.009. ISSN 0143-8166. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143816609002073>
 38. TIAN, Z.L, C COUSSEMENT, M DE WITTE a M STEEN. Creep behaviour of 12Cr-Mo-V steel weldments. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. Elsevier, 1991, 46(3), 339-348 [cit. 2020-04-06]. DOI: 10.1016/0308-0161(91)90077-F. ISSN 0308-0161. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030801619190077F#>
 39. ČSN EN 10302 (420917) *A Žáropevné oceli, niklové a kobaltové slitiny*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
 40. HALD, John. Microstructure and long-term creep properties of 9–12% Cr steels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. Elsevier, 2008, 85(1), 30-37 [cit. 2020-04-09]. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2007.06.010. ISSN 0308-0161. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016107000634>
 41. VODÁREK, Vlastimil. *Fyzikální metalurgie modifikovaných (9-12) % Cr ocelí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0329-1.
 42. DILTHEY, U., A. BRANDENBURG a D. PIONTEK. Laser Beam Welded Cooling Structure Components made of Martensitic High-Temperature Steels. *Welding in the World* [online]. 2004, 48(3-4), 23-27 [cit. 2020-04-09]. DOI: 10.1007/BF03266423. ISSN 0043-2288. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03266423>
 43. FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. Brno: CERM, 1996, 261 s.: obr., tabulky, grafy. ISBN 80-85867-95-8.
 44. MILLICAN, Kevin. *Schaeffler Diagram* [Program v MS Excel]. In: 2013 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <http://web.millican.info/schaeffler-diagram>

45. BAKIC, G., V. Sijacki ZERAVCIC, M.B. DJUKIC, et al. Material Characterization of the Main Steam Gate Valve Made of X20CrMoV 12.1 Steel after Long Term Service. In: *Procedia Materials Science* [online]. 2014, 3, s. 1512-1517 [cit. 2020-04-13]. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.244. ISSN 22118128. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211812814002454>
46. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s.: il.; 30 cm. ISBN 80-85771-85-3.
47. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s.: il., čb. fot. ISBN 978-80-227-3167-6. ČSN EN 1011-2 (052210) *A Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
48. ČSN EN 1011-2 (052210) *A Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
49. ČSN EN 1011-3 (052210) *A Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 3: Obloukové svařování korozivzdorných ocelí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
50. SORRENTINO, S. 9 - *Welding technologies for ultra-supercritical power plant materials*. Woodhead Publishing, 2017, s. 247-319. DOI: 10.1016/B978-0-08-100552-1.00009-9. ISBN 978-0-08-100552-1. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005521000099>
51. LEE, Byeong-Joo. *Calculated Phase Diagram Database* [online]. Pohang: Pohang University of Science and Technology [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <http://steel.ndsl.kr/index.htm>
52. ČSN EN 1011-6 (052210) *A Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 6: Laserové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
53. ČSN EN ISO 12932 (050112) *A Svařování - Hybridní laserové svařování ocelí, niklu a niklových slitin - Určování stupňů kvality*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
54. XU, Jiajun, Youmin RONG, Yu HUANG, Pingjiang WANG a Chunming WANG. Keyhole-induced porosity formation during laser welding. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2018, **252**, 720-727 [cit. 2020-04-13]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.10.038. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013617304879>
55. KOLARÍK, Ladislav a Karel KOVANDA. Svařitelnost hliníkových slitin. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2011, (4), 18 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-hlinikovych-slitin.html>
56. PODHORA, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno - SMS, 2005, 97 s. ISBN 80-903-3864-X. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:d2183370-0a46-11e8-a0cf-005056827e52>
57. KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN ISBN978-80-7204-591-4. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:426bef80-f2e5-11e4-88cd-005056827e52>
58. MOLLIKOVÁ, Eva. *Zkouška tvrdosti dle Vickerse*. Brno: Ústav materiálových věd a inženýrství, FSI VUT v Brně, 2006. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>

59. LIČKOVÁ, Dagmar. *Vlastnosti a zkoušení materiálu: Vrbová houževnatost*. Ostrava, 2016. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~lic098/files/10.cviceni_VZM.pdf
60. PANTĚLEJEV, Libor. *Únava kovových materiálů* [online]. Brno: Ústav materiálových věd a inženýrství, FSI VUT v Brně, 2013 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/ukm/Unava_kovovych_materialu.pdf
61. MÍŠEK, Bohumil. *Nedestruktivní metody zkoušení svarových spojů*. Brno: TDS Brno - SMS, 2005, 77 s. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:d2183370-0a46-11e8-a0cf-005056827e52>
62. ČSN EN ISO 17635 (051170) *A Nedestruktivní zkoušení svarů - Obecná pravidla pro kovové materiály*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
63. ČSN EN ISO 17637 (051180) *A Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
64. Radiograph Interpretation - Welds. *NDE/NDT Resource Center* [online]. Ames (Iowa): Collaboration of for NDT Education, 2014 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/TechCalibrations/RadiographInterp.htm>
65. ŠKVRNA, Tomáš. *Současné ultrazvukové technologie NDT* [online]. Praha: TECH MEDIA PUBLISHING, ©2010-2020, 18. 10. 2011 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/247>
66. VÁZQUEZ, Rodrigo Gómez, Holger M KOCH a Andreas OTTO. Multi-physical Simulation of Laser Welding. *Physics Procedia* [online]. Elsevier B.V, 2014, 56(C), 1334-1342 [cit. 2020-06-09]. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.059. ISSN 1875-3892. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389214002041>
67. ČSN EN 1011-1 (052210) *A Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
68. *Citace PRO VUT v Brně* [online]. Brno: Citace.com, (c) 2012–2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz/>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Význam
A	[%]	Tažnost
CW	-	Kontinuální režim provozu laseru
DT	-	Destruktivní metody zkoušení
GMAW	-	Svařování tavící se kovovou elektrodou v ochranné atmosféře
GTAW	-	Svařování netavící se wolframovou elektrodou ochranné atmosféře
I_{TIG}	[A]	Proud elektrickým obloukem TIG
KV	[J]	Nárazová práce
LATIG	-	Hybridní technologie svařování laser-TIG
M_s	[°C]	Teplota martenzit start
NDT	-	Nedestruktivní metody zkoušení
PW	-	Pulzní režim provozu laseru
QCW	-	Kvazikontinuální režim provozu laseru
Q_{in}	[J.mm ⁻¹]	Celkové vnesené teplo
Q_{inlas}	[J.mm ⁻¹]	Teplo vnesené laserem
Q_{inTIG}	[J.mm ⁻¹]	Teplo vnesené metodou TIG
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
SK	-	Svarový kov
T_i	[°C]	Teplota interpass
TOO	-	Tepelně ovlivněná oblast
T_p	[°C]	Teplota přehřevu
U_{TIG}	[V]	Napětí oblouku TIG při svařování
v_s	[mm.s ⁻¹]	Svařovací rychlost
YAG	-	Yttrito-hlinitý granát
ZM	-	Základní materiál

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vlastnosti vybraných druhů laseru [21]	14
Tab. 2: Chemické složení a mechanické vlastnosti [39], skutečnost dle příloh 1 a 2	22
Tab. 3: Dělení vad dle ČSN EN ISO 12932 [53]	25
Tab. 4: Metody NDT dle ČSN EN ISO 17635 [62]	29
Tab. 5: Parametry při experimentu	34
Tab. 6: Rozměrové parametry a vady svarů na základě vyhodnocení makrostruktury.....	40
Tab. 7: Úhlová odchylka povrchu vzorků	42
Tab. 8: Odhadované náklady na provedení 1 m svaru	55

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: TIG a laserové svařování, parní turbína [6], [7], [8], [9]	9
Obr. 2: Obrobené rotorové kolo s umístěním svarů (čerchovaně) [3].....	10
Obr. 3: Svařování metodou TIG [11]	10
Obr. 4: Svařování MIG/MAG [12].....	11
Obr. 5: Plazmové svařování [14].....	11
Obr. 6: Svařování svazkem elektronů [16].....	12
Obr. 7: Hlava pro hybridní svařování [17]	12
Obr. 8: Schéma principu laseru [23].....	13
Obr. 9: Slab laser [25]	14
Obr. 10: Schéma diodového laseru [20]	15
Obr. 11: Soustava pro korekci divergence paprsku [20]	15
Obr. 12: Sestava čtyř diskových laserů [27].....	16
Obr. 13: Příčný řez vláknem [24].....	16
Obr. 14: Schéma vláknového laseru [28]	17
Obr. 15: Schéma laserového svařování [20].....	17
Obr. 16: Vliv vlnové délky a teploty na odrazivost a absorpci [20].....	18
Obr. 17: Režimy svařování laserem [18].....	18
Obr. 18: Schéma svařování TIG [33]	19
Obr. 19: Svar korozivzdorné oceli metodou TIG [35]	20
Obr. 20: Možnosti svařování LATIG [36]	21
Obr. 21: Řez rozložením energie v paprsku - módem [20]	21
Obr. 22: Schaefflerův diagram [44].....	22
Obr. 23: ARA diagram X22CrMoV12-1 [50]	23
Obr. 24: Efekt teploty na strukturu svařovaného materiálu [46], diagram [51]	24
Obr. 25: Vznik porozity vlivem keyhole [32]	25
Obr. 26: Krystalizační trhliny (Al slitina) [55].....	26
Obr. 27: Příklad vodíkem indukovaných lomů [20].....	27
Obr. 28: Zkouška tvrdosti dle Vickerse [56]	27
Obr. 29: Charpyho kladivo [59]	28
Obr. 30: Wöhlerova křivka [60]	29
Obr. 31: Podmínky vizuální zkoušky [57]	30
Obr. 32: Radiogram porézního svaru [64].....	30
Obr. 33: Vzorky po dělení.....	32
Obr. 34: Prostor robota	32
Obr. 35: Hlava pro svařování LATIG	33
Obr. 36: Umístění svarů na destičce.....	33
Obr. 37: Svary po svaření.....	34
Obr. 38: Připravený, naleptaný vzorek.....	36
Obr. 39: Makrofoto vzorku 10.....	36
Obr. 40: Makrofoto vzorku 18.....	37
Obr. 41: Makrofoto vzorku 20.....	37
Obr. 42: Makrofoto vzorku 28.....	38
Obr. 43: Makrofoto vzorku 34.....	38
Obr. 44: Makrofoto vzorku 38.....	39
Obr. 45: Makrofoto TIG svaru	39
Obr. 46: Graf závislosti geometrie svaru na celkovém vneseném teple.....	40
Obr. 47: Porovnání makrosnímků vzorků	41
Obr. 48: Úhlová odchylka povrchu vzorku 38	42
Obr. 49: Porovnání úhlové odchylky vzorků.....	42

Obr. 50: Umístění linií vtisků.....	43
Obr. 51: Průběh mikrotvrlosti na vzorku 18.....	43
Obr. 52: Průběh mikrotvrlosti na vzorku 24.....	44
Obr. 53: Porovnání svarového kovu 1 mm pod vrchním povrchem	45
Obr. 54: Porovnání tvrdosti svarového kovu 1,7 mm pod vrchním povrchem	45
Obr. 55: Porovnání hodnot tvrdosti svarového kovu 1 mm nad spodním povrchem.....	45
Obr. 56: Srovnání tvrdosti svarů při $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ v linii 1 mm od vrchního povrchu.....	46
Obr. 57: Srovnání tvrdosti svarů při $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ v linii 1,7 mm od vrchního povrchu..	46
Obr. 58: Srovnání tvrdosti svarů při $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ v linii 1 mm od spodního povrchu	46
Obr. 59: Osový průběh tvrdosti vzorku 18.....	47
Obr. 60: Osový průběh tvrdosti vzorku 24.....	47
Obr. 61: Osový průběh tvrdosti vzorku 10.....	47
Obr. 62: Závislost tvrdosti svarového kovu na celkovém vneseném teple	48
Obr. 63: Osová tvrdost svarů zhotovených při $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$	48
Obr. 64: Mikrostruktura základního materiálu X22CrMoV12-1	49
Obr. 65: Mikrostruktura TOO hlavy svaru 18.....	50
Obr. 66: Srovnání mikrostruktury hranice SK-TOO vzorku 28.....	51
Obr. 67: Dendritická struktura svarového kovu	52
Obr. 68: Svarový kov svaru 30 v hlavové a kořenové oblasti.....	52
Obr. 69: Svarový kov svaru 14 v hlavové a kořenové oblasti.....	53
Obr. 70: Mikrostruktura SK TIG svaru	53
Obr. 71: EBSD snímky struktury svaru v jednotlivých oblastech (délka měřítka 5 μm)....	54
Obr. 72: Analýza oblasti s předpokládaným výskytem δ -feritu	54

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Atest svařovaného materiálu
- Příloha 2: Rozbor chemického složení materiálu
- Příloha 3: Makrofota svarů s měřenou geometrií svaru.
- Příloha 4: Tvrdost svaru TIG
- Příloha 5: Průběh tvrdosti svarů při $v_s = 20 \text{ mm.s}^{-1}$
- Příloha 6: Průběh tvrdosti svarů při $v_s = 30 \text{ mm.s}^{-1}$
- Příloha 7: Průběhy osových tvrdostí svarů 2X a 3X
- Příloha 8: Nenaleptaný vzorek základního materiálu (150 x) - mikrostruktura
- Příloha 9: Mikrostruktura TOO hlavy svaru 18 (GE-Turbo-martenzit, 50 x)

YO36



BGH Polska Sp. z o.o.

BGH Polska Sp. z o.o. ul. Żelazna 9, PL - 40-851 Katowice

Siemens S.R.O.
odstepny zavod

Olomoucka 7/9
61800 Brno
Tschechien

Kunden-Bestell-Nr. 7000797458/10-1
Customer order no.
Zamówienie klienta nr 100624

BGH-Auftrags-Nr. 01760400101
BGH works no.
Nr zlecenia BGH

Zeugnis-Nr. 2318711
Certificate no.

Świadectwo odbioru nr
Bescheinigung über Werkstoffprüfung nach EN 10204
Certificate of material tests according to EN 10204 3.1
Świadectwo badań materiałowych wg EN 10204

Die Lieferung entspricht den vereinbarten Lieferbedingungen.
Delivery in accordance with the agreed terms of delivery.
Dostawa spełnia wymagania uzgodnione przy zamówieniu.

Zeichen des Lieferwerkes Stempel des Werkssachverständigen
Trade mark Inspector's stamp
Znak firmowy Stempel przedstawiciela kontroli



Erzeugnisform Product		Stab, flach, gestrahlt Flat bars, shot blasted										
Werkstoff / Quality / Material		1.4923 X22CrMoV12-1+QT2										
Anforderungen Requirements		TLV 9248 06 12/13 1.4923 X22CrMoV12-1+QT2 TLV 0110 11/13										
Besichtigung und Maßnachprüfung Inspection and dimensional control Kontrola powierzchni i wymiarów ohne Beanstandung without objection				Erschmelzung/Nachbehandlung Melting process/secondary refining Proces wytworzenia E- VOD				Verwechslungsprüfung (spectroanalytisch) Identification test (spectral-analysis) Kontrola zgodności gatunku spektrotastem ohne Beanstandung without objection				
Pos. / Item Poz.	Anzahl / Quantity Ilość sztuk	Abmessung / Dimension Wymiar								Gewicht / Weight Waga	Schmelz-Nr. / Heat-No Numer wytopu	
1	14	120 X 37								2612	kg	391436
Schmelz- Heat % Wytop		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V		
391436		0,206	0,35	0,70	0,007	0,0063	11,15	0,85	0,75	0,271		
Wärmebehandlungszustand Condition of heat treat		vergütet + spannungsarmgeglüht Hardened + tempered + stress relieved										
Prob-Nr	Lage	Temp	Rp0,2		Rm	A5	Z	Kerbschlagarbeit Impact value Udarność		Probenform Shape of test piece Rodzaj próby Charpy-V °C	Härte Hardness Twardość HBW	
Test-No		°C	N/mm ²		N/mm ²	%	%	J				
Soll/Req.	L		>=700		>=900 <=1050	>=11	>=35	>=20		RT °C	>=265 <=310	
132BC1	L	RT	830		986	17	55	30	29	28	RT	310
132BC2												302
132BC3	L	RT	827		983	17	54	32	28	31	RT	295
132BC4												308
132BC5												309
132BC6												306
132BC7												302
132BC8												295
132BC9												300
132BC10												310
Deltaferrit/ ferrite delta: 132BC1: <1% 132BC3: <1%												
Korngröße/ grain size ASTM E 112 132BC1: 5,0 132BC3: 5,0												
Reinheitsgrad/ micro purity A dünn /thin: 1,3 A dick /heavy: 0,4												
Anlagen Encl. Załączniki	US-certificate / UT certificate WBH-Besch./Heat treatment cer.				Katowice Place and date Miejsce i data 12.09.2018	Print date 12.09.2018		Abnahmebeauftragter Inspector representative Przedstawiciel kontroli Krzysztof Leszczyk				
Niniejsze świadectwo sporządzono elektronicznie i jest ważne bez podpisu						This certificate was generated by data system it must not be signed for validity as well. Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig.						

Siemens, s.r.o., odstepny zavod
Industrial Turbomachinery
WYPRESZED / REVIEWED
Lukáš SOVA
SIGNED/DATE:



Protokol o chemickém složení

Materiál: X22CrMoV12-1
 Zadavatel: Ing. Mgr. Hana Šebestová, Ph.D.
 Označ. vzorku: X22CrMoV12-1

Protokol č.: 015/2020
 Poř. číslo knihy: 015/2020
 Zkušební stroj: Spectrumat GDS 750

Výsledné chemické složení:

Ozn. vzorku	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W	Cu	Al
X22CrMoV12-1	0,21	0,61	0,22	0,014	0,004	11,3	0,61	0,85	0,28	0,05	0,07	0,017

Ozn. vzorku	Ti	Co	B	Sn	Sb	Nb
X22CrMoV12-1	0,00	0,02	0,000	0,01	0,00	0,00

V Brně dne 9. června 2020

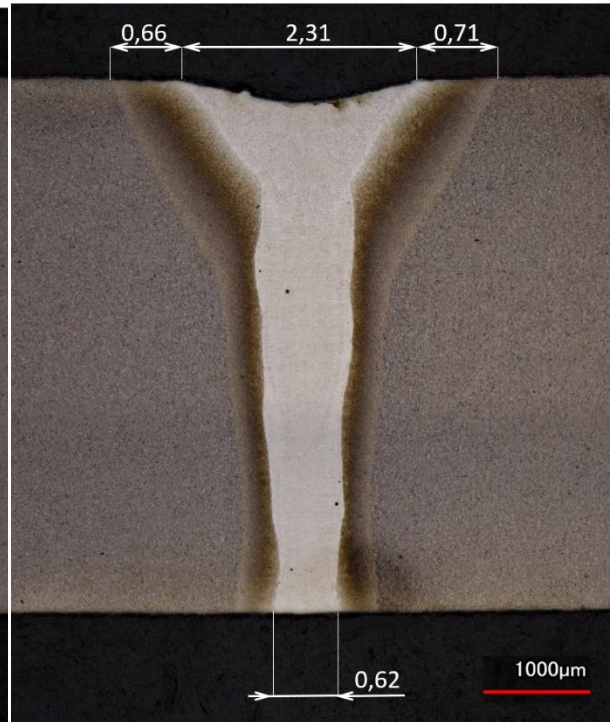
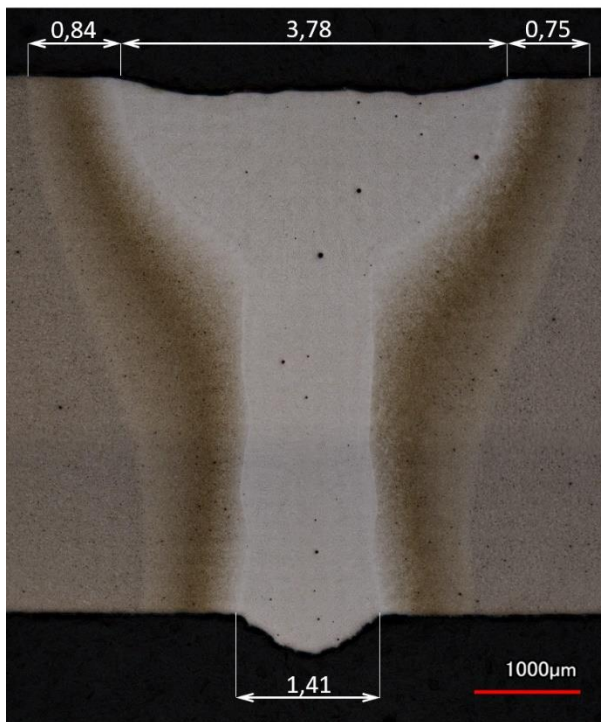
.....
 Ing. Pavel Doležal, Ph.D.

X22CrMoV12-1

vzorek: 14

X22CrMoV12-1

vzorek: 24



X22CrMoV12-1

vzorek: 30

