



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

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

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kamil Hála

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|-------------------------------------|
| Ústav: | Ústav strojírenské technologie |
| Student: | Bc. Kamil Hála |
| Studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Strojírenská technologie |
| Vedoucí práce: | doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2018/19 |

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

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

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

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

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii laserového svařování včetně techniky s rozmítání svazku (tzv. wobbling). Osvojit si problematiku 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

HÁLA Kamil – Studium vlivu procesních parametrů na vlastnosti heterogenního svaru feritické korozivzdorné oceli s uhlíkovou ocelí při laserovém svařování s rozmítáním svazku

Diplomová práce předkládá výzkum vlivu procesních parametrů na vlastnosti heterogenního spoje při laserovém svařování s rozmítáním svazku. Nejprve je pomocí literární studie vytvořen přehled o využití technologie laserového svařování v průmyslu a vysvětlena problematika vzniku heterogenního spoje. V experimentální části bylo svařeno 6 vzorků uhlíkové oceli s korozivzdornou feritickou ocelí s použitím různých parametrů rozmítání. Ze vzorků byla vytvořena zkušební tělesa pro tahovou zkoušku, zkoušku tvrdosti dle Vickerse, metalografickou zkoušku a pro zkoušku korozní odolnosti. Výsledkem experimentu je vytvoření studie pro využití kombinace daných materiálů v průmyslové praxi.

Klíčová slova: Svařování, LASER, paprsek, struktura materiálu, wobbling

ABSTRACT

HÁLA Kamil – Study of the influence of process parameters on welding properties of ferritic stainless steel and carbon steel in laser oscillation welding

The Master thesis is focused on the influence of procedural parameters on the properties of heterogeneous weld in laser welding. The literature review section offers an overview of the industrial application of the laser welding technology as well as it explains the issue of heterogeneous weld creation. The experimental part of the thesis aims to describe how six carbon steel samples have been welded together with ferritic stainless steel by usage of several different beam oscillation configurations. Tested samples have been used to create trial ensembles that were subjected for a tension testing, Vickers hardness testing, metallographic testing and corrosive resistant testing. As a result of the experiment, there is a suggestion of the study that could be used for an industrial using of a combination of these materials.

Keywords: Welding, Laser, Beam, Material Structure, Wobbling

Bibliografická citace

HÁLA, Kamil. *Studium vlivu procesních parametrů na vlastnosti heterogenního svaru feritické korozivzdorné oceli s uhlíkovou ocelí při laserovém svařování s rozmitáním svazku*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116793>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Studium vlivu procesních parametrů na vlastnosti heterogenního svaru feritické korozivzdorné oceli s uhlíkovou ocelí při laserovém svařování s rozmítáním svazku vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Místo a datum

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, PhD za cenné rady, připomínky a veškerou pomoc, kterou mi při vypracování poskytl. Dále také rodině a dalším, kteří mi pomohli při vypracování této diplomové práce a během celého studia.

Obsah

| | |
|--|----|
| Zadání | |
| Abstrakt | |
| Bibliografická citace | |
| Čestné prohlášení | |
| Poděkování | |
| Obsah | |
| ÚVOD | 9 |
| 1 ROZBOR ZADÁNÍ | 10 |
| 2 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ | 11 |
| 2.1 Režimy laserového svařování | 12 |
| 2.1.1 Key hole efekt | 13 |
| 2.2 Konstrukce laseru | 14 |
| 2.2.1 Aktivní prostředí | 14 |
| 2.2.2 Rezonátor | 14 |
| 2.2.3 Optická soustava | 15 |
| 2.3 Lasery používané v průmyslu | 17 |
| 2.3.1 Nd:YAG Laser | 18 |
| 2.3.2 CO ₂ Laser | 19 |
| 2.3.3 Vláknový laser | 19 |
| 2.4 Možnosti rozmítání paprsku | 20 |
| 2.5 Vznik heterogenního svarového spoje | 22 |
| 2.6 Nejčastější vady při laserovém svařování | 24 |
| 2.7 Svařitelnost | 25 |
| 2.7.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí | 27 |
| 2.7.2 Svařitelnost feritických korozivzdorných ocelí | 27 |
| 2.8 Zkoušky svarových spojů | 28 |
| 2.8.1 Tahová zkouška | 29 |
| 2.8.2 Metalografická zkouška | 31 |
| 2.8.3 Zkoušky tvrdosti | 32 |
| 2.8.4 Zkoušky korozní odolnosti | 33 |
| 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 36 |
| 3.1 Použitá zařízení | 36 |
| 3.2 Materiál | 37 |
| 3.3 Volba procesních parametrů | 40 |
| 3.4 Příprava vzorků | 41 |
| 3.5 Metalografická zkouška | 44 |
| 3.6 Zkouška tvrdosti dle Vickerse | 49 |
| 3.7 Tahová zkouška | 52 |
| 3.8 Zkouška korozní odolnosti | 55 |
| 4 ZÁVĚRY | 58 |
| Seznam použitých zdrojů | |
| Seznam použitých symbolů a zkratk | |
| Seznam obrázků | |
| Seznam tabulek | |
| Seznam příloh | |

ÚVOD [2; 3; 4; 5; 6; 7]

Svařování umožňuje vytvořit pevná a nerozebíratelná spojení strojních součástí, které mohou společně tvořit i větší konstrukce. Technologie svařování je hojně využívána ve většině průmyslových odvětví, kde mezi nejvíce využívané metody patří svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách, odporové svařování, svařování ruční obalenou elektrodou aj. V dnešní době, kdy je kladen důraz na co největší produkci, malé tepelné ovlivnění konstrukce a svařování materiálů se speciálními fyzikálními vlastnostmi, které jsou běžnými metodami obtížně svařitelné, se využívají technologie koncentrovaných zdrojů energie, jako jsou laserové a plasmové technologie, nebo elektronový paprsek.

Účelem této práce je vytvoření základního přehledu o technologii laserového svařování (Obr. 1), zejména o technice svařování s rozmítáním svazku (tzv. wobbling). Následně bude provedena analýza vlivu jednotlivých parametrů na svarové spoje vytvořené pomocí základních způsobů rozmítání skenovací hlavou z hlediska makro a mikrostruktury, a z hlediska mechanických vlastností se zaměřením na vzniklé vady. Svařeny budou dva druhy ocelí, které mají odlišné vlastnosti, jedná se o spojení uhlíkové oceli a feritické korozivzdorné oceli.



Obr. 1 Technologie laserového svařování [8; 9; 10; 11]

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Vzhledem k dobré svařitelnosti zadaných materiálů je plechy možné svařit širokou škálou metod, od odporového svařování, až po nekonvenční metody, jako je svařování výbuchem či difuzí. To znamená, že v první řadě je potřeba vyselektovat správnou metodu. Téměř určitě lze vyřadit metody, které nejsou úplně běžné. Těmi jsou svařování difuzí z hlediska časové a energetické náročnosti a svařování výbuchem, kde je potřeba speciální oblast a vysoce kvalifikovaná obsluha. I když se bude jednat o výzkum vlivu svařovacích parametrů na materiál v podobě plechu, je možné vyřadit odporové svařování, důvodem je tvar svaru, jedná se totiž o tupý svar o délce 60 mm. Zůstávají už jen metody tavného svařování. Při svařování ruční obalenou elektrodou dochází k velkým nepřesnostem a nesouvislosti svarového kovu vlivem ručního vedení. Aby byl zajištěn souvislý svar, pokud možno bez přerušení je tedy nutné robotické, nebo jinak řízené vedení zajišťující konstantní směr a rychlost svařování. To lze zajistit u metod jako je svařování pod tavidlem, obloukové svařování v ochranných atmosférách, svařování elektronovým paprskem, plasmou nebo laserem. Svařování pod tavidlem je výhodné z hlediska minimálního zásahu člověka do procesu svařování, ale také se vyznačuje velkým vneseným teplem a je zde riziko zanesení vodíku do svarového kovu vlivem navlhlého tavidla. Oblouk vzniká mezi svařovacím drátem a základním materiálem. Pro snížení nákladů na svařování je možné materiály svařit i bez přídavného materiálu, tím vyřadíme metody obloukového svařování tavící se elektrodou (v aktivním plynu – MAG, i v inertním plynu MIG). Metoda, kde se využívá netavicí se elektrody (TIG) je sice vhodná, ale vyznačuje se vysokou hodnotou vneseného tepla, a tudíž může dojít k velkému tepelnému ovlivnění, zhrubnutí zrna a k plastické deformaci základního materiálu. Z důvodu vysoké ceny, energetické náročnosti a vzniku toxických zplodin lze vyloučit také plasmu. Proti elektronovému paprsku hovoří vysoká cena, nutnost vakuové komory a vznik RTG záření. Zbývá tedy svařování laserem, které je rychlé, přesné a relativně levné, pokud není nutné kupovat nové zařízení. To samotné ovšem zahrnuje další možnosti, kde je potřeba se rozhodnout mezi jednotlivými režimy. Kondukční režim je vhodný pro nízké návary, nebo pro svařování s přídavným materiálem. K důkladnému provaření je vhodný penetrační režim, kde je využit tzv. key-hole efekt. U laseru je možné také využít rozmítání svazku tzv. wobbling, kde je ovšem nutné nastavení více procesních parametrů než u konvenčního způsobu.

Správné nastavení procesních parametrů má zásadní vliv na výsledné spojený svařovaných materiálů. Zvláště pokud se jedná o ojedinělou kombinaci, která není v běžné praxi často používaná. Proto je velice důležité provedení laboratorních experimentů pro ověření svařitelnosti daných materiálů před jejich následným využitím v průmyslové praxi. Optimální nastavení parametrů rozmítání svazku (frekvence, amplituda) a nastavení svařovacích parametrů (posuv, výkon laseru) je potřeba experimentálně ověřit, protože doporučené hodnoty často neodpovídají skutečnosti, nebo je nelze předem určit. Svaření proběhne na vysoce výkonném vláknovém laseru YLS-2000 v laboratoři na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd ČR. Bude proveden rozbor vlivu jednotlivých způsobů rozmítání svazku na 6ti vzorcích. Vzorky tvoří plechy z uhlíkové oceli DC01 a z korozi vzdorné feritické oceli X6Cr17 o tloušťce 3 mm na nichž bude vytvořen tupý svar o délce 60 mm. Z jednotlivých vzorků se vyrobí zkušební tyčinky pro zkoušku tahem a také vzorky pro metalografickou zkoušku. Vyhodnocena bude mikro a makrostruktura s cílem zjištění vad vzniklých při svaření.

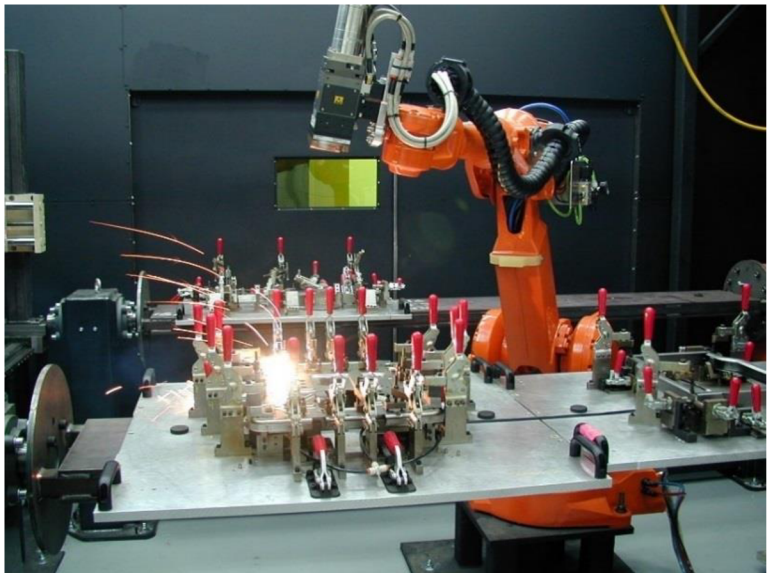
Výsledkem této práce bude zjištění vlivu procesních parametrů na vlastnosti heterogenního svaru uhlíkové a korozi vzdorné feritické oceli. A také ověření využitelnosti materiálu v praxi s ohledem na mechanické vlastnosti svaru. Předpokládá se budoucí využití v energetickém případně potravinářském průmyslu s ohledem na snížení nákladů na dané zařízení, kde není potřeba korozi vzdornost v celém svařenci a je možné část sestavy nahradit levnější uhlíkovou ocelí.

2 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ [2; 3; 6; 12; 13]

Základem laserového svařování je koherentní monochromatické záření zaostřené do jednoho bodu (ohniska). Takto zaostřený paprsek je jeden ze zdrojů s nejvyšší plošnou hustotou energie v dnešním průmyslu. Laserové svařování se řadí mezi nejmodernější metody tavného svařování koncentrovanými zdroji energie a je vhodné ho využít ke svařování dílů a konstrukcí, u nichž je kladen důraz na vysokou přesnost a kvalitu svaru, bez trhlin, pórů a nečistot, při vysoké svařovací rychlosti a malému tepelnému ovlivnění základního materiálu. Tím lze vytvořit svary tenkostěnných i tlustostěnných o vysoké jakosti. Technologie svařování laserem je vhodná především pro svařování konstrukčních ocelí, nerezových ocelí, hliníku, mědi, titanu a jejich slitin. Vzhledem k nízkým hodnotám vneseného tepla je rychlost ochlazování poměrně vysoká a z tohoto důvodu nesmí obsah uhlíku u nelegovaných a nízkolegovaných ocelí překročit hodnotu 0,2 hm.%. Pokud by byl obsah uhlíku vyšší než 0,2 hm.%, došlo by ke vzniku velkých pnutí a vzniku trhlin. Naopak výborné výsledky vykazuje svařování laserem u vysokolegovaných ocelí, niklu, molybdenu nebo třeba wolframu. Velmi rychlý ohřev umožňuje svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí (např. měď, stříbro, hliník) a materiálů s vysokou teplotou tání (např. wolfram, zirkon, titan). Mezi pokrokovou a průmyslově důležitou metodou je svařování plastů pomocí laseru. Využívají se lasery pracující v infračerveném spektru a pomocí absorpčních aditiv používaných při výrobě plastů lze spojovat i transparentní a neprůhledné plastové materiály.

Vznik svaru je založen na složitých fyzikálně-metalurgických procesech na základě interakce laserového paprsku se základním povrchem. Ohřev materiálu probíhá v bodě dopadu laserového paprsku, kde se mění energie monochromatického koherentního záření na tepelnou. Vzniklá tepelná energie způsobí ohřev materiálu na několik tisíc °C, při řezání se blíží k bodu varu daného kovu. Lokální ohřev vlivem energie dopadajícího světla je větší než odvod tepla z místa dopadu sáláním nebo vedením. Tím dochází k natavení materiálu a vzniku svarové lázně. Proces ohřevu, natavení a spojení obou součástí probíhá velmi rychle (v řádu desetin sekundy), tím je zaručeno velmi malé tepelné ovlivnění základního materiálu. V důsledku vysoké svařovací rychlosti dochází ke vzniku deformačních napětí, které vedou k deformaci svařovaných součástí, především z tenkých plechů. Tato napětí mohou také způsobit vznik středové trhliny při tuhnutí a vysokému smrštění svarového kovu.

Mezi největší výhody se řadí vysoká svařovací rychlost, která je omezena pouze maximální možnou rychlostí svařovacího zařízení, nejčastěji robotu (Obr. 2). Dále také malé vnesené teplo, velmi úzká tepelně ovlivněná oblast, vysoká rychlost ochlazování, snadná programovatelnost a produktivnost. Nevýhodou naopak je vyšší pořizovací cena zařízení, větší nároky na čistotu prostředí a citlivost optické soustavy.

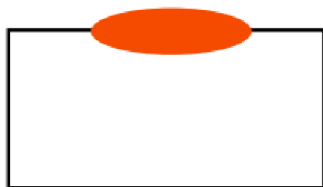


Obr. 2 Robotizované svařovací pracoviště [14]

2.1 Režimy laserového svařování [2; 3; 6; 11; 15; 16; 17]

Regulací výkonu laseru, průměru fokusovaného paprsku a vzdálenosti ohniska lze dosáhnout dvou režimů svařování. Kondukčního a penetračního pomocí key hole efektu. Správné nastavení daného svařovacího režimu má vliv na tvar a vlastnosti spoje, proto je nutné předem promyslet k jakému účelu bude konstrukce sloužit a podle toho zvolit svařovací režim. Volba probíhá na základě vlastností, především tloušťky a druhu, svařovaného materiálu s ohledem na množství vneseného tepla. S tím souvisí velikost tepelného ovlivnění okolí svaru.

- Kondukční režim svařování: - Používá se pro svařování s nízkým závarem (Obr. 3), nebo pro navařování s přídavným materiálem. Hloubka svaru se pohybuje v rozmezí 0,1 – 2 mm a hustota svařovacího výkonu je menší než $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Do základního materiálu se teplo šíří pouze vedením (kondukcí). Schopnost základního materiálu vést teplo omezuje maximální hloubku svaru. Z toho vyplývá, že čím menší je tepelná vodivost materiálu, tím menší bude také hloubka svaru. Avšak, pokud nedojde k dostatečně rychlému odvodu tepla z místa dopadu laserového paprsku, stoupne teplota lázně

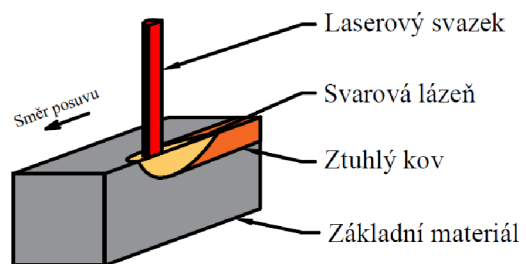


kondukční

Obr. 3 Průvar kondukčního režimu [17]

nad odpařovací teplotu. Vznikne kovová pára, která zapříčiní skokové zvýšení hloubky svaru a proces svařování se změní na penetrační režim.

Kondukční režim (Obr. 4) se používá především pro svařování tenkostěnných součástí z plechů, v elektrotechnice, a všude tam, kde je dbáno na estetický vzhled svaru. Pro kondukční režim se využívá především pevnolátkových laserů s impulsním nebo spojitým provozem.



Obr. 4 Kondukční režim svařování [18]

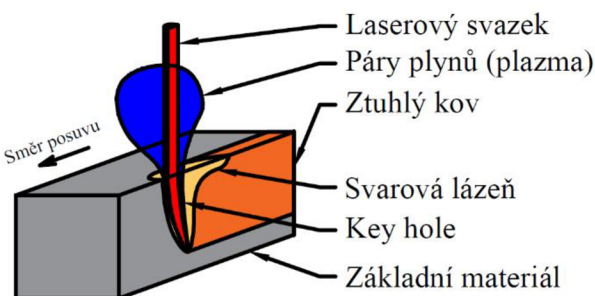
- Penetrační režim svařování: - Při penetračním režimu dochází k ohřevu základního materiálu až na teplotu odpařování. Vlivem vysokého svařovacího výkonu, dosahujícího hodnoty až $1 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$, vzniká kapilára. Zde dochází k intenzivnímu ohřevu roztaveného kovu a k jeho odpařování. Důsledkem dynamického účinku par je vznik tzv. key hole efektu. Při pohybu laserového paprsku se pohybuje i dutina, kterou obtéká roztavený kov a vlivem povrchového napětí se opět spojí a tuhne (Obr. 6). Tím vzniká svar, který se vyznačuje velkou štíhlostí, kdy je hloubka svaru až desetkrát větší než jeho šířka.



penetrační

Obr. 5 Průvar penetračního režimu [17]

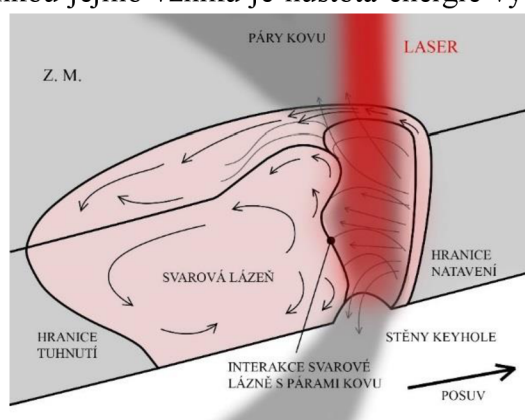
Laserový paprsek je téměř pohlcen taveninou, čímž roste účinnost svařovacího procesu. Při použití plynového CO₂ laseru dochází k absorpci světla párou odpařeného kovu a tím vzniká ionizovaný plyn (plasma). Toto plasma přináší do procesu další teplo a tím přispívá ke zvýšení účinnosti. Při vysoké rychlosti svařování jde o velmi produktivní proces výroby svarů s malou tepelně ovlivněnou oblastí a nepatrnou deformací. Penetrační režim se používá především pro řezání a svařování plechů do tloušťky 25 mm.



Obr. 6 Penetrační režim svařování [18]

2.1.1 Key hole efekt [3; 6; 12; 16; 19]

Kapilára vzniklá dynamickým účinkem par odpařovaného kovu, který je zapříčiněn intenzivním ohřevem, se nazývá key hole. Podmínkou jejího vzniku je hustota energie vyšší než $1 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Kapilára šavlovitého tvaru je vyplněna směsí par a ionizovaného plynu a umožňuje přímé šíření tepla do hloubky materiálu. Nedojde tak k velkému tepelnému ovlivnění základního materiálu, jako tomu je u běžných metod tavného obloukového svařování. Vzniklém key hole je umožněno dosažení velkého průvaru při vysokých svařovacích rychlostech. Velikost průvaru ovlivňuje vzniklé plasma z ionizovaných par odpařeného kovu. Toto plasma zvyšuje množství tepla v key hole, ale zabraňuje průchodu paprsku laseru hlouběji do materiálu. Při požadavku na vysoký závar se využívá ochranného plynu, nejčastěji helia, který má nízký ionizační potenciál. Vzhledem k vysoké ceně čistého helia se používají levnější směsi, zejména pak směs helia a argonu v poměru 60 % He / 40 % Ar. Vliv vzniklého plazmatu lze ovlivnit vhodným nastavením parametrů tak, aby došlo nejprve k prohřátí podpovrchové vrstvy na teplotu tavení a až poté k ohřevu povrchové vrstvy na teplotu odpařování.



Obr. 7 Metalurgické procesy v key hole [20]

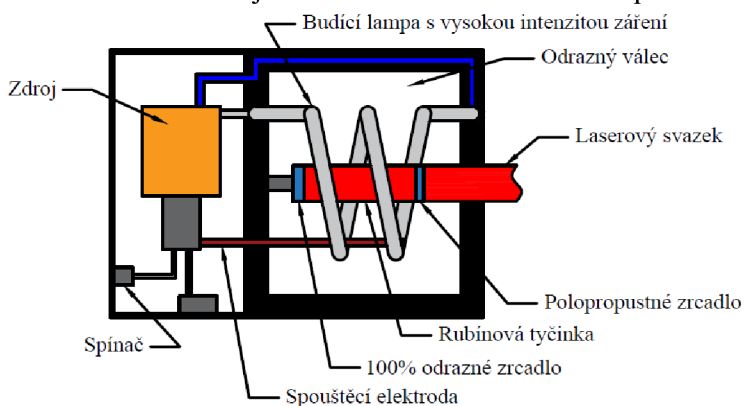
Stěny a okolí key hole (Obr. 7) jsou tvořeny taveninou základního materiálu, která obtéká plynovou dutinu a poté se vlivem povrchového napětí opět spojí. Tím dojde k uzavření dutiny za pohybujícím se paprskem. Tavenina velmi rychle chladne, začíná krystalizovat a vzniká svar.

Tab.1 Srovnání metod svařování z hlediska koncentrace energie:

| Zdroj energie | Nejmenší plocha ohřevu [cm ²] | Nejvyšší koncentrace energie [W · cm ⁻²] |
|-------------------------------|---|--|
| Kyslíkoacetylenový plamen | $1 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^3$ |
| Kyslíkovodíkový plamen | $1 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^3$ |
| Elektrický oblouk (elektroda) | $1 \cdot 10^{-3}$ | $1 \cdot 10^4$ |
| Elektrický oblouk (MIG, WIG) | $1 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^5$ |
| Plazmový paprsek | $1 \cdot 10^{-6}$ | $1 \cdot 10^7$ |
| Elektronový paprsek | $1 \cdot 10^{-7}$ | $1 \cdot 10^8$ |
| Laserový paprsek | $1 \cdot 10^{-8}$ až $1 \cdot 10^{-11}$ | $1 \cdot 10^9$ až $5 \cdot 10^{13}$ |

2.2 Konstrukce laseru [2; 6; 21; 22; 23; 24]

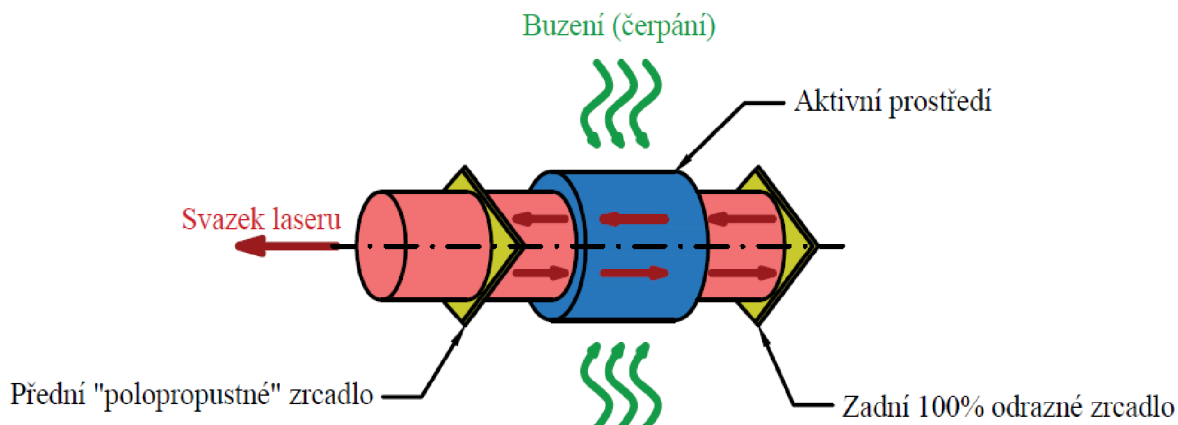
Jak už bylo řečeno, základem laserového svařování je koherentní monochromatické záření. Jedná se o stimulovanou emisi světla, při které je nutné, aby co nejvíce atomů zůstalo ve vybuzeném stavu dostatečně dlouhou dobu. K tomuto jevu dochází v tzv. aktivním prostředí. Z aktivního prostředí se vylučují fotony. Ty je nutné udržet pohromadě, aby mohlo být dosaženo co nejvyšší hodnoty energie. K tomu slouží optický rezonátor se dvěma zrcadly, z nichž jedno je nepropustné a druhé polopropustné. Rezonátor společně s aktivním prostředím určují vlnovou délku výsledného záření, které ze soustavy vychází směrem k fokusačním čočkám.



Obr. 8 Zdroj laserového paprsku [24]

2.2.1 Aktivní prostředí [25; 26]

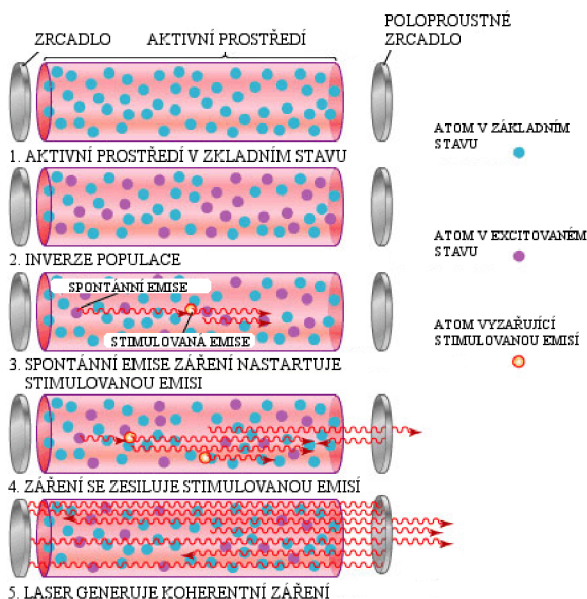
V tomto prostředí (Obr. 9) dochází k přechodu atomu či molekuly z vyššího energetického stavu do nižšího. Dochází k vybuzení atomů, tím k vyzáření fotonů. Teprve až vyzážené fotony lze přeměnit na laserový svazek pomocí procesu, který se nazývá stimulovaná emise. Stimulovanou emisí se rozumí lavinový efekt, kdy fotony naráží do vybuzených atomů. Tento atom se snaží opět přejít do nižšího energetického stavu tím, že vyzáří další foton. Současně s tímto jevem se vyzážené fotony pohybují mezi zrcadly rezonátoru a sráží se s dalšími atomy. Aktivní prostředí je tvořeno rezonátorem, který je ohraničen nepropustným zrcadlem na jedné straně a polopropustným zrcadlem na straně druhé. Pro vybuzení atomů se nejčastěji využívají budící lampy tvořené laserovými diodami.



Obr. 9 Aktivní prostředí [26]

2.2.2 Rezonátor [26; 27]

Jedná se o optickou součást generátoru laserového paprsku, která uzavírá aktivní prostředí. Skládá se ze dvou zrcadel, nepropustného a polopropustného. Nepropustných zrcadel může být případně i více a mohou být rovinná nebo zakřivená. Jako nepropustné zrcadlo je možné použít buď dielektrické zrcadlo nebo destička s vysoce leštěným povrchem z kovu, především zlata či mědi (pro větší vlnové délky).



Obr. 10 Proces buzení atomů v rezonátoru [26]

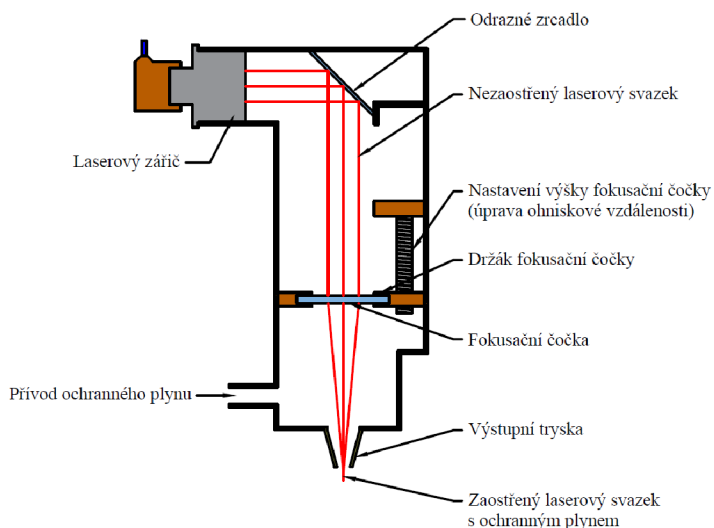
Zrcadla by měla být kolmá na směr pohybu fotonů. To nelze zaručit u všech fotonů, a proto se některé, v závislosti na úhlu dopadu, několikrát odrazí a poté odchází pryč a jsou ztrátové. Naopak fotony jejichž úhel dopadu je kolmý k zrcadlům rezonátoru se odrazí do té doby, dokud nedojde k vybuzení dostatečného množství energie. Poté projdou polopropustným zrcadlem a stává se z nich koherentní laserový svazek s minimální rozbíhavostí. Na obr. 10 je popsán proces vybuzení atomů v aktivním prostředí mezi zrcadly, která tvoří rezonátor.

2.2.3 Optická soustava [7; 28; 29]

Uspořádání a typ elementů, které tvoří optickou soustavu, se liší podle konstrukce hlavy laseru. Ty se dělí dle použití na svařovací, řezací a skenovací. Každá z těchto soustav má své využití.

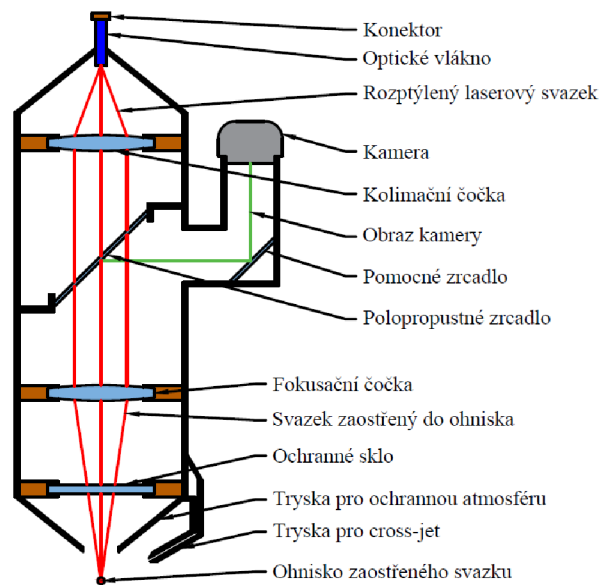
Rozdělení svařovacích hlav:

- Řezací hlava (Obr. 11) je pohyblivá, to umožňuje přesné vedení svazku při dodržení konstantní vzdálenosti ohniska od řezaného materiálu. Tím se eliminuje změna tvaru způsobená zkroucením řezaného materiálu vlivem tepelného ovlivnění. Laser se přivádí pomocí optického vlákna do řezací hlavy, kde je pomocí kolimačních čoček zaostřován do ohniska o velmi malém průměru (okolo 0,12 mm). Rychlosti řezání dosahují hodnoty až 100 mm/s. Využití nachází hlavně v automobilním, leteckém a vesmírném průmyslu pro řezání plechů o tloušťce 1 až 6 mm. S rostoucí tloušťkou plechu klesá kvalita řezné plochy. Lze realizovat jak tavné, tak oxidační nebo sublimační řezání.



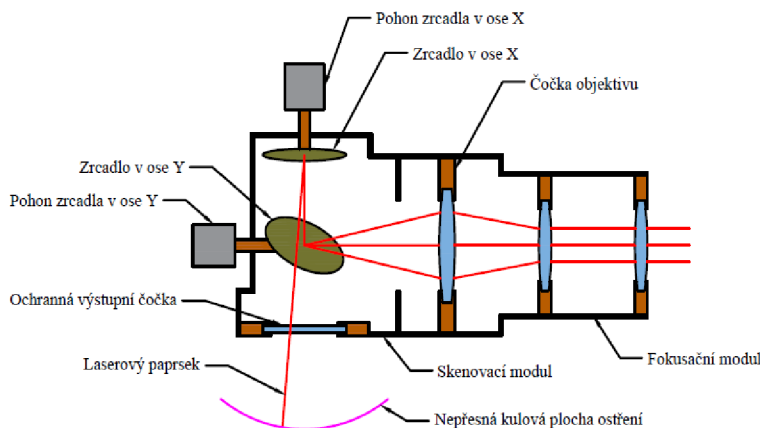
Obr. 11 Řezací laserová hlava [30]

- Svařovací hlava (Obr. 12) bývá nejčastěji modulární konstrukce. To umožňuje variabilní nastavení optické soustavy. Svazek fotonů je přiveden pomocí optického vlákna. Dochází k rozptylu a je tedy nutné usměrnit paprsek pomocí kolimační čočky, která vytvoří široký rovnoběžný paprsek, který se díky fokusační čočce zaostří do ohniska. Ohnisko má při svařování větší průměr než u řezání, okolo 0,4 mm. Ke svařovací hlavě lze připojit moduly pro přívod ochranné atmosféry, přídavného materiálu, nebo kamerové zařízení pro záznam průběhu svařovacího procesu. To umožňuje sledování chování tavné lázně přímo v průběhu procesu.



Obr. 12 Svařovací laserová hlava [31]

- Skenovací hlava (Obr. 13) nachází své využití při vysokorychlostním svařování, které je značně limitováno rychlostí pohybu robota. Optickou soustavu tvoří dvě počítačem řízená vychylovací zrcadla, která jsou schopna velmi rychle vychylovat laserový paprsek v rámci určité plochy, která je dána jejich plochou a plochou výstupní širokoúhlé čočky. Je o plochu stovek až tisíců mm². Vysoké rychlosti vychylování umožňují výrazné zvýšení dynamiky celého svařovacího procesu a tím i výrazné zkrácení svařovacích časů.



Obr. 13 Skenovací svařovací hlava [32]

Vzhledem k vysokým nárokům na ochranu vychylovacích zrcadel proti prachu a poškození není konstrukce modulární a přívod ochranné atmosféry případně přídavného materiálu musí být zajištěn zvláštními vývody v upínacím systému. Ochranná atmosféra není nutná, protože svařovací proces je natolik rychlý, že nedochází k výrazné oxidaci roztaveného kovu. Nevýhodou svařovací hlavy je její hmotnost, která má za následek vyšší setrvačné síly při vyšších rychlostech svařování. Proto je maximální posuvová rychlost menší než u klasické svařovací hlavy. Využívá se pro žíhání, povrchové kalení nebo také pro svařování s rozmítáním svazku. Rozmítání svazku skenovací hlavou je velice výhodné z pohledu rychlosti vychylování zrcadel, která mají velký rozsah a umožňují vychylování o vysoké frekvenci. Což přispívá ke zvýšení celkové dynamiky svařovacího procesu. Na druhou stranu dochází ke změně ohniskové vzdálenosti, což umožňuje vznik odlesků, které mají negativní vliv na celistvost svaru a také na míru provaření materiálů. Poloha ohniska se pohybuje po kulové ploše. Tento problém lze částečně kompenzovat pohybem robota.

- Svařovací hlava pro rozmítání svazku (Obr. 14) se na rozdíl od skenovací vyznačuje větší kompaktností, avšak rozsah vychylovacího pohybu je menší. Zařízení má integrovanou skenovací optiku, která umožňuje pohyb laserového paprsku ve dvou osách a tím vytvářet sekundární pohyb při svařovacím procesu, který tvaruje výsledný svar. Ve srovnání se skenovací hlavou nedochází k tak velké nepřesnosti polohy ohniska vlivem vychýlení svazku z polohy kolmé k obrobku. To má za následek snížení strukturních problémů týkajících se zpětných odrazů při svařování obtížně svařitelných materiálů, jakými jsou například slitiny hliníku nebo mědi. S kompaktností se snižuje rozsah vychýlení svazku, je tedy nutné zajistit vedení pomocí robotu, což má za následek jakési omezení rychlosti svařovacího procesu. I přesto se jedná o nejpreciznější a nejrychlejší možnost svařování s rozmítáním svazku. Hlavu je možné osadit zařízením pro sledování polohy svazku, to nám umožňuje zvýšení produktivity skrze automatické nastavení pozice svaru, tak aby odpovídalo různým polohám spojů s přesností do 10 μm . Využívá vysokorychlostní kameru s LED stroboskopickým osvětlením pro zachycení obrazu rychle se pohybujících součástí, tím napomáhá ke zvýšení stability procesu. Hlavu pro rozmítání svazku lze kromě svařování využít také k vrtání děr, které nejsou kolmé k povrchu základního materiálu, viz obrázek číslo 15.



Obr. 14 Svařovací hlava pro rozmítání svazku [33]

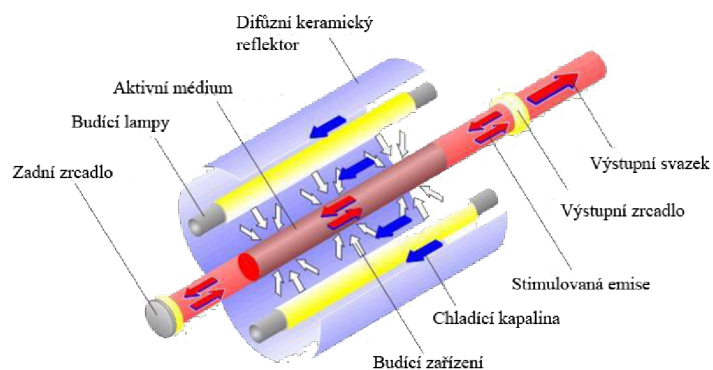


Obr. 15 Laserové vrtání [33]

2.3 Lasery používané v průmyslu [2; 6; 19; 34; 35; 36]

V dnešní době, kdy je průmysl 3.0 v plném proudu a stále více se projevuje nástup průmyslu 4.0. Tedy co největší snaha o automatizaci, digitalizaci a maximální využití kyberneticko-fyzikálních systémů v průmyslové výrobě. Mají lasery široké spektrum využití, právě díky jejich snadné automatizaci a možnosti robotického vedení. Využití nacházejí při svařování, řezání, vrtání, gravírování, žíhání, povrchovému kalení, nebo pro mikroobrábění. Díky množství laserových technologií je lze využít při zpracování kovových i nekovových materiálů.

Významným objevem poslední doby je tzv. vláknový laser, které jsou nyní ve velkém množství nasazovány do průmyslových aplikací. I když je nelze využít ve všech odvětvích, lze předpokládat



Obr. 16 Konstrukce laserového zdroje [34]

jejich velký rozmach do budoucna. Další oblastí, kde je možné očekávat vývoj v budoucnu jsou lasery pracující v X-ray spektru, tedy lasery využívající rentgenové záření. Výzkum probíhá také na poli optické soustavy, kdy je snaha o využití povahy laserového svazku jako elektromagnetického záření, proto je možné jej vychylovat pomocí elektromagnetického pole. Tato technologie nalezne využití při značení materiálu a výrobě štítků bez použití skenovací hlavy.

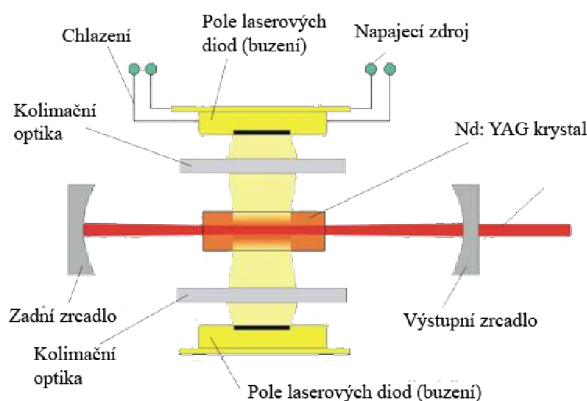
2.3.1 Nd:YAG Laser [19; 37; 38]

Jde o nejstarší typ průmyslově používaného pevnolátkového laseru. Jako aktivní prostředí je použit izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu, který je obohacený o ionty neodymu. S obsahem iontů neodymu souvisí také výsledná barva monokrystalu. Ta bývá nejčastěji od světle růžové až po fialovou. Tyto lasery jsou buzené buď kryptonovými nebo xenonovými výbojkami (LPSS – lamp pumped solid state), anebo laserovými diodami (DPSS – diode pumped solid state). V dnešní době se ustupuje od buzení výbojkami z důvodu nízké účinnosti přeměny elektrické energie na světelnou. Při této přeměně se velká část energie přemění na tepelnou a tím dochází ke značným ztrátám. Oba typy Nd:YAG laserů je nutné intenzivně chladit vodou.

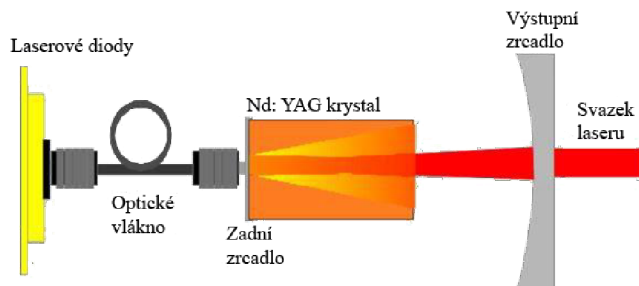
LPSS lasery se používají zejména pro laserové svařování při požadovaném hlubokém závaru a velmi malé tepelně ovlivněné oblasti. Také pro vrtání ušlechtilých ocelí a slitin v leteckém průmyslu. Velkou nevýhodou je nízká účinnost, vysoké nároky na chlazení vodou, krátká životnost výbojek (1000 h) a vysoké provozní náklady.

U DPSS laserů se rozlišují dva typy buzení podle uspořádání rezonátoru, boční (transversální) a zadní (end-pumped). V případě zadního buzení je světlo pomocí optického vlákna vedeno z laserových diod do rezonátoru. Z tohoto důvodu jsou často zaměňovány za vláknové lasery. V případě zadního buzení dosahuje laser lepší kvality paprsku, ale nižšího výkonu. Kdežto u bočního buzení lze dosáhnout vyššího výkonu, ale horší kvality výstupního svazku. DPSS lasery jsou nejčastěji používány v tzv. Q-switch pulzním režimu, kdy laser vytváří malé světelné pulzy o výkonu do 100 W, které trvají v řádech nanosekund. Na rozdíl od LPSS laserů vyniká vyšší účinností, delší životností a menšími nároky na chlazení.

Pevnolátkové lasery se ve strojírenství objevují v řadě aplikací jako je svařování, vrtání, řezání, žihání a gravírování. Gravírují se především anorganické látky jako jsou různé druhy kovů a plastů. Mezi další obory, ve kterých našly Nd:YAG lasery uplatnění patří medicína, biologie, věda a vojenské aplikace. V medicíně je využíván především v oftalmologii pro odstranění druhotného šedého zákalu.



Obr. 17 Laser s bočním buzením [34]



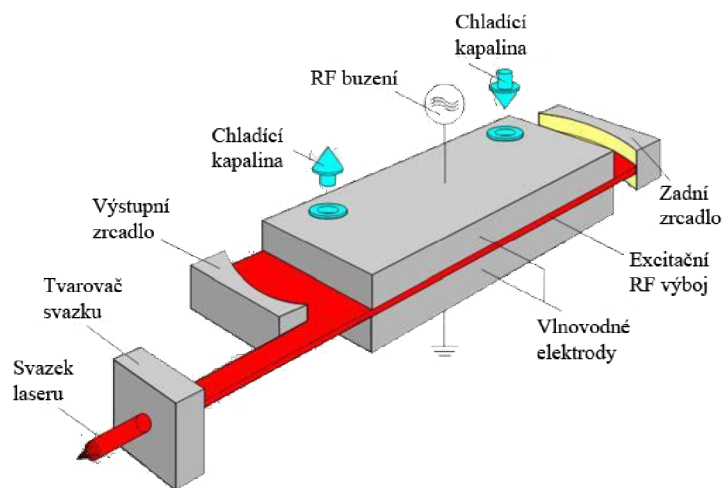
Obr. 18 Laser se zadním buzením [34]

2.3.2 CO₂ Laser [19; 27; 35; 37]

Hlavním představitelem skupiny plynových laserů je CO₂ laser (Obr. 19). U těchto laserů je aktivním prostředím trubice naplněná směsí plynů. Díky stejnorodému aktivnímu prostředí mají tyto lasery výborné parametry, avšak jeho výkon je malý. K vybuzení svazku se využívá účinků elektrického výboje nebo radiofrekvenční buzení. Plynové CO₂ lasery lze rozdělit podle uzavřenosti rezonátoru. Plyn může rezonátorem neustále proudit (pro výkony okolo 10 kW), ve druhém případě je rezonátor hermeticky uzavřený.

Nejběžnější laser do výkonu 5 kW je difúzně chlazený radio-frekvenčně buzený laser. Dochází k buzení pomocí radio-frekvenčního vlnění mezi dvěma elektrodami. Tato zařízení vyniká vysokou spolehlivostí, životností a nízkými náklady.

Hlavní oblastí využití CO₂ laseru je gravírování a řezání nekovových materiálů, zejména plastů, plexiskla, dřeva, kůže, skla apod. U těchto aplikací se používají zařízení do výkonu 1,5 kW. V případě svařování kovů výkon dosahuje až 20 kW. Na rozdíl od pevnolátkových laserů nelze vést laserový svazek pomocí optického vlákna a je nutné využít soustavu naklápěcích zrcadel což je jeho největší nevýhodou. Je potřeba složitější dráhy svazku a také pravidelná kalibrace spojená s vysokými nároky na čistotu prostředí.

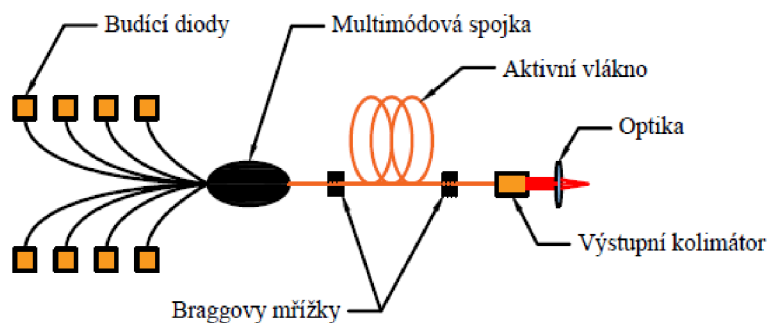


Obr. 19 Konstrukce zdroje CO₂ laseru [22]

2.3.3 Vláknový laser [39; 40]

Vláknové lasery (Fiber glass laser), viz obr. 20, jsou nejnovější a nejmodernějším typem pevnolátkových laserů v dnešním průmyslu. Základem je aktivní prostředí v podobě dlouhého optického vlákna obohaceného ytterbiem nebo erbiem. Toto vlákno je složeno ze dvou vrstev a plní funkci aktivního prostředí i rezonátoru. Záření je generováno v jádru optického vlákna při ozařování vlákna světlem z laserových diod. Budící diody ozařují vnější obalovou vrstvu skrze optickou spojku a světelný tok působí na jádro obsahující aktivní prvek. Vlnová délka budícího záření je jiná než

u výsledného laserového svazku, který vznikne v aktivním jádru optického vlákna. Pro plnění funkce rezonátoru a zvyšování výkonu slouží tzv. Braggovy mřížky. Jde o struktury vytvořené přímo na optickém vlákne, které vznikly periodickými změnami indexu lomu v jádru optického vlákna. Dochází k interakci procházejícího světla s mřížkou a světlo se odráží zpět. Tím roste koncentrace energie ve vláknu, ze kterého vychází laserový svazek skrze optický kolimátor.



Obr. 20 Konstrukční schéma vláknového laseru [40]

Největší výhodou vláknového laseru je jednoduchost a absence mechanických prvků pro odraz světla, které by vytvářely tepelné ztráty nebo byly náchylné na mechanické poškození. Zařízení je modulární, robustní a odolné do míry odolnosti jeho optického vlákna, které svou plochou velmi dobře odvádí teplo. Není tedy nutné aktivní vodní chlazení. Místo toho postačí jednoduché chlazení vzduchem v podobě malého ventilátoru. Vyznačuje se vysokou životností (více než 150 000 h), vysokou účinností 30-35 % a velmi kvalitním paprskem.

Dělí se na kontinuální a pulzní. Kontinuální jsou vhodné pro řezání. Pulsní se používají pro jemné svařování úzkých a dlouhých svarů, kde je potřeba velká hustota výkonu při vysoké rychlosti.

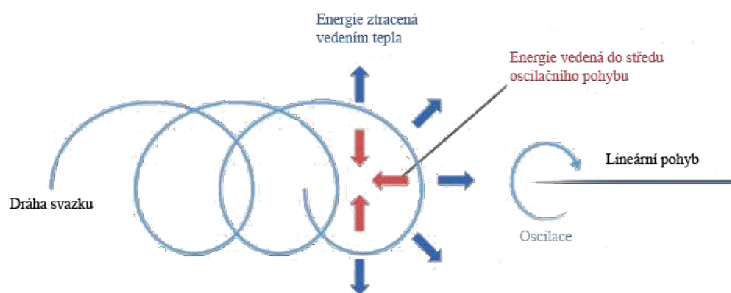
Tab.2 Srovnání laserových zařízení:

| Název | Vlnová délka [nm] | Buzení | Účinnost [%] | Výkon [W] | Životnost [h] | Použití v průmyslu |
|-----------------|-------------------|---------------------|--------------|-----------|---------------|--|
| Nd:YAG | 1 064 | diodami | 7 | až 6 000 | 10 000 | řezání, svařování |
| | | lampami | 3 | 600 | 1000 | svařování, kalení |
| CO ₂ | 10 600 | radio-frekvenční | 10 | 10-250 | 20 000 | gravírování, řezání nekovových materiálů |
| | | elektrickým výbojem | 25 | až 20 000 | neomezená | řezání, svařování |
| Vláknový | 1 070 | diodami | 30 | až 80 000 | 100 000 | řezání, svařování |
| | | | | 100 | | gravírování, mikroobrábění |
| Diskový | 1 070 | diodami | 15 | až 16 000 | 10 000 | řezání, svařování |
| Diodový | 808-980 | elektrickým výbojem | 60 | až 10 000 | 15000 | svařování, kalení |

2.4 Možnosti rozmítání paprsku [7; 41; 42]

Základem laserového svařování s rozmítáním, které se nazývá wobbling, je oscilační pohyb laserového paprsku. Samotný svařovací proces je složen ze dvou pohybů (vektorů), primárního a sekundárního. Primární pohyb (vektor) tvoří dráha laseru určená svarovou mezerou, nebo požadovaným tvarem svaru na dané součásti. Sekundární pohyb potom tvoří vlastní oscilace laserového svazku, který dopadá do svarové lázně. Tento pohyb je oproti primárnímu výrazně menší a nemění trajektorii svaru. Jeho význam spočívá v pravidelné oscilaci okolo primárního pohybu. To nám umožňuje uměle navýšit šířku svaru, nebo postupně natavovat svařované materiály a tím ovlivňovat složení svarového kovu. Lze tak docílit vytvoření vhodnější mikrostruktury a lepších vlastností výsledného svaru než při klasickém laserovém svařování. Schéma pohybových vektorů, viz obr. 21.

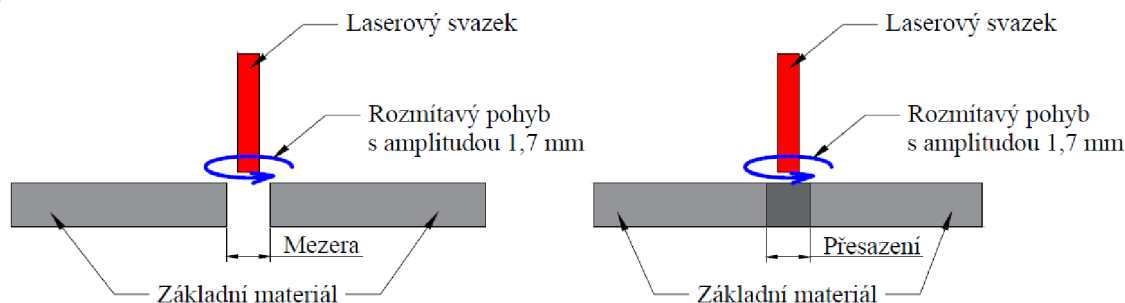
Pro vytvoření oscilačního pohybu se využívá skenovací hlavy, nebo speciálně vytvořené hlavy pro svařování s rozmítáním paprsku. Této oscilace se docílí pohybem zrcadel, případně rotací hranolu, která navádí laserový paprsek do ohniska. Hlava určená speciálně pro wobbling je kompaktnější než klasická skenovací hlava, z důvodu velmi malého rozsahu pohybu vychylovacích zrcadel. Oscilační pohyb bývá nejčastěji lineární nebo křivočarý (kruhový, eliptický, ve tvaru číslice 8).



Obr. 21 Schéma pohybových vektorů při rozmítání svazku [43]

Rozmítání je ovlivněno tvarem obrazce oscilačního pohybu, rychlostí pohybu a rozmítací frekvencí. Vysoké kmitočtové hodnoty vedou k vyčištění laserového paprsku během jeho kmitání, což vede k opětovnému částečnému natavení svarového kovu a tím ke vzniku souvislého lemu podél osy primárního pohybu. Naopak vysoká rychlost svařování vede k malému opětovnému natavení a vzniká nesouvislý svar. Dochází také ke změnám tvaru tepelně ovlivněné oblasti a rozložení deformačního napětí vlivem tepla.

Hlavní výhodou laserového svařování s rozmítáním svazku je možnost dynamické změny geometrie svaru v průběhu svařování, odpadá čas potřebný na přenastavení svařovacích parametrů při zastavení stroje. Mezi další výhody patří dobrá reprodukovatelnost spoje, snížení počtu vad ve svaru, do jisté míry také regulace chemického složení svarového kovu postupným natavováním základních materiálů a nižší nároky na kvalitu svarové mezery než u klasického laserového svařování. To souvisí s variabilitou nastavení svařovacích parametrů, která nám umožňuje rozšířit toleranční pole procesních parametrů, při zachování kvality spoje, viz tabulka číslo 3. Na druhou stranu nevýhodou může být složitější optimalizace svařovacího procesu.

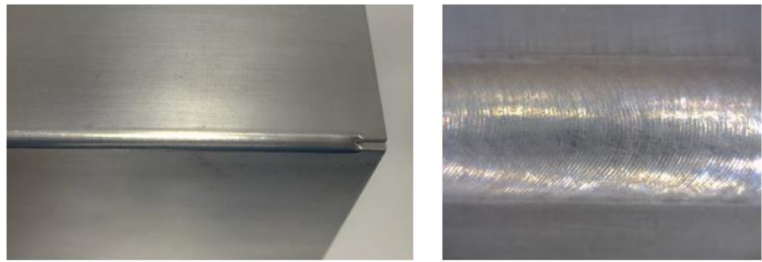


Obr. 22 Vliv tvaru svarové mezery [33]

Tab.3 Porovnání způsobů laserového svařování: [33]

| Způsob svařování | Šířka mezery mezi svařovanými materiály [μm] | | | | | | | | | | | |
|------------------|---|-------|--------|------------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|--------|-----|-----|
| | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | |
| Konvenční | Green | Green | Yellow | Yellow | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | |
| S rozmítáním | Green | Green | Green | Green | Green | Green | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Red | |
| | Šířka přesazení svařovaných materiálů [μm] | | | | | | | | | | | |
| | 0 | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | |
| Konvenční | Green | Green | Green | Green | Yellow | Red | Red | Red | Red | Red | Red | |
| S rozmítáním | Green | Green | Green | Green | Green | Green | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Red | |
| Svařitelnost | dobrá | | Green | dostatečná | | Yellow | nesvařitelné / nesvařuje se | | | | | Red |

Přednosti této techniky vyniknou především u vláknových laserů, které jsou charakteristické vyšší kvalitou a možností zaostření laserového paprsku. Mezi hlavní oblasti využití této metody patří svařování mědi a slitin hliníku, kde dochází k rapidnímu snížení vad ve svarovém kovu. Lze jej také použít pro zhotovení vnějších koutových svarů u plechových součástí, kde jsou kladeny vysoké požadavky na estetické vlastnosti. Vlivem rozmítání dojde k natavení hran obou součástí, tím se odstraní ostré přechody a vzniká celistvá zaoblená hrana, viz obr 23.



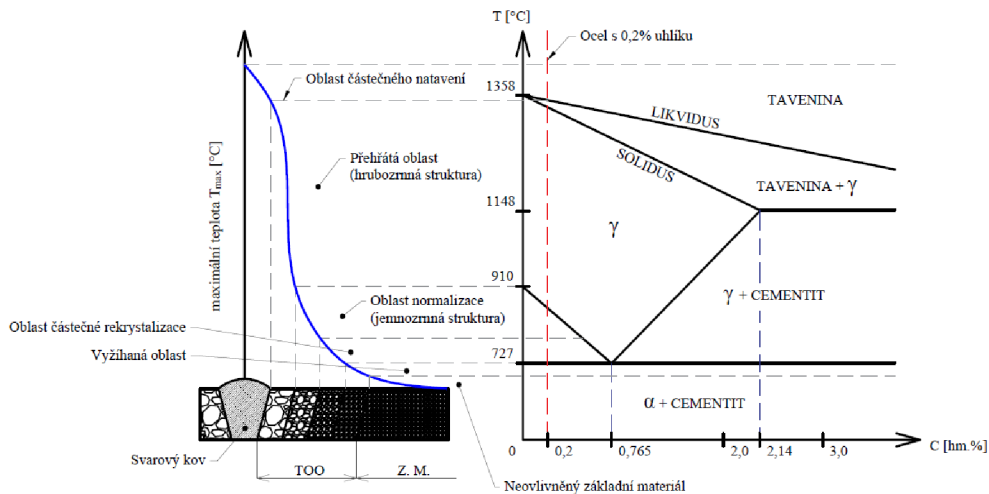
Obr. 23 Vzhled vnějšího koutového svaru [33]

Tab.4 Základní způsoby rozmítání svazku:

| Způsob rozmítání | Schéma | Vzhled svaru |
|------------------------------|--------|--------------|
| Kruhové | | |
| Lineární | | |
| Ve tvaru číslice 8 | | |
| Ve tvaru znaku pro nekonečno | | |

2.5 Vznik heterogenního svarového spoje [43; 44; 45; 46]

Vlivem působícího tepla dochází k místnímu natavení základního materiálu, případně i přídavného materiálu, a tím ke vzniku svarového kovu. V tavenině je intenzivní turbulentní proudění, které je příčinou promísení všech natavených složek. U klasického laserového svařování je natavován pouze základní materiál. Současně s pohybem zdroje tepla dochází k ochlazování taveniny, svarový kov začíná tuhnout. Orientace a velikost rostoucích zrn závisí na směru gradientu teploty. Čím větší je gradient teploty, tím je zrno jemnější. V blízkém okolí svaru se nachází teplem ovlivněná oblast, ve které se postupně mění mechanické vlastnosti. Oblast se dělí na 5 pásem dle obr. 24. Vyskytuje se u všech metod a materiálů, její šířka a velikost jednotlivých pásem je závislá na vlastnostech svařovaného materiálu a použité technologii.



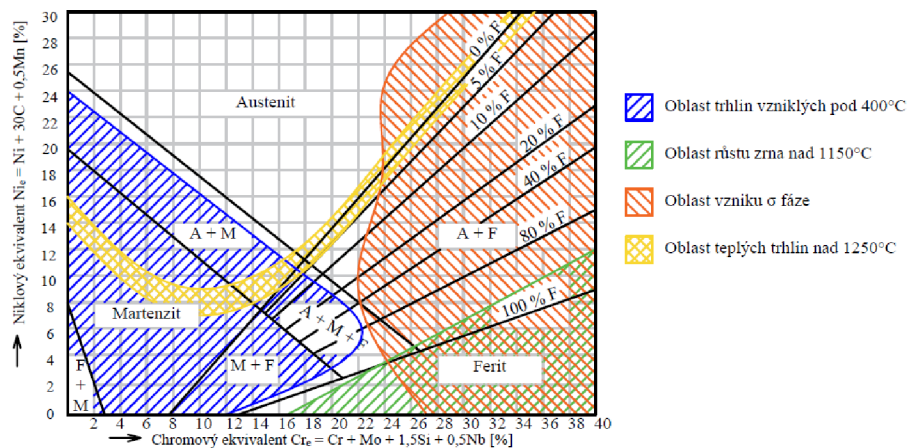
Obr. 24 Pásma tepelně ovlivněné oblasti [46]

Heterogenní spoje vznikají spojením dvou materiálů různého chemického složení, mikrostruktury a mechanických vlastností. Vzhledem k těmto odlišnostem dochází k degradaci vlastností základního materiálu v přechodu ze základního materiálu so svarového kovu. Vzniká tzv. fúzní zóna, která má odlišné chemické složení. Tím dochází k degradaci mechanických a chemických vlastností, snižuje se korozní odolnost a dochází k celkovému snížení spolehlivosti a bezpečnosti svařované konstrukce. Spojení těchto dvou materiálů vyžaduje větší pozornost než homogenní svařky, tj. svařky materiálů stejného složení a stejných vlastností.

Situace, při kterých vzniká heterogenní spoj:

- Svařování materiálů s podstatným rozdílem chemického složení, za podmínky, že svarový kov je odlišný od alespoň jednoho ze základních materiálů.
- Navařování nelegovaných, nebo nízkolegovaných ocelí s použitím přídavného materiálu, který má vyšší provozní odolnost. Výsledkem má být zvýšení pevnosti nebo korozní odolnosti.
- Svařování stejných materiálů za použití odlišného přídavného materiálu. Přídavný materiál bývá nejčastěji austenitický, nebo nízkouhlíkový legovaný niklem. Používá se především u obtížně svařitelných materiálů.

V závislosti na technologických podmínkách procesu svařování dochází k promísení základních materiálů a tím ke vzniku nového kovu s odlišnou strukturou než oba základní materiály. K odhadu výsledných strukturních změn v závislosti na chemickém složení základních materiálů lze vycházet ze Schaefflerova diagramu (Obr. 25). Pomocí tohoto diagramu lze předpovědět i možné degradační vlivy způsobené zředěním základního materiálu.

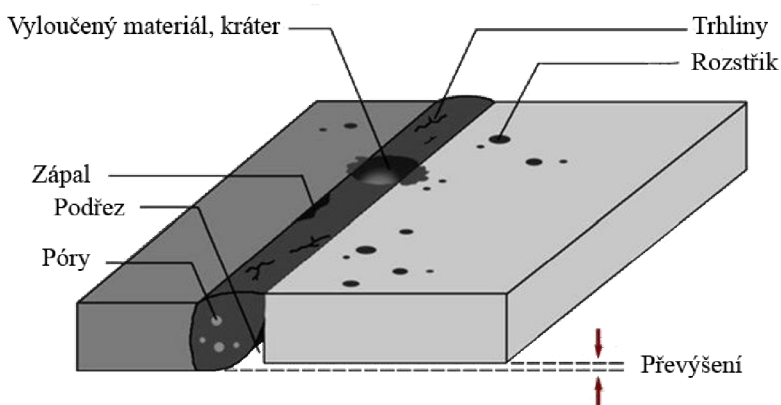


Obr. 25 Schaefflerův diagram [44]

Největší riziko z pohledu bezpečnosti a provozní odolnosti svařence při tepelném, případně tepelně-mechanickém zatížení, představuje stabilita svarového rozhraní. Zvláště u ocelí s vysokým rozdílem obsahu uhlíku a legujících prvků. Dochází k přerozdělení obsahu uhlíku a tím pádem ke vzniku oduhličených nebo nauhličených pásem. Tím začnou vznikat nehomogenní oblasti v původně homogenní struktuře přechodového pásma svařovaných materiálů. Rozložení obsahu uhlíku ve svarovém spoji přímo souvisí se změnami tvrdosti v nauhličených a oduhličených pásmech. Kromě difuze uhlíku probíhá také difuze dalších legujících prvků, především chromu a niklu. Difuze těchto prvků je však o několik řádů menší než difuze uhlíku, a proto lze považovat změny rozložení těchto prvků za zanedbatelné.

2.6 Nejčastější vady při laserovém svařování [2; 3; 6; 43; 45; 47; 48]

Hodnocení vad, je jedním z nejdůležitějších parametrů celistvosti svarového spoje, tj. aby byl svar dokonale celistvý, nesmí obsahovat žádné vady. V praxi se využívá koncepce „vhodnosti pro daný účel“, kde jsou některé vady přípustné, avšak nesmí ohrozit životnost společně s bezpečností konstrukce v daném provozu. Vady jsou považovány za koncentrátory napětí a mají výrazný nepříznivý vliv na vlastnosti svařence, zvláště pak na mez únavy, nebo mohou být příčinou vzniku křehkého lomu. Znázornění nejběžnějších vad, viz obr. 26. Na kvalitu svaru vyrobeného pomocí laseru má vliv mnoho aspektů. Nejdůležitější je vhodné nastavení svařovacího výkonu a rychlosti. Nemalý význam dále má nastavení použité optiky ve svařovací hlavě (nastavení ohniskové vzdálenosti), množství a druh inertního plynu, kvalita přenosu laserového paprsku atd.

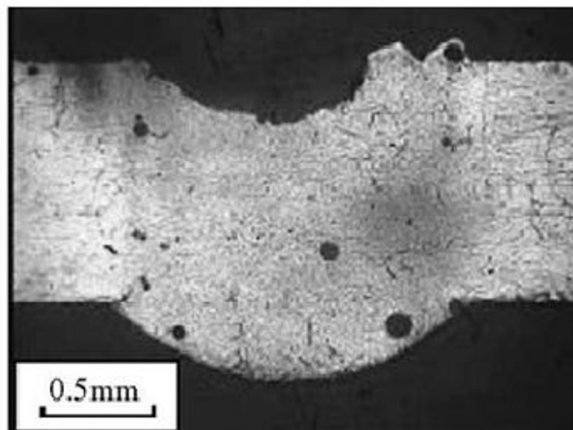


Obr. 26 Znázornění svarových vad [49]

Tab.5 Základní rozdělení vad:

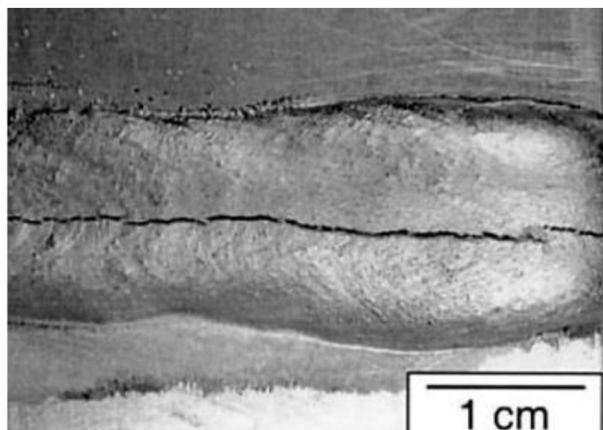
| Základní rozdělení vad ve svaru | | |
|---------------------------------|------------|---|
| Dle polohy | Povrchové | Trhliny, póry, zápaly, studené spoje, neprovařený kořen |
| | Vnitřní | Dutiny, staženiny, vměstky |
| Dle tvaru | Bodové | Malé sférické vměstky, mikropóry |
| | Plošné | Trhliny, mikrotrhliny, studené spoje |
| | Prostorové | Vměstky, staženiny, plynové dutiny |

Nejčastější vady u svařenců vytvořených pomocí laserového svařování je pomezita (plynové dutiny atd.) a horké trhliny. Pomezita (Obr. 27) svaru vzniká vlivem plynů, které nestihly odejít z roztavené svarové lázně a zůstaly v ní uvězněny. U laserového svařování bývá nejčastěji způsobena znečištěným povrchem svarového kovu. Další příčinou bývá často nestabilita key hole, kdy dochází k jejímu zhroucení během částečné penetrace u vysokovýkonných laserů. K pomezitě může dojít v důsledku příliš vysokého nebo příliš nízkého průtoku ochranného plynu. Pomezita představuje problém zvláště při svařování hliníku, kde k ní dochází vlivem vodíku, který se do svarového kovu může dostat ze vzdušné vlhkosti nebo při nedostatečném očištění svařovaných ploch.



Obr. 27 Pomezita svaru [50]

Další vadou, která je podstatně horší než pomezita, je vznik podélné trhliny v ose svaru při tuhnutí svarové lázně (Obr. 28). Největší vliv na vznik podélné trhliny má chemické složení základního materiálu, hlavně tedy fosfor a síra. Volnou síru lze omezit pomocí manganu, a tím lze omezit vznik těchto trhlín.



Obr. 28 Podélná trhlina [51]

Při svařování tlustostěnných ocelových součástí může být příčinou příliš vysoká štíhlost svaru (poměr šířky ku hloubce svaru) což způsobuje vysoké napětí při tuhnutí v ose svaru, kde vlivem stažení vzniká trhlina. Při úplné penetraci je pravděpodobnost vzniku trhlín menší než při částečném provaření. Náchylnost na vznik těchto trhlín lze snížit pomocí chemického složení (legování manganem), snížením svařovací rychlosti a hloubkou průniku laseru.

2.7 Svařitelnost [3; 4; 5; 52; 53; 54; 55; 56; 57; 58]

Svařitelnost je komplexní technologická charakteristika materiálů vyjadřující jejich vhodnost pro vytvoření svarového spoje, přičemž musí být dodržena předepsaná kvalita spoje za daných podmínek. Rozlišujeme svařitelnost tavnou a tlakovou. Závisí zejména na materiálových vlastnostech základního polotovaru, na podmínkách technologie svařování a na vlastním konstrukčním řešení svařované konstrukce.

Rozdělení svařitelnosti dle ČSN 05 1310:

- Zaručená svařitelnost – stupeň 1a, výrobce zaručuje svařitelnost za teplot až do 0°C bez zvláštních opatření.
- Podmínečně zaručená svařitelnost – stupeň 1b, výrobce zaručuje svařitelnost při dodržení určitých podmínek předepsaných výrobcem v normách jakosti. Záruka svařitelnosti platí pouze pro spoje vytvořené při dodržení těchto podmínek.
- Dobrá svařitelnost – stupeň 2, výrobce sice nezaručuje svařitelnost, ale ve většině případů vznikají vyhovující svarové spoje.
- Obtížná svařitelnost – stupeň 3, výrobce nezaručuje vyhovující jakost svarových spojů ani při dodržení zvláštních podmínek. Tyto oceli se nedoporučuje svařovat.

Se svařitelností souvisí také charakteristika vyjadřující vhodnost materiálu ke svařování. Ta zahrnuje změnu vlastností materiálů v důsledku svařování. Vliv na vhodnost materiálu ke svařování má dle ČSN 05 1309 zejména chemické složení, způsob výroby polotovaru a tepelné zpracování. Svařitelnost závisí především na tloušťce materiálu a chemickém složení, kde největší vliv má obsah uhlíku. Hlavním ukazatelem vlivu chemického složení a s tím související vhodnosti oceli ke svařování je tzv. uhlíkový ekvivalent. Ten lze vypočítat několika postupy:

- a) Dle ČSN EN 1011 pro materiály s obsahy prvků pod mezními hranicemi $C = 0,22$ hm. %, $Mn = 1,6$ hm. %, $Cr = 1$ hm. %, $Cu = 0,3$ hm. %, $Ni = 3$ hm. %, $V = 0,14$ hm. %. Aby byl materiál svařitelný bez předehřevu je nutné, aby výsledná hodnota uhlíkového ekvivalentu byla pod hranicí $C_e < 0,5$ hm. %.

$$C_E = C + \frac{M_n}{6} + \frac{C_r}{5} + \frac{N_i}{15} + \frac{M_o}{4} + \frac{C_u}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot t \text{ [hm. \%]} \quad (2.1)$$

kde t je tloušťka svařovaného materiálu [mm]

- b) Uhlíkový ekvivalent CET, který se používá pro nízkolegované vysokopevnostní oceli. V dnešní době se jedná o nejčastěji používaný výpočet u materiálů, jejichž mezní hodnoty legujících prvků jsou pod hranicí $C = 0,05 - 0,25$ hm. %, $Si < 0,8$ hm. %, $Mn = 0,5 - 1,9$ hm. %, $Cr < 1,5$ hm. %, $Cu < 0,7$ hm. %, $Ni < 2,5$ hm. %, $Mo < 0,75$ hm. %, $V < 0,18$ hm. %, $Ti < 0,12$ hm. %, $B < 0,005$ hm. %, $Nb < 0,06$ hm. %.

$$CET = C + \frac{M_n + M_o}{10} + \frac{C_r + C_u}{20} + \frac{N_i}{40} \text{ [hm. \%]} \quad (2.2)$$

- c) Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu feritických ocelí je vhodný vzorec dle ČSN EN 1011-2 článek č.2, pro nelegované, jemnozrnné a nízkolegované oceli (dle mezinárodního institutu svařování IIW). Mezními hodnotami hmotnostních procent legujících prvků jsou: $C = 0,05 - 0,25$ hm. %, $Si < 0,8$ hm. %, $Mn < 1,7$ hm. %, $Cr < 0,9$ hm. %, $Cu < 1$ hm. %, $Ni < 2,5$ hm. %, $Mo < 0,75$ hm. %, $V < 0,2$ hm. %

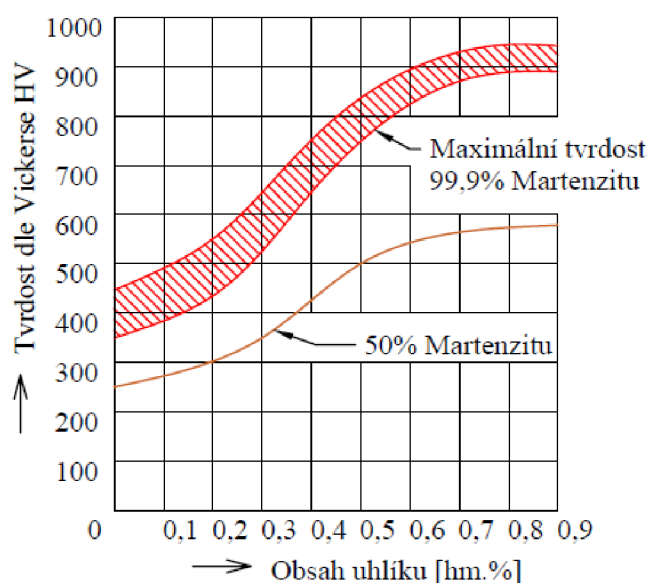
$$C_E(\text{IIW}) = C + \frac{M_n}{6} + \frac{C_r + M_o + V}{5} + \frac{N_i + C_u}{15} \text{ [hm. \%]} \quad (2.3)$$

Tab.6 Srovnání svařitelností rozdílných materiálů pomocí laseru: [6]

| Svařitelnost odlišných materiálů pomocí laseru | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|-----|-----|
| | W | Ta | Mo | Cr | Co | Ti | Be | Fe | Pt | Ni | Pd | Cu | Au | Ag | Mg | Al | Zn | Cd | Pb |
| Ta | Green | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mo | Green | Green | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cr | Green | Red | Green | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Co | Yellow | Red | Yellow | Blue | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ti | Yellow | Green | Green | Blue | Yellow | | | | | | | | | | | | | | |
| Be | Red | Red | Red | Red | Yellow | Red | | | | | | | | | | | | | |
| Fe | Yellow | Yellow | Blue | Green | Green | Yellow | Yellow | | | | | | | | | | | | |
| Pt | Blue | Yellow | Blue | Blue | Green | Yellow | Red | Blue | | | | | | | | | | | |
| Ni | Yellow | Blue | Yellow | Blue | Green | Yellow | Yellow | Blue | Green | | | | | | | | | | |
| Pd | Yellow | Blue | Blue | Blue | Green | Yellow | Yellow | Blue | Green | Green | | | | | | | | | |
| Cu | Red | Red | Red | Red | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Green | Green | Green | | | | | | | | |
| Au | - | - | Red | Yellow | Red | Yellow | Yellow | Yellow | Green | Green | Green | Green | | | | | | | |
| Ag | Red | Red | Red | Red | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Red | Red | Green | Yellow | Green | | | | | | |
| Mg | Red | - | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Yellow | Yellow | Yellow | | | | | |
| Al | Red | Red | Red | Red | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Red | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | | | | |
| Zn | Red | - | Red | Red | Yellow | Red | Red | Yellow | Red | Yellow | Yellow | Blue | Yellow | Blue | Red | Yellow | | | |
| Cd | - | - | - | Red | Red | Red | Red | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Red | Yellow | Blue | Green | Red | Red | Red | |
| Pb | Red | - | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red |
| Sn | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Yellow | Yellow | Yellow | Red | Yellow | Yellow | Red | Red | Red | Red | Red |

2.7.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí [1; 45; 54; 59]

Jde o oceli zařazené do tříd 10, 11 a 12 dle ČSN 42 0002. Podle aktuální normy ČSN EN 10027-1 jsou zařazeny ke skupině s číslem 1, tedy označeny podle způsobu použití, mechanických a fyzikálních vlastností symboly S, P, L atd. Svařitelnost uhlíkových ocelí nejvíce ovlivňuje chemické složení a výrobci obvykle garantuje pouze obsah základních prvků jako jsou uhlík, mangan, křemík, fosfor a síra. Přičemž největší vliv má obsah uhlíku. Rostoucí obsah uhlíku sice pozitivně ovlivňuje mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost, ale má negativní vliv na plastické vlastnosti. To má za následek vznik trhlin především v tepelně ovlivněné oblasti. Ze závislosti velikosti tvrdosti dle Vickerse na obsahu uhlíku na obr. 29 byla stanovena hodnota maximální přípustné tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti na 350 HV, což odpovídá 50 % obsahu martenzitu ve struktuře při 0,25 hm.% obsahu uhlíku v oceli. Pro zajištění svařitelnosti je obsah uhlíku omezován pod hranici 0,25 hm.%, kdy ještě není nutný předehřev. Čistě feritické uhlíkové oceli zůstávají feritickými i po svaření, avšak v důsledku absence fázových přeměn při ohřevu či ochlazování jsou náchylné k nadměrnému zhrubnutí zrna při vysokých teplotách. Pokud se obsah uhlíku dostane přes 0,25 hm. % je nutné provést určitá opatření proti nadměrnému nárůstu tvrdosti. Toho lze docílit předehřevem, čímž se sníží rychlost ochlazování a tím se omezí vznik tvrdé martenzitické fáze. Pokud není z nějakých důvodů možné zahrnout předehřev, tak lze zpomalit ochlazování velkým tepelným příkonem. Kromě nárůstu tvrdosti se u uhlíkových ocelí objevují další vady vzniklé natavením segregovaných oblastí. To především zapříčiňuje vznik pórů, trhlin a celkové zkřehnutí svarového spoje.



Obr. 29 Závislost tvrdosti HV na obsahu uhlíku [45]

2.7.2 Svařitelnost feritických korozivzdorných ocelí [60; 61; 62; 63; 64; 65]

Je nutné posuzovat svařitelnost ze dvou hledisek. Z pohledu svařitelnosti klasických feritických ocelí s obsahem uhlíku 0,08 hm.% a z pohledu feritických ocelí s velmi nízkým obsahem intersticiálních prvků jakými jsou především uhlík a dusík. Součet jejich obsahů v materiálu by měl být menší nebo roven 0,04 hm.%. V případě klasických feritických ocelí může v tepelně ovlivněné oblasti vzniknout martenzitická struktura, zatímco základní materiál zůstává feritický. Při ohřevu dochází k vyloučení uhlíku z karbidu železa Fe_3C , vzniká austenit, který se vlivem vysoké rychlosti ochlazování přemění na martenzit, který se vyznačuje vysokou tvrdostí. Při klasickém svařování se využívá předehřev, aby se zpomalila doba ochlazování a tím došlo k omezení vzniku martenzitu. V pásmu přehřátí, nad 900 °C, dochází k zvýšenému hrubnutí zrn, které výrazně přispívá k náchylnosti vzniku trhlin. V rozmezí teplot 450 až 525 °C probíhají precipitační procesy, které mohou být příčinou tzv. zkřehnutí 475. Toto zkřehnutí se u malých tlouštěk neprojevuje z důvodu velmi krátké doby setrvání na kritické teplotě. V rozmezí teplot od 500 do 800 °C může ve svarovém spoji u ocelí s obsahem chromu nad 22 hm.% vznikat tzv. σ -fáze, ta samotná obsahuje cca 45 % chromu. Jde o křehkou intermetalickou sloučeninu železa a chromu způsobující pokles tažnosti a houževnatosti. Přispívá také ke snížení korozní odolnosti a společně s obsahem chromu způsobuje zvýšení

náchylnosti ke vzniku mezikrystalické koroze. Klasifikací faktorů svařitelnosti korozivzdorných feritických ocelí se zabývá norma ČSN EN 1011-3, která bere v úvahu především faktory podmínek svařování jako je návrh spoje, vodíkem indukované praskání, houževnatost a tvrdost tepelně ovlivněné oblasti, krystalizační praskání, lamelární praskání a korozi.

2.8 Zkoušky svarových spojů [45; 66; 67]

Vzhledem k rozšíření technologie svařování pro spojování konstrukčních dílů, je potřeba dodržet zvýšené požadavky na kvalitu, bezpečnost a životnost konstrukce. S tím souvisí kvalita návrhu, výroba, a především kontrola kvality z hlediska vad. V praxi neexistuje materiál vyrobený běžnými způsoby bez toho, aby neobsahoval nějakou vadu vzniklou buď při výrobě polotovaru, nebo při následném zpracování. Pro posouzení vlivu těchto vad a jejich přípustnosti pro daný účel je zapotřebí důsledná kontrola všech svarových oblastí. Lze předpokládat, že svar bude nejslabším článkem sestavy, ale není to vždy pravidlem.

Pro kontrolu svarových spojů se využívá celá řada zkoušek, které lze rozdělit na destruktivní (DT – Destructive testing) a nedestruktivní (NDT – Non-destructive testing). Vždy je potřeba se předem rozhodnout, kterou z metod využijeme. Nedestruktivní zkoušky jsou z pravidla nákladnější z důvodu drahého zařízení a větších nároků na kvalifikaci obsluhy. Nedochází u nich k porušení celistvosti a funkčnosti konstrukce. Jsou založeny na principech měřitelných fyzikálních jevů, které vznikají v okolí vady v materiálu. Na druhou stranu destruktivní zkoušky jsou levnější, rychlejší, avšak nemusí odhalit veškeré vady vzniklé v materiálu. To jim ovšem neubírá na důležitosti, zvláště u metalografických a mechanických zkoušek, které jsou důležité pro stanovení mezních pevnostních limitů konstrukce. Dochází při nich k nevratnému porušení konstrukce za účelem získání materiálových vzorků. Tyto vzorky jsou dále zkoumány v laboratorních podmínkách pro určení či ověření jejich mechanických vlastností.

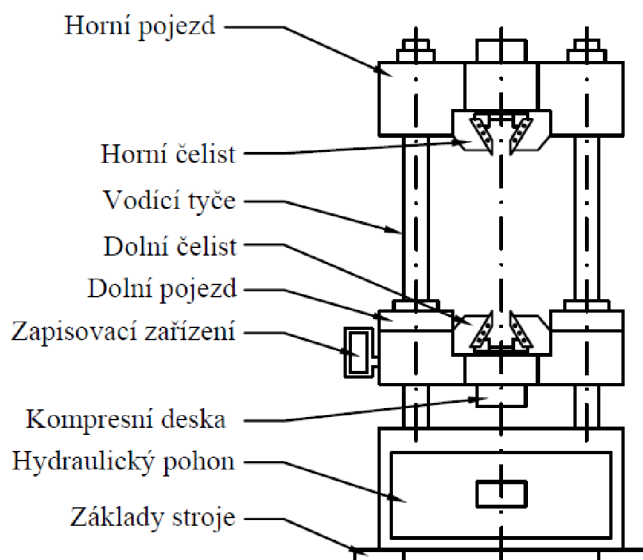
Tab.7 Rozdělení materiálových zkoušek:

| Rozdělení | Název metody | Označení | Použití |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|---|
| Nedestruktivní (NDT) metody | Vizuální metoda | VT | Detekce povrchových vad |
| | Kapilární metoda | PT | Detekce otevřených vad na povrchu |
| | Magnetická prášková metoda | MT | Detekce povrchových a některých vad pod povrchem |
| | Metoda vířivých proudů | ET | Detekce povrchových vad |
| | Radiografická metoda | RT | Detekce vnitřních vad |
| | Ultrazvuková metoda | UT | |
| Destruktivní (DT) metody | Tahová zkouška | | Zjištění meze pevnosti, meze kluzu, tažnosti, kontrakce |
| | Zkoušky tvrdosti | Brinell | Zjištění tvrdosti |
| | | Rockwell | |
| | | Vickers | |
| | Metalografické zkoušky | | Zjištění vnitřní struktury |
| | Zkouška rázem v ohybu | | Zjištění nárazové práce a vrubové houževnatosti |
| | Zkouška ohybem | | Zjištění pevnosti v ohybu |
| Zkouška korozní odolnosti | | Zjištění korozní odolnosti | |

2.8.1 Tahová zkouška [45; 66; 67; 68; 69]

Pro zjištění základních mechanických vlastností slouží zkouška tahem. Pomocí naměřených dat jsou dále určovány základní pevnostní a plastické charakteristiky používané pro hodnocení kvality materiálu, pro pevnostní výpočty konstrukcí, nebo k obecnému určení vhodnosti materiálu pro danou aplikaci. Provádí se téměř u všech technických materiálů.

Průběh zkoušky, společně s výpočty jednotlivých charakteristik a všemi náležitostmi, je dán normou ČSN EN ISO 6892-1. Zkouška je založena na plynulé deformaci zkušební tyče vlivem tahové síly, obvykle do jejího přetržení. Na základě změny průřezu zkušební tyče se výpočtem stanoví mechanické vlastnosti dle vzorců uvedených v normě. Důležité je také zahrnout vliv okolního prostředí, zkouška probíhá za pokojové teploty v rozmezí 10 °C až 35 °C (v arbitrážních případech při teplotě 23 ± 5 °C), při dané konstantní rychlosti zatěžování předem specifikovaných vzorků. U nich by měla existovat přímá závislost mezi počáteční délkou L_0 a průřezem S_0 . Zkušební těleso je upevněné do čelistí trhačického zařízení (Obr. 30), čelisti se od sebe konstantní rychlostí oddalují, tím vznikne ideální stav jednoosé napjatosti.



Obr. 30 Trhačický lis [70]

V průběhu zkoušky se vykresluje tzv. tahový diagram (Obr. 31), který znázorňuje závislost tahové síly na poměrném prodloužení zkušební tyče. Pomocí tohoto diagramu lze následným výpočtem podle vztahů uvedených ve výše zmíněné normě určit základní materiálové charakteristiky:

- Poměrné prodloužení ε

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} [-], \quad (2.4)$$

kde: ΔL – prodloužení zkušební tyče [mm],
 L_0 – původní délka zkušební tyče [mm].

- Youngův modul pružnosti v tahu E v lineární oblasti tahového diagramu z Hookova zákona

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [\text{GPa}], \quad (2.5)$$

kde: σ – působící napětí v lineární oblasti [MPa].

- Mez pevnosti R_m , odpovídá maximálnímu zatížení, po kterém dojde ke vzniku krčku a následnému přetržení zkušební tyče.

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} [\text{MPa}], \quad (2.6)$$

kde: F_{\max} – maximální síla působící na mezi pevnosti [N],
 S_0 – původní průřez zkušební tyče [mm²].

2.8.2 Metalografická zkouška [45; 66; 72]

Metalografická zkouška se provádí za účelem pozorování mikrostruktury materiálu a pro odhalení vad, jako jsou trhliny nebo póry, neprovaření kořene atd. Zkouška je poměrně náročná, a proto se provádí pouze u vybraných materiálů nebo výrobků, kde se předpokládá vznik nežádoucích struktur. Náročnost spočívá v nutnosti speciální měřicí techniky, s tím spojených zvýšených nároků na kvalifikaci a zkušenost obsluhy.

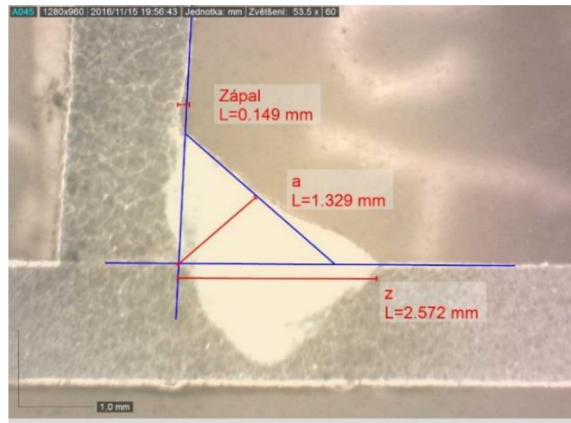
Postup vyhodnocení je určen normami ČSN EN ISO 6520-1, ČSN EN ISO 5817, ČSN EN ISO 17639 a ČSN EN ISO 15614-1. Uvedené normy tvoří základ pro hodnocení makrostruktury svarových spojů. Určují, z jakých oblastí mají být zkušební vzorky (Obr. 32) odebrány, postup přípravy (broušení a leptání), podle čeho, jakým způsobem a za jakých podmínek má být zkouška vyhodnocena. Hodnocení mikrostruktury je bráno jako doplňující a zároveň slouží k získání přehledu o strukturních změnách vzniklých důsledkem svařování. Vzorek by měl být odebrán vždy kolmo na osu svaru, tím získáme přehled o struktuře svarového kovu a přechodu tepelně ovlivněné oblasti do základního materiálu. Zároveň je nutné



Obr. 32 Vzorky pro metalografii [73]

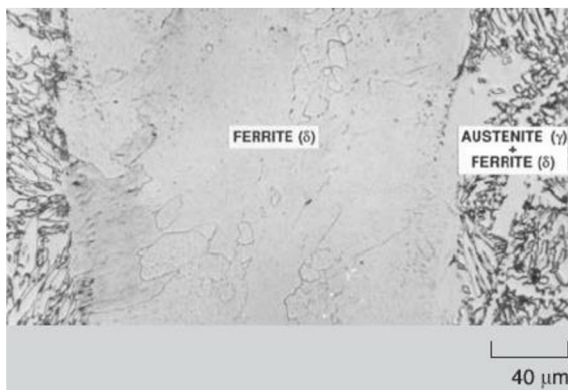
podotknout, že tato zkouška odhalí pouze vady v rovině odběru vzorku. Při odběru vzorku nesmí v žádném případě dojít k dalšímu tepelnému ovlivnění struktury, výsledky by se potom staly zkreslenými a tudíž nepoužitelnými. Lze ji rozdělit na makroskopickou a mikroskopickou.

- Makroskopická kontrola zahrnuje pozorování vzorku ve skutečné velikosti nebo při velmi malém zvětšení (maximálně 30x). V případě vzorku svařované součásti lze po vybroušení, vyleštění a případně naleptání povrchu hodnotit tvar svaru (Obr. 33), způsob kladení svarových housenek při vícevrstevném svařování, nebo odmíšení svarového kovu. Dále lze pomocí softwaru vyhodnotit základní rozměry svaru a charakter tepelně ovlivněné oblasti včetně všech jejích pásem. Součástí hodnocení makrostruktury je zkoumání větších objemových vad, například určení rozměrů pórů, výraznějších trhlin apod.



Obr. 33 Makrostruktura svaru [1]

- Mikroskopická kontrola obnáší pozorování precizně vyleštěného a naleptaného vzorku pod velkým zvětšením (30x až 2 000x), které závisí na použitém mikroskopu.



Obr. 34 Mikrostruktur svaru [74]

K vyvolání mikrostruktury nejčastěji slouží tekutá leptadla. Správný výběr závisí na účelu pozorování, a především na typu zkoumaného materiálu. Pro nelegované a nízkolegované oceli je nejpoužívanějším leptadlem Nital (1 - 4% roztok kyseliny dusičné v etylalkoholu). Pro chromové a chrom-niklové oceli se používají speciální prostředky, jako jsou Villela - Bain nebo Vogel. Hlavním

předmětem pozorování je velikost a tvar jednotlivých zrn, jejich hranic, rozložení strukturních fází (ferrit, austenit, cementit, martenzit, perlit, bainit) svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti (Obr. 34). Při mikroskopické kontrole je možné odhalit strukturní vruby, nežádoucí fáze (např. Widmanstättenova struktura), mikrořediny, případně malé trhliny, které byly skryté při makroskopické kontrole. Jedním z hlavních výstupů zkoumání mikrostruktury je také vměstkovitost, která zkoumá velikost a množství vměstků v oceli na základě porovnání s etalonem dle ČSN ISO 4967.

2.8.3 Zkoušky tvrdosti [45; 67; 75; 76; 77]

Odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa se nazývá tvrdost. Ta se řadí mezi základní a nejdůležitější mechanické vlastnosti v technické praxi a měří se u všech technických materiálů pomocí řady mechanických zkoušek. Z nich se získávají bezrozměrné hodnoty tvrdosti doplněné o označení stupnice způsobu měření, kterými byly naměřeny. Mírou tvrdosti je tedy konkrétní velikost trvalé plastické deformace, kterou zanechává indentor v měřeném vzorku. Základní rozdělení zkoušek tvrdosti spočívá v rozlišení způsobu působící síly, na statické a dynamické.

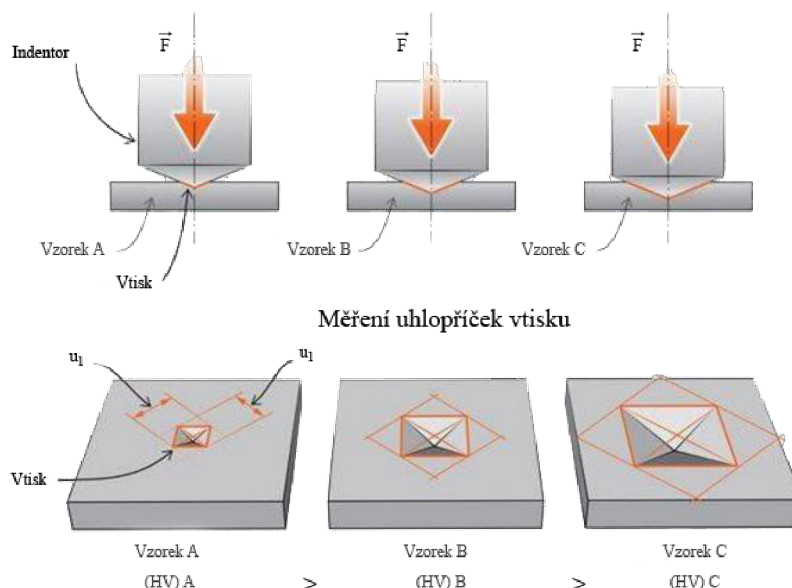
Tab.8 Rozdělení zkoušek tvrdosti: [67]

| Rozdělení | | Název metody | Norma | |
|-------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Zkoušky makrotvrdomosti | statické | vrypové | dle Martense | |
| | | vnikací | dle Brinella | ČSN EN ISO 6506-1 |
| | | | dle Vickerse | ČSN EN ISO 6507-1 |
| | dle Rockwella | | ČSN EN ISO 6508-1 | |
| | dynamické | plastické nárazové | volným pádem | |
| | | | stlačenou pružinou | |
| | | | porovnávací | |
| | | elastické odrazové | dle Shoreho | |
| | duroskop | | | |
| | Zkoušky mikrotvrdomosti | statické | vnikací | dle Viskerse |
| | | | dle Knoopu | ČSN ISO 4545 |
| Zkoušky nanotvrdomosti | statické | vnikací | dle Berkoviche | |

U svarových spojů se nejvíce využívá zkouška mikrotvrdomosti dle Viskerse pro určení tvrdosti jednotlivých částí tepelně ovlivněné oblasti. Pomocí těchto hodnot je možné odhadnout strukturní složení v okolí svaru. Zkouška mikrotvrdomosti se od obyčejné Vickersovy zkoušky odlišuje velmi malým zatížením v rozmezí 10 - 200 g odpovídající označení HV0,01 – HV0,2, působícím po dobu 10 – 180 s. V průběhu zkoušky je do zkoumaného materiálu vtlačován, předem definovanou silou F, diamantový indentor ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136°, tím na povrchu vzniká trvalý vtisk v důsledku rozvoje plastických deformací v okolí vnikajícího tělesa. Pomocí mikroskopu a speciálního softwaru se proměřuje geometrie vtisku po odlehčení. U Viskerse jde konkrétně o dvě úhlopříčky jejichž průměrná hodnota se dosadí do vztahu pro výpočet hodnoty tvrdosti daného normou. Čím větší je plocha vtisku a s tím související délka úhlopříček, tím je materiál měkčí, viz obr. 35.

$$HV = 0,102 \cdot \frac{F}{S_v} = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)}{u_s^2} = 0,189 \cdot \frac{F}{u_s^2}, \quad (2.11)$$

Kde: HV – tvrdost dle Vickerse,
 F – zatěžující síla [N],
 S_v – plocha vtisku [mm²],
 u_s² – průměrná velikost úhlopříček vtisku [mm],
 φ – vrcholový úhel indentoru [°], φ = 136°.



Obr. 35 Průběh zkoušky tvrdosti dle Vickerse [78]

Metoda je vhodná pro tvrdé i měkké materiály. Hlavní výhodou měření mikrotvrdosti pomocí Vickersovy zkoušky je rychlost, jednoduchost, opakovatelnost a možnost měření přímo na měřeném vzorku určeném pro další mechanické zkoušky. Nevýhodou však jsou vysoké nároky na kvalitu povrchu. Ideálně by měl být povrch měřeného vzorku hladký, rovný a vyleštěný, aby bylo možné správně vyhodnotit délky úhlopříček vtisku. Při svařování by výsledná tvrdost neměla přesáhnout hodnotu 350 HV z důvodu výrazného vnitřního prnutí v materiálu.

2.8.4 Zkoušky korozní odolnosti [79; 80; 81; 82; 83; 84]

Degradace kovů a slitin vlivem okolního prostředí probíhá nepřetržitě od počátku jejich výroby z rud až po jejich použití v praxi. Korozní děj je v drtivé většině případů nežádoucí



Obr. 36 Korozie [85]

z hlediska negativního vlivu na konstrukční a zejména pak estetické vlastnosti materiálu (Obr. 36). Korozie může být i žádoucí, například vznik pasivační vrstvy na střeších domů z mědi, nebo vznik oxidů na povrchu součástí vyrobených z hliníku. Korozie se objevuje téměř u všech materiálů. Kromě kovů také u skla, betonu, plastů atd. Představuje značné ekonomické ztráty, které ve vyspělých zemích dosahují 4–6 % hrubého domácího produktu. Při převodu na Českou republiku to znamená ztrátu

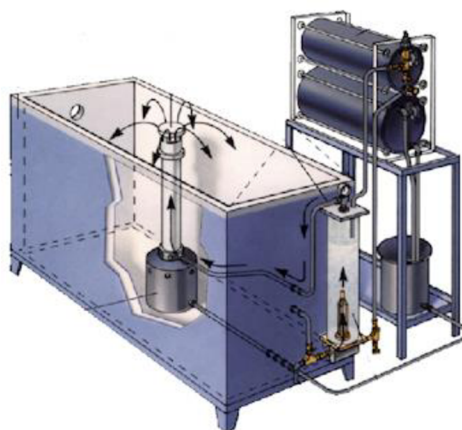
přibližně 300 miliard Kč ročně. Ztráty oceli se v celkovém měřítku se odhadují přibližně na 1 až 5 % hodnoty celkové roční výroby oceli na světě. Základní druhy korozního napadení jsou uvedeny v tabulce číslo 9.

Tab.9 Typy koroze:

| Rozdělení | Název | Popis |
|-----------------------------------|--------------------------|---|
| Dle korozního napadení | Rovnoměrná | Probíhá po celé ploše součásti |
| | Nerovnoměrná | Zanechává místa bez napadení |
| | Bodová | Místní napadení, které postupuje do hloubky bez zvětšení šířky |
| | Selektivní | Napadá jen určité fáze slitiny |
| | Interkrystalická | Napadá hranice zrn, materiál ztrácí své mechanické vlastnosti |
| | Transkrystalická | Dochází k lomu napříč zrna |
| Dle vnitřního mechanismu | Chemická | Vznik oxidů na povrchu kovů |
| | Elektrochemická | Vznik galvanického článku |
| Dle korozního prostředí | Atmosférická | Při zvýšené vlhkosti, teploty a množství nečistot v okolním ovzduší |
| | V kapalinách | Vliv mají pH a množství plynů ve vodě |
| | Půdní | Vliv mají vlhkost a soli obsažené v půdě |
| | Chemickými látkami | Při vystavení materiálu kyselinám |
| Dle kombinace s vnějšími činiteli | Při mechanickém namáhání | Opotřebení součástí při provozu v korozním prostředí |
| | Při únavě materiálu | Při střídavém namáhání v korozním prostředí |
| | Vibrační | Při tření součástí s jakýmkoliv materiálem, např. kavitace u vodních turbín |
| | Korozní praskání | Namáhání tahem v korozním prostředí |
| | Koroze bludnými proudy | Nedostatečnou izolací v oblasti zdroje proudu, např. kolejová vozidla |

Zkoušení korozní odolnosti spočívá v umělém vytvoření korozních podmínek ve speciálních komorách. Tím dojde k urychlení korozního procesu, kdy lze v relativně krátkém čase simulovat účinky prostředí v rozmezí několika let. Využívají se především v automobilním průmyslu, nebo při ověření účinnosti povrchových úprav v korozním prostředí. Nejrozšířenější je zkouška korozní odolnosti v solné mlze (NSS), při které jsou vzorky vystaveny 5% mlze chloridu sodného. Variantou NSS může být nahrazení mlhou chloridu sodného s kyselinou octovou (AASS), případně s přídavkem chloridu měďnatého (CASS). Všechny podmínky a způsoby vyhodnocování jsou specifikovány v normě ČSN EN ISO 9277. Existuje však řada dalších způsobů zkoušení, zejména firmy v automobilním průmyslu mají stanovené interní specifikace zkoušek, které spočívají v cyklických změnách podmínek v solné komoře.

Při klasickém testu solnou mlhou dle ČSN EN ISO 9277 je důležité dbát na správnou přípravu a umístění vzorků v komoře. Musí být důkladně odmaštěny a vloženy do komory (Obr. 37) tak, aby nebyly ve směru proudění mlhy z rozprašovací trysky. Ideálně by měl být vzorek plochý a umístěný lícovou stranou nahoru pod úhlem co nejblíže 20° ke svislé ose, nesmí však přijít do styku s povrchem komory nebo dalšími vzorky. Po uplynutí doby expozice se nechají oschnout a poté umyjí v destilované vodě. Mezi hlavní kritéria hodnocení patří posouzení vzhledu po zkoušce, vzhledu po odstranění povrchových korozních zplodin, počet a rozložení korozních defektů, změna hmotnosti a rozměrů, změna mikrostruktury a mechanických vlastností.



Obr. 37 Solná komora [86]

Tab.10 Parametry zkoušky korozní odolnosti dle ČSN EN ISO 9277:

| Parametr zkušební metody | Neutrální solná mlha (NSS) | Okyselená solná mlha (AASS) | Okyselená solná mlha s chloridem měďnatým (CASS) |
|--|---|-----------------------------|--|
| Teplota | 35 °C ± 2 °C | 35 °C ± 2 °C | 50 °C ± 2 °C |
| Průměrná rychlost shromažďování mlhy z vodorovné sběrné plochy 80cm ² | 1,5 ml/h ± 0,5 ml/h | | |
| Obsah chloridu sodného (v nashromážděném roztoku) | 50 g/l ± 5 g/l | | |
| pH (nashromážděného roztoku) | 6,5 až 7,2 | 3,1 až 3,3 | 3,1 až 3,3 |
| Doporučená doba expozice | 2 h, 6 h, 24 h, 48 h, 96 h, 168 h, 240 h, 480 h, 720 h, 100 h | | |

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato kapitola je zaměřena na praktickou stránku celé práce. Je v ní popsán celkový postup přípravy, provedení a konečného vyhodnocení experimentu včetně použitých zařízení. Převážná část experimentu byla provedena na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky, v.v.i. v Brně v laboratoři svařování a metalografické laboratoři. Měření tvrdosti bylo provedeno na Ústavu materiálůvých věd a inženýrství v laboratoři tvrdosti a mikrotvrdosti. Tahová zkouška byla provedena v laboratoři mechanických vlastností materiálů, která je součástí Ústavu strojírenské technologie. Oba ústavy se nachází v areálu Vysokého učení technického v Brně. Test korozní odolnosti byl proveden ve firmě Daikin Device Czech Republic s.r.o.

3.1 Použitá zařízení [87; 88; 89]

K provedení experimentu bylo zapotřebí využít mnoha zařízení ať už pro samotné svařování, vyhodnocení materiálůvých vlastností, preparaci vzorků nebo pro zachycení obrazového záznamu. Nejdůležitější přístroje, které mohou přímo ovlivnit experiment jsou však pouze ty, jenž byly využity v prvotní části experimentu pro vytvoření zkoumaného svaru. Jedná se tedy o zdroj laserového paprsku IPG YLS 2000 a skenovací hlavu Arges Rhino 31 upevněnou na robotu ABB IRB 2400.

- Laserový zdroj Yb:YAG Laser – IPG YLS 2000 (Obr. 38): – pevnolátkový vodou chlazený vláknový zdroj od firmy IPG Photonics o výkonu 2kW a účinnosti přibližně 30 % při kontinuálním nebo pulzním režimu. Maximální výkon je možné měnit pomocí modulárního uspořádání. Výsledná vlnová délka je dána aktivním prostředím, v tomto případě jde izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu dopovaného Ytterbiem, které generuje infračervené záření o vlnové délce 1070 až 1080 nm. Schopnost fokusace paprsku udávána parametrem BPP (Beam Parameter Product), který popisuje kvalitu kruhové symetrie svazku, je 0,34 mm·mrad. Uplatnění nachází po celém světě v automobilním, leteckém, petrochemickém nebo energetickém průmyslu. Zdroj je připojen na robotické rameno ABB IRB 2400, které umožňuje pohyb v 6ti osách s přesností 0,05mm. Zařízení je možné osadit svařovací, řezací nebo skenovací hlavou. V tomto experimentu byla použita skenovací hlava Arges Rhino 31.



Obr. 38 Laserový zdroj YLS-2000 [90]

- Skenovací hlava Arges Rhino 31 (Obr. 39): – kompaktní 2D skenovací hlava s pracovní plochou 205 x 205 mm pro širokou oblast použití. Je určena pro výkonné vláknové nebo plynové lasery se všemi vlnovými délkami. Lze ji využít pro přesné svařování, pro svařování s rozmítáním svazku, řezání, povrchové kalení, gravírování, značení, vrtání, nebo laserový 3D tisk kovů.



Obr. 39 Arges Rhino 31 [89]

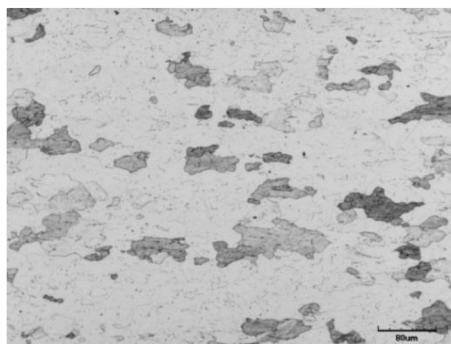
Následující zařízení byla použita při vyhodnocení experimentu. Na výslednou kvalitu svaru neměla žádný vliv, a tudíž budou jednoduše popsána v kapitolách týkajících se jednotlivých zkoušek.

- Metalografická pila MTH Mikron 110
- Lisovací přístroj Struers CitoPress – 1
- Metalografická bruska Struers Tegramin – 20
- Ultrazvuková pračka Ulsonix Proclean 2.0 M
- Mikroskop Olympus LEXT 3100
- Mikrotvrdoměr Leco LM 247AT Microhardness tester
- Trhací stroj ZD40
- Solná komora WEISS SC450

3.2 Materiál [91]

V rámci výzkumu vlivu procesních parametrů na vznik heterogenního spoje byly zvoleny různorodé oceli DC01 a X6Cr17 v podobě 3 mm silného plechu. Této tloušťky bylo u obou ocelí dosaženo válcováním za studena.

- DC01 EN 10130-91 – jde o nízkouhlíkovou feritickou ocel obvyklých jakostí vhodnou pro tváření za studena s následnou povrchovou úpravou, zejména k tažení, protlačování, pokovení v tavenině nebo smaltování (pouze neuklidněná ocel). V neuklidněném stavu je náchylná ke stárnutí, a proto je nutné ji zpracovat v odpovídajícím časovém termínu. Svařitelnost závisí na tloušťce materiálu. Do tloušťky 0,5 mm je dle ČSN 05 1310 zaručeně podmíněná, pokud je větší nebo rovna 0,5 mm je svařitelnost zaručená. Bez povrchové úpravy se nevyznačuje žádnou korozní odolností. Ocel byla vyrobena firmou ArcelorMittal, která garantuje její vlastnosti na základě inspekčního certifikátu uvedeného v příloze číslo 1.



Obr. 40 Výchozí struktura DC01

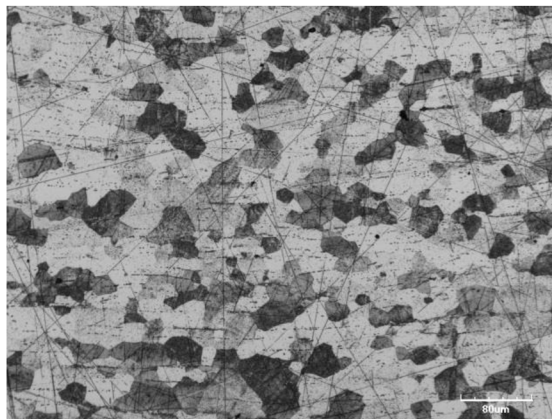
Tab.11 Vlastnosti oceli DC01: [92]

| Zastoupení jednotlivých prvků v hm. % | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|---------|-------|-------|
| | C | Si | Mn | P | S | Al |
| Maximum | 0,10 | | 0,45 | 0,030 | 0,030 | |
| Aktuálně | 0,038 | 0,007 | 0,204 | 0,007 | 0,01 | 0,035 |
| Mechanické vlastnosti | | | | | | |
| | R _{p0,2} [MPa] | R _m [MPa] | A ₈₀ [%] | E [GPa] | | |
| Minimum | | 280 | 29 | 211 | | |
| Maximum | 235 | 380 | | | | |
| Aktuálně | 192 | 313 | 40,1 | | | |

Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu pro nízkouhlíkovou nelegovanou ocel lze použít vzorec pro výpočet dle normy ČSN EN 1011, který zahrnuje tloušťku materiálu.

$$C_E = C + \frac{M_n}{6} + \frac{C_r}{5} + \frac{N_i}{15} + \frac{M_o}{4} + \frac{C_u}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot t = 0,038 + \frac{0,204}{6} + \frac{0,007}{2} + 0,0024 \cdot 3 = 0,083 \text{ hm. \%}$$

- X6Cr17 – ocel byla vyrobena firmou Columbus Stainless (PTY) LTD, která na základě inspekčního certifikátu, viz příloha 2, garantuje chemické a mechanické vlastnosti z dané tavby. Tyto hodnoty jsou v tabulce číslo 12 porovnány s hodnotami uvedenými v materiálových listech. Jedná se o feritickou korozivzdornou ocel s kovově lesklým povrchem, která se vyznačuje odolností vůči atmosférické korozi. Nekoroduje ani ve vodě s obsahem chloru a minerálních solí. Odolná je také vůči chemikáliím, jako je například zředěná kyselina dusičná nebo méně agresivním organickým kyselinám při pokojové teplotě. V dodaném stavu je odolná vůči mezikrystalické korozi. Tuto odolnost však ztrácí během svařování, pokud bezprostředně po něm nenásleduje rozpouštěcí žihání při teplotě 1000 až 1150°C. Ocel je žáruvzdorná do teploty 800 °C, při této teplotě odolává spalinám obsahující sírné sloučeniny a nauhličující látky. Svařitelnost je označena jako dobrá, doporučuje se předeřev 150 až 300 °C, poté ochlazovat na vzduchu. Ocel X6Cr17 lze svařovat téměř všemi metodami s výjimkou svařování elektrickým obloukem, kdy může dojít ke zkřehnutí vlivem nadměrného růstu zrna v pásmu přehřátí v tepelně ovlivněné oblasti. Použití nachází zejména v oblastech průmyslu s vyššími nároky na korozní odolnost při zachování dobré tažitelnosti a leštitelnosti, například pro výrobu příborů, dřezů, blatníků nárazníků apod.



Obr. 41 Výchozí struktura X6Cr17

Tab.12 Vlastnosti oceli X6Cr17:

| Zastoupení jednotlivých prvků v hm. % | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|---------|------|------|------|
| | C | S | P | Mn | Si | Cr | Ni |
| Minimum | | | | | | 16,0 | |
| Maximum | 0,080 | 0,015 | 0,040 | 1,00 | 1,00 | 18,0 | 0,75 |
| Aktuálně | 0,041 | 0,001 | 0,018 | 0,42 | 0,40 | 16,1 | 0,15 |
| Mechanické vlastnosti | | | | | | | |
| | R _{p0,2} [MPa] | R _m [MPa] | A ₅₀ [%] | E [GPa] | | | |
| Minimum | 280 | 450 | 22 | 220 | | | |
| Maximum | | 600 | | | | | |
| Aktuálně | 325 | 481 | 31 | | | | |

Protože se jedná o korozivzdornou feritickou ocel, řídí se její svařitelnost dle normy ČSN EN 1011-3 příloha B. Charakter výsledné struktury svarového kovu závisí na poměru feritotvorných a austenitotvorných prvků, jejichž hodnoty se získají na základě výpočtů chromového a niklového ekvivalentu.

V případě heterogenního svarového spoje ocelí rozdílných vlastností se bere doporučení pro svařování ušlechtlejší z nich. V tomto případě se bude svařování řídit podle oceli X6Cr17. Je potřeba spočítat chromový a niklový ekvivalent pro oba zadané materiály, zanést je do Schaefflerova diagramu a poté vyznačit bod v polovině vzniklé úsečky. Tento bod určuje přibližné strukturní složení svarového kovu. Protože Schaefflerův diagram neuvažuje možnost

regulace promísení pomocí rozmitání, bude získaná struktura pouze orientační. Pro přesnější určení by bylo vhodné provést vyhodnocení pomocí metody EDX, která vyhodnocuje chemické složení na základě detekce rentgenového záření vydávaného vzorkem.

Výpočet chromového a niklového ekvivalentu na základě hodnot z inspekčních certifikátů:

- Ocel DC01 EN 10130-91

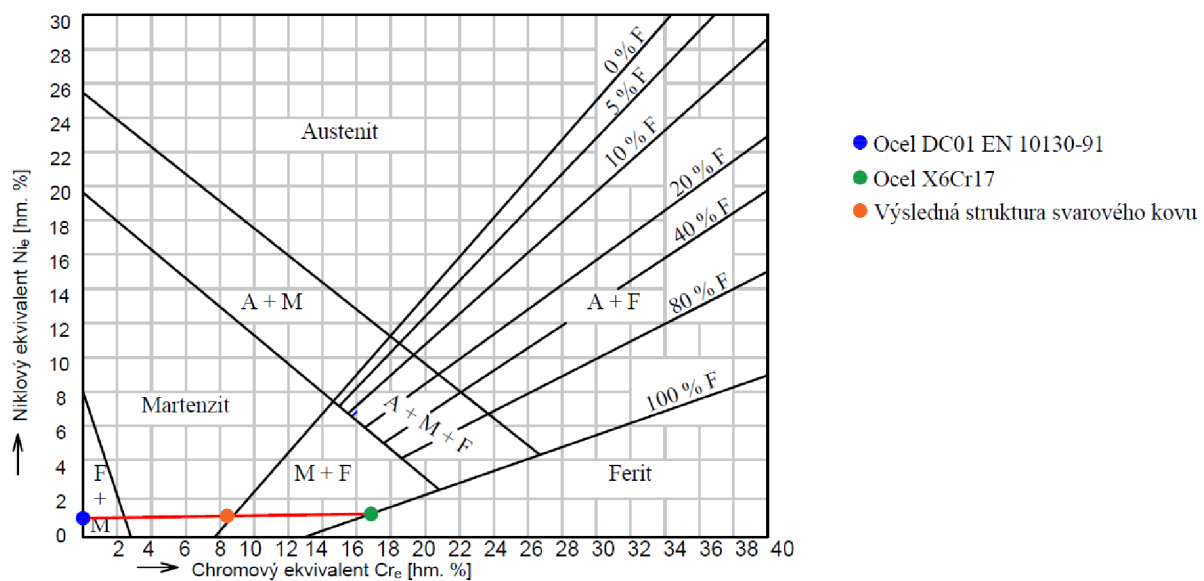
$$Ni_e = Ni + 30 \cdot C + \frac{1}{2} \cdot Mn + 30 \cdot (N - 0,05) = 0 + 30 \cdot 0,038 + \frac{1}{2} \cdot 0,204 + 0 = 1,242 \text{ hm. \%}$$

$$Cr_e = Cr + Mo + \frac{3}{2} \cdot Si + \frac{1}{2} \cdot Nb + 2 \cdot Ti = 0 + 0 + \frac{3}{2} \cdot 0,007 + 0 + 0 = 0,011 \text{ hm. \%}$$

- Ocel X6Cr17

$$Ni_e = Ni + 30 \cdot C + \frac{1}{2} \cdot Mn + 30 \cdot (N - 0,05) = 0,15 + 30 \cdot 0,041 + \frac{1}{2} \cdot 0,42 + 0 = 1,59 \text{ hm. \%}$$

$$Cr_e = Cr + Mo + \frac{3}{2} \cdot Si + \frac{1}{2} \cdot Nb + 2 \cdot Ti = 16,1 + 0 + \frac{3}{2} \cdot 0,4 + 0 + 0 = 16,7 \text{ hm. \%}$$

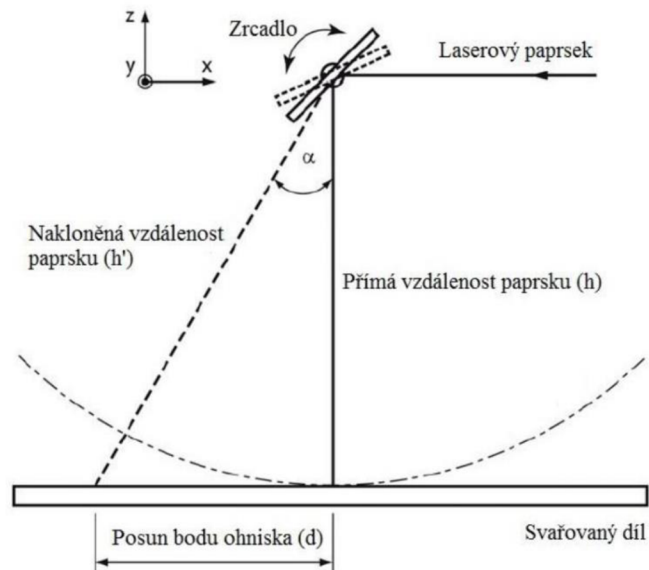


Obr.42 Vyznačení výsledné struktury svarového kovu

Ze Schaefflerova diagramu vychází výsledná struktura v podobě martenzitu, který se vyznačuje vysokou tvrdostí. V případě laserového svařování je dosaženo vysoké rychlosti ochlazování, která je příčinou jemnozrnější, a tedy i tvrdší martenzitické struktury oproti svařování elektrickým obloukem. Příliš vysoká tvrdost svarového kovu má negativní vliv na vlastnosti spoje. Je jí tedy nutné nějakým způsobem snížit. V případě obloukového svařování se běžně využívá predehřevu, který zpomalí ochlazování svarového kovu, případně následné normalizační žíhání po svařování. U laserového svařování však existují další možnosti snížení rychlosti ochlazování, jedním z nich je například rozmitání svazku, které vlivem oscilačního pohybu zpětně ohřívá a natavuje základní materiál. To přispívá rovněž ke zlepšení promísení obou základních materiálů.

3.3 Volba procesních parametrů

Pro ověření využitelnosti svařování s rozmítáním svazku korozivzdorné feritické oceli X6Cr17 s uhlíkovou ocelí DC01 a jeho porovnání s konvenčním svařováním laserem bylo zhotoveno 5 skupin svarů pomocí oscilačního pohybu paprsku a jeden vzorek klasickým svařováním bez rozmítání. Hlavní rozlišující parametry jsou způsob a vlastní frekvence rozmítání laserového svazku. Způsobem rozmítání se rozumí tvar obrazce, ve kterém osciluje laserový svazek a má vliv na výsledný tvar a vzhled svaru. Je rozhodujícím parametrem především při regulaci šířky svaru. Největší šířky se dosáhne pomocí kružnice, případně příčným lineárním posuvem. Nastavení probíhá pomocí parametrických rovnic, kde se změnou úhlu a poloměru nastavuje tvar a velikost výsledného obrazce. Dále je nutné zohlednit průměr vystupujícího paprsku, v našem případě přibližně 0,2 mm, a nastavit ohniskovou vzdálenost od čočky. Při použití skenovací hlavy není možné dodržet konstantní ohniskovou vzdálenost. To je způsobeno pevnou polohou svařovacího zařízení, kdy se laserový svazek pohybuje pouze nastavením vychylovacích zrcadel. Dochází k pohybu paprsku po kulové ploše (Obr. 43). Při vytváření svaru o délce 60 mm s přímé ohniskovou vzdáleností 200 mm je vychýlení $8^{\circ}31'$. Na okrajích svaru dochází ke zvýšení ohniskové vzdálenosti o 2 mm. Pro minimalizaci vlivu změny ohniskové vzdálenosti bylo ohnisko určeno ve středu svarové housenky v hloubce 1 mm pod povrchem. Hodnoty jednotlivých parametrů jsou detailně rozepsány v tabulce číslo 13.



Obr. 43 Změna ohniskové vzdálenosti [93]

Tab.13 Svařovací parametry pro experiment:

| Skupina parametrů | Výkon laseru [kW] | Rychlost svařování [mm/s] | Ochranný plyn (průtok) | Způsob rozmítání | Rozměr [mm] | Frekvence [Hz] |
|-------------------|-------------------|---------------------------|------------------------|------------------|--------------------|----------------|
| 1 | 2 | 10 | Argon 4.6 (17,5 l/min) | | | |
| 2 | | | | Kružnice | $r = 0,6$ | 30 |
| 3 | | | | Kružnice | $r = 0,6$ | 60 |
| 4 | | | | Kružnice | $r = 0,6$ | 90 |
| 5 | | | | Elipsa | $a = 1,2; b = 0,6$ | 90 |
| 6 | | | | Lineární | $l = 1,2$ | 90 |

Vzhledem ke kombinaci lineárního pohybu, oscilačního pohybu a různé tepelné vodivosti materiálů je velice komplikované spočítat množství vneseného tepla do svaru bez odborného softwaru, a proto nebude v této práci počítáno.

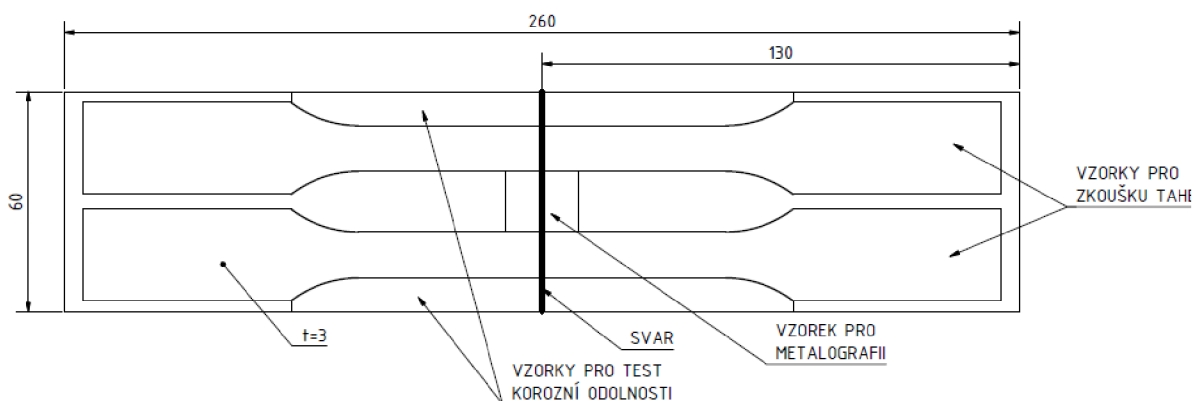
3.4 Příprava vzorků [94; 95]

Vzorky z výše uvedených materiálů byly připraveny na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Jejich tvar byl zvolen s ohledem na umístění jednotlivých preparátů pro další zkoušky.

- Svařování – Vzhledem k dalšímu zkoumání byly zvoleny rozměry výchozích materiálů 130 x 60 x 3 mm. Nařezané plechy byly řádně zbaveny otřepů, očištěny a podél jejich kratší strany upevněny k pracovnímu stolu pomocí upínek. Při aretování plechů je důležité dbát zvýšené pozornosti ohledně umístění svarové mezery ve středu dráhy laserového svazku, zvláště u klasického svařování a při lineárním rozmitání. Tím lze docílit přibližně stejného natavení obou materiálů. Svařované plechy byly bez úkosů na hranách a mezera mezi nimi byla minimální bez přesazení. Systém ustavení pomocí upínek je možné vidět na obrázku vpravo (Obr. 44). Po svaření byly na vzorcích o rozměrech 260 x 60 x 3 mm vyznačeny pozice (Obr. 45), odkud byly pomocí laseru vyřezány preparáty pro následující zkoušky. Celkem 12 vzorků pro tahovou zkoušku, 6 společných pro metalografii s testem tvrdosti dle Vickerse a 2 pro test korozní odolnosti.



Obr. 44 Upnutí svařovaných vzorků



Obr. 45 Umístění vzorků pro jednotlivé zkoušky

- Metalografie a zkouška tvrdosti – příprava vzorků v podobě preparátu zataveného v černé pryskyřici byla provedena v metalografické laboratoři na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky a je možné ji shrnout do 4 fází:
 - Odběr vzorků – všech 6 vzorků bylo odebráno na metalografické pile MTH Mikron 110 (Obr. 46) z přibližného středu svarové housenky, tím je zajištěna přibližně stejná plocha svarového kovu u všech preparátů a určitá podobnost výsledků zkoušky při následném porovnání jednotlivých vzorků. Metalografická pila se vyznačuje intenzivním chlazením a s tím souvisejícím minimálním tepelným ovlivněním materiálu v oblasti řezu, které by mělo negativní vliv na výslednou mikrostrukturu zkoumaného předmětu.



Obr. 46 Pila MTH Mikron 110

- Preparace vzorků – z prvního kroku byly získány vzorky o velikosti přibližně 20 x 4 x 3 mm. Ruční broušení by bylo nebezpečné a vyznačovalo se velkou nepřesností. Takhle malé vzorky je vhodné zalisovat za tepla do pryskyřice. Pro tento účel byl použit lis Struers Citopress-1 (Obr. 47). Vzorky byly před umístěním na kovovou podložku lisu řádně očištěny lihem, aby na ně pryskyřice dobře přilnula. Vzhledem k velikosti vzorků bylo možné zalisovat dva vzorky do jednoho preparátu. Byly umístěny do lisu, zasypany pryskyřicí ve formě granulátu a za podmínek uvedených v tabulce číslo 14 zalisovány. Po vyjmutí z lisu je vhodné jednotlivé preparáty označit pomocí vibračního gravírovacího zařízení a srazit hrany. Sražení slouží společně s ochranou brusných kotoučů ke zvýšení kvality broušeného povrchu.



Obr. 47 Lis Citopress-1 [96]

Tab. 14 Parametry lisování vzorků:

| Zahřívání | | | Chlazení | |
|--------------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Teplota [°C] | Čas [min] | Tlak [bar] | Intenzita | Čas [min] |
| 180 | 3,5 | 250 | vysoká | 1,5 |

- Broušení vzorků – jde o nejdůležitější a nejdélnější část procesu přípravy. Jde o snahu co nejvíce minimalizovat nerovnosti povrchu vzniklé při odběru vzorků. Postup broušení na zařízení Struers Tegramin-20 (Obr. 48) je ve své podstatě jednoduchý, postupuje se od nejhrubších brusných kotoučů po nejjemnější, přičemž je velice důležité vzorky důkladně opláchnout po předchozí operaci, aby došlo k odstranění zrněk hrubšího brusiva. Tato zrnka případně částičky kovu bývají často příčinou nežádoucích vrypů v podobě dlouhých pravidelných škrábanců na ploše vzorku. U hrubších kotoučů se vzorky oplachují obyčejnou vodou, kdežto u jemnějších, kde se používají speciální diamantové pasty, se vzorky oplachují lihem a následně se dočišťují v ultrazvukové pračce. V našem případě šlo o zařízení Ulsonix Proclean 2.0 M. Aby nedošlo k tepelnému ovlivnění, musí být vzorky během broušení intenzivně chlazeny. Celkový postup přípravy vzorků je shrnut v tabulce číslo 15.



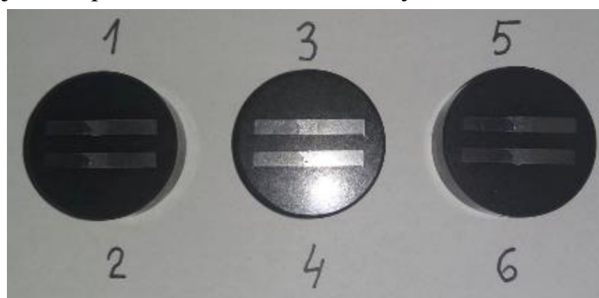
Obr. 48 Bruska Struers Tegramin-20 [97]

Tab. 15 Postup broušení vzorků:

| Číslo operace | Název operace | čas [min] |
|---------------|-----------------------------------|-----------|
| 1 | Broušení kotoučem s drsností 500 | 3 |
| 2 | Broušení kotoučem s drsností 1200 | 3 |
| 3 | Praní v ultrazvukové pračce | 2 |
| 4 | Leštění diamantem 9 μ m | 3 |
| 5 | Praní v ultrazvukové pračce | 2 |
| 6 | Leštění diamantem 3 μ m | 3 |
| 7 | Leštění diamantem 3 μ m | 3 |
| 8 | Praní v ultrazvukové pračce | 2 |
| 9 | Leštění diamantem 1 μ m | 3 |
| 10 | Leštění diamantem 1 μ m | 3 |
| 11 | Praní v ultrazvukové pračce | 2 |
| 12 | Leštění roztokem SiO ₂ | 5 |
| 13 | Praní v ultrazvukové pračce | 2 |

- Leptání vzorků – po dokončení broušení a důkladném očištění povrchu vzorku je možné pozorovat částečně vyniklou makrostrukturu. Pro umožnění zkoumání mikrostruktury je zapotřebí vzorky naleptat. Podle konkrétních požadavků následného zkoumání slouží několik metod. Rozlišujeme chemické leptání, leptání na hranice zrn, plošné leptání, selektivní leptání, elektrolytické a tepelné leptání. Vzhledem k potřebě zkoumat strukturu svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti poslouží chemické leptání, kdy se vzorek na chvíli namočí do leptadla. U heterogenních svarů nastává problém s výběrem správného leptadla z důvodu míry naleptání jednotlivých materiálů. Pro ocel DC01 by postačil Nital (3% roztok HNO₃ v ethanolu), ten by však nedokázal naleptat ocel X6Cr17. Pro tu by byl vhodnější roztok Vogel (180 ml HCl, 18 ml HNO₃ a 180 ml vody), ale došlo by k přepleptání struktury méně odolné uhlíkové oceli DC01. Z výše uvedených důvodů bylo zvoleno leptadlo s názvem Villela – Bain (2,5 ml HNO₃, 0,5 g kyseliny pikrové a 47,5 ml ethanolu), které je kompromisem mezi Nitalem a Vogelem. Důležitý je také správný časový interval leptání, pro naše vzorky byl zvolen interval 10 až 11 sekund, poté je vzorky nutné opláchnout lihem a dočistit v ultrazvukové pračce, tím se zabrání dalšímu napadání měkčích fází na hranicích zrn a zároveň se zabrání následnému vzlínání leptadla z kapilár vzniklých na okrajích vzorků při zalisování do pryskyřice. Poté se vzorky uloží do nádoby se silikagelem, který zpomalí proces atmosférické koroze narušeného povrchu. Při důkladném rozboru heterogenních svarů je vhodné nejdříve naleptat a zkoumat mikrostrukturu méně odolného materiálu, poté vzorky znovu přepleptat silnějším leptadlem a zkoumat druhý materiál.

Pro zkoušku tvrdosti dle Vickerse byly využity vzorky připravené pro metalografickou zkoušku (Obr. 49) z důvodu jejich ideálního tvaru pro umístění pod mikroskop měřícího zařízení. Vyleštěný povrch také umožňuje přesnější odečítání díky úhlopříčkám vzniklého vtisku, kdy ovlivnění povrchu leptáním lze považovat za zanedbatelné.



Obr. 49 Vzorky pro metalografii a test tvrdosti

- Tahová zkouška – laserem bylo nařezáno celkem 12 vzorků pro tahovou zkoušku, která byla provedena v laboratoři mechanických vlastností materiálů při Vysokém učení technickém v Brně. Při dělení materiálu vznikly na hranách zkušebních tyčinek otřepy, které bylo nutné před samotnou zkouškou odstranit pro zajištění bezpečné manipulace a zaručeného upnutí v trhacím stroji ZD 40, jehož specifikace jsou uvedeny v příloze 3. Okraje byly odstraněny na kotoučové brusce s ohledem na minimální narušení hran, které by mohlo způsobit nežádoucí vruby. Tyto vruby mohou působit jako koncentrátoři napětí a tím by došlo ke zkreslení výsledků během zkoušky. Následně se na vzorcích vyznačily hranice ve vzdálenosti 40 mm od svaru v obou směrech. Hranice udávají počáteční délku L_0 , od které se následně po přetržení odměří prodloužení tyče.
- Zkouška korozní odolnosti – test korozní odolnosti nebyl původně zadáním, a proto se s ním nepočítalo při původním dělení materiálu pomocí laseru. Byly tedy odřezány až následně pomocí úhlové brusky ze zbylého odpadu (Obr. 50). Z tohoto důvodu nebylo možné dodržet přesné rozměry stanovené normou ČSN EN ISO 9277, bylo tedy využito dodatku v odstavci 6.1, který umožňuje umístit do komory vzorky o rozměrech dle domluvy. Podobně jako v případě tahové zkoušky došlo ke vzniku otřepů, které musely být následně odstraněny. Při manipulaci v průmyslovém prostředí dochází k nánosu nečistot, různých olejů nebo prachu na povrch. Po označení vzorků elektrickým gravírovacím zařízením, aby nedošlo ke ztrátě označení během testu, je vhodné před samotnou zkouškou povrch vzorků očistit od výše zmíněných nečistot. K tomu poslouží běžně dostupný technický líh.



Obr. 50 Vzorky pro test solnou mlhou

3.5 Metalografická zkouška [98]

Byla provedena na výbrusech připravených v kapitole 3.4, materiál pro ně byl pečlivě vybrán tak, aby reprezentoval vlastnosti celého svaru. Byly připraveny tři tělesa vzorků v nich byly po dvojicích zataveny zkoumané preparáty. Zkouška byla provedena v laboratoři na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky za použití laserového konfokálního rastrovacího mikroskopu LEXT OLS 3100 od firmy Olympus (Obr. 51). Toto zařízení je vhodné spíše pro měření výšky profilů, měření drsnosti a tloušťky vrstvy, ale je možné jej využít také ke zkoumání makro a mikrostruktury materiálů. Obraz se z mikroskopu přenáší přímo do počítače, kde lze pomocí softwaru LEXT OLS 3100 upravovat přiblížení, jas a zaostření obrazu v reálném čase.



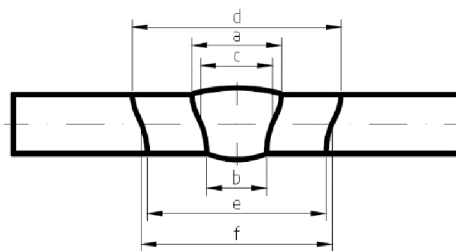
Obr. 51 Sestava Olympus LEXT OLS 3100 [99]

- Makrostruktura – rozbor snímků pořízených výše zmíněným mikroskopem je zaměřen na pozorování tepelně ovlivněné oblasti, základních vad ve svarovém kovu a následně byly snímky použity při grafickém znázornění průběhů tvrdostí u jednotlivých vzorků. Předmětem bylo srovnání vlivu rozmítání na vlastní tvar svarové lázně vzhledem ke vzorku

číslo 1, který byl zhotoven klasickou metodou svařování. U všech vzorků je možné pozorovat tvar svarové lázně v podobě kalichu, ten je dán zaostřením ohniska laseru v hloubce 1 mm pod povrchem základního materiálu.

V následující tabulce jsou shrnuty charakteristické rozměry svarové lázně a tepelně ovlivněné oblasti podle schématu na obr. 52.

Vzhledem k naleptání vzorků pro potřeby sledování mikrostruktury je v některých případech složité odhadnout přesnou hranici mezi tepelně ovlivněnou oblastí a neovlivněným základním materiálem, a proto je určování zejména rozměrů d, e, f poměrně subjektivní. Tento problém se týká především vzorků 3 a 4, u kterých je složité přesně odhadnout tuto hranici na straně korozivzdorné feritické oceli X6Cr17.

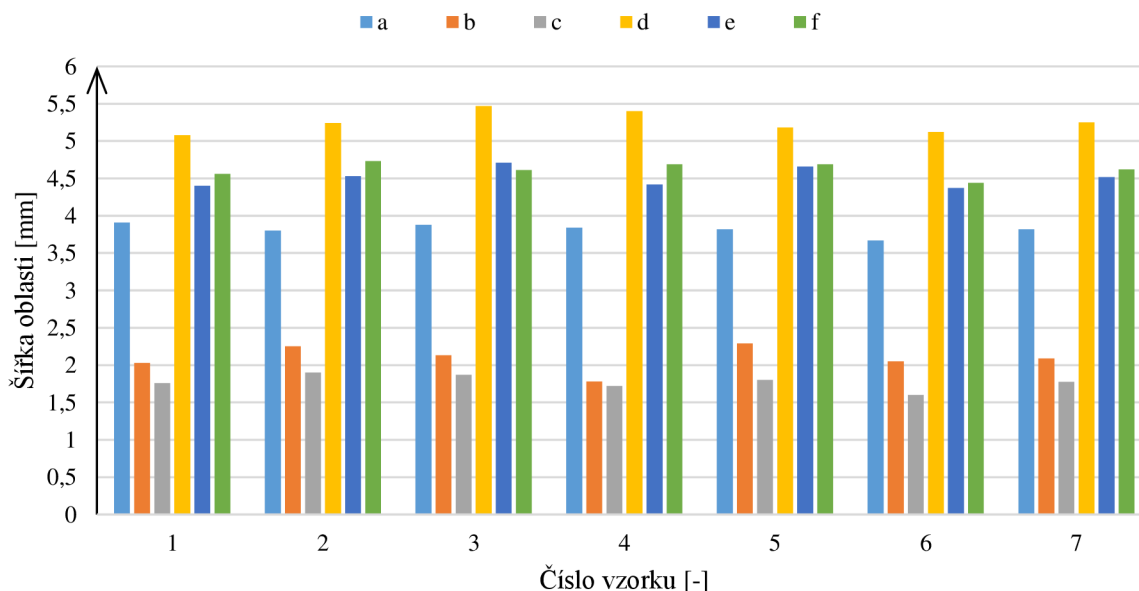


Obr. 52 Schéma základních měřených rozměrů

Tab. 16 Charakteristické rozměry vzorků:

| | Charakteristický rozměr [mm] | | | | | |
|--------|------------------------------|------|------|------|------|------|
| | a | b | c | d | e | f |
| 1 | 3,91 | 2,03 | 1,76 | 5,08 | 4,4 | 4,56 |
| 2 | 3,8 | 2,25 | 1,9 | 5,24 | 4,53 | 4,73 |
| 3 | 3,88 | 2,13 | 1,87 | 5,47 | 4,71 | 4,61 |
| 4 | 3,84 | 1,78 | 1,72 | 5,4 | 4,42 | 4,69 |
| 5 | 3,82 | 2,29 | 1,8 | 5,18 | 4,66 | 4,69 |
| 6 | 3,67 | 2,05 | 1,6 | 5,12 | 4,37 | 4,44 |
| Průměr | 3,82 | 2,09 | 1,78 | 5,25 | 4,52 | 4,62 |

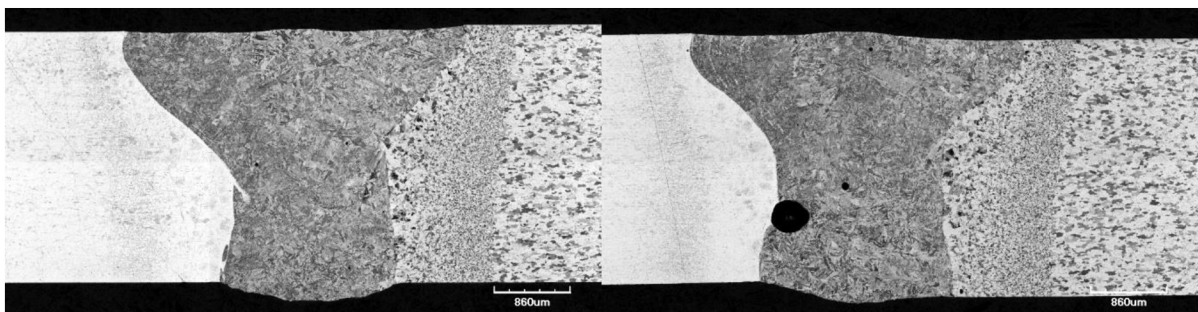
Srovnání charakteristických rozměrů svaru



Obr. 53 Diagram srovnání charakteristických rozměrů svaru

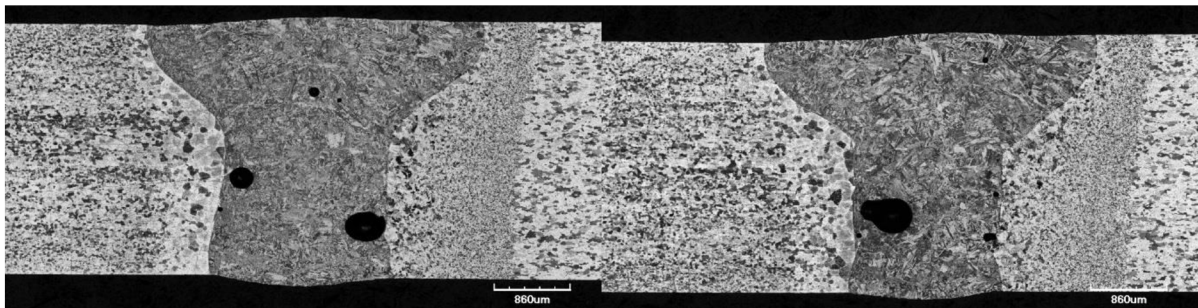
Na obr. 54 až 59 je možné pozorovat makrostrukturu jednotlivých vzorků s vyznačenými šířkami svaru. Snímky byly pořízeny při 20tinasobném zvětšení v režimu NCF s překrytím 15 %. V porovnání s klasickým svařováním (Obr. 54) dochází při svařování s rozmitáním

svazku k výraznému růstu výskytu pórů. Jejich kulovitý tvar je způsobený snahou plynu vytvořit útvar o co nejnižším povrchovém napětí. Tato perezita může mít mnoho příčin, které byly zmíněny v kapitole 2.6. Z důvodu výskytu pouze u svarů svařených pomocí rozmitání paprsku je možné vyloučit příčinu, kdy dochází k vytvoření pórů příliš velkým, nebo nedostatečným průtokem ochranného plynu, tím pádem i póry způsobené zvýšeným obsahem vodíku, který v oceli není běžně obsažený. Svařování za pokojové teploty, kde jsou teploty okolí i základního materiálu stejné, vylučuje kondenzaci vody v průběhu svařování. Protože byly vzorky před svařením důkladně očištěny lihem, je tedy vyloučena přítomnost nečistot na povrchu. Jako nejpravděpodobnější příčina se jeví nestabilita key hole v průběhu rozmitání, kdy dochází ke vzniku velkého množství proudů v jejím okolí. Z důvodu tohoto “míchání” dochází ke zpětnému natavování a může dojít k chvilkovému zhroucení stěny key hole a uvěznění odpařovaného plynu v tuhoucím kovu. Vzhledem k výskytu pórů převážně v dolní části svaru, tj. pod hranicí ohniska laseru, je možné těmto pórům předejít úpravou svařovacích parametrů. Především tedy snížením ohniskové vzdálenosti ke spodní hranici základního materiálu, nebo snížením výkonu laseru. V případě nižšího výkonu by se snížila hloubka průvaru a nemuselo by dojít ke spojení obou materiálů v plné hloubce svaru. Další nejčastější vadou je vznik podélné trhliny v ose svaru. Tento jev se u zkoumaných svarů neobjevuje. U vzorku číslo 5 je možné v pravé dolní části svarového kovu pozorovat studený spoj, který se projevuje ostrým rozhraním svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Přítomnost těchto vad se může negativně projevit snížením mechanických vlastností, zejména snížením meze pevnosti při tahové zkoušce. Pokud nedojde k přetržení zkušební tyčinky v oblasti svarového kovu je možné tyto vady považovat za přípustné bez omezení bezpečnosti konstrukce. U vzorků 1 a 6 je možné pozorovat mírné převýšení svaru v dolní části. V prvním případě jde o 0,17 mm, ve druhém 0,2 mm. V horní části svaru nedochází k přílišnému převýšení nebo zápalu po hranicích svarové housenky. Pouze u vzorků číslo 2 došlo k výškovému dosazení základních materiálů o 0,2 mm vlivem nepřesnosti upnutí pomocí upínek k pracovnímu stolu. U většiny vzorků se v oblasti částečného natavení základního materiálu vyskytla jistá anomálie, která bude dále zkoumána při větším zvětšení v rámci pozorování mikrostruktury.



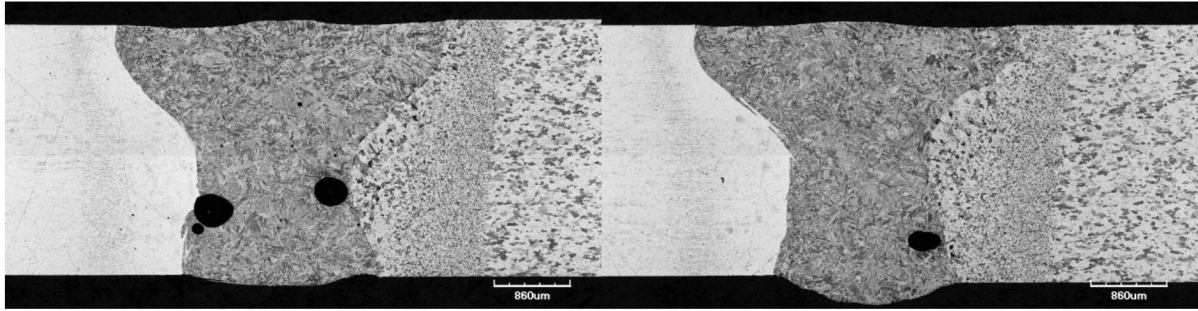
Obr. 54 Makrostruktura vzorku 1

Obr. 55 Makrostruktura vzorku 2



Obr. 56 Makrostruktura vzorku 3

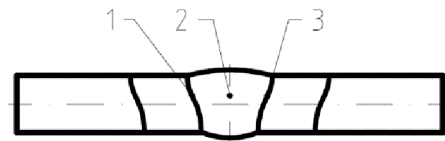
Obr. 57 Makrostruktura vzorku 4



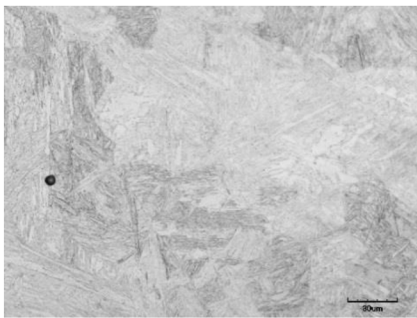
Obr. 58 Makrostruktura vzorku 5

Obr. 59 Makrostruktura vzorku 6

- Mikrostruktura – pozorování proběhlo na stejném mikroskopu, jaký byl použit při pořízení snímků pro účely sledování makrostruktury. Změněno bylo pouze zvětšení z 20x na 50x až 200x. Zkoumány byly především vzniklé strukturální složky ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Nejprve byly zachyceny snímky obou základních materiálů, ty byly použity v kapitole 3.2 pro znázornění struktury použitých ocelí před svařením. U všech vzorků byla pořízena základní série snímků v místech vyznačených na obr. 60, na kterých je zachycen svarový kov a dále rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti na obou stranách svaru. Svarový kov má ve všech případech stejnou martenzitickou strukturu (Obr. 61) jejíž zrna směrem ke středu svaru hrubne. To je způsobeno nižším teplotním gradientem než u hranice mezi svarovým kovem a tepelně ovlivněnou oblastí. Čím větší je teplotní gradient tím je růst zrna pomalejší a vzniká jemnější struktura. U vzorků s vyšší svařovací frekvencí je martenzitická struktura hrubší právě z důvodu vyšší koncentrace energie v místě svařování a následným rychlým ochlazením svarové lázně. Pro zjemnění zrna ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti se po svaření doporučuje rozpouštěcí žíhání.

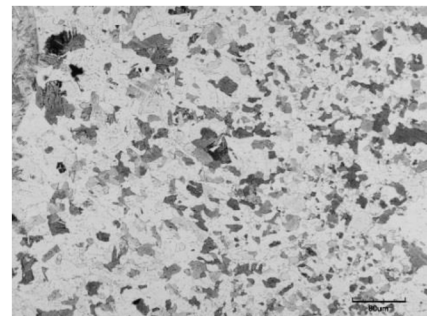


Obr. 60 Oblasti pořízení snímků



Obr. 61 Martenzitická struktura vzorku 1

U materiálu DC01 je možné pozorovat tmavší a světlejší zrna (Obr. 62), což může svádět k domněnce perliticko-feritické struktury, ale není tomu tak. Jedná se o čistě feritickou strukturu, ve které se mohou objevit zbytky perlitu. Vzhledem k obsahu uhlíku 0,1 hm.% se bude jednat pouze o stopové množství. Tmavší oblasti jsou tedy pouze jinak natočená a více naleptaná feritická zrna. Na straně oceli X6Cr17 je také feritická struktura, ve které jsou jasně patrné hranice



Obr. 62 Tepelně ovlivněná oblast DC01

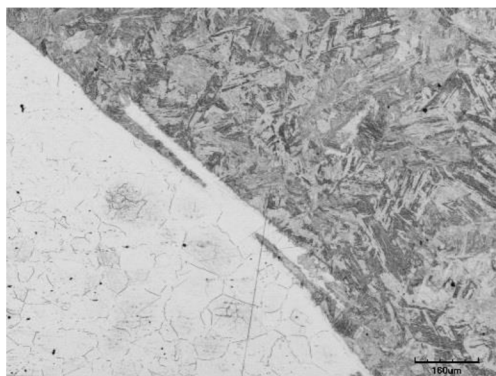


Obr. 63 Tepelně ovlivněná oblast X6Cr17

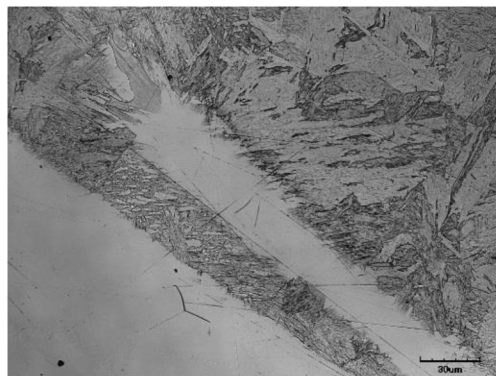
zhrublého zrna v tepelně ovlivněné oblasti (Obr. 63). U obou materiálů je patrné zhrubnutí zrna v pásmu přehřátí, u materiálu X6Cr17 je intenzivnější z důvodu vyššího obsahu chromu, který má sklon ke zvýšení náchylnosti k hrubnutí zrna na 1150°C. To vede ke snížení houževnatosti a zvýšení rizika vzniku trhlin. S rostoucím obsahem chromu roste také

riziko vzniku σ -fáze, která se vyznačuje snížením tažnosti a houževnatosti, vyskytuje se především u oceli s obsahem chromu nad 22 hm.%. Zkoumaná korozivzdorná ocel obsahuje menší množství chromu, a tudíž nedošlo ke vzniku σ -fáze.

Na makroskopických snímcích byly zachyceny jisté anomálie v oblasti částečného natavení základního materiálu v různých úrovních svaru. Na obrázku 64 je zachycen výstupek neroztaveného materiálu s feritickou strukturou obalený martenzitickým svarovým kovem, jehož detail je na obrázku 65. Tento jev je výraznější na straně korozivzdorné oceli X6Cr17. Kdyby byl neroztavený materiál vytržen během napětí vzniklých při tuhnutí svarového kovu, byla by viditelná hranice v podobě likvační trhliny vyplněná plynem. Žádná taková trhlina pozorovatelná není a je tedy možné tuto teorii považovat za nesprávnou. Tento jev vzniká v oblasti částečného natavení, kdy se mísí tavenina s tuhou fází. Nejpravděpodobnější příčinou je tedy odtavení části materiálu po hranicích zhrublého zrna. Tím se uvolní větší částice kovu do taveniny, kde se postupně taví. Nestihne se však roztavit celá a při ochlazování opět tuhne obklopena martenziticskou strukturou svarového kovu. Potvrzuje to také vznik podobných šupinek tuhé fáze ve svarovém kovu v oblasti pórů (Obr. 66), kde se dá předpokládat rychlejší smršťování plynové kapsy vzhledem k okolnímu prostředí. Při rychlém smrštění by mohlo dojít k odtržení tuhé fáze a ke vzniku výše zmíněných trhlín.



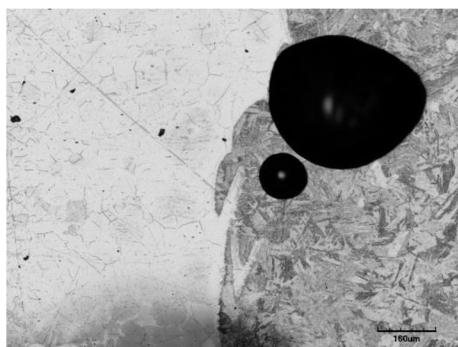
Obr. 64 Neroztavený materiál ve svarovém kovu



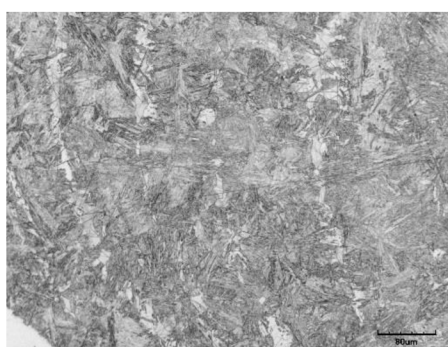
Obr. 65 Detail neroztaveného materiálu

Při sledování mikrostruktury svarového kovu lze zachytit stopy po svařování s rozmítáním svazku v podobě pravidelných obloukovitých útvarů vyznačujících se na obrázku číslo 67 světlejší barvou. Ta je zapříčiněna jinou velikostí a typem zrna, které je pozůstatkem hranice natavení. Nejvýraznější stopy zanechalo rozmítání pomocí kružnice s poloměrem 0,6 mm a frekvencí rozmítání 30 Hz na vzorku číslo 2.

Pro ověření vlivu rozmítání laserového paprsku na míru promísení obou kovů by bylo vhodné provést analýzu chemického složení svarového kovu s ohledem na koncentraci chromu, případně uhlíku a manganu, jejichž obsahy se u použitých materiálů liší. Veškeré snímky jsou shrnuty v příloze 4.



Obr. 66 Póry na vzorku 5



Obr. 67 Stopy po rozmítání svazku

3.6 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

V souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1 proběhla na Ústavu materiálových věd a inženýrství při Vysokém učení technickém v Brně zkouška tvrdosti dle Vickerse. Na zalisovaných vzorcích, použitých již při metalografické zkoušce, byla předem stanovena úroveň 1 mm pod povrchem materiálu, ve které bylo provedeno 81 vpichů. Měření proběhlo na přístroji LECO LM 247AT Microhardness tester (Obr. 68) s integrovanou CCD kamerou pro určení rozměrů úhlopříček během samotného měření v automatickém režimu. Z dat získaných z kamery se následně v poloautomatickém režimu ručně změří jednotlivé úhlopříčky vzniklých vtisků na jejichž základě jsou pomocí speciálního softwaru Hardtest LECO AMH-2000 vyhodnoceny hodnoty tvrdosti. Měření tvrdosti proběhlo za níže uvedených podmínek:

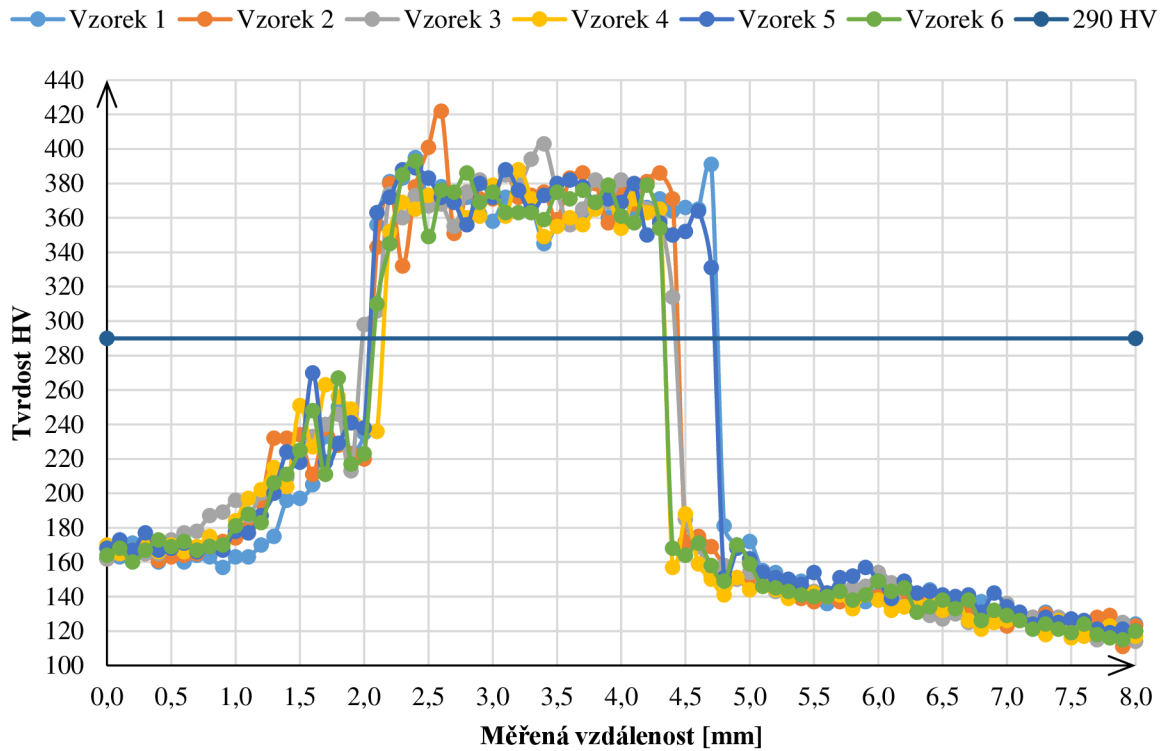


Obr. 68 LECO AMH-2000

- Zatížení HV01 – zatěžující síla $F = 1 \text{ N}$ odpovídá hmotnosti závaží 0,1 kg.
- Indentor – zkušební těleso vtlačované do zkoušeného materiálu má tvar pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136°
- Doba zatížení – čas po který působí síla na indentor byl stanoven na 10 sekund
- Oblast měření 1,5 mm pod povrchem prochází od základního materiálu X6Cr17 skrze tepelně ovlivněnou oblast I a plochu svaru do tepelně ovlivněné oblasti II, odkud dále do druhého základního materiálu DC01.
- Vzdálenost jednotlivých vtisků byla stanovena na 0,1 mm, aby byla dodržena podmínka minimální vzdálenosti mezi vtisky. Ta musí být menší než 2,5x délka úhlopříčky vtisku. Tím se zabrání ovlivnění rozměrů dalšího vtisku vlivem plastických deformací a zpevnění způsobeného předchozím vtiskem.

Pro lepší názornost jsou hodnoty tvrdostí graficky znázorněny na makroskopických snímcích (Obr. 71 až 76) pořízených stereomikroskopem Olympus LEXT OLS 3100 podrobně rozebraných v kapitole 3.5. Vzorky jsou foceny v režimu NCF při 20tinásobném zvětšení. Naměřená tvrdost základních materiálů dosahuje průměrné hodnoty 122 HV pro ocel DC01 a pro ocel X6Cr17 je to 166 HV. V materiálových normách je tvrdost uvedena v jednotkách HB podle Brinella a jejich přepočítání podle normy ČSN EN ISO 18265 na jednotky HV by byl přesný pouze za předpokladu, že hodnoty byly naměřeny za stejných podmínek zatížení. V opačném případě je převod pouze orientační, a to pouze na základě provedení porovnávacích zkoušek. Na obrázku 68 je grafické znázornění průběhů tvrdosti u všech vzorků, z něhož je patrný pozvolný nárůst tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti ze strany korozivzdorné feritické oceli do hodnoty 240 HV a poté skokový nárůst na 398 HV ve svarovém kovu. To potvrzuje vznik martenzitické struktury o téměř 100% koncentraci dle diagramu na obr. 29 uvedeném v kapitole 2.7.1. Hranice 290 HV vyznačuje tvrdost odpovídajícího 50ti procentům obsahu martenzitu ve struktuře. V oblasti svarového kovu jsou hodnoty tvrdosti téměř konstantní u všech vzorků. Ke změně dochází při přechodu svarového kovu do tepelně ovlivněné oblasti uhlíkové oceli DC01. Zde je zřejmé skokové snížení tvrdosti na 160 HV, odkud pozvolna klesají až po hodnoty základního materiálu. Veškeré číselné údaje vychází z průměru náměru u všech vzorků. Jednotlivé vzorky budou dále rozebrány samostatně proložení průběhů tvrdosti na metalografickém snímku. Mírné oscilace naměřených hodnot jsou způsobeny místem vpichu, kdy hranice zrn mohou mít nižší tvrdost než samotná zrna.

Průběh tvrdostí HV



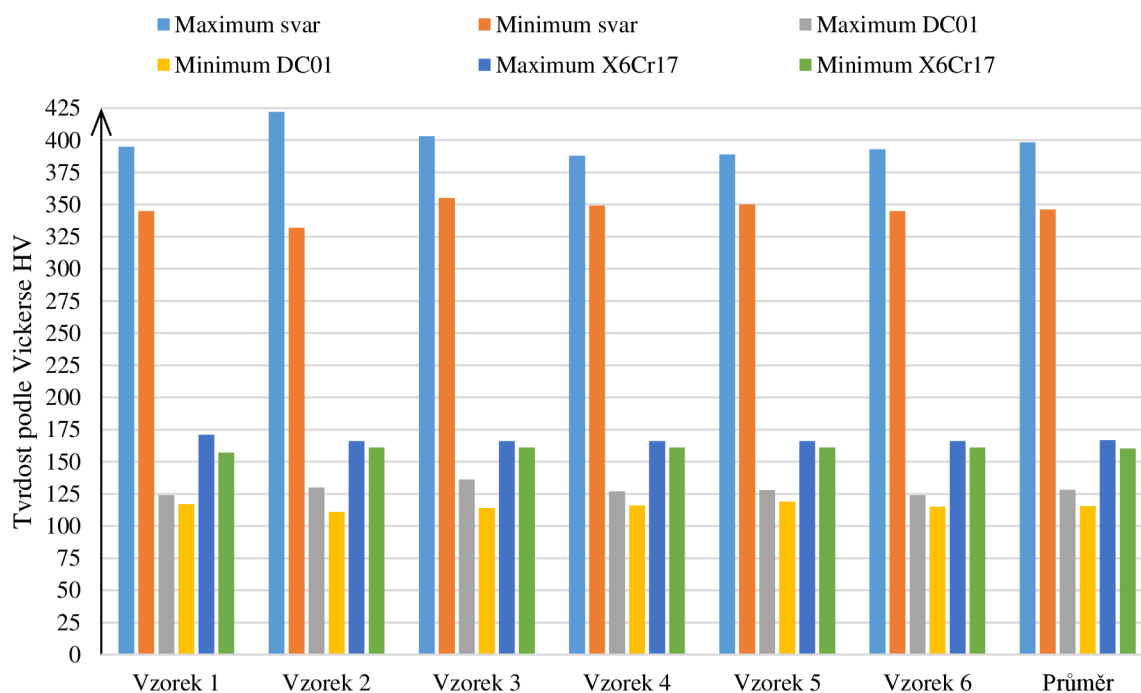
Obr. 69 Průběh tvrdostí HV

V následující tabulce jsou shrnuty a v diagramu na obrázku číslo 69 graficky znázorněny hodnoty maximálních a minimálních tvrdostí všech naměřených vzorků v porovnání průměrnými hodnotami v daných oblastech. Nejvyšší hodnoty vykazují svarové oblasti, z nichž vůbec nejvyšší hodnoty dosáhl vzorek číslo 2 a to 422 HV. Naopak nejnižší hodnoty vykazují vzorky v uhlíkové oceli DC01, paradoxně nejnižší hodnota 111 HV je rovněž u vzorku číslo 2.

Tab. 17 Souhrn maximálních a minimálních tvrdostí:

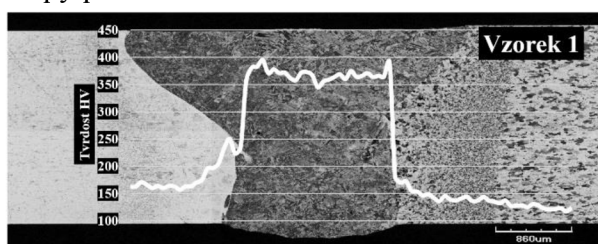
| Oblast měření | Tvrdost jednotlivých vzorků dle Vickerse [HV] | | | | | | |
|----------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| | Vzorek 1 | Vzorek 2 | Vzorek 3 | Vzorek 4 | Vzorek 5 | Vzorek 6 | Průměr |
| maximum svar | 395 | 422 | 403 | 388 | 389 | 393 | 398 |
| maximum DC01 | 124 | 130 | 136 | 127 | 128 | 124 | 128 |
| maximum X6Cr17 | 171 | 166 | 166 | 166 | 166 | 166 | 167 |
| minimum DC01 | 117 | 111 | 114 | 116 | 119 | 115 | 115 |
| minimum X6Cr17 | 157 | 161 | 161 | 161 | 161 | 161 | 160 |

Porovnání hodnot HV různých oblastech vzorků

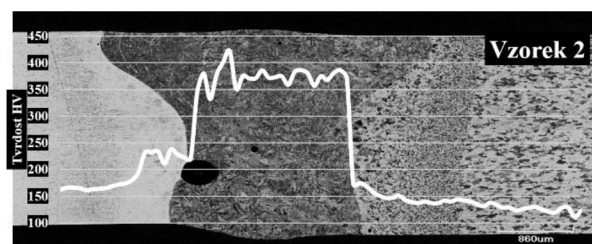


Obr. 70 Porovnání hodnot HV v různých oblastech vzorků

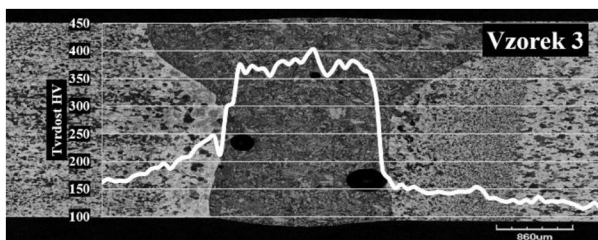
Při zkoumání snímků makrostruktury byla průměrná šířka tepelně ovlivněné oblasti stanovena na 0,72 mm. Měření tvrdosti tuto hodnotu potvrdilo. Pouze u vzorků 1 a 5 došlo k rozšíření oblasti svarového kovu v místě měření o 0,3 až 0,4 mm v porovnání s ostatními vzorky. Při sledování mikrostruktury byly odhaleny oblasti neroztaveného materiálu ve svarovém kovu, které se při měření tvrdosti projeví skokovou změnou tvrdosti zejména na straně korozivzdorné oceli X6Cr17 (na levé straně). Stejným způsobem se u vzorku 2 projeví stopy po svařování s rozmítáním laserového svazku.



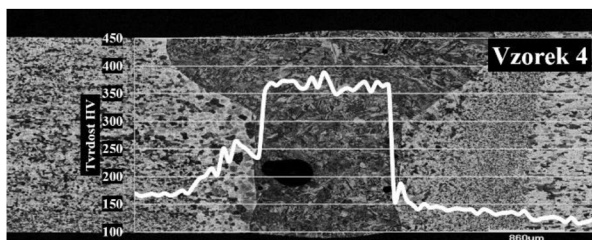
Obr. 71 Průběh tvrdosti na vzorku 1



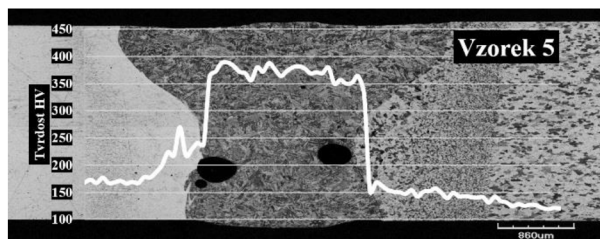
Obr. 72 Průběh tvrdosti na vzorku 2



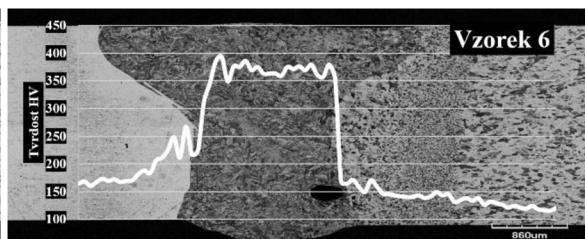
Obr. 73 Průběh tvrdosti na vzorku 3



Obr. 74 Průběh tvrdosti na vzorku 4



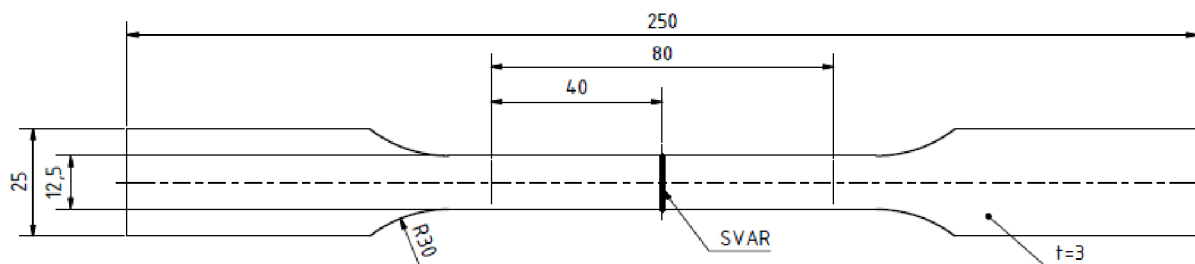
Obr. 75 Průběh tvrdosti na vzorku 5



Obr. 76 Průběh tvrdosti na vzorku 6

3.7 Tahová zkouška

Celkový průběh zkoušky od výroby zkušebních tyčinek, provedení testu, až po následné vyhodnocení naměřených veličin proběhl podle normy ČSN EN ISO 6892-1. Podrobně je průběh přípravy vzorků je popsán v kapitole 3.4. Z každé svařené dvojice plechů byly vyříznuty dva vzorky, které reprezentují celý svarový spoj. Důvodem je vytvoření jakési statistické dvojice, která vzájemně vyloučí chybu v měření jednoho či druhého vzorku. Pro přesnější výsledek by bylo vhodné vytvořit více vzorků, ale z ekonomických důvodů to nebylo možné. V souladu s výše uvedenou normou byly zvoleny rozměry zkušební tyčinky (Obr. 77), jejíž rozšířená část slouží k upnutí mezi čelisti trhacího zařízení. Pro maximální přesnost zkoušku musí být tvar a rozměry dokonale symetrické vzhledem k umístění svarové housenky, ta leží v ose symetrie ve zúžené části tyčinky.



Obr. 77 Zkušební těleso pro tahovou zkoušku

Zkouška proběhla v laboratoři mechanických vlastností materiálů na Ústavu strojírenské technologie při vysokém učení technickém v Brně. Tato laboratoř disponuje hydraulickým trhacím zařízením ZD40 určenému k provádění tahových, tlakových a ohybových zkoušek při zatížení 8 až 400 kN. Záznam polohy příčnicku probíhá pomocí inkrementálního délkového snímače s rozlišením 0,01 mm. Společně se snímačem síly je připojen na řídicí jednotku EDC60, která posílá informace do počítačového softwaru M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků a grafickým zpracováním dat. Veškeré informace o měřicím zařízení jsou uvedeny v příloze 3.

Při provádění tahové zkoušky byla zvolena rychlost zatěžování 10 MPa za sekundu. Chyba měření je stanovena na $\pm 1\%$. Předpokládané hodnoty napětí zkušebních vzorků jsou, vzhledem k vlastnostem základních materiálů, přibližně 300 až 450 MPa. V takovém případě je nepřesnost měření okolo 3, respektive 4,5 MPa pro ocel X6Cr17. Měření se dá považovat za relativně přesné a pro naše potřeby dostačující. Teplota okolního prostředí byla při zahájení zkoušky 21 °C a v průběhu testování se neměnila. Před samotným měřením je nutné zadat základní informace o rozměrech zkušebních vzorků (tab. 18) do vyhodnocovacího systému. Všechny zkušební tyčinky byly vyrobeny stejně, a tudíž nebylo nutné během měření měnit nastavená data.

Tab. 18 Základní rozměry zkušební tyčinky:

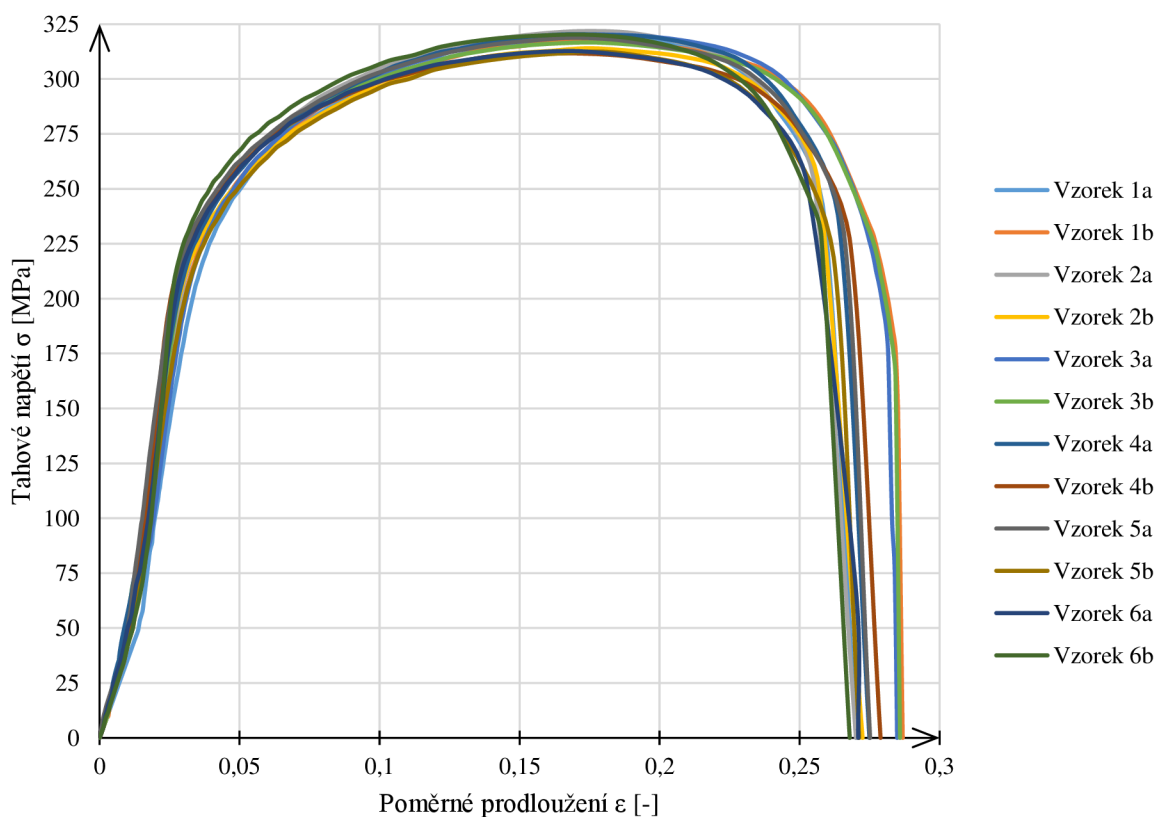
| Šířka [mm] | Tloušťka [mm] | Plocha S_0 [mm ²] | Rychlost zatěžování [MPa/s] |
|------------|---------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 12 | 3 | 36 | 10 |

Vzorky s vyznačenými hranicemi ve vzdálenosti 40 mm od svaru na obě strany byly upnuty za celou plochu rozšiřující se části mezi drážkové čelisti stroje ZD40 a poté plynule zatěžovány až do přetržení tyčinky (Obr. 78). V průběhu měření byla snímána časová závislost zatěžující síly na dráze příčnicku. Po přetržení se vzorky vyjmuly z čelistí a změřila se konečná vzdálenost mezi ryskami. Po zadání hodnot do programu M-TEST v.1.7 bylo vypočteno poměrné prodloužení zkoušeného materiálu a následně vyhodnocena grafická závislost průběhu zatěžující síly na dráze příčnicku. Na výsledných grafech je patrný náběh s výkyvy zatěžující síly. Tento jev je způsoben svíráním čelistí a je vhodné ho pomocí tabulkového procesoru odfiltrovat pro lepší znázornění reálného průběhu deformace zkušební tyčinky. V průběhu měření bylo zaznamenáno více než 1800 hodnot posuvu příčnicku, kde v některých místech vznikaly menší oscilace okolo reálného průběhu. Pro zjednodušení a hladší grafické znázornění výsledné křivky byla vybrána každá 30 hodnota, tím došlo k odstranění nežádoucích oscilací. Porovnání jednotlivých tahových charakteristik je graficky znázorněno v následujícím diagramu.



Obr. 78 Upnutí vzorku do trhacího stroje

Porovnání průběhů tahové zkoušky jednotlivých vzorků



Obr. 79 Porovnání průběhů tahové zkoušky jednotlivých vzorků

U všech vzorků svařených různými způsoby došlo k přetržení v základním materiálu s menší mezí pevnosti. Tím byla uhlíková ocel DC01 s mezí pevnosti 280–380 MPa dle materiálového

listu. K přetržení všech tyčinek došlo mezi vyznačenými ryskami (Obr. 80), a tudíž bylo možné přesně odečíst prodloužení zkušební vzorku po přetržení pomocí ocelového pravítka. Průměrná doba zatěžování do nevratného porušení materiálu byla 35,5 s. Tento materiál se vyznačuje průběhem tahového diagramu bez výrazné meze kluzu, kde je oblast elastické deformace s platností Hookova zákona do zatížení 6 kN. Poté dochází v materiálu k plastickým deformacím, tvorbě krčku, a nakonec k přetržení zkušební vzorku. Naměřené hodnoty mechanických vlastností jednotlivých vzorků jsou shrnuty v následující tabulce a graficky znázorněny v diagramu na obrázku 81 v porovnání s mechanickými vlastnostmi oceli DC01 danými normou ČSN 41 1321.

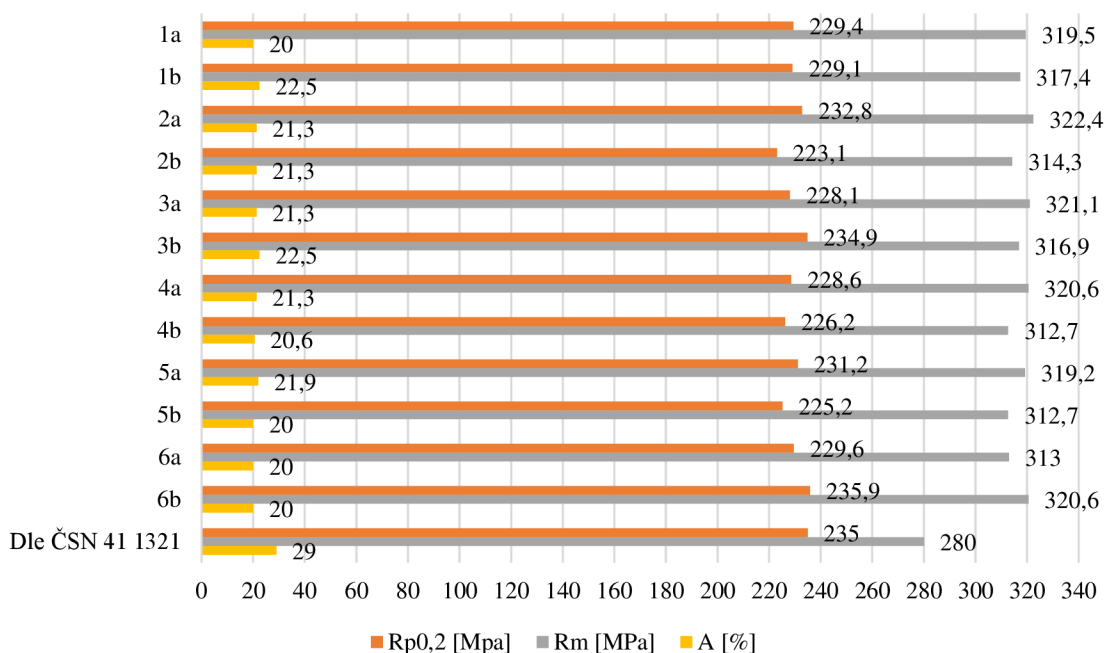


Obr. 80 Srovnání přetržených vzorků

Tab. 19 Naměřené hodnoty mechanických vlastností:

| Číslo vzorku | F_{\max} [N] | $R_{p0,2}$ [MPa] | R_m [MPa] | A [%] | t [s] |
|------------------------|----------------|------------------|-------------|-------|-------|
| 1a | 11 502,4 | 229,4 | 319,5 | 20 | 35,4 |
| 1b | 11 427,2 | 229,1 | 317,4 | 22,5 | 35,7 |
| 2a | 11 605,6 | 232,8 | 322,4 | 21,3 | 35,8 |
| 2b | 11 314 | 223,1 | 314,3 | 21,3 | 35 |
| 3a | 11 558,8 | 228,1 | 321,1 | 21,3 | 36 |
| 3b | 11 408 | 234,9 | 316,9 | 22,5 | 35,7 |
| 4a | 11 540 | 228,6 | 320,6 | 21,3 | 35,7 |
| 4b | 11 257,6 | 226,2 | 312,7 | 20,6 | 35,3 |
| 5a | 11 492,8 | 231,2 | 319,2 | 21,9 | 35,7 |
| 5b | 11 257,6 | 225,2 | 312,7 | 20 | 34,9 |
| 6a | 11 267,2 | 229,6 | 313 | 20 | 35,1 |
| 6b | 11 540 | 235,9 | 320,6 | 20 | 35,8 |
| Průměr | 11 430,9 | 229,5 | 317,5 | 21 | 35,5 |
| Maximum | 11 605,6 | 235,9 | 322,4 | 22,5 | 36 |
| Minimum | 11 257,6 | 223,1 | 312,7 | 20 | 34,9 |
| Dle ČSN 41 1321 | | max 235 | 280 - 380 | 29 | |

Porovnání mechanických vlastností vzorku s normou ČSN 41 1321



Obr. 81 Porovnání mechanických vlastností vzorků s normou ČSN 41 1321

Průměrná hodnota meze kluzu ($R_{p0,2}$) u všech vzorků je 229,5 MPa. Materiálová norma ČSN 41 1321 udává maximální hodnotu 235 MPa, ta je překonána pouze u vzorku 6b o 0,9 MPa. Vzhledem k výše zmíněné nepřesnosti měření se jedná o velice malou odchylku a je možné ji považovat za zanedbatelnou. V případě meze pevnosti (R_m), která by se měla pohybovat v rozmezí 280 až 380 MPa, je průměrná hodnota 317,5 MPa. I z tohoto pohledu materiál splňuje hodnoty mechanických vlastností daných normou ČSN 41 1321. Jediná hodnota, které nebylo dosaženo je tažnost. Příčin může být více, nejpravděpodobnější však je uspořádání vláken materiálu vlivem válcování.

Svary je tedy možné považovat za bezpečné z pohledu mechanických vlastností získaných z tahové zkoušky, protože u žádného ze zkoumaných vzorků nedošlo k porušení ve svaru, ani v tepelně ovlivněné oblasti.

3.8 Zkouška korozní odolnosti [100]

K provedení byly použity dva vzorky jejichž příprava je popsána v kapitole 3.4. Norma ČSN EN ISO 9277 udává přesné umístění v komoře. Společně s testováním vlivu korozního prostředí na vzorek byl zkoumán také vliv umístění ve zkušební solné komoře WEISS SC450 (Obr. 83), která je určena pro testy solnou mlhou. První vzorek byl vložen podle normy pod úhlem 20° do přípravku, který musí být vyroben z inertního materiálu, aby nedošlo ke kontaminaci vzorku. Tento úhel umožní stékání zkondenzované solné mlhy po povrchu, a tudíž nevytváří souvislou vrstvu kapaliny. Druhý vzorek byl umístěn “naplocho“, neodpovídal normě a umožňoval vznik souvislé vrstvy kapaliny, která do určité míry vytvořila ochrannou vrstvu a zpomalila rychlost



Obr. 82 Umístění vzorků ve zkušební komoře

korozního napadání materiálu. Umístění vzorků před zahájením testu v solné komoře je možné vidět na obrázku číslo 82.



Obr. 83 Solná komora WEISS SC450

Podmínky nastavené v solné komoře WEISS SC450 byly převzaty z modelu pro testování barvy na povrchu kompresorů klimatizačních zařízení. Doba expozice 96 hodin byla zvolena dle normy a měla by odpovídat přibližně čtyřem letům v provozu. Test probíhal v režimu NSS, tedy za použití neutrální mlhy chloridu sodného. V průběhu zkoušky byly v rozmezí 24 hodiny měřeny údaje udávající stabilitu procesu během testování. Veškeré hodnoty sledovaných podmínek jsou uvedeny v tabulce č. 20. Kontrolní list průběhu zkoušky se všemi zaznamenanými údaji je uveden v příloze 5.

Tab. 20 Podmínky ve zkušební komoře:

| Teplota nádrže [°C] | Teplota komory [°C] | pH [-] | Teplota rozprašovače [°C] | Objem kondenzace [ml] |
|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------|
| Standard: 20-26 °C | Standard: 33-37 °C | Standard: 6,5-7,2 | Standard: 46-49 °C | |
| 25 | 35 | 7,1 | 47,1 | 20 |
| 26 | 35,1 | 7 | 47,1 | 60 |
| 25 | 35 | 7,1 | 47,1 | 90 |
| 26 | 35,1 | 7 | 47,1 | 120 |

- Vzorek A (Obr. 84) – U vzorku umístěného dle normy je patrné intenzivní šíření koroze na povrchu vrchní (lícové) strany oceli DC01 (označena číslicí 2). Dochází ke vzniku korozních zplodin ve formě šupinek, které se postupně odlupují. K napadení korozivzdorné oceli (označena číslicí 1) dochází pouze v tepelně ovlivněné oblasti, kde vlivem svařování a následných strukturálních změn došlo ke ztrátě korozní odolnosti. Na spodní (rubové) straně je koroze rozšířena méně z důvodu menší míry kondenzace solné mlhy.



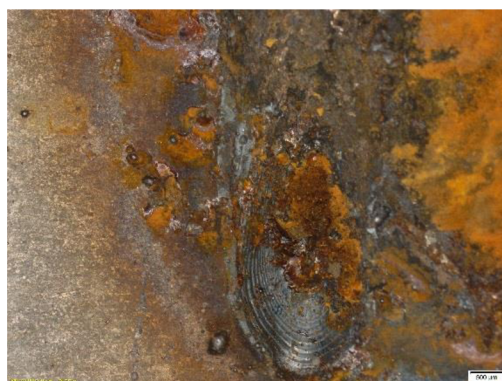
Obr. 84 Koroze na vzorku A

- Vzorek B (Obr. 85) – Korozní napadení uhlíkové oceli DC01 a tepelně ovlivněné oblasti je podstatně menší než u vzorku A. Došlo k vytvoření vrstvy zkondenzované mlhy, která do jisté míry chránila povrch vzorku na vrchní straně. Ustálená kapalina zabránila odvodu částic materiálu, a tím pádem i uvolnění prostoru pro další korozní napadání. Na spodní straně vzorku však došlo ke vzniku kapiček, které v průběhu zkoušky odpadávaly a tím způsobily vytvoření menších šupinek rzi.



Obr. 85 Koroze na vzorku B

V obou případech se solná mlha projevila vznikem bodové (důlkové) koroze a vznikem šupinek zkorodovaného kovu (Obr. 86). Předmětem hodnocení byl hmotnostní úbytek shrnutý v tabulce číslo 21, a také vizuální porovnání obou vzorků. Předpokládaná změna hmotnosti se projevila u vzorku s označením B, kde došlo ke ztrátě 0,04 g z původní váhy, kdežto u vzorku A narostla hmotnost o 0,08 g. Tento jev byl pravděpodobně způsoben nánosem usazené soli pod šupinkami zoxidovaného kovu. V tepelně ovlivněné oblasti obou vzorků je zvýšené riziko vzniku mezikrystalické koroze z důvodu vyššího obsahu chromu.



Obr. 86 Důlková koroze v oblasti svaru

Tab. 21 Změna hmotnosti po testu solnou mlhou:

| Vzorek | Rozměr [mm] | Hmotnost před testem [g] | Hmotnost po testu [g] | Úbytek materiálu [g] |
|--------|-------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|
| A | 130x10x3 | 28,42 | 28,5 | 0,08 |
| B | 130x10x3 | 28,33 | 28,29 | -0,04 |

4 ZÁVĚRY

Nejprve byla vypracována literární studie, v níž byl vytvořen přehled o nejběžnějších laserových zařízeních používaných ve strojírenském průmyslu společně se studií základních režimů svařování včetně moderní metody rozmítání laserového svazku. V této oblasti lze předpokládat veliký rozvoj využitelnosti pro široké spektrum materiálů. Dnes se využívá především při svařování neželezných kovů, jakými jsou měď a hliník, kde dochází k výraznému snížení pórovitosti. Tato práce je zaměřena na studium vlivu procesních parametrů rozmítání laserového svazku při svařování korozivzdorné feritické oceli X6Cr17 s tvárnou uhlíkovou ocelí DC01. Jedná se o kombinaci materiálů, kterou je možné využít především v energetickém průmyslu. Při využití uhlíkové oceli na zařízení, která nejsou v přímém kontaktu s korozivzdorným prostředím, ale je nutné jejich pevné spojení s korozivzdornou ocelí by vedlo k celkovému snížení nákladů na výrobu takové konstrukce.

Pro ověření možnosti svařování výše uvedených materiálů s využitím technologie rozmítání svazku byly vybrány plechy o tloušťce 3 mm, které byly svařeny pomocí 3 způsobů rozmítání s proměnnou frekvencí u obrazce ve tvaru kružnice. Celkem bylo zhotoveno 6 vzorků, z nichž jeden byl pro porovnání svařen klasickým způsobem s přímou dráhou laseru. Ze svařenců byly posléze vytvořeny zkušební tělesa pro zkoušku tahem, metalografii, měření mikrotvrdomosti dle Vickerse při zatížení HV0,1 a pro test korozní odolnosti neutrální solnou mlhou.

Metalografická zkouška je rozdělena na pozorování mikro a makrostruktury. Nejprve byla pozorována makrostruktura, ve které je možné pozorovat značný nárůst pórovitosti oproti vzorku svařeného bez rozmítání svazku. Vliv rozmítání na šířku svarového kovu se za daných parametrů nepodařilo spolehlivě prokázat. K většímu rozdílu by došlo v případě větší změny rozměru příčného parametru základního obrazce. V této práci byl zkoumán především vliv rychlosti rozmítání v podobě změny frekvence a tvaru rozmítacího obrazce. Výsledná mikrostruktura je u všech vzorků podobná s menším rozdílem v hrubnutí zrna svarového kovu, který má jemnější strukturu při nižších rozmítacích frekvencích. Pozorovatelný byl enormní růst zrna v pásmu přehřátí oceli X6Cr17. Na základě získaných dat nebylo možné zjistit úroveň promísení a změnu chemického složení svarového kovu oproti základním materiálům.

Měření mikrotvrdomosti podle Vickerse při zatížení odpovídajícím váze 0,1 kg byla potvrzena přítomnost čistě martenzitické struktury ve svarovém kovu, kdy tvrdost dosahovala průměrné hranice 398 HV. Vyšší tvrdost martenzitu je dána jeho jemnější strukturou oproti struktuře vzniklé po obloukovém svařování.

Při tahové zkoušce došlo k přetržení všech vzorků v základním materiálu DC01 a neprojevil se tak obavy z pórovitosti, ani příliš hrubého zrna v tepelně ovlivněné oblasti. Nedošlo tedy ke snížení mechanických vlastností pod hranici danou uhlíkovou ocelí a svar je možné z tohoto hlediska považovat za bezpečný.

Testem solnou mlhou byla ověřena ztráta korozní odolnosti v tepelně ovlivněné oblasti korozivzdorné oceli a ve svarovém kovu, kde došlo k napadení důlkovou korozi.

Na základě zjištěných výsledků jednotlivých testů je možné tento typ svařování doporučit, pro svařování dané kombinace materiálů, nedejde-li k ohrožení bezpečnosti dané konstrukce. Vady v podobě pórů neměly vliv na výsledky tahové zkoušky, je tedy možné považovat tyto defekty za přijatelné z pohledu bezpečnosti. Avšak není zaručeno, zda by neměly vliv na bezpečnost svařence například při tlakové zkoušce tlakového zařízení. Z hlediska dalšího zkoumání bych doporučil metodu EDX pro přesnější zjištění chemického složení svarového kovu, nebo tlakovou zkoušku pro tlaková zařízení.

Seznam použitých zdrojů [101; 102]

1. HÁLA, Kamil. *Svařování oceli C45* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=149016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.
2. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
3. DULEY, W. W. *Laser welding*. New York: A.Wiley-Interscience publication, c1999. ISBN 04-712-4679-4.
4. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. : il. ISBN 80-85771-81-0.
5. KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 8070826975.
6. STEEN, W. M. *Laser material processing*. 2nd ed. New York: Springer, 1998. ISBN 35-407-6174-8.
7. MRŇA, Libor a Petr HORNÍK. Pokročilé metody laserového svařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové Spektrum, 2017, 2017, **2017**(3), 104 [cit. 2019-04-29]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrocile-metody-laseroveho-svarovani.html>
8. Laser Welding. In: *IndiaMART* [online]. Chennai [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://dir.indiamart.com/chennai/laser-welder.html>
9. The three main types of Lasers used for welding are Fiber Lasers, Nd: YAG pulse Lasers and continuous wave Lasers. In: *SPI Lasers* [online]. c2019 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.spilasers.com/application-welding/the-top-5-benefits-of-laser-welding/>
10. BAILEY, Tom. Advanced Metal Joining with Laser Welding. In: *Fabricating and Metalworking* [online]. Birmingham, 2018 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2018/02/advanced-metal-joining-with-laser-welding/>
11. Svařování laserovým paprskem. In: *Trumpf* [online]. Praha, c2019 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/
12. Laserové svařování. *Laser Therm* [online]. Plzeň: Laser Therm, 2019 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-svarovani/>
13. Svařování plastů laserem. *Leonardo Technology* [online]. Hlohovec: Leonardo Technology, c2002-2019 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/svarovani-plastu-laserem>

14. PINHO, Tony. Fiber laser, mounted to robot, is shown placing 22 welds in 13 seconds on automotive seating components. In: *Industrial Laser Solutions* [online]. Shelby Charter, 2010 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/welding/article/16490001/remote-fiber-laser-welding-brazing-and-cutting>
15. Kondukční svařování. *Trumpf* [online]. Praha: Trumpf, c2019 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/kondukcni-svarovani/
16. Hluboké svařování. *Trumpf* [online]. Praha: Trumpf, c2019 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/hluboke-svarovani/
17. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. Olomouc, 2010 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>. Projekt Evropské unie. Společná laboratoř optiky FzÚ AV ČR a UP Olomouc.
18. MRŇA, L. Využití výkonových laserů ve strojírenské praxi svařování, dělení a další technologie [přednáška]. Brno, Ústav přístrojové techniky. In: <http://docplayer.cz/> [online]. [cit. 2018-05-14] Dostupné z: <http://docplayer.cz/7209420-Vyuziti-vykonovych-laseru-ve-strojirenske-praxi-svarovani-deleni-a-dalsi-technologie.html>
19. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II. - svařování* [online]. Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2006 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_II_opora_svarovani_2018_II_kubicek.pdf
20. CARIN, Muriel. Schematic diagram of the phenomena in keyhole laser welding. In: *Research gate* [online]. Bretagne, 2013 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-phenomena-in-keyhole-laser-welding_fig1_259780902
21. KUSALA, Jaroslav. Laser a jeho využití. *Laser a jeho využití* [online]. Praha: ČEZ, 2004, 2004 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
22. MRŇA, L. Základy laserové techniky [přednáška]. Brno, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2016-09-21. In: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/> [online]. [cit. 2019-05-14] Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf
23. Světlo, laserové záření. *Therapy systems* [online]. Brno: Therapy systems, c2009 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <http://www.therapy.cz/laserove-zareni.php>
24. SINGH, Jyoti. Types of laser. In: *SlideShare* [online]. Chandigarh: National Institute of Technical Teachers Training & Research, 2017 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/JyotiSingh28/types-of-laser-75045103>
25. VOJTA, Filip. Princip Laseru. *Princip laseru* [online]. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2003, s. 8 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>

26. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení. *Lasery a Optika* [online]. Praha, 2013 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
27. Princip CO2 laseru. *Leonardo Technology* [online]. Hlohovec: Leonardo Technology, c2002-2019 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>
28. Systém pro řezání laserem. *Bystronic* [online]. Brno: Bystronic Czech Republic, c2019 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://www.bystronic.cz/cs/produkty/systemy_rezani_laserem/
29. Laserové řezání planžet. *MEPAC* [online]. Třinec: MEPAC, 2019 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.mepac.cz/cz/lasery---sluzby/laserove-rezani-planzet/2/princip-fungovani-laseroveho-rezani>
30. Laser cutting process. *Engineer student* [online]. United Kingdom: Engineer student, c2018 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: http://www.engineerstudent.co.uk/laser_cutting.html
31. Adaptive optics for control of the laser welding process. In: *Research gate* [online]. Brno: The European Physical Journal Conferences, 2013 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Optical-system-of-the-solid-state-laser-welding-machine_fig3_258785364
32. Three Axis Scan System. In: *Cambridge Technology* [online]. Bedford, c2019 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.cambridgetechnology.com/products/3-axis-scan-heads>
33. *IPG Photonics Wobble Heads: from the World Leader in Fiber Lasers* [online]. Oxford: IPG Photonics Corporation, 2018 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/208/Widget/Wobble+Process+Heads+Brochure+2018.pdf>
34. DUŠEK, Jiří. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Megaflex* [online]. Praha: Megaflex, 2013 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
35. ŠTĚPÁN, Václav;. Lasery. *Tc-pipa* [online]. Praha, c2006-2016 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://tc-pipa.wz.cz/lasery.html>
36. Historie vývoje laseru. *Leonardo Technology* [online]. Hlohovec: Leonardo Technology, c2002-2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/historie-vyvoje-laseru>
37. Vláknové, Nd:YVO4, Nd:YAG a CO2 lasery. In: *MediCom a.s.* [online]. Praha: MediCom [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.medicom.cz/p.php?p=prumyslove,aplikace,laser>
38. Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red. *Leonardo Technology* [online]. Hlohovec: Leonardo Technology, c2002-2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
39. Vláknoový laser. *Trumpf* [online]. Praha: Trumpf, c2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/vlaknovy-laser/

40. Princip vláknového - FIBER LASERU. *Leonardo Technology* [online]. Hlohovec: Leonardo Technology, c2002-2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
41. Welding with wobbling technique. In: *Metal Working World Magazine* [online]. Milán: Metal Working World Magazine, 2016 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.metalworkingworldmagazine.com/welding-with-wobbling-technique/>
42. MRŇA, Libor. Aktuální možnosti v laserovém svařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové Spektrum, 2018, **2018**(1), 44 [cit. 2019-05-12]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-moznosti-v-laserovem-svarovani.html>
43. MEHLMANN, Benjamin a Josef SEDLMAIR. A schematic of the deep-penetration welding process. In: *Industrial Laser Solutions* [online]. Ottobrunn, 2017 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/welding/article/16485068/laser-bonding-a-new-connection-technology-for-high-currents>
44. *Svařování nerezavějících ocelí* [online]. Vamberk: ESAB, 2012 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://products.esab.com/ESABImages/nerezy2012.pdf>
45. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-857-7185-3.
46. JŮZA, Aleš. Vliv svařování na lomovou houževnatost. *Konstrukce* [online]. Ostrava: Konstrukce media, 2008, **2008**(1) [cit. 2019-05-14]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/vliv-svarovani-na-lomovou-houzevnatost/>
47. What is Welding Defects – Types, Causes and Remedies?. *The Welding Master* [online]. The Welding Master, 2017 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.theweldingmaster.com/welding-defects/>
48. BARTÁK, Jiří. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. *Česká svářečská společnost ANB (zkratka CWS ANB)* [online]. Plzeň: CWS-ANB, 2012 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
49. Technical information: Laser processing: CO2 [online]. Ditzingen: TRUMPF Werkzeugmaschinen, 2007 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: http://iconmachinetool.com/education/Library_Laser_CO2_Laser.pdf
50. ASADI, Parviz. Weld dropout defect in laser welding of AZ31. In: *ResearchGate* [online]. Qazvin, 2005 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Weld-dropout-defect-in-laser-welding-of-AZ31-Zhu-et-al-2005_fig6_235996056
51. KOLÁŘ, Vladislav. Vznik trhlin ve svarovém spoji. In: *Česká svářečská společnost ANB (zkratka CWS ANB)* [online]. Praha: Česká svářečská společnost ANB (zkratka CWS ANB), 2015 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=502>
52. KRŇÁK, Rudolf. *Kapesní příručka svařování, řezání, pájení*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1973.

53. ČSN 05 1309 (051309): *Zváranie. Zvariteľnosť kovov a jej hodnotenie. Všeobecné ustanovenia*. Praha: Český normalizační institut, 1991.
54. SCHMIDOVÁ, Eva. *Metalurgické vady svarových spojů*. Vyd. 2. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra mechaniky, materiálů a části [sic] strojů, 2014. ISBN 978-80-7395-851-0.
55. ČSN EN 1011: *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
56. Zkratky ve svařování. *Česká svářečská společnost ANB (zkratka CWS ANB)* [online]. Praha: CWS-ANB, c2006-2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=4&i=32>
57. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 8085771853.
58. MAJER, Lubomír. *Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-857-7170-5.
59. FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. ISBN 80-858-6795-8.
60. CUNAT, Pierre-Jean. *Svařování korozivzdorných ocelí* [online]. 1. Lucembursko: Euro Inox, 2007 [cit. 2019-05-12]. ISBN 978-2-87997-177-3. Dostupné z: http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf
61. PILOUS, Václav. *Svařování konstrukcí z korozivzdorných ocelí ve shodě s ČSN EN 1011-3. Konstrukce* [online]. Ostrava: Konstrukce media, 2012 [cit. 2019-05-12]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/svarovani-konstrukci-z-korozivzdornych-oceli-ve-shode-s-csn-en-1011-3/>
62. *Druhy nerezové oceli a příklady jejího užití. FASTENERS CZ* [online]. Ivančice u Brna: FASTENERS CZ, c2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.fasteners-cz.cz/druhy-nerezove-oceli-priklady-jejeho-uziti>
63. *Hlavní skupiny nerezových ocelí. TERAPOL spol. s r.o.* [online]. Chomutov: TERAPOL [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.terapol.cz/clanek/no-vap-hlavni-skupiny>
64. *Charakteristika jednotlivých skupin korozivzdorných ocelí. Bohdan Bolzano s.r.o.* [online]. Kladno: Bohdan Bolzano, c2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/charakteristika-skupin-korozivzdornych-oceli>
65. ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia, 1999. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-0671-0.

66. ŠTORKÁN, Zdeněk. Problematika hodnocení svarových spojů. *Konstrukce* [online]. Ostrava: Konstrukce media, 2014 [cit. 2019-05-12]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
67. SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-704-3417-1.
68. DAVIS, Joseph. R. *Tensile testing: Second edition*. 2. vyd. Ohio: ASM International, 2004. ISBN 0-87170-806-X.
69. ČSN EN ISO 6892-1 (420310): *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
70. Hydraulic pressure universal testing machine. In: *Lab Test Machines* [online]. Tung-kuan: Haida International, c2015-2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.labtestmachines.com/sale-8518998-manual-hydraulic-tensile-test-universal-testing-machines-panasonic-servo-motor.html>
71. MOLLIKOVÁ, Eva. *Nauka o materiálu: Studijní opora předmětu vyučovaného v kombinovaném bakalářském studiu*. Brno, 2002. Fakulta strojního inženýrství VUT.
72. ČSN EN ISO 17639 (051128): *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
73. Metallographic sample. In: *Direct Industry* [online]. c2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/allied-high-tech-products-inc/product-34997-1137545.html>
74. DAVID, S.A., S.S. BABU a J.M. VITEK. Ferritic microstructure in type-312 stainless steel with negligible secondary austenite formation. In: *The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)* [online]. Oak Ridge (Tennessee): The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 2003 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.tms.org/pubs/journals/jom/0306/david-0306.html>
75. Tvrdost. *Měření tvrdosti* [online]. Ostrava: Proinex Instruments, 2011 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.merenitvrlosti.cz/tvrlost.html>
76. SUCHÁNEK, Jan a Vladimír SUCHÁNEK. Zkouška tvrdosti podle Vickerse. *HANYKO Praha* [online]. Praha: HANYKO Praha, c2016 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrlost-a-jak-se-meri/zkouska-tvrlosti-podle-vickerse/>
77. ČSN EN ISO 6507-1 (420374): *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
78. MITCHELL, John. Vickers Hardness Test indentation examples. In: *EngineeringClicks* [online]. Cambridge: EngineeringClicks, c2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/vickers-hardness-test/>
79. VALEŠ, Miroslav. Zkoušení povrchových úprav a ochran. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové Spektrum, 2011, **2011**(4), 60 [cit. 2019-05-12]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zkouseni-povrchovych-uprav-a-ochran.html>

80. PRAŽÁK, Milan. Korozní komory. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové Spektrum, 2015, **2015**(12), 126 [cit. 2019-05-12]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozni-komory.html>
81. MEDVEC, Pavel a Radana BRÁBNÍKOVÁ. Urychlené korozní zkoušky v automobilovém průmyslu - normy Volvo VCS 1027 v korozních komorách Ascott Analytical. *Gamin* [online]. Ostrava: Omega Design, c2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.gamin.cz/profil-spolecnosti/publikace/urychlene-korozni-zkousky/>
82. Korozní ztráty. *Chemická obchodní společnost* [online]. Třeboň: Chemická obchodní společnost, 2018 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.chos.cz/cs/novinka/korozni-ztraty/>
83. MATOUŠ, Jan. Koroze kovových úložných zařízení a působení bludných proudů. *Elektrika.info* [online]. Praha, 2011 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/koroze-kovovych-uloznych-zarizeni-a-pusobeni-bludnych-proudu>
84. ČSN EN ISO 9227 (038132): Korozní zkoušky v umělých atmosférách - Zkoušky solnou mlhou. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
85. HELMENSTINE, Anne Marie. Rust is a good example of corrosion. In: *ThoughtCo* [online]. Knoxville (Tennessee): ThoughtCo, 2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/definition-of-corrosion-604960>
86. SMITH, Kevin A. Salt fog corrosion testing class. In: *Auto Technology* [online]. Ohio, 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://autotechnology.com/classes/understanding-performing-salt-fog-corrosion-testing-class/>
87. SHINER, Bill. High Power Fiber Laser Technology. In: *SLAC Conferences, Workshops and Symposiums* [online]. Menlo Park: SLAC National Accelerator Laboratory, 2013 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www-conf.slac.stanford.edu/lsow/2013-Presentations/BShiner-HighPowerFiberLasers.pdf>
88. MRŇA, Libor. Výkonový laser IPG YLS2000. *Institute of Scientific Instruments of the of the Czech Academy of Sciences* [online]. Brno [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.isibrno.cz/cs/vykonovy-laser-ipg-yls2000>
89. Arges Rhino 31. In: *Arges* [online]. Wackersdorf [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.arges.de/industrial-products/2d-scan-heads/rhino/>
90. Model YLS-2000. In: *Allegro Archiwum* [online]. 2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://archiwum.allegro.pl/oferta/fiber-laser-2d-2000-w-1-5x3-0-i-3d-rur-i-profil-i6999268261.html>
91. Charakteristika korozivzdorných materiálů. *Italinox* [online]. Praha: Italinox, c2015 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-3>
92. ČSN 41 1321 (411321): Ocel' 11 321. Praha: Český normalizační institut, 1988.

93. VAKILI-FARAHANI, F., J. LUNGERSHAUSEN a K. WASMER. Process Parameter Optimization for Wobbling Laser Spot Welding of Ti6Al4V Alloy. *Physics Procedia*. 2016, 83, 483-493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.050>. ISSN 1875-3892. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389216301572>
94. ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. Olomouc [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
95. CAIS, Jaromír. Elektronová mikroskopie. Metalografie [online]. Praha, 2015 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/1571274-Elektronova-mikroskopiemetalografie.html>
96. Struers Citopress-1. In: *Spectrographic* [online]. Guiseley (Leeds): Spectrographic, c2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://spectrographic.co.uk/shop/recent-sales-refurbished/struers-cito-press-20/>
97. Bruska Struers Tegramin-20. In: *Struers* [online]. Roztoky u Prahy: Struers, c2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.struers.com/en/Products/Grinding-and-Polishing/Grinding-and-polishing-equipment/Tegramin>
98. ŠEBESTOVÁ, Hana. *Laserový rastrovací konfokální mikroskop LEXT OLS 3100*. Olomouc, 2009. ŠEBESTOVÁ, Hana. Laserový rastrovací konfokální mikroskop LEXT OLS 3100 [online]. Olomouc, 2009 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_lext.pdf. Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky.
99. Olympus Confocal microscope LEXT OLS3100. *Tel Aviv University Center for Nanoscience and Nanotechnology* [online]. Tel Aviv [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://nano.tau.ac.il/old/index.php/labs/9-equipment/microscopes/14-olympus-confocal-microscope-lext-ols3100>
100. SEDLÁKOVÁ, V. [Doba expozice vzorků v solné mlze] [zvukový záznam rozhovoru], 2019-05-15
101. *Citace PRO* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>
102. KRČÁL, Martin a Zuzana TEPLÍKOVÁ. *Naučte (se) citovat*. Blansko: Citace.com, 2014. ISBN ISBN978-80-260-6074-1.

Seznam použitých symbolů a zkratek

| Označení | Legenda | Jednotka |
|----------|--|--------------------|
| A | tažnost | [%] |
| AASS | acetic acid salt spray | [-] |
| BPP | beam parameter product | [mm·mrad] |
| CASS | chloride acid salt spray | [-] |
| CE | uhlíkový ekvivalent | [hm.%] |
| CET | uhlíkový ekvivalent podle IIW | [hm.%] |
| ČR | Česká republika | [-] |
| ČSN | Česká státní norma | [-] |
| DPSS | diode pumped solid state | [-] |
| DT | destructive testing | [-] |
| E | Youngův modul pružnosti v tahu | [MPa] |
| EDX | Energy-Dispersive X-ray spectroscopy | [-] |
| EN | Evropská norma | [%] |
| ET | electrical testing | [%] |
| F | zatěžující síla | [N] |
| Fe | zatěžující síla na mezi kluzu | [N] |
| Fmax | zatěžující síla na mezi pevnosti | [N] |
| HV | tvrdost dle Vickerse | [-] |
| IIW | mezinárodní svářečský institut | [-] |
| ISO | International organization for standardization | [-] |
| L | délka zkušební tyče | [mm] |
| L0 | počáteční délka zkušebního tělesa | [mm] |
| LED | light emitting diode | [-] |
| Lk | konečná délka zkušebního tělesa po přetržení | [mm] |
| LPSS | lamp pumped solid state | [-] |
| MAG | metal active gas | [-] |
| MIG | metal inert gas | [-] |
| MT | magnetic testing | [-] |
| NDT | non destructive testing | [-] |
| NSS | neutral salt spray | [%] |
| PT | penetration testing | [%] |
| Re | mez kluzu | [MPa] |
| Rm | mez pevnosti | [MPa] |
| Rp0,2 | smluvní mez kluzu | [MPa] |
| RT | radiographic testing | [-] |
| RTG | rentgen | [-] |
| S0 | počáteční průřez zkušebního tělesa | [mm ²] |
| Sk | konečný průřez zkušebního tělesa | [mm ²] |
| Sv | plocha vtisku | [mm ²] |
| TIG | tungsten inert gas | [-] |
| us | průměrná velikost úhlopříček vtisku | [mm] |
| UT | ultrasonic testing | [%] |
| VT | visual testing | [%] |

| | | |
|---------------|--------------------------|-------|
| WIG | wolfram inert gas | [-] |
| X-ray | rentgenové záření | [-] |
| YAG | yttrium aluminium granát | [-] |
| YLS | ytterbium laser systém | [-] |
| Z | kontrakce | [%] |
| Δ | rozdíl | [-] |
| ε | poměrné prodloužení | [-] |
| ϕ | vrcholový úhel indentoru | [°] |
| σ | napětí | [MPa] |

Seznam obrázků

| | | |
|---------|---|----|
| Obr. 1 | Technologie laserového svařování [8; 9; 10; 11] | 9 |
| Obr. 2 | Robotizované svařovací pracoviště [14] | 11 |
| Obr. 3 | Průvar indukčního režimu [17] | 12 |
| Obr. 4 | Kondukční režim svařování [18] | 12 |
| Obr. 5 | Průvar penetračního režimu [17] | 12 |
| Obr. 6 | Penetrační režim svařování [18] | 13 |
| Obr. 7 | Metalurgické procesy v key hole [20] | 13 |
| Obr. 8 | Zdroj laserového paprsku [24] | 14 |
| Obr. 9 | Aktivní prostředí [26] | 14 |
| Obr. 10 | Proces buzení atomů v rezonátoru [26] | 15 |
| Obr. 11 | Řezací laserová hlava [30] | 15 |
| Obr. 12 | Svařovací laserová hlava [31] | 16 |
| Obr. 13 | Skenovací laserová hlava [32] | 16 |
| Obr. 14 | Svařovací hlava pro rozmítání svazku [33] | 17 |
| Obr. 15 | Laserové vrtání [33] | 17 |
| Obr. 16 | Konstrukce laserového zdroje [34] | 17 |
| Obr. 17 | Laser s bočním buzením [34] | 18 |
| Obr. 18 | Laser se zadním buzením [34] | 18 |
| Obr. 19 | Konstrukce zdroje CO2 laseru [22] | 19 |
| Obr. 20 | Konstrukční schéma vláknového laseru [40] | 19 |
| Obr. 21 | Schéma pohybových vektorů při rozmítání svazku [43] | 21 |
| Obr. 22 | Vliv tvaru svarové mezery [33] | 21 |
| Obr. 23 | Vzhled vnějšího koutového svaru [33] | 22 |
| Obr. 24 | Pásma tepelně ovlivněné oblasti [46] | 23 |
| Obr. 25 | Schaefflerův diagram [44] | 23 |
| Obr. 26 | Znázornění svarových vad [49] | 24 |
| Obr. 27 | Porezita svaru [50] | 25 |
| Obr. 28 | Podélná trhlinka [51] | 25 |
| Obr. 29 | Závislost tvrdosti HV na obsahu uhlíku [45] | 27 |
| Obr. 30 | Trhací lis [70] | 29 |
| Obr. 31 | Tahový diagram [71] | 30 |
| Obr. 32 | Vzorky pro metalografii [73] | 31 |

| | | |
|---------|--|----|
| Obr. 33 | Makrostruktura svaru [1] | 31 |
| Obr. 34 | Mikrostruktura svaru [74] | 31 |
| Obr. 35 | Průběh zkoušky tvrdosti dle Vickerse [78] | 33 |
| Obr. 36 | Koroze [85] | 33 |
| Obr. 37 | Solná komora [86] | 35 |
| Obr. 38 | Laserový zdroj YLS-2000 [90] | 36 |
| Obr. 39 | Skenovací hlava Arges Rhino 31 [89] | 37 |
| Obr. 40 | Výchozí struktura DC01 | 37 |
| Obr. 41 | Výchozí struktura X6Cr17 | 38 |
| Obr. 42 | Vyznačení výsledné struktury svarového kovu | 39 |
| Obr. 43 | Změna ohniskové vzdálenosti [93] | 40 |
| Obr. 44 | Upnutí svařovaných vzorků | 41 |
| Obr. 45 | Umístění vzorků pro jednotlivé zkoušky | 41 |
| Obr. 46 | Pila MTH Mikron 110 | 41 |
| Obr. 47 | Lis Citopress-1 [96] | 42 |
| Obr. 48 | Bruska Struers Tegramin-20 [97] | 42 |
| Obr. 49 | Vzorky pro metalografii a test tvrdosti | 49 |
| Obr. 50 | Vzorky pro test solnou mlhou | 44 |
| Obr. 51 | Sestava Olympus LEXT OLS 3100 [99] | 44 |
| Obr. 52 | Schéma základních rozměrů svaru | 45 |
| Obr. 53 | Diagram srovnání charakteristických rozměrů | 45 |
| Obr. 54 | Makrostruktura vzorku 1 | 46 |
| Obr. 55 | Makrostruktura vzorku 2 | 46 |
| Obr. 56 | Makrostruktura vzorku 3 | 46 |
| Obr. 57 | Makrostruktura vzorku 4 | 46 |
| Obr. 58 | Makrostruktura vzorku 5 | 47 |
| Obr. 59 | Makrostruktura vzorku 6 | 47 |
| Obr. 60 | Oblasti pořízení snímků | 47 |
| Obr. 61 | Martenzitická struktura vzorku 1 | 47 |
| Obr. 62 | Tepelně ovlivněná oblast DC01 | 47 |
| Obr. 63 | Tepelně ovlivněná oblast X6Cr17 | 47 |
| Obr. 64 | Neroztavený materiál ve svarovém kovu | 48 |
| Obr. 65 | Detail neroztaveného materiálu | 48 |
| Obr. 66 | Póry na vzorku 5 | 48 |
| Obr. 67 | Stopy po rozmitání svazku | 48 |
| Obr. 68 | Mikrotvrdoměr LECO AMH-2000 | 49 |
| Obr. 69 | Průběh tvrdostí HV | 50 |
| Obr. 70 | Porovnání hodnot HV v různých oblastech vzorků | 51 |
| Obr. 71 | Průběh tvrdosti na vzorku 1 | 51 |
| Obr. 72 | Průběh tvrdosti na vzorku 2 | 51 |
| Obr. 73 | Průběh tvrdosti na vzorku 3 | 51 |
| Obr. 74 | Průběh tvrdosti na vzorku 4 | 51 |
| Obr. 75 | Průběh tvrdosti na vzorku 5 | 52 |
| Obr. 76 | Průběh tvrdosti na vzorku 6 | 52 |
| Obr. 77 | Zkušební těleso pro tahovou zkoušku | 52 |
| Obr. 78 | Upnutí vzorku do trhacího stroje | 53 |

| | | |
|---------|---|----|
| Obr. 79 | Porovnání průběhů tahové zkoušky jednotlivých vzorků | 53 |
| Obr. 80 | Srovnání přetržených vzorků | 54 |
| Obr. 81 | Porovnání mechanických vlastností vzorků s normou ČSN 41 1321 | 55 |
| Obr. 82 | Umístění vzorků ve zkušební komoře | 55 |
| Obr. 83 | Solná komora WEISS SC450 | 56 |
| Obr. 84 | Koroze na vzorku A | 56 |
| Obr. 85 | Koroze na vzorku B | 56 |
| Obr. 86 | Důlková koroze v oblasti svaru | 57 |

Seznam tabulek

| | | |
|--------|---|----|
| Tab.1 | Srovnání metod svařování z hlediska koncentrace energie | 13 |
| Tab.2 | Srovnání laserových zařízení | 20 |
| Tab.3 | Porovnání způsobů laserového svařování | 21 |
| Tab.4 | Základní způsoby rozmítání svazku | 22 |
| Tab.5 | Základní rozdělení vad | 24 |
| Tab.6 | Srovnání svařitelnosti rozdílných materiálů pomocí laseru | 26 |
| Tab.7 | Rozdělení materiálových zkoušek | 28 |
| Tab.8 | Rozdělení zkoušek tvrdosti | 32 |
| Tab.9 | Typy koroze | 34 |
| Tab.10 | Parametry zkoušky korozní odolnosti dle ČSN EN ISO 9277 | 35 |
| Tab.11 | Vlastnosti oceli DC01 | 37 |
| Tab.12 | Vlastnosti oceli X6Cr17 | 38 |
| Tab.13 | Svařovací parametry pro experiment | 39 |
| Tab.14 | Parametry lisování vzorků | 41 |
| Tab.15 | Postup broušení vzorků | 42 |
| Tab.16 | Charakteristické rozměry vzorků | 44 |
| Tab.17 | Souhrn maximálních a minimálních tvrdostí | 49 |
| Tab.18 | Základní rozměry zkušební tyčinky | 51 |
| Tab.19 | Naměřené hodnoty mechanických vlastností | 53 |
| Tab.20 | Podmínky ve zkušební komoře | 55 |
| Tab.21 | Změna hmotnosti po testu solnou mlhou | 56 |

Seznam příloh

| | |
|-------------|---|
| Příloha č.1 | Inspekční certifikát DC01 |
| Příloha č.2 | Inspekční certifikát X6Cr17 |
| Příloha č.3 | Hydraulický zkušební stroj ZD40 |
| Příloha č.4 | Snímky mikrostruktury |
| Příloha č.5 | Kontrolní list průběhu zkoušky solnou mlhou |

Příloha č.2

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|--|--------------|--|---------------------|--|--------------------------------|--|------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  | |  <small> ZA 0845 17 0845-076-0845 </small> | | INSPECTION CERTIFICATE 3.1 | | ISSUE DATE: 2017-03-01 | | | | | | | | | | | | |
| <small> Columbus Stainless (Pty) Ltd P.O. Box 181 Middelburg 309 South Africa Telephone: +27 (0) 31 975 111 Fax: +27 (0) 31 975 185 Website: www.columbusstainless.co.za A Subsidiary of WCBMPOCCSA </small> | | <small> Columbus Stainless (Pty) Ltd 17 0845-076-0845 </small> | | <small> Columbus Stainless (Pty) Ltd 17 0845-076-0845 </small> | | 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 LPA808603 4086342A04 [2901 Kg] | | | | | | | | | | | | | | |
| TOLERANCE: ISO 9445-2 ; ASTM A480/480M ; ASME SA480/SA480M | | | | | | TYPE | X6Cr17 | | | | | | | | | | | |
| 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 | | | | | | | | | | | | |
| 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 | | | | | | | | | | | | |

Příloha č.3

Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN/

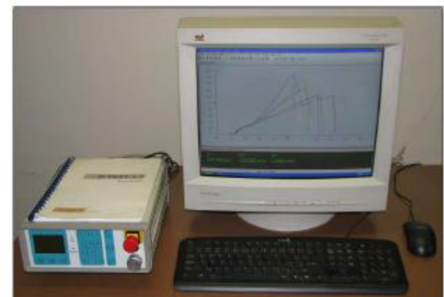
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

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

Technické parametry:

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

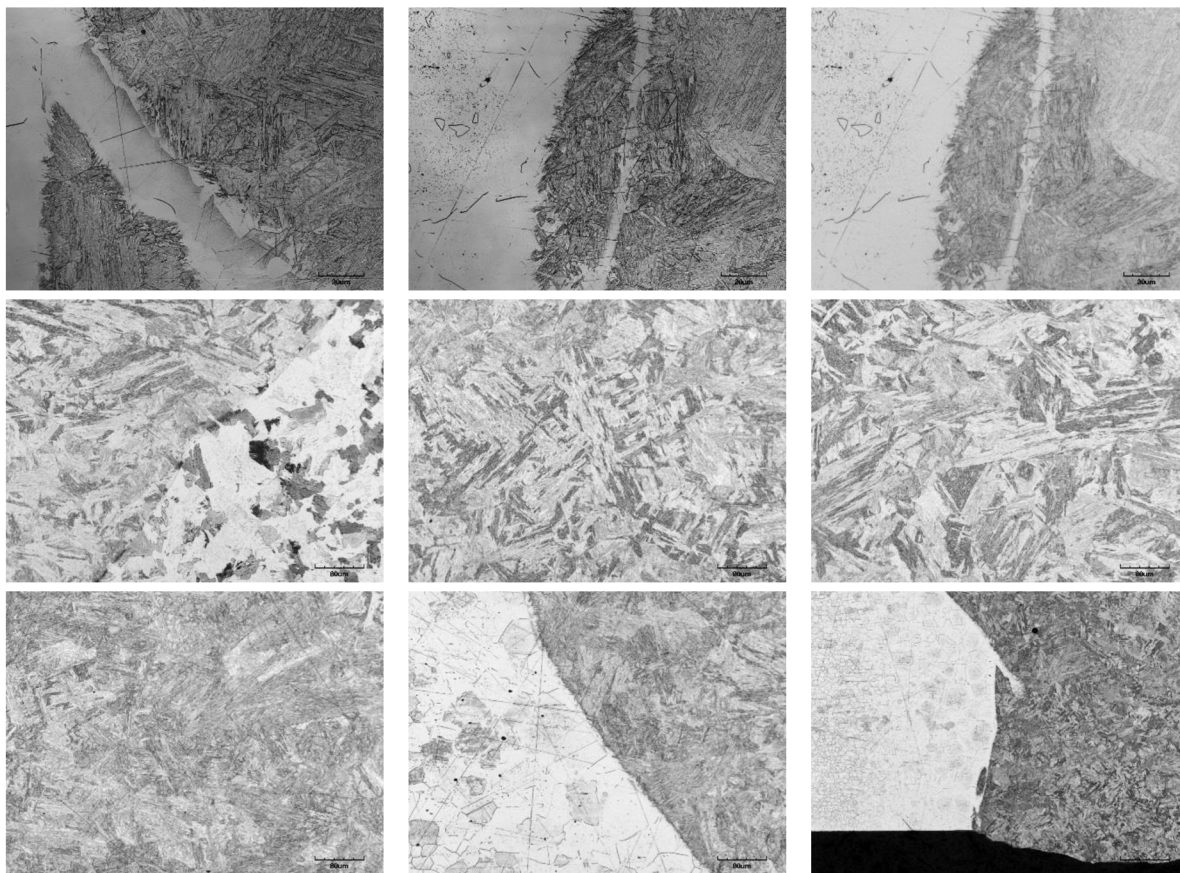
Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



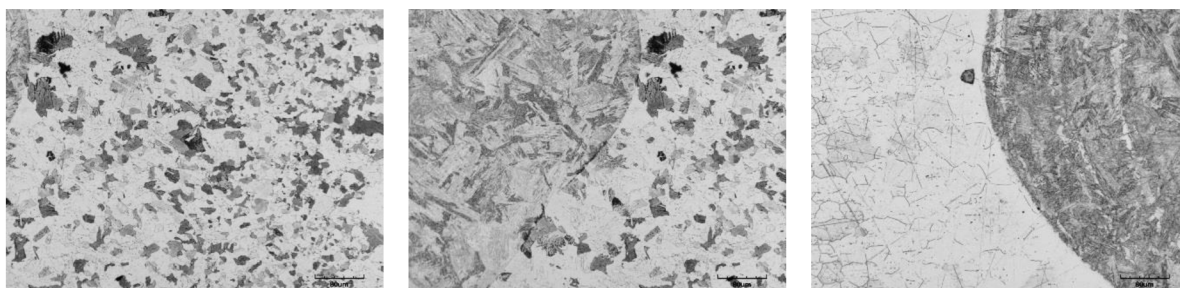
Řídicí jednotka EDC 60

Příloha č.4

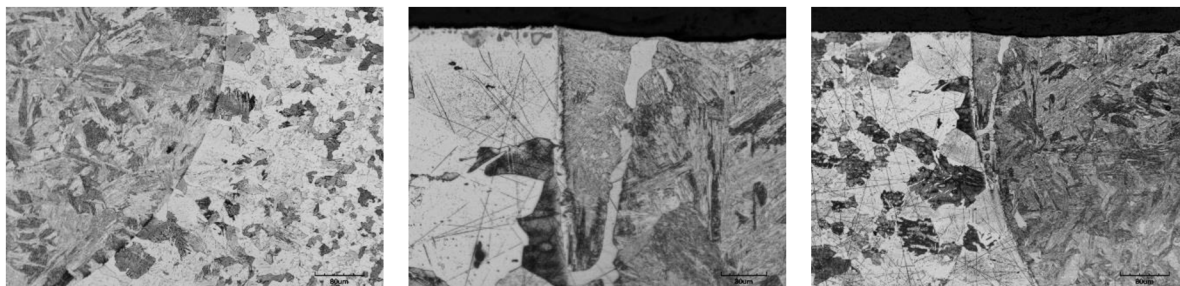
Vzorek 1



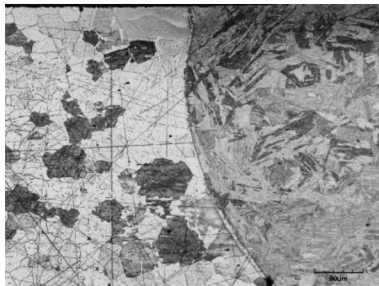
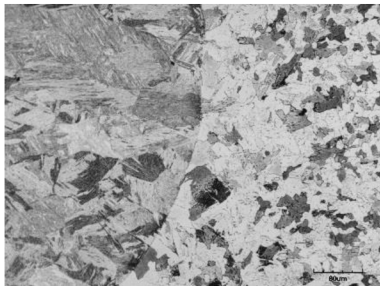
Vzorek 2



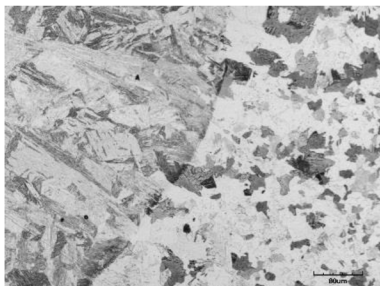
Vzorek 3



Vzorek 4



Vzorek 5



Vzorek 6

