

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIUM VLIVU PROCESNÍCH PARAMETRŮ NA VLASTNOSTI SVARU FERITICKÉ KOROZIVZDORNÉ OCELI PŘI LASEROVÉM SVAŘOVÁNÍ S ROZMÍTÁNÍM SVAZKU

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Křepela

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

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

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

Studium vlivu procesních parametrů na vlastnosti svaru feritické korozivzdorné oceli při laserovém svařování s rozmítáním svazku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

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

Cíle diplomové práce:

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

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

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

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

KŘEPELA Petr: Studium vlivu procesních parametrů na vlastnosti svaru feritické korozivzdorné oceli při laserovém svařování s rozmítáním svazku.

Tato práce měla za cíl provést experiment, který měl posoudit vliv jednotlivých svařovacích parametrů při metodě svařování laserem s rozmítáním svazku na zhotovený svar, resp. svary. Svařovaným materiálem byla feritická korozivzdorná ocel s označením 1.4016, která je, stejně jako všechny feritické oceli, náchylná k hrubnutí zrna a tím způsobenému zkřehnutí, které vede k degradaci mechanických vlastností svařence. Svary byly porovnány se vzorkem svařeným bez rozmítání i mezi sebou. Bohužel však vyhodnocení zkušebních vzorků nepřineslo významné odlišnosti od svařování laserem bez rozmítání, nicméně některé změny jsou poměrně patrné, jako je orientace zrn, svarové vady, nebo rovnoměrnost mechanických vlastností po délce svaru, kde je nejpodstatnější vliv frekvence rozmítání. Další výzkum by se měl věnovat omezení pórovitosti při vyšších frekvencích rozmítání ve tvaru kružnice či elipsy.

Klíčová slova: feritická ocel, 1.4016, laser, rozmítání svazku, vliv, vlastnosti

ABSTRACT

KŘEPELA Petr: Study of the influence of process parameters on welding properties of ferritic stainless steel in laser oscillation welding

The aim of this work was to carry out an experiment to assess the influence of the individual welding parameters in the laser welding method with the beam wobbling on the made weld, respectively. welds. The material which was welded was ferritic stainless steel with the designation 1.4016, which, like all ferritic steels, is susceptible to coarse grains and the resulting brittleness which leads to degradation of the mechanical properties of the weld. The welds were compared to a sample welded without wobbling and between themselves. Unfortunately, however, the evaluation of the test samples did not bring significant differences from laser welding without wobbling, however some changes are evident, such as grain orientation, weld defects, or uniformity of mechanical properties over the weld length, where wobbling frequency is most important. Further research should focus on limiting the porosity at higher wobbling frequencies in the shape of a circle or ellipse.

Keywords: ferritic steel, 1.4016, laser, wobbling, influence, properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KŘEPELA, Petr. *Studium vlivu procesních parametrů na vlastnosti svaru feritické korozivzdorné oceli při laserovém svařování s rozmitáním svazku*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116795>. 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 dne 22.5.2019

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych zde chtěl poděkovat lidem z ÚST FSI VUT a z ÚPT AV ČR za pomoc při vyhodnocení experimentu a jeho zhodnocení. V neposlední řadě patří mé díky rodině za podporu ve studiu.

OBSAH

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD.....	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	11
1.1 Výrobní možnosti / variantní řešení	11
2 TEORETICKÁ ČÁST.....	13
2.1 Korozivzdorné oceli	13
2.2 Feritické korozivzdorné oceli	15
2.2.1 Svařitelnost feritických ocelí	16
2.2.2 Svarové vady	17
2.3 Technologie svařování	19
2.4 Svařování laserem	20
2.4.2 Laser a laserový paprsek	20
2.4.3 Průmyslové lasery	21
2.4.4 Laserové svařování.....	23
2.5 Technologie rozmítání svazku.....	25
2.5.1 Parametry svařování s rozmítáním svazku.....	25
2.5.2 Vliv svařování s rozmítáním svazku na vlastnosti svaru	26
2.5.3 Přístrojové vybavení pro rozmítání svazku.....	26
2.5.4 Výhody rozmítání svazku	27
2.6 Bezpečnost při práci s lasery	27
2.7 Zkoušky svarových spojů.....	28
2.7.1 Destruktivní zkoušky	29
2.7.2 Nedestruktivní zkoušky.....	32
2.7.3 Zkoušky odolnosti proti mezikrystalové korozi.....	33
3 EXPERIMENT	34
3.1 Svařovaný materiál.....	34
3.2 Přístrojové vybavení.....	36
3.3 Parametry procesu a postup svařování	36
3.4 Vizuální kontrola.....	38
3.5 Makro a mikrostruktura.....	39
3.5.1 Vyhodnocení makrostruktury.....	41

3.5.2 Vliv rozmítání na makrostrukturu svaru	44
3.5.3 Vyhodnocení mikrostruktury	45
3.6 Tahová zkouška	46
3.6.1 Příprava vzorků pro tahovou zkoušku	46
3.6.2 Průběh tahové zkoušky	47
3.6.4 Vliv parametrů na vlastnosti svaru zjištěných tahovou zkouškou	53
3.7 Zkouška tvrdosti	54
3.7.1 Průběh a vyhodnocení zkoušky tvrdosti	55
3.7.2 Vliv rozmítání na tvrdost svarového spoje.....	58
3.8 Vyhodnocení experimentu-shrnutí	58
3.8.1 Vliv svařování skenovací hlavou	58
3.8.2 Vliv rozmítacího pohybu na vlastnosti svaru.....	58
3.8.3 Vliv frekvence rozmítání na vlastnosti svaru.....	59
3.9 Výstupy z experimentu a doporučení pro praxi	59
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ	60
5 ZÁVĚRY	61
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

ÚVOD [1], [2], [3]

Svařování je vedle tváření, obrábění a slévárenství jedním z nejdůležitějších průmyslových oborů. Člověk jej využívá již od starověku, kdy bylo známé tzv. kovářské svařování. První moderní metodou bylo svařování plamenem, které se objevuje na konci 19. století. Následně se začínají objevovat a rozvíjet další metody tavného svařování, jako svařování obalenou elektrodou, svařování v ochranných plynech, svařování plazmou, elektronovým paprskem a v neposlední řadě svařování laserem. Vedle tavných metod se rozvíjí i svařování tlakové. Již dlouhou dobu, asi od roku 1960, se rozvíjí svařování pomocí laserového paprsku, viz obr. 1, které nalézá stále širší uplatnění nejen ve svařování, ale i v dalších oblastech jako je řezání, pájení nebo vrtání, značení, či gravírování. Jednou z nových metod laserového svařování je tzv. svařování s rozmítáním svazku, které již u jistých materiálů pomohlo k lepší svařitelnosti.

Problematika svařování a svařitelnosti materiálů je velmi zajímavá, ale i složitá. Tak jako v případě technologie obrábění nebo tváření se každý materiál, či skupina materiálů, chová jinak a musíme určit vhodnou technologii, procesní podmínky, použité nástroje či přípravky, je tomu stejně tak i u svařování. Ne každá technologie svařování je pro určitý materiál vhodná, jelikož existuje celá řada omezení při svařování různých materiálů. Tato práce je zaměřena na svařování feritické korozivzdorné oceli 1.4016 pomocí této technologie. Feritické oceli se v některých případech dají použít místo austenitických, jelikož neobsahují velmi drahý nikl. Bohužel ale běžné tavné metody, včetně svařování laserem, totiž způsobují zkřehnutí vlivem nadměrného růstu zrn a mimo to vznik ostrého rozhraní ve svarovém kovu, což má za následek de facto ztrátu mechanických, pevnostních a deformačních, vlastností svaru. Vyřešit tento problém by mohla právě metoda laserového svařování s rozmítáním svazku.



Obr. 1 Svařování laserem [4]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [3]

Problematikou této práce je svařování feritických korozivzdorných ocelí, konkrétně oceli 1.4016 poměrně novou a málo známou technologií svařování laserem s rozmítáním svazku. Svar vytvořený touto technologií vzniká spolupůsobením dvou pohybů. Rozmítání svazku umožňuje omezit některé svarové vady a svar tak dostává lepší mechanické vlastnosti. Levnější feritické oceli lze v určitých oblastech použít jako náhradu za oceli austenitické, které jsou kvůli legování niklem drahé. Konkrétní aplikací, pro kterou by se výsledky z této práce měly použít je svařování bubnů praček. Bohužel svařování feritických ocelí laserem, a dalšími tavnými metodami, s sebou přináší některé problémy. Při jejich svařování totiž dochází k extrémnímu zhrubnutí zrna, a výrazné středové orientaci zrn mezi svařovanými díly a tím ke ztrátě mechanických vlastností až na takovou úroveň, že po zkušebních svarech plechu o tloušťce 0,4 mm svar i při působení malé síly praská. Řešením tohoto problému by mohla být již zmíněná technologie svařování laserem s rozmítáním svazku.

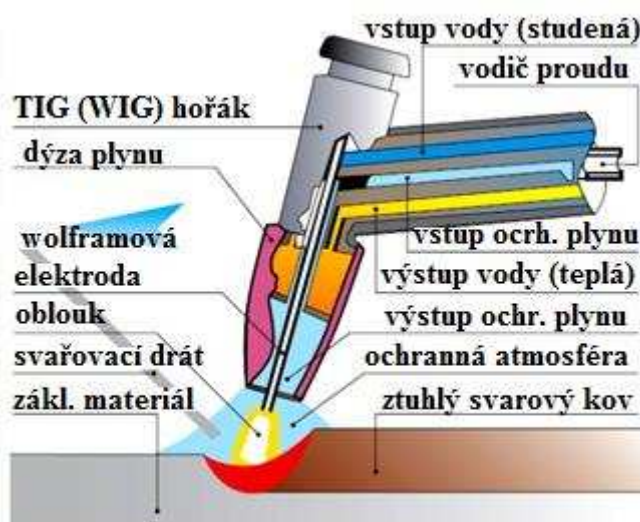
Cílem této práce je dle zadání osvojení si techniky laserového svařování včetně techniky s rozmítáním svazku, problematiku svařování feritických korozivzdorných ocelí, návrh experimentu a jeho vyhodnocení pomocí metalografických zkoušek a zkoušek mechanických vlastností svarů. Teoretický základ problematiky bude nastíněn v první části práce.

V rámci experimentu budou provedeny zkušební svary, při různých parametrech svařování, které budou následně zkoušeny normalizovanými zkouškami a vyhodnoceny. Cílem je najít optimální parametry procesu, při kterých bude potlačena středová orientace zrn a pokud možno co nejjemnozrnnější struktura.

1.1 Výrobní možnosti / variantní řešení [5],[6],[7],[8],[9],[10],[11]

Ačkoliv lze feritické korozivzdorné oceli, svařovat různými metodami, jak tavného tak i tlakového svařování, vzhledem k tomu, že je práce zaměřena na konkrétní metodu svařování a všechny metody, tedy metody při nichž se překročí kritická teplota, tj. tavné metody způsobují zhrubnutí zrna, jsou zde uvedeny pouze nejčastěji užívané metody - svařování metodou TIG a MIG.

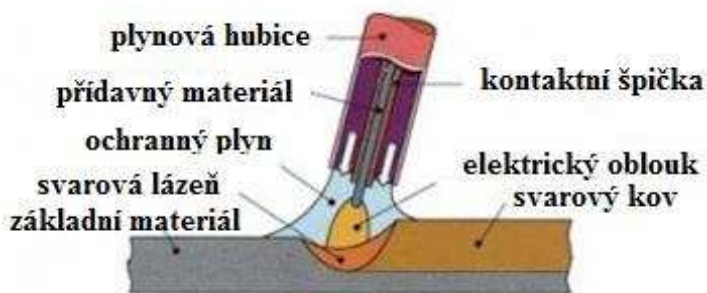
- Svařování metodou TIG je charakteristické hořením oblouku mezi svařovaným materiálem a netavící se wolframovou elektrodou, viz obrázek 2, která bývá většinou připojena na záporný pól, kvůli emisi elektronů, zlepšujících průvar, z elektrody na svařenec. Současně nedochází k velkému opotřebení elektrody. Přídavným materiálem je tyčinka s různým průměrem a složením dle svařovaného materiálu. Používají se inertní ochranné plyny, tvořené směsí Ar a He a N₂. Pro svařování se používají přídavné materiály se stejným chemickým složením jako má základní materiál, ale výsledný svarový kov má nízké plastické vlastnosti, proto je možné použít i materiály dolegované asi 4 hm.% Ni. Svařováním přídavným materiálem s obsahem Ni se dosáhne dostatečné houževnatosti svarového kovu s malou náchylností na tvorbu studených trhlin. Svařence se žíhají při teplotě 750 - 850 °C za účelem



Obr. 2 Princip svařování metodou WIG [7]

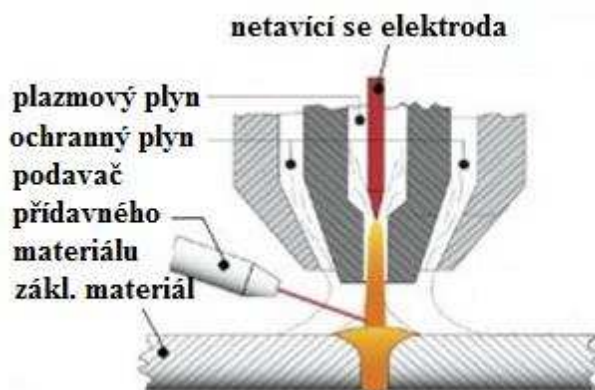
zvýšení plastických vlastností a zvýšení korozní odolnosti svarového spoje.

- Další často využívanou metodou svařování feritických korozivzdorných ocelí je svařování metodou MIG, jejíž princip je zachycen na obrázku 3. U tohoto způsobu svařování hoří oblouk mezi svařencem a odtavující se elektrodou ve formě drátu pod ochranným inertním plynem, s podobným složením jako u předchozí metody. Co se týče přídavných materiálů a ochranných plynů jsou svým složením obdobné jako u předchozí metody.



Obr. 3 Princip svařování metodou MIG [8]

- Existují i výzkumy svařování korozivzdorných feritických ocelí plazmovým paprskem, konkrétně šlo o ocel 1.4512 a výzkum se týkal především vlivu výstupního průměru plazmové trysky na geometrii svaru, výskyt svarových vad, velikost zrn a mechanické vlastnosti. Svařování plazmou je založeno na interakci svařovaného materiálu s plazmovým paprskem, jež vzniká disociací molekul plazmového plynu, viz obr. 4. Využívá se vysoké koncentrace tepla na jednotku plochy a tím zvýšení hloubky průvaru. Účelem experimentu bylo nejen vhodně vyladit jednotlivé svařovací parametry, ale mimo to porovnat svařitelnost daného materiálu různými metodami, konkrétně WIG(TIG), laserem a právě plazmovým paprskem. Vhodnou kombinací svařovacích parametrů při svařování plazmou bylo dosaženo celkově nejlepších výsledků v porovnání s dalšími dvěma uvedenými technologiemi.



Obr. 4 Princip svařování plazmou [10]

- Další možností je svařování pomocí laserového paprsku, potažmo laserového svařování s rozmítáním svazku, které se již osvědčilo např. při svařování slitin hliníku a mědi, kde byla zrovnoměněna struktura svarového kovu, potlačeny svarové vady - póry a dosáhlo se lepšího promísení obou materiálů. Vzhledem k těmto skutečnostem vzešel předpoklad, že tato metoda by mohla změnit mikrostrukturu a tím i mechanické vlastnosti při svařování feritických korozivzdorných ocelí laserem. Tato metoda a její problematika byla již nastíněna. A jelikož je předmětem této práce, bude rozebrána podrobněji v dalších kapitolách.

Norma ČSN EN 1011-3 pro obloukové svařování korozivzdorných ocelí uvádí, že běžně se používají metody MIG, MAG, WIG a plazmovým svařováním. Co se týče ostatních tavných metod, jako je svařování laserem, či elektronovým paprskem, doporučuje se použití pouze po dohodě, ale jelikož je laserové svařování hlavním bodem této práce, a práce je výzkumného typu, je dohoda bezpředmětná.

2 TEORETICKÁ ČÁST

V této části budou popsány teoretické poznatky ohledně svařování feritických korozivzdorných ocelí, metodiky svařování laserem s rozmítáním svazku a zkoušení svarových spojů. Tato část práce je prvotním předpokladem pro vyhodnocení experimentální části, která je pak hlavním předmětem této práce.

2.1 Korozivzdorné oceli [11],[12],[13],[14],[15],[16],[17]

Feritické oceli patří, vedle ocelí martenzitických, austenitických a duplexních nebo dvoufázových do skupiny korozivzdorných ocelí, což jsou konstrukční kovové materiály s typickým chemickým složením všechny obsahují min. 11,7 hm. %, ale až 30 hm. % Cr, a další legující prvky jako Ni, jehož obsah může být až 30 hm. %, až 24 hm.% Mn a další prvky, jejichž obsah je v jednotkách hm. %, jako Al, Si, Ti, Nb, Ta, V, W a N. Korozivzdorné oceli mají nízký obsah S a P omezený na 0,03 hm. %. Obsah C je v rozmezí 0,01 - 0,1 hm. %. U jednotlivých ocelí je přesně zaručeno chemické složení. Nejprve je tedy nutné se alespoň z části věnovat korozivzdorným ocelím obecně.

Tyto materiály jsou odolné proti chemické i elektrochemické korozi v oxidačním prostředí, důvodem je schopnost pasivace, která je podmíněna minimálním obsahem chromu, jež je hlavním legujícím prvkem těchto ocelí, v tuhém roztoku 11,7 % a závisí na přítomnosti dostatečného množství oxidačního činidla. Korozivzdornost je závislá na obsahu volného chromu v tuhém roztoku, který umožňuje vytvořit tzv. pasivní vrstvu, která vzniká reakcí chromu s kyslíkem, tedy oxidací. Díky chromu vzniká na povrchu vrstva oxidu chromitého, která tvoří onu pasivní vrstvu a zabraňuje další oxidaci, stejně jako tomu je např. u hliníku nebo mědi. Oxidická vrstva zaručuje dobrou odolnost proti korozi, ale pokud je narušena např. v důsledku mechanického namáhání a není zaručeno dostatečné množství oxidačního média může dojít k napadení korozi. U korozivzdorných ocelí rozeznáváme různé druhy koroze, jako je lokální (bodová nebo šterbinová) koroze, koroze ovlivněná změnou struktury (nožová, mezikystalová, selektivní), nebo koroze způsobená mechanickým ovlivněním (vodíková křehkost, korozní praskání za napětí, korozní únava) Nejnebezpečnější je korozní praskání za napětí a lokální formy koroze.

Rozdělují se podle struktury na oceli feritické, martenzitické, a duplexní (feriticko austenitické, martenziticko austenitické, martenziticko feritické). A podle chemického složení na Cr, CrNi, CrMo a CrMn oceli. Martenzitické oceli mají obsah Cr od 12 do 18 hm. % a obsah C 0,1 - 1 hm. %. Martenzitické struktury je dosaženo rychlým ochlazením z oblasti

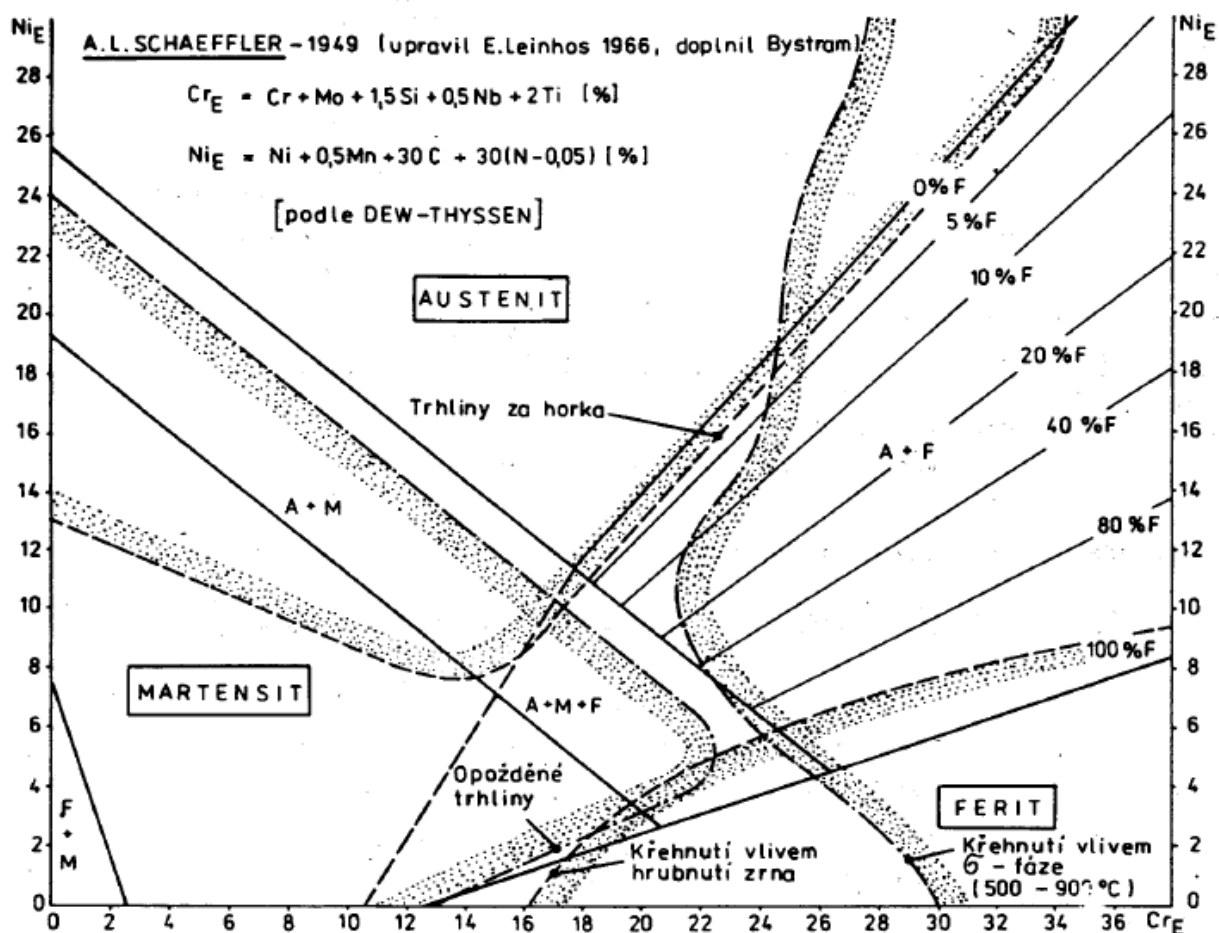


Obr. 5 Použití korozivzdorné oceli v automobilovém průmyslu [16]

austenitu. Svařují se v popuštěném, žíhaném nebo tvrdém stavu s předehřevem mezi 250 až 400 °C. Po svaření následuje žíhání na při teplotě 600 až 700°C, jehož účelem je popuštění martenzitu. Austenitické oceli se vyznačují austenitickou strukturou, které lze dosáhnout legováním prvky, stabilizující austenit, nejčastěji se legují niklem, který je velmi drahý, alternativou je levnější mangan. Mají vyšší korozní odolnost oproti ocelím feritickým a martenzitickým. Z důvodu

náchylnosti k mezikrystalové korozi při svařování se stabilizují Ti, Nb nebo Ta, případně je snížen obsah C pod 0,03 hm.%. Dále jsou pro zvýšení korozní odolnosti legovány 2 - 4,5 % Mo. Dalším problémem při svařování je možnost vzniku teplých trhlin a zkřehnutí vlivem σ -fáze.

Výsledná struktura korozivzdorných ocelí je dána kombinací vlivů austenitotvorných a feritotvorných prvků. Tento vliv je vyjádřen pomocí chromového a niklového ekvivalentu, na jejichž základě byl sestaven tzv. Schaefflerův diagram, viz obr. 6, kde jsou rovněž uvedeny vztahy pro výpočet chromového a niklového ekvivalentu, jež se používá k odhadu výsledné struktury. Mimo to jej lze použít i k určení přechodové struktury svarového kovu a základního materiálu při svařování, kde se do diagramu zanesou chromový a niklový ekvivalent, přičemž na základě promísení se určí struktura svarového kovu. Např. při použití austenitického přídavného materiálu ke svaření feritické oceli dochází ke vzniku martenzitické struktury v přechodu mezi svarovým kovem a základním materiálem, z toho důvodu je nutné svařované dílce předehřívat. Rovněž lze pomocí tohoto diagramu předpovědět svarové vady, na které jsou jednotlivé struktury náchylné.



Ačkoliv jsou vzorce pro výpočet chromového a niklového ekvivalentu uvedeny v obrázku 6, zde je jejich prepis a popis jednotlivých vstupních hodnot. Vzorec pro výpočet chromového ekvivalentu:

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5Si + 0,5Nb + 2Ti, \quad (2.1)$$

kde : Cr_E - chromový ekvivalent [%]

Cr - obsah chromu [%]
 Mo - obsah manganu [%]
 Si - obsah křemíku [%]
 Nb - obsah niobu [%]
 Ti - obsah titanu [%]

A vzorec pro výpočet niklového ekvivalentu:

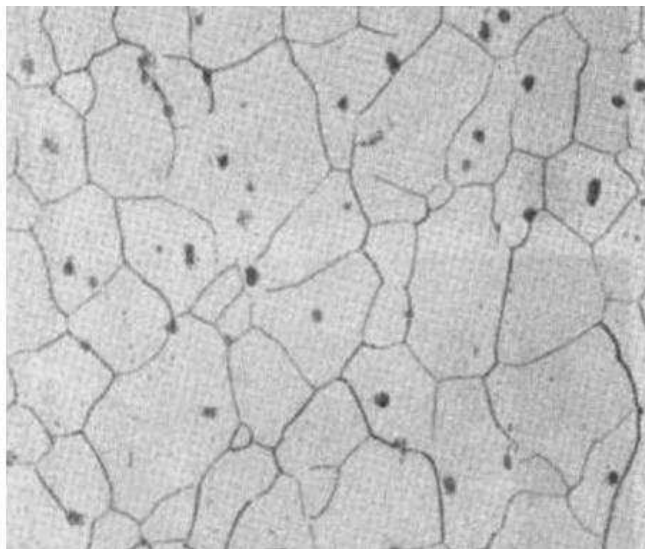
$$Ni_E = Ni + 0,5Mn + 30C + 30(N - 0,05), \quad (2.2)$$

kde: Ni_E - niklový ekvivalent [%]
 Ni - obsah niklu [%]
 Mn - obsah manganu [%]
 C - obsah uhlíku [%]
 N - obsah dusíku [%]

Korozivzdorné oceli se používají v chemickém, energetickém, potravinářském průmyslu. Dále při výrobě domácích spotřebičů a potřeb, v architektuře a v automobilovém průmyslu, příklad využití korozivzdorné austenitické oceli na výfukový systém automobilu je na obrázku 5, ale i v dalších oborech. Volba korozivzdorné oceli pro jednotlivé aplikace je poměrně složitá, jelikož každý typ má svoje určité vlastnosti včetně korozní odolnosti v různých korozních prostředích. Správná volba je důležitá pro spolehlivost provozu, životnost. Proto je nutné stanovit provozní média a parametry výroby, především s ohledem na druh korozního prostředí a jeho změn, a na jejich základě pak určit vhodný materiál.

2.2 Feritické korozivzdorné oceli [11],[12],[13],[15],[19],[20]

Tyto oceli se vyznačují feritickou strukturou, viz obr. 7, které je dosaženo legováním prvky, které stabilizují oblast feritu, nazývané jako feritotvorné. Takovými prvky jsou Cr, Mo, Si, Nb, V nebo Al. Obsah uhlíku je omezen maximální hodnotou 0,08 % a obsah chromu se pohybuje v rozmezí 11,5 až asi 30 hm.%. Při ohřevu na teploty odpovídajících běžnému tepelnému zpracování, tj. asi od 750 do 900 °C nedochází k přeměně na austenit, ale pouze k rozpouštění karbidů ve feritu. Tato vlastnost se označuje jako nekalitelnost, protože pokud při ohřevu nedochází k přeměně feritu na austenit, nemůžeme dosáhnout ani martenzitickou strukturu. Nekalitelnost je způsobena přísadou prvků rozšiřujících a stabilizujících oblast feritu, a protože je rozpustnost uhlíku ve feritu menší než v austenitu, volné atomy uhlíku se tak navážou na chrom, za vzniku karbidů chromu. Korozní odolnost feritických ocelí určuje množství chromu, které není vázáno ve formě karbidů. Oceli jsou magnetické a nelze je vytvrdit tepelným zpracováním.



Obr. 7 Feritická struktura [15]

Nevýhodou feritických ocelí je riziko zkřehnutí při delší prodlevě v rozmezí kritických teplot 500 - 800 °C. Při teplotách 350 - 500 °C dochází ke snížení houževnatosti a tažnosti.

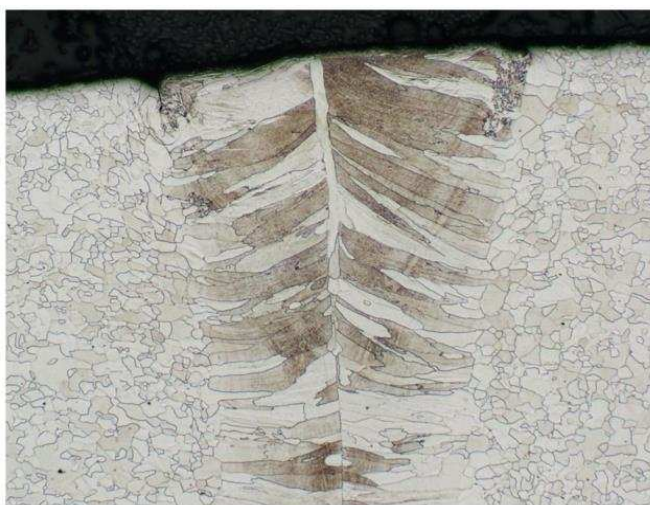
Feritické oceli se svařují obtížněji než austenitické oceli. Výhodou je jejich relativně nízká cena, jelikož neobsahují austenitotvorný nikl, který je velmi drahý. Příkladem korozivzdorných feritických ocelí jsou např. 1.4000, (dle ČSN 17 020), 1.4016, (dle ČSN 17 040), 1.4510, 1.4510 nebo 1.4113. Feritické oceli se rozdělují podle obsahu chromu na:

- 13% chromové feritické oceli, které mají obsah C pod 0,08 hm. % a obsahují 11,5 - 13,5 hm.% Cr. Mají dobrou korozní odolnost v atmosféře, ve vodě a vodní páře, ve zředěné kyselině dusičné a slabých organických kyselinách. Nevhodné je použití v mořské vodě nebo silně znečištěných průmyslových vodách i atmosférách. Uplatňují se pro výrobu zařízení pro chemický průmysl (sedla ventilů, potrubí čerpadel, výměňkové trubky, nádrže a kolony pro zpracování ropy) a v potravinářství. Korozní odolnost je závislá na kvalitě zpracování povrchu a jejich svařitelnost a tvařitelnost je podmíněná. Oceli s 13 hm. % Cr se při odpovídajícím obsahu C vyznačují vznikem austenitické struktury při ohřevu, následným ochlazením pak vzniká martenzit.
- 17% chromové feritické oceli, u nichž je obsah C, stejně jako u předchozích, maximálně 0,08 hm.% a obsah Cr se pohybuje mezi 16 - 18 hm.%. Mohou být stabilizované Ti a legované Mo, což zvyšuje jejich korozní odolnost až na úroveň austenitických ocelí. I u těchto ocelí při vyšším obsahu C může dojít při ohřevu nad 900°C ke vzniku austenitické struktury a při ochlazení k transformaci na martenzitickou strukturu. Dobře odolávají koroznímu prostředí jako je atmosféra, říční i mořská voda, kyselina dusičná, zředěné organické kyseliny a roztoky solí. Na rozdíl od předešlého typu dobře odolávají znečištěné průmyslové atmosféře a vodám, dále alkalickým prostředím za tepla, benzínu, studeným olejům a pracím prostředkům. Mají dobrou odolnost proti bodové korozi a koroznímu praskání v neutrálních nebo mírně kyselých roztocích za přítomnosti chloridových iontů. Odolnost proti mezikrystalové korozi lze zvýšit stabilizací Ti. Používají se do teplot 320°C v potravinářském (např. při zpracování mléka), automobilovém průmyslu, při výrobě kuchyňských potřeb, nebo ve vzduchotechnice a architektuře.
- 25% chromové feritické oceli oproti dvěma předchozím typům dosahují vyšší korozní odolnosti, ale vysoký obsah Cr způsobuje náchylnost ke zkřehnutí v oblasti kritických teplot. S obsahem C od 0,1 do 0,2 hm.% se používají jako žáruvzdorné.
- Superferity se vyznačují čistě feritickou strukturou a sníženým obsahem intersticiálních prvků, kdy součet C+N je 0,015-0,025 hm.%, obsah Cr se pohybuje v rozmezí 18-29 hm.% a jsou stabilizovány Ti nebo Nb. Svařitelnost a tvařitelnost superferitů je dobrá a dosahují lepších mechanických vlastností, lepší odolnosti proti koroznímu napadení.

2.2.1 Svařitelnost feritických ocelí [11],[18],[20],[22],[23]

Co se týče podrobnějších poznatků o svařitelnosti, rozlišuje se zvláště svařitelnost tzv. klasických feritických ocelí, jež lze ještě rozdělit na plně feritické a poloferitické a oceli, které mají snížený obsah intersticiálních prvků.

- Všechny feritické oceli vykazují růst zrna, viz obr. 8, ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti při teplotě vyšší než 950°C, důsledkem je zkřehnutí a ztráta houževnatosti, kterou nelze odstranit pomocí tepelného zpracování. Dále jsou náchylné na zkřehnutí vlivem σ -



Obr. 8 Hrubé zrno a středová orientace zrn [9]

fáze a zkřehnutí 475. Pokud se svařuje na více vrstev, tak se výplňové vrstvy svařují houževnatým austenitickým přídavným materiálem s obsahem niklu. Krycí vrstva, je-li to třeba, např. kvůli požadavku na stejnou barvu základního materiálu a svarového kovu, nebo zachování žáruvzdornosti, se svaří přídavným materiálem odpovídajícím složení základního materiálu. S obsahem chromu vyšším než 13 hm.% jsou náchylné k mezikrystalové korozi. Dalším problémem je možnost vzniku trhlin za studena. Na obrázku 8 si lze rovněž povšimnout výrazné středové orientace zrn po svaření laserem.

- Při svařování poloferitických ocelí může v tepelně ovlivněné oblasti vzniknout martenzit, přičemž základní je čistě feritický, tj. dochází k částečnému zakalení. Tento jev je závislý na obsahu C a Cr, proto je možné, že i ocel označovaná jako plně feritická se v závislosti na odchylkách chemického složení může chovat částečně jako poloferitická. Při ohřevu se uhlík uvolňuje z rozpouštějících se karbidů a může vyvolat vznik austenitu, který se při kritických rychlostech ochlazování mění na martenzit. Pro poloferitické oceli platí stejné rozmezí teplot předehřevu a mezivrstvy jako je tomu u plně feritických ocelí. Stejně tak jsou náchylné na vznik studených trhlin a mezikrystalovou korozi. Poloferitické oceli se při a po svaření chovají buď jako martenzitické, kdy dochází k zakalení ztvrdnutí nebo jako feritické, kdy dochází ke zhrubnutí zrna a křehkosti, jak bylo uvedeno výše. Jestli se bude ocel chovat jako martenzitická nebo feritická je závislé na obsahu austenitu, který se přemění na martenzit.
- Svařitelnost feritických ocelí se sníženým obsahem intersticiálních prvků, neboli superferitů, především uhlíku a dusíku, jejichž součet nepřesahuje 0,04 hm. %, je lepší než je tomu u klasických a lze ji srovnávat se svařitelností austenitických ocelí. Při svařování těchto ocelí se dosahuje čistě feritické struktury ve svarovém kovu i tepelně ovlivněné oblasti. Další odlišností je, že tyto oceli nejsou náchylné na vznik studených trhlin a proto se obvykle svařují bez předehřevu. Jsou stabilizované Ti, který snižuje náchylnost na vznik kráterových trhlin. Pokud je obsah Ti menší než 0,7 hm. % jsou odolné proti vzniku mezikrystalové koroze. Po svaření dochází k poklesu vrubové houževnatosti, proto se stejně jako u klasických feritických ocelí musí použít co nejnižší tepelný příkon. Po svaření se provádí pouze žíhání při teplotě 800°C, po dobu jedné hodiny, pro zlepšení odolnosti proti mezikrystalové korozi.

2.2.2 Svarové vady [11],[18],[19],[23],[24],[25],[26],[27],[28],[29],[30],[31]

Některé svarové vady, na které jsou korozivzdorné feritické oceli náchylné byly nastíněny již výše jde o zkřehnutí vlivem zhrubnutí zrna, vlivem σ -fáze a zkřehnutí 475. Oceli jsou také náchylné na mezikrystalovou korozi a studené trhliny indukované vodíkem. V této kapitole budou vady rozebrány podrobněji a nastíněny možnosti jejich odstranění či omezení.

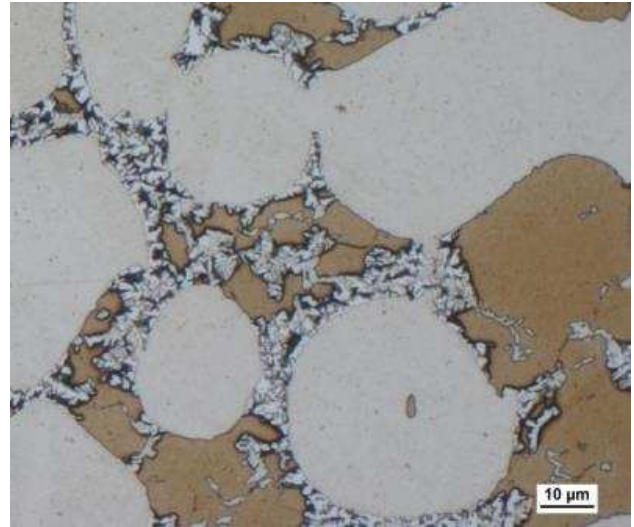
- Ke zkřehnutí vlivem zhrubnutí zrna dochází při teplotách vyšších než je 950 °C z důvodů růstu feritických zrn. Zhrubnutí zrna a středová orientace zrn ve svarovém kovu způsobující ostré rozhraní je vidět na obrázku 4. Jelikož nelze zhrubnutí zrna odstranit tepelným zpracováním, musí být k zamezení růstu zrna musí být limitován tepelný příkon, uvádí se, že by neměl překročit 10 J·mm⁻¹, doporučuje se však úprava svařovacích parametrů (např. napětí, proud nebo rychlost svařování), používání přídavných materiálů s malým průměrem a vytvářením krátkých housenek. Tepelný příkon lze vypočítat dle následujícího vztahu:

$$Q_s = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{v} = \frac{\eta \cdot P}{v} \quad (2.3)$$

kde: Q_s - tepelný příkon svařování [J·mm⁻¹]
 η - účinnost [-]

U - napětí [V]
 I - svařovací proud [A]
 v - rychlost svařování [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]
 P - výkon [W]

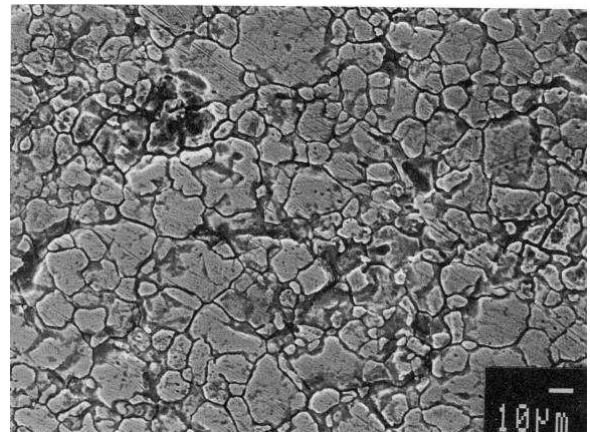
- Zkřehnutí 475, které má za následek ztrátu tažnosti, je způsobeno rozpadem feritické struktury a precipitačními procesy mezi teplotami 450 až 525 °C. Díky krátké době setrvání na kritických teplotách ke zkřehnutí 475 nedochází při svařování tenkých plechů. Oceli náchylné na křehnutí 475 obsahují alespoň 15% chromu. Zkřehnutí lze odstranit ohřevem na 540°C a prudkým ochlazením na pokojovou teplotu.



Obr. 9 σ -fáze v duplexní oceli [23]

- σ -fáze, způsobující zkřehnutí, je tvrdá a křehká intermetalická sloučenina, která se vylučuje na hranicích zrn ferit-austenit v případě duplexních ocelí (obr.9) a uvnitř feritických zrn, v případě feritických ocelí, a mimo zhoršení mechanických vlastností má vliv i na zhoršení korozivzdornosti. Vzniká mezi teplotami 500 až 820 °C, přičemž s rostoucí teplotou a s delší prodlevou na kritické teplotě, obvykle se pohybuje v řádech minut, se urychlují difuzní pochody a vylučuje se větší množství σ -fáze. Vznik σ -fáze podporují feritotvorné prvky (Si, Al, Mo, Ti, Nb), karbidotvorné prvky jako Ti, Zr, Nb nebo Ta, které zabraňují tvorbě karbidů chromu, čímž se zvyšuje obsah nevázaného Cr, nebo lokální přesycení chromem, pokud došlo k příliš rychlému ochlazení. Vliv má i jemnost/hrubost struktury nebo intenzivní tváření za studena. Pro zamezení nebo omezení vzniku σ -fáze je třeba důsledně dodržovat předepsaný postup svařování a tepelného zpracování. Na obrázku 6 je zobrazena sigma fáze vyloučená v duplexní oceli, kde se vylučuje na hranicích mezi austenitickými a feritickými zrny a uvnitř zrn feritických. Pravděpodobnost zkřehnutí vlivem růstu zrna, zkřehnutí 475 a zkřehnutí vlivem σ -fáze se zvyšuje s rostoucí tloušťkou materiálu, které vedou k používání vyšších tepelných příkonů. Nepříznivě působí i tepelné zpracování po svařování, kdy se prodlužuje čas přechodu přes kritické teploty. Doporučením pro potlačení mechanismů zkřehnutí je používat co nejmenší tepelný příkon a co nejkratší výdrž na kritických teplotách. Na zkřehnutí vlivem σ - fáze jsou náchylné oceli s obsahem Cr + Mo větším než 22 hm. %.

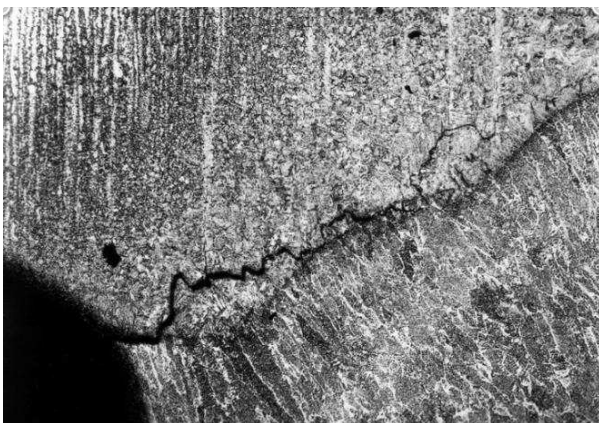
- Mezikrystalová koroze - V případě feritických korozivzdorných ocelí je mezikrystalová koroze způsobena ohřevem, např. při svařování, nad teplotu 900 °C, kdy dochází ke vzniku karbidů chromu Cr_2C_6 a nitridů chromu Cr_2N na hranicích zrn a vzhledem k vysoké difúzní rychlosti ve feritické struktuře nelze jejich vznik znemožnit rychlým ochlazením. Tvorbou



Obr. 10 Mezikrystalová koroze [29]

těchto sloučenin jsou hranice ochuzeny o volný chrom, který určuje antikorozi vlastnosti. Vlivem mezikrystalové koroze je narušena pasivní vrstva a soudržnost jednotlivých zrn, a tím zhoršeny i mechanické vlastnosti. Karbidy a nitridy, způsobující mezikrystalovou korozi lze odstranit pomocí ohřevu na teplotu asi 600°C s výdrží několika hodin, omezením obsahu C a N nebo potlačením jejich vzniku přidáním stabilizačních prvků, které se lépe slučují s uhlíkem za vzniku karbidů či nitridů jako jsou Ti, Ta nebo Nb. Vyloučené karbidy a napadení mezikrystalovou korozi je zřejmé z obrázku 10.

- Tzv. studené trhliny vznikají při nízkých teplotách pod 200 °C většinou v podhousenkové, v kořenové oblasti svaru nebo ve svarovém kovu. Trhliny jsou transkrystalické a jejich povrch je lesklý a nezoxidovaný. Vznikají z několika příčin, nejčastěji kvůli přítomnosti vodíku ve svaru, zbytkových napětí nebo struktury citlivé na účinky vodíku. Vodík se do svaru dostává nejčastěji z atmosféry, z obalu elektrod, případně i z ochranného plynu. Přídavné materiály musí obsahovat co nejméně difuzního vodíku, aby se zamezilo vzniku trhlin, čehož lze dosáhnout vysoušením elektrod nebo použitím ochranného plynu bez vodíku. Pro zamezení trhlin v tepelně ovlivněné oblasti se doporučuje předeřev na teplotu 300°C. Příklad trhliny za studena je na obrázku 11.



Obr. 11 Trhlina za studena [31]

2.3 Technologie svařování [32],[33]

Svařováním se rozumí technologický proces, při němž se vytváří trvalé nerozebíratelné spojení dvou nebo více součástí, vyrobených z výkovků, odlitků nebo hutních polotovarů v jeden celek. Svařováním lze spojovat kovové i nekovové materiály s různými mechanickými i fyzikálně-chemickými vlastnostmi.

Obecně se metody svařování rozdělují na dvě skupiny - tavné a tlakové. U tavného svařování dochází k roztavení části obou spojovaných dílů vlivem působení vneseného tepla. Roztavením vznikne tavná lázeň a jejím ztuhnutím svarový spoj. Mezi tavné metody patří např. svařování elektrickým obloukem (obalenou elektrodou, MIG/MAG, viz obr. 12, TIG), plamenem, plazmou, laserem, jemuž věnována tato práce, nebo elektronovým paprskem apod. Tlakové svařování je charakteristické tím, že ke spojení součástí dochází vlivem působení vnějšího tlaku a teploty menší než je teplota tavení daných materiálů. Metody tlakového svařování jsou např. svařování za studena, difúzní svařování, svařování třením, kovářské,



Obr. 12 Příklad svařování metodou MIG/MAG [33]

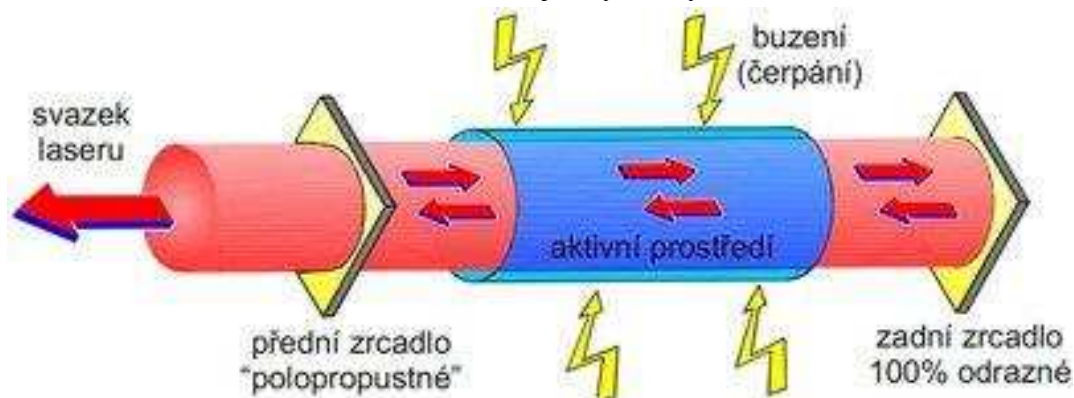
ultrazvukové, indukční nebo svařování odporové. Jelikož je tato práce věnovaná problematice svařování laserem, konkrétně metodě s rozmítáním svazku, bude v následujícím textu věnována pozornost právě laserovému svařování a především metodě rozmítání svazku.

2.4 Svařování laserem

Svařování laserem je jenom jednou z mnoha metod svařování. Jde o dnes poměrně hojně rozšířenou technologii, které nalézá uplatnění v mnoha průmyslových oborech.

2.4.2 Laser a laserový paprsek [30],[31],[32]

Laser, jako zařízení, je v podstatě optický zesilovač, jež pomocí stimulované emise fotonů generuje elektromagnetické záření, čili světlo. Je tvořen dvěma základními částmi a to aktivním prostředím a optickým rezonátorem, což jsou dvě proti sobě umístěná zrcadla, z nichž jedno je polopropustné. Fungování laseru je založeno na tom, že elementy, většinou atomy, v aktivním prostředí se mohou nacházet ve stavu s nižší nebo ve stavu s vyšší energií, tedy v takzvaném vybuzeném neboli excitovaném stavu. Přechod na vyšší energetickou hladinu se realizuje tzv. buzením, které je možno provést např. opticky či elektricky. Při přechodu ze stavu s vyšší energií do stavu s nižší energií element vyzáří foton, což se děje samo od sebe, jelikož soustava má snahu dosáhnout stavu s co nejmenší energií resp. termodynamické rovnováhy. Buzením je tato rovnováha narušena a aktivní prostředí přivedeno do excitovaného stavu. Při nárazu již vyzářených fotonů do nabuzeného atomu se



Obr. 13 Princip laseru [30]

vyzáří další foton, což se stále opakuje. Tento jev se nazývá stimulovaná emise. Vyzářené fotony v prostředí optického rezonátoru putují od jednoho zrcadla k druhému a jejich počet vzrůstá a následně dochází k uvolnění energie v podobě proudu fotonů - laserového záření přes polopropustné zrcadlo. Princip vzniku laserového záření je zobrazen na následujícím obrázku, viz obr.13.

Laserový paprsek je unikátní svými vlastnostmi. Foton narážející na excitovaný element má stejnou energii, směr, polarizaci i fázi, jako vyzářený foton. Díky tomu je laserový paprsek odlišný od ostatních druhů záření. Paprsek je kolimovaný, tj. nerozbíhavý, monochromatický, neboli jednobarevný. Jednobarevnost je znakem toho, že všechny generované fotony mají stejnou vlnovou délku. Další vlastností laserového svazku je jeho koherentnost, tj., že jednotlivé fotony jsou ve fázi jak časově, tak i prostorově. Tyto vlastnosti předurčují laser k použití v různých oblastech. V průmyslu nachází uplatnění hlavně díky možnosti fokusovat svazek do malého bodu a dosáhnout tak vysoké plošné hustoty energie. Toho se využívá při svařování, řezání, kalení, nebo značení. Unikátní je i módová struktura laserového záření, což je prostorová charakteristika, které definuje rozložení intenzity paprsku, ovlivňující přenos paprsku na velké vzdálenosti a jeho koncentraci na malé plochy. Nejběžnější je mód TEM_{00} , kdy je rozložení intenzity popsáno Gaussovou křivkou.

2.4.3 Průmyslové lasery [2], [34], [35],[36],[37],[38],[39],[40],[41],[42],[43]

Existuje velké množství různých laserů, ale v průmyslu se používají takové, které mají dostatečný energetický výkon v rozsahu od 100 W do desítek kW. Musí být provozně spolehlivé a s příznivými pořizovacími a provozními náklady. Základní dělení laserů je dle typu aktivního prostředí na lasery plynové, pevnolátkové, polovodičové, chemické nebo barvičkové, přičemž v průmyslu se používají hlavně první tři z uvedených typů.

Aktivní prostředí u pevnolátkových laserů tvoří monokrystalické nebo amorfni látky s příměsími aktivačních prvků, čerpání je zajištěno např. kryptonovými výbojkami. Záření vycházející z laseru není fokusováno a je vedeno soustavou zrcadel nebo optickými kabely do technologické hlavy. Pomocí optiky ve svařovací hlavě je pak svazek fokusován do místa svařování.

Plynové lasery jako aktivní prostředí používají plyny nebo směsi plynů a par. Nejčastěji používaným plynovým laserem je CO₂ laser, kde je aktivním prostředím směs plynů He, N₂ a CO₂ v různém poměru, které jsou uzavřené ve skleněné trubici. Proces začíná excitací molekul dusíku na vibrační hladinu (E₄), poté dochází ke srážkám molekul dusíku s molekulami CO₂, čímž dojde k excitaci na hladinu E₃. Foton se vyzáří při přechodu molekul CO₂ na nižší hladinu (E₂). Molekuly CO₂ se musí vrátit na základní hladinu (E₀), aby nedocházelo ke snížení inverze při kontinuálním záření. Návrat CO₂ na základní hladinu umožňuje He, které odebírá molekulám CO₂ teplo a díky dobré tepelné vodivosti ochlazuje aktivní prostředí. CO₂ lasery běžně dosahují výkonů od 0,5 do 20 kW, maximálně až 200 kW, vlnová délka je 10,6 μm a účinnost okolo 20 %.

Diodové lasery mají jako aktivní prostředí elektricky čerpanou polovodičovou diodu. Chemické lasery, které jsou buzeny chemickou reakcí a dodávají obrovské množství energie, se používají hlavně pro vojenské účely. A tzv. barvičkové lasery, jejichž aktivní prostředí je tvořeno organickým barvivem, se používají hlavně ve vědě a výzkumu.

Lasery lze rozdělit také podle typu výstupního záření na kontinuální (značení CW), které se vyznačuje generováním souvislého výstupního výkonu a pulzní lasery, jejichž výkon je přiváděn v pulzech, které trvají nano - až milisekundy.

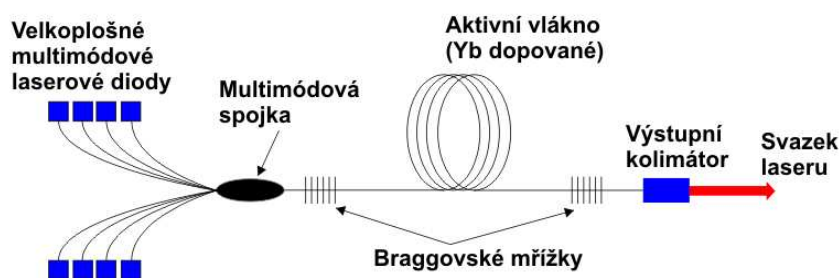
Použití laserů v průmyslu se neomezuje jen na svařování, ale nachází mnohem širší uplatnění. Pomocí laserů lze řezat, povrchově kalit, vrtat, gravírovat, navařovat nebo i čistit. V současné době jsou využívány hlavně lasery vláknové, diskové a polovodičové. Orientační parametry jednotlivých nejužívanějších laserů jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Parametry nejčastěji používaných průmyslových laserů [37]

laser	vlnová délka λ [nm]	buzení	účinnost η [%]	režim	Výkon P [kW]	údržba	životnost [hod.]
Nd.YAG	1064	laserové diody	7	CW/ pulsní	až 6	ano	10 000
CO ₂	10 600	elektricky	25	CW/ pulsní	až 20	ano	-
diskový	1070	laserové diody	15	CW	až 16	ano	10 000
vláknový	1070	laserové diody	30	CW	až 80	ne	100 000
diodový	808- 980	elektricky	60	CW	až 10	ne	15 000

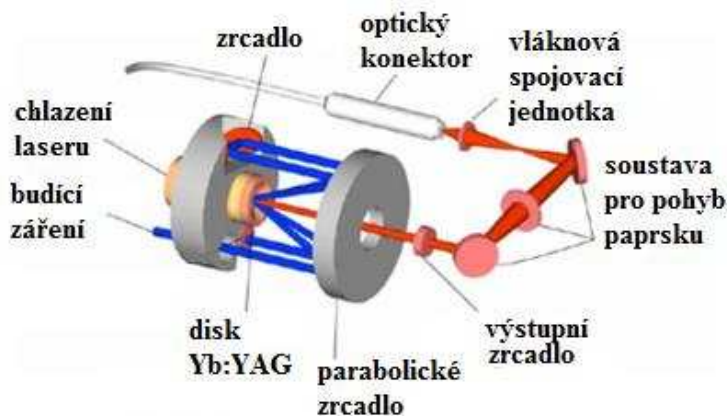
- Vláknový laser je zdrojem velmi intenzivního a kvalitního svazku záření. Jedná se o technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru, kde optické prostředí tvoří

dlouhé optické vlákno sycené ytterbiem. Schéma laseru je vyobrazeno na obr. 14. Vláknový laser se skládá z velkoplošných laserových budících diod, optické spojky, která zajišťuje převod buzení z diod do optického vlákna. A namísto zrcadel jsou zde použity tzv. Braggovské mřížky, což jsou struktury, které jsou vytvořeny přímo na optickém vlákně. Vzniklé laserové záření je z vlákna vyvázáno pomocí optického kolimátoru. Výhodou vláknového laseru je jeho jednoduchost, jelikož celý laser tvoří víceméně jen optické vlákno, jejich robustnost a možnost navýšení výkonu pomocí modulů, které lze přidávat nebo odebírat a tak upravovat výkon až na 80 kW. Vláknové lasery mají relativně vysokou účinnost dosahující hodnot 30 - 35 %, velkou životnost až 100 000 hodin, malé prostorové nároky vyplývající z malých rozměrů ale i malé provozní náklady a minimální náklady na údržbu. Nevyžadují složité chlazení vodou, je plně dostačující chlazení vzduchem. V současnosti tyto lasery nachází stále širší uplatnění v různých oblastech, kde rovněž začínají nahrazovat starší typy laserů. Uplatňují se nejen ve strojírenství při svařování a řezání ale i v lékařství, při měření času nebo v ochranných systémech.



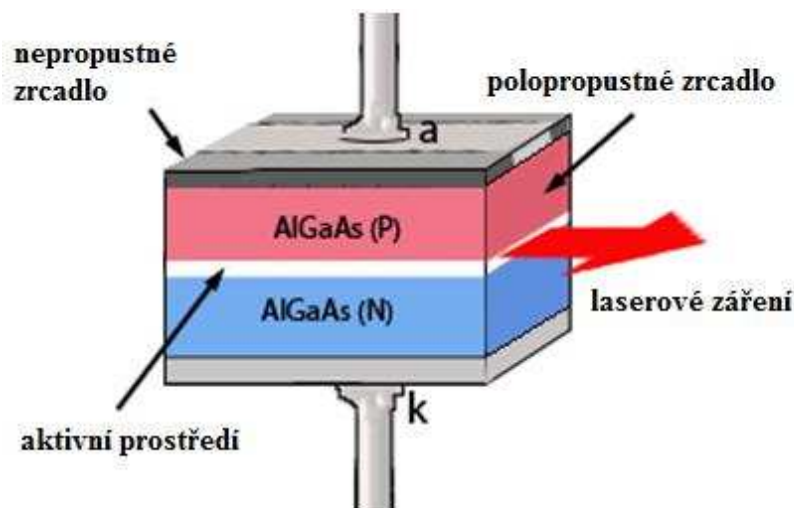
Obr. 14 Princip vláknového laseru [37]

- Diskový laser, jehož schéma je na obrázku 15, je ve své podstatě modifikací Nd:YAG laseru, kdy aktivní prostředí ve formě válečku je nahrazeno diskem s podstatně menšími rozměry, jehož průměr je v desítkách mm a tloušťka v desetinách mm, lepším řešením optického rezonátoru i systému čerpání polem laserových diod. Díky tomu diskové lasery dosahují vysoké kvality výstupního svazku a dalších výhod jako je rovnoměrný teplotní profil po celém disku. Tvar disku umožňuje přesné chlazení buď vodou nebo vzduchem, což umožňuje dosáhnout vysokých výkonů až 16 kW. Bohužel jsou diskové lasery poměrně náročné na výrobu a mají relativně malou účinnost 15-20 %. V průmyslu se používají převážně pro řezání a svařování kovů. Vývojem a výrobou laserů se zabývá firma TRUMPF, nicméně dnes jsou již diskové lasery poměrně zastaralé a stále více jsou nahrazovány lasery vláknovými.



Obr. 15 Princip diskového laseru [42]

- Aktivním prostředím je u diodových laserů polovodičový materiál např. GaAs nebo AlGaAs. Záření se generuje přímo v polovodiči průchodem elektrického proudu v PN přechodu, viz obr 16. Jejich účinnost je, oproti jiným laserům, vysoká a běžně dosahuje 50 až 60%. Mimo vysokou účinnost jsou výhodami diodových laserů především nízká provozní i investiční náročnost, dlouhá životnost a kompaktnost zařízení, možnost nastavení vlnové délky a řízení výkonu (od jednotek W až o 15kW). Nevýhodou je menší kvalita svazku, který je rozbíhavý. Diodový laser je používán pro svařování, navařování, nanášení vrstev nebo povrchové kalení a jejich výrobou se zabývají firmy jako IPG, Coherent nebo Laserline a Dilas.

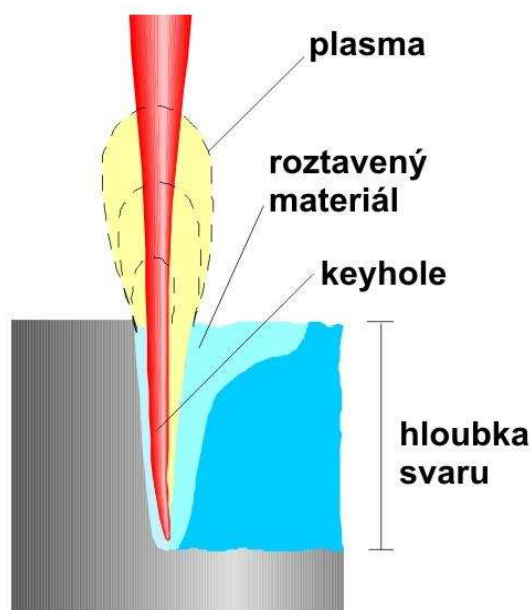


Obr. 16 Princip polovodičového laseru [43]

2.4.4 Laserové svařování [18],[35],[44],[45],[46],[47]

Laserové svařování je založeno na interakci laserového paprsku se svařovanými materiály, kdy rovnoběžný paprsek z laseru pomocí vhodné optiky je zaostřen do ohniska, které se nachází v místě svaru. Je to poměrně náročná aplikace, která musí splňovat požadavky na co nejmenší deformace, mechanické a fyzikálně-metalurgické vlastnosti. Důležitými požadavky na úspěšnost laserového svařování je kolmý dopad paprsku na a konstantní vzdálenost optiky a povrchu svařovaných materiálů. Dále konstantní posuvová rychlost a důležitá je i ochrana fokusační optiky. Existují dva svařovací mechanismy, které se odlišují hustotou energie vnesené do svařovaného místa a geometrií svaru.

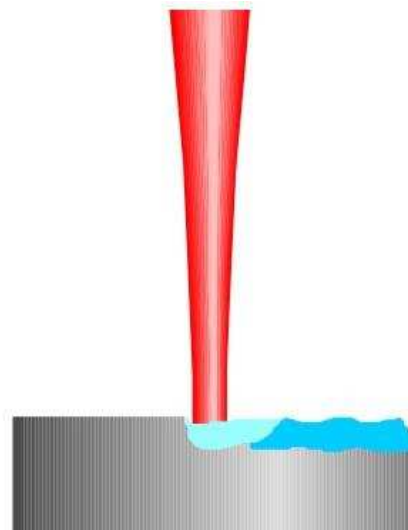
V případě, kdy teplo nemůže být odváděno dostatečně rychle, zvětšuje se průvar a mluvíme o penetračním režimu, viz obr. 17, kdy hloubka vzniklého svaru je mnohonásobně větší než jeho šířka. K tomuto jevu dochází, pokud plošná hustota energie dosáhne kritické hodnoty, která se pohybuje v rozmezí $1 - 5 \times 10^6 \text{ Wcm}^{-2}$, kdy se začínají tvořit páry kovů nad povrchem svařovaného materiálu a kapilára, nazývaná podle svého tvaru jako "keyhole", která je mírně kuželová a má průměr 1,5 až 2 krát větší než



Obr. 17 Penetrační režim svařování [44]

průměr paprsku a je vyplněna roztaveným kovem a jeho parami. Spolupůsobením par a vysoké plošné energie laserového svazku se vytváří plazma, která zpětně ovlivňuje tvar kapiláry. Uzavření keyhole je zabráněno díky tlaku plynů, které odchází ven. K tepelné interakci se svařovaným materiálem dochází na čelní stěně keyhole, odkud se přesouvá roztavený kov v důsledku dynamické rovnováhy mezi tlakem plynů, par a roztaveným kovem. V zadní části paroplynového kanálu se roztavený kov hromadí a vytváří taveninovou stěnu. Při použití penetračního režimu se dosahuje velmi hlubokých svarů, nicméně při svařování je nebezpečí zhroucení keyhole, které může způsobit např. poréznost, či znemožnit svařování. Aby ke zhroucení nedošlo, musí se vhodně sladit veškeré parametry.

Kondukcí režim se vyznačuje menší hustotou tepelné energie, ta se pohybuje v řádech 10^6 Wcm^{-2} , jelikož je teplo odváděno kondukcí, nedosáhneme velké hloubky svaru, proto se kondukcí režim používá především pro svařování tenkých plechů, resp. tenkostěnných součástí. Hloubka průvaru dosahuje pouze několik desetin mm až 1 mm, přičemž je šířka svaru vždy větší, než je jeho hloubka, což je způsobeno tepelnou vodivostí. Používají se hlavně pevnolátkové lasery umožňující pulzní i kontinuální provoz. Na druhou stranu lze v kondukcí režimu svařovat vyššími rychlostmi než je tomu u režimu penetračního. Schéma kondukcí režimu lze vidět na obrázku 18.



Obr. 18 Kondukcí režim svařování [44]

Pro svařování se používají různé typy laserů, viz výše, a svařovacích hlav, které jsou obvykle umístěny na víceosém robotu. Nejběžnější je klasická svařovací hlava, kdy její pohyb uskutečňuje nosný robot. Dalším typem hlavy je hlava skenovací, která vzhledem k možnosti řízení paprsku může zůstat nepohyblivá. Dále existují i řezací hlavy nebo jsou vyvinuté i hlavy pro speciální technologie laserového svařování. Celá sestava se svařovací hlavou, pracovním stolem, vláknovým laserem YLS - 10000 a polohovacím robotem je zobrazena na následujícím obrázku (obr.19).



Obr.19 Příklad sestavy pro laserové svařování [48]

Díky svým výhodám je laserové svařování oblíbenou technologií v průmyslu, která nalézá stále širší uplatnění. Mezi největší výhody laserového svařování patří vysoká kvalita svaru,

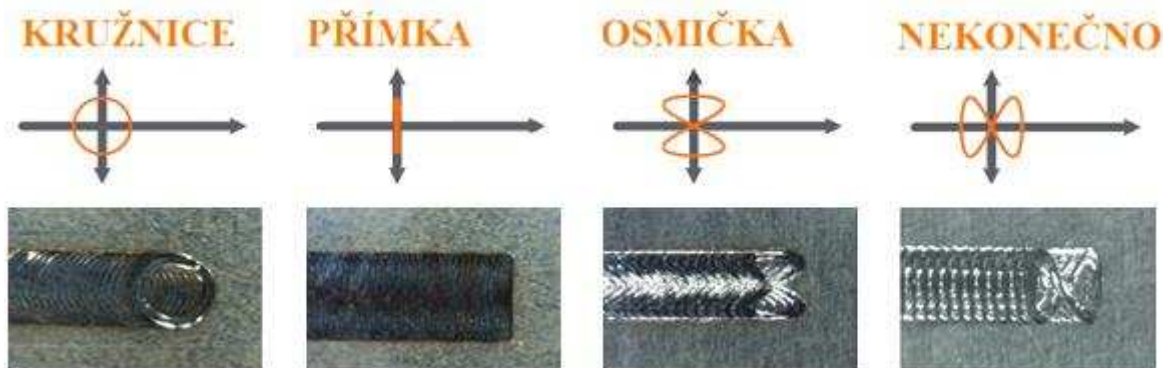
jak z hlediska vizuálního dojmu, kdy se svar nemusí dodatečně opracovávat, tak i co se týče mechanických vlastností. Další výhodou je dosažení větší hloubky průvaru, pokud použijeme penetrační režim, která může být až 10× větší než tloušťka svaru a může dosahovat až desítek mm v závislosti na výkonu laseru. Kladem je i možnost svařovat tenké kovové fólie i plechy do tloušťky několika mm. Dále pak menší tepelně ovlivněná oblast, vyšší produktivita svařování a snadnější možnost automatizace. Neméně významná je i možnost svařování bez přídavného materiálu a svařování velmi malých tloušťek plechu od několika mikrometrů do 15 mm. Dále tichý a čistý provoz laseru, možnost dělit a rozvádět laserový svazek soustavou zrcadel, hranolů a optických vláken na různá pracovní místa nebo pracoviště.

Hlavními nevýhodami laserového svařování je drahé vybavení a poměrně vysoký rozstřík taveniny při velkých rychlostech svařování, dále složité ustavování dílů a nutnost kvalifikované obsluhy.

Svařování laserem je celkem široký pojem, jelikož existuje několik typů laserového svařování, mimo běžné svařování existuje skenerové svařování pomocí skenovací hlavy, dále tzv. remote welding (bez technologické hlavy) a svařování s rozmítáním svazku.

2.5 Technologie rozmítání svazku [3], [49], [50], [51]

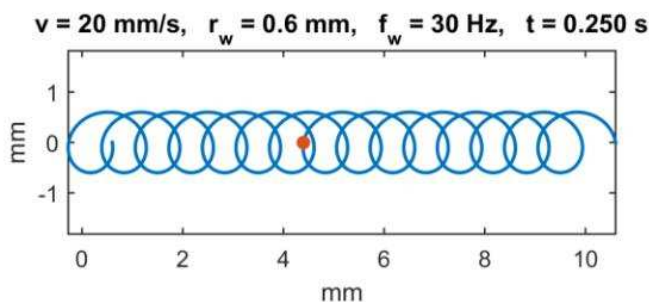
Poměrně nová a málo známá je technologie laserového svařování s rozmítáním svazku, anglicky nazývaná wobbling, či oscilation welding a můžeme se setkat i s počeštěným výrazem voblování. Při tomto způsobu svařování se svar vytváří pomocí dvou pohybů laserového paprsku. Jedním je pohyb v ose svaru a druhým je tzv. rozmítání nebo mikropohyb. Rozmítání je realizováno použitou laserovou hlavou, skenovací nebo voblovací, po určité křivce (kružnice, osmička, nekonečno, přímka, elipsa nebo též jako vratný pohyb v ose svaru). Některé tvary rozmítacích obrazců jsou i se vzhledem svaru vidět na obrázku 20. Výsledkem kombinace dvou pohybů, je "promíchávání" svarové lázně, což může příznivě ovlivnit mikrostrukturu spoje.



Obr. 20 Některé tvary rozmítacích obrazců [50]

2.5.1 Parametry svařování s rozmítáním svazku [3], [49], [50], [51]

Vedle základních parametrů, jako je výkon laseru a posuvová rychlost, resp. rychlost svařování u metody s rozmítáním svazku definujeme další parametry. Jedním je samotný tvar rozmítacího pohybu, viz obr. 20. Dalšími jsou frekvence a amplituda rozmítání. Vzhledem k množství parametrů je optimalizace procesu



Obr. 21 Trajektorie paprsku při rozmítání ve formě kružnice v závislosti na frekvenci [51]

poměrně zdlouhavá a složitá. Musí se totiž provádět velké množství zkoušek, které se provádí s různými kombinacemi parametrů, na něž navazuje vyhodnocení kvality svarů pomocí metalografie a zkoušek mechanických vlastností. Na obrázku 21 je zobrazena kombinace posuvového pohybu v ose svaru a rozmítání ve formě kružnice. Rychlost svařování a amplituda je konstantní, mění se pouze frekvence rozmítání. Z obrázku je patrné, že kombinací těchto pohybů vzniká spirála, jejíž hustota se zvyšuje s rozmítací frekvencí.

2.5.2 Vliv svařování s rozmítáním svazku na vlastnosti svaru [3], [49], [50], [51],[52],[53]

Volba parametrů má vliv na geometrické vlastnosti, především na jeho šířku i na mikrostrukturu a tím i na mechanické vlastnosti svaru. Pomocí rozmítání svazku lze měnit šířku svaru, čehož lze dosáhnout nastavením vhodných parametrů svařování. Na šířku svaru má vliv frekvence rozmítání, amplituda výkon laseru. Nicméně pokud se zvětšuje šířka svaru, musí se zvýšit výkon laseru, aby se udržela konstantní hloubka průvaru. Platí, že při zvyšujícím se výkonu dochází k většímu průvaru a k účinnější absorpci energie, roztavení většího množství materiálu kolem keyhole a tím ke zvětšení tloušťky svaru, ale zároveň i tepelně ovlivněné oblasti. Ovlivňování velikosti svaru je ale závislé na frekvenci rozmítání. Pokud je nižší, dochází ke zvětšování tloušťky, jak bylo uvedeno, ale pokud je vysoká, dochází k tomu, že i přes velký výkon se vlivem vyšší frekvence nestihne roztavit takové množství materiálu, jelikož paprsek na určitém místě setrvává velmi krátkou dobu a dochází tak ke zmenšení šířky svaru a tepelně ovlivněné oblasti.

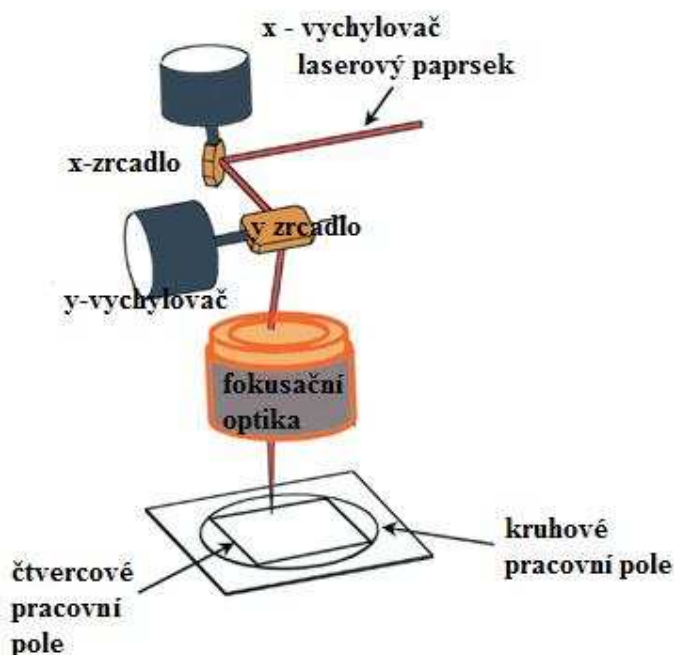
Rozmítáním svazku je možné ovlivňovat i mikrostrukturu svaru, čehož je dosaženo tím, že paprsek míchá svarovou lázní. Vzhledem k rozdílnému přísunu tepla pak dochází k rozdílnému chladnutí svarové lázně, tak je možné potlačit různé svarové vady. Změnou mikrostruktury tak dosahujeme i zlepšení mechanických vlastností.

2.5.3 Přístrojové vybavení pro rozmítání svazku [3], [49], [50], [51],[52]

Pro metodu laserového svařování s rozmítáním svazku lze použít lasery, které dosahují dostatečné kvality výstupního svazku, nejběžněji používaným typem laseru je vláknový laser, ale lze použít i jiné typy, např. diskový nebo diodový, jejichž princip byl popsán v předchozích částech.

Co se týče technologických hlav, využívá se pro metodu s rozmítáním svazku skenovací hlava, která se používá pro tzv. skenerové svařování. Jak je vidět na obrázku 22, kde je zjednodušeně zachycen princip skenovací hlavy, obsahuje dvě počítačem řízená zrcadla, která dokážou velmi rychle pohybovat paprskem v rámci určité plochy - pracovního prostoru. Nevýhodou jsou její poměrně velké rozměry, což přináší omezení pro velikost prostoru, ve kterém se bude svařovat.

Pro svařování s rozmítáním svazku lze použít mimo běžné skenovací hlavy i speciální hlavu zkonstruovanou přímo pro tuto



Obr. 22 Princip skenovací hlavy a laserového skenování [54]

metodu, která má velmi malý rozsah pohybu vychylovacích zrcadel k zaostření svazku používá běžnou čočku. Díky svým rozměrům, které jsou podobné běžné svařovací hlavě, je velice kompaktní. Menší velikost speciální hlavy pro rozmítání je výhodou oproti klasickým skenovacím hlavám, které jsou poměrně velké a není možné s nimi svařovat v místech, jako jsou např. otvory. Rozmítací hlavy jsou tvořeny dvěma malými zrcadly, podobně jako běžné skenovací hlavy, nakloněnou čočkou nebo rotujícím optickým hranolem, pomocí něhož lze dosáhnout pouze přidavného pohybu ve formě kružnice, ale na druhou stranu vyšších rozmítacích rychlostí. Na obrázku 23. je laserová rozmítací hlava od firmy IPG Photonics, určená pro lasery s výkonem do 6 kW, frekvence rozmítání do 1 kHz a s možností volby různých rozmítacích pohybů. Existují i hlavy určené pro výkony do 12 kW nebo až do 30 kW od stejné firmy.



Obr. 23 Voblovací hlava [50]

2.5.4 Výhody rozmítání svazku [3], [49], [50], [51]

Při rozmítání laserového svazku se dosahuje v některých případech ještě kvalitnějších svarů, než je tomu u klasického laserového svařování, především tedy s ohledem na omezení vzniku některých svarových vad, např. pórovitosti. Výhodou je právě možnost ovlivňovat vznik svarových vad u náchylných materiálů, jako jsou hliníkové slitiny nebo slitiny mědi. Rovněž lze svařovat různé materiály dohromady, přičemž díky rozmítání paprsku a míchání svarovou lázní dosahujeme lepšího promísení obou materiálů a tím i lepších vlastností svaru. Další výhodou je dosažení větších tloušťek svaru, což dává možnost pro snadnější a méně dokonalou přípravu svarových ploch před svařováním.

2.6 Bezpečnost při práci s lasery [36]

Velmi důležitá je i bezpečnost při práci s lasery. V závislosti na možnosti poškození zraku a s tím souvisejícím použitím ochranných pomůcek při pohledu do laserového svazku se lasery dělí do 4 bezpečnostních tříd, kde třída IV. je nejnebezpečnější. Výkonné lasery třídy IV. mohou způsobit popáleniny, tržné nebo řezné rány nebo i požár. V průmyslu je nutné zabránit tomu, aby i odražený paprsek zasáhl oči obsluhy nebo jiného personálu, proto svařování probíhá automaticky, většinou prostřednictvím robota, který nese svařovací hlavu v uzavřeném prostoru, v buňce. Stěny buňky musí být vyrobeny z materiálu, který nepropouští vlnovou délku, kterou vyzařuje laser. Každé laserové pracoviště by mělo být řádně označeno, příklad značky je na následujícím obrázku, viz obr. 24.



Obr.24 Označení laserového prostoru [54]

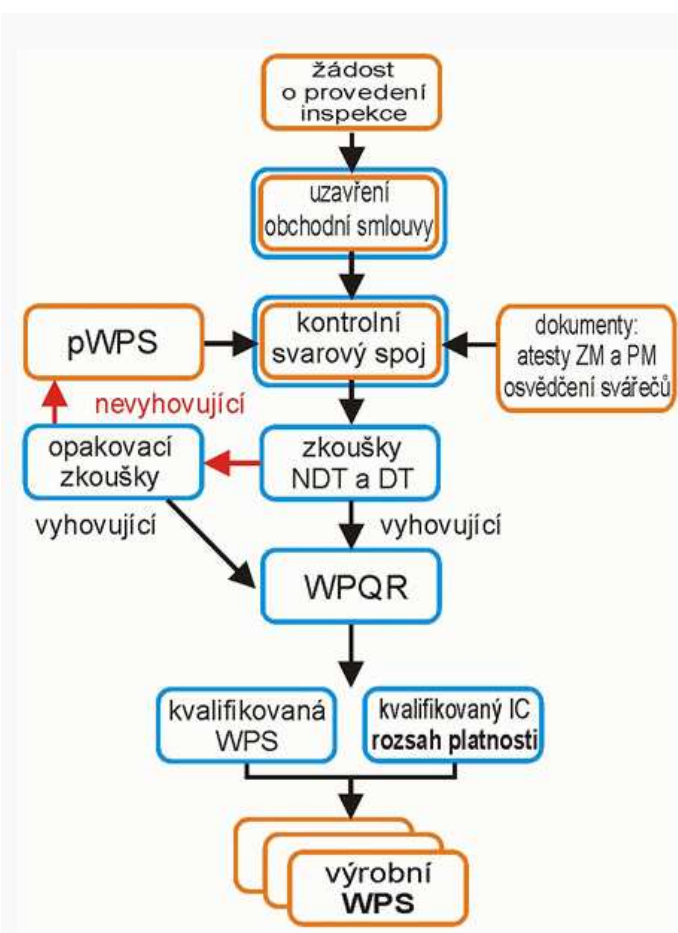
2.7 Zkoušky svarových spojů [44],[56],[57],[58]

Tak jako se pomocí zkoušek určují mechanické vlastnosti materiálů, určují se i mechanické vlastnosti svarů. Kvalita svarů je důležitá pro správnou funkci výrobků, jejich dlouhou životnost, ale i bezpečnost.

Zkoušky svarů se provádějí pro stanovení postupů svařování, aby se ověřilo, jestli je zvolená metoda a parametry vhodná pro daný materiál a danou aplikaci. Pokud zkoušky nevyhovují, musí se stanovovat nové postupy a hledat příčiny neúspěchu. Dle obrázku 25, který ilustruje postup stanovení svařovacího postupu a jeho vyhodnocení a ověření, je první fází žádost o provedení inspekce a uzavření obchodní smlouvy. Dále se provedou kontrolní svarové spoje s atestovanými materiály a zkušenými svářeči, pomocí předběžně stanoveného svařovacího postupu (pWPS). Zkušební svary jsou podrobeny právě destruktivním a nedestruktivním metodám zkoušení, pokud nevyhovují, musí se postup přepracovat, a provést další zkoušky. Pokud tentokrát vyhovují, je vyhotoven protokol WPQR a předán zadavateli. Cílem je stanovit svařovací postup (WPS), který bude implementován ve výrobě. Existuje mnoho různých druhů zkoušek, základní dělení je na destruktivní a nedestruktivní. Jak samotné názvy napovídají, destruktivní zkoušky se vyznačují poškozením vzorku, např. ve formě ploché zkušební tyče, v případě svařování plechů. Mezi destruktivní zkoušky patří zkouška tahem, lámavosti, rázem v ohybu, dále zkouška tvrdosti a metalografické zkoušky, kam patří vyhodnocení makro a mikrostruktury.

Nedestruktivní zkoušky se mohou provádět přímo na zkoumaném tělese nebo i vzorku, přičemž nedochází k jeho mechanickému poškození. Mezi nedestruktivní pak patří kapilární zkoušky, zkouška prozářením nebo zkouška ultrazvukem. Dále pak vizuální kontrola nebo tzv. magnetická prášková zkouška.

Každá u uvedených zkoušek je definovaná v příslušných normách. Aby byly zkoušky průkazné, musí se splnit všechny požadavky dané normou. Pevně jsou stanoveny postupy jednotlivých zkoušek, zkušební stroje a zatížení. Rovněž je předepsán tvar včetně rozměrů zkušebních vzorků, místa jejich odběru, teplota zkoušení a postup vyhodnocení výsledků získaných ze zkoušek. Jenom dobře provedená zkouška může vystihnout skutečné vlastnosti daného materiálu nebo svaru, proto by se zkoušky měly provádět svědomitě a personál, který je provádí, musí být vybaven znalostmi, kvalitními přístroji, mít objektivní a kritický přístup k hodnocení.



Obr. 25 Postup stanovení svařovacího postupu [57]

2.7.1 Destruktivní zkoušky [56],[59],[60],[62],[63],[65],[66],[67]

V této podkapitole jsou podrobněji rozepsány jednotlivé destruktivní zkoušky, jejichž výčet byl uveden na předchozí straně:

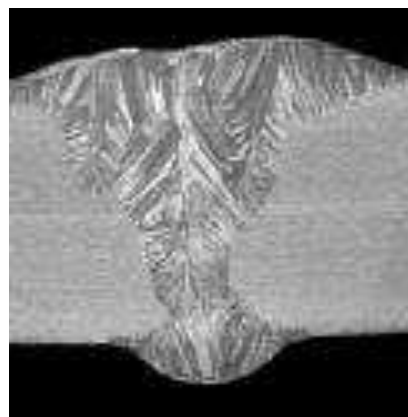
- Pro metalografické vyhodnocení svarů je nejprve nutné připravit vzorky pro pozorování, které jsou odebrány ze zkušebního svařence (např. dva svařené plechy), následně vybroušen, vyleštěn, naleptán, očištěn a vysušen. Pořízení vzorků má svá pravidla. Odebírá se několik vzorků, každý musí vystihnout charakter struktury



Obr. 26 Ukázka vybavení metalografické laboratoře [61]

zkoumaného svaru. Při přípravě nesmí dojít k tepelnému ani mechanickému ovlivnění zkoumané struktury. Dalším krokem je tzv. preparace vzorku, která se provádí kvůli lepší manipulaci. Preparace se provádí buď zaléváním za studena, kdy se vzorek vloží do formičky a následně zalije roztavenou epoxidovou nebo methalakrylovou pryskyřicí nebo zalisováním za tepla, přičemž je vzorek umístěn do teplotní komůrky lisu a zasypán pryskyřicí ve formě prášku. Vzorek je vystaven teplotě 100-180°C a silám asi 30 - 50 kN. Z toho důvodu se používá zalisování za tepla pro vzorky, kde nehrozí ovlivnění struktury v důsledku působení tlaku a zvýšených teplot. Každý vzorek musí být také řádně označen, včetně zanesení polohy odkud byl odebrán. Dalším krokem v přípravě vzorků je broušení prováděné brusnými papíry a dále leštění pomocí brusných diamantových past. V tomto, neleptaném, stavu lze zjistit trhliny, praskliny nebo staženiny. Další fází je leptání vzorku, díky kterému se zviditelní mikrostruktura. Na vyleštěný povrch vzorku se nanese chemikálie nezyvaná leptadlo, která způsobí vznik povrchového reliéfu vlivem různé rozpouštěcí schopnosti jednotlivých strukturních složek. Pro leptání korozivzdorných ocelí lze použít elektrolytické leptání, kdy dochází k vzájemnému účinku elektrického proudu a elektrolytu materiálu vzorku. Vzorek může být při tomto způsobu leptání zapojen dvěma způsoby, podle toho se pak nazývá jako leptání anodické a katodické. Rozlišují se dva způsoby metalografického vyhodnocení, jsou to zkoušky makrostruktury a mikrostruktury. Na obrázku 26 lze vidět některé vybavení pro přípravu vzorků.

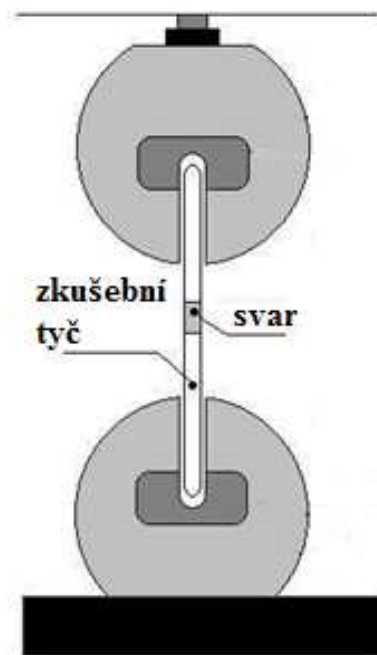
- Makrostruktura se vyhodnocuje na základě pozorování vzorku, který je odebraný z místa svaru v příčném řezu a zahrnuje všechny jeho části. Vzorek musí být vybroušen a případně naleptán (např. vodním 10% roztokem kyseliny dusičné) pro zviditelnění makrostruktury, lze ale pozorovat makrostrukturu i v nenaleptaném stavu. Makrostrukturu lze pozorovat pouhým okem, viz obrázek 27, nebo při malém zvětšení, maximálně 30-50× např. lupou či mikroskopem. Výstupem kontroly je vyhodnocení tvaru svaru, způsobu kladení svarových vrstev, charakteru a šířky tepelně ovlivněné oblasti, hranice natavení, provaření



Obr. 27 Příklad makrostruktury svaru [56]

kořene svaru nebo spojení jednotlivých housenek a výskyt defektů jako jsou póry, vměstky, studené spoje, trhliny atd.

- Při vyhodnocování mikrostruktury probíhá pozorování vzorků při velkém, obvykle do 500, ale až 2000 - násobném, zvětšení. Pro vyvolání struktury je naleptán, ale stejně jako u makrostruktury lze pozorovat vzorek i v nenaleptaném stavu, kdy lze pozorovat charakter rozložení nekovových vměstků nebo necelistvostí materiálu. Pro vyvolání mikrostruktury, lze sledovat jednotlivá zrna materiálu, hranice mezi nimi, jejich velikost, orientaci a tvar jak ve svarovém kovu, tak i v tepelně ovlivněné oblasti základním materiálu.
- Zkouška tahem je jednou ze základních zkoušek ke zjištění mechanických vlastností materiálů, které určují jeho vhodnost pro rozličné aplikace. Základní vlastnosti získané vyhodnocením tahové zkoušky, jsou mez kluzu R_e ($R_{p0,2}$), mez pevnosti R_m , tažnost A a kontrakce Z . $R_{p0,2}$ se nazývá smluvní mez kluzu, počítaná pro 0,2 % plastické deformace vzorku. U svarů je nejdůležitější mez pevnosti svaru a poloha lomu. Zkouška se provádí dle normy ČSN EN ISO 4136 v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1 a spočívá v tahovém zatížení zkušební vzorku, ve formě tyče, která je zatěžována až do jejího porušení, tj. přetržení. Vzorek, resp. zkušební tyč, je odebrán příčně ze svarového spoje a po opracování se středy svarového kovu a vzorku shodují. Pro plechy se používá plochá zkušební, která je pevně upnuta do trhacího stroje a následně tahově zatížena, jak je zobrazeno na přiloženém schématu (obr. 28). Výsledkem zkoušky je tahový diagram, pomocí něhož se vyhodnocují již uvedené vlastnosti materiálu, či svaru. Existují dva typy tahových diagramů, které se odlišují způsobem výpočtu jednotlivých pevnostních charakteristik. V případě tzv. smluvního diagramu se síly na mezi pevnosti či pružnosti vztahují na jednotku počátečního průřezu. Další možností je vztáhnout síly na okamžitý průřez, pak se jedná o skutečný tahový diagram. Dále jsou uvedeny vzorce pro výpočet smluvních napěťových charakteristik a deformačních charakteristik:



Obr.28 Princip zkoušky tahem [64]

Mez kluzu:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}, \quad (4.1)$$

kde: R_e – mez kluzu [MPa]

F_e – síla na mezi kluzu [N]

S_0 – počáteční průřez [mm^2]

Mez pevnosti:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \quad (4.2)$$

kde: R_m – mez pevnosti [MPa]

F_e – síla na mezi pevnosti [N]

S_0 – počáteční průřez [mm^2]

Tažnost:

$$A = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100, (4.3)$$

kde:A – tažnost [%]

l_0 – počáteční vzdálenost rysek [mm]

l – konečná vzdálenost rysek [mm]

Kontrakce:

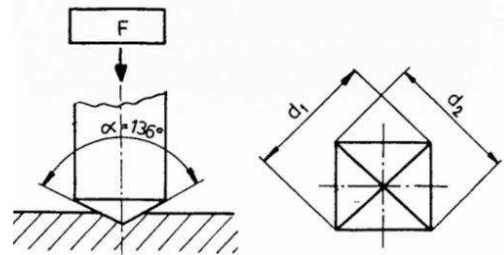
$$Z = \frac{S_0-S}{S_0} \cdot 100, (4.4)$$

kde:Z – kontrakce [%]

S_0 – počáteční průřez vzorku [mm²]

S – konečný průřez vzorku [mm²]

- Ačkoliv existuje několik metod zkoušení tvrdosti, jako zkouška podle Brinella, Rockwella apod., používá se pro vyhodnocování kvality svarů zkouška podle Vickerse, jejíž princip je zřejmý z obrázku 29. Zkouška probíhá dle normy ČSN EN 1043-1. Výsledkem je tvrdost v HV v dané oblasti svaru. Zkouška se provádí za okolní teploty 23±5 °C a spočívá ve vtlačování diamantového tělesa tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem $\alpha = 136^\circ$ do povrchu zkoušeného tělesa. Zatížení musí působit kolmo k ploše, do které se indentor vtlačuje a má hodnotu 49 a 98 N - HV 5 a HV10. Po odtížení se změří úhlopříčky vtisku, který zůstane na povrchu. Tvrdost se pak určí jako poměr zkušebního zatížení ku povrchu vtisku. Důležité je získat tvrdost ve všech možných oblastech svaru, proto se měření provádí na linii - základní materiál, tepelně ovlivněná oblast, svarový kov, tepelně ovlivněná oblast, základní materiál. Pomocí metody dle Vickerse se měří i mikrotvrdost materiálu, kdy působící zatížení dosahuje hodnot menších než 1,961 N.



Obr.29 Princip zkoušky dle Vickerse [67]

Vzorky pro zkoušku tvrdosti se odebírají řezáním, přičemž nesmí dojít k tepelnému ovlivnění povrchu. Řez je veden kolmo na osu svarového spoje a musí zahrnovat základní materiál, tepelně ovlivněnou oblast a svarový kov. Před měřením se musí vzorek obrousit, případně naleptat, aby došlo ke zviditelnění jednotlivých částí spoje. Často se pro zkoušku tvrdosti používají vzorky vyrobené pro vyhodnocení makrostruktury. Počet a rozmístění vtisků je dán výše uvedenou normou. Naměřené hodnoty tvrdosti se i s místem vpichu zaznamenávají a porovnávají s přípustnými hodnotami tvrdosti pro svarové spoje pro daný materiál. Příprava vzorků pro zkoušku mikrotvrdosti a jejich vyhodnocení je stejné jako u zkušek tvrdosti. Zkoušky mikrotvrdosti se provádějí u materiálů s velkými gradienty tvrdosti metodou dle Vickerse a zkušební zatížení je 0,98 až 49 N, což odpovídá HV0,1 až HV5. Metoda měření dává lepší obraz o minimálních a maximálních hodnotách tvrdosti v jednotlivých částech spoje, jelikož vtisky jsou menší a mohou být umístěny blíže k sobě. Vzdálenost vtisků se pohybuje v rozmezí od 0,2 pro HV0,1 do 0,7 mm pro HV5, pro kovy na bázi železa s výjimkou austenitických ocelí. Tvrdost materiálu se vypočte pomocí následujícího vztahu:

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2},$$

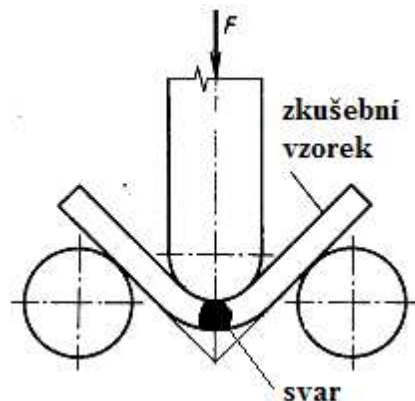
(4.5)

kde:HV – tvrdost dle Vickerse HV]

F – zkušební zatížení [N]

d – střední hodnota úhlopříček vtisku [mm]

- Zkouška lámavosti se používá pro stanovení deformačních schopností svarového spoje. Provádí se ohýbacím trnem, přičemž je zkušební tyč podepřena dvěma válečky a osa svaru se shoduje s osou ohýbacího trnu. Zkouška je ukončena po dosažení předepsaného úhlu ohybu. Zkouška se provádí v příčném i podélném směru, s tím také souvisí odběr zkušebních vzorků, ty nesmí být při odběru tepelně ovlivněny. Princip zkoušky, viz obrázek 30.
- Zkouška rázem v ohybu je další zkouškou mechanických vlastností, konkrétně se pomocí ní určuje vrubová houževnatost, nárazová práce, místo a typ lomu. Definována je v normě ČSN EN ISO 9016 v souladu s normou ČSN ISO 148-1. Zkušební těleso je opatřeno vrubem, který je vytvořen buď v oblasti svaru, nebo v oblasti přechodového pásma. Princip zkoušky spočívá v přeražení zkušebního tělesa Charpyho kladivem za pokojové nebo snížené teploty do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

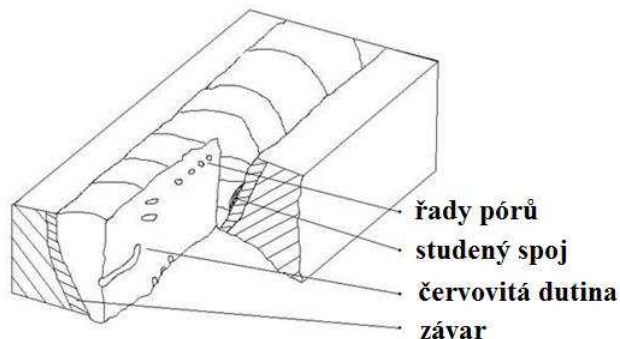


Obr. 30 Princip zkoušky lámavosti [68]

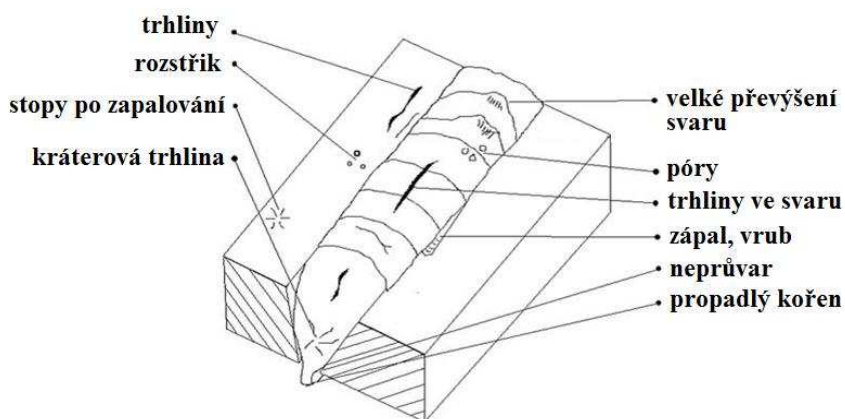
2.7.2 Nedestruktivní zkoušky [59],[69],[70],[71],[72]

Jak již bylo zmíněno výše, nedestruktivní, nebo také defektoskopické, metody zkoušení se vyznačují tím, že při nich nedochází k destrukci zkoumaného tělesa, pozorování pak probíhá přímo na zkušebním svařenci nebo na hotovém dílci.

Rozlišuje se několik typů vad, které mohou ve výsledném svaru nastat, jsou to vady bodové, plošné a prostorové co se týče jejich rozlišení podle tvaru. Bodové vady jsou např. mikropóry, k plošným vadám se řadí trhliny, mikrotrhliny, studené spoje a mezi objemové plynové dutiny, vměstky nebo staženiny. Podle polohy se vady rozlišují na povrchové, např. trhliny, studené spoje, neprůvary nebo póry, viz obr. 32. A na vady vnitřní, jako jsou dutiny, staženiny, vměstky,



Obr. 31 Vnitřní svarové vady [68]



Obr. 32 vnější svarové vady [68]

studené spoje nebo neprůvody v kořeni, zobrazené i s popisem na obrázku 31. Nejčastěji používanými metodami nedestruktivního zkoušení jsou vizuální kontrola, penetrační zkouška nebo magnetická prášková zkouška, jež se používají pro zjištění povrchových vad. Pro detekci vnitřních vad se využívá zkouška prozářením nebo ultrazvukem. Dále jsou stručně popsány jednotlivé druhy nedestruktivních zkoušek, uvedené na straně 28:

- Zkouška prozářením spočívá v prozáření zkoumaného tělesa RTG nebo gama zářením a následném zviditelnění prošlého záření pomocí vhodného detektoru. Intenzita prošlého záření závisí na tloušťce prozařovaného materiálu, přičemž vady ve svaru relativně podstatně, v závislosti na rozsahu vady, mění intenzitu prošlého záření. Na detektoru je pak zobrazeno rozložení intenzity prošlého záření, ze kterého lze vyhodnotit typ, tvar nebo velikost vady.
- Zkoušení ultrazvukem je založeno na šíření mechanického vlnění pozorovaným předmětem, kdy při přechodu přes rozhraní mezi dvěma prostředím (např. přechod z homogenního materiálu do trhliny nebo vměstku atd.), které mají různé akustické vlastnosti, dochází ke změnám vlnění, které jsou detekovány. Nejčastěji užívanou metodou ultrazvukového zkoušení je odrazová impulzní metoda, kdy ultrazvukové vlnění je vysíláno ve formě krátkých impulzů, které se následně odráží od protilehlého povrchu zkoumaného předmětu nebo právě od vnitřních vad. Po odrazu jsou tyto vlny zachyceny přijímačem, a následně zobrazeny na obrazovce, kde na základě tvaru impulzu a času, kdy se odražený impulz dostal na přijímač lze vyhodnotit, o jaké a jak velké vady jde, a v jaké hloubce pod povrchem jsou. Pomocí ultrazvukové zkoušky lze s úspěchem odhalit plošné a objemové vady, jako bubliny, póry, studené spoje nebo neprovaření kořene svaru.
- Zkoušení magnetickou práškovou metodou lze použít pouze pro feromagnetické materiály, a pouze pro zjištění vad na jejich povrchu, či těsně pod ním. Principem metody je vystoupení magnetického pole v místě vady nad povrch namagnetovaného materiálu. Vada je pak detekována pomocí prášku, který kopíruje, "zviditelňuje", magnetické siločáry.
- Kapilární, nebo též penetrační zkoušky jsou založeny na principu vztlínivosti kapalin v kapiláře, resp. na kapilární elevaci a je možné je použít pouze pro detekci vad, které začínají na povrchu, jako jsou např. trhliny, studené spoje pórů nebo zápalů. Zkouška probíhá v několika fázích, kdy zkoumaný povrch musí být odmaštěn, následně vysušen a poté se nanese tzv. kapilárně aktivní kapalina, která pronikne do vady, poté se přebytečná kapalina odstraní a kapalina zatečená do vady začne vztlínat, načež se nanese vývojka, čímž se při použití UV osvětlení vady zviditelní.
- Vizuální kontrolu lze zjistit zjevné povrchové vady, jako nerovnoměrnosti, převýšení svaru, trhliny, zápal, dále např. studené spoje a vady v kořenové oblasti. Rozlišuje se přímá, kdy svar pozorujeme pomocí pouhého oka nebo lupy, a nepřímá vizuální kontrola, kdy pozorování probíhá tzv. endoskopem. Mimo vad se kontroluje i dodržení předepsané geometrie svaru a jeho povrchový vzhled.

2.7.3 Zkoušky odolnosti proti mezikrystalové korozi [20]

K určení odolnosti proti mezikrystalové korozi se používají 3 zkoušky. V každém případě je vzorek podroben působení agresivnímu prostředí. Jednou ze zkoušek je tzv. Hueyův test, který se používá mimo určování náchylnosti k mezikrystalové korozi i k určení náchylnosti k jiným druhům korozi u korozivzdorných ocelí, jako je nožová nebo šterbinová koroze. Provádí se v prostředí 65% koncentrované vroucí kyseliny dusičné po dobu 48 hodin v pěti periodách. Pomocí zkoušky lze odhalit místa ochuzená o Cr a místa vzniku σ -fáze, která jsou příčinami mezikrystalové koroze. Další zkouškou je Straussův test, kde je jako agresivní prostředí použita kyselina sírová a síran měďnatý a Streicherův test, v jehož případě je ocel vystavována opět prostředí kyseliny sírové, ale oproti předchozímu případu síranu železitého.

3 EXPERIMENT

Cílem experimentu je posouzení vlivu různých svařovacích parametru na vlastnosti spoje korozivzdorné feritické oceli 1.4016 vytvořených metodou rozmítání laserového svazku. A rovněž posoudit vlastnosti svarů, jako makro a mikrostruktura, mechanické vlastnosti a tvrdost, zhotovených s rozdílnými parametry rozmítání. Svary budou porovnány mezi sebou a s referenčním vzorkem, svařeným bez rozmítání. Nastínění řešeného problému, popis problematiky svařitelnosti korozivzdorných feritických ocelí je uveden v předchozích částech práce, stejně jako popis laserového svařování, včetně metody rozmítání svazku, a metod zkoušení svarů. Zařízení použité pro experiment, svařovaný materiál, postup experimentu a jeho vyhodnocení bude popsáno v dalších kapitolách.



Obr. 33 Plech z oceli 1.4016 [74]

3.1 Svařovaný materiál [73],[74]

Experiment řeší svařování oceli 1.4016, dle chemického složení značené X6Cr17, jejíž ekvivalent v ČSN je 17 040, na obrázku 33 lze vidět plech z této oceli. Tento materiál patří do skupiny feritických korozivzdorných ocelí, jejichž vlastnosti, svařitelnost a použití, včetně jejich výhod a nevýhod byly uvedeny v předchozích částech práce, konkrétně v kapitole 2.

- Chemické složení oceli, resp. tavby, která byla použita pro experiment uvádí tabulka 1, převzatá z atestu materiálu, jež je přílohou č. 2.

Tab. 2 Chemické složení oceli 1.4016

prvek	C	Ni	Si	Mn	P	S	Cr
obsah [%]	0,041	0,15	0,40	0,42	0,018	0,001	16,1

- Mechanické vlastnosti plechu, dle atestu materiálu, viz příloha 2, jsou uvedené v následující tabulce (tabulka 3).

Tab. 3 Mechanické vlastnosti ocelového plechu z materiálu 1.4016

	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50} [%]	A_5 [%]	HRBW
minimální hodnota	280	450	22	20	
maximální hodnota		600			89
aktuální hodnota	325	481	31	28	78

- Co se týče korozní odolnosti, tak s kovově lesklým povrchem odolává atmosférické korozi s výjimkou silně znečištěného, průmyslového, ovzduší. Nekoroduje ve vodě bez obsahu chloru a minerálních solí. Je odolná vůči zředěné kyselině dusičné a méně agresivním organickým kyselinám při pokojové teplotě.

- Ocel 1.4016 lze svařovat všemi dostupnými metodami, přičemž se doporučuje přehřev na teploty 150 až 300 °C a přídavný materiál podobného složení s vyšším obsahem Cr nebo přídavný materiál austenitický. Po svaření se má ochlazovat na vzduchu a pokud to je možné, tak vyžítat při teplotách 790-800 °C s prodlevou na teplotě v tomto rozmezí 4 hodiny s následným ochlazením na vzduchu. Ocel je náchylná ke hrubnutí zrna, vlivem ohřevu při svařování. I když je v dodaném stavu odolná proti mezikystalové korozi, po svaření už být nemusí, proto se doporučuje následně svařenec vyžítat, aby se zlepšila jeho odolnost vůči tomuto druhu koroze.
- Do teplot 800 °C odolává žáru a spalinám obsahujících siřné sloučeniny a nauhličující látky. Používá se na výrobu méně namáhaných součástí v potravinářství nebo farmaceutickém průmyslu. Vyrábí se z ní zařízení přicházející do styku s vodou, jako jsou bubny praček, nebo párou. Další využití nalézají ve výrobě kuchyňských potřeb a do obsahu C 0,03 % se používá v elektrotechnice.
- Jak bylo uvedeno výše, pro odhad struktury korozivzdorných feritických ocelí se používá chromový a niklový ekvivalent, které se vynášejí do Schaefflerova diagramu. Dále jsou tedy uvedeny výpočty jednotlivých ekvivalentů:

Výpočet chromového ekvivalentu dle vzorce (2.1):

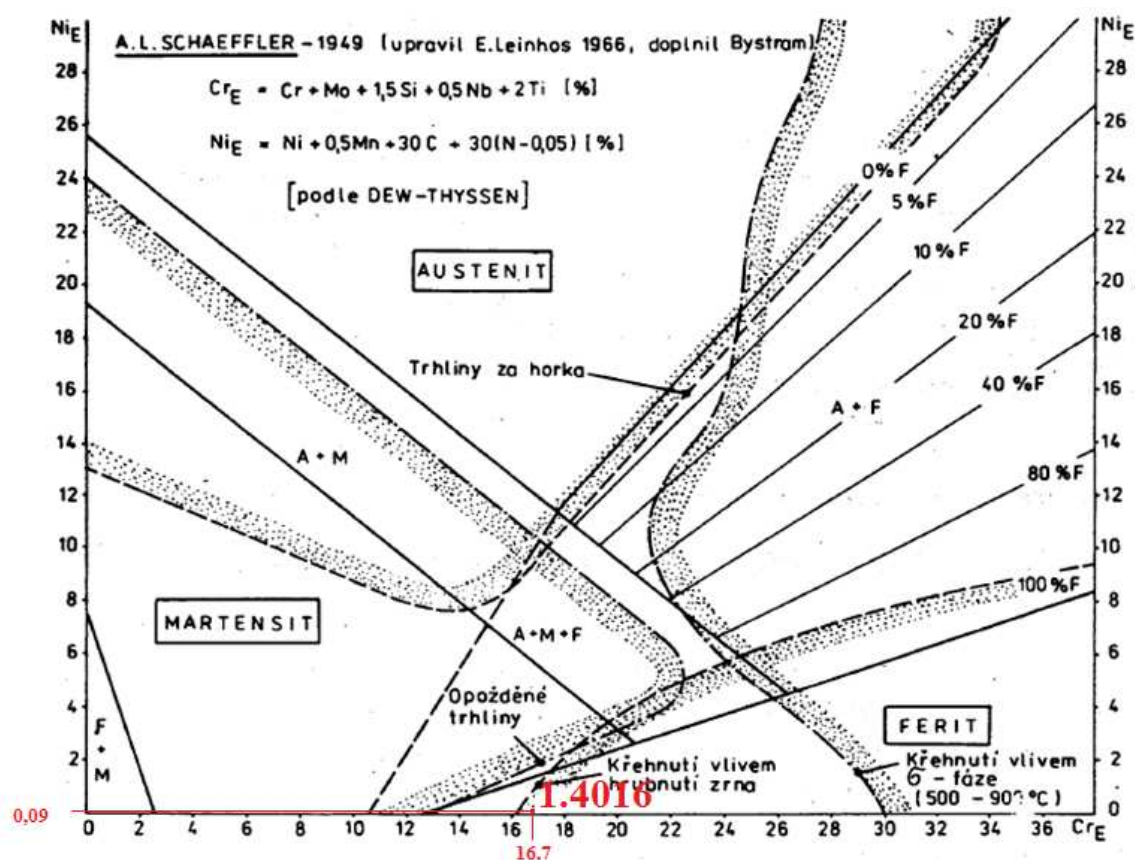
$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5Si + 0,5Nb + 2Ti$$

$$Cr_E = 16,1 + 0 + 1,5 \cdot 0,40 + 0,5 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = 16,7 \%$$

Výpočet niklového ekvivalentu dle (2.2):

$$Ni_E = Ni + 0,5Mn + 30C + 30(N - 0,05)$$

$$Ni_E = 0,15 + 0,5 \cdot 0,42 + 30 \cdot 0,041 + 30(0 - 0,05) = 0,09 \%$$



Dl

Obr. 34 Ocel 1.4016 ve Schaefflerově diagramu [18]

ě bod char

Z diagramu na obrázku 34 plyne feritická struktura oceli a její náchylnost ke zkřehnutí vlivem zhrubnutí zrna, které se dostavuje při ohřevu na teploty vyšší než 950 °C, jak bylo uvedeno již v teoretické části. Zkřehnutí vlivem σ -fáze by se uplatnit nemělo.

- Ocel 1.4016 je vhodná na výrobu zařízení, které přichází do styku s vodou nebo párou. Dále se využívá pro zařízení, která se používají pro výrobu kyseliny dusičné nebo výrobu chemických aparatur. Další uplatnění nalézá ve výrobě spotřebního zboží, kuchyňských potřeb, potravinářském průmyslu nebo v dopravě.

3.2 Přístrojové vybavení [75]

Experiment probíhal na pracovišti Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky, kde je instalován vláknový výkonový laser IPG YLS 2000 s modulovaným výkonem, který lze rozšiřovat po 500 W do 2000W a vlnovou délkou generovaného laserového záření 1070 nm. K dispozici jsou různé technologické hlavy -svařovací hlava Precitec YW 30, řezací hlava Precitec YRC100 a skenovací hlava Arges Rhino 31. Záření je do technologické hlavy přiváděno pomocí optických vláken. Technologické hlavy jsou nesené víceosým robotickým ramenem ABB IRB 2400, které vykonává svařovací pohyb. U řezací a svařovací hlavy je pohyb uskutečňován pouze tímto ramenem. U hlavy skenovací, která má pracovní plochu 205×205 mm, je možné, pokud to dovolí složitost svařence, svařovat bez pohybu hlavy a řídit pouze pohyb paprsku, což s sebou přináší vyšší rychlost svařování a tím i vyšší produktivitu. Na obrázku 35 lze spatřit robotické rameno s upnutou skenovací hlavou, včetně svařovacího stolu a použitých upínek a na vedlejším obrázku (obr. 36) je zachycen použitý laser.



Obr.35 Robot se skenovací hlavou



Obr.36 Laser YLS -2000

3.3 Parametry procesu a postup svařování

Celkem bylo zhotoveno 6 ks vzorků z feritické korozivzdorné oceli 1.4016 svařených s různými parametry, přičemž výkon laseru $P = 2000 \text{ W}$, s účinností cca 81 %, platí pro režim voblování, a rychlost svařování $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ se neměnily, měnil se pouze tvar a frekvence rozmítání. První vzorek byl svařen bez rozmítání a posloužil tak jako referenční. Jako ochranný plyn, chránící tavnou lázeň před vzdušným kyslíkem byl použit argon. Poloha ohniska byla nastavena na 1 mm pod povrch materiálu. Svařovací parametry pro jednotlivé vzorky jsou zaznamenány v následující tabulce, viz tabulka 4. Označení vzorků číslem 914

vychází z interního značení Ústavu přístrojové techniky, kdy číslice 9 označuje rok (2019) a 14 znamená 14. sadu vzorků v tomto roce.

Tepelný příkon při svařování korozivzdorných feritických ocelí by neměl překročit $10 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$, viz teoretická část. Dosazením do vzorce (2.3), získáme tepelný příkon v případě tohoto experimentu:

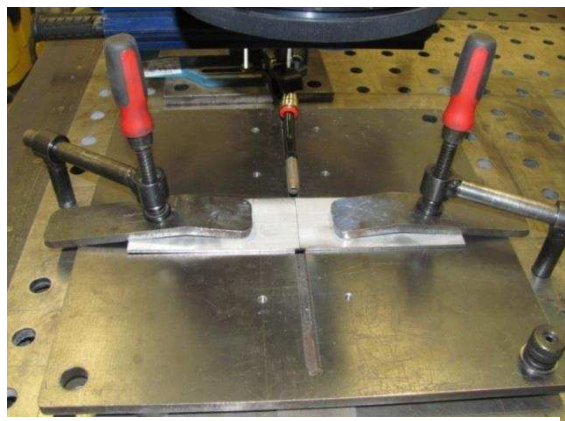
$$Q_s = \frac{\eta \cdot P}{v} = \frac{0,81 \cdot 2000}{1} = 16,2 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Vypočtená hodnota tepelného příkonu svařování je nad rámec hodnoty doporučené, lze tedy očekávat zkřehnutí vlivem zhrubnutí zrna.

Tab. 4 Svařovací parametry jednotlivých vzorků

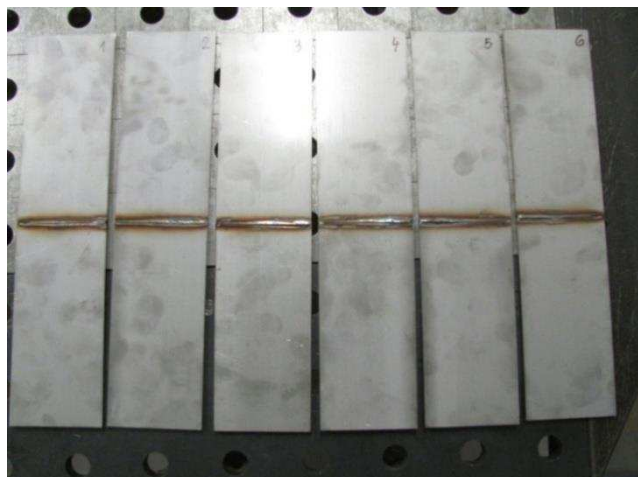
Vzorek	Výkon P[kW]	Rychlost v [mms ⁻¹]	Tvar rozmítání	Amplituda r [mm]	Frekvence f [Hz]
914-1	2	10	-	-	-
914-2	2	10	kružnice	0,6	30
914-3	2	10	kružnice	0,6	60
914-4	2	10	kružnice	0,6	90
914-5	2	10	elipsa	a = 1,2 b = 0,6	90
914-6	2	10	kmitání v ose svaru	2,4	90

Co se týče samotného postupu svařování, dva plechy z oceli 1.4016 byly, pokud to bylo třeba z hlediska nerovností na jejich dorazové ploše, obroušeny brusným papírem a následně upevněny pomocí dvou upínek na svařovací stůl, viz obr. 37. Samotnému svařování předcházelo nabodování z jedné strany a následně došlo ke svaření ze strany druhé. Nabodování je důležité z hlediska udržení konstantní a co nejmenší mezery mezi oběma svařovanými plechy. Pokud by k nabodování nedošlo, tak by se vlivem smrštění při chladnutí již svařené části rozevírala část ještě



Obr. 37 Upnutí plechů před svařením

nesvařená a svařování by pak nemohlo úspěšně proběhnout. Po svaření byl každý vzorek označen číslem odpovídajícím tabulce výše. Na obrázku 38 jsou vzorky po svaření, které byly následně použity pro výrobu vzorků pro metalografii a pro tahovou zkoušku. Zde je nutné podotknout, že šířka svaru v případě prvního a posledního vzorku by měla odpovídat průměru paprsku a u ostatních vzorků je šířka rovna součtu dvojnásobku rozmítací amplitudy a průměru paprsku v místě dopadu na materiál.



Obr. 38 Vzorky po svaření

3.4 Vizuální kontrola

Tato kontrola spočívá v prohlížení vzorků pouhým okem, nebo při malém zvětšení, jak bylo uvedeno v teoretické části. V tomto případě poslouží spíše k popisu tvaru jednotlivých svarů. Směr svařování je na fotografiích od pravého okraje stránky k levému. Z uvedených fotografií jednotlivých vzorků si lze povšimnout některých skutečností:

- Na fotografii (obr. 40) je zachycen detail svaru vzorku 914-1 lze pozorovat rovnoměrnou tloušťku svaru cca do $\frac{2}{3}$ jeho délky. Povrch základního materiálu je čistý bez větších kuliček způsobených rozstříkem.



Obr. 40 Detail svaru vzorku 914-1

- Rozmítání svazku již u vzorku 914-2 způsobilo změnu tvaru svaru, který má na začátku svařování větší šířku, než na konci, přičemž se šířka mění plynule. Rozstřík je obdobný jako u předchozího vzorku, viz obrázek 41.



Obr. 41 Detail svaru vzorku 914-2

- Svar vzorku 914-3 má asi do $\frac{2}{3}$ délky svaru shodný tvar jako je tomu v případě vzorku 914-2, ale následně dochází k velkému zmenšení šířky svaru asi na 0,5-násobek původní šířky. Rovněž došlo k nárůstu počtu a ke zvětšení kuliček, tj. k většímu rozstříku, jak je vidět na obrázku 42.



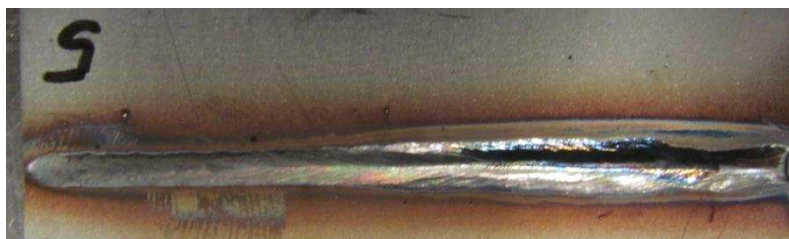
Obr. 42 Detail svaru vzorku 914-3

- Svar vzorku 914-4 má obdobný tvar jako předchozí vzorek s jistou anomálií při začátku svařování stejně tak rozstřík zůstal podobný, jako u vzorku 914-3, viz obr. 43.



Obr. 43 Detail svaru vzorku 914-4

- I u vzorku 914-5 došlo ke změně tvaru po šířce svaru, tentokrát je však zúžení patrné již o cca poloviny délky svaru, viz obr. 44. Počáteční nepravidelnost svaru a rozstřík je obdobný jako u předchozího vzorku.



Obr. 44 Detail svaru vzorku 914-5

- Ačkoliv byl vzorek 914-6

svařován rozmítáním, či spíše kmitáním, v ose svaru, tj. prakticky stejným pohybem, jako u vzorku svařeném bez rozmítání, došlo i u tohoto vzorku k tomu, že šířka svaru se po jeho délce opět mění. Jak ze zachyceno na obrázku 45, šířka svaru se mění rovnoměrně a opět zde lze nalézt nepravidelnost svaru na jeho počátku, rozstřík však odpovídá vzorku 914.1 svařenému bez rozmítání.



Obr. 45 Detail svaru vzorku 914-6

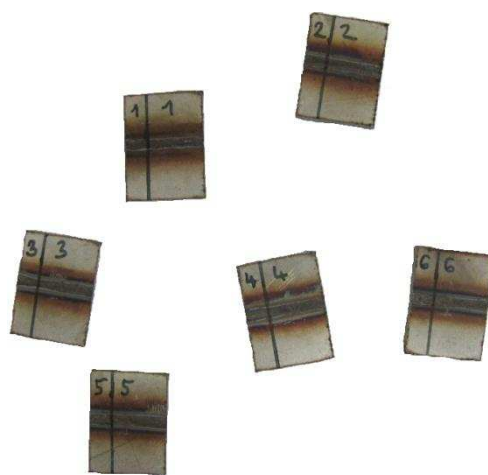
Již po letmém prohlédnutí svarů lze zjistit vliv jednotlivých parametrů na vzhled a geometrii svaru. Všechny vzorky svařené s rozmítáním svazku vykazují zúžení svaru po jeho délce od začátku ke konci. K zúžení došlo i u vzorku 914-1, který byl svařen bez rozmítání, ale ne v takové míře, jak tomu bylo u dalších vzorků. Nepravidelnost svaru na jeho začátku nebyla pravděpodobně způsobena svařováním s rozmítáním při vyšších frekvencích, jak by se mohlo zdát, ale pravděpodobně tím, že paprsek začal svařovat na hraně plechu, či částečně mimo plech. Dalším poznatkem je zvýšení rozstříku kovu při vyšších frekvencích rozmítání ve tvaru kružnice, potažmo elipsy. Pouhým okem nebyly zjištěny žádné viditelné svarové vady. Co se týče zúžení svaru, nabízí se následující vysvětlení. Jelikož osa fokusační čočky skenovací hlavy byla nad středem plechu, dále došlo k nabodování, tj. paprsek urazil dráhu poloviny délky svaru, načež se vrátil na druhý konec plechu a začal svařovat. V průběhu této trajektorie došlo pravděpodobně k mírnému přehřevu, čímž se rozšířila oblast vedení tepla a tak došlo k rozšíření svaru. V místě, kde se šířka svaru zužuje, již nebyl materiál ohřátý natolik, postupně ochladl, aby byl umožněn takový odvod tepla, který by způsobil roztavení větší části materiálu. Jelikož se dosáhlo průvaru přes celou tloušťku plechu a svar je poměrně široký, dá se tedy říci, že došlo k penetračnímu a kondukčnímu režimu současně.

3.5 Makro a mikrostruktura

Vyhodnocení makro a mikrostruktury je jednou ze zkoušek vlastností svarového spoje, pomocí níž získáme přehled o struktuře neovlivněného základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu. Stav struktury, je jedním ze základních předpokladů pro dobré mechanické vlastnosti a v případě korozivzdorných ocelí i pro antikorozi vlastnosti svaru.

Pro vyhodnocení byly zhotoveny metalografické vzorky, které byly vyříznuty z prvotních svařených vzorků na obr 38. Výřezy lze vidět na obrázku 46. Samotná příprava vzorku probíhala v několika fázích, které jsou podrobněji rozepsány dále:

- V místě, kde se neprojeví tepelné ovlivnění z předchozího řezání laserem, toto místo bylo stanoveno na 4 mm od okraje, byl vzorek rozříznut, čímž byly získány dvě části. Menší z nich pak posloužila tedy pro výrobu metalografického vzorku, a větší k případné potřebě v budoucnu (např. při ztrátě nebo poškození preparovaného a vybroušeného vzorku). Řezání proběhlo na kotoučové pile s vodním chlazením, aby se v co největší možné míře zabránilo tepelnému ovlivnění, s označením MTH MIKRON 110, viz obr. 47. Po



Obr. 46 Výřezy pro výrobu metalografických vzorků

rozříznutí byla menší část omyta a osušena a větší, nepotřebná, uschována. Jelikož po řezu na pile vznikly otřepy, bylo nutné je obrousit, což proběhlo na brusném papíře s využitím zařízení SAPHIR 330, který je vidět na obrázku 48., poté byl vzorek opět omyt a osušen.



Obr. 47 Kotoučová pila MTH
MIKRON 110



Obr. 48 SAPHIR 330

- Vzorek byl v přístroji STRUERS CITO PRESS-1, viz obr. 49, zalisován do pryskyřice, která byla nasypána v práškové formě. zalisování jednoho vzorku trvalo cca 3 minuty.
- Do pryskyřice zalisovaný, preparovaný, vzorek byl následně broušení, ve třech fázích, nejprve kotoučem se zrnitostí 500, pak 1200 a následně diamantovým kotoučem, se zrní o velikosti 9 μm , na každém kotouči se brousilo 3 minuty. Po každém kroku opět následoval oplach vodou, izopropylalkoholem a následné sušení. Po broušení diamantovým kotoučem i čištění pomocí ultrazvuku, přičemž byl vzorek ponořen v technickém líhu.
- Další fází přípravy vzorku bylo leštění, které probíhalo na stejném přístroji jako broušení, jež je zobrazen na obrázku 50. Ovšem tentokrát za použití diamantové pasty se zrní o velikosti 3 μm po dobu cca 4 min. Dále následovalo leštění diamantovou pastou o velikosti zrn 1 μm po dobu 2 min. Jako poslední byl použit koloidní roztok křemíku (OPU), který umožňuje mechanické i chemické leštění. Následoval opět oplach vodou, izopropylalkoholem nebo technickým líhem, čištění ultrazvukem a poté vysušení. Vzhledem k poškrábání vzorku byly některé operace opakovány.



Obr. 49 STRUERS CITO PRESS-1



Obr. 50 Příklad pro leštění a broušení

- Pro leptání bylo použito leptadlo VILLELA-BAIN, což je směs kyseliny pikrové (1 gram), kyseliny chlorovodíkové (5 ml) a ethanolu (100 ml). Toto leptadlo se používá k naleptávání feriticko-karbidických struktur v ocelích. Leptání probíhá v rádech sekund až minut. V tomto případě 15 s, doba byla stanovena dle zkušeností. Po naleptání byl opět proveden oplach vodou, lihem, čištění ultrazvukem a sušení, tento proces musel být proveden co nejrychleji, kvůli přítomným pórům, ve kterých se usazuje leptadlo a následně vzlíná a tak dále naleptává strukturu kolem pórů, což je nežádoucí. Bohužel, i když je leptadlo určené pro feritické struktury, došlo k tomu, že většina vzorků byla naleptána nevhodně, proto musely být pře leptány. Tentokrát směsí 100 ml HNO_3 , 20 ml HCl a 30 ml glycerinu. Naleptané vzorky, které lze vidět na obrázku 51, byly následně podrobeny metalografickému vyhodnocení

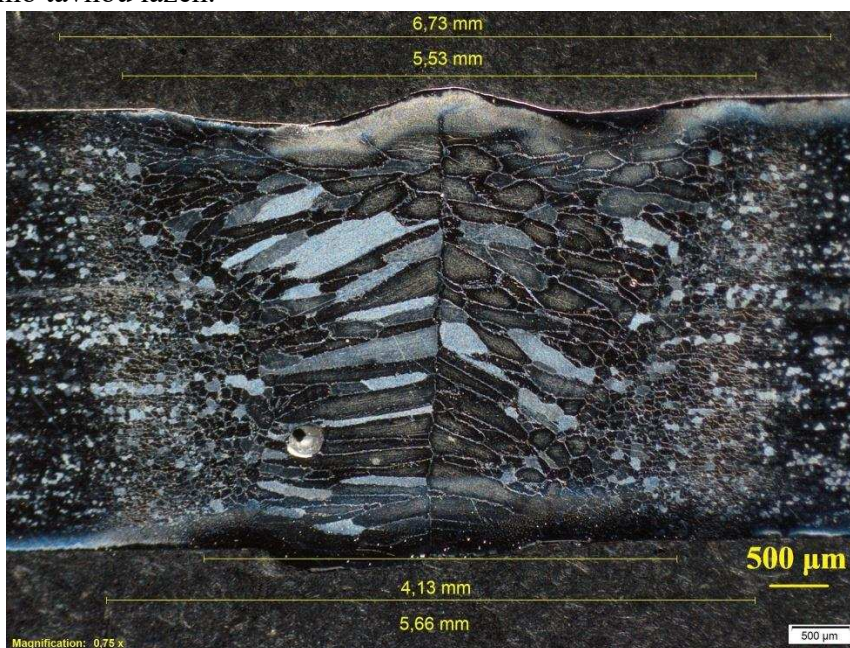


Obr. 51 Hotové metalografické vzorky

3.5.1 Vyhodnocení makrostruktury

Pozorování vzorků probíhalo pomocí mikroskopu OLYMPUS SZ61, při běžném osvětlení, na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. V dalším textu budou popsány jednotlivé metalografické výbrusy. Na následujících snímcích jednotlivých vzorků jsou zřetelně vidět jednotlivá zrna ve svarovém kovu a částečně i v tepelně ovlivněné oblasti a méně zřetelně i zrna základního materiálu. Dále jsou na přiložených obrázcích okótovány rozměry svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti, nicméně jde o rozměry cca v polovině původního svaru, jelikož se šířka svaru poměrně podstatně liší po jeho délce, nejde tedy o rozměry platné po celé jeho délce. Vliv na rozdílnou šířku svaru měl úhel, pod kterým paprsek dopadal na materiál. V místě, kde dopadal pod velkým úhlem, tedy na začátku svařování, až cca do poloviny je šířka větší než ve zbylé části svaru. Vše bylo popsáno již v kapitole 5.4. Sklon paprsku má vliv i na vzhled svaru, kdy první část svaru je lesklá a druhá začernalá. Rozdílná geometrie a vzhled svaru mohou být způsobeny ale i rozdílným přísunem ochranného plynu, chránícího tavnou lázeň.

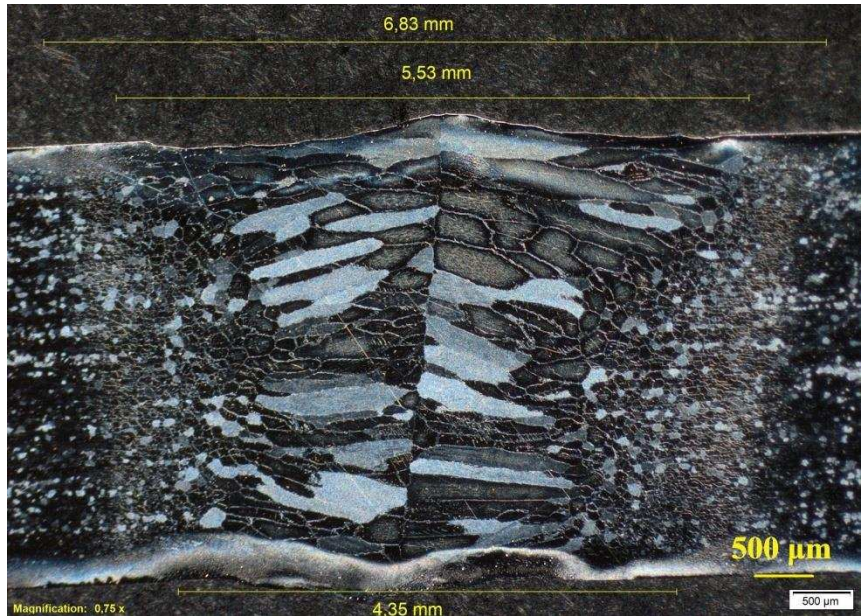
- Při pohledu na makro-snímek vzorku 914-1, viz obr. 52, který byl svařován bez rozmítání, je patrné ostré rozhraní mezi oběma polovinami svarového kovu a velmi hrubá zrna, nejdelší z nich jsou dlouhá až 1,6 mm. Valná většina zrn je podlouhlá a v dolní polovině svaru orientovaná více či méně kolmo na středové rozhraní. V



Obr. 52 Makrostruktura vzorku 914-1

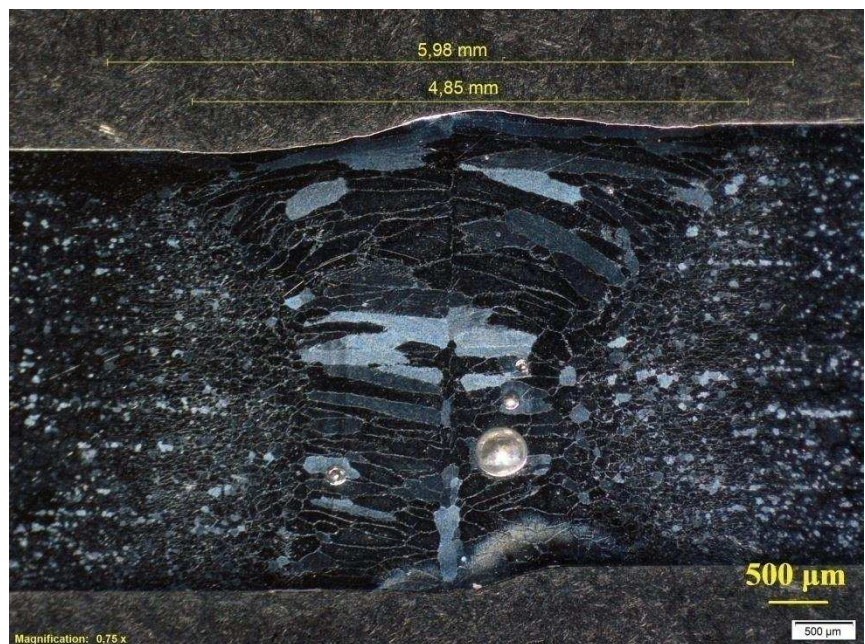
horní polovině jsou orientována směrem k hlavě svaru. Na snímku lze také, pravděpodobně, vidět i zrna, která jsou orientovaná ve směru svařování lokalizovaná nejvíce pod hlavou svaru. Co se týče tvaru svarového kovu, je prakticky symetrický podle ostrého rozhraní. Šířka svarového kovu se směrem ke kořeni svaru zmenšuje. Plocha svarového kovu je přibližně 7 mm^2 a rozměry svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti jsou zřejmé z obrázku 52.

- Vzorek 914-2 svařovaný rozmítáním s parametry uvedenými v tabulce 4. se od prvního vzorku liší tím, že středové rozhraní na rozdíl od předchozího vzorku není kolmé na povrch plechu, ale je mírně odkloněné, jak lze vidět na obrázku 53, kde jsou rovněž uvedené rozměry hlavních částí svaru. Největší zrna opět dosahují délky až 1,6 mm ale oproti vzorku 914-1 zároveň větší tloušťky. Zrna jsou opět orientována kolmo na rozhraní svaru v jeho dolní polovině a směrem k hlavě svaru v horní polovině. I v tomto případě se pod hlavou nachází zrna orientovaná podél směru svařování. Zajímavé je povšimnout si relativně jemného zrna cca v polovině šířky svaru. Plocha svarového kovu je v tomto případě cca $8,8 \text{ mm}^2$.



Obr. 53 Makrostruktura vzorku 914-2

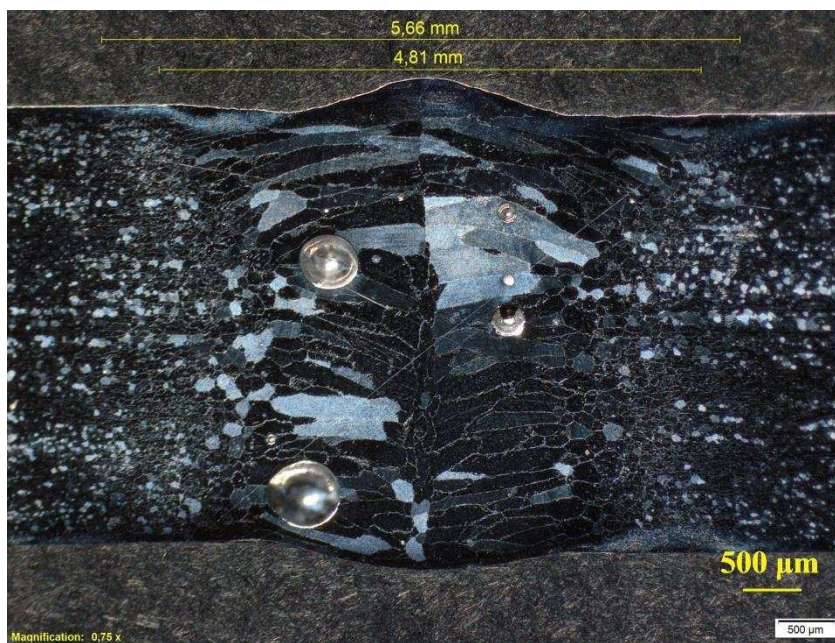
- Na snímku vzorku č. 914-3, svařeného rozmítáním ve formě kružnice jako u vzorku 914-2, ale s vyšší frekvencí 60 Hz, tj. hustší spirálou se na metalografickém výbrusu objevily póry, viz obrázek 54, lokalizované v dolní polovině svarového kovu, jehož plocha je $6,6 \text{ mm}^2$. Rozměry pórů se pohybují od 0,04 mm do 0,4 mm. Zrna jsou ve středu tloušťky plechu orientovaná kolmo na rozhraní svaru, v horní polovině lehce k hlavě svaru ale v dolní částečně ke kořeni svaru. Dále si lze všimnout skutečnosti, že se, oproti dvěma předchozím vzorkům, zmenšila extrémně zhrublá oblast svaru. Zrna nedosahují takové délky, nejdelší



Obr. 54 Makrostruktura vzorku 914-3

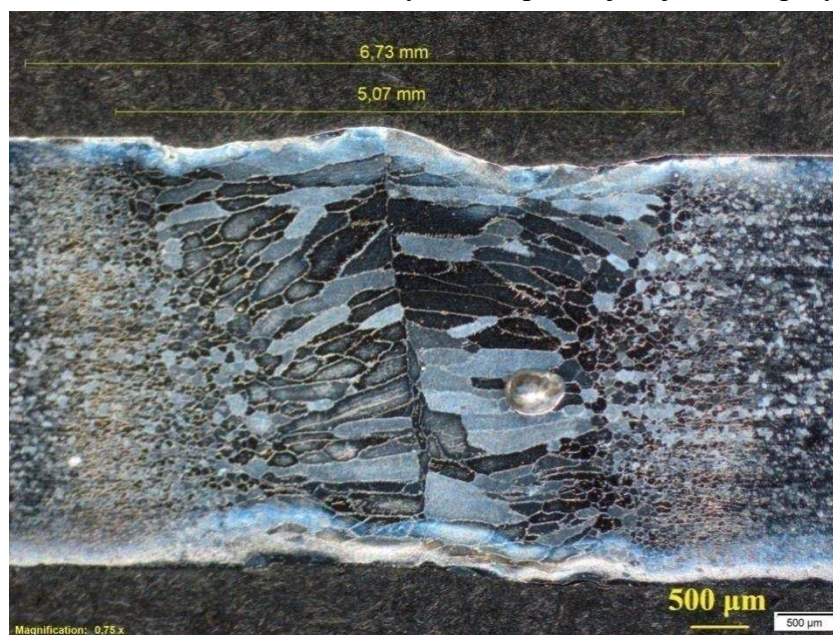
z nich mají na délku tentokrát cca 0,85 mm. Došlo i ke změně tvaru svaru, který se blíží tvaru přesýpacích hodin. Asi do 1/3 výšky svaru od jeho kořene se nacházejí zrna orientovaná podél směru svařování, změna orientace nastala v důsledku vyšší frekvence voblování, která způsobila intenzivnější zpětné tavení materiálu a tím i změny teplotních polí a tedy i rychlostí ochlazování a směrů teplotních gradientů. Zajímavé je i částečné zjemnění zrna u kořene svaru ve spodní třetině jeho tloušťky.

- Rozměry svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku 914-4 jsou tentokrát prakticky stejné po celé tloušťce plechu a svar tak má cca obdélníkový tvar. Velikost zrn a jejich orientace je srovnatelná s předchozím vzorkem. Bohužel však došlo k vytvoření velkých pórů, dosahujících průměru 0,35 až 0,4 mm. Opět došlo k narušení ostrého rozhraní zrna orientovanými ve směru svařování, tentokrát zasahují až do 2/3 výšky svaru, vlivem vyšší frekvence rozmítání, viz obrázek 55. Plocha svarového kovu činí 7 mm².

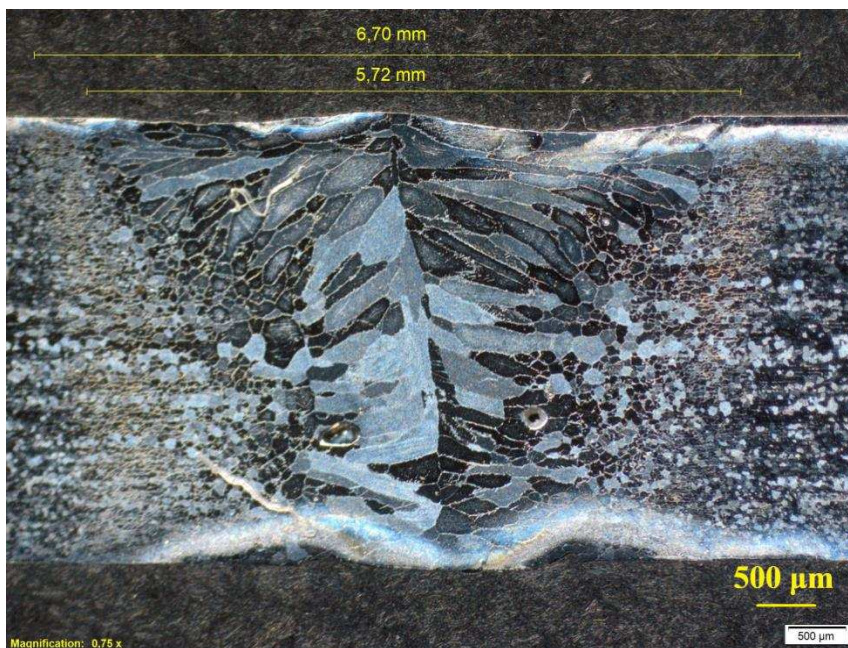


Obr. 55 Makrostruktura vzorku 914-4

- U vzorku 914-5 je na první pohled patrné, zjemnění zrna v levé polovině. Zároveň největší zrna dosahovala délky cca 0,65 mm. Bohužel se na výbrusu opět objevují velké póry o průměru až 0,4 mm cca uprostřed tloušťky plechu. V tomto případě však při rozmítání ve tvaru elipsy s frekvencí 90 Hz nedošlo ke vzniku zrn orientovaných ve směru svařování v takové míře, jak tomu bylo u předchozích dvou vzorků. I v tomto případě má svar celkem rovnoměrnou šířku po celé tloušťce plechu a jeho tvar odpovídá vzorku 914-2. Plocha svarového kovu je asi 7,7 mm², viz obr. 56.



- Tvar svaru vzorku 914-6 je díky způsobu rozmítání v ose svaru obdobný jako u prvního vzorku s označením 914-1 a jeho plocha je 7 mm². Tvar a rozměry základních částí svaru lze vidět na obrázku 57. Velikost zrn je srovnatelná se vzorkem 914-5. Vlivem rozmítání došlo ke změně orientace jednotlivých zrn v horní polovině svaru, kde jsou zrna orientována směrem k hlavě svaru, na levé straně více než na pravé. Ve středu tloušťky svaru jsou některá ze zrn orientovaná kolmo na povrch plechu. V tomto případě tak bylo dosaženo největších změn v orientaci zrn ze všech vzorků.



Obr. 57 Makrostruktura vzorku 914-6

3.5.2 Vliv rozmítání na makrostrukturu svaru

Z hlediska vlivu rozmítání na makrostrukturu svaru lze říci, že tvar rozmítání má vliv na rozměry svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Šířka se u kořene zvětšuje, pokud je rozmítacím tvarem kružnice či elipsa. U rozmítání svazku v ose svaru nedošlo, co se týče tvaru a rozměrů svaru, téměř k žádným změnám.

Z uvedených snímků a jejich popisu je zřejmý i vliv kombinace rozmítání ve tvaru kružnice a frekvencí 30 Hz, 60 Hz a 90 Hz, na ostré rozhraní mezi oběma polovinami svaru. U frekvence 30 Hz nedošlo k žádné změně. Změna nastala u vzorku svařovaného frekvencí 60 a 90 Hz a částečně i u rozmítání ve tvaru elipsy, kdy v místě rozhraní byla vytvořena zrna orientovaná ve směru svařování. Bohužel vyšší rozmítací frekvence s sebou přinesla vznik pórů, při rozmítání ve tvaru kružnice a elipsy.

Co se týče makrostruktury, nepřineslo svařování laserem s rozmítáním svazku kýžené výsledky v takové míře, že by došlo k podstatným změnám. V některých případech se podařilo částečné zjemnění zrna, ale ne nijak výrazné a většinou pouze v určité oblasti svarového kovu. Potlačit ostré rozhraní, tím, že by byla zrna promísena, provázána, čímž by se zlepšily mechanické vlastnosti svaru promísením zrna, se bohužel nepodařilo. Rozmítání má vliv na orientaci zrn. Především u vzorku 914-6 došlo k relativně výrazné orientaci zrn směrem k ose hlavy svaru po téměř celé tloušťce svaru.

Dlouhá zrna ve svarovém viditelná u všech uvedených fotografií se označují jako kolumnární, neboli sloupcová. Vznikla v důsledku velkých teplotních gradientů. Zrna, která jsou orientovaná v ose svaru, se označují jako ekviaxiální a vznikají při nižších teplotních gradientech, kdy zrna rostou rovnoměrně všemi směry.



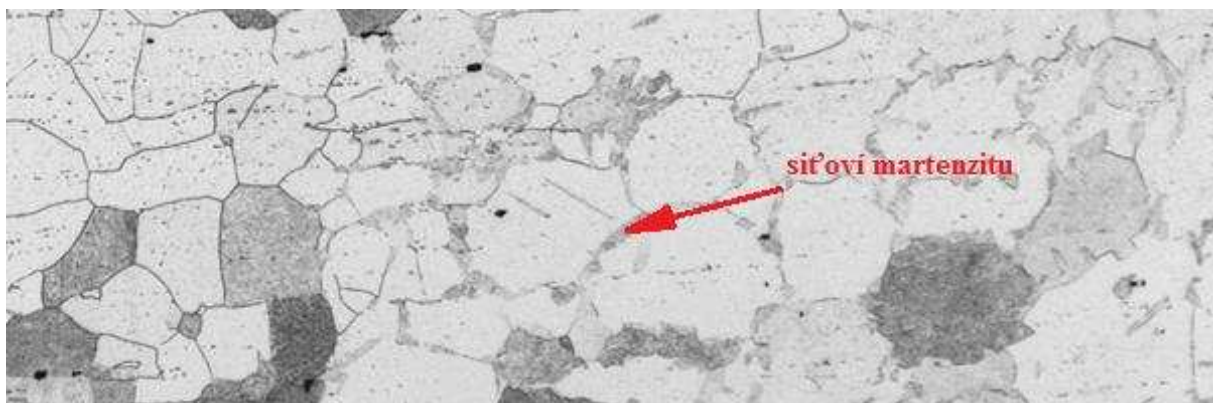
Obr. 58 Konfokální mikroskop OLYMPUS LEXT [76]

3.5.3 Vyhodnocení mikrostruktury

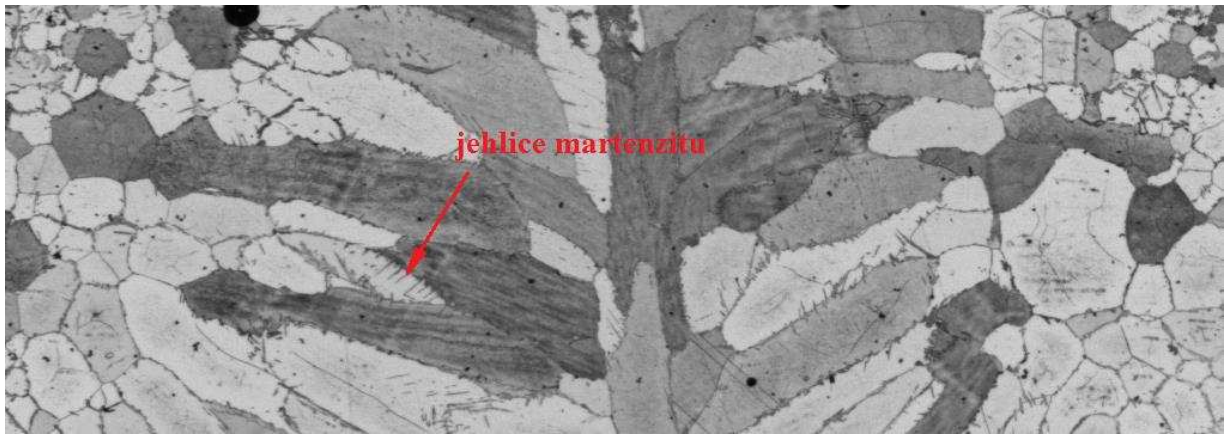
Vzhledem k extrémní velikosti zrn vzniklých při svařování ve svarovém kovu byly popisy jejich velikosti a orientace uvedeny již při vyhodnocení makrostruktury. Na obrázku 59. lze vidět mikrostrukturu základního materiálu, vlevo a tepelně ovlivněné oblasti, vpravo, které jsou u všech vzorků stejné. U základního materiálu lze pozorovat čistě feritickou strukturu. Dále následují detailní fotografie svarového kovu jednotlivých vzorků, které jsou prakticky srovnatelné s již uvedenými fotografiemi makrostruktury. Snímky mikrostruktury uvedené v této podkapitole

byly pořízeny na konfokálním mikroskopu OLYMPUS LEXT, viz obrázek 58.

U všech svařených vzorků je svarový kov tvořen zrny chromového feritu, jejich rozdílná barva je způsobena jejich rozdílnou krystalografickou orientací. Na hranicích zrn je vyloučen martenzit v podobě souvislého síťoví nebo jehlic směřujících dovnitř feritických zrn. Jelikož martenzit obsahuje nižší množství Cr, může být, mimo snížení odolnosti proti mezikrystalové korozi, zhoršena houževnatost svarového kovu. Obsah martenzitu závisí na vneseném teple, tedy poměru výkonu a posuvové rychlosti neboli rychlosti svařování, jelikož je poměr u všech vzorků stejný, takže i množství vzniklého martenzitu je přibližně stejné. Vliv na množství martenzitu má ale i zpětné tavení materiálu, které dosahuje v případě vyšších frekvencí vyšší intenzity, tj. ke vnášení více tepla. Detail síťoví martenzitu v případě vzorku 914-1 je zobrazen na snímku mikrostruktury s označením obr. 59. Na dalším obrázku s číslem 60 jsou poté zachyceny jehlice martenzitu u vzorku 914-6. U ostatních vzorků je rozložení martenzitu, jak již bylo zmíněno, podobné, proto jsou uvedeny pouze dva reprezentativní detailní snímky. Ostatní snímky mikrostruktury jsou uvedeny v příloze 4. Co se týče tepelně ovlivněné oblasti lze na uvedených snímcích vidět pouze ferit, ale martenzit se zde ale pravděpodobně také může objevovat.



Obr. 59 Síťoví martenzitu po hranicích zrn



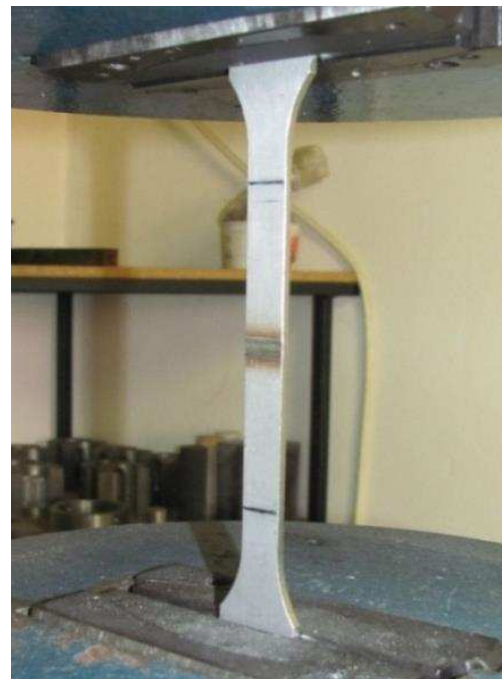
Obr. 60 Jehlice martenzitu po hranicích zrn

3.6 Tahová zkouška

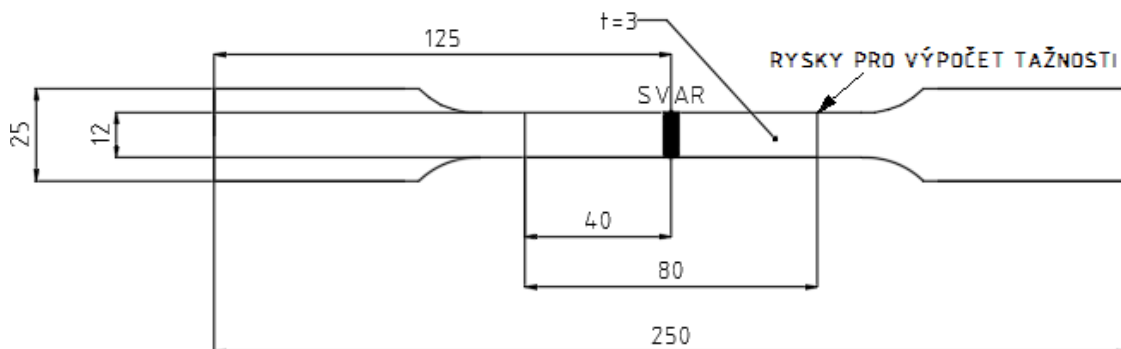
Pomocí tahové zkoušky se zjišťují mechanické vlastnosti materiálů a svarů, přičemž mechanickými vlastnostmi rozumíme vlastnosti pevnostní a deformační. Pevnostní vlastnosti jsou mez kluzu R_e nebo $R_{p0,2a}$ mez pevnosti R_m a za deformační lze považovat tažnost A a kontrakci Z . Princip tahové zkoušky byl uveden v předchozích kapitolách.

3.6.1 příprava vzorků pro tahovou zkoušku

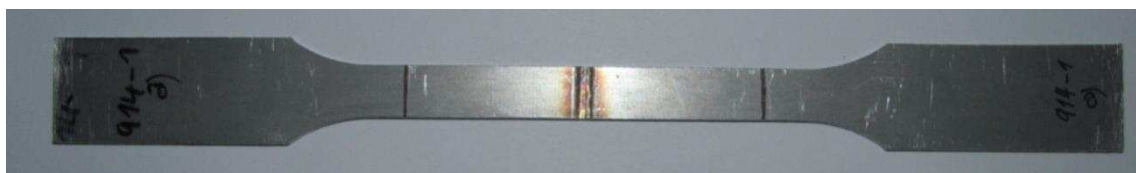
Dva vzorky z každého zkušebního svařence pro tahovou zkoušku, byly vyříznuty pomocí laseru, dle rozměrů uvedených na obrázku 62. Pro tahovou zkoušku bylo tedy zhotoveno celkem 12 zkušebních tyčí. Dalším krokem bylo odstranění otřepů vzniklých při řezu laserem pomocí pilníku a brusného papíru, poté vyznačení vzdálenosti 40 mm od osy svaru na každou stranu a popis obou polovin vzorku fixou. Popis vzorků byl zvolen následovně, k popisu vzorku z ÚPT 914-x (kde x je pořadové číslo vzorku dle tabulky 4) bylo připojeno písmeno "a" a "b", kde "a" značí tu část vzorku, která byla svařována dříve a svar je lesklý a má větší šířku viz vizuální kontrola. A vzorky "b" měly menší šířku svaru a byly svařované později. Vyřezaný, očištěný a popsany vzorek je vidět na obrázku 63.



Obr. 61 Upnutí vzorku v trhacím stroji



Obr. 62 Geometrie zkušební tělesa pro tahovou zkoušku



Obr. 63 Zkušební těleso připravené pro tahovou zkoušku

3.6.2 Průběh tahové zkoušky

Samotná zkouška probíhala na trhačím stroji, jehož specifikace je přílohou č. 1 umístěném v dílnách ústavu strojírenské technologie. Způsob upnutí pomocí čelistí se zuby je zřejmý z obrázku 61. Průběh tahové zkoušky byl zaznamenáván pomocí počítače. Získaná data byla zpracována pomocí programu MS Excel, přičemž byl odfiltrován počátek zatěžování, kdy se zuby na čelistech "zakusují" do vzorku a dochází k pevnému upnutí. V tabulce 5 jsou zaznamenány důležité naměřené hodnoty, jako maximální síla F_m , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m , tažnost A a poloha lomu. Rychlost zatěžování při zkoušce byla konstantní $10 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$. Celý průběh tahové zkoušky pro všechny vzorky je znázorněn na obrázku 65, kde jsou jednotlivé vzorky svařované stejnými parametry označeny stejnou barvou ale odlišným typem čáry. Plná čára je přiřazena vzorkům "a" a čárkovaná vzorkům "b", viz legenda. Po přetržení, příklady přetržených vzorků lze vidět na obrázku 64, byl vzorek vyjmut ze zkušebního stroje a následně změřena vzdálenost rysek, která posloužila pro výpočet tažnosti A , dle vzorců uvedených v teoretické části, výsledné hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 5.

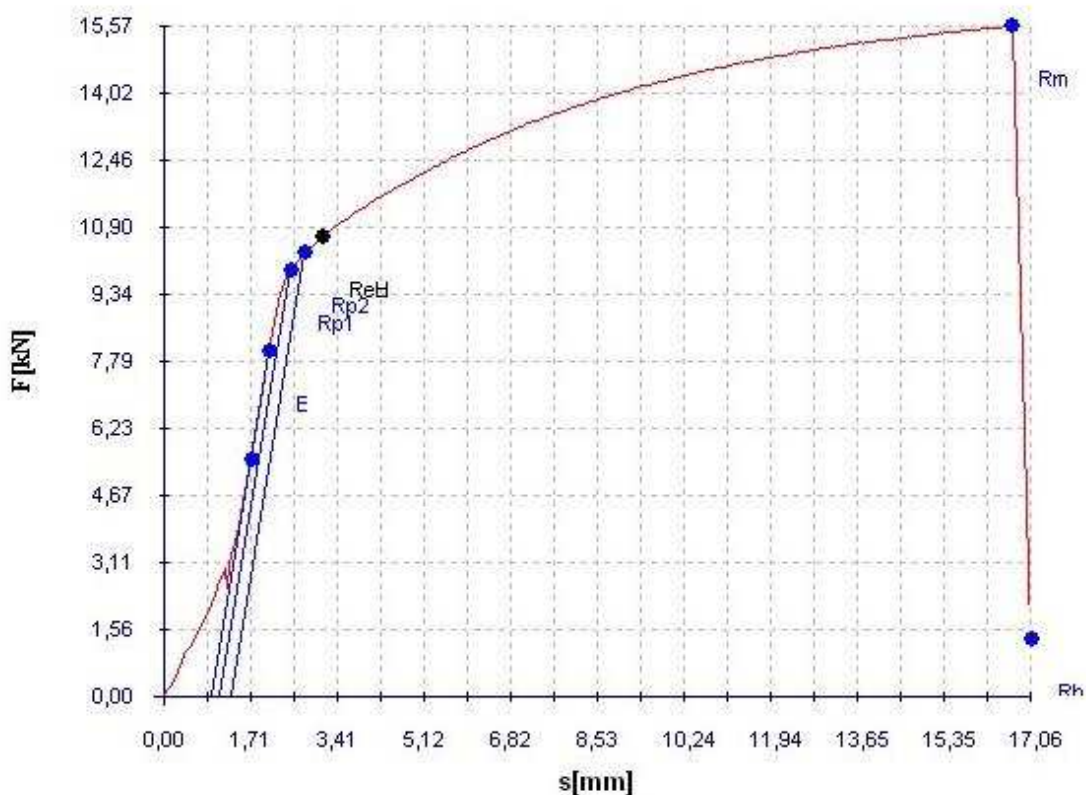


Obr. 64 Ukázka přetržených vzorků

Tab. 5 Výsledky tahové zkoušky - mechanické vlastnosti vzorků

vzorek	poloha lomu	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
914-1a	mimo rysky	15715,60	288,42	436,54	22,50
914-1b	ve svaru	15612,00	286,07	433,67	15,63
914-2a	v ZM	15734,40	294,69	437,07	23,75
914-2b	ve svaru	11267,20	291,56	312,98	1,88
914-3a	ve svaru	15574,40	286,59	432,62	13,13
914-3b	ve svaru	13665,20	292,33	379,59	6,25
914-4a	v TOO	14577,60	295,47	404,93	7,50
914-4b	ve svaru	13796,60	290,24	383,24	6,25
914-5a	V TOO	14521,20	296,26	403,37	7,50
914-5b	ve svaru	14765,60	292,60	410,16	8,75
914-6a	mimo rysky	15809,60	297,56	439,16	21,25
914-6b	ve svaru	13035,20	295,99	362,09	3,75

Pro ověření správnosti výpočtů byly vypočteny hodnoty uvedené v tabulce 5 pro vzorek 914-3a ručně. Pro výpočet byl použit následující graf, viditelný na obrázku 65. Tento graf byl vygenerován při tahové zkoušce a jsou na něm znázorněny hlavní charakteristiky. průřez vzorku je dán součinem šířky s a tloušťky t , obě hodnoty jsou zřetelné z obrázku 62, kde $s = 12 \text{ mm}$ a $t = 3 \text{ mm}$, pak je $S_0 = 3 \cdot 12 = 36 \text{ mm}^2$.



Obr. 65 Smluvní tahový diagram pro vzorek 914-3

Síla na $R_{p0,2}$ u vzorku 914-3a a je přibližně 10400 N. Dosadíme-li tuto hodnotu do vztahu (4.1), obdržíme:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} = \frac{10400}{36} = 288,9 \text{ MPa}$$

Dle grafu je $F_m = 15720 \text{ N}$. Dosazením této hodnoty do vztahu (4.2) pro výpočet meze pevnosti R_m získáme:

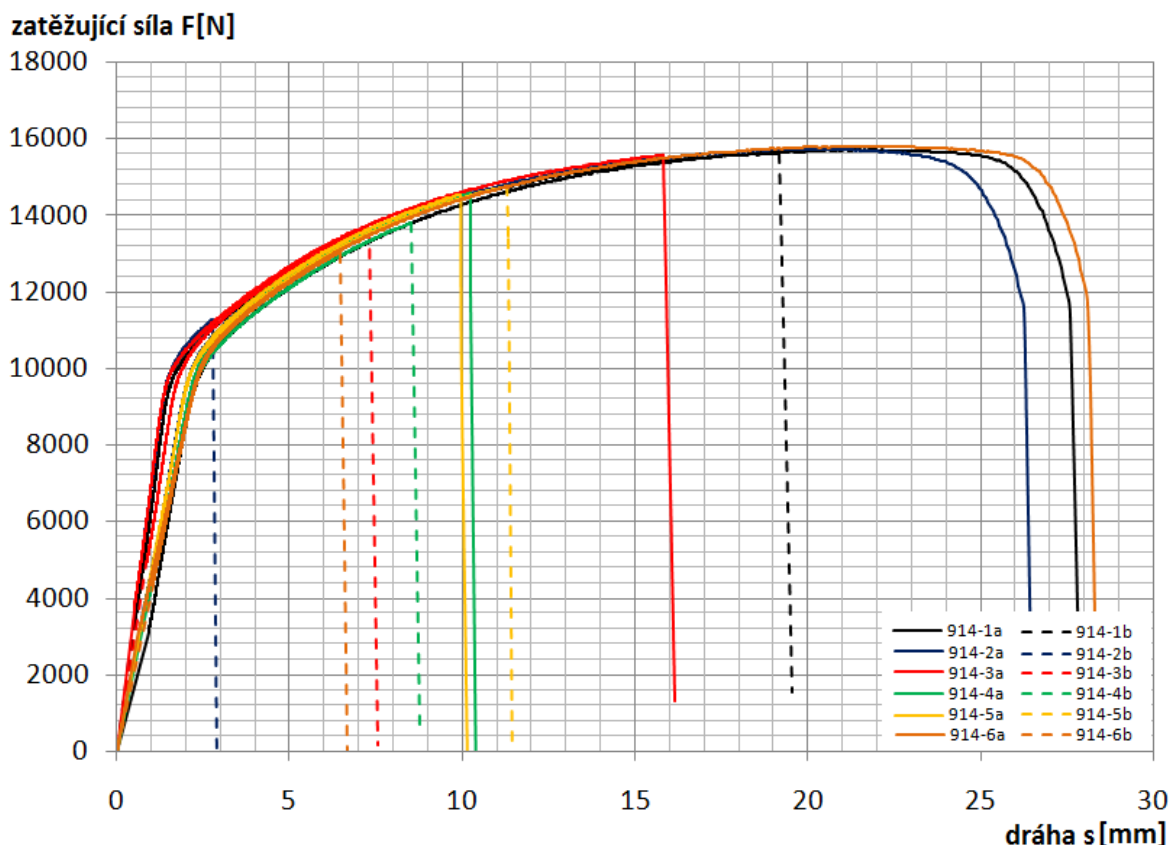
$$R_m = \frac{F_m}{S_0} = \frac{15570}{36} = 432,5 \text{ MPa}$$

Tažnost A se spočte dosazením do vzorce (4.3), přičemž počáteční vzdálenost rysek je $l_0 = 80 \text{ mm}$ a koncová vzdálenost po přetržení $l = 90,5 \text{ mm}$:

$$A = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{90,5 - 80}{80} \cdot 100 = 13,13 \%$$

Jak je zřejmé z uvedených vzorových výpočtů, hodnoty v tabulce odpovídají s ručně vypočtenými hodnotami, především tedy R_m a $R_{p0,2}$. Co se týče tažnosti, ta byla vypočtena také pomocí počítače, ale hodnoty koncové vzdálenosti rysek byly získány ručně a zadány do výpočetního programu. Proto v případě tažnosti ruční výpočet posloužil, nejen k ověření funkčnosti programu, ale i k ověření správnosti měření. Menší rozdíly jsou způsobeny nepřesným odečítáním z grafu, či nepřesností při měření vzdálenosti rysek po přetržení vzorku, či zaokrouhlením v průběhu výpočtu, a jelikož se liší maximálně o jednotky, lze je považovat za totožné. Na obrázku 66 jsou souhrnně vyneseny tahové zkoušky všech zkoušených vzorků-

PRŮBĚHY TAHOVÉ ZKOUŠKY



Obr. 66 Souhrnný smluvní tahový diagram pro všechny vzorky

5.6.3 Vyhodnocení a porovnání jednotlivých vzorků

Z grafu na obrázku 65 je patrné, že až na sadu vzorků 5 mají všechny vzorky označené "b", horší mechanické a deformační vlastnosti, což je zřejmé především z hodnot tažnosti a meze pevnosti, než vzorky "a". Tento rozdíl je největší u vzorků 2 a 6. Co se týče vad přítomných na lomové ploše vzorku, jsou zde rozdíly, především v počtu a velikosti pórů v závislosti na sklonu paprsku. Dále jsou popsány jednotlivé vzorky z hlediska místa lomu, typu lomu a vad na lomové ploše, včetně jejich fotografií:

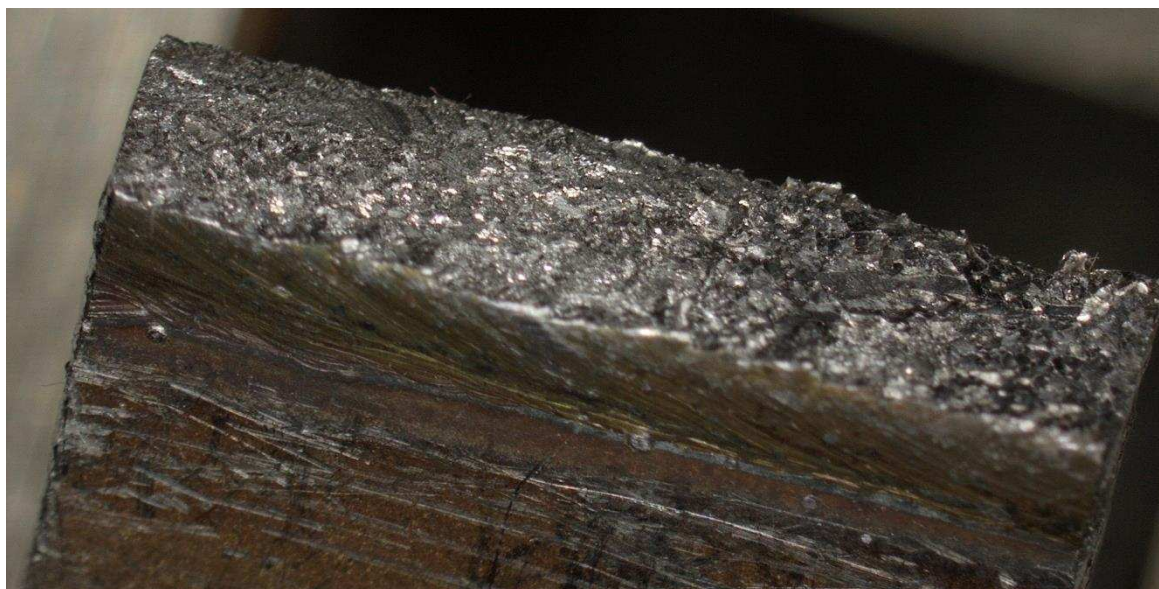
- Vzorek 914-1a byl porušen mimo rysku, s tím, že se v místě rysky vytvořil krček, lom je tedy, alespoň částečně, tvárného charakteru. Co se týče vlastností svaru, dosáhly tedy lepších hodnot, než samotný základní materiál.

- Lomová plocha jde od středu svaru k rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Vzhledem k velikosti zrn a tím způsobeným křehnutím je lom křehkého charakteru a proběhl na hranicích zrn. Lomová plochy tohoto vzorku je zachycena na následující fotografii (obr. 67), zřetelně lze vidět hrubozrnnou strukturu a místo lomu.



Obr. 67 Lomová plocha vzorku 914-1b

- Poloha lomu vzorku 914-2a svařeného s rozmítáním, parametry uvedenými v tabulce 5, je mimo svar a mezi ryskami, charakter lomu je tvárný s podílem lomu křehkého. Mez pevnost je třetí nejvyšší s hodnotou 437 MPa.
- Ačkoliv vzorek 914-2a svařený se stejnými parametry jako vzorek 914-2b byl porušen mimo svar, u vzorku 2b tomu tak nebylo, jelikož praskl ve svaru. Mez pevnosti tohoto vzorku dosáhla vůbec nejmenší hodnoty ze všech, tj 312,MPa. Na lomové ploše, viz obr 68, lze mimo místa lomu vidět i hrubozrnnou strukturu se zrnky rostoucími kolmo na rozhraní svaru i zrna rostoucí v rovině lomové lochy, která jsou lesklá.



Obr. 68 Lomová plocha vzorku 914-2b

- Oba vzorky, 914-3a i 914-3b, byly porušeny ve svaru orientace zrn, v obou vzorcích je podobná, přičemž zrna v kořeni a v hlavě svaru jsou orientována v ose svaru a ve střední části svarového kovu příčně na osu. Na lomové ploše obou vzorků se objevuje poměrně velké množství pórů, u vzorku 914-3a jsou menší oproti vzorku 914-3b, což je také důvodem jeho horších mechanických vlastností. Na následujícím obrázku (obr. 69) je lomová plocha vzorku 914-3b, kde je nejvíce pórů ze všech sledovaných vzorků..



Obr. 69 Lomová plocha vzorku 914-3b

- Porušení vzorku 914-4a nastalo v tepelně ovlivněné oblasti a porušení druhého vzorku, tedy, 914-4b, nastalo opět ve svaru ve směru od středu svaru k rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti., lom obou vzorků je křehkého charakteru a orientace zrn vzorku 914-4a obdobná vzorku 914-1b a vzorku 914-4b vzorkům 914-3. Na lomové ploše obou vzorků lze opět zřetelně rozeznat relativně velké množství pórů po celé lomové ploše. Mechanické vlastnosti obou vzorků jsou velmi podobné, což znamená, že svar má rovnoměrnou strukturu, či spíše pórovitost po celé jeho délce, viz obrázek 70.



Obr. 70 Lomová plocha vzorku 914-4b

- Vzorek 914-5a byl porušen na rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti, na lomové ploše, jež je vidět na obrázku 71, je vidět křehký lom a poměrně velké množství pórů o průměru až 0,4 mm ale ne v takovém počtu jako u předchozích vzorků. Vzorek 914-5b byl porušen v místě ostrého středového rozhraní, tj. v ose svaru, lomová plocha je podobného charakteru, jako je tomu u vzorku 914-5a. U této sady vzorků bylo dosaženo také prakticky stejných mechanických vlastností, jako tomu bylo u vzorků 914-4.



Obr. 71 Lomová plocha vzorku 914-5a

- Vzorek 914-6 a byl stejně jako vzorek 914-1a přetržen mimo rysku, resp. na rýsce. U obou vzorků to bylo pravděpodobně způsobeno tím, že vzorek neměl konstantní šířku po celé jeho délce, což ale nemění nic na tom, že mechanické vlastnosti svaru byly velmi dobré, protože se blíží minimální hodnotě meze pevnosti oceli 1.4016, dle atestu jež je přílohou 2. Lom je převážně tvárný. Tento vzorek dosáhl vůbec nejvyšší meze pevnosti, kdy $R_m = 439$ MPa, nejde ale o mez pevnost svaru, která je tedy ještě o něco vyšší, ale o mez pevnosti základního materiálu.
- U vzorku 914-6b došlo k přetržení ve svaru, viz obrázek 72. Oproti předchozím vzorkům na lomové ploše nejsou vidět větší póry. Co se týče orientace zrn, většina je orientována příčně k ose svaru, ale jsou zde i zrna orientovaná podélně, rozmístěná hlavně u hlavy svaru. Bohužel ale oproti vzorku 914-6a dosáhl druhé nejnížší pevnosti, pouhých 362 MPa.



Obr. 72 Lomová plocha vzorku 914-6b

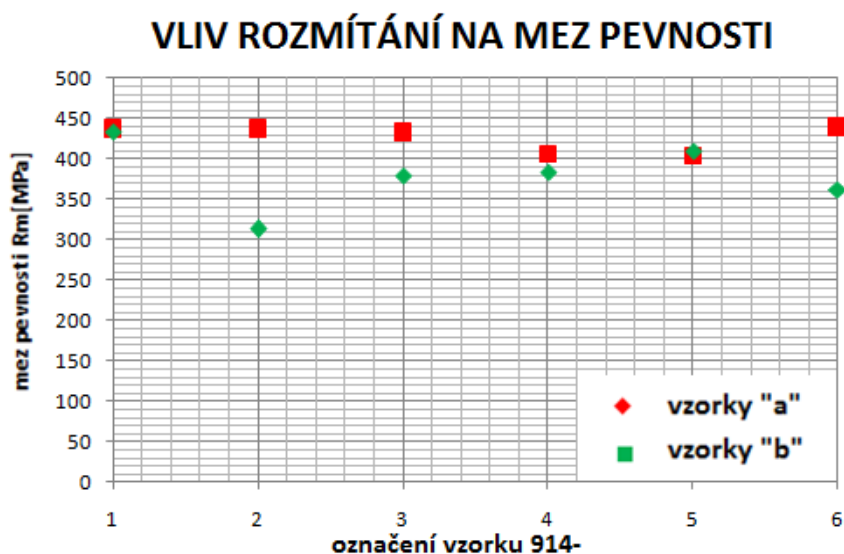
3.6.4 Vliv parametrů na vlastnosti svaru zjištěných tahovou zkouškou

Tahová zkouška provedená na zhotovených vzorcích, prokázala spíše negativní nebo v některých případech prakticky žádný vliv rozmítání na mechanické vlastnosti svaru. Nejvyšší pevnosti bylo dosaženo u vzorku svařovaného pomocí rozmítání paprsku v ose svaru konkrétně u vzorku 914-6a, u vzorku svařovaného bez rozmítání, tj. vzorku 914-1a a také vzorku 914-2a, kdy byla rozmítacím obrazcem kružnice s frekvencí rozmítání 30 Hz, který zároveň dosáhl nejvyšší tažnosti. Nicméně tyto vzorky jsou svými pevnostními charakteristikami souměřitelné, jelikož se liší maximálně o jednotky MPa a blíží se minimální hodnotě meze pevnosti oceli 1.4016, která dle atestu, jež je přílohou 2, činí 450 MPa. Na mechanické vlastnosti vzorků svařovaných pomocí skenovací hlavy a to nejen při rozmítání, ale i při běžném svařování touto hlavou, má, patrně, vliv i již uvedený částečný předehřev vzorku, způsobený pohybem paprsku po materiálu a tím jeho zahříváním. Z grafu na obrázku 66 je zřejmé, že vzorky označené "b" mají horší mechanické i deformační vlastnosti než vzorky "a", až na vzorky 914-5. Přičemž došlo k tomu, že vzorky 914-2b a 914-6b dosáhly vůbec nejnižší meze pevnosti, ačkoliv vzorky "a" dopadly nejlépe. Nejmenší rozdíly jsou u vzorků 914-4 a 914-5, kdy u vzorků svařovaných rozmítáním ve formě elipsy bylo dosaženo o něco vyšší meze pevnosti u vzorku "b" než u vzorku "a". Rozdíly jsou i u vzorků 914-1 a 914-3, přičemž u vzorku 914-1b nedošlo prakticky k poklesu R_m oproti vzorku 914-a. Z těchto skutečností lze soudit, že použití laseru bez rozmítání svazku dosáhlo nejrovnoměrnejších a lze říci, že i nejlepších mechanických vlastností a nejrovnoměrnejší struktury bez vad, především pórů. Zajímavé je zvýšení meze kluzu svarového kovu téměř u všech vzorků svařených s rozmítáním a to i v případech, kdy je mez pevnosti nejnižší. Nicméně opět došlo k nárůstu jen o jednotky MPa, takže vliv rozmítání není nijak podstatný.

Dalším jevem, jehož si lze všimnout z grafu na obrázku 73, je skutečnost, že byla-li rozmítacím obrazcem kružnice o poloměru 0,6 mm, zmenšuje se rozdíl v pevnostních vlastnostech, především co se týče meze pevnosti, ale i v deformačních vlastnostech, tj. tažnosti, vzorků "a" a "b" s rostoucí frekvencí rozmítání, z čehož plyne, že vyšší frekvence rozmítání, při použití skenovací hlavy má vliv na rovnoměrnost struktury svarového kovu po délce svaru, včetně rovnoměrného rozložení vad. Pokud mechanické vlastnosti vzorků 914-1, 914-2 a 914-6 byly odlišné v důsledku předehřevu, lze říci, že v případě vzorků 914-4 a 914-5 došlo k potlačení potřeby předehřevu a tím k prakticky rovnoměrným vlastnostem po celé délce svaru. Zajímavé je, že

v případě vzorků "a" vlivem narůstající frekvence dochází ke zhoršování mechanických vlastností, ale u vzorků "b" se při narůstající frekvenci mechanické vlastnosti zlepšují, a spojují se takřka v jednom bodě, jak mez pevnosti R_m , viz obr. 73, tak i tažnost A, viz obr. 74.

Z hlediska rovnoměrnosti mechanických vlastností bylo srovnatelného výsledku dosaženo i v případě rozmítání v podobě



Obr. 73 Vliv rozmítání na mez pevnosti

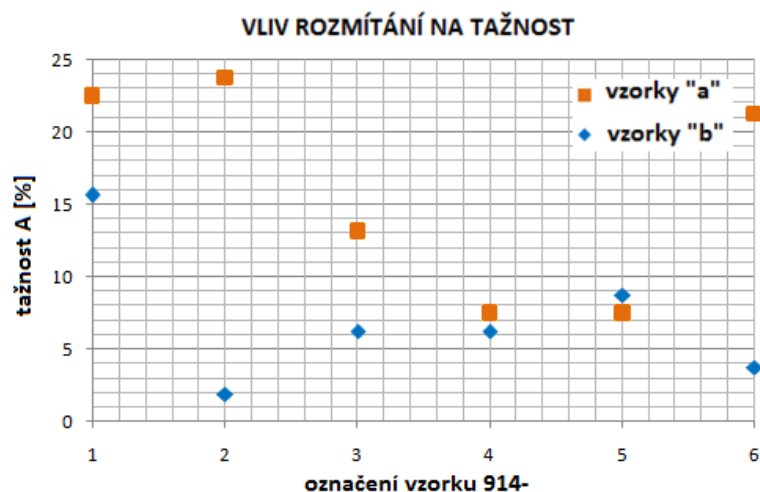
elipsy s frekvencí 90 Hz, ale jelikož nebylo provedeno více svarů v kombinaci elipsa s různými frekvencemi, nelze toto tvrzení potvrdit. Co se týče uvedených obrázků 73 a 74, jsou zde uvedeny vlastnosti i pro ostatní vzorky z důvodu srovnání. svařovací parametry pak lze nalézt v tabulce 4.

Pozitivum lze nalézt v tom, že ač vzorky 914-3, 914-4 a 914-5 obsahovaly velké množství pórů kvůli vyšší rozmítací frekvenci, jejich vlastnosti byly ze stejného

důvodu prakticky rovnoměrné po celé délce svaru a dosahovaly spíše průměrných hodnot. Bohužel problémem při svařování oceli 1.4016 metodou rozmítání svazku je vznik velkého množství pórů, zvláště při vyšších frekvencích rozmítání při rozmítání ve tvaru kružnice a elipsy. Zhoršení mechanických vlastností především v případě vzorků 914-3, 914-4 a 914-5 je způsobeno právě těmito póry, které oslabují průřez a v mnoha případech dosahují průměru až 0,4 mm.

3.7 Zkouška tvrdosti

V případě tohoto experimentu neproběhla zkouška mikrotvrdomosti při velmi malém zatížení, ale klasická zkouška dle Vickerse, jejíž princip byl popsán výše, při zatížení 5 kg, tedy HV5. Měření tvrdosti probíhalo na tvrdoměru značky Zwick 3212, viz obrázek 75, který lze osadit i kuličkou pro měření dle Brinella. Tvrdoměr je umístěn na pracovišti fakulty strojíního inženýrství a je opatřen samozřejmě hrotem ve formě diamantového jehlanu, zařízením pro sledování úhlopříček, resp. velikosti vtisku. Toto zařízení tvoří mikroskop se snímací kamerou. Obraz je přenášěn do počítače, kde jsou pomocí programu testXpert změřeny úhlopříčky vtisku, vypočtena jejich střední hodnota a z této hodnoty a hodnoty zatěžující síly následně vypočtena tvrdost. Dále je tvrdoměr opatřen svěrákem, pomocí něhož se upínají jednotlivé vzorky. Svěrák je umístěn na pohyblivém stole, pomocí něhož lze vzorky posunovat ve dvou osách. Ke správnému měření tvrdosti je třeba, aby hrot dopadal na povrch materiálu konstantní rychlostí, čehož je dosaženo použitím speciálních převodů a oleje, který zpomaluje klesání hrotu. Dále se tvrdoměr osazuje závažím, dle potřebného zkušebního zatížení, v tomto případě tedy 5 kg.



Obr. 74 Závislost tažnosti na rozmítání



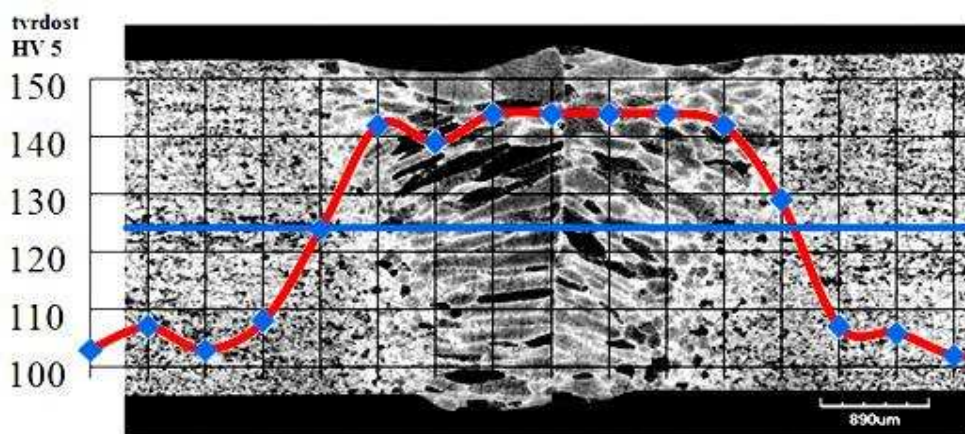
Obr. 75 Tvrdoměr Zwick 3212

3.7.1 Průběh a vyhodnocení zkoušky tvrdosti

Na každém ze 6 vzorku bylo provedeno 18 zkušebních vpichů, které dostatečně pokryly oblast základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu. Jednotlivé vpichy byly od sebe vzdáleny 0,5 mm, aby nedocházelo k ovlivnění výsledků. Doba trvání vtisku byla 12-15 s. Vpichy byly provedeny v polovině tloušťky základního materiálu, cca do 1,5 mm pod jeho povrch. Jednotlivé hodnoty tvrdosti byly zapisovány do tabulky a následně zaneseny do grafů.

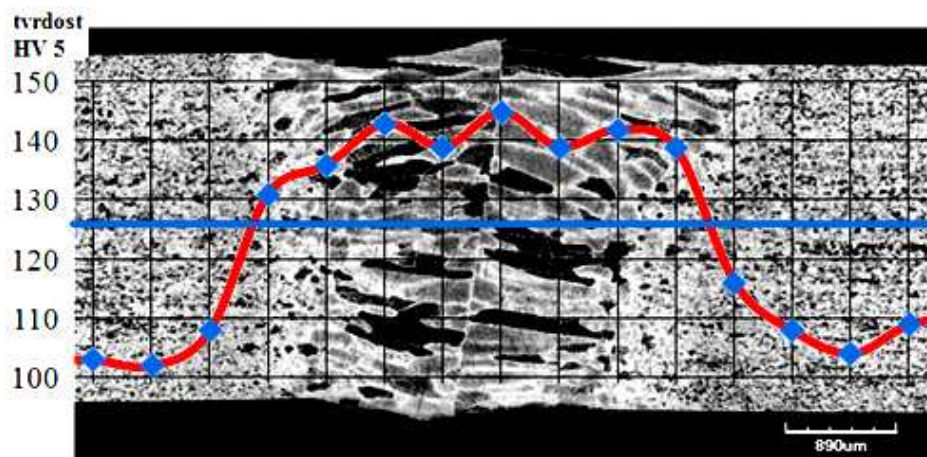
Co se týče tvrdosti základního materiálu pohybuje se od 100 do 108 HV 5. Hodnoty tvrdostí tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu se sice lišily, ale výsledky jsou, tak jako u tahové zkoušky velmi podobné, lišící se maximálně spíše o jednotky HV, ve všech případech tvrdost svarového kovu přesáhla 140 HV 5, v případě vzorku 914-6 dosahoval hodnoty tvrdosti ve svarovém kovu 154 HV 5. Obecně lze říci, že největší hodnoty tvrdosti bylo dosaženo ve středu svaru. Tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti se pohybovala u všech vzorků v rozmezí od 111 do 131 HV 5. U všech vzorků je tedy patrný nárůst tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti i svarovém kovu způsobený zhrubnutím zrna a přítomností martenzitu v mikrostruktuře svaru. Na následujících obrázcích jsou znázorněny průběhy tvrdosti v jednotlivých částech spoje. Modrou čarou je znázorněna přibližná linie vtisků.

- Tvrdost jednotlivých částí svaru u vzorku 914-1 má téměř symetrický průběh, jak je možné spatřit na obrázku 76, podle středu svaru, menší odchylka mohla být způsobena vpichem do místa kde je méně vyloučeného martenzitu, či jemnější zrna.



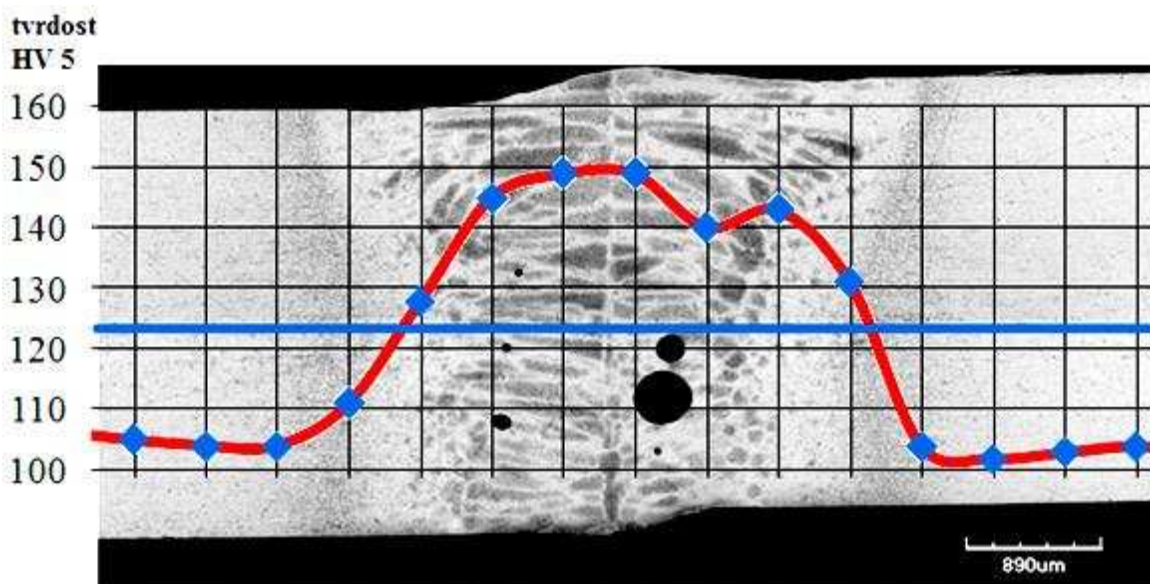
Obr. 76 Tvrdost vzorku 914-1

- Průběh tvrdosti vzorku 914-2 je obdobný jako u předchozího vzorku, až na mírné odchylky ve svarovém kovu. Hodnoty se ale liší o pár jednotek HV, proto je lze považovat za takřka shodné. Rozmítání v tomto případě nepřineslo žádné změny oproti předchozímu vzorku, viz obrázek 77.



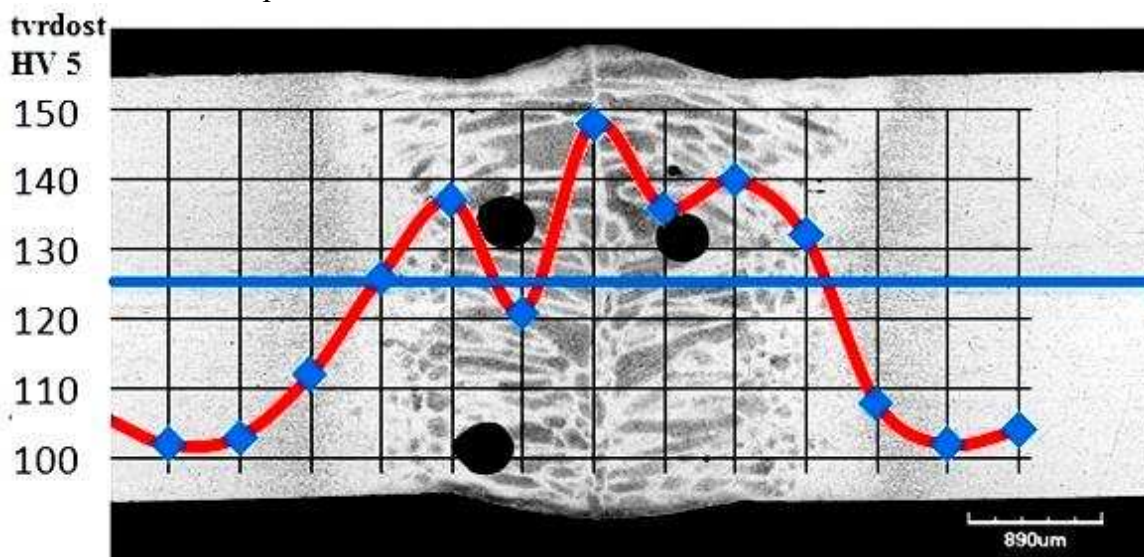
Obr. 77 Tvrdost vzorku 914-2

- Jak je vidět z obrázku 78, který reprezentuje průběh tvrdosti vzorku 914-3 jsou hodnoty tvrdosti obdobné předchozím dvěma vzorkům. Změna nastala především ve strmosti změny tvrdosti mezi základním materiálem a svarovým kovem, tedy tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti. Tento přechod není na levé straně, jako na pravé. U předchozích vzorků byl tento přechod strmý po obou stranách svarového kovu. Tento jev lze vysvětlit nárůstem rozmítací frekvence.



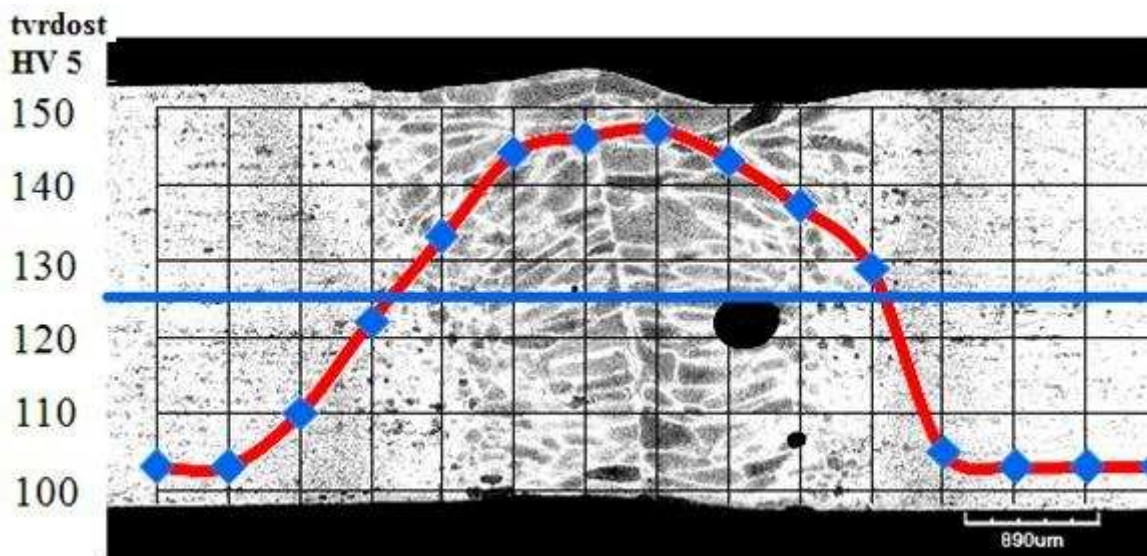
Obr. 78 Tvrdost vzorku 914-3

- V případě tvrdosti vzorku 914-4 došlo k podobnému jevu, jako u předchozího vzorku, tj. přechod tvrdosti není na obou stranách svarového kovu stejně strmý. Avšak u tohoto vzorku, na rozdíl od předchozích, kde byla tvrdost v celém svarovém kovu konstantní, tomu tak není. Tvrdost má maximální hodnotu ve středu svaru, která činí 148 HV 5. Zajímavé jsou velké výkyvy tvrdosti ve svarovém kovu, viz obr. 79, které mohou být způsobeny vpichem do jemnozrnné struktury nebo oblasti, kde bylo vyloučeno menší množství martenzitu po hranicích zrn.



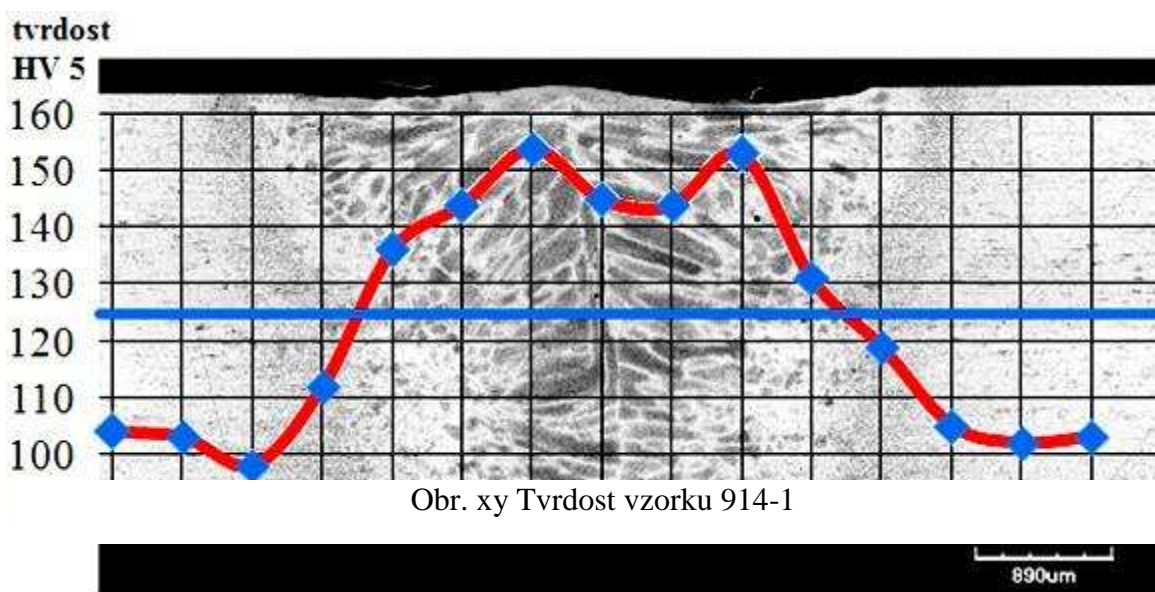
Obr. 79 Tvrdost vzorku 914-4

- Ani vzorek 914-5 nemá konstantní tvrdost po celé jeho délce a stejně jako u předchozích dvou vzorků se liší strmost na obou stranách, viz obrázek 80, svarového kovu. Maximální naměřená hodnota tvrdosti je 147 HV 5, což je srovnatelné s výsledky u předchozích vzorků.



Obr. 80 Tvrdost vzorku 914-5

- V případě vzorku 914-6 byla naměřena nejvyšší hodnota tvrdosti ve svarovém kovu, činila 154 HV 5. Tvar křivky je však podobný jako u vzorku 914-1, tzn. téměř symetrický podle osy svaru, jak je vidět na obrázku 81. Vysoká hodnota tvrdosti je pravděpodobně způsobena větším množstvím vyloučeného martenzitu po hranicích zrn.



Obr. xy Tvrdost vzorku 914-1

Obr. 81 Tvrdost vzorku 914-6

Výsledky měření tvrdosti jsou uvedeny v tabulce, jež je přílohou 5 této práce. V tabulce jsou barevně označeny tvrdosti v jednotlivých částech svaru. Červeně svarový kov, zeleně tepelně ovlivněná oblast a modře základní materiál.

3.7.2 Vliv rozmítání na tvrdost svarového spoje

Bohužel ani tato zkouška nepřinesla podstatné odlišnosti vlastností svaru, tedy tvrdosti, v případě svařování bez rozmítání svazku a s rozmítáním. Narůst tvrdosti ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti je způsoben nejen hrubými zrnny, ale i vlivem martenzitu, který byl vyloučen na hranicích zrn, jak bylo uvedeno ve vyhodnocení mikrostruktury, ve svarovém kovu i tepelně ovlivněné oblasti. Ke změnám v průběhu, nikoliv v hodnotách, tvrdosti došlo pouze vlivem rozmítací frekvence při rozmítání ve tvaru kružnice i elipsy, kdy při frekvencích 60 a 90 Hz došlo k odlišnostem průběhu tvrdosti po obou stranách svarového kovu, jak dokumentují přiložené obrázky a jejich popis. Ačkoliv je u vzorku 914-1,2,6 průběh tvrdosti v celém svarovém kovu konstantní, u vzorku 914-6 je to způsobeno nejspíše způsobem rozmítání, který se podobá svařování bez rozmítání a u vzorku 914-2 zase nízkou frekvencí rozmítání, tak u ostatních vzorků má tvrdost své maximum cca v ose svarového kovu, tj. v místě rozhraní. Vliv na tento jev má zřejmě vyšší frekvence rozmítání, při použití kružnice a elipsy jako rozmítacího pohybu.

3.8 Vyhodnocení experimentu-shrnutí

Tato podkapitola slouží jako konečné shrnutí všech poznatků zjištěných pomocí vyhodnocení experimentu a uvedených v předchozích částech této práce.

Experiment, a jeho vyhodnocení, byl proveden v zázemí Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky a Ústavu strojírenských technologií Fakulty strojírenského inženýrství VUT v Brně za účasti několika odborníků, kteří přispěli svými vědomostmi a zkušenostmi ke stanovení vlivů jednotlivých parametrů na vlastnosti zhotovených svarů u jednotlivých vzorků.

V rámci experimentu bylo zjištěno několik závislostí mezi parametry svařování a vlastnostmi svaru, které byly již popsány výše. Jelikož byl výkon P laseru po celý experiment konstantní a činil 2 000 W, stejně tak jako rychlost svařování v s hodnotou $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, nelze tedy jejich vliv nijak posoudit. Stejně tak tomu je u amplitudy rozmítání, která je ve většině případů také stejná. Lze posoudit pouze vliv rozmítacího pohybu, rozmítací frekvence a jejich vzájemné kombinace, na strukturu, mechanické vlastnosti a tvrdost svarového spoje. Lze zde uvést i vliv svařování skenovací hlavou na tvar a geometrii svaru. Uvedené svařovací parametry byly konstantní, především z důvodu velkého množství parametrů a tedy mnoha různých kombinací a z toho plynoucí množství experimentů, jejichž vyhodnocování by bylo velice zdlouhavé a náročné.

3.8.1 Vliv svařování skenovací hlavou

Vzhledem k tomu, že pro svařování oceli 1.4016 byla použita skenovací hlava, která zůstala během svařování statická a byl řízen pouze pohyb paprsku, došlo ke vzniku svaru rozdílné šířky po jeho celkové délce. Toto bylo nejspíše způsobeno pohybem paprsku po svařovaném plechu, přičemž došlo nejspíše k částečnému přehřevu a v těch místech, kde byla ještě dostatečná teplota (obvykle cca do poloviny šířky plechu, tj. asi do 30 mm), došlo k vedení tepla, tím zahřátí větší části materiálu a svar dosáhl lesklý povrch, větší šířku a v některých případech i lepší mechanické vlastnosti.

3.8.2 Vliv rozmítacího pohybu na vlastnosti svaru

V rámci experimentu byly posuzovány celkem tři rozmítací pohyby. Kružnice, elipsa a kmitání v ose svaru. Tyto pohyby mají vliv především na šířku svaru a jeho tvar. Rozmítáním svazku lze dosáhnout větší šířky svaru a tepelně ovlivněné oblasti, většinou ale jen v řádu desetin milimetru.

3.8.3 Vliv frekvence rozmítání na vlastnosti svaru

Frekvence rozmítání má vliv na rychlost ochlazování svarové lázně, kdy s vyšší frekvencí se rychlost ochlazování snižuje, tím že laserový paprsek, tím jak se "vrací", zpětně taví a ohřívá okolní materiál. Snížení rychlosti ochlazování umožňuje růst zrn do více směrů. Vliv frekvence na rychlost ochlazování lze pozorovat od frekvence 60 Hz, jelikož při frekvenci 30 Hz ještě k žádným změnám nedošlo. Pomocí vyšší frekvence (60 a 90 Hz) bylo dosaženo změny orientace zrn u všech rozmítacích pohybů, proto lze říci, že vliv na orientaci zrn má tedy primárně frekvence rozmítání. Dle výsledků tahové zkoušky má frekvence rozmítání vliv i na rovnoměrnost mechanických vlastností po délce svaru, které bohužel nedosahovaly nejlepších, ale na druhou stranu ani nejhorších hodnot jak dokumentují grafy v předchozích částech práce. Bohužel vyšší frekvence rozmítání, 60 Hz, ale především 90 Hz v kombinaci s rozmítáním ve tvaru kružnice a elipsy způsobila vznik pórů. Čím vyšší byla rozmítací frekvence, tím více a větších pórů vzniklo. Co se týče vlivu frekvence na mikrostrukturu a makrostrukturu svaru, i zde hraje frekvence největší roli. V případě frekvencí nad 60 Hz, včetně, došlo ke změně orientace zrn, v důsledku změny teplotních gradientů. Mimo zrna orientovaná kolmo na středové rozhraní svaru s vyšší frekvencí objevila i zrna orientovaná ve směru svařování, či zrna kolmá na povrch plechu nebo zrna orientovaná směrem k hlavě svaru. Narušit ostré rozhraní, tím, že by byla zrna vzájemně provázána se však bohužel nepodařilo. Vždy tedy došlo k jeho vzniku, lišila se pouze orientace zrn ve svarovém kovu a v místě tohoto rozhraní. Vyhodnocení tvrdosti svarového spoje také nepřineslo žádné hmatatelné výsledky v porovnání se vzorkem svařeným bez rozmítání.

3.9 Výstupy z experimentu a doporučení pro praxi

Vzhledem k tomu, že kombinace zkoušených parametrů svařování laserem s rozmítáním svazku neměly podstatný vliv na zlepšení vlastností svaru korozivzdorné oceli 1.4016, bylo by vhodné dále zkoušet různé kombinace parametrů, především v kombinaci s frekvencemi vyššími než 60 nebo 90 Hz, jelikož frekvence má největší vliv na strukturu a mechanické vlastnosti spoje. Vhodné by bylo pravděpodobně i použití rozmítací hlavy, místo skenovací, či pohybovat skenovací hlavou pomocí robotického ramene, z důvodů uvedených výše.

Celkově nejlepších mechanických vlastností dosáhly vzorky 914-1a,b, jelikož vlastnosti obou byly velmi podobné a jedny z nejlepších, dokonce bylo dosaženo vyšší meze pevnosti svarového kovu než základního materiálu u vzorku 914-1a. Srovnatelných vlastností dosáhly i vzorky 914-6a a 914-2a, bohužel, ale jejich obdoby označené b dosáhly vůbec nejhorších mechanických vlastností, proto by bylo vhodné tento problém ověřit pomocí dalších experimentů. Ačkoliv vzorek 914-6 dosáhl změn v orientaci zrn a částečného zjemnění struktury, tvrdost ve svarovém kovu byla nejvyšší. Zajímavé jsou vzorky 914-5 a 914-4, které mají spíše průměrné mechanické vlastnosti, stejnou tvrdost jako vzorek svařovaný bez rozmítání a rovněž u nich bylo dosaženo změn v orientaci zrn. Bohužel mechanické vlastnosti byly zhoršeny velkým množstvím pórů.

Další studium této problematiky by se tedy mělo zabývat buď zrovnomněním mechanických vlastností, což je řešitelné nejspíše pomocí pohybu skenovací hlavy po délce svaru za současného rozmítání svazku. Dalším problémem k řešení je pak omezení či zamezení vzniku pórů při vyšších frekvencích rozmítání.

zajímavá je i skutečnost ohledně uvedeného možného předeřevu laserovým paprskem. Jak je vidět, předeřev měl v mnoha případech podstatný vliv na rozdílné mechanické vlastnosti vzorků "a" a "b", ale u některých se tento vliv neuplatnil, na druhou stranu ale u těchto vzorků došlo ke vzniku pórů.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Jelikož je tato práce zaměřená na vhodnost určité technologie pro svařování určitého materiálu, tedy výzkum, je technicko-ekonomické vyhodnocení spíše lehce filozofickou úvahou bez množství konkrétních čísel, tabulek, výpočtů apod. a vychází z poznatků uvedených v předchozích kapitolách této práce, jak z teoretických tak i z experimentu.

Ať už se jedná o jakýkoliv problém, nejen ve svařování nebo průmyslu obecně, ale i v každé oblasti našich životů je ekonomická otázka velmi důležitá. Vždy je třeba hledět na to, zda se investice vyplatí, za jak dlouho se vrátí a zda-li nám přinese nové výhody a posune nás dopředu. Co se týče problému řešeného v této práci tkví technicko-ekonomické vyhodnocení primárně v posouzení vhodnosti technologie svařování laserem s rozmítáním svazku na strukturu a z ní vycházející vlastnosti svaru feritické oceli 1.4016. Pro realizaci této technologie je nutné pořízení skenovací, či rozmítací, hlavy. Každá z těchto hlav má jistě své výhody a nevýhody, ale i rozdílnou cenu. Rozmítací hlava je novější technologií vyvinutou přímo pro metodu s rozmítáním svazku a je tedy dražší než hlava skenovací. Vhodnost metody se určuje pomocí zkoušek, z nichž některé byly provedeny v rámci této práce. Zkoušky dávají obraz o mechanických a deformačních vlastnostech, o struktuře, nebo o vadách ve svaru apod. O použití nové technologie lze uvažovat, pokud zkušební svary provedené touto, novou, technologií dosahují lepších vlastností, příznivější struktury, méně svarových vad, zkrátka podstatně vyšší kvality, než je tomu u svarů provedených běžnými svařovacími postupy.

Pokud se při zkouškách dosáhne lepší kvality svarových spojů lze se dále bavit o dalších investicích do nákupu nových strojů a zařízení nezbytných pro danou technologii. Mimo pořízení nového vybavení je nutné zohlednit i náklady na školení obsluhy a údržby těchto zařízení. Na řadu přichází i výpočet doby návratnosti investice, která má být co nejkratší.

Technicko-ekonomické vyhodnocení se netýká pouze samotného provozu, ale i konečné ceny výrobku, kterou platí konečný spotřebitel. Ta by měla být co nejpríznivější a to při zachování vysoké kvality, životnosti a bezproblémového provozu výrobku. V dnešní době jsou neméně důležité i ekologické dopady použité výrobní technologie, jako je znečištění ovzduší, vody nebo půdy produkcí různých odpadů. Ačkoliv lze velké množství odpadů, které průmysl produkuje odbourat, vyčistit či zneškodnit, vždy je lepší, pokud žádný odpad nevznikne.

Důležité je také brát v potaz návratnost investice do dražšího vybavení a to především s ohledem na to, jak se zkvalitní daná výroba, tzn., jak se omezí zmetkovitost součástí. Pokud by se díky nákupu dražší technologie zkvalitnila výroba, vyrábělo se méně neprodejných zmetků, lze o zavedení nové technologie uvažovat za předpokladu co nejkratší doby návratnosti, přičemž nový stroj po celou tuto dobu musí bezchybně fungovat.

Problémem konkrétně u metody rozmítání svazku je velké množství možných kombinací různých parametrů a tedy i složité hledání vhodné, či nejvhodnější, kombinace, což s sebou přináší další náklady na provedení experimentů a jejich vyhodnocení. Ale každý problém má své řešení a je na investorovi, zda-li další výzkum podpoří, třeba i pro jinou aplikaci, než zamýšlel původně, či tuto cestu zavrhne a půjde již cestou vyšlapanou.

5 ZÁVĚRY

Cílem této práce bylo posouzení vlivu svařování rozmítaným laserovým svazkem na vlastnosti svaru feritické korozivzdorné oceli 1.4016. Tato technologie je poměrně nová a osvědčila se při svařování slitin hliníku a mědi, kdy byly omezeny některé svarové vady, jako např. póry. Důvodem použití této technologie pro svařování feritických ocelí byla skutečnost, že při rozmítání dochází ke kombinovanému pohybu paprsku, tím k míchání tavné lázně a částečně k opětovnému tavení a ohřevu již vzniklého svaru tím ke snižování rychlosti chladnutí, což má vliv na strukturu a tím i na mechanické vlastnosti spoje. Ze znalosti těchto skutečností vzešel předpoklad, že pomocí rozmítání svazku by bylo možné alespoň mírné zjemnění zrna a potlačení ostrého rozhraní vznikajícího v důsledku středové orientace zrn při běžném svařování laserem, které výrazně zhoršují mechanické vlastnosti svaru.

Výsledky vzešlé z provedeného experimentu však ve většině případů nepřinesly výrazně odlišné výstupy od klasického laserového svařování. Nicméně byly zjištěny některé skutečnosti ohledně vlivu jednotlivých parametrů při rozmítání svazku na vlastnosti svaru, které jsou uvedeny ve vyhodnocení experimentu. Bohužel vzorků bylo zhotoveno poměrně malé množství, proto je nutné brát je s jistou rezervou. Pro ověření jednotlivých výstupů by totiž bylo nutné provést další experimenty, či již ze začátku počítat se zhotovením více vzorků.

Rozmítání svazku má v některých případech vliv na rozdílnost mechanických vlastností po délce svaru. U některých vzorků také došlo ke vzniku mnoha poměrně velkých pórů. Bohužel vzorky s rovnoměrnými mechanickými vlastnostmi obsahovaly zároveň nejvíce pórů. Proto by mohlo být předmětem dalšího výzkumu omezení pórovitosti, či zrovnoměrnění vlastností po celé délce svaru. Také bylo zjištěno, že největší vliv ze všech parametrů má frekvence rozmítání, pomocí níž bylo dosaženo změn v orientaci zrn a tím tedy i ke změně rychlosti chladnutí a teplotních polí ve svarové lázni.

SENAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [77]

1. KOUKAL, Jaroslav, c2002-2019. Historie tavného svařování kovů. KONSTRUKCE [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/historie-tavneho-svarovani-kovu/>
2. AMBROŽ O., KANDUSB., KUBÍČEK J. Technologie svařování a zařízení, Ostrava, Zeross, 2001, 395 str. ISBN 80-85771-81-0.
3. MRŇA, Libor a Petr HORNÍK, c2009. Pokročilé metody laserového svařování. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrocile-metody-laseroveho-svarovani.html>
4. Stainless Sheet Laser Welding Solution, LEFON [online]. LEFON Mechanical Equipment Shanghai Co [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.lefonmachine.com/index.php/en-us/stainless-sheet-laser-welding-solution>
5. *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.
6. CUNAT, Pierre-Jean. Svařování korozivzdorných ocelí: Materiály a jejich použití, Volume 3 [online]. Luxembourg: Euro Inox, 2007 [cit. 2019-04-15]. ISBN 978-2-87997-177-3. Dostupné z: http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf
7. Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu WIG (TIG) - 141, c2015-2019. Idoc [online]. Ostrava: VŠB-TUO [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/09-141.pdf>
8. Svařování MIG/MAG, MIG svařování, MAG svařování, svařování plněnou elektrodou, c1991-2019. Schinkmann [online]. Schinkmann s.r.o [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-co2>
9. DANĚK, Ladislav, Jaroslav KUBÍČEK a Libor MRŇA, c2019. Svařování feritické oceli plazmovým paprskem. Engineering.sk [online]. CB Media [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/zvaranie/879--svaovani-feriticke-oceli-plazmovym-paprskem>
10. Plazma - mikroplazmové svařování, středněplazmové svařování, c1991-2019. Schinkmann [online]. Schinkmann s.r.o [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/plazma-1>
11. ČSN EN 1011-3 (052210) Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 3: Obloukové svařování korozivzdorných ocelí
12. Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/korozivzdorne_oceli_3.pdf

13. PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu. I. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, xii, 516 s. : il. ISBN 80-7204-283-1
14. FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. Konstrukční oceli. Brno: CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8.
15. MARTINEC, Jiří, Zdeněk ŠVEIDLER a Jiří JANOVEC, c2002-2019. Korozivzdorné materiály – základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost. KONSTRUKCE [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/korozivzdorne-materialy-zakladni-typy-oceli-a-doporuceni-pro-jejich-svaritelnost/>
16. c1997-2019. Techportál [online]. Praha: Dashöfer Holding, Ltd. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydLM2IOd2w-zoz27aFII0BA
17. Druhy nerezové oceli a příklady jejího užití, c2019. FASTENERS: spojovací materiál [online]. FASTENERS CZ [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.fasteners-cz.cz/druhy-nerezove-oceli-priklady-jejeho-uziti>
18. AMBROŽ, Oldřich, SVAŘITELNOST MATERIÁLU. *Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/fsm_svaritelnost_materialu_ambroz.pdf
19. Hlavní skupiny nerezových ocelí, TERAPOL: nerez ocel [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.terapol.cz/clanek/no-vap-hlavni-skupiny>
20. MESSLER, Robert W. Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy. New York: John Wiley, 1999, 662 s. ISBN 0-471-25376-6.
21. NĚMEC, Josef. Svařování korozivzdorných a žárovzdorných ocelí. 2. přeprac. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1975, 165 s.
22. VEVERKA, J., Svařování korozivzdorných a žárupevných ocelí. OMNITECH [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.omnitechweld.cz/cze/clanky/svarovani_korozivzdornych_a_zarupevných_oceli.html
23. Kapitola 7 - Speciální oceli - Duplexní oceli, VĚDA-HROU.CZ [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://ebook.veda-hrou.cz/cms/17-kapitola-7-specialni-oceli-duplexni-oceli.html>
24. ALHEGAGI, Farej Ahmed, 2010. 475°C Embrittlement in Stainless Steels. IJSER [online]. International Journal of Scientific & Engineering Research [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: 475°C Embrittlement in Stainless Steels
25. 2019. Techportál [online]. Praha: Dashöfer Holding [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydGhF1VNE-e13oz27aFII0BA

26. Mezikrystalová koroze, c2014. *Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství* [online]. Praha: VŠCHT [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: [http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Mezikrystalov_C3_A1_20koroze_20_20\(Strauss\).pdf?redirected](http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Mezikrystalov_C3_A1_20koroze_20_20(Strauss).pdf?redirected)
27. CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ A ZÁKLADNÍ INFORMACE O POUŽITÍ, ZPRACOVÁNÍ, SVAŘOVÁNÍ A MOŽNÉ KOROZI, c2015. Italinox [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-3>
28. Koroze nerezové oceli a jak se jí efektivně bránit, c2019. FASTENERS: spojovací materiál [online]. FASTENERS CZ, a.s [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.fasteners-cz.cz/koroze-nerezove-oceli-jak-se-ji-efektivne-branit>
29. CORROSION: Intergranular Corrosion, The Stainless Steel Information Center [online]. Washington [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.ssina.com/corrosion/igc.html>
30. KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. Svařování I. 1. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 136 s. ISBN 978-80-248-0870-3.
31. PILOUS, Václav, c2002-2019. Nové nízkouhlíkové oceli feritické báze a jejich vzájemná svařitelnost. KONSTRUKCE [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, s.r.o [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/nove-nizkouhlikove-oceli-feriticke-baze-a-jejich-vzajemna-svaritelnost/>
32. RAYNOCH, Jindřich, Svařování. *Střední průmyslová škola Ostrava-Vítkovice* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/SVA_C5_98OV_C3_81N_C3_8D-UT.pdf
33. Svařování metodou MIG, C2015-2017. KOVOVÝROBA [online]. Brno: CR DESIGN [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.kovovyroba-crdesign.cz/svarovani-brno/svarovani-metodou-MIG>
34. NOVÁK, Miroslav, 2014. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení. Lao: Lasery a Optika [online]. LAO - průmyslové systémy [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
35. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technologie, 1. vyd., Bratislava, Vydavatelstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
36. BEZÁK, Ján, Anton KOLENO, Ivan VITÁLOŠ, et al. Zváracie procesy a zariadenia: učebný text pre vyšší zvaračský personál. Bratislava: Prvá zvaračská , a.s, 2011, 287 stran : ilustrace. ISBN 978-80-89421-01-5

37. KOŘÁN, Pavel, 2014. Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. Lao: Lasery a Optika [online]. LAO - průmyslové systémy [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
38. Využití laseru v průmyslu: minulost a současnost, Technický portál [online]. Praha: Business Media CZ [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/vyuziti-laseru-v-prumyslu-minulost-a-soucasnost_28291.html
39. PETERKA, Pavel et al, Vláknové lasery. Věda kolem nás [online]. Středisko společných činností AV ČR [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: http://www.vedakolemnas.cz/miranda2/m2/sys/galerie-download/vkn_002_2014_web.pdf?0.5423163361847401
40. Rozdělení laserů, LASCAM [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
41. KOŘÁN, Pavel, c2019. Průmyslové lasery (2) - svařovací lasery. MM: Průmyslové spektrum[online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>
42. Direct industry [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/ii-vi-infrared/product-37313-749747.html>
43. COATES, Eric, c2007-2019. Laser Diodes. Learn about Electronics [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: http://www.learnabout-electronics.org/Semiconductors/diodes_26.php
44. KOŘÁN, Pavel, 2014. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ I (LASER WELDING). Lao: Lasery a Optika [online]. LAO - průmyslové systémy [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
45. Kondukční svařování, c2019. TRUMPF [online]. TRUMPF [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/kondukcni-svarovani/
46. Conduction Mode and Keyhole Mode Welding, 2015. EB INDUSTRIES [online]. EB Industries [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.ebindustries.com/conduction-mode-keyhole-mode-welding/?cn-reloaded=1>
47. Laserové svařování, c2019. LASER THERM: Lasery pro průmyslové technologie [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-svarovani/>
48. Robot Laser Welding Cell with Seam Tracking Function, HAN*S LASER [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.u-tanklaser.com/en/robot-laser-welding-59p.html>

49. MRŇA, Libor, c2019. Aktuální možnosti v laserovém svařování. MM: Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-moznosti-v-laserovem-svarovani.html>
50. IPG Photonics Wobble Heads, c2019. IPG Photonics [online]. IPG Photonics Corporation [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/208/Widget/Wobble+Process+Heads+Brochure+2018.pdf>
51. MRŇA, Libor, Petr HORNÍK, Petr JEDLIČKA a Jan PAVELKA, https://www.wlt.de/lim/Proceedings2017/Data/PDF/Contribution236_final.pdf. WLT: Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: https://www.wlt.de/lim/Proceedings2017/Data/PDF/Contribution236_final.pdf
52. Welding with wobbling technique, c2019. Metalworking [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.metalworkingworldmagazine.com/welding-with-wobbling-technique/>
53. VAKILI-FARAHANI, F., J. LUNGERSHAUSEN a K. WASMER, 2016. Process Parameter Optimization for Wobbling Laser Spot Welding of Ti6Al4V Alloy. Physics Procedia [online]. Elsevier B.V, **83**, 483-493 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.050. ISSN 1875-3892.
54. Made-in-China.com [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://sanhe-laser.en.made-in-china.com/productimage/UCJmRjaWaGcd-2f1j00bwfanJQBLlqe/China-Hot-Sale-Stainless-Steel-Carbon-Steel-Iron-Aluminum-Copper-Brass-Fiber-Laser-Marking-Machine-Marker-Engraver-Printer.html>
55. ČERNÁ, Dana, 2016. Povinnosti související se zahájením provozování laseru v ordinaci. Medigenia [online]. MediGenia [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://medigenia.cz/clanky/dokumentace/povinnosti-souvisejici-se-zahajenim-provozovani-laseru-v-ordinaci/>
56. ŠTORKÁN, Zdeněk, c2002-2019. Problematika hodnocení svarových spojů. KONSTRUKCE[online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, s.r.o [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
57. Specifické požadavky normy ČSN EN 1090-2 pro kvalifikace postupů svařování, c2019. *Mechanická zkušebna* [online]. [cit. 2019-03-1]. Dostupné z: <http://mechanicka-zkusebna.cz/tag/wpqr/>
58. Kvalifikace WPQR dle ISO 15614-1 až 14, c2014. *Vaněk welding* [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://www.vanek-welding-s-r-o.cz/iso-15614-1-az-14-kvalifikace-wpqr/>
59. KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMDLENÝ, 2009. *Svařování I*. Dotisk 1. vydání. Ostrava: VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. ISBN 978-80-248-0870-3.

60. MODERNÍ TECHNOLOGIE VE STUDIU APLIKOVANÉ FYZIKY. Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii[online]. 2011 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z:<https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
61. Spotřební materiál pro metalografické přístroje, c2018. LECO[online]. Plzeň: LECO Instrumente Plzeň, spol. s r.o. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://cz.leco-europe.com/product/consumables-metallography/>
62. TREJTNAR, Josef, *Destruktivní zkoušky svarových spojů* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/destruktivni-zkousky-svarovych-spoju-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EuvDzS7ep4R2Wh5CTKyYaSk/>
63. Laboratoř mechanického zkoušení kovových materiálů, 2014. *Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství* [online]. Praha: VŠCHT Praha [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Mechanick_C3_A9_20zkou_C5_A1en_C3_AD_20kovov_C3_BDch_20materi_C3_A11_C5_AF.pdf?redir
64. Principle of tensile test, 2019. ResearchGate [online]. © ResearchGate [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-tensile-test-Zwick-Roell-kind-Zmart-PRO_fig1_301542666
65. Zkoušky svarů, c2015. *CZ FERRET: Materiálová zkušebna* [online]. CZ FERRET [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://www.czferret.cz/zkousky-svaru/>
66. Zkoušky tvrdosti[online]. [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf
67. Měření tvrdosti, ELUC [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1569>
68. TECHNICKÁ MĚŘENÍ [online], [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: http://xyz12345.wz.cz/tmr/zkousky_tech.html
69. Kontrola svaru [online], [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1573>
70. Radiografická metoda, DEFEKTA NDT [online]. DEFEKTA NDT [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://defekta.cz/ut/>
71. Ultrazvuková kontrola, DEFEKTA NDT [online]. DEFEKTA NDT [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://defekta.cz/ut/>
72. Magnetická metoda prášková, c2015. WELDINSPECT s.r.o: Defektoskopie – Kontrola – Inspekce [online]. Pňovice: WELDINSPECT [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: https://weldinspect.cz/?page_id=85
73. X6Cr17, ©2019. BOLZANO [online]. Kladno: Bohdan Bolzano [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6cr17-feriticke>

74. 1.4016 je legovaná ušlechtilá poloferitická ocel, c2018. AK1234 [online]. AK1324, s.r.o [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.ak1324.cz/jakost-1-4016/>
75. Výkonový laser IPG YLS2000 [online], ISI CAS [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.isibrno.cz/cs/vykonovy-laser-ipg-yls2000>
76. LEXT - High resolution 3D Surface Profile, Imaging&Microscopy[online]. [cit. 2019-0522]. Dostupné z: <https://www.imaging-git.com/products/lext-high-resolution-3d-surface-profile-observation-and-measurement-uv-laser-confocal-micro>
77. CITACE PRO. Generátor citací [online]. 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
Ar	argon	[-]
C	uhlík	[-]
Co	kobalt	[-]
CO ₂	oxid uhličitý	[-]
Cr	chrom	[-]
ČSN	Česká státní norma	[-]
d	Střední délka úhlopříčky vtisku	[mm]
EN	Evropská norma	[-]
f	frekvence rozmítání	[Hz]
F	zatěžující síla	[N]
F _m	síla na mezi pevnosti	[N]
F _e	síla na mezi kluzu	[N]
HV	tvrdost podle Vickerse	[-]
He	helium	[-]
I	proud	[A]
l	konečné délka zkušební tyče	[mm]
l ₀	počáteční délka zkušební tyče	[mm]
MAG	metal active gas	[-]
MIG	metal inert gas	[-]
Mn	mangan	[-]
Mo	molybden	[-]
N	dusík	[-]
Ni	nikl	[-]
P	fosfor, výkon laseru	[-],[W]
Q _s	tepelný příkon svařování	[kJ·mm ⁻¹]
R _e	mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
RTG	rentgenové záření	[-]
s	počáteční šířka měrné tyče	[mm]
S	počáteční průřez měrné tyče	[mm ²]
S ₀	konečný průřez měrné tyče	[mm ²]
Si	křemík	[-]
SK	svarový kov	[-]
t	tloušťka zkušební tyče	[mm]
Ti	titan	[-]
TIG	tungsten inert gas	[-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	[-]
U	napětí	[V]
v	rychlost svařování	[mm·s ⁻¹]
WIG	wolfram inert gas	[-]
ZM	základní materiál	[-]
λ	vlnová délka	[nm]
η	účinnost	[%] [nm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Svařování laserem [4]	10
Obr. 2 Princip svařování metodou WIG [7].....	11
Obr. 3 Princip svařování metodou MIG [8]	12
Obr. 4 Princip svařování plazmou [10]	12
Obr. 5 Použití korozivzdorné oceli v automobilovém průmyslu [17]	13
Obr. 6 Schafflerův diagram [18]	14
Obr. 7 Feritická struktura [15]	15
Obr. 8 Hrubé zrno a středová orientace zrn [9].....	16
Obr. 9 σ -fáze v duplexní oceli [23]	17
Obr. 10 Mezikrystalová koroze [29]	18
Obr. 11 Trhlina za studena [31]	18
Obr. 12 Příklad svařování metodou MIG/MAG [33].....	19
Obr. 13 Princip laseru [30].....	19
Obr. 14 Princip vláknového laseru [37]	21
Obr. 15. Princip diskového laseru [42]	22
Obr. 16. Princip polovodičového laseru [43]	22
Obr. 17 Penetrační režim svařování [44]	23
Obr. 18 Kondukční režim svařování [44]	23
Obr. 19 Příklad sestavy pro laserové svařování [48]	24
Obr. 20 Některé tvary rozmítacích obrazců [50]	25
Obr. 21 Trajektorie paprsku při rozmítání ve formě kružnice v závislosti na frekvenci [51]	25
Obr. 22 Princip skenovací hlavy a skenování [54]	23
Obr. 23 Voblovací hlava [50].....	23
Obr. 24 Označení laserového prostoru [55]	24
Obr. 25 Postup stanovení svařovacího postupu [57].....	28
Obr. 26 Ukázka vybavení metalografické laboratoře [61].....	29
Obr. 27 Příklad makrostruktury svaru [56]	29
Obr. 28 Princip zkoušky tahem [64]	30
Obr. 29 Princip zkoušky tvrdosti dle Vickerse [67].....	30
Obr. 33 Plech z oceli 1.4016 [74]	34
Obr. 34 Ocel 1.4016 ve Schafferově diagramu [18]	35
Obr. 35 Robot se skenovací hlavou.....	36
Obr. 36 Laser YLS -2000.....	36
Obr. 37 Upnutí plechů před svařením	37
Obr. 38 Vzorky po svaření	37
Obr. 40 Detail svaru vzorku 914-1	38
Obr. 41 Detail svaru vzorku 914-2.....	38
Obr. 42 Detail svaru vzorku 914-3.....	38

Obr. 43 Detail svaru vzorku 914-4.....	38
Obr. 44 Detail svaru vzorku 914-5.....	38
Obr. 45 Detail svaru vzorku 914-6.....	39
Obr. 46 Výřezy pro výrobu metalografických vzorků	39
Obr. 47 Kotoučová pila MTH MIKRON 110	40
Obr. 48 SAPHIR 330	40
Obr. 49 STRUERS CITO PRESS-149.....	40
Obr. 50 Příklad pro leštění a broušení0	40
Obr. 51 Hotové metalografické vzorky.....	41
Obr. 52 Makrostruktura vzorku 914-1	41
Obr. 53 Makrostruktura vzorku 914-2	42
Obr. 54 Makrostruktura vzorku 914-3	42
Obr. 55 Makrostruktura vzorku 914-4	43
Obr. 56 Makrostruktura vzorku 914-5	43
Obr. 57 Makrostruktura vzorku 914-6	44
Obr. 58 Konfokální mikroskop OLYMPUS LEXT [76].....	45
Obr. 59 Síťová martenzitu po hranicích zrn.....	45
Obr. 60 Jehlice martenzitu po hranicích zrn.....	46
Obr. 61 Upnutí vzorku v trhacím stroji	46
Obr. 62 Geometrie zkušební tělesa pro tahovou zkoušku	46
Obr. 63 Zkušební těleso připravené pro tahovou zkoušku	47
Obr. 64 Ukázka přetržených vzorků	47
Obr. 65 Smluvní tahový diagram pro vzorek 914-3.....	48
Obr. 66 Souhrnný smluvní tahový diagram pro všechny vzorky	49
Obr. 67 Lomová plocha vzorku 914-1b.....	50
Obr. 68 Lomová plocha vzorku 914-2b.....	50
Obr. 69 Lomová plocha vzorku 914-3b.....	51
Obr. 70 Lomová plocha vzorku 914-4b.....	51
Obr. 71 Lomová plocha vzorku 914-5a.....	52
Obr. 72 Lomová plocha vzorku 914-6b.....	52
Obr. 73 Vliv rozmítání na mez pevnosti	53
Obr. 74 Závislost tažnosti na rozmítání.....	54
Obr. 75 Tvrdoměr Zwick 3212.....	54
Obr. 76 Tvrdost vzorku 914-1	55
Obr. 77 Tvrdost vzorku 914-2	55
Obr. 78 Tvrdost vzorku 914-3	56
Obr. 79 Tvrdost vzorku 914-4	56
Obr. 80 Tvrdost vzorku 914-5	57
Obr. 81 Tvrdost vzorku 914-6	57

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Parametry nejčastěji používaných průmyslových laserů [36]	21
Tab. 2 Chemické složení oceli 1.4016	34
Tab. 3 Mechanické vlastnosti ocelového plechu z materiálu 1.4016.....	34
Tab. 4 Svařovací parametry jednotlivých vzorků	37
Tab. 5 Výsledky tahové zkoušky - mechanické a deformační vlastnosti vzorků.....	48

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/
- Příloha 2 Inspekční certifikát - atest materiálu 1.4016
- Příloha 3 Výsledky tahové zkoušky - grafy
- Příloha 4 Fotografie mikrostruktury svarového kovu
- Příloha 5 Výsledky měření tvrdosti

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

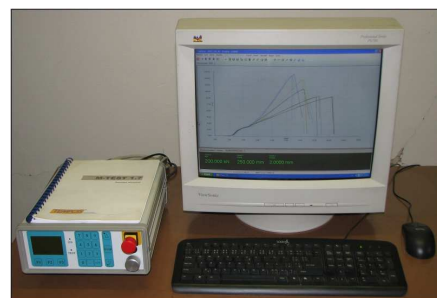
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

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






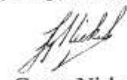
Technické parametry:

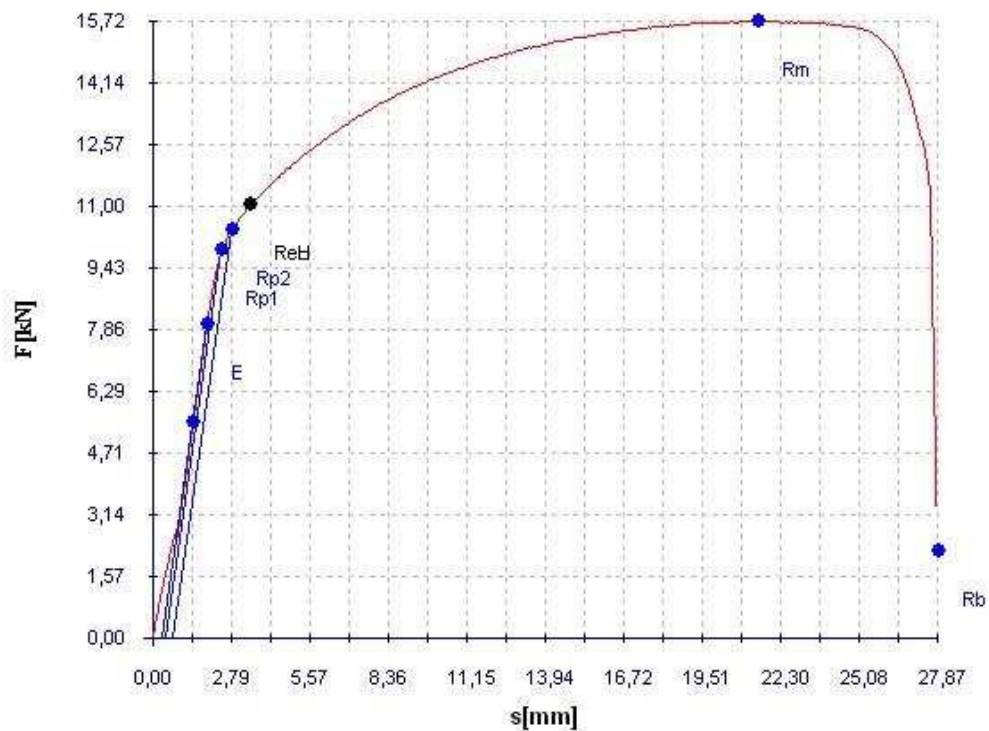
- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC COM1 pro PC s FIFO s maximální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

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

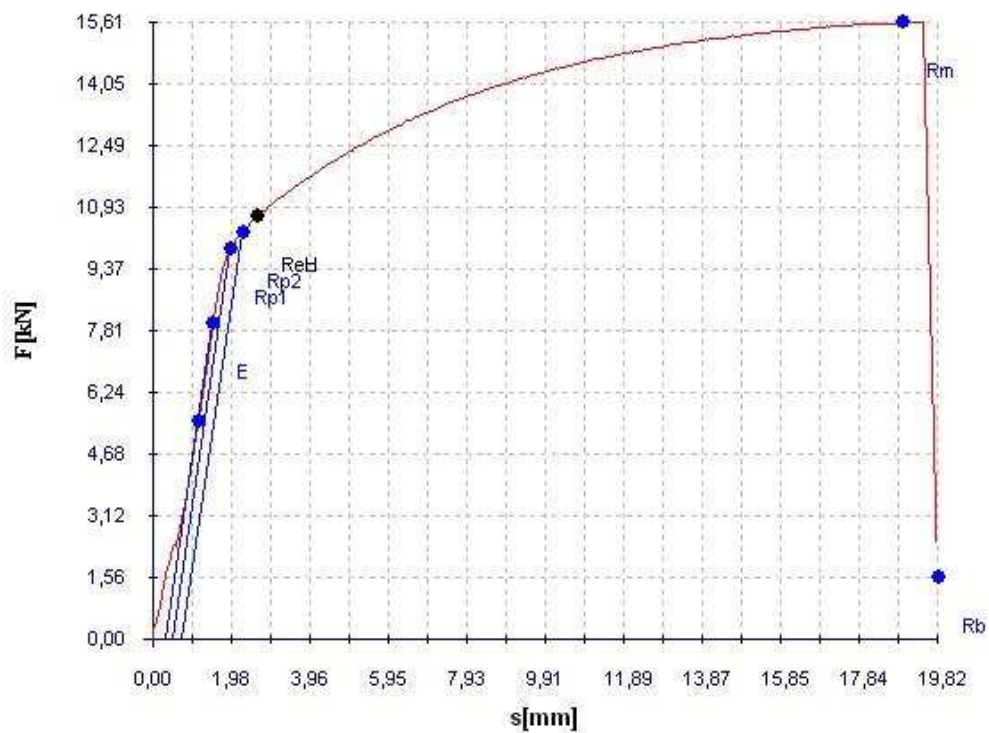


Řídicí jednotka EDC 60

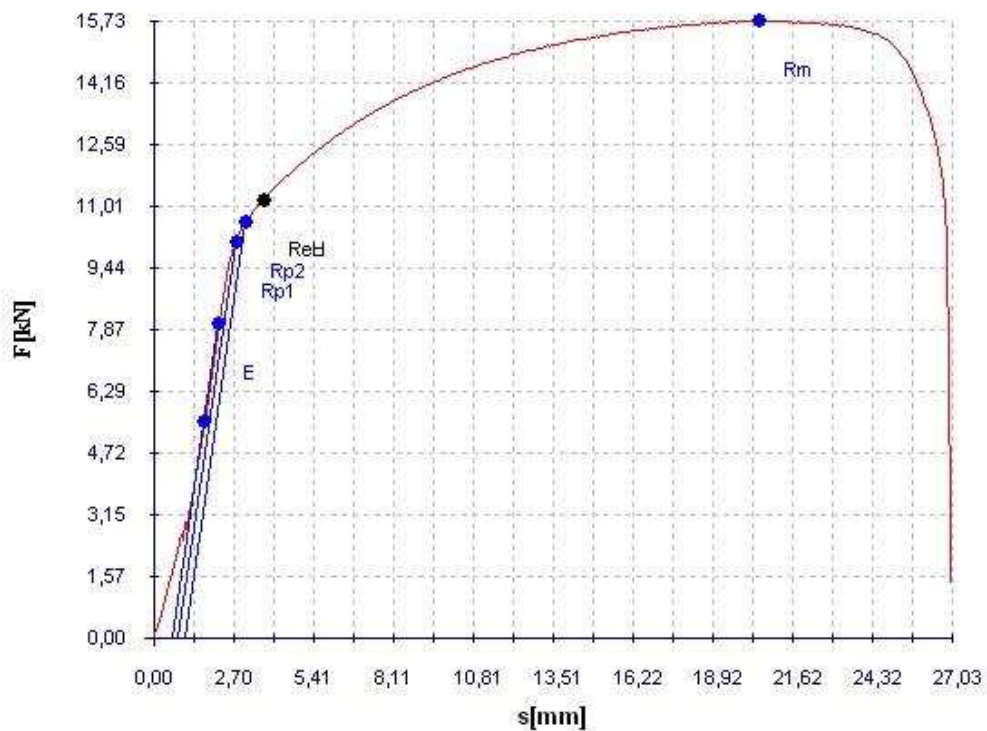
 <p>Columbus Stainless (Pty) Ltd P.O. Box 111, Middelburg 1008, South Africa Telephone: +27 11 547 6111 Fax: +27 11 548 148 Website: www.columbus.co.za A Division of ACSERVO S.A.</p>	 <p> Institute of Registration ICF Inspection Services S.A. (Pty) C/ Santiago de Compostela 190, 28011 Madrid Spain Tel: +34 902 5130 50 / 348 51 62 Corrosion Resistant Steel for building construction or civil engineering. Registered activities: No performance determined </p>	INSPECTION CERTIFICATE 3.1		ISSUE DATE: 2017-03-01											
		ACCORDING TO EN 10204 CERTIFICATE NO 3140980 Rev 1													
MANUFACTURER'S MARK 	INSPECTOR'S STAMP 		MELTING PROCESS		E/AOD										
CUSTOMER:			ORDER No. PW01575	ITEM No. 27	DELIVERY NOTE No. DEL075136										
			CUSTOMER ORDER No. 2016-V019(ZA)												
REQUIREMENTS															
SPECIFICATIONS EN 10088-2-2014 EN 10088-4-2009 ASTM A240 / A240M-16a ASME BPVC IIA SA240 / SA240M-2015		MATERIAL CODE 1.4016 1.4016 430 430		CASE LPAS06663 4086342A04 [2901 Kg]											
TOLERANCE: ISO 9445-2 ; ASTM A480/480M ; ASME SA480/SA480M				TYPE	N6Cr 17										
PRODUCT: 2B: Cold rolled, heat treated, pickled, skin passed.				HEAT No.: 408634											
DIMENSIONS: 3 mm x 1000 mm x 2000 mm			QUANTITY 65	MASS 2901 Kg	MATERIAL No.: 4086342-2										
CHEMICAL COMPOSITION (%)															
	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni								
Min						16.0									
DIMENSIONS: 3 mm x 1000 mm x 2000 mm						QUANTITY 65	MASS 2901 Kg	MATERIAL No.: 4086342-2							
CHEMICAL COMPOSITION (%)															
	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni								
Min						16.0									
Max	0.080	0.015	0.040	1.00	1.00	18.0	0.75								
Actual	0.041	0.001	0.018	0.42	0.40	16.1	0.15								
MECHANICAL PROPERTIES															
TEMPERATURE	DIRECTION	POSITION	Rp0.2 MPa	Rp1.0 MPa	Rm MPa	A50 %	A5 %	HRBW HRBW	Bend						
Ambient	Transverse	Requirement Min	280		450	22	20								
		Max			600			89							
Ambient	Transverse	Head	325	345	481	31	28	78	PASS						
		Tail						76							
INTERGRANULAR CORROSION						Columbus Stainless (Pty) Ltd. certifies that the analysis and material on this certification is correct and meets the specifications stated. This document is issued without alteration or erasure and may only be reproduced in full. Made and melted in South Africa. This Material is PMI Tested. Visual and dimensional control: no exceptions. The delivery is in accordance with the order. This material is free from mercury contamination. The radiation level exhibited by this material is not greater than the normal background level. This material meets the Hardness requirement of NACE MR0175 / ISO 15156-3 : 2015 & NACE MR0103 / ISO 17945 : 2015 Columbus Stainless is ISO 9001:2008 & ISO 14001:2004 Certified. For the Declaration of Performance, please visit http://www.columbusstainless.co.za/declaration									
TEST		RESULT													
HEAT TREATMENT (SOLUTION ANNEALED)															
Anneal °C		Quench													
770 - 830		AIR/ WATER SPRAY													
COLUMBUS STAINLESS (PTY) LTD Hendrina Road, Middelburg Mpumalanga, South Africa.  G. van Niekerk WORKS EXPERT															



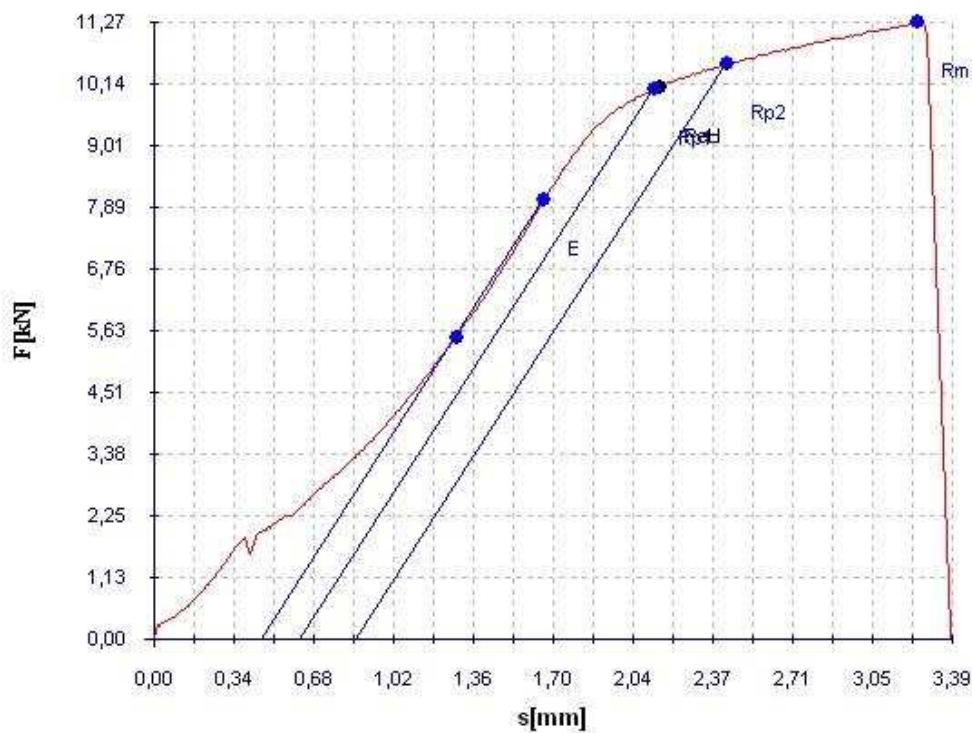
Obr. 3.1 Smluvní tahový diagram vzorku 914-1a



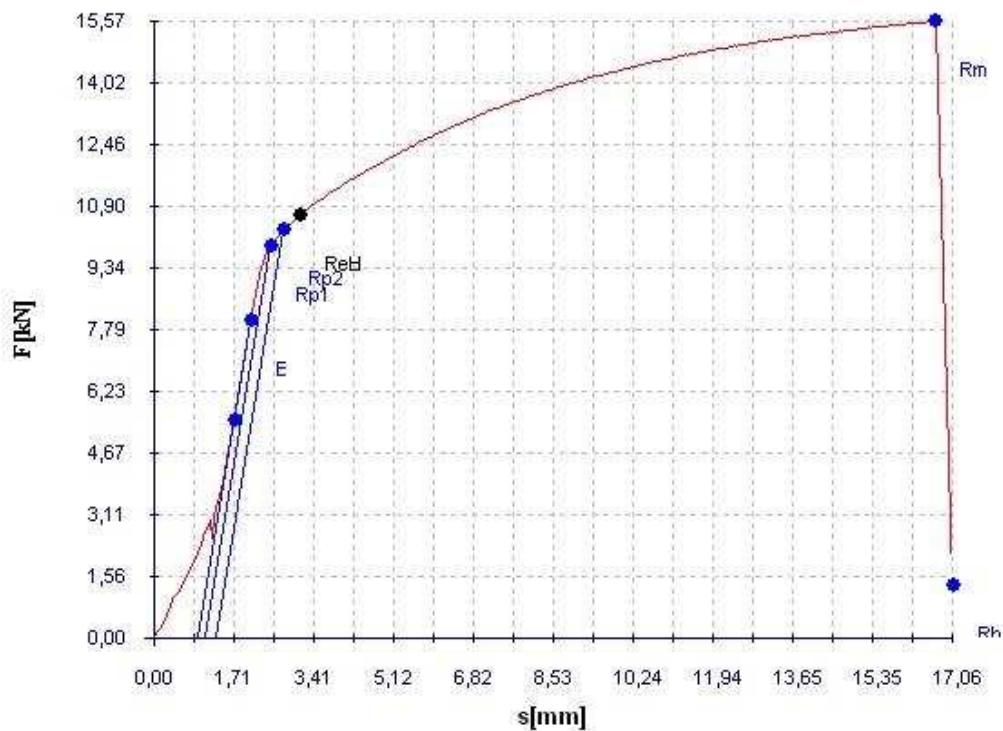
Obr. 3.2 Smluvní tahový diagram vzorku 914-1b



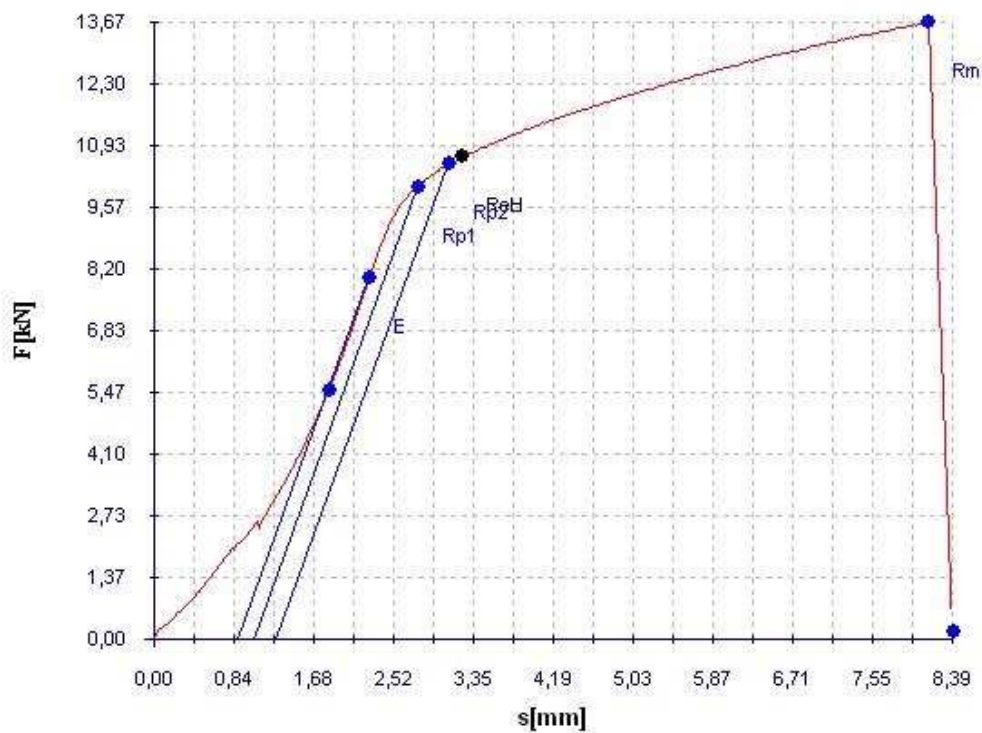
Obr. 3.3 Smluvní tahový diagram vzorku 914-2a



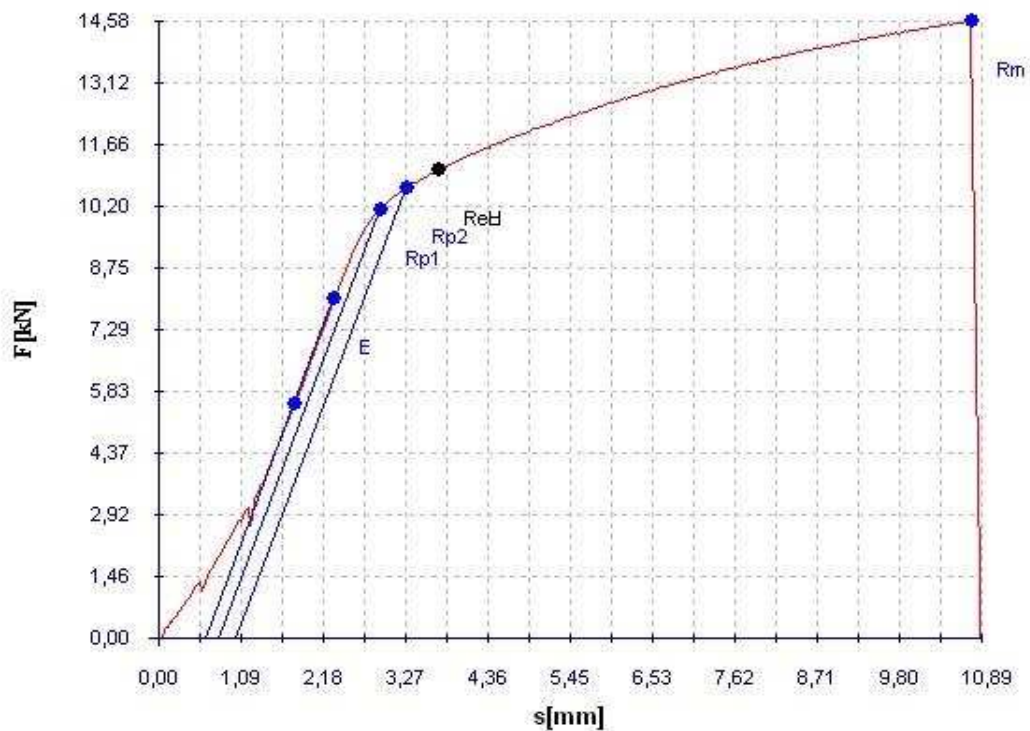
Obr. 3.4 Smluvní tahový diagram vzorku 914-2b



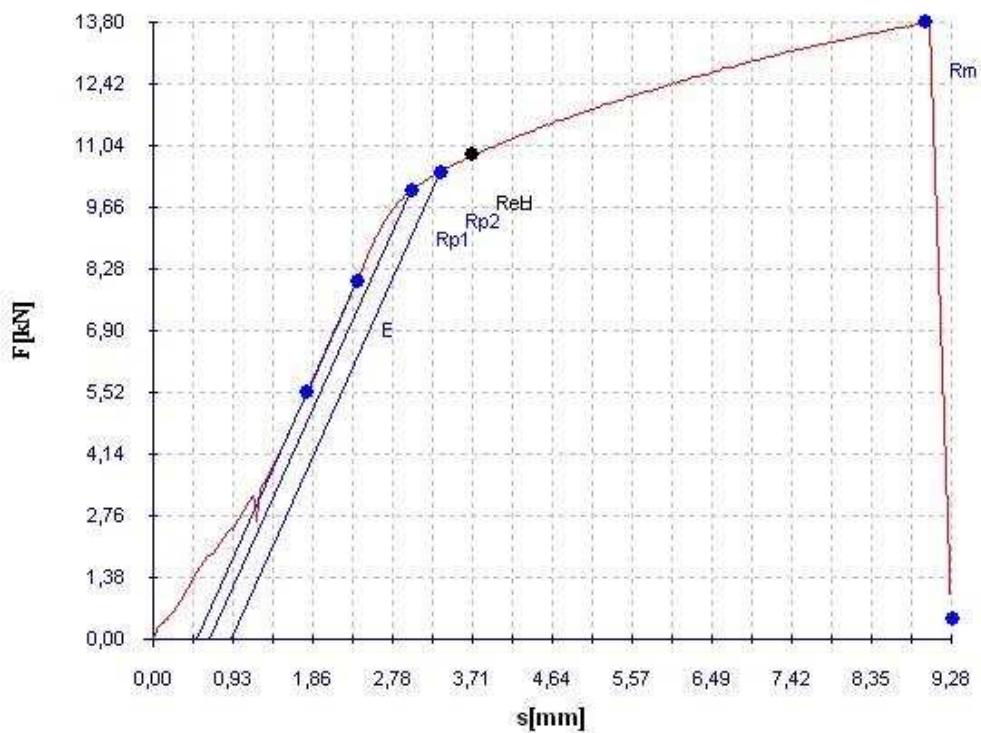
Obr. 3.5 Smluvní tahový diagram vzorku 914-3a



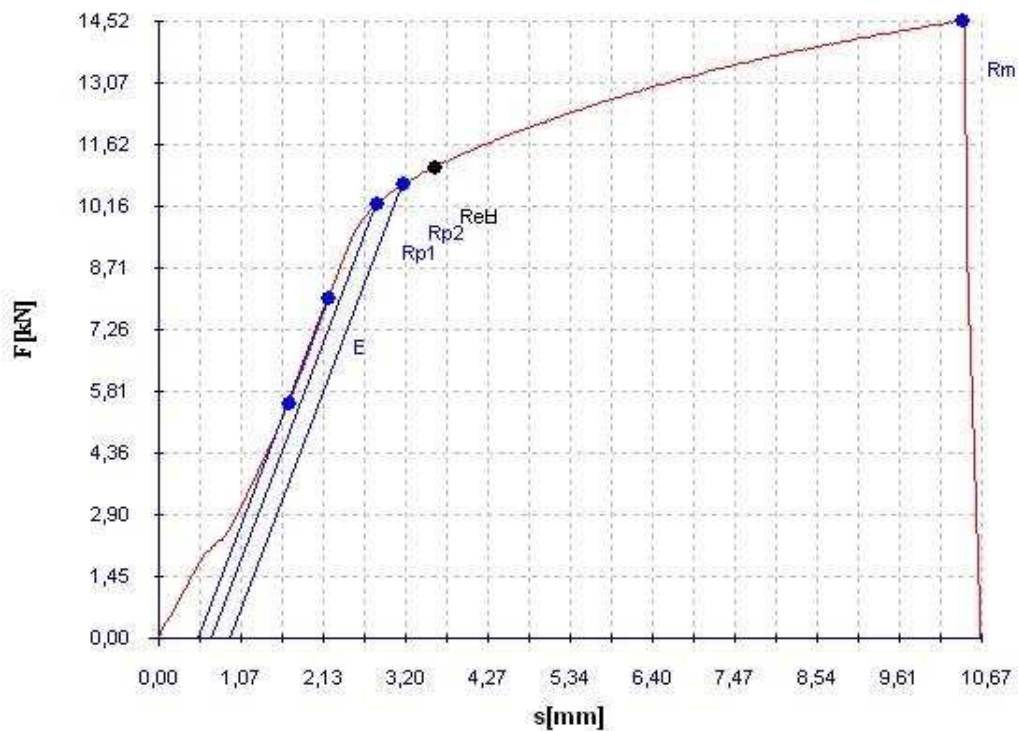
Obr. 3.6 Smluvní tahový diagram vzorku 914-3b



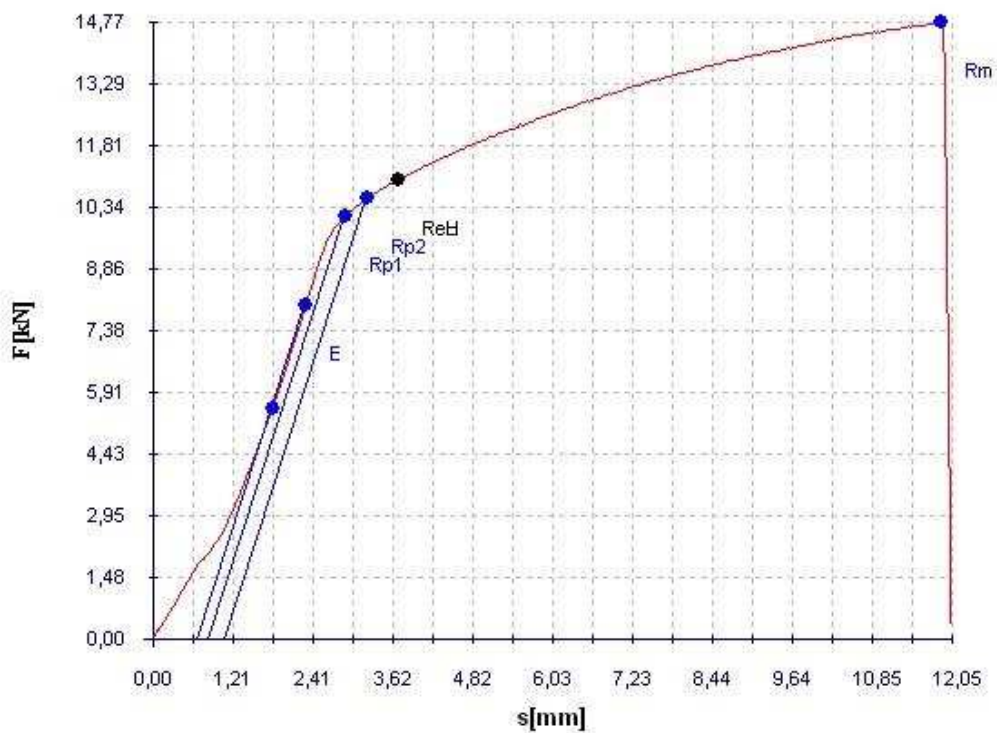
Obr. 3.7 Smluvní tahový diagram vzorku 914-4a



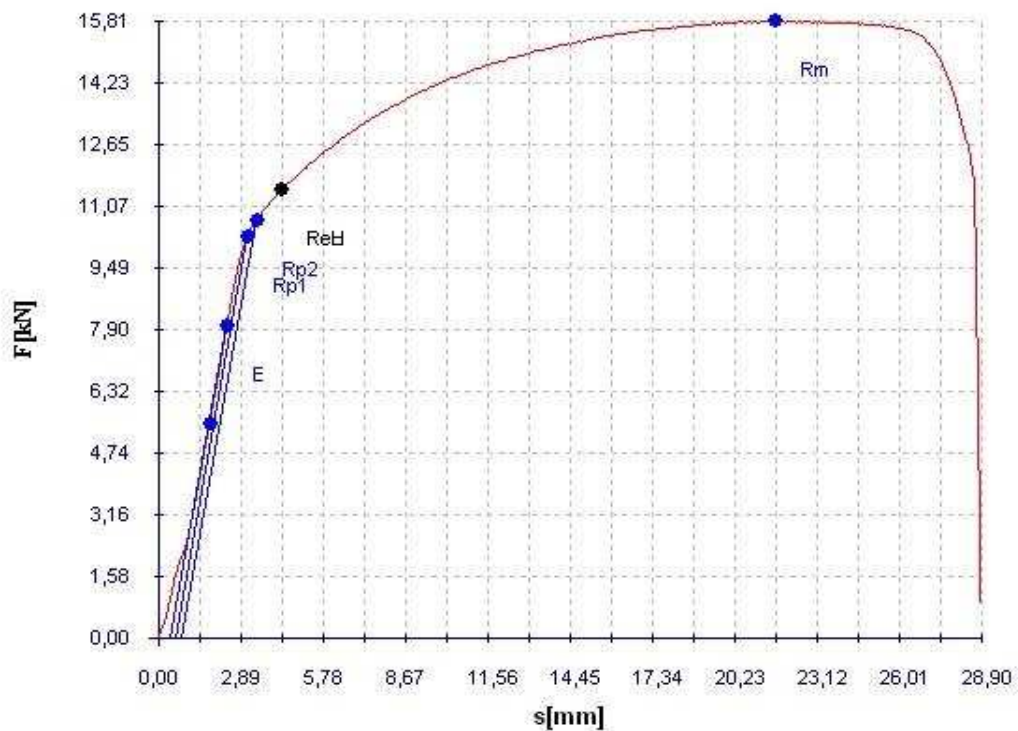
Obr. 3.8 Smluvní tahový diagram vzorku 914-4b



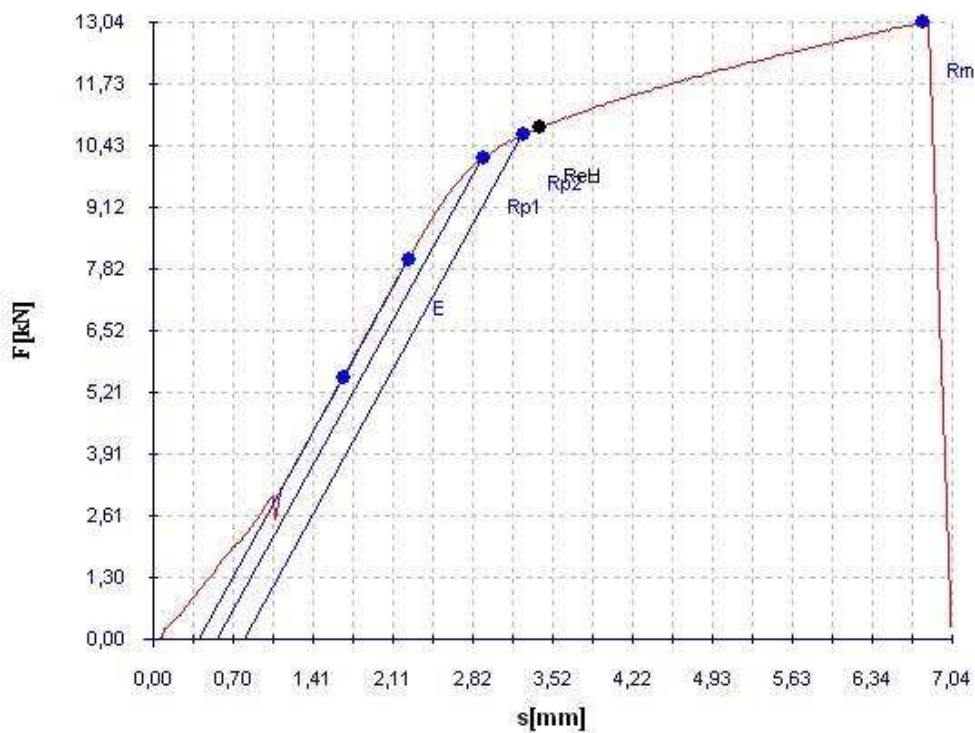
Obr. 3.9 Smluvní tahový diagram vzorku 914-5a



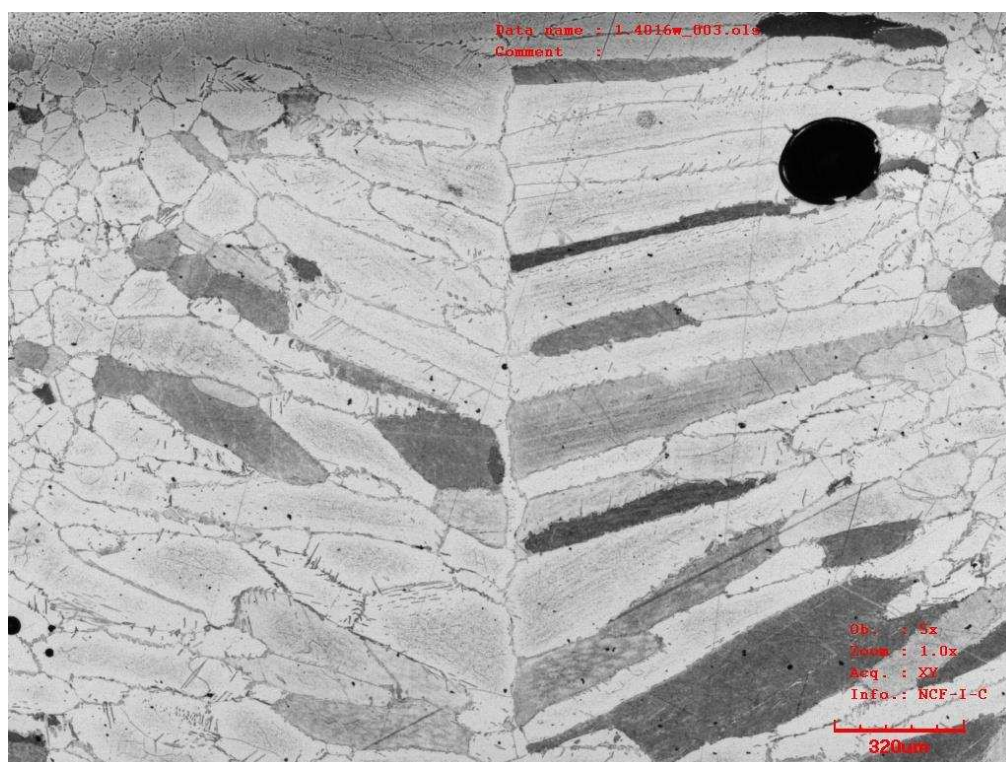
Obr. 3.10 Smluvní tahový diagram vzorku 914-5b



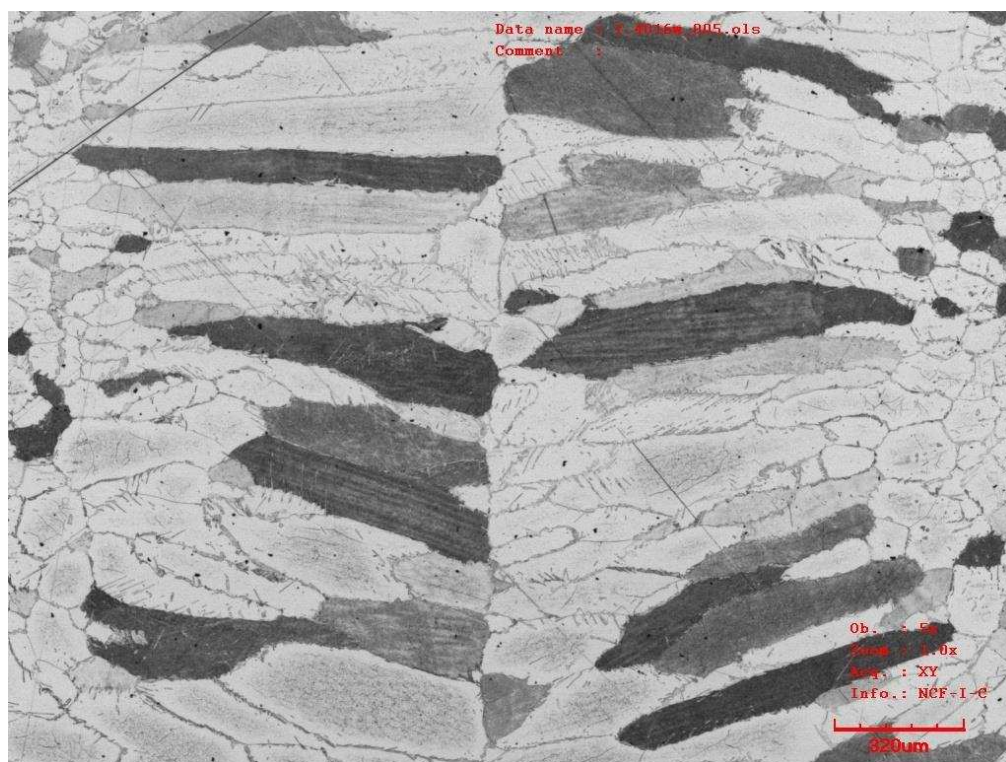
Obr. 3.11 Smluvní tahový diagram vzorku 914-6a



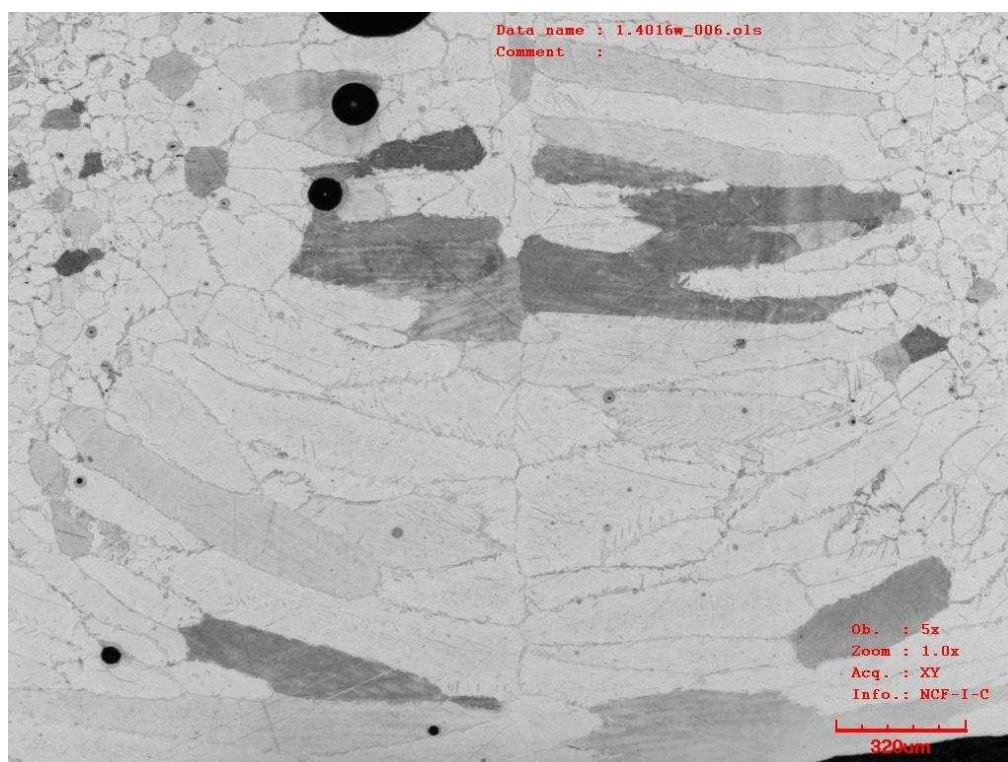
Obr. 3.12 Smluvní tahový diagram vzorku 914-6b



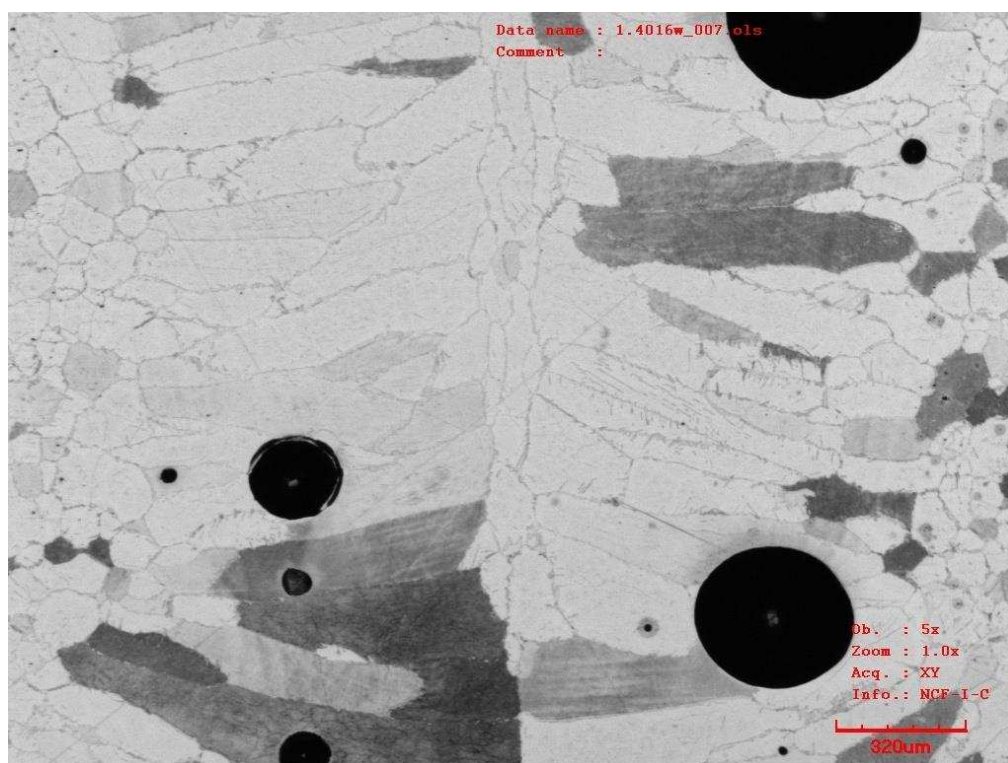
Obr. 4.1 Mikrostruktura svarového kovu vzorku 914-1



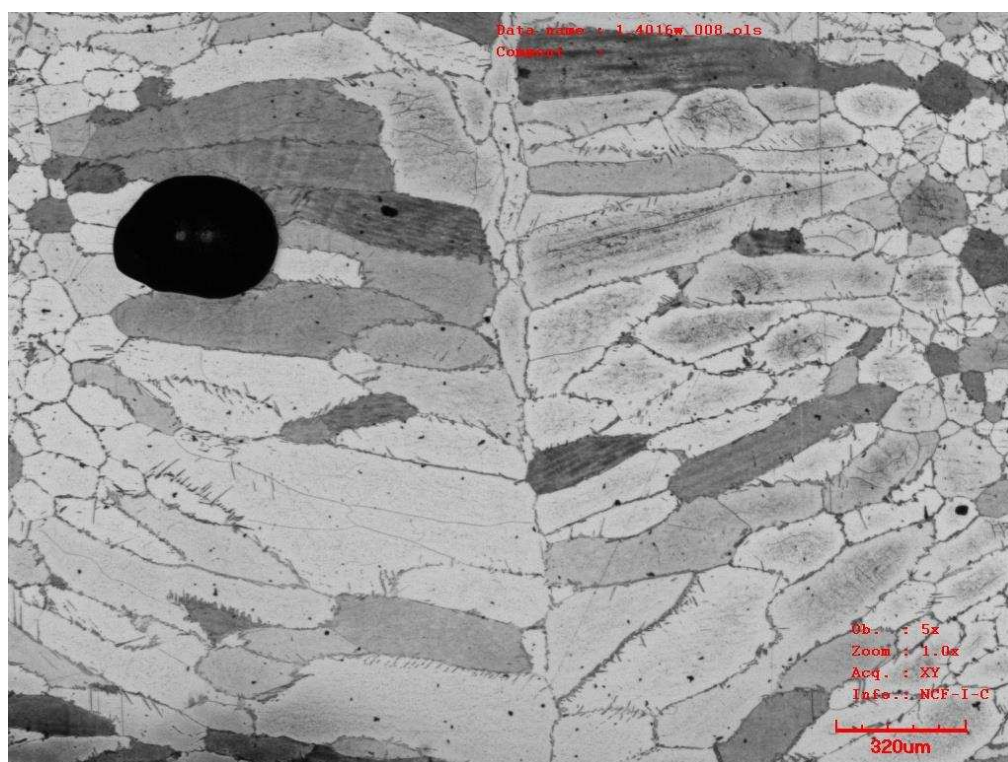
Obr. 4.2 Mikrostruktura svarového kovu vzorku 914-2



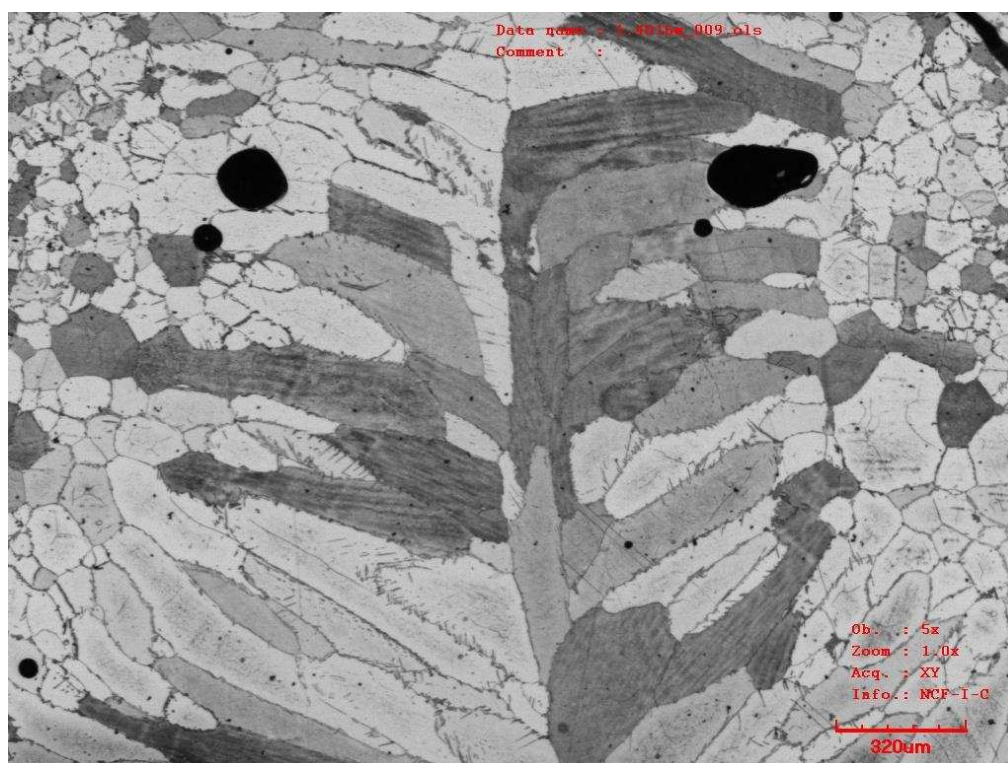
Obr. 4.3 Mikrostruktura svarového kovu vzorku 914-3



Obr. 4.4 Mikrostruktura svarového kovu vzorku 914-4



Obr. 4.1 Mikrostruktura svarového kovu vzorku 914-1



Obr. 4.1 Mikrostruktura svarového kovu vzorku 914-1

Tab. 5.1 Výsledky měření tvrdosti

Vtisk/ vzorek	914-1	914-2	914-3	914-4	914-5	914-6
1	103	103	102	100	101	103
2	102	103	104	103	106	104
3	106	102	103	104	105	105
4	107	108	102	102	103	104
5	129	131	104	108	103	103
6	142	136	131	132	103	98
7	144	143	143	140	105	112
8	144	139	140	136	129	136
9	144	145	149	148	137	144
10	144	139	149	121	143	154
11	139	142	145	137	147	145
12	142	139	128	126	146	144
13	124	116	111	112	144	153
14	108	108	104	103	133	131
15	103	104	104	102	122	119
16	107	109	105	106	110	105
17	103	110	106	106	103	102
18	103	106	104	104	103	103