



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POROVNÁNÍ LASEREM VYTVOŘENÝCH SVARŮ PŘI POUŽITÍ PŘÍMÉ A SKENEROVÉ SVAŘOVACÍ HLAVY

COMPARISON OF LASER WELDS WITH USING DIRECT AND SCANNER WELDING HEAD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Kudr

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

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

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

Porovnání laserem vytvořených svarů při použití přímé a skenerové svařovací hlavy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést porovnání geometrie, kvality a svařovací rychlosti svarů vzniklých při použití přímé a skenerové svařovací hlavy pro různé svařovací parametry a různé materiály.

Cíle diplomové práce:

- Osvojit si technologii laserového svařování.
- Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu.
- Osvojit si základy metalografického vyhodnocování svaru.
- Osvojit si technicko–ekonomické zhodnocení laserového svařování.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

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

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

KUDR Martin: Porovnání laserem vytvořených svarů při použití přímé a skenerové svařovací hlavy.

Práce předkládá porovnání přímého laserového a skenerového svařování. Nejprve je pomocí literární studie vysvětlena technologie laserového svařování a poté následuje praktické srovnání těchto metod. Experimenty byly provedeny na austenitické korozivzdorné oceli X5CrNi18-10 a na konstrukční oceli S235JR. U metod byly porovnány svařovací časy, geometrie a tvrdosti svaru, mechanické vlastnosti a také ekonomika použití v praxi. Ze srovnání vyplývá, že skenerové svařování je kvalitativně rovnocenné s konvenčním laserovým svařováním a navíc je ekonomicky výhodnější.

Klíčová slova: ocel X5CrNi18-10, ocel S235JR, skenerové svařování, laser, svařování

ABSTRACT

KUDR Martin: Comparison of laser welds with using direct and scanner welding head.

The master thesis presents a comparison of direct laser and scanner welding. At first, using literary studies explained the technology of laser welding, followed by a practical comparison of these methods. The experiments were performed on austenitic stainless steel X5CrNi18-10 and S235JR structural steels. These methods were compared in welding times, geometry and weld hardness, mechanical properties and economy of use in industry. The comparison shows that the scanner welding is qualitatively equivalent to the conventional laser welding and is also economical.

Keywords: Steel X5CrNi18-10, Steel S235JR, Scanner welding, laser, welding

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUDR, Martin. *Porovnání laserem vytvořených svarů při použití přímé a skenerové svařovací hlavy*. Brno, 2017. 62s, 7 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V dne 26. 5. 2017

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych velice rád poděkoval panu doc. RNDr. L. Mrňovi Ph.D. za cenné připomínky, čas a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu V. Řiháčkovi a panu Ing. K. Podanému Ph.D. za pomoc při zhotovení mechanických zkoušek. V neposlední řadě patří velký dík mé rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

| | |
|--|----|
| ÚVOD..... | 9 |
| 1 ROZBOR ZADÁNÍ..... | 10 |
| 1.1 Porovnání metod..... | 12 |
| 2 TEORIE A VYUŽITÍ LASERŮ V PRAXI | 15 |
| 2.1 Fyzikální princip a vlastnosti laseru..... | 15 |
| 2.2 Vlastnosti laseru..... | 17 |
| 2.3 Konstrukce laseru..... | 18 |
| 2.4 Rozdělení laserů | 19 |
| 2.5 Využití laserů v praxi | 20 |
| 2.6 Nejčastěji používané lasery v průmyslové praxi | 23 |
| 2.7 Laserové svařování přímou hlavou | 26 |
| 2.7.1 Interakce laserového svazku s materiálem | 27 |
| 2.7.2 Svařitelnost materiálů laserem | 28 |
| 2.7.3 Parametry laserového svařování..... | 29 |
| 2.7.4 Typy svarů, jejich vady a zkoušky..... | 30 |
| 2.8 Skenerové svařování - Remote welding | 33 |
| 3 Experimenty a vyhodnocení..... | 36 |
| 3.1 Svařovací čas | 36 |
| 3.2 Geometrie | 38 |
| 3.3 Tvrdost | 43 |
| 3.4 Tahová zkouška | 53 |
| 3.5 Stroje a přístroje použité pro experimenty..... | 60 |
| 4 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ | 61 |
| 5 ZÁVĚRY | 62 |

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

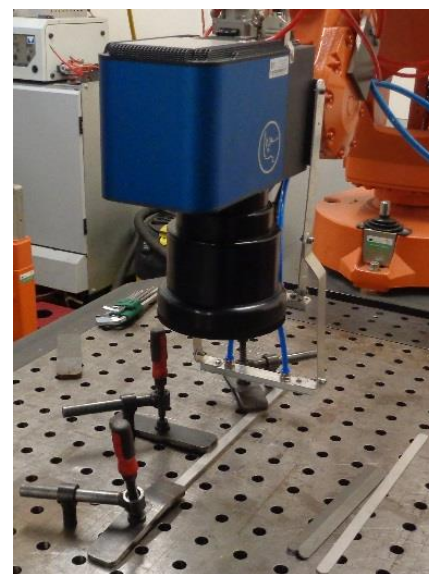
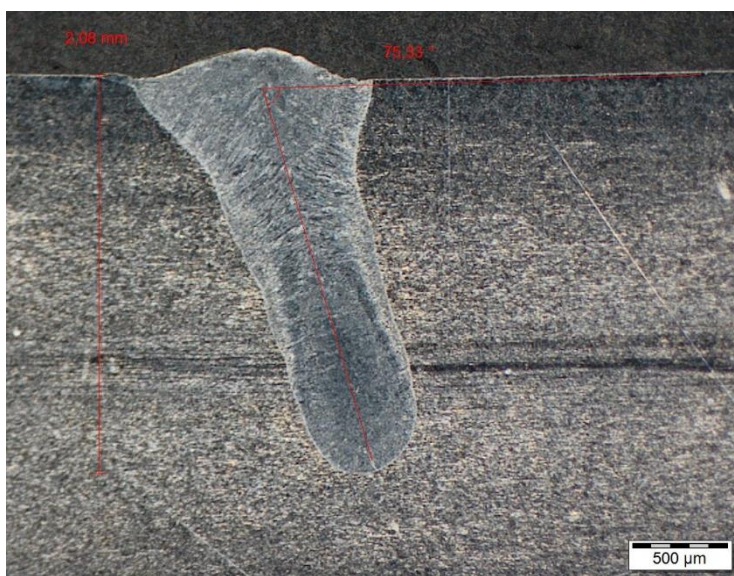
Seznam příloh

ÚVOD

V dnešní době je kladen velký důraz jak na kvalitu, tak také na efektivitu výroby. Oba tyto požadavky naplňují laserové technologie svařování. Významným hybným faktorem české ekonomiky je automobilový průmysl a právě v tomto odvětví je kladen největší důraz na výše zmíněnou kvalitu a efektivitu. Nejnovější progresivní metodou v laserovém svařování je metoda skenerového svařování. Tato metoda není zatím hojně rozšířena z důvodu vyšších pořizovacích nákladů a složitějšího programování oproti metodě konvenčního laserového svařování.

Metoda skenerového laserového svařování je schopna dosahovat vysoké svařovací rychlosti a je také schopna velice kvalitního svařování pomocí vychýleného laserové paprsku. Díky této vlastnosti, kdy stačí vychýlit paprsek místo pohybu celé svařovací hlavy, je efektivita ještě vyšší. Když vezmeme v úvahu vyšší rychlost i menší požadavky na pojezd samotné svařovací hlavy, dostaneme výrazně nižší svařovací časy.

V této diplomové práci jsou nejprve srovnány svařovací časy za použití obou metod a to u dvou různých materiálů. Následně jsou vyhodnoceny geometrie vzniklých svarů. Geometrie jsou porovnávány jak podle metody svařování, tak typu svařování. Zda-li je svar proveden kolmo, či vychýlením paprsků a svařováním pod úhlem. Jako poslední experiment byly provedeny tahové zkoušky, pro zjištění kvality a vhodnosti použití skenerového svařování v průmyslové praxi. Zkoušené materiály byly konstrukční ocel S235JR (1.0038, ČSN 11 375) a austenitická korozivzdorná ocel X5CrNi18-10 (1.4301, ČSN 17 240). Tyto materiály byly vybrány proto, že S235JR je běžně používaná konstrukční ocel pro svařování a austenitická ocel je hojně využívána pro svoji korozivzdornost a vhodnost použití v potravinářství.

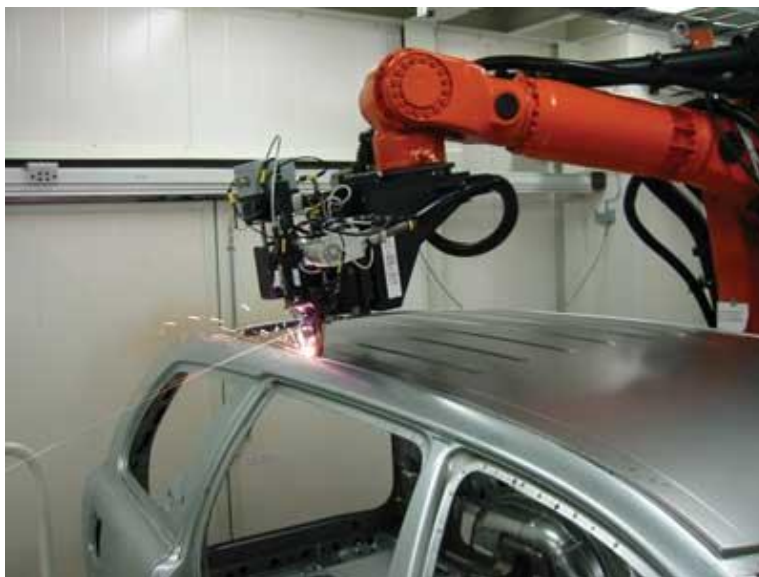


1 ROZBOR ZADÁNÍ [15], [38], [57], [62], [63], [66], [69]

Výroba automobilů je důležitým průmyslovým odvětvím v České republice a je také velkou hybnou ekonomickou silou. V automobilovém průmyslu je dnes kladen velký nárok na vyšší produktivitu, vyšší kvalitu a nižší hmotnost nových vozů. Nižší hmotnost je důležitá pro menší spotřebu paliva a tím také pro nižší zatěžování životního prostředí.

Laserová technologie se v automobilovém průmyslu začala používat poprvé ve Spojených státech amerických a to v roce 1970. Kvalita laserové paprsku byla v té době nesrovnatelně horší než nyní a také byl výrazně omezený výběr laserových zdrojů. Nejprve se laser využíval hlavně pro temperování, jako zdroj byl použit plynný CO₂ laser. S následným zavedením YAG laserů a tím zlepšení kvality svazku se začaly používat lasery o vyšším výkonu. Díky této revoluci v laserové technice bylo možné začít používat lasery pro další technologické aplikace, jako jsou řezání, vrtání a svařování.

Jako první použila laser pro svařování firma Ford Motor Co. v roce 1973. Laser byl použit pro svařování karosérie na montážní lince. V 80. letech 20. století se začal laser používat pro svařování dalších částí automobilů: částí převodovek, komponent airbagů a vstřikování paliva. V 90. letech 20. století se začaly laserem svařovat tvářené části karoserie, tzv. „tailor blanks“. Tato technologie se používá až do dnešní doby. Nejnovějším trendem ve svařování laserem je svařování 3D skenovací hlavou a to právě svařování karosérie a tailored blanks. Jako zdroj jsou použity lasery pevnolátkové, diskové a vláknové.



Obr. 1 Laserové svařování Volvo XC90 [38]

Velice často svařovaným materiálem v průmyslu je nelegovaná univerzální konstrukční ocel S235JR(1.0038, ČSN 11375). Oproti tomu korozivzdorná austenitická ocel X5CrNi18-10 (1.4301, ČSN 17 240, AISI 304) je hojně využívána v potravinářství. Tyto dva typy ocelí budou použity pro experiment.



Obr. 2 Součást sedadla automobilu z S235JR [62]

Ocel S235JR, někdy také označovaná 1.0038, je univerzální nelegovaná konstrukční ocel s vysokou vrubovou houževnatostí a dobrou svařitelností. Se zvyšující se tloušťkou materiálu vzniká riziko vzniku trhlin za studena. Tato konstrukční ocel je určena pro svařované součásti, strojní součásti a není důležité, zdali jsou součásti z této oceli namáhány staticky či dynamicky. Ocel je vhodná pro svařování všemi obvyklými způsoby. S rostoucí tloušťkou svařovaného materiálu a rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu se zvyšuje riziko vzniku trhlin za

studena v oblasti svaru. Tento materiál je využíván jak ve stavebnictví pro výrobu svařovaných konstrukcí nebo mostních konstrukcí, tak také ve strojírenství pro výrobu dutých ohýbaných profilů, součástí automobilů, strojů anebo také jako součásti tepelných a tlakových nádob v energetice. V tabulce 1 můžeme vidět chemické složení této oceli.

Tab. 1 Chemické složení - S235JR [Příloha 1]

| Chemické složení [hm. %] – S235JR | | | | |
|-----------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| C | Mn | P | S | N |
| max 0,17 | max 1,5 | max 0,045 | max 0,045 | max 0,007 |



Obr. 3 Použití oceli X5CrNi18-10 v petrochemickém průmyslu [71]

Dalším druhem testované oceli bude ocel X5CrNi18-10 (ČSN 17 240). Tato ocel je austenitická korozivzdorná. Tepelná odolnost materiálu je až do teplot 350 °C, nad teplotou 450 °C vznikají karbidy chromu (CrC) a to způsobuje náchylnost k mezi-krytalické korozi. Tato ocel je nekalitelná. Ocel je hlubokotažná, dobře obrobitelná i dobře svařitelná. Mimo vhodného použití v potravinářském průmyslu se hodí i pro farmaceutický a chemický průmysl. V tabulce 2 je uvedeno její chemické složení. Svařitelnost této oceli je velmi dobrá, až na výše zmíněnou mezi-krytalickou korozi.

U průvaru nad 5 mm je nutné svarovou oblast žíhat. Tato ocel má také tendenci ke zpevňování za studena (při tažení za studena),

to je zapříčiněno přetvořením austenitu na deformačně indukovaný martenzit. Tím dochází ke ztrátě tažnosti a zvýšení pevnosti. Díky častému využívání tohoto materiálu v chemickém a potravinářském průmyslu byl vybrán pro experimentální porovnání.

Tab. 2 Chemická složení X5CrNi18-10 [Příloha 2]

| Chemické složení [hm. %] – X5CrNi18-10 | | | | | | | |
|--|---------|---------|-------------|------------|-----------|-----------|----------|
| C | Mn | Si | Cr | Ni | P | S | N |
| max 0,07 | max 2,0 | max 1,0 | 17,0 – 19,5 | 8,0 – 10,5 | max 0,045 | max 0,015 | max 0,11 |

V následující tabulce 3 je porovnání mechanických vlastností u těchto dvou testovaných ocelí. Údaje vychází z materiálových listů daných ocelí.

Tab. 3 Porovnání mechanických vlastností [Příloha 1], [Příloha 2]

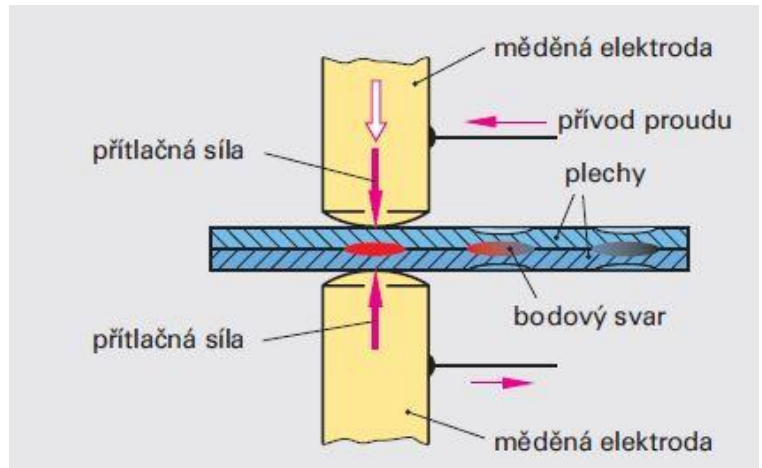
| Porovnání mechanických vlastností | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|--|
| Mechanické vlastnosti | Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] min | Mez pevnosti R_m [MPa] | Tažnost A_5 [%] min | Modul pružnosti v tahu E_t [GPa] při 20 °C |
| S235JR | 235 | 360 - 510 | 21 | 206 |
| X5CrNi18-10 | 230 | 540 - 750 | 45 | 200 |

1.1 Porovnání metod [2], [3], [9], [16], [33], [34]

Pro srovnání dvou metod svařování byly vybrány metody svařování přímou laserovou hlavou a skenerovou laserovou hlavou. Do srovnání je ovšem zařazena také metoda odporového svařování, neboť odporové bodové svařování je velice často využíváno pro svařování karoserií automobilů.

- Bodové svařování elektrickým odporem – tato metoda patří do tlakového svařování.

U této technologie dochází ke svařování v místě ohřátém na svařovací teplotu odporovým teplem. Toto teplo vzniká průchodem elektrického proudu o vysokém proudu (až 100 000 A) a nízkého napětí (5 až 15 V) svařovaným materiálem. Množství tepla vzniklého průchodem elektrického proudu je dáno Joule - Lenzovým zákonem:



Obr. 4 Schéma odporového bodového svařování [9]

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \text{ [J]}$$

(1.1)

kde: Q – množství vzniklého tepla (odporové teplo) - [J]

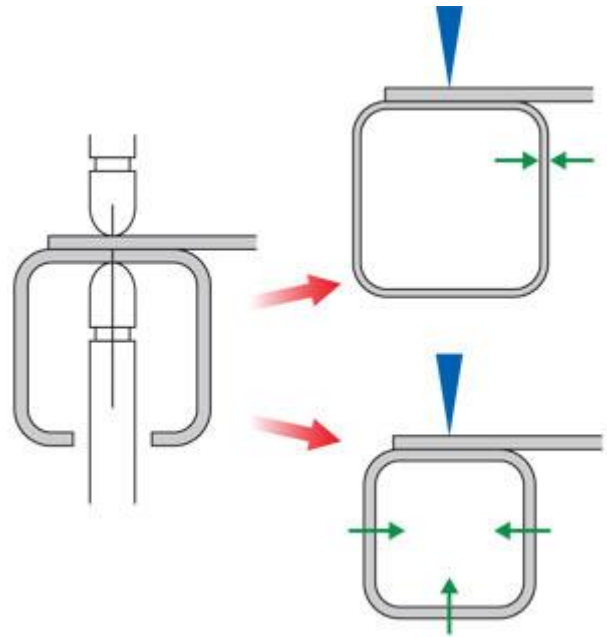
R – celkový odpor svarového spoje – [Ω]

I – svařovací proud [A]

t – doba průchodu svařovacího proudu [s]

V místě průchodu svařovacího proudu materiálem vzniká malá oblast taveniny, tato oblast se nazývá svarová čočka. V současné době se nejčastěji používá tvrdý svařovací režim, to znamená, že je vysoký proud, krátký svařovací čas a vysoký stlačovací tlak, viz obr. 4. Bodové svařování je používáno pro přeplátované plechy od tloušťky 0,4 až do tloušťky 5 mm, ve výjimečných případech až o tloušťce 10 mm. Toto svařování může být prováděno na stabilních nebo i závěsných svářečkách. Metoda je výhodná pro hromadnou velkosériovou výrobu a je používána hlavně pro svařování karoserií automobilů, obráběcích strojů a podobně. Velice často jsou odporové svářečky robotizovány a zasazeny do výrobních linek.

- Svařování přímou laserovou hlavou – svařování laserem patří mezi nejmodernější metody spojování materiálů. Při svařování laserovou přímou hlavou je paprsek soustředěn do úzkého svazku a opticky zaostřen do ohniska malých rozměrů. K ohřevu materiálů dochází dopadem fotonů. Díky vysoké energii dopadajících fotonů je rychlost ohřevu mnohonásobně vyšší než odvod tepla do okolí. Jedinečné vlastnosti laserového paprsku (koherentnost a monochromaticnost) zajišťují oproti jiným metodám



Obr. 5 Porovnání bodového a laserového svařování [3]

přesné svary, relativně bez trhlin, nečistot a pórů. U svarů provedených laserovým svazkem je také velice malé tepelné ovlivnění materiálu a tím také minimální deformace způsobené svařovacím teplem. Navíc tato technologie dosahuje velké svařovací rychlosti a jednoduché automatizace. Toto jsou hlavní důvody, proč je technologie laserového svařování velice oblíbená v průmyslové praxi, a to hlavně při výrobě kvalitních a sériových dílů. Touto metodou můžeme svařovat ve dvou režimech, v režimu povrchového (kondukčního) svařování nebo v režimu penetračního svařování („keyhole“). Povrchové svařování se používá pro svařování tenkých plechů a fólií. Svar vzniká tím, že materiál absorbuje záření, tím se zahřívá a natavuje povrchová vrstva. Hloubka svaru u této metody dosahuje do 2 mm. U druhé metody dochází díky vyšší hodnotě plošné hustoty energie (10^6 W/cm²) ke vzniku kapiláry a laserový paprsek proniká hlouběji do materiálu. Takto vzniklou kapiláru nazýváme keyhole. Metoda je schopná svařovat ocel až do tloušťky 10 mm. Laserem je možné svařovat velké množství materiálů, od železných po neželezné a dokonce i plasty či sklo. Oproti metodě odporového svařování má laserové svařování lepší kvalitu svaru, lepší přístup ke svarovému spoji, menší tepelně ovlivněnou oblast a hlavně mnohem vyšší svařovací rychlost. Lepší přístup ke svařované součástce je zobrazen na obr. 5. Zde je možno vidět, že je jednodušší také svařovat materiály o různých tloušťkách. Laserové svařování se hojně využívá v automobilovém průmyslu a výrobě přesných součástek.

- Laserové svařování skenerovou hlavou, nazývané také „remote welding“ – je nejnovější metoda laserového svařování. Tento typ laserového svařování se od konvenčního liší tím, že zde není žádná pevná optická hlava, nýbrž je zde skenerová hlava. Skenerová hlava je schopna laserový paprsek



Obr. 6 Skenerové svařování v automobilovém průmyslu [3]

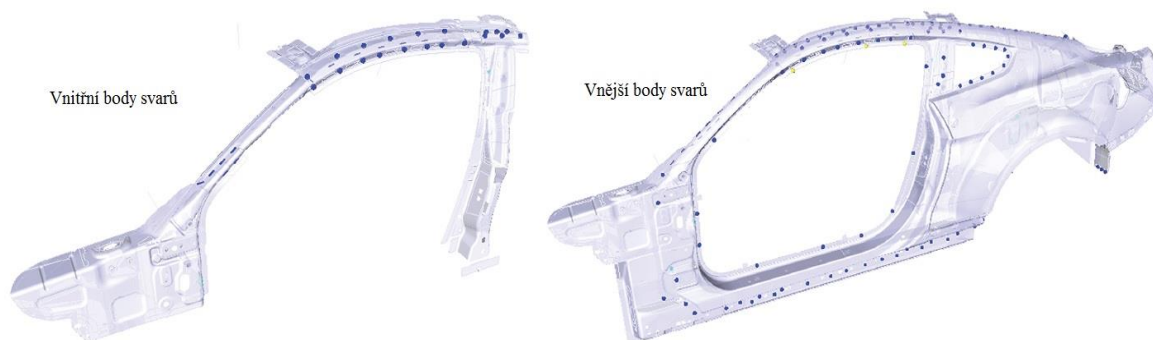
vychýlit pomocí zrcadel a tím nahrazuje pohyb celé svařovací hlavy. Díky malému pohybu zrcadla se laserový paprsek může posunout o velkou vzdálenost. Skenerová svařovací hlava může být osazena na robotu a když je pohyb robotu synchronní se skenerovou hlavou, dostáváme neporovnatelně vyšší dynamiku oproti konvenčním metodám svařování. To je také hlavní výhodou této metody. Když navíc k velké dynamice připočteme výhody svařování laserovým paprskem, získáme velice efektivní způsob pro svařování karoserií automobilů a jiných sériových součástek, u nichž je potřeba zaručit vysokou kvalitu svaru. Svařování automobilové karoserie je zobrazeno na obr. 6. Mezi nevýhody metody skenerového svařování patří vysoká pořizovací cena a náročnější programování synchronizovaného pohybu robotu a paprsku. Pro ukázkou vysoké efektivnosti této metody je v tabulce 4 uveden příklad použití skenerového svařování u svařování karosérie Fordu Mustang 2017 s metodou, jež byla používána dříve. Na obrázku 7 jsou zaznačena místa svarů.

Tab. 4 Porovnání přímé a skenerové svařovací hlavy [16]

Porovnání metod u svařování Fordu Mustang 2017

| | Skenerové svařování | Dřívější metoda |
|---|---------------------|-----------------|
| <i>Čas svařování (79 svarů) [s]</i> | 22 | 111 |
| <i>Počet potřebných svařovacích robotů [ks]</i> | 4 | 12 |
| <i>Počet potřebných manipulačních robotů [ks]</i> | 2 | 4 |
| <i>Počet manipulačních cyklů [-]</i> | 1 | 3 |

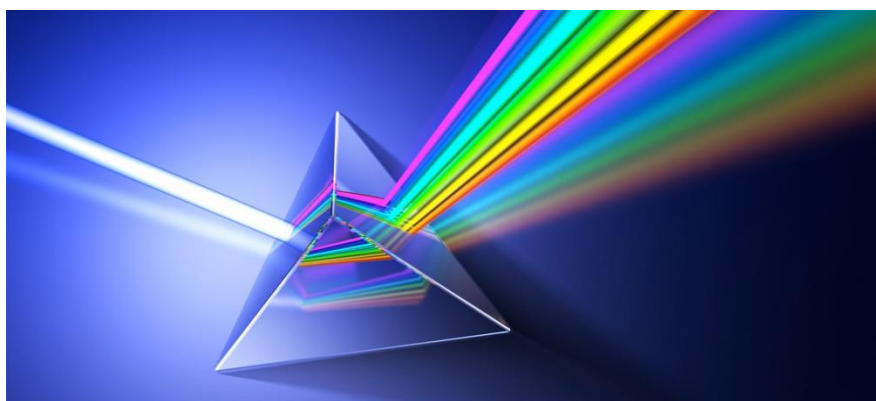
Díky lepšímu přístupu je menší počet manipulačních cyklů a díky menšímu počtu robotů je také významná úspora zastavěného místa.



Obr. 7 Zobrazení svařovacích bodů karosérie Fordu Mustang 2017 [16]

2 TEORIE A VYUŽITÍ LASERŮ V PRAXI [1], [5], [9],[11], [14], [18]

Jak už samotná zkratka LASER (light amplification by stimulated of radiation) napovídá, jedná se o zesílení světla stimulovanou emisí záření. Pojmem laser v dnešní době rozumíme zdroj světla, elektromagnetického záření, o určitých vlastnostech, jako jsou například koherentnost a nebo také monochromaticnost. Laser má v dnešním moderním světě nezastupitelnou a důležitou roli, jak v průmyslových aplikacích, tak v našem každodenním životě.



Obr. 8 Laser [81]

2.1 Fyzikální princip a vlastnosti laseru [3], [4], [6], [10], [26], [32], [37], [55], [67], [68], [78]

Laserový paprsek je vlnění optického druhu a patří do skupiny elektromagnetického záření. Na rozdíl od běžného záření, však laserový paprsek obsahuje jen vlnění o jediné vlnové délce. Běžné světelné záření také obsahuje vlny o různé frekvenci, které jsou rozbíhavé. Tomu se u laserového paprsku podařilo zabránit. Získání laserového paprsku je možné díky stimulované emisi záření, ta nastává u laserů v aktivním prostředí. V aktivním prostředí se médium, atom či molekula, může nacházet v základním stavu s nižší energií nebo v excitovaném (vybuzeném) stavu s vyšší energií. Při interakci fotonu s aktivním prostředím může nastávat stimulovaná emise záření. Rozeznáváme 3 základní typy interakcí, absorpci, spontánní emisi a stimulovanou emisi záření. Během přechodu média z nižšího energetického stavu do vyššího nastává absorpce a při přechodu z vyššího energetického stavu do nižšího nastává zase emise. Ta se dále dělí na spontánní a stimulovanou emisi.

Podle kvantové fyziky může molekula nebo atom přijmout či vyzářit energii jen v určitých nejmenších dávkách – kvantech. Kvanta jsou rozdílem v energetických hladinách, které může prvek (elektron, atom, molekula) zaujmout. Rozdíl mezi energetickými hladinami je dán Bohrovým vztahem:

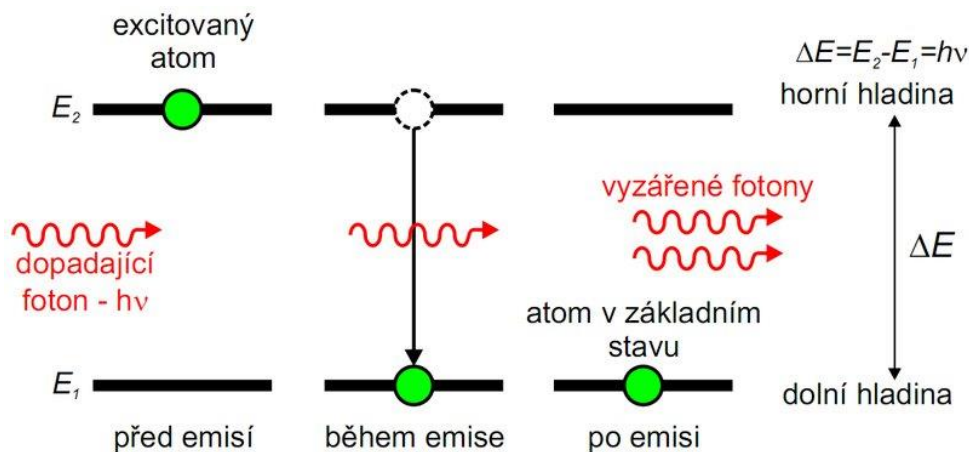
$$\Delta E = h \cdot \nu, \quad (2.1)$$

kde: ΔE – energetický rozdíl hladin [J]

h – Planckova konstanta - $6,625 \times 10^{-34}$ [J · s]

ν – frekvence vyzářeného fotonu [Hz]

Schéma interakcí a přechodů z energetických hladin můžeme vidět na obr. 9.



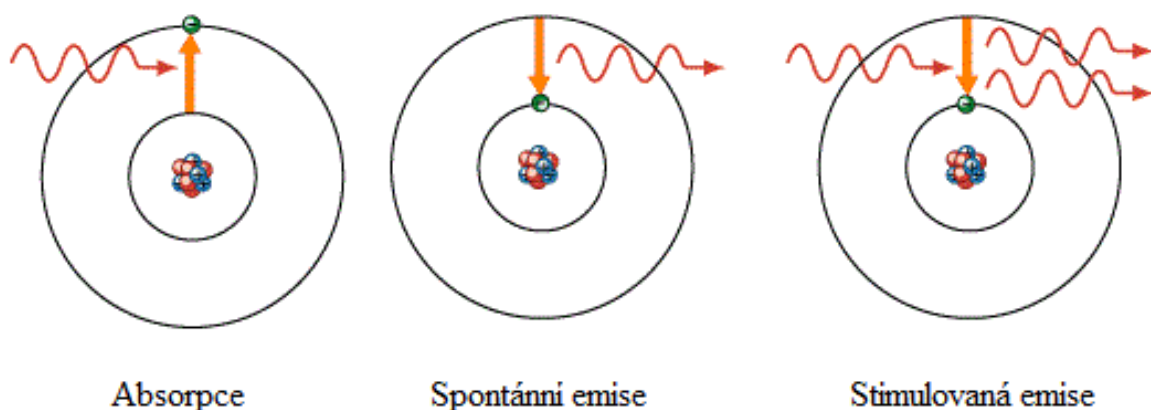
Obr. 9 Schéma přechodů atomu z různých energetických hladin [32]

Jsou dány dvě energetické hladiny 1 a 2 určitého atomu prvku. Každá z hladin má energii, E_1 a E_2 , kde $E_1 < E_2$. Atom je z počátku v energetické hladině 1 a také by v ní zůstal, kdyby mu nebyla dodána energie. Poté, co atom absorbuje energii, se přesune do vyšší energetické hladiny 2. Tento jev je nazýván absorpcí. Jenže atom má tendence přejít zpět do energeticky výhodnější hladiny 1. Při tom musí atom dříve absorbovanou energii ($E_2 - E_1$) vyzářit. Energie je vyzářena pomocí elektromagnetické vlny a tomuto se říká spontánní emise.

Frekvence vyzářeného záření je dána vztahem:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}, \quad (2.2)$$

V okamžiku, kdy je atom v 2. energetické hladině a současně na něj dopadají elektromagnetické vlny s frekvencí ν , to znamená s frekvencí spontánně emitované vlny, dopadající elektromagnetická vlna donutí přejít atom z 2. do 1. energetické hladiny a přitom atom emituje energii $E = h \cdot \nu$. Emitované vlnění má stejnou fázi a směr jako dopadající vlna. Vznikající vlny se následně skládají a zesilují. Toto je princip stimulované emise záření. Tento princip je zachycen na obr. 10. Pro trvalou stimulovanou emisi, je nutný přebytek částic ve vyšší energetické hodnotě.



Obr. 10 Absorpce, spontánní emise a stimulovaná emise [36]

2.2 Vlastnosti laseru [4], [37], [55], [64], [78]

Díky tomu, že emitované fotony mají stejnou energii, frekvenci, směr, polarizaci a fázi jako dopadající - budící fotony, má laserové záření jedinečné vlastnosti.

Mezi nejdůležitější vlastnosti patří:

- **Monochromaticnost** – ideálně jsou v laseru emitovány všechny fotony o stejné energii a tedy i o stejné vlnové délce. To znamená, že se jedná o monochromatické záření. Energie fotonu je určena vztahem:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.3)$$

kde: c – rychlost světla ve vakuu [299 792 km/s],

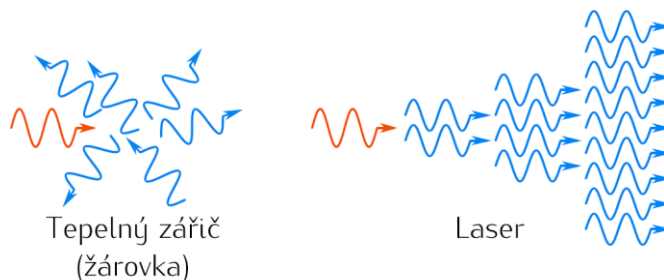
λ – vlnová délka [m].

- **Koherence** – mimo stejné vlnové délky mají fotony také stejnou fázi. Ideálně laser emituje jednu dlouhou spojitou intenzivní vlnu. Díky této vlastnosti můžeme laser použít pro mnoho aplikací na bázi optické interference.
- **Kolimace - směrovost a intenzita** – laickým pohledem je právě kolimace – směrovost tím největším rozdílem mezi běžným a laserovým zdrojem optického záření. Neboť u laserového paprsku můžeme jasně vidět, že se paprsek šíří jen jedním směrem. Intenzita světla je definována jako množství světla vycházejícího ze zdroje na jednotku plochy. Ideální laserový zdroj funguje jako bodový zdroj o velké intenzitě záření. Porovnání klasického zdroje a laserové zdroje je zobrazeno v tabulce 5 a na obrázku 11.

Mezi další veličinu popisující kvalitu laserového svazku a jeho použití v konkrétní situaci je BPP (beam parametr product). Tato veličina udává schopnost fokusace svazku. Se zvětšující se vlnovou délkou λ je obtížnější fokusace a také se dosahuje vyššího BPP, tím pádem zhoršení kvality svazku.

Tab. 5 Porovnání klasického zdroje a laseru [55]

| Klasický zdroj | LASER |
|---|--|
| Záření se šíří rovnoměrně do celého prostoru | Záření vychází ve formě úzkého paprsku o malém průměru |
| Záření je barevné tzn., obsahuje mnoho vlnových délek | Paprsek má jen jednu barvu to znamená, že je monochromatický |
| Jednotlivé světelné vlny nejsou synchronizovány | Vychází jen jedna synchronní vlna |
| Zaostření do plošky | Zaostření svazku do bodu |



Obr. 11 Porovnání klasického zdroje a laseru [4]

2.3 Konstrukce laseru [4], [6],[10], [37],[54], [64], [78]

Laser je složen z několika částí, mezi hlavní patří aktivní prostředí, čerpací systém a optický rezonátor. Dále je laser velice často vybaven chlazením, řídicí a kontrolní elektronikou. Některé typy laserů jsou také vybaveny optickým vláknem.

- Aktivní prostředí – je látka, v níž jsou obsaženy oddělené kvantové hladiny elektronů. Aktivní prostředí můžeme dělat dle skupenství dané látky, viz tab. 6.

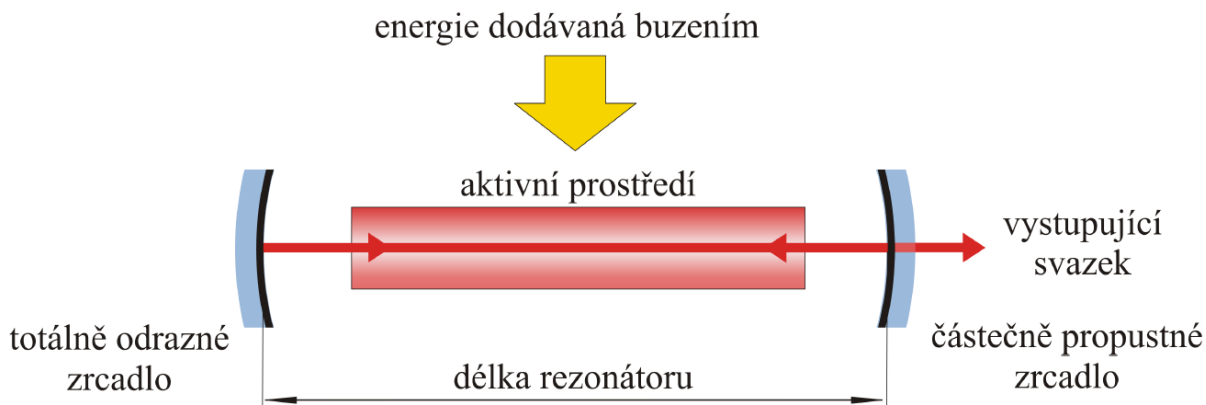
Tab. 6 Rozdělení aktivních prostředí [37]

| Dělení podle skupenství | Další rozdělení | Vlastnosti |
|-------------------------|--|---|
| Plynné | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Atomární – He-Ne, Cu, I ➤ Iontové – Ar²⁺, Ne²⁺, Kr²⁺, He-Cd ➤ Molekulové – H₂, N₂, CO, CO₂ | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Prostředí jen mírně ovlivňuje kvalitu svazku, malá divergence ➤ Malá hustota aktivních částic, nutnost použití velkých rezonátorů |
| Kapalné | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Roztoky organických barviv (Oxazin, Xanten) ve vhodných rozpouštědlech (voda, aceton) ➤ Roztoky soli a ionty vzácných zemin (Nd, Ho, Er) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Malá chem. a fotochemická stabilita organických barviv ➤ Možnost změny vlnové délky v jednom prostředí |
| Pevné | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Ionty vzácných zemin (Nd, Ho, Er, Yb) dopované ve skle nebo umělých krystalech (YAG, YLF, YVO) ➤ Polovodičový přechod (GaAs, InGaAs) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Jednoduchá konstrukce, velká stabilita aktivního prostředí ➤ Pomocí filtru možnost změny vlnové délky (na polovinu, třetinu, čtvrtinu) ➤ Kvalita svazku je závislá na zahřívání aktivního prostředí |

- Čerpací systém – též nazývaný budící systém. Jeho funkcí je dodávat energii aktivnímu prostředí a tím zajistit přebytek částic ve vyšším energetickém stavu. Tím zajišťuje inverzní populaci nutnou pro stimulovanou emisi. Dělí se podle formy čerpací (budící) energie na elektrický, chemický, světelný nebo mechanický budící systém.
- Optický rezonátor – je součástí, jež zajišťuje větší počet stimulovaných přechodů na místo spontánních přechodů. Prakticky se jedná o optickou dutinu, jež je omezena zrcadly. Nejčastěji je rezonátor tvořen dvěma zrcadly, z nichž je jedno polopropustné a jedno zcela odrazivé. Záření vystupující z aktivního prostředí se odrazí od zrcadla a poté vstupuje zpátky do aktivního prostředí, kde funguje jako impuls pro další stimulovanou emisi. Takovými opakovanými odrazy je laserové záření zesilováno. Jakmile laserové záření dosáhne požadované intenzity, opouští svazek záření polopropustným zrcadlem rezonátor. Svazek může být dále upraven systémem čoček, clon a filtrů.
- Chladicí zařízení – při buzení aktivního prostředí, ztrátách v rezonátoru a také ztrátách v optických prvcích, jimiž prochází svazek, dochází k významnému ohřevu mnoha součástí laseru. Proto musí být každý výkonový laser vybaven taktéž chladicím zařízením. Chlazení nejčastěji zajišťuje proudění kapaliny, většinou demineralizované

vody. Nejvíce je na teplotu citlivý laser, v němž je aktivní prostředí tvořeno krystalem. U těchto laserů se totiž s teplotou mění rozměry a vlastnosti krystalu.

- Řídící a kontrolní elektronika – nebo také řídicí počítač. Tato součást laseru zajišťuje fokusaci svazku, nastavení různých parametrů paprsku, kontrolu a i samotné jednoduché pohyby laseru.
- Optické vlákno – slouží pro přenos laserového světelného svazku ze zdroje. Schéma konstrukce laseru je zobrazeno na obrázku 12.



Obr. 12 Schéma konstrukce laseru [18]

2.4 Rozdělení laserů [4], [6], [35], [37], [53], [55], [64], [68], [78], [79]

Lasery je možné dělit podle mnoha kritérií, například podle typu aktivního prostředí, vlnové délky, pracovního režimu, způsobu buzení, výkonu, použití a také dalších parametrů.

Podle typu aktivního prostředí:

- Plynové – atomární – He-Ne, He-Cd
iontové – Ar, Kr
molekulární – CO₂, N₂, H₂
- Pevnolátkové – Nd:YAG, Nd:sklo, Yb:YAG, rubínový
- Diodové (polovodičové) – GaAs, GaN, PbSnSe, InAsSb
- Kapalinové – na bázi organických barviv: oxazine, coumarin, fluorescein, cyanin

Podle vlnové délky:

- Infračervené – vlnová délka 780 nm až 1 mm
- Viditelné – vlnová délka 360 nm až 780 nm
- Ultrafialové – vlnová délka 10 nm až 360 nm
- Rentgenové – vlnová délka 0,1 nm až 10 nm

Podle režimu práce:

- Kontinuální – nepřetržité záření
- Pulsní – ns, ps, fs pulsy s vysokou opakovací frekvencí
- Impulsní – vysoce energetické pulsy s nízkou opakovací frekvencí

Podle způsobu buzení:

- Optické čerpání
- Elektrickým výbojem
- Chemickou reakcí
- Elektronovým svazkem

2.5 Využití laserů v praxi [8], [14], [19], [21], [23], [25], [30], [37], [41], [42] [43], [44], [45], [46], [47], [48], [61], [68], [70], [78]

Laser se za dobu své existence uplatnil v celé řadě oborů, za to vděčí své univerzálnosti a kvalitě vzniklého laserového záření. Škála strojů a přístrojů, v nichž je použit laser, je velice široká. S lasery se nesetkáváme jen v laboratořích, či průmyslu, nýbrž i v domácnostech.

- Důležité je použití laseru také ve výzkumu a metrologii. Často se využívá pro měření vzdáleností, pro použití holografie, laserové spektrometrie, laserové bezdrátové komunikace, laserového radaru, laserové závory a alarmu. Laser se také například využívá pro restaurování památek.
- Technologicky vyspělé státy světa implementují do své výzbroje laserové zbraně. Jedná se jak o laserové ruční zbraně, tak vybavení válečných lodí či letadel. Výhodami laserového paprsku v tomto odvětví je vysoká rychlost paprsku (300000 km/s), neslyšitelnost a neviditelnost používaných paprsků. Velkou nevýhodou použití těchto zbraní je ale energetická náročnost.
- V průmyslové praxi se laserový paprsek používá pro vrtání, řezání, svařování, navařování, zpracování povrchů, čištění povrchů, 3D tisk a další.

➤ Laserové čištění

Čištění povrchu laserem je označováno jako přelomová technologie v tomto oboru, neboť je to vysoce efektivní, ekonomicky výhodná a ekologická technologie. Princip této technologie spočívá v ultrakrátkých laserových pulzech. Tyto pulzy odstraňují nečistoty bez porušení nebo tepelného ovlivnění podkladové vrstvy. Pro čištění laserem se nejčastěji používají pulzní vláknové zdroje a to nejčastěji Nd:YAG nebo TEACO₂. Laser Nd:YAG pracuje s vlnovou délkou 1,06 μm až 1,08 μm a TEACO₂ s vlnovou délkou od 9,6 μm do 10,6 μm. Samotný laserový systém může mít mnoho podob, od ručního provedení, obr. 13, až po podobu robotické 3D integrace na výrobní lince. Při čištění je laser schopen nahradit i vícero různých metod najednou, je dokonce schopen odstranit z materiálů povrchovou vrstvu oxidů, to je možné vidět na obr. 14. Laserové čištění má mnoho výhod, například ekologičnost procesu (není nutné pro čištění používat chemické látky), nedochází k poškození čištěného povrchu, nízké provozní náklady, tichý



Obr. 13 Ruční laserové čištění provoz, [14]

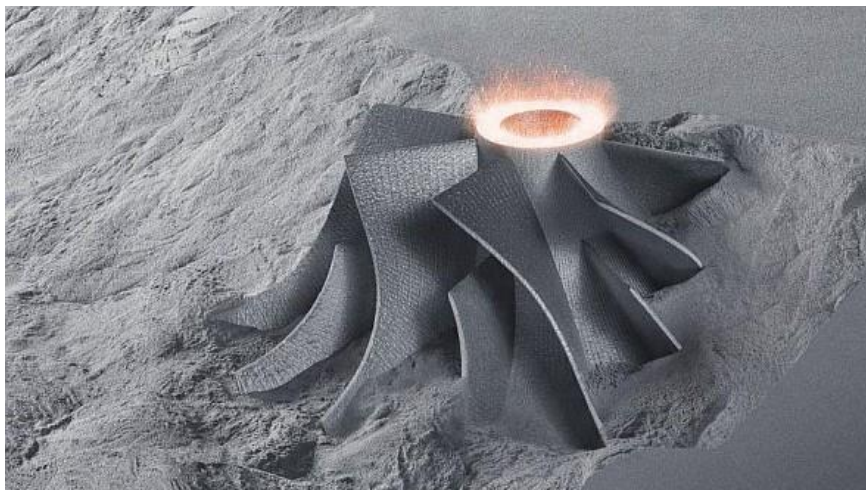


Obr. 14 Laserové čištění od koroze [23]

a bezprašný provoz, preciznost čištění a vysoká rychlost čištění. Rychlost čištění pro čištění povlakovaného kovu je až 29 000 mm²/s. Díky těmto výhodám se laserové čištění s úspěchem používá pro čištění plastikářských a přesných forem, tiskařských válců, nástrojů pro PVD povlakování či pro čištění od laků, maziv a koroze.

➤ 3D tisk

Tato technologie bývá také označována jako aditivní výroba a je to technologie, která slouží k výrobě trojrozměrných objektů z digitálních formátů dat. U technologie kovového 3D tisku se postupně nanáší vrstvičky kovu, který je následně nataven laserovým paprskem. Po ztuhnutí jedné vrstvy, se nanese další vrstva a celý proces se opakuje, dokud není celá součást vyrobena. Pomocí toho lze vyrobit tvarově velice složité výrobky. Laser se využívá u 4 základních typů kovového 3D tisku. Tyto technologie jsou: selektivní laserové tání (SLM – selective laser melting), selektivní laserové spékání (SLS – selective laser sintering), přímé kovové laserové spékání (DMLS – direct metal laser sintering) a technologie společnosti Concept laser cusing (LC). Kovový 3D tisk se používá nejčastěji pro rapid prototyping a to



Obr. 15 3D tisk kovu [61]

zejména díky jeho vlastnostem. Mezi největší výhody patří: snížení nákladů na nástroje a zařízení, z důvodu menšího odpadu oproti jiným technologiím výroby, rychlá výroba, nové konstrukční možnosti, vysoká kvalita výsledného výrobku.

Hlavní nevýhodou můžeme označit cenu této technologie.

Aplikace 3D kovového tisku jsou zejména v automobilovém a leteckém průmyslu, ve výrobě forem a v lékařství při tisku kloubních náhrad, zubů a podobně. Na obr. 15. můžeme vidět kovový 3D tisk lopatky.

➤ Laserové kalení

Povrchové kalení je používáno ke zvýšení pevnosti materiálu a ke zvýšení odolnosti proti opotřebení. Pro laserové kalení se nejčastěji používají lasery CO₂, Nd:YAG, vláknové a nově také diodové lasery. Pomocí těchto laserů můžeme tepelně zpracovat materiál velice rychle a jen v požadovaných místech a to až do hloubky 2,5 mm. Hloubka je závislá na kaleném materiálu. Kalit můžeme rozličné materiály, jako třeba běžné konstrukční oceli, vysoce legované konstrukční oceli, nástrojové oceli, šedé litiny. Podmínkou pro přímou kalitelnost materiálu je to, aby obsahoval minimálně 0,22% uhlíku. Při kalení laserovou technologií vzniká oproti jiným technologiím velice jemnozrná struktura. Princip této metody spočívá v rychlém zahřátí, výdrži na teplotě a následném prudkém ochlazení. Mezi největší výhody této metody je kalení v přesně určených místech, minimální teplotní deformace, jednoduché snímání okamžité teploty (termokamerami nebo pyrometry), nízká oxidace povrchu, nevznikají povrchové trhliny, minimální nebo žádná potřeba dalšího opracování, vysoká energetická účinnost, ekologičnost a snadná automatizace procesu. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena laseru. Nejvíce se tato metoda používá při kalení tvarově složitých licích a lisovacích forem, střížných a ohýbacích nástrojů, ložiskových



Obr. 16 Laserové kalení ozubeného kola [41]

pouzder, ozubených kol, lopatek turbín, pístních kroužků a při dalších aplikacích. Na obr. 16. je vyobrazeno povrchové kalení ozubeného kola.

➤ Laserové řezání

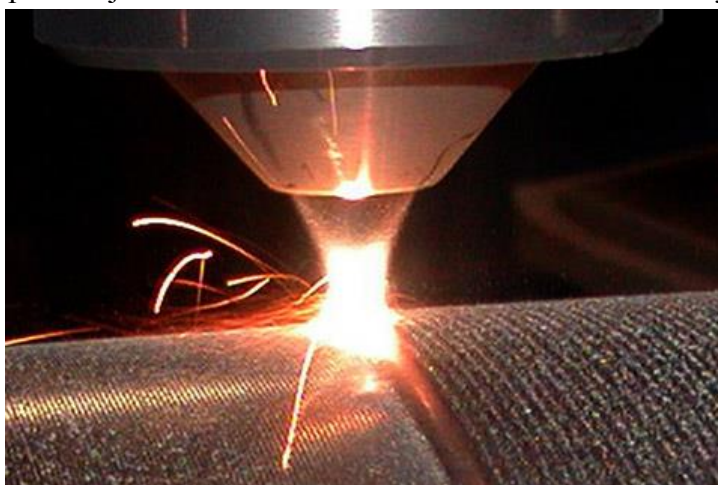
Laserové řezání materiálů je nejrozšířenější průmyslovou aplikací laseru. Pro průmyslové řezání laserovým svazkem se používají hlavně dva typy laserů - plynový CO₂ laser a vláknové lasery. Tyto lasery mohou být použity v 2D plošných řezacích centrech, 3D robotických centrech nebo také nově tzv. remote cutting. Kdy je laserový paprsek veden pomocí soustavy zrcadel. Řezání laserem se dělí na tři základní metody: tavné, oxidační a sublimační řezání. Princip tavného řezání spočívá v roztavení a následném vyfouknutí materiálu z řezné spáry. Vyfouknutí je prováděno inertním plynem. Když namísto inertního plynu použijeme kyslík, vznikne exotermická reakce, která má za následek zvýšení teploty v řezu, to je oxidační řezání. Tímto můžeme řezat do větších hloubek a vyšší rychlostí, kvalita řezu je však nižší. Při sublimačním řezání je v místě řezu materiál vypařován, pro tuto technologii je potřeba mít laserové záření o vysoké intenzitě. Laserovým svazkem je možno řezat rozličné materiály a to kovové i nekovové. Na obr 17. můžeme vidět laserové řezání kovového plechu. Například můžeme řezat oceli, měď, hliníky, bronzy, stříbro, mosaz ale i plasty, gumy, akryláty, papír, dřevo, textil a další materiály. Tloušťky, jež můžeme laserem řezat, se pohybují od 0,1 mm až do 50 mm. Mezi největší výhody metody patří vysoká rychlost procesu, univerzálnost, malá tepelně ovlivněná oblast v místě řezu, vysoká přesnost, opakovatelnost procesu a úzká řezná spára.



Obr. 17 Laserové řezání [48]

➤ Laserové navařování

Tato metoda navařování je používána pro precizní navařování anebo pro opravy menších součástí. Pro laserové navařování se používají hlavně diodové a vláknové kontinuální lasery. Princip metody spočívá v tom, že do ohniska laserového svazku se přidává práškový či drátový přídavný materiál, ten se taví a ochranným plynem (nebo i gravitačně) je nanesen na povrch součásti. Tloušťka navařené vrstvy je od 50 μm do 2 mm. Navařovaným materiálem mohou být kovy, tvrdokovy, ale také keramika. Tato technologie se nejčastěji používá pro opravy a renovace. Mezi její výhody patří nízká porozita navařeného materiálu, variability navařeného materiálu, jen malé tepelné ovlivnění základního materiálu, malé deformace, přesnost. Mezi hlavní negativa patří strojní a instrumentační složitost a investiční náročnost technologie. Navařování je zachyceno na obr. 18.



Obr. 18 Laserové navařování [47]

➤ Laserové svařování

Svařování pomocí laserového svazku je v dnešní době už nezbytná technologie a to především pro oblasti, ve kterých je vyžadována přesnost, kvalita a efektivita výrobního procesu. Při laserovém svařování je paprsek zaostřen do ohniska o velmi malých rozměrech. Díky tomu v ohnisku vzniká vysoká koncentrace výkonu - až 10^{12} W/cm². Při dopadu fotonů na svařovaný materiál je rychlost ohřevu mnohonásobně vyšší než rychlost ochlazování, při vhodné volbě podmínek (svařovací rychlost, výkon) dochází ke svařování.



Obr. 19 Laserové svařování [73]

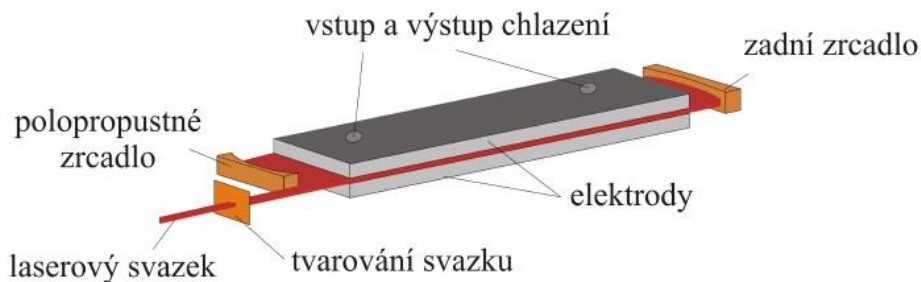
Laserový paprskem má při svařování dva režimy účinku, buď to je to kondukční režim anebo je to penetrační režim. Na laserové svařování jsou kladeny také určité požadavky: kolmý dopad paprsku na povrch, konstantní posuvová rychlost a také konstantní odstup od svařovaného povrchu. Navíc je potřeba zajistit ochranu optiky. Laserové svařování je metoda svařování bez přídavného materiálu a jsou zde dva hlavní typy svarů, natupo a průvarový svar. Svařování je zobrazeno na obr. 19. Svařovat je možné kovové i nekovové materiály. Mezi výhody technologie patří vysoká dynamika procesu, malé množství vneseného tepla, štíhlost a kvalita svaru. Mezi nevýhody patří drahé zařízení a složité přípravkování.

2.6 Nejčastěji používané lasery v průmyslové praxi [2], [19], [28], [33], [55], [58],[65], [78]

Mezi nejčastěji používané lasery patří CO₂ laser, polovodičový laser, diskový laser a vláknový laser.

• CO₂ laser

Tento typ laseru byl vynalezen v roce 1964. Patří do skupiny plynových laserů a aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů He, N₂ a CO₂. Laser může pracovat jak v kontinuálním, tak i v pulzním režimu.



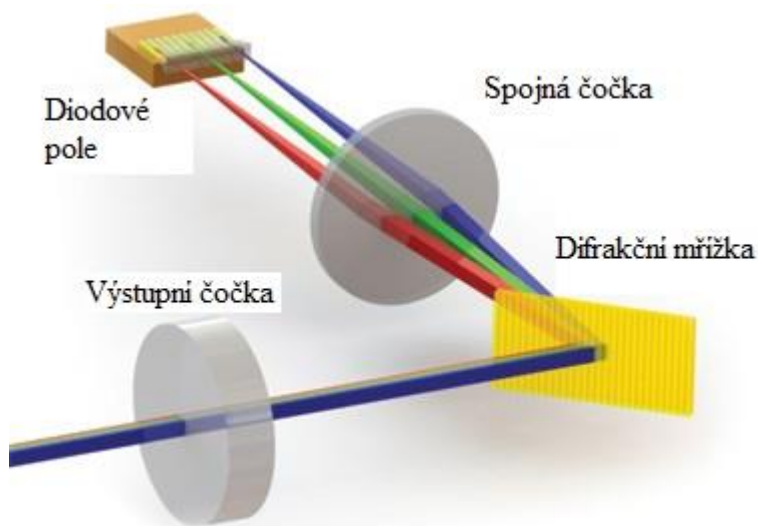
Obr. 20 CO₂ laser s difúzním chlazením [33]

V průmyslu jsou používány lasery buzené, buď radiofrekvenčně (RF) nebo elektrickým výbojem (DC – direct current). Dále je možno CO₂ lasery dělit podle typu rezonátoru. Prvním typem je hermeticky uzavřený rezonátor a druhým je laser s průtočným rezonátorem. Tento typ je využíván pro lasery o výkonu 10 kW a více. Tyto lasery jsou vhodné pro velké spektrum využití, například pro: gravírování, značení, řezání nekovových materiálů (plasty, kůže, papír, sklo), řezání kovových materiálů a také na svařování. Vlnová délka výstupního paprsku je 10,6 μm a výkon laseru je až 20 kW s účinností od 5 do 10%. Nevýhodou toho typu laseru je nemožnost použití optického vlákna a také nelze použít skleněnou optiku, což je dáno vlnovou délkou paprsku. Z tohoto důvodu je třeba místo optického vlákna použít složitější soustavu zrcadel a speciální optiky z ZnSe, GaAs a Si/Cu s příměsí Au.

Nejnovějším typem CO₂ laseru je deskový CO₂ laser s difúzním chlazením. Ten je vybaven zásobníkem s plynem (ten vystačí pro provoz laseru cca 1 rok) a díky tomu není potřeba vnější zdroj plynu. Odvod tepla je zajištěn rozptylem tepla na vodou chlazených vysokofrekvenčních elektrodách, viz obr. 20.

- **Polovodičový - diodový laser**

Je-li aktivním prostředím silně dopovaný polovodič, označujeme ho jako laserovou diodu. Záření je generováno přímo v polovodiči (GaAs, AlGaAs) v PN přechodu pomocí průchodu elektrického proudu. V tab. 7 je porovnání různých typů polovodičů. Takový laser dosahuje vysoké účinnosti, až 40%, také má nízkou hmotnost a kompaktní rozměry. Na druhou stranu je zde problém s velmi nízkou kvalitou svazku (velká rozbíhavost). Z toho vyplývá, že paprsek nejde fokusovat do jednoho bodu, to je vyobrazeno na obr. 21. Tyto lasery jsou používány pro kontinuální provoz. Laserové záření dosahuje výkonu až 10 kW při vlnové délce kolem 1 μm. Použití těchto laserů je jako laserové tiskárny, v telekomunikaci, v přehrávačích CD, DVD a Blue-ray disků. Díky špatné fokusaci se v průmyslu používají pro povrchové úpravy, kalení, cladding, navařování a svařování.



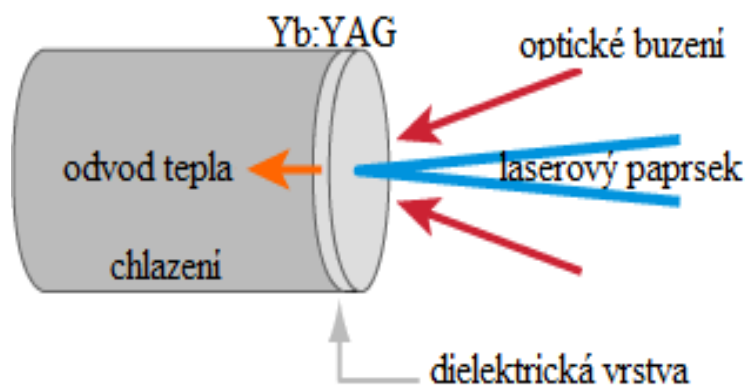
Obr. 21 Schéma diodového laseru [50]

Tab. 7 Vlnové délky a výkony laserových diod [33]

| | Vlnová délka [nm] | Výkon [mW] | Typické použití |
|---------|-------------------|------------|---|
| GaAs | 840 | 5 | CD přehrávače, buzení pevnolátkových laserů |
| AlGaAs | 760 | 50 | Laserové tiskárny |
| GaInAsP | 1300 | 20 | Vláknové komunikace |

- **Diskové lasery**

Tento laser je typem Nd:YAG laseru, jehož aktivní prostředí je tvořeno diskem o výšce několika setin milimetru a průměru obvykle do 10 mm, více na obr. 22. Díky této geometrii aktivního prostředí je zde rovnoměrný teplotní profil, to je zajištěno svazkem s Gaussovým rozdělením záření intenzity s vysokou kvalitou tohoto svazku. Použití těchto laserů je výhodné pro výkonově náročné

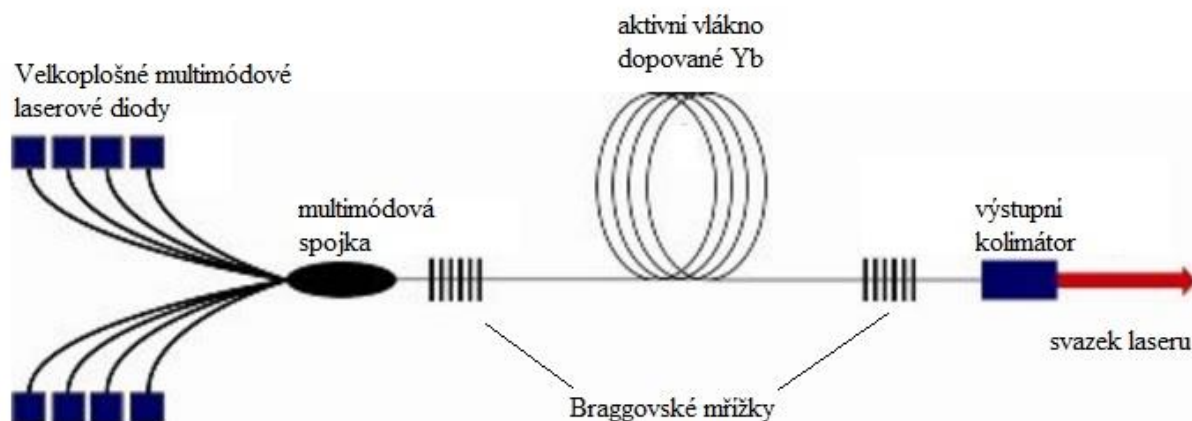


Obr. 22 Schéma diskového laseru [60]

operace (výkon laseru až 16 kW), například pro svařování či řezání kovů. Laserový svazek dosahuje vlnové délky 1,07 μm . Nevýhodou tohoto typu laseru je menší účinnost (15-20%) a nižší životnost než u vláknových laserů.

- **Vláknový laser**

Nejmodernějším typem dnes používaného látkového laseru je vláknový tzv. fiber laser. Tento typ laseru se vyznačuje tím, že aktivní prostředí je tvořeno optickým vláknem, jež je dopováno yterbiem. Buzení je zde optické, pomocí laserových diod, jež jsou vedeny optickou spojkou do aktivního vlákna a zrcadla jsou nahrazeny Braggovskými mřížkami. Braggovy mřížky zde tvoří optický rezonátor. Záření nakonec opouští vlákno pomocí optického kolimátoru, viz obr. 23.

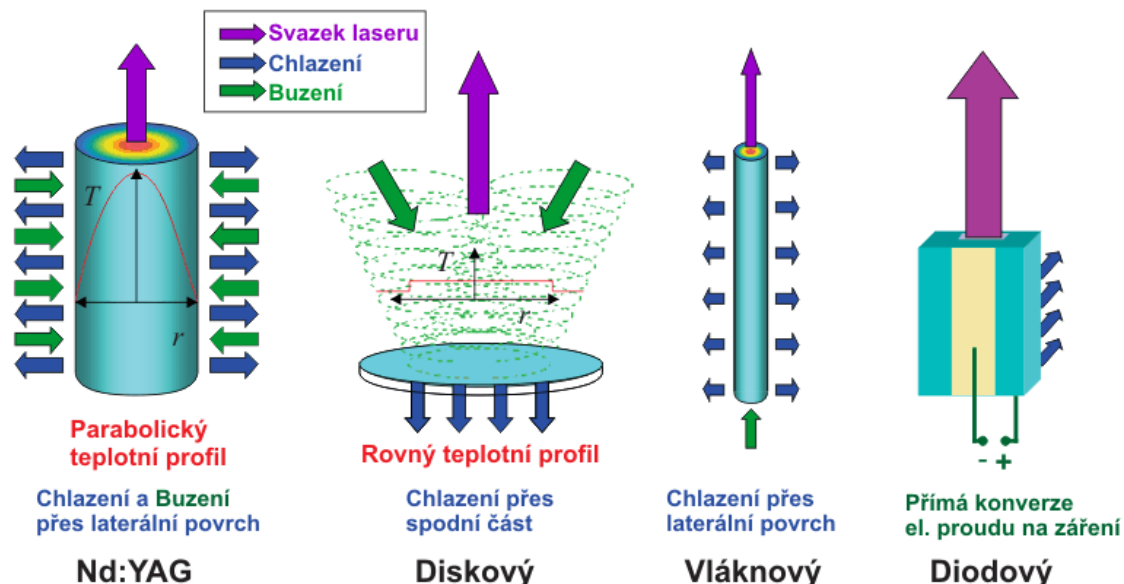


Obr. 23 Schéma vláknového laseru [58]

Vláknové lasery můžeme dělit podle typu provozu na kontinuální, pulzní (CW) nebo kvazipulzní (QCW). Díky tomu, že laser je tvořen víceméně hlavně optickým vláknem, je tento typ laserů jednoduchý a kompaktní. Jednotlivá optická vlákna tvoří moduly, ty je pak možné skládat dohromady a takto postupně navyšovat výkon laseru až do 80 kW při vlnové délce 1,07 μm . Mezi výhody patří vysoká účinnost laser (30-35%), vysoká životnost a to až 100 000 hodin provozu, nízké provozní náklady a minimální potřeba údržby. Srovnání laseru s jinými druhy laserů můžeme vidět v tab. 8. a také na obr. 24.

Tab. 8 Srovnání vlastností vybraných laserů [1], [32]

| | Nd:YAG | CO ₂ | Diskový | Vláknový |
|----------------------------------|---------|-----------------|---------|--------------|
| <i>Celková účinnost [%]</i> | 5 | 10 | 15 | 30 |
| <i>Výstupní max. výkon [kW]</i> | 6 | 20 | 16 | 80 |
| <i>BPP (pro 5 kW) [mm·mrad]</i> | 25 | 6 | 8 | < 2,5 |
| <i>Životnost diod [hod]</i> | 10 000 | - | 10 000 | 100 000 |
| <i>Chlazení</i> | DI voda | voda | voda | voda/ vzduch |
| <i>Provozní náklady [Kč/hod]</i> | 825 | 520 | 760 | 460 |
| <i>Údržba</i> | častá | nutná | častá | žádná |

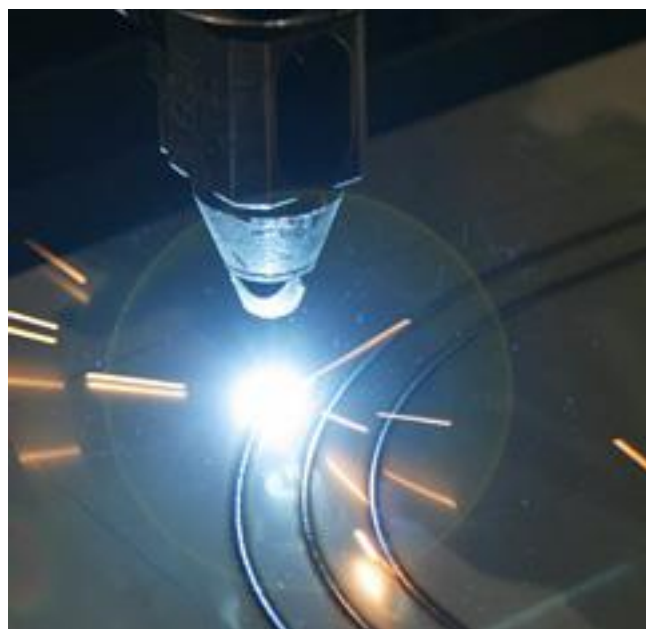


Obr. 24 Porovnání různých zdrojů laserového záření [31]

2.7 Laserové svařování přímou hlavou [2], [4], [12], [29], [54]

Jedinečné vlastnosti laserového paprsku zajišťují laserovému svařování velké množství výhod a uplatnění. Díky tomu, že laserový paprsek je velmi úzký a je do něj soustředěno velké množství energie, je možné svařovat bez velkého přívodu tepla do materiálu. To nám zajišťuje oproti jiným metodám malou tepelně ovlivněnou oblast a také velkou svařovací rychlost.

Svařovat laserem můžeme kovové i nekovové materiály, materiály o malé tloušťce až po materiály o tloušťce několika milimetrů, ukázka svaru je na obr. 25. Ve většině případů je svařováno bez přídavného materiálu, je však možné se setkat s různými hybridními metodami, kde je přídavný materiál použit. Následující tabulka 9 ukáže porovnání této metody s některými metodami tavného svařování.



Obr. 25 Laserové svařování [20]

Tab. 9 Porovnání různých metod svařování [54]

| Metoda | Plošná hustota energie [W/cm ²] | Hloubka průvaru [mm] | Šířka/ hloubka svaru | Svařovací rychlost [m/min] |
|-------------|---|----------------------|----------------------|----------------------------|
| Laser | 10 ⁷ - 10 ⁹ | 25 | 0,1 - 0,5 | 10 |
| Plamen | 10 ³ | 3 | 3 | 0,01 |
| El. oblouk | 10 ⁴ | 4 | 2 | 0,5 - 3 |
| Plasma | 10 ⁶ | 12 | 1 | 0,5 - 5 |
| El. paprsek | 10 ⁸ | 200 | 0,03 | 0,5 - 5 |

Svařitelnost materiálů je obdobná s metodou WIG. Z důvodu rychlého odvodu tepla se obtížně svařují oceli o obsahu uhlíku vyšším jak 0,2%. Vysoké kvality svarů je dosahováno u svařování vysokolegovaných ocelí, Ni Mo.

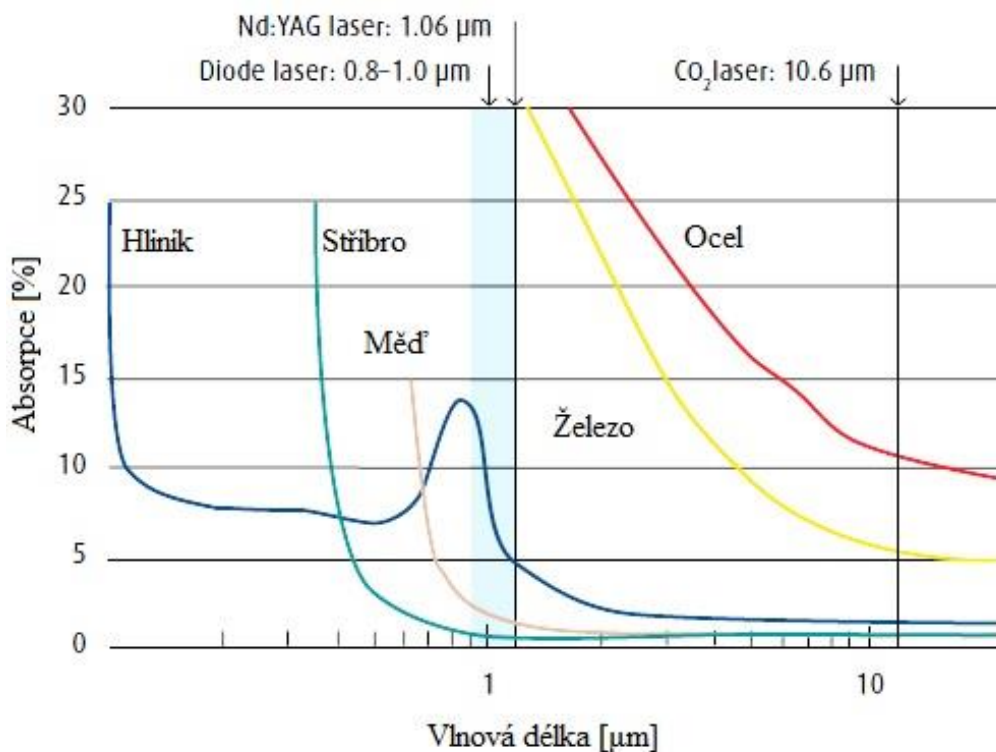
Díky velmi rychlému ohřevu je možné svařovat jak materiály s velkou tepelnou vodivostí (Cu, Au, Ag, Al), tak i materiály s vysokou teplotou tavení (W, Mo, Ta, Zr, Ti).

2.7.1 Interakce laserového svazku s materiálem [2], [4],[26] [27], [32], [76]

Tab. 10 Součinitel odrazivosti vybraných materiálů [2]

Dopadající laserové záření na povrch může být pohlceno, odraženo anebo u transparentních materiálů může volně projít. Pro svařování má význam zabývat se pohlceným zářením. Kvantum energie, jež obsahuje foton, při pohlcení rozkmitá mřížku a tím zvyšuje teplotu materiálu. O míře pohlcení materiálu rozhoduje míra absorpce, ta je závislá na teplotě, vlnové délce záření, vodivosti materiálu a povrchu, na který dopadá záření. Závislost absorpce je možné vidět na obr 26. Povrchem materiálu je myšlena drsnost, geometrie a případný nátěr povrchu. Pro snížení odrazivosti je možno povrch zdrsnit, natřít absorpční barvou, posypat absorpčním práškem atd. Absorpce se skokově zvyšuje při natavení materiálů, při odpařování se absorpce blíží až 100%.

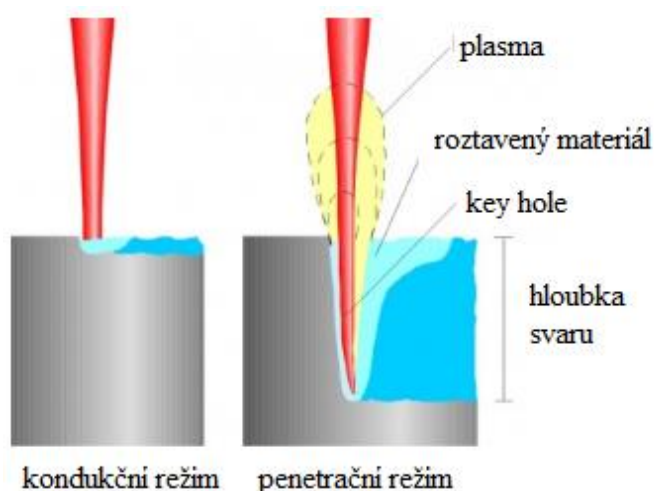
| Materiál | Vlnová délka λ [μm] | | |
|------------------------|--|------|------|
| | 0,694 | 1,06 | 10,6 |
| Součinitel odrazivosti | | | |
| Al | 0,87 | 0,93 | 0,97 |
| Cr | 0,56 | 0,58 | 0,93 |
| Cu | 0,82 | 0,91 | 0,98 |
| Ni | 0,68 | 0,75 | 0,95 |
| Ag | 0,95 | 0,97 | 0,99 |
| Ocel | 0,58 | 0,63 | 0,93 |



Obr. 26 Závislost absorpce na vlnové délce [76]

Laserový svazek může při svařování dosáhnout dvou režimů vlivu na materiál, kondukčního a penetračního.

- Kondukční režim – také bývá označován jako povrchové svařování. U tohoto režimu se využívá nižší plošnou hustotu energie - 10^6 W/cm². Přímou absorpcí laserového záření dochází k natavení povrchové vrstvy svařovaných materiálů. Při následném ztuhnutí promíchaných natavených materiálů vzniká svarový spoj. Hloubka svaru bývá zpravidla do 2 mm. Výhodou tohoto režimu je vysoká rychlost svařování a minimální odpaření materiálu. Použití je hlavně u svařování tenkých plechů a fólií.
- Penetrační režim – při tomto režimu je potřeba zajistit vyšší hustotu energie, 10^8 W/cm². Díky vysoké hustotě plošné energie dochází k vypařování materiálu a tím se vytváří kapilára, ta má průměr roven 1,5 až 2 násobku průměru ohniska laserového svazku. Laserový paprsek průchodem par kovů tvoří plasma, to ovlivňuje tvar vzniklé kapiláry a unikající plyny z kapiláry brání jejímu zavření. Tímto procesem získáváme hluboký průvar a tuto kapiláru nazýváme „key hole“. Dochází zde také k mnohonásobně lepší absorpci záření než v kondukčním režimu a to díky odrazivosti



Obr. 27 Režimy laserového svařování [32]

ve vzniklé kapiláře. Tímto režimem jsme schopni svařovat ocel do tloušťky 10 mm.

U laserového svařování může nastávat také nežádoucí interakce materiálu se vzdušným kyslíkem a následná oxidace. Tomu se lze bránit použitím ochranných plynů, převážně Ar, Ar + CO₂, N₂ a He. Těmito plyny můžeme také ovlivňovat tvar vzniklé kapiláry. Porovnání obou metod je na obr. 27.

2.7.2 Svařitelnost materiálů laserem [2], [12], [32], [40], [71]

Svařování laserovým svazkem je vhodné pro velké množství materiálů. Lze svařovat neželezné i železné kovy, plasty, dokonce i keramiku a sklo. Nejčastěji jsou svařovány vysokolegované oceli, vysokotavitelné kovy a kombinace různých kovů, jako například W – Mo, W – Ta, Ti – Mo, Ni – Pt, Au – Pt a další. Vhodnost vzájemné svařitelnosti materiálu je ukázaná v tabulce 11.

Tab. 11 Kombinace svařovaných materiálů [32]

| | Al | Ag | Au | Cu | Pd | Ni | Pt | Fe | Be | Ti | Cr | Mo | Te | W |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| Al | V | | | | | | | | | | | | | |
| Ag | U | U | | | | | | | | | | | | |
| Au | U | V | V | | | | | | | | | | | |
| Cu | U | U | V | V | | | | | | | | | | |
| Pd | | V | V | V | | | | | | | | | | |
| Ni | U | | V | V | V | V | | | | | | | | |
| Pt | | U | V | V | V | V | V | | | | | | | |
| Fe | | | U | U | D | D | D | V | | | | | | |
| Be | | | U | U | U | U | | U | | | | | | |
| Ti | U | U | U | U | U | U | U | U | | V | | | | |
| Cr | | | U | | D | D | V | V | | D | | | | |
| Mo | | | | | | U | V | D | | V | V | | | |
| Te | | | | | D | D | U | U | | V | | V | | |
| W | | | | | U | U | D | U | | U | V | V | V | V |

V – velmi dobrá, D – dobrá, U – uspokojivá svařitelnost

2.7.3 Parametry laserového svařování [2], [4], [27], [54]

Základní parametry pro laserové svařování jsou určeny podle druhu provozu laseru, vlnové délky a rozbíhavosti světelného paprsku. Tyto parametry ovlivňují výslednou kvalitu svaru a určují technologické použití této technologie v průmyslové praxi.

Důležité parametry laserového svařování podle různých kritérií:

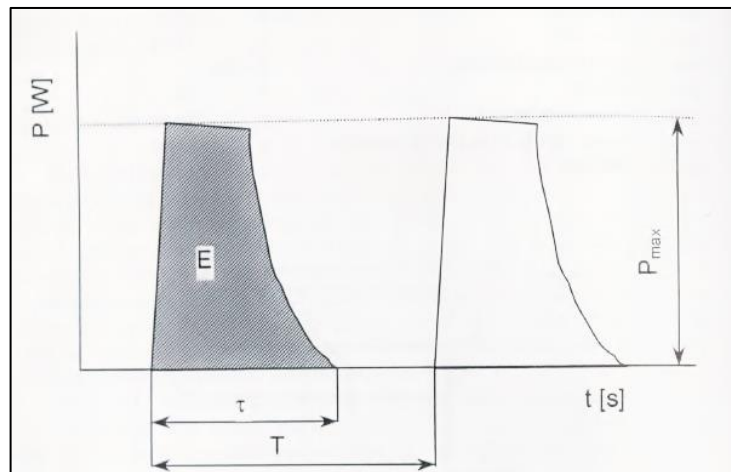
- Podle druhu provozu:
 - Pulzní provoz – důležitá je energie pulzu, což je energie na výstupu z laseru a doba pulzu τ ,
 - Kontinuální provoz – výstupní výkon P a svařovací rychlost.
- Podle vlnové délky – vhodnou volbou vlnové délky ke konkrétnímu materiálu můžeme dosáhnout vysoké efektivity laserového paprsku.
- Dle rozbíhavosti paprsku – velikost stopy světelného paprsku je závislá na jeho rozbíhavosti. Platí, že pro daný výkon je stopa tím menší, čím je vyšší intenzita záření.
- Další parametry, určené podle specifických podmínek:
 - průměr clony (1,3 až 25 mm)
 - teplota chladicí kapaliny
 - ochranná atmosféra
 - vakuum
 - typ svaru a další.

Pro kontinuální režim jsou nejdůležitější parametry výstupní výkon paprsku P [W], rychlost svařování v [mm/s] a parametry týkající se fokusace paprsku. Hodnota výkonu je v kontinuálním režimu s časem neměnná. Výkon ovlivňuje množství energie vnesené do materiálu a tím například také hloubku průvaru. Svařovací rychlost je dráha, po které laser dodává energii za čas.

V případě použití pulzního režimu je nutné počítat s větším počtem parametrů. Průběh pulzu je funkcí výkonu, který se s časem mění.

Parametry v pulzním režimu:

- Energie pulzu E_i [J]
- Maximální výkon pulzu P_{\max} [W]
- Délka pulzu τ [s]
- Frekvence pulzu F [Hz]
- Střední výkon paprsku laseru [W]
- Funkce pulzu $G=f(t)$
- Průměr fokusace pulzu d [mm]
- Poloha ohniska k povrchu materiálu s [mm]
- Rychlost svařování v [mm/s]



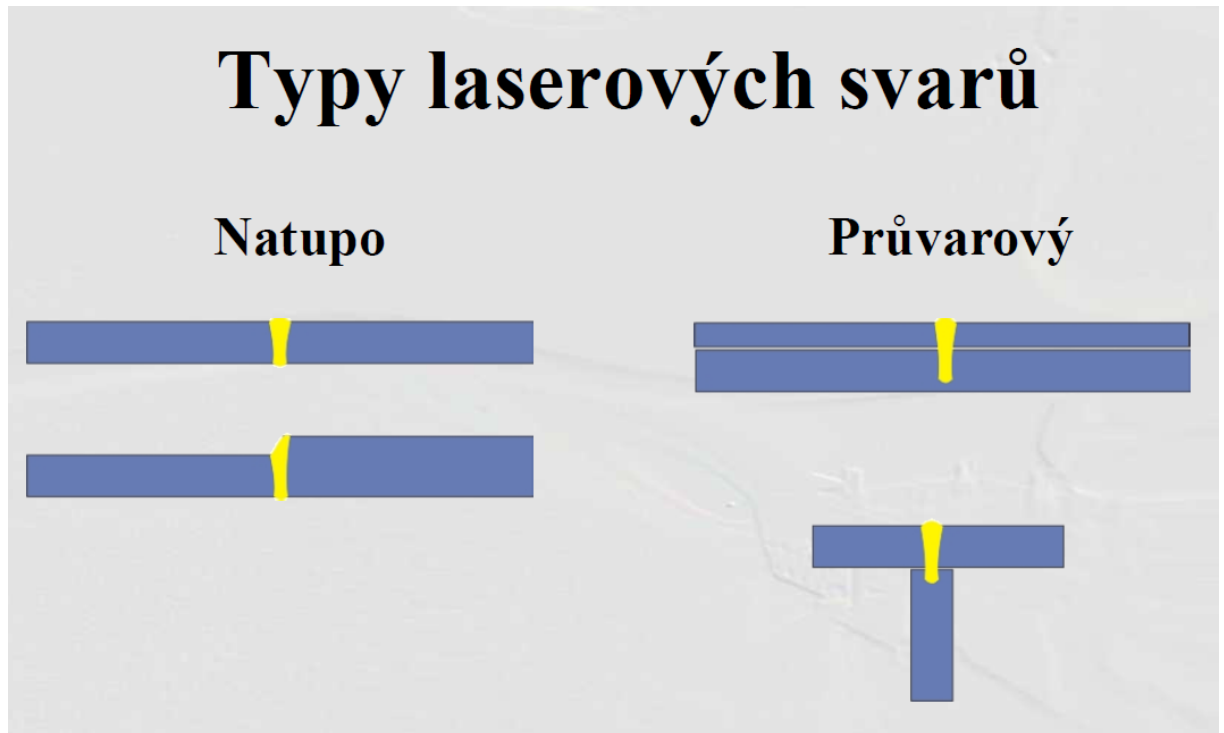
Obr. 28 Pulz a jeho parametry [4]

Pro svařování laserem je také důležité zachovat požadavky na proces a to především:

- Běžně je snaha o kolmý dopad paprsku na povrch materiálu
- Konstantní odstup od povrchu materiálu, zachování konstantní ohniskové vzdálenosti
- Konstantní posuvová rychlost
- Ochrana optiky pomocí „cross jetu“ se stlačeným vzduchem

2.7.4 Typy svarů, jejich vady a zkoušky [52], [54], [72]

Geometrie svaru popisuje, jak se společně stýkají hrany a plochy spojovaných dílců. Základní dělení laserových typů svarů je: natupo a průvarový, viz obrázek 29. Laserové svařování je svařování bez přídavného materiálu.

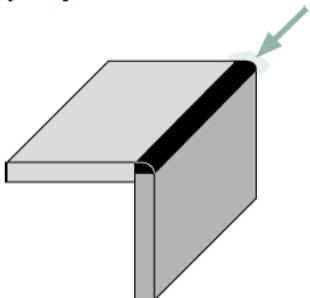
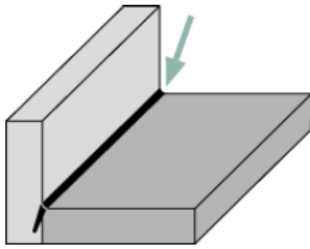
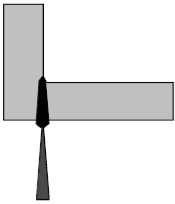
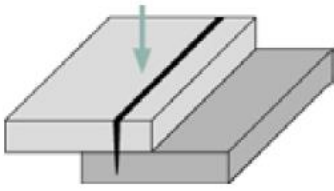
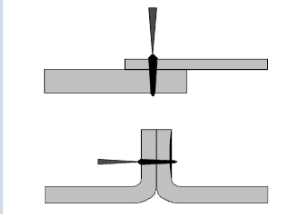
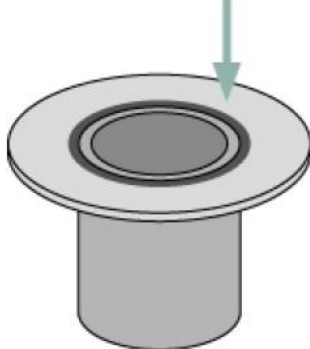
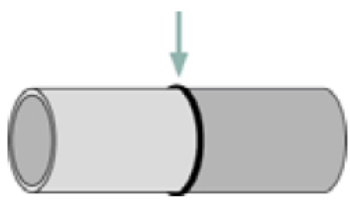


Obr. 29 Typy laserových svarů [54]

Existují různé, typy a variace těchto dvou základních typů laserových svarů. Ty jsou stručně popsány v následující tabulce 12.

Tab. 12 Typy laserových svarů [72]

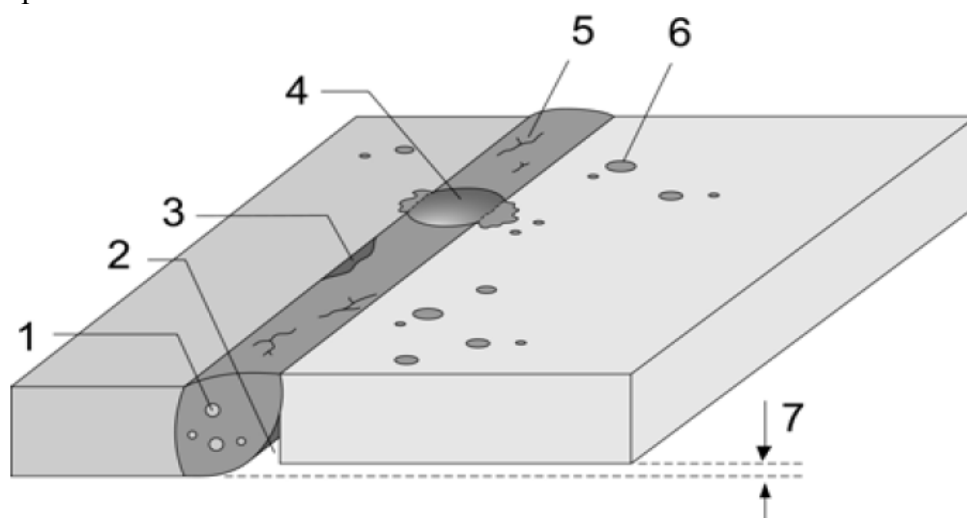
| Geometrie svaru | Popis | Nejvhodnější geometrie |
|---------------------------|---|------------------------|
| <p>Svar natupo</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Možnost svařování různých tloušťek plechů • Nejvhodnější silové zatížení • Dobrý přístup • Drahé přípravkování • Svarová mezera musí být velmi malá | |
| <p>Lemový svar</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Velmi levné přípravkování • Velká tuhost • Nepříznivé silové zatížení • Dobrý přístup • Vyšší náklady na materiál | |

| | |
|--|---|
| <p>Koutový vnější</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Svařování jen 90° úhlu • Výhodné použití pevnolátkového laseru |
| <p>Koutový vnitřní</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Drahé přípravkování • Příznivé silové zatížení • Špatná přístupnost • Někdy může dojít k ohybu dílců  |
| <p>Svar přelátováním</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Levné přípravkování • Dobrý přístup • Nepříznivé silové zatížení  |
| <p>Axiální svar</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Odpovídá tupému svaru • Vnitřní díl musí být předepnut • Příznivé silové zatížení |
| <p>Radiální svar</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Odpovídá tupému svaru • Jednoduchá příprava • Příznivé silové zatížení • Dobrý přístup • Bez smrštění • Výhodnější než axiální svařování |

Na kvalitu svarů jsou kladeny vysoké požadavky. Šířka a hloubka svaru musí dosahovat definované hodnoty a být konstantní v celé svarové housence, neboť tohle jsou určující parametry pro pevnost svaru. Na strukturu svaru jsou také požadavky jemnozrnosti

a celistvosti struktury, jak jen je to možné. Další vlastnosti svarové housenky jsou závislé na svarovém materiálu.

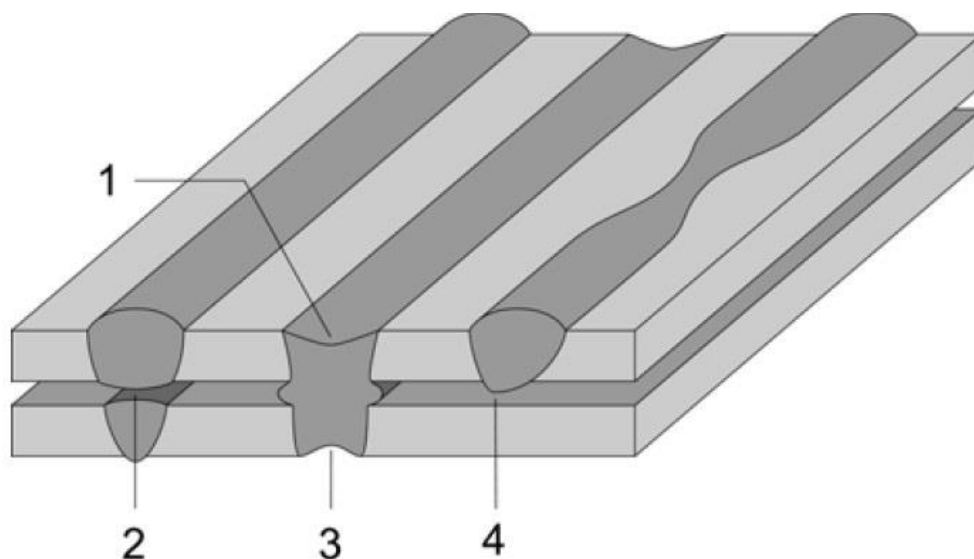
Na následujícím obrázku 30 jsou zobrazeny možné vady, jež mohou nastat při laserovém svařování u tupého svaru.



- | | | | |
|----------|-------------------------------|----------|-------------------------|
| 1 | Póry | 5 | Trhliny |
| 2 | Neprovařený kořen | 6 | Rostřík taveniny |
| 3 | Studený spoj | 7 | Odsazení od hran |
| 4 | Výron taveniny (otvor) | | |

Obr. 30 Možné vady u tupého svaru [72]

Na dalším obrázku 31 jsou zobrazeny možné vady u průvarového typu svařování.



- | | | | |
|----------|---------------------------------------|----------|---|
| 1 | Propad svaru | 3 | Propad kořene |
| 2 | Nespojitost kvůli velké mezeře | 4 | Nespojitost kvůli rozdílné hloubce průvaru |

Obr. 31 Možné vady u průvarového svaru [72]

2.8 Skenerové svařování - Remote welding [1], [5], [18], [24], [49], [51], [56], [74], [75], [77]

Laserové svařování se v poslední době díky rozšíření pevnolátkových laserů rychle vyvíjí. Za jeden z největších výsledků tohoto vývoje, můžeme označit metodu skenerového svařování. Skenerové svařování poskytuje nové možnosti využití laserového paprsku o vysoké kvalitě pro vysoce kvalitní, produktivní a flexibilní spojování materiálu, a to zejména v automobilovém a leteckém průmyslu. Vysoká produktivita je dána tím, že mimo pohybu celé optiky, je zde možný pohyb jen laserového paprsku.

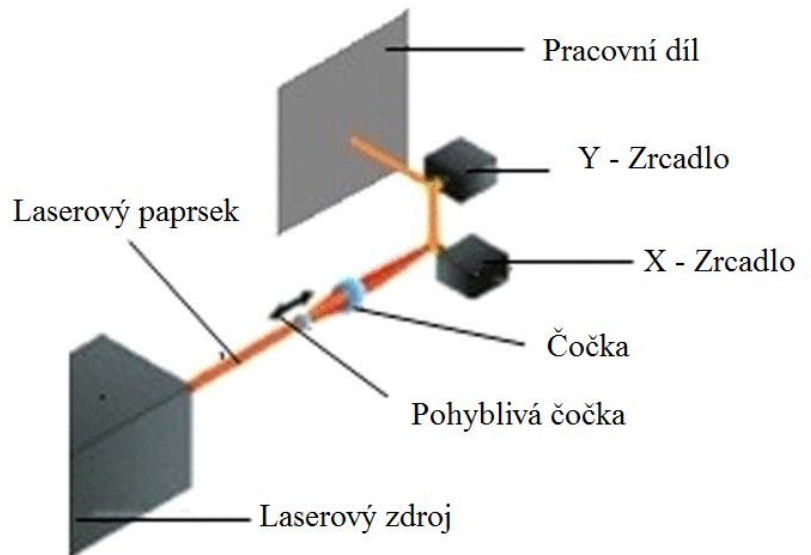
Pro skenerové svařování je důležité mít laserový zdroj, který bude schopen vyrobit kvalitní laserový svazek. Nejčastěji se používají pevnolátkové diskové anebo vláknové lasery. Dále je zapotřebí optické vlákno, to vede laserový svazek ze zdroje do skenerové hlavy. Poté je potřeba mít samotnou skenerovou hlavu a zejména pro svařování natupo je zapotřebí použít vhodný monitorovací systém laserového paprsku. Ten zajišťuje přesné monitorování a vedení laserového paprsku.

Skenovací optická hlava používaná pro skenerové svařování se od klasické optické hlavy s pevným optickým systémem bez pohyblivých částí liší hlavně v těchto bodech:

- Větší provozní vzdálenost skenovací hlavy od svařence.
- Poloha ohniska svazku je určena pohyblivým zrcadlem a optickou čočkou.
- Větší pracovní oblast.
- Úhel laserového svazku není během svařování pevný.
- Schopnost rychlého posuvu svazku.

Laserový svazek je veden optickým vláknem do kolimační čočky a následně do skenovací hlavy. Po průchodu svazku kolimační čočkou je svazek vychýlen o 90° pomocí deflektivního reflexního zrcadla. Toto zrcadlo je vždy dichromatické, tudíž jím prochází jen některé vlnové délky světla. Propuštěné vlnové délky mohou být detekovány na zadní straně monitorovacími čidly a kamerou. Jednou vychýlený paprsek o 90° pomocí zrcadla je veden do čočky o velkém ohnisku. Tato čočka je schopna rychlého lineárního pohybu - označován jako pohyb v ose Z.

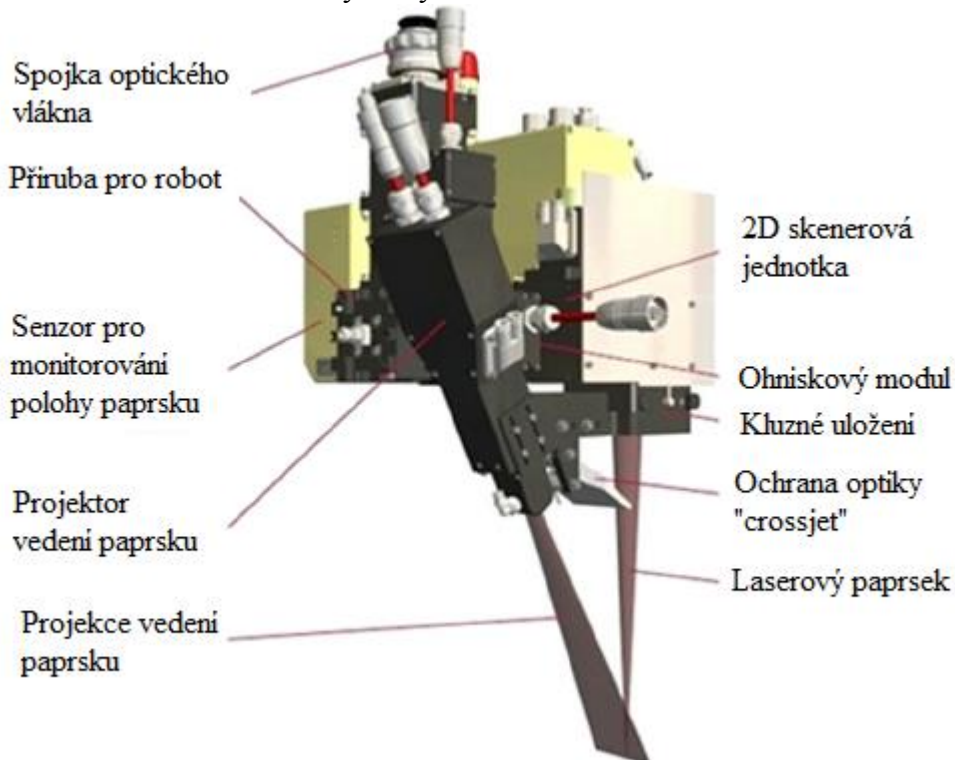
Po průchodu touto čočkou je laserový paprsek veden do skenovací jednotky, v té je pomocí pohybů zrcadel usměrněn. Řízení paprsku je docíleno díky změně úhlů na zrcadle. Na obrázku 32 můžeme vidět příklad seskupení zrcadel a čoček, jež tvoří skenerovou hlavu. Jako první prochází paprsek ze zdroje do nejmenší, pohyblivé čočky. Ta má za úkol měnit polohu ohniska. Poté je paprsek vychýlen další, statickou, čočkou. Po vychýlení je paprsek směřován do zrcadel X a Y. Proces končí fokusováním paprsku přesně podle požadavků na svařovaný pracovní díl.



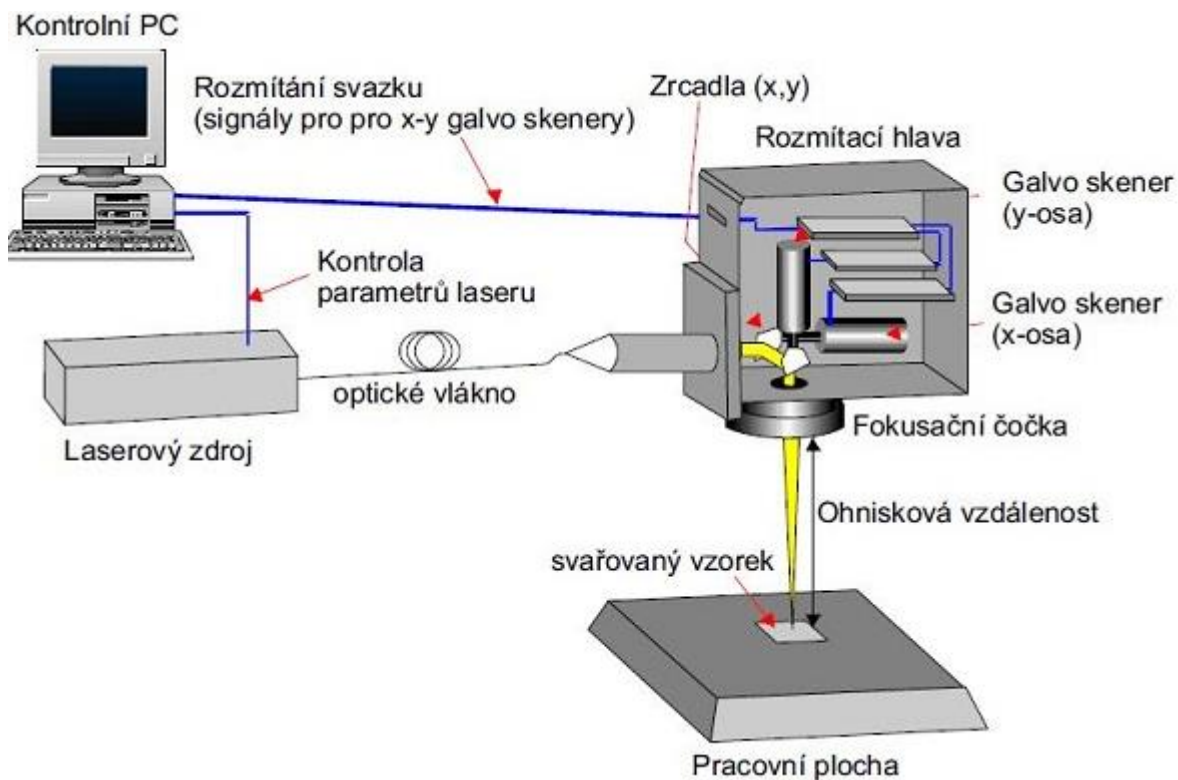
Obr. 32 Čočky a zrcadla ve skenerové hlavě [24]

Na obrázku 33 je vyobrazeno schéma celé skenerové 2D hlavy. Tato skenerová hlava je určena pro přichycení na průmyslový robot. Jako zdroj laserového paprsku je nejvhodnější použití vláknového laseru. Na svařovací hlavě je vidět také monitorovací systém polohy

paprsku a projekce vedení paprsku. Na obrázku 34 je zachyceno celé schéma technologie skenerového svařování i s řídicími systémy.



Obr. 33 2D skenerová hlava [24]



Obr. 34 Schéma technologie skenerového svařování [59]

Celou skenovací jednotkou je možné během svařování pohybovat nad svařovaným materiálem. Je-li mezi robotem osazeným skenovací optikou a směrovými zrcadly zcela synchronní pohyb, nazýváme tuto technologii svařování jako „welding on the fly“.

Výhody

- Vysoká produktivita
- Kvalita svarů
- Konstantní rychlost svazku
- Dosah paprsku i do jinak obtížně dosažitelných míst
- Velká pracovní oblast
- Menší množství použitých robotů

Nevýhody

- Vysoká pořizovací cena
- Složitě programování
- Systémová integrace

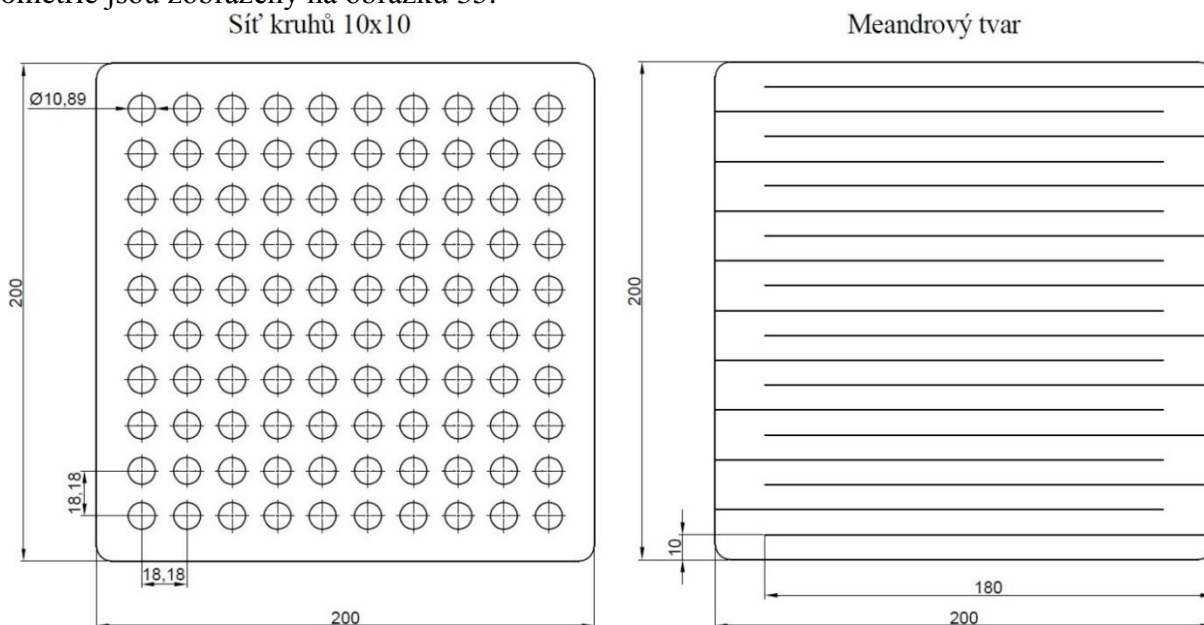
Využití tato progresivní metoda nachází hlavně ve velkosériové automobilové výrobě, kde se využívá ke svařování karoserií, dveří či sedadel automobilů. Dále se využívá v letectví, elektrotechnice, energetice a také potravinářství.

3 EXPERIMENTY A JEJICH VYHODNOCENÍ

Tyto experimenty byly provedeny pro posouzení výhodnosti použití různých metod laserového svařování. Pro tento účel porovnání dvou metod laserového svařování je vybrán experiment, při němž je nedřívě změřen čas svařování, poté jsou posouzeny geometrie svaru, tvrdost svaru a jako poslední krok byly provedeny tahové zkoušky. Experimenty jsou provedeny na dvou typech materiálů – X5CrNi18-10 a S235JR. Svařování bylo provedeno konvenční přímou svařovací laserovou hlavou a 2D skenerovou svařovací hlavou.

3.1 Svařovací čas

Pro porovnání svařovacích časů, mezi běžnou přímou svařovací hlavou a skenerovou svařovací hlavou, byla svařována vždy stejná geometrie ze stejného materiálu. Svařovaným materiálem byla austenitická korozivzdorná ocel X5CrNi18-10. Samotná svařovací rychlost byla u obou metod konstantní, avšak rychlost pohybu mezi samotným svařováním byla rozdílná. V tomto by měla být největší výhoda skenerové svařovací hlavy. Pro ukázkou možností svařovací skenerové hlavy bylo také provedeno svařování o vyšší svařovací rychlosti. Experiment byl proveden pro svařování dvou různých svařovaných geometrií, pro srovnání rychlostí svařování převážně lineárních pohybů a kruhových pohybů. Svařované geometrie jsou zobrazeny na obrázku 35.



Obr. 35 Svařované geometrie při experimentu

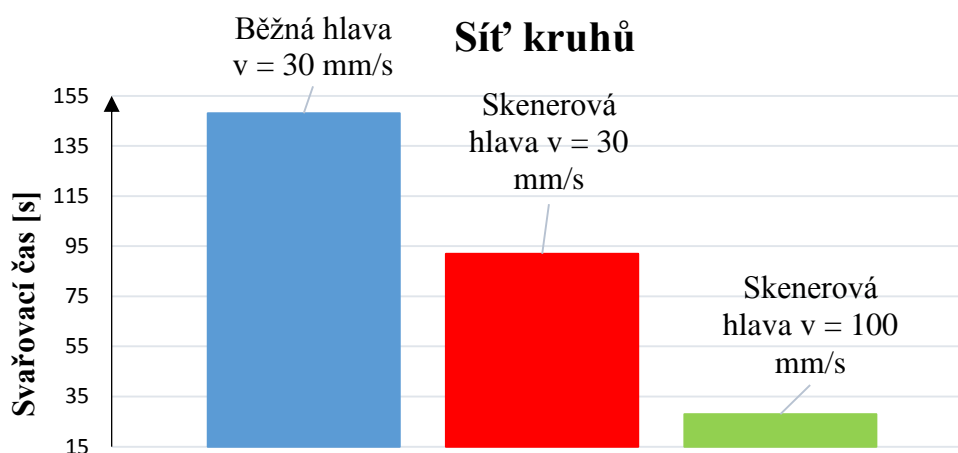
➤ Vyhodnocení

V tabulce 13 můžeme vidět svařovací časy při použití obou metod laserového svařování. Z naměřených hodnot jasně vyplývá, že skenerová svařovací hlava dosahuje nižších svařovacích časů, než hlava konvenční. To je především způsobeno nižší hmotností pohybujících se částí u skenerové hlavy, než u hlavy konvenční. Konvenční hlava má tu velkou nevýhodu, že díky své rychlosti a hmotnosti má vysokou setrvačnost pohybu. Tato negativní vlastnost konvenční hlavy způsobuje výrazně pomalejší posun mezi samotným svařováním.

Tab. 13 Porovnání svařovacích časů

| Geometrie | Použitá technologie | | Svařovací čas [sek] | | |
|---------------------|-----------------------|---------|---------------------|----------|-------------|
| | Svařovací rychlost → | 30 mm/s | Úspora času | 100 mm/s | Úspora času |
| Sít' kruhů 10x10 | Běžná svař. hlava | 148 | | | |
| | Skenerová svař. hlava | 92 | 38 % | 28 | 81 % |
| Meandr | Běžná svař. hlava | 155 | | | |
| | Skenerová svař. hlava | 142 | 8% | 45 | 71 % |

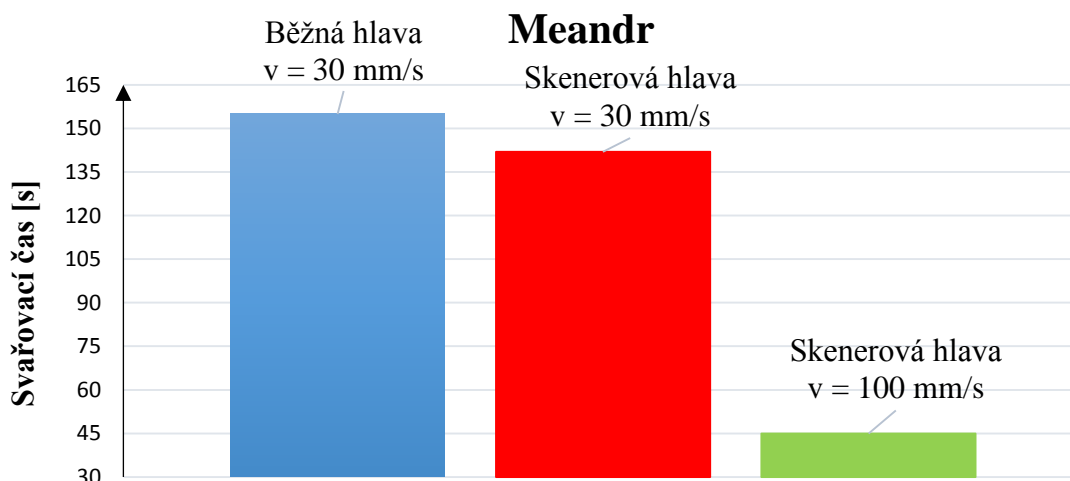
Při svařování geometrie tvořené sítí kruhů rychlostí 30 mm/s můžeme vidět úsporu času ve prospěch skenerového svařování o 38%. To je způsobeno především již zmíněnou nižší hybností u soustavy skenerového svařování. O celých 81% by byla časová úspora při využití potenciálu svařovací skenerové hlavy. Srovnání svařovacích časů při svařování sítě kruhů je zobrazeno v grafu 1.



Graf 1 Porovnání svařovacích časů – sít' kruhů

Při svařování u něhož je velká převaha lineárního pohybu se svařovací časy méně liší, viz graf 2. Je to způsobeno menším počtem změn směru pohybu a tím pádem má zde menší vliv hybnost soustavy konvenčního svařování. Úspora času při stejné rychlosti svařování je ve prospěch skenerového svařování jen 8%, avšak při použití svařovací rychlosti $v = 100$ mm/s skenerového svařování je úspora času 71%.

Z výsledků měření vyplývá, že čím složitější je svařovaná geometrie, tím se zvyšuje výhodnost použití skenerové svařovací hlavy oproti té konvenční.



Graf 2 Porovnání svařovacích časů - meandr

3.2 Geometrie

Pro porovnání geometrií svaru bylo nutné nejdříve provést svary na dvou různých materiálech. Prvním materiálem je korozivzdorná ocel X5CrNi18-10 a tím druhým je konstrukční ocel S235JR. Samotný experiment spočívá v provedení svarů na plechové pásky o tloušťce 3 mm pomocí skenerové hlavy a konvenční svařovací hlavy.

První typ svaru byl proveden pomocí skenerové svařovací hlavy a byl to přímý svar. Laserový paprsek se pohyboval od $-16,2^\circ$ do $+16,2^\circ$ v ose X. Celková délka svaru je 200 mm. Na obrázku 36 je ukázka tohoto typu. Druhý typ svaru nebyl přímý, ale byl do strany v ose Y vychýlen o $16,2^\circ$. Ostatní parametry jsou shodné s prvním typem svaru.

Další typy svaru byly provedeny přímou laserovou svařovací hlavou Precitec YW30. První typ svaru byl proveden kolmo, druhý byl proveden šikmo, pod úhlem $16,2^\circ$. Naklonění bylo provedeno pomocí robotu ABB IRB 2400, na němž je konvenční svařovací hlava upnuta. Tyto svary byly provedeny dvakrát a to pro srovnání dvěma různými rychlostmi. Nejprve $v = 20 \text{ mm/s}$ a poté $v = 30 \text{ mm/s}$.

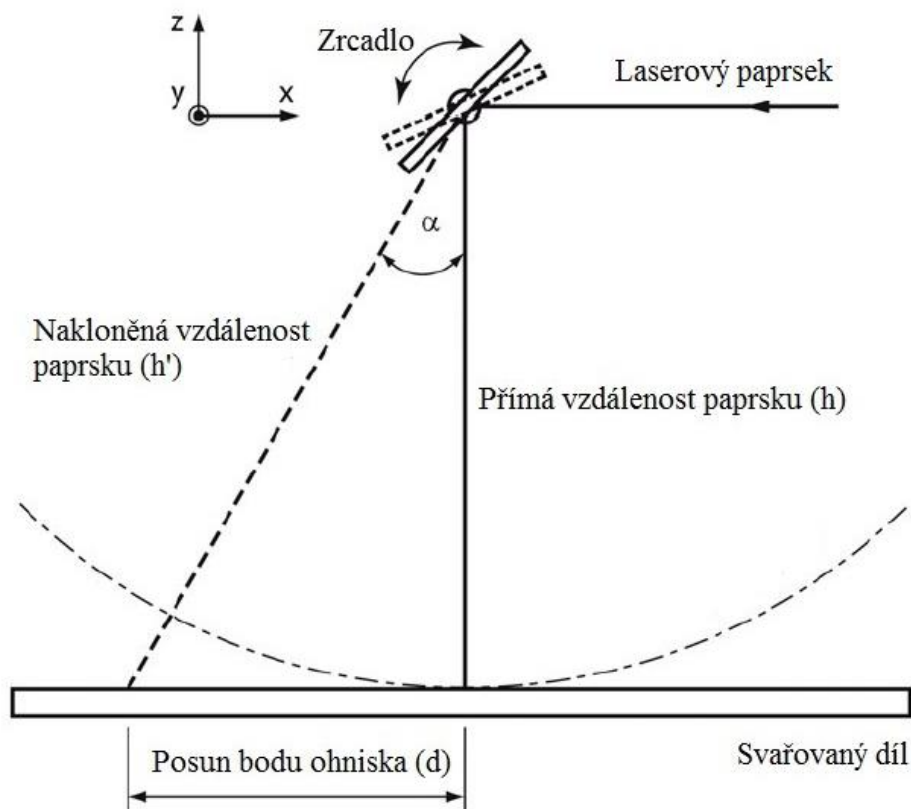
➤ Parametry a provedení experimentu

Parametry provedení laserového svaru skenerovou hlavou.

- Konstantní svařovací rychlost $v = 20 \text{ mm/s}$.
- Výkon laseru $P = 1200 \text{ W}$.
- Maximální úhel vychýlení paprsku $\alpha = \pm 16,2^\circ$.
- Délka svaru 200 mm.
- Tloušťka vzorku 3 mm.
- Průměr vlákna $100 \mu\text{m}$.
- Průměr spotu $200 \mu\text{m}$.
- Ohnisko bylo zaměřeno na povrch vzorku, $f=0$.

Parametry provedení laserového svaru provedeného konvenční hlavou.

- Konstantní svařovací rychlost $v_1 = 20 \text{ mm/s}$.
- Konstantní svařovací rychlost $v_2 = 30 \text{ mm/s}$.
- Výkon laseru $P = 1200 \text{ W}$.
- Maximální úhel vychýlení paprsku do strany $= 16,2^\circ$.
- Délka svaru 200 mm.
- Tloušťka vzorku 3 mm.
- Ohnisko bylo zaměřeno na povrch vzorku, $f=0$.



Obr. 36 Schéma rozsahu laserové hlavy při experimentu [80]

Postup při přípravě metalografického vzorku

1. Po naměření a označení míst pro uřezání vzorků ze zkušebního plechu, bylo provedeno samotné řezání. K řezání byla použita laboratorní pila MTH MIKRON 110.
2. Následně byly vzorky zalisovány (za tepla) do černého bakelitu v laboratorním lisu Struers CitoPress-1.
3. Po vyjmutí vzorků z lisu byly vzorky broušeny a leštěny ve stroji Struers Tegramin 20. Brusné operace byly v následujícím pořadí:
Kotouč Primo 120, broušení v délce 6 min
Kotouč Primo 220, broušení v délce 5 min
Kotouč Primo 500, broušení v délce 4 min
Následovalo leštění:
Kotouč Allegro s pastou DiaDuo 9 μm , v délce 4 min
Kotouč Allegro s pastou Dac 3 μm , v délce 4 min
4. Leptání bylo provedeno ve dvou různých roztocích. Austenitická korozivzdorná ocel X5CrNi18-10 byla leptána po dobu 2 minut v roztoku 221, ten je tvořen 2 ml HF (kyselina fluorovodíková), 1 ml HNO₃ (kyselina



Obr. 37 Svařování pásku na metalografické výbrusy

dusičná), 2 ml C₃H₈O₃ (glycerin).

Ocel S235JR byla leptána po dobu 30 sekund v roztoku Nital. Ten je tvořen z 10% HNO₃ a zbytek roztoku tvoří etanol C₂H₆O.

Po leptání byly vzorky opláchnuty ve vodě a následně v etanolu. Po oplachu byly vzorky vysušeny horkovzdušnou pistolí.

Jakmile byly vzorky připraveny, byly na mikroskopu Olympus SC50 zhotoveny fotografie svarů a také zde byly změřeny hloubky průvarů a úhly naklonění svarů od osy svarů, viz tabulka 14 a tabulka 15.

Tab. 14 Hloubka a úhel svaru při skenerovém svařování

| Hloubka a úhel svaru u skenerového svařování | | | Začátek svaru | Střed svaru | Konec svaru | Průměrný rozdíl mezi přímou a nepřímou metodou | Procentuální rozdíl mezi hloubkami svarů |
|--|---------------------|--------------------|---------------|-------------|-------------|--|--|
| S235JR | Přímé svařování | Hloubka svaru [mm] | 2,40 | 2,68 | 2,42 | +0,14 | 6 % |
| | Svařování pod úhlem | Hloubka svaru [mm] | 2,25 | 2,54 | 2,30 | -0,14 | |
| | | Úhel svaru [°] | 11 | 13 | 11 | | |
| X5CrNi18-10 | Přímé svařování | Hloubka svaru [mm] | 2,46 | 2,59 | 2,49 | +0,13 | |
| | Svařování pod úhlem | Hloubka svaru [mm] | 2,34 | 2,47 | 2,34 | -0,13 | 5,5% |
| | | Úhel svaru [°] | 16 | 17 | 15 | | |

Tab. 15 Hloubka a úhel svaru při konvenčním svařování

| Hloubka a úhel svaru u konvenčního svařování | | | Kolmý směr | Pod úhlem | Úhel svaru [°] | Rozdíl hloubek mezi rychlostmi | Rozdíl hloubek mezi metodami |
|--|-------------|--------------------|------------|-----------|----------------|--------------------------------|------------------------------|
| S235JR | v = 20 mm/s | Hloubka svaru [mm] | 2,65 | 2,46 | 12 | 0,57 – kolmý směr | 0,19 |
| | v = 30 mm/s | Hloubka svaru [mm] | 2,08 | 2,06 | 13 | 0,40 – pod úhlem | 0,02 |
| X5CrNi18-10 | v = 20 mm/s | Hloubka svaru [mm] | 2,45 | 2,42 | 17 | 0,29 – kolmý směr | 0,03 |
| | v = 30 mm/s | Hloubka svaru [mm] | 2,16 | 2,08 | 17 | 0,34 – pod úhlem | 0,08 |

➤ Hloubka svarů u materiálu S235JR

V tabulkách 14 a 15 můžeme vidět hodnoty hloubek svarů. Z těchto hodnot vyplývá, že pro stejnou konstantní rychlost svařování $v = 20$ mm/s je ve středu svarové housenky větší hloubka svaru u skenerového svařování, to platí pro oba dva testované materiály.

U metody konvenčního kolmého svařování přímou hlavou materiálu S235JR je maximální hloubka svaru ve středu svarové housenky 2,65 mm, u přímého svařování skenerovou hlavou je hloubka svaru

2,68 mm. Tento rozdíl je zanedbatelný a může

být způsoben nepřesností měření. V tomto ohledu jsou si obě metody rovnocenné.

U konvenčního kolmého svařování rychlostí $v = 30$ mm/s je hloubka svaru 2,08 mm, to je způsobeno vyšší rychlostí svařování a tím nižší hodnotou specificky vneseného tepla.

Při svařování shodného materiálu za shodných rychlostí, avšak pod úhlem, je hloubka svaru největší u metody skenerového svařování, tato hodnota dosahuje 2,54 mm. Zatímco u konvenčního svařování rychlostí $v = 20$ mm/s pod úhlem je hloubka svaru 2,46 mm. To je způsobeno lepším zaostřením paprsku u skenerové hlavy, tento rozdíl se ukazuje právě u svařování pod úhlem, neboť tento typ svaru je na to citlivější. Nejmenší hloubky svaru je zase dosaženo u konvenčního svařování za vyšší rychlosti svařování, důvod je stejný, jako u kolmého svařování.

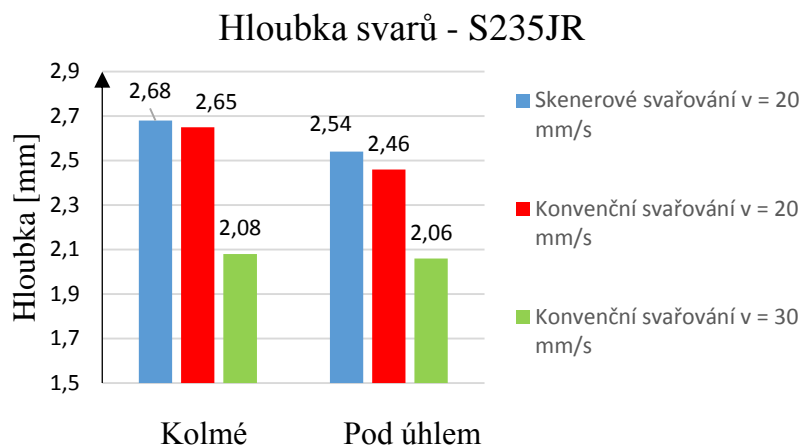
Výše popsané hodnoty můžeme vidět v grafu 3, kde je zobrazena hloubka svarů v závislosti na metodě provedení svaru a svařovací rychlosti. Hodnoty úhlu vychýlení jsou velice podobné, pohybují se od 12° do 13° , tento rozptyl můžeme připsat nepřesnosti měření.

➤ Hloubka svarů u materiálu X5CrNi18-10

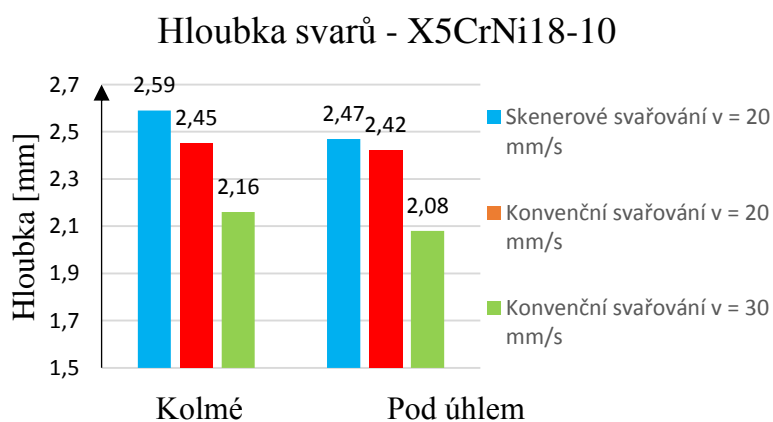
Při svařování materiálu X5CrNi18-10 kolmo skenerovou metodou konstantní rychlostí $v = 20$ mm/s byla hloubka svaru 2,59 mm, přičemž při použití konvenční laserové hlavy byla dosažena hloubka svaru jen 2,45 mm. To tvoří rozdíl 0,14 mm a to už není zanedbatelný rozdíl, jako při svařování materiálu S235JR. Při konvenčním svařování zvýšenou rychlostí dosahuje hloubka svaru 2,16 mm, je to způsobeno menším specificky vneseným teplem.

U svařování pod úhlem se situace opakuje a u metody skenerového

svařování je hloubka svaru zase největší a to 2,47 mm. Rozdíl mezi skenerovým a konvenčním svařováním je zde menší, jen 0,05 mm. U konvenčního svařování rychlostí $v = 20$ mm/s byla hloubka svaru 2,42 mm. Při zvýšené svařovací rychlosti metody konvenčního svařování pod úhlem byla dosažena hloubka 2,08 mm.



Graf 3 Hloubka svarů u materiálu S235JR



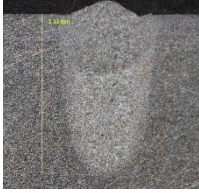
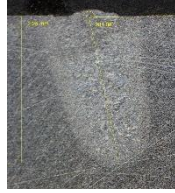

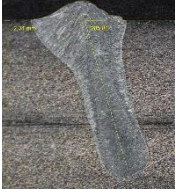





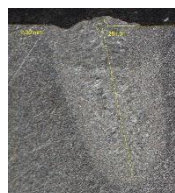

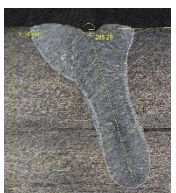
Graf 4 Hloubka svarů u materiálu X5CrNi18-10

Největší hloubky svarů u skenerového svařování bylo dosaženo z důvodu lepšího ostření během svařování u této metody. Rozdíly u metody svařování pod úhlem však nejsou nijak významné. Při svařování vyšší rychlostí jsou hloubky svarů menší. To je způsobeno menší hodnotou specificky vneseného tepla v průběhu svařování.









Všechny hloubky svarů byly měřeny v přibližném středu svarového housenky na metalografických výbrusech. Jednotlivé hodnoty hloubek svarů jsou zachyceny v grafu 4.

Úhel vychýlení u metody svařování pod úhlem je při svařování konvenčním i skenerovým způsobem stejný, 17°, a to i při konvenčním svařování za vyšší rychlosti.

Tab. 16 Fotografie metalografických vzorků – skenerové svařování

| | | <i>S235JR</i> | | <i>X5CrNi18-10</i> | |
|---------|--|---|---|--|---|
| | | Kolmo | Pod úhlem | Kolmo | Pod úhlem |
| Počátek | |  |  |  |  |
| | |  |  |  |  |
| | |  |  |  |  |

Tab. 17 Fotografie metalografických vzorků – konvenční svařování

| | | <i>S235JR</i> | | <i>X5CrNi18-10</i> | |
|-------------|--|---|---|--|---|
| | | Kolmo | Pod úhlem | Kolmo | Pod úhlem |
| v = 20 mm/s | |  |  |  |  |
| | |  |  |  |  |

➤ Vyhodnocení geometrií obou použitých metod

Z tabulky 14 můžeme vidět, že u skenerového kolmého svařování, je větší hloubka průvaru. U obou typů svařování se rozdíl ve hloubce průvaru pohybuje od 0,12 mm do 0,15 mm. Průměrný rozdíl hloubek mezi kolmým svařováním a svařováním pod úhlem je u materiálu S235JR 0,14 mm (rozdíl 6% v tloušťce) a u materiálu X5CrNi18-10 je to 0,13 mm (rozdíl 5,5% v tloušťce). Z měření není patrné, zdali je větší rozdíl hloubek průvaru v počátku, středu či konci svaru. Celková hloubka průvaru je největší ve středu svarové housenky a nejmenší v počátku svařování. Úhel naklonění u svařování pod úhlem dosahuje vyšších hodnot u svařování materiálu X5CrNi18-10, zde jsou hodnoty tohoto úhlu od 15° do 17°. U materiálu S235JR se tyto hodnoty pohybují od 11° do 13°. U obou metod je největší hodnota tohoto úhlu dosažena ve středu svarové housenky.

Největší hloubka svaru je u materiálu S235JR, to je způsobeno vyšší tepelnou vodivostí tohoto materiálu. Díky tomu, je také šířka svaru větší než u korozivzdorné austenitické oceli. Tepelná vodivost materiálu S235JR je: $\lambda_t = 55$ [W/m·K] a oproti tomu tepelná vodivost X5CrNi18-10 je: $\lambda_t = 15$ [W/m·K].

Hloubka svaru v krajních polohách je naopak větší u materiálu X5CrNi18-10. Může to být způsobeno tím, že díky nižší tepelné vodivosti tohoto materiálu nedochází k tak velkým tepelným ztrátám odvodem tepla do okolí, ale naopak se energie více šíří ve směru paprsku. Úhel svaru je větší u materiálu X5CrNi18-10. To z velké míry způsobuje pravděpodobně vyšší index lomu světla při průchodu roztavenými plyny u materiálu S235JR.

U materiálu S235JR při svařování konvenční hlavou při rychlosti $v = 20$ mm/s je rozdíl v hloubkách mezi kolmým směrem a svařováním pod úhlem 0,19 mm. To je způsobeno právě vyosením paprsku o 16,2°, kdy je hloubka zmenšena o právě toto vybočení paprsku. U svařování za vyšší rychlosti je tento rozdíl neznatelný, jen 0,02. Tento minimální rozdíl je hodně závislý na přesnosti měření.

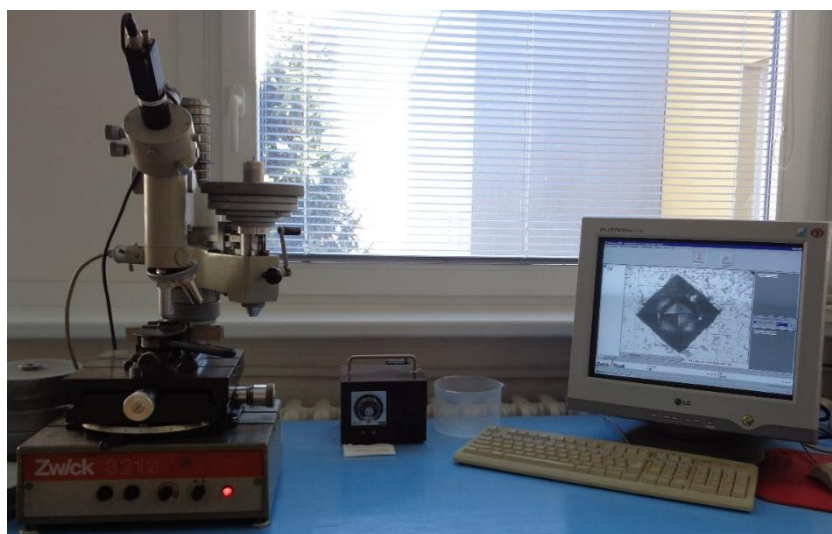
U materiálu X5CrNi18-10 je rozdíl hloubek svarů při použití konvenční svařovací hlavy jen 0,08 mm, větší hloubka je dosahována u metody kolmé. Menší rozdíl v hloubkách než u oceli S235JR může být zapříčiněn více jak 3x vyšší teplotní vodivostí u materiálu S235JR.

Změřený úhel svaru dosahuje u materiálu S235JR hodnot 12° a 13°. Zatímco u korozivzdorné oceli dosahuje při obou rychlostech svařování 17°. To je způsobeno rozdílným koeficientem lomu světla u par těchto materiálů.

Veškeré hodnoty hloubky svarů, či úhlů jsou zobrazeny v tabulkách 14 a 15, na fotografiích v tabulkách 16 a 17.

3.3 Tvrdost

Po změření hloubek průvarů a úhlu sklonu svarů byla na vybraných vzorcích změřena tvrdost. Měření bylo provedeno na vzorcích od obou materiálů. Pro měření byly zvoleny vzorky, které byly svařovány konvenčně kolmo ve středu svarové housenky. A vzorky svařované pod úhlem na počátku svarové housenky pomocí skenerové hlavy. Úmyslně byly zvoleny tyto dva extrémy, aby byly zachyceny oba extrémy při této technologii svařování.



Obr. 38 Měření tvrdosti

U metody konvenčního svařování bylo měření provedeno při dvou svařovacích rychlostech a také při kolmém svařování a svařování pod úhlem. Měření bylo provedeno na tvrdoměru

Zwick 3212, tento přístroj disponuje měřicím systémem TextXpert. Zatížení pro měření bylo u obou materiálů 5 kg, hrot byl diamantový a měřila se tvrdost pomocí metody Vickers. Ze základního materiálu (ZM) byly přes svar provedeny vpichy, zpět do ZM. Po provedení vpichu zůstal indentor zanořen do materiálu ještě 12 až 15 vteřin, poté byly u těchto vpichů automaticky změřeny uhlopříčky a z nich vyšly výsledné hodnoty tvrdosti.

➤ Parametry svařování

Parametry provedení laserového svaru skenerovou hlavou.

- Konstantní svařovací rychlost $v = 20 \text{ mm/s}$
- Výkon laseru $P = 1200 \text{ W}$
- Maximální úhel vychýlení paprsku $\alpha = \pm 16,2^\circ$
- Délka svaru 200 mm
- Tloušťka vzorku 3 mm
- Průměr vlákna 100 μm
- Průměr spotu 200 μm
- Ohnisko bylo zaměřeno na povrch vzorku, $f=0$

Parametry provedení laserového svaru provedeného konvenční hlavou.

- Konstantní svařovací rychlost $v_1 = 20 \text{ mm/s}$
- Konstantní svařovací rychlost $v_2 = 30 \text{ mm/s}$
- Výkon laseru $P = 1200 \text{ W}$
- Maximální úhel vychýlení paprsku do strany = $16,2^\circ$
- Délka svaru 200 mm
- Tloušťka vzorku 3 mm
- Ohnisko bylo zaměřeno na povrch vzorku, $f=0$

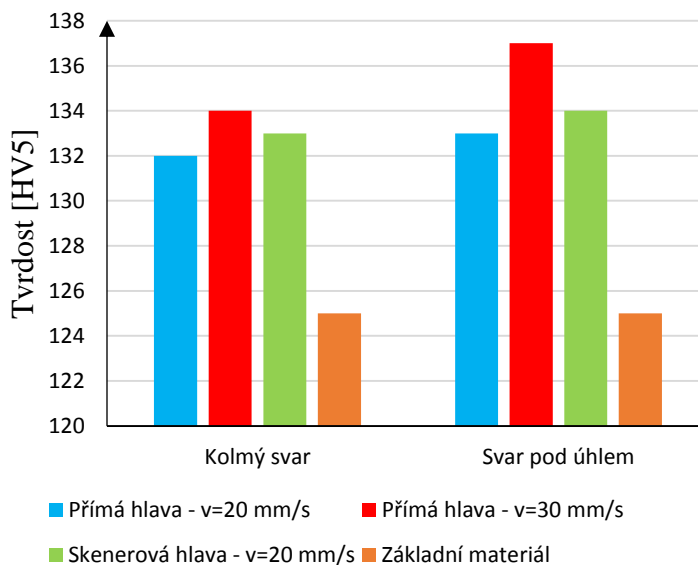
➤ Vyhodnocení tvrdosti u materiálu X5CrNi18-10

Materiál X5CrNi18-10 je korozivzdorná austenitická ocel a díky austenitotvorným prvkům (Ni, Mn) se po zahřátí a následném zchlazení tvoří zase austenit. To nezpůsobuje velký rozdíl v tvrdosti tepelně ovlivněné oblasti od základního materiálu.

Největší rozdíl v tvrdosti mezi ZM a svarem je 19 HV5 a to u metody kolmého svařování konvenční hlavou rychlostí $v = 30 \text{ mm/s}$. Nejvyšší hodnota tvrdosti dosahovaná ve svarovém kovu je 134 HV5 při kolmém svařování konvenční hlavou $v = 30 \text{ mm/s}$ a při svařování pod úhlem 137 HV5. Hodnoty tvrdosti jsou nejvyšší u konvenčního svařování vyšší rychlostí, to je způsobeno vyšším gradientem teploty a tím vyšší rychlostí ochlazování než u nižší rychlosti svařování.

Při svařování rychlostí $v = 20 \text{ mm/s}$ je mírně vyšší tvrdost dosažena u skenerového svařování. Rozdíl je však jen 1 HV5, takže to může být dáno nepřesností měření.

Porovnání maximální tvrdosti materiálu X5CrNi18-10

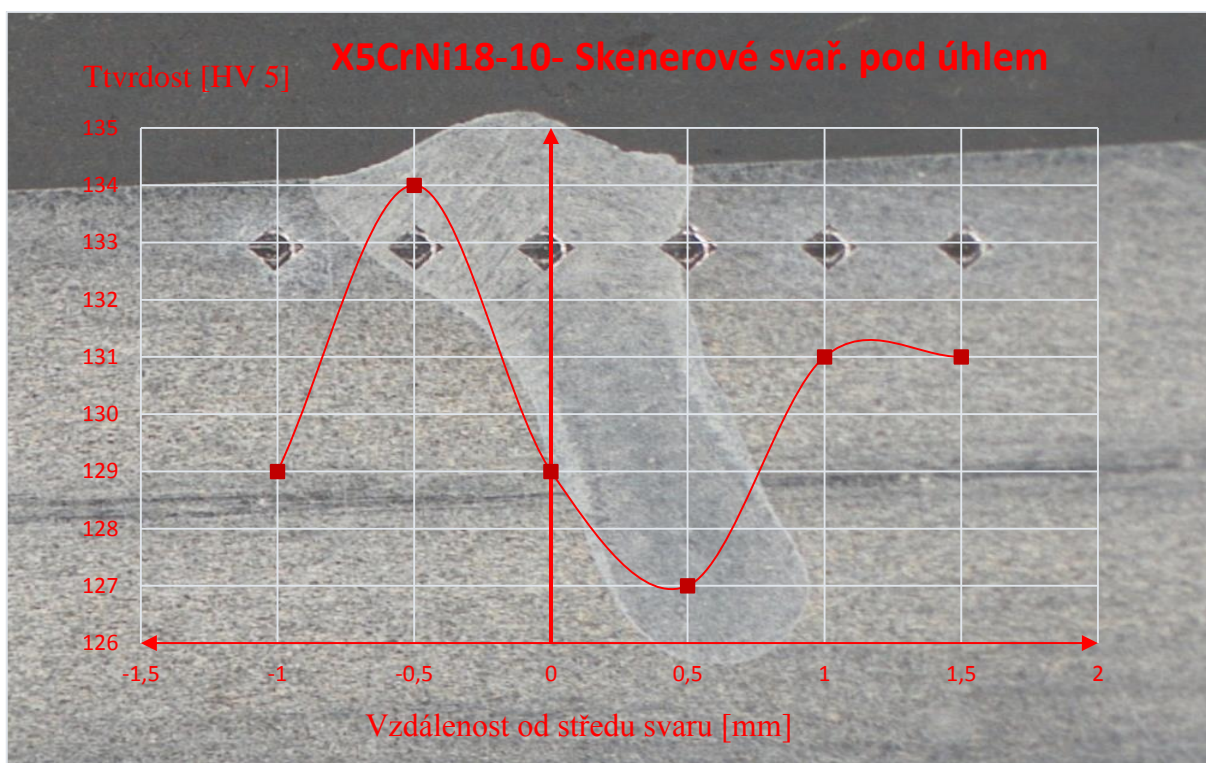


Graf 5 Porovnání maximálních tvrdostí materiálu X5CrNi18-10

Veškeré hodnoty tvrdostí je možno vidět v tabulkách 18 až 21. V grafu 5 jsou zobrazeny největší naměřené hodnoty při použití různých metod svařování. V grafech 7,9 a 11 je zobrazena závislost hodnoty tvrdosti na vzdálenosti od středu svaru. Jednotlivé vpichy diamantového indentoru ve vzorcích jsou zobrazeny v grafech 6,8 a 10. Tyto grafy slouží k lepšímu přehledu o měřené tvrdosti. Všechny tyto grafy jsou v příloze 3 a 4. Mezi tvrdostí naměřenou na svaru provedeném kolmě anebo pod úhlem není výrazný rozdíl, avšak vždy je tvrdost vyšší u metody svařování pod úhlem. To je způsobeno větší plochou ochlazování svaru.

Tab. 18 Nejvyšší tvrdost u X5CrNi18-10

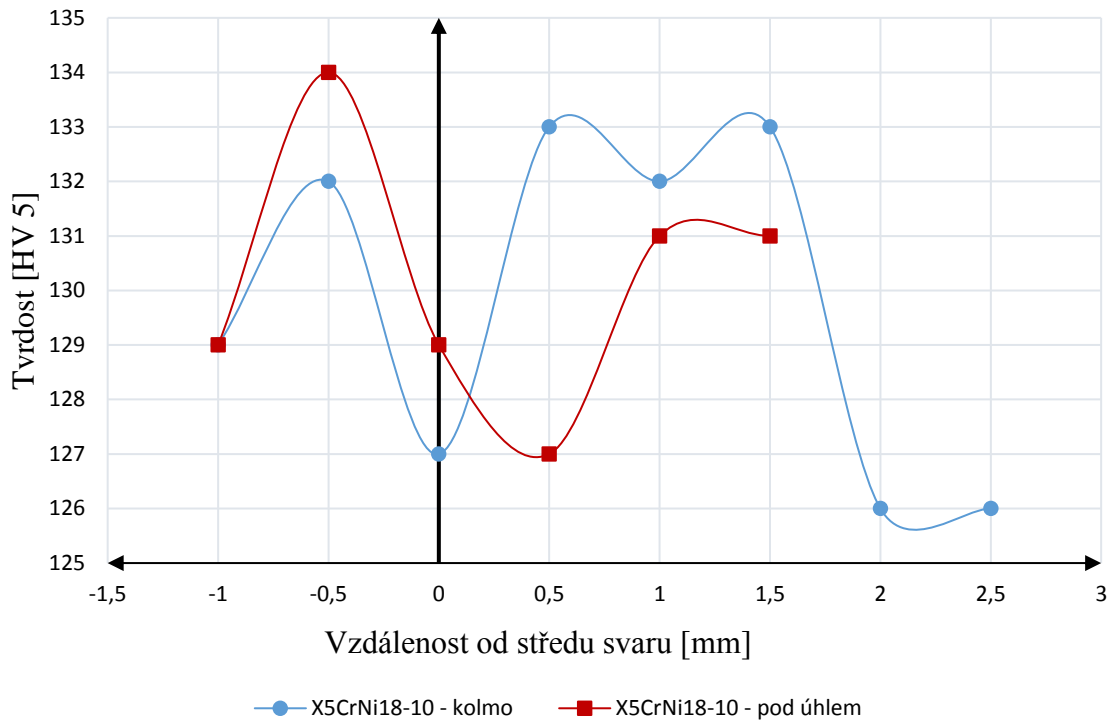
| Největší tvrdost materiálu X5CrNi18-10 [HV5] | | | Tvrdost ZM [HV5] | |
|--|-----------|------------|------------------|----------------|
| | | Kolmý svar | | Svar pod úhlem |
| Přímá hlava | v=20 mm/s | 132 | 133 | 125 |
| | v=30 mm/s | 134 | 137 | |
| Skenerová hlava | | 133 | 134 | |



Graf 6 Průběh tvrdosti u materiálu X5CrNi18-10, pod úhlem

Tab. 19 Tvrdost X5CrNi18-10 Skenerové svařování

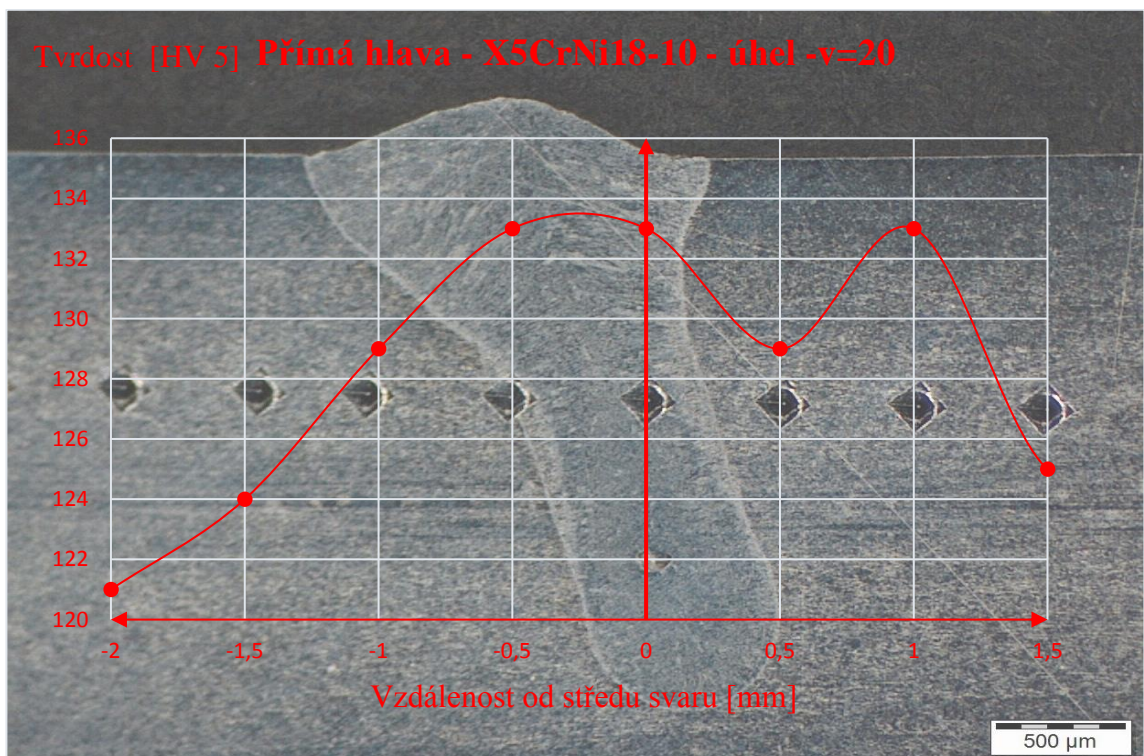
| Tvrdost HV5 – Skenerové svařování | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|-----|
| X5CrNi18-10 | Kolmo | 129 | 132 | 127 | 133 | 132 | 133 | 126 | 126 |
| | Úhel | 129 | 134 | 129 | 127 | 131 | 131 | - | - |



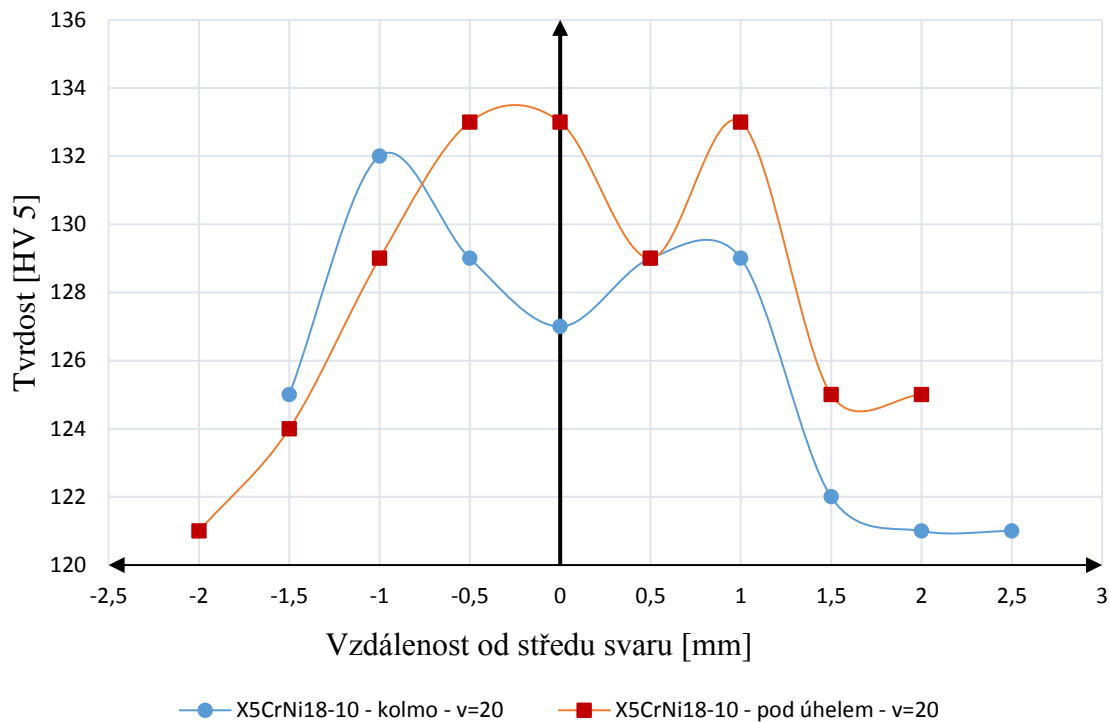
Graf 7 Závislost tvrdosti materiálu X5CrNi18-10 na vzdálenosti od středu svaru

Tab. 20 Tvrdość X5CrNi18-10 – konvenční svař. $v=20$ mm/s

| | | Tvrdość HV5 – Konvenční svařování $v=20$ mm/s | | | | | | | | |
|-------------|-------|---|------------|-----|------------|------------|-----|-----|-----|-----|
| X5CrNi18-10 | Kolmo | 125 | 132 | 129 | 127 | 129 | 129 | 122 | 121 | 121 |
| | Úhel | 121 | 124 | 129 | 133 | 133 | 129 | 133 | 125 | 125 |



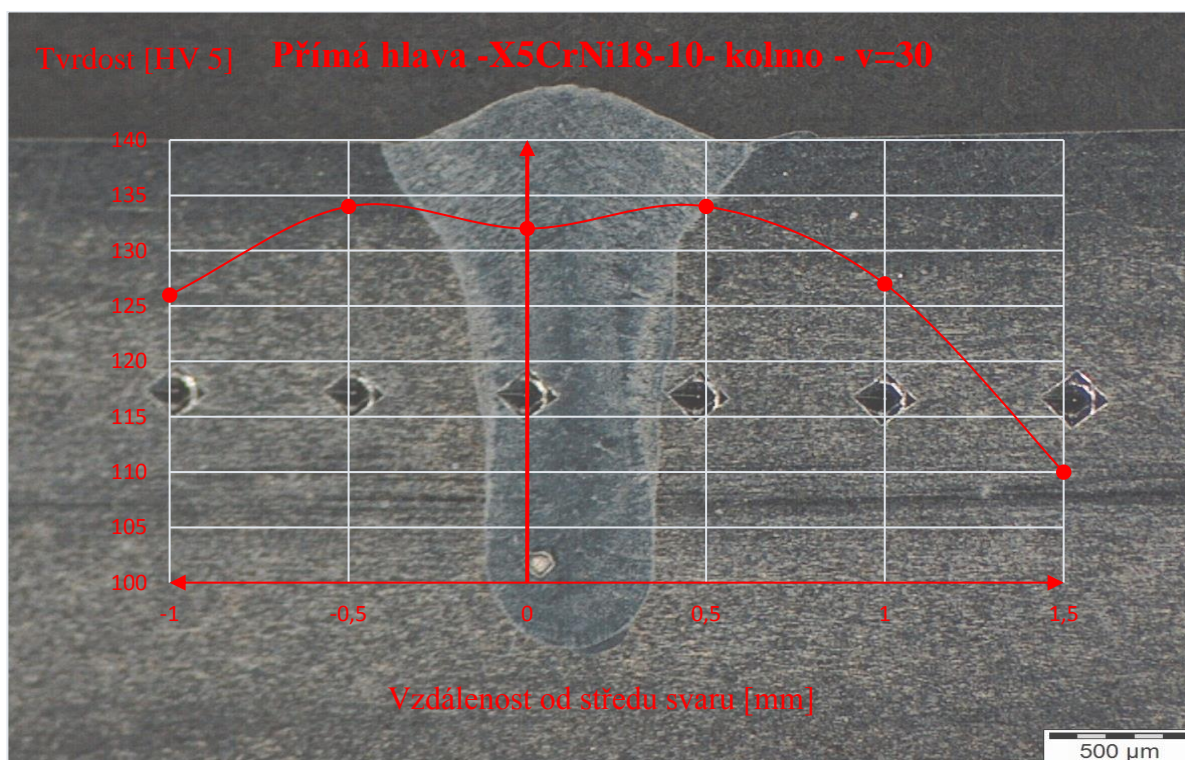
Graf 8 Průběh tvrdosti konvenční svař. $v=20$ mm/s – pod úhlem



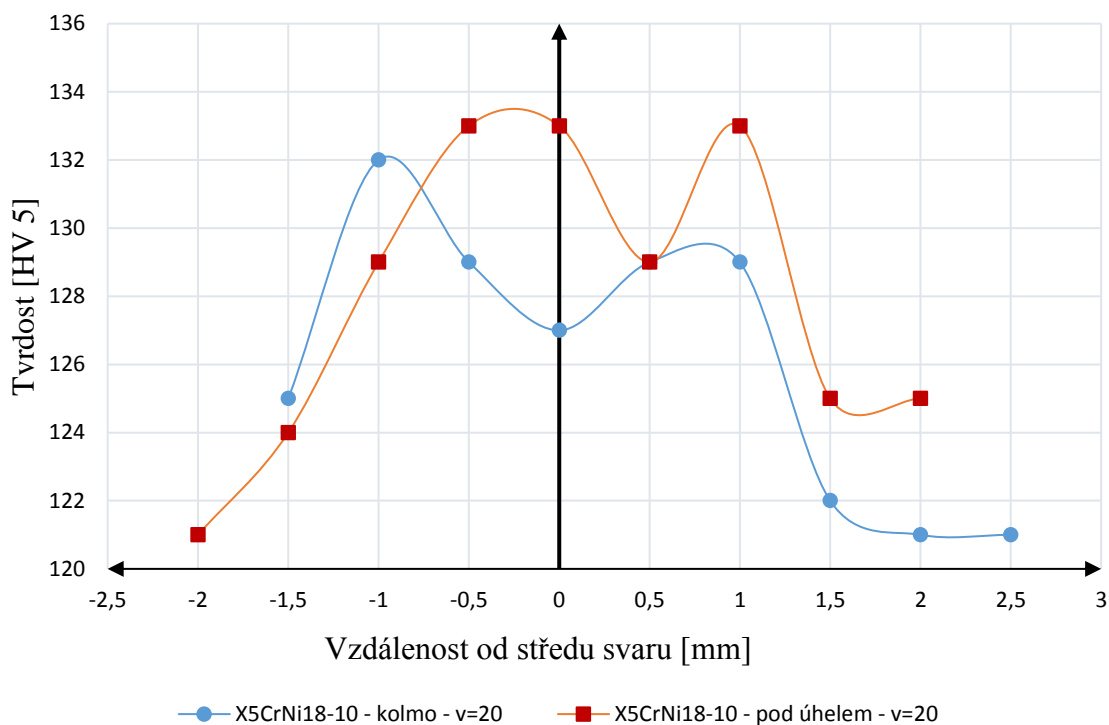
Graf 9 Závislost tvrdosti materiálu X5CrNi18-10 na vzdálenosti od středu svaru

Tab. 21 Tvrdost X5CrNi18-10 – konvenční svař. v=30 mm/s

| | | Mikrotvrdost HV5 – Konvenční svařování v=30mm/s | | | | | | |
|-------------|-------|---|-----|------------|-----|------------|-----|-----|
| X5CrNi18-10 | Kolmo | - | 126 | 134 | 132 | 134 | 127 | 110 |
| | Úhel | 122 | 130 | 135 | 130 | 137 | 127 | 118 |



Graf 10 Průběh tvrdosti konvenční svař. v=20mm/s – kolmý



Graf 11 Závislost tvrdosti materiálu X5CrNi18-10 na vzdálenosti od středu svaru

➤ Vyhodnocení tvrdosti u materiálu S235JR

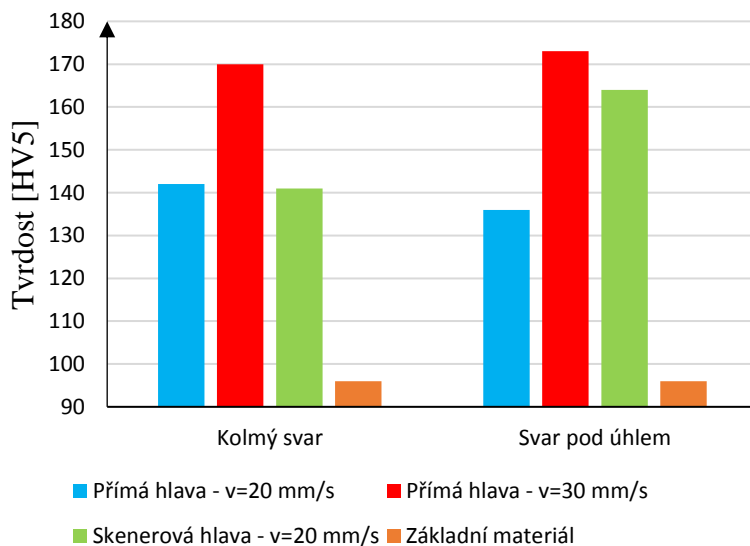
U materiálu S235JR při vyšších rychlostech ochlazování, běžných při svařování působí prvky obsažené v této oceli vznik tetragonálního martenzitu. Vznik martenzitu zapříčiňuje křehkost a větší tvrdost v oblasti svaru.

U materiálu S235JR je nejvyšší tvrdost HV5 dosažena u konvenčního svařování rychlostí $v = 30 \text{ mm/s}$, dosažená maximální tvrdost je 173 HV5. Druhé nejvyšší hodnoty jsou dosaženy u skenerového svařování $\text{HV5} = 164$. Nejnižší tvrdost je dosažena u konvenčního svařování nižší rychlostí.

Nejvyšší dosažená tvrdost u konvenčního svařování rychlostí $v = 30 \text{ mm/s}$ je způsobena vyšší rychlostí ochlazování. Ve srovnání s metodou konvenčního svařování nižší rychlostí je zde tvrdost vyšší asi o 30 HV5. Tvrdosti při skenerovém svařování se pohybují mezi oběma metodami konvenčního svařování, dosažená tvrdost při kolmém svařování je 141 HV5 a při svařování pod úhlem je 164 HV5.

U základního materiálu se tvrdost pohybuje okolo 96 HV5 a jelikož nejvyšší naměřená tvrdost je 173 HV5, je zde největší navýšení tvrdosti o 77 HV5. Tak velké navýšení tvrdosti je způsobeno tím, že materiál S235JR obsahuje velké množství uhlíku – C. Ten způsobuje

Porovnání maximální tvrdosti materiálu S235JR



Graf 12 Porovnání maximálních tvrdostí u materiálu S235JR

zvýšenou tvrdost, protože zde vzniká martenzitická struktura a ta má vyšší tvrdost než základní struktura materiálu.

U svaru vytvořeného metodou pod úhlem jsou hodnoty tvrdosti svarového kovu vyšší, to může být způsobeno delší linií styku svarového kovu se základním materiálem, tím je také možnost odvodu svarového tepla do většího objemu materiálu, čímž se zvýší rychlost ochlazování a tím je vyšší výsledná tvrdost svarového kovu.

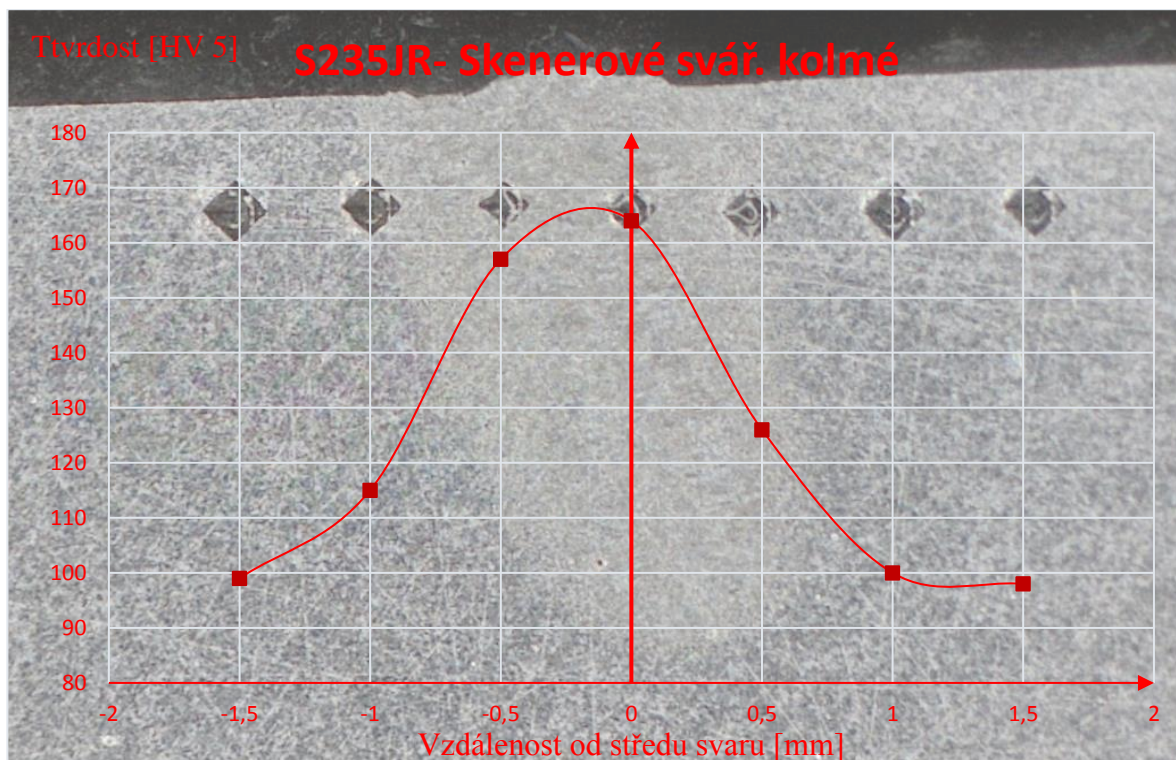
Na grafech 13,15 a 17 jsou zobrazeny hodnoty tvrdosti v závislosti na poloze měření, v tabulkách 22 až 24 jsou zobrazeny všechny hodnoty měření. V grafech 14,16 a 18 jsou na vybraných snímcích metalografických výbrusů zobrazeny body měření, další tyto grafy jsou v příloze 3 a 4.

Tab. 22 Největší tvrdost S235JR

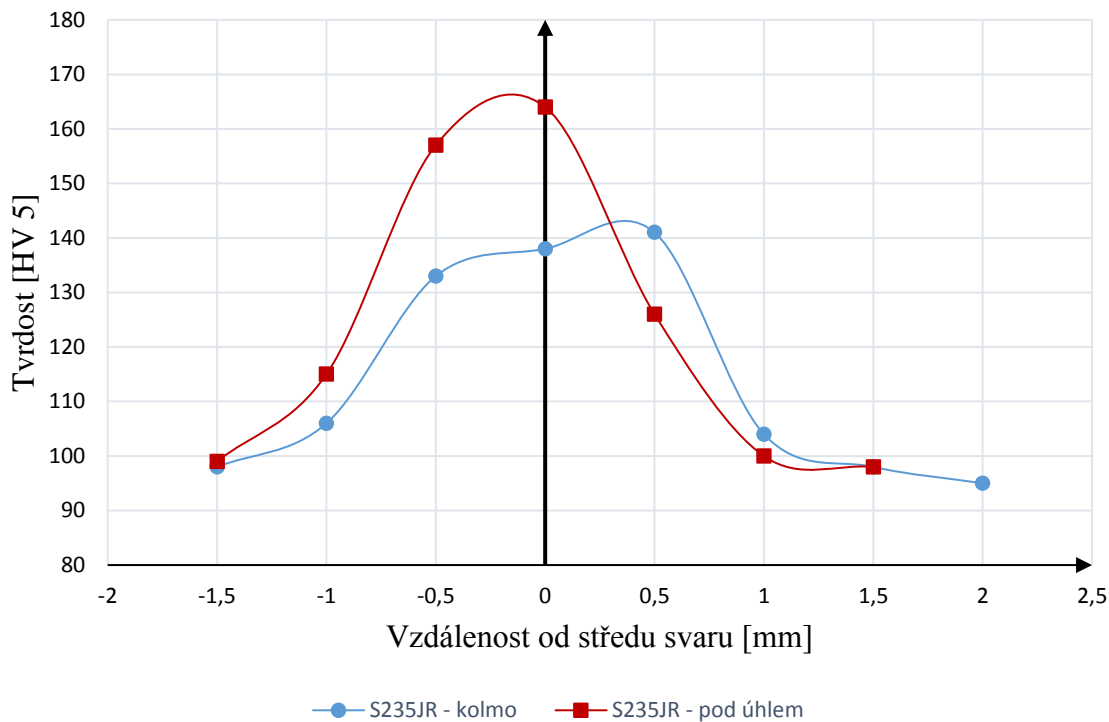
| Největší tvrdost materiálu S235JR [HV5] | | | | Tvrdost ZM [HV5] |
|---|-----------|------------|----------------|------------------|
| | | Kolmý svar | Svar pod úhlem | |
| Přímá hlava | v=20 mm/s | 142 | 136 | 96 |
| | v=30 mm/s | 170 | 173 | |
| Skenerová hlava | | 141 | 164 | |

Tab. 23 Tvrdost – Skenerové svařování S235JR

| Tvrdost HV5 - Skenerové svařování | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------|----|-----|-----|------------|------------|-----|----|----|
| S235JR | Kolmo | 98 | 106 | 133 | 138 | 141 | 104 | 98 | 95 |
| | Úhel | 99 | 115 | 157 | 164 | 126 | 100 | 98 | - |



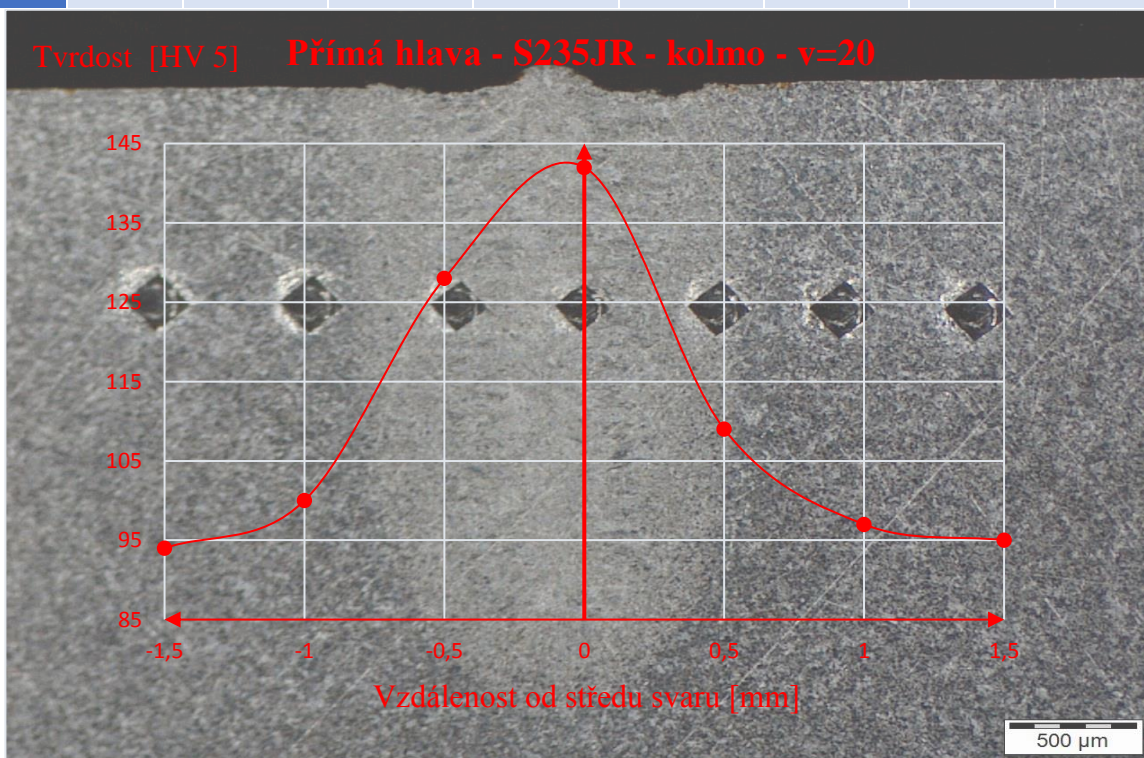
Graf 13 Průběh tvrdosti skenerového svařování – pod úhlem



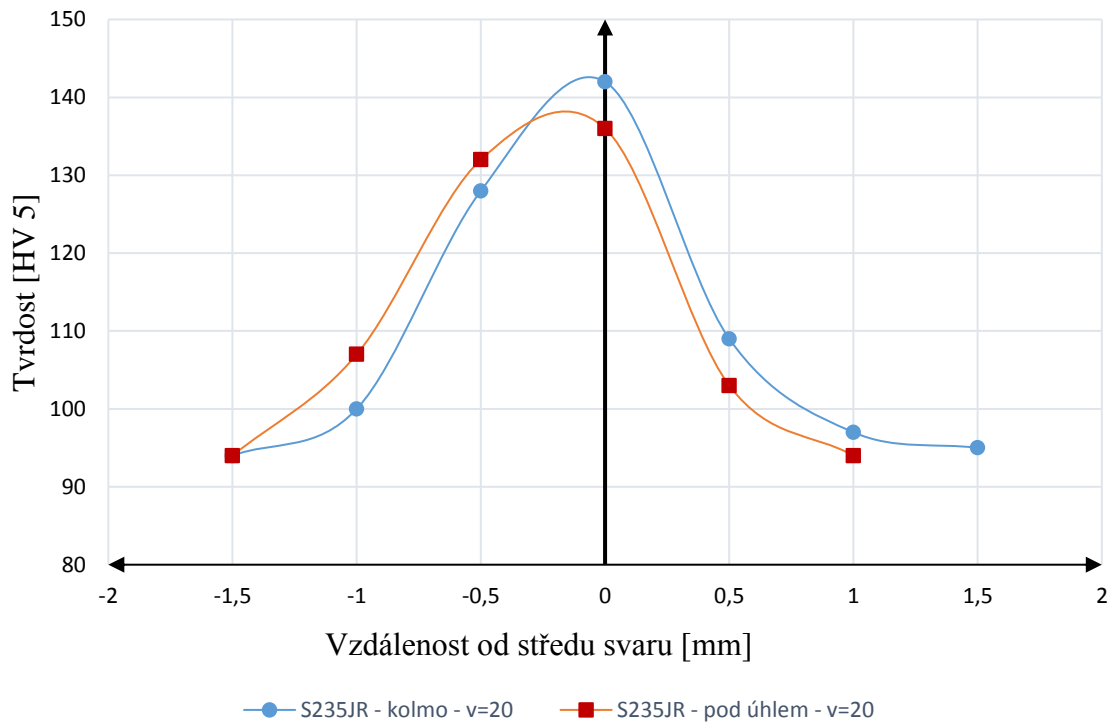
Graf 14 Závislost tvrdosti materiálu S235JR na vzdálenosti od středu svaru

Tab. 24 Tvrdość S235JR – konvenční svař. $v=20$ mm/s

| | | Tvrdość HV5 – Konvenční svařování $v=20$ mm/s | | | | | | |
|--------|-------|---|-----|-----|------------|-----|----|----|
| S235JR | Kolmo | 94 | 100 | 128 | 142 | 109 | 97 | 95 |
| | Úhel | 94 | 107 | 132 | 136 | 103 | 94 | - |



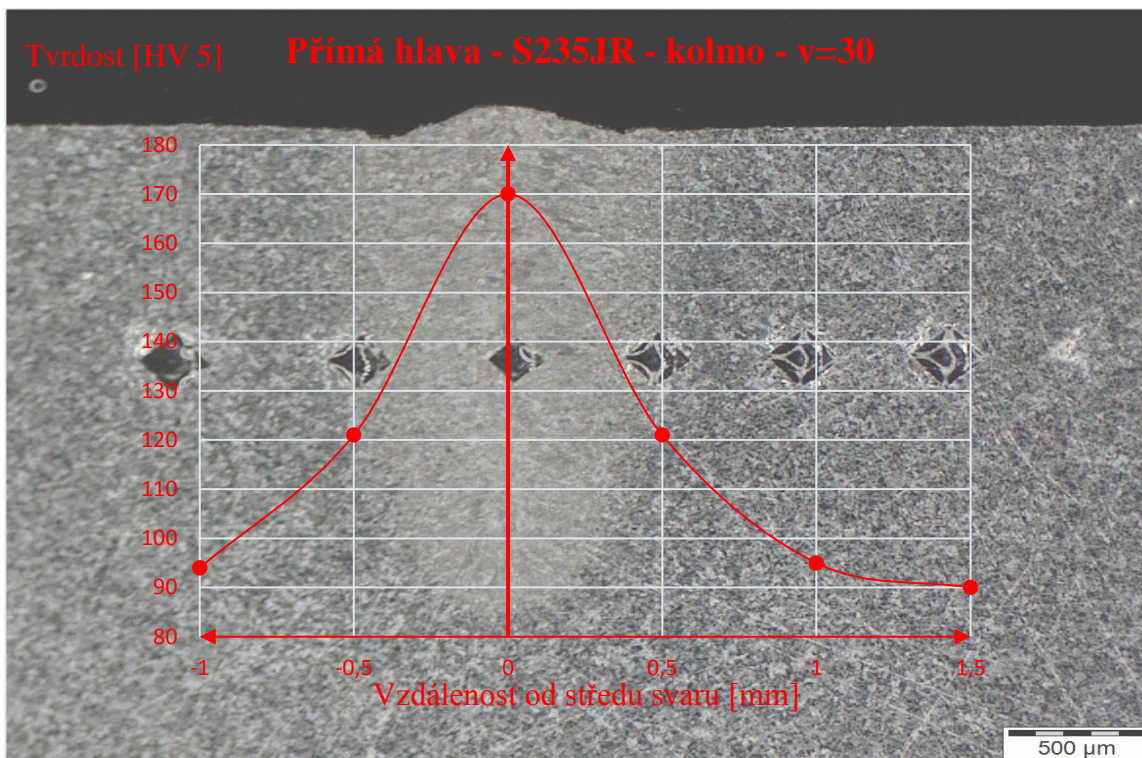
Graf 15 Průběh tvrdosti konvenčního svař. $v=20$ mm/s – kolmý



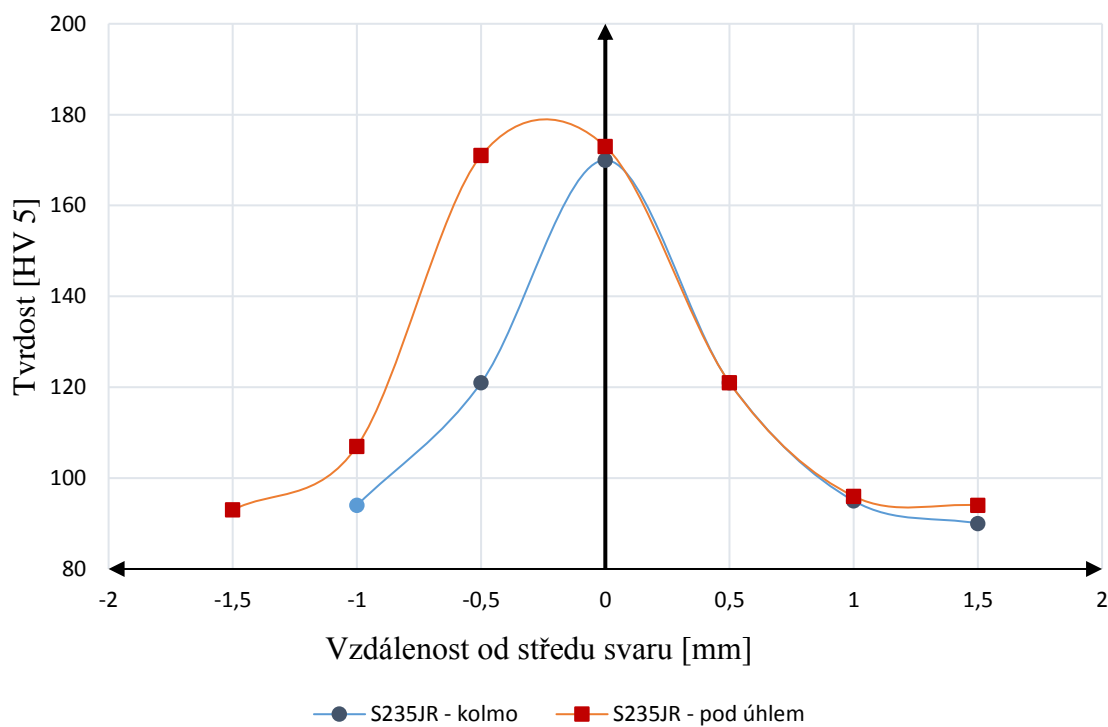
Graf 16 Závislost tvrdosti S235JR na vzdálenosti od středu svaru – konvenční svař.
v=20 mm/s

Tab. 25 Tvrdost S235JR – konvenční svař. v=30 mm/s

| Tvrdost HV5 – Konvenční svařování v=30mm/s | | | | | | | | |
|--|-------|----|-----|-----|------------|-----|----|----|
| S235JR | Kolmo | - | 94 | 121 | 170 | 121 | 95 | 90 |
| | Úhel | 93 | 107 | 171 | 173 | 121 | 96 | 94 |



Graf 17 Průběh tvrdosti konvenčního svař. v=30 mm/s – kolmý



Graf 18 Závislost tvrdosti S235JR na vzdálenosti od středu svaru – konvenční svař.
v=30 mm/s

3.4 Tahová zkouška

Po provedení předchozích zkoušek byla provedena tahová zkouška. Ta byla provedena u obou typů materiálů. Celkový počet testovaných kusů byl 24. Pro statistickou přesnost byly vždy 3 vzorky od jednoho materiálu svařovány stejnou metodou a z těchto 3 vzorků byly spočítány průměrné hodnoty. Jako testované vzorky byly použity ploché vzorky o tloušťce 2 mm.

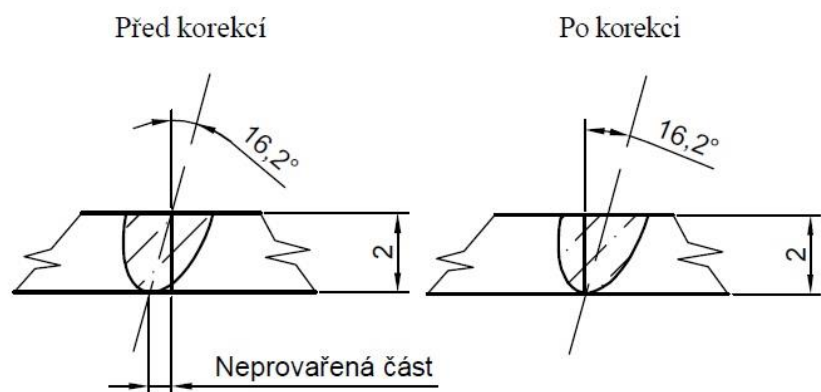


Obr. 39 Ukázka z tahové zkoušky

➤ Parametry a provedení experimentu.

- Konstantní svařovací rychlost $v = 30 \text{ mm/s}$
- Výkon laseru $P = 2000 \text{ W}$
- Maximální úhel vychýlení paprsku v ose délky svaru $\pm 23,5^\circ$
- Úhel svařování pod úhlem, bočního vybočení $\alpha = \pm 16,2^\circ$
- Délka svaru 150 mm
- Tloušťka vzorku 2 mm
- Průměr vlákna $100 \mu\text{m}$

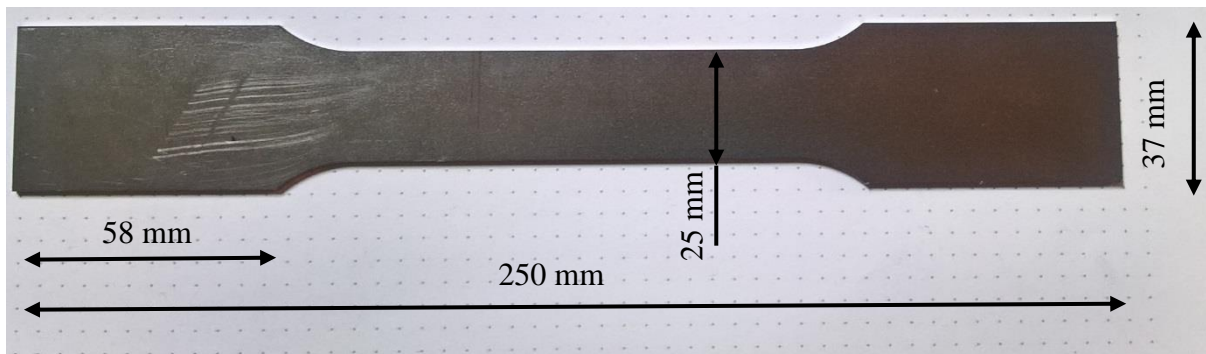
Pro tahovou zkoušku byly svařeny dva čtvercové plechy o hraně $a = 150 \text{ mm}$ k sobě natupo, tloušťka plechů je 2 mm. Svařeny byly k sobě plechy skenerovou hlavou a to nejprve kolmo a poté pod úhlem $16,2^\circ$. Pro tento experiment byly použity oba materiály,



Obr. 40 Znázornění hledání správného odsazení

jak ocel S235JR, tak i X5CrNi18-10. Svařování pod úhlem bylo problematické z důvodu potřeby nalezení správného odsazení paprsku od rozhraní materiálů tak, aby byly svary provařeny po celé hloubce svaru. Hledání vhodného odsazení bylo prováděno pomocí robotu ABB. Po svaření byly z každého plechu vyřezány 3 zkušební vzorky, ty byly následně podrobeny tahové zkoušce na stroji ZD40. Stroj zatěžoval všechny vzorky rychlostí 10 MPa/s. Testovaný vzorek je možno vidět na obr 41.

Z každého materiálu bylo zhotoveno 12 zkušebních vzorků, 3 vzorky nebyly svařeny a slouží jako referenční hodnoty pro materiál neovlivněný svařováním. Další trojice vzorků byla svařena skenerovou hlavou přímo a další dvě trojice byly svařeny pod úhlem 16,2°. První z této trojice byly svařeny s nevyhovujícím odsazením a poslední trojice byla s vyhovujícím odsazením.



Obr. 41 Vzorek pro tahovou zkoušku

➤ **Vyhodnocení materiálu X5CrNi18-10**

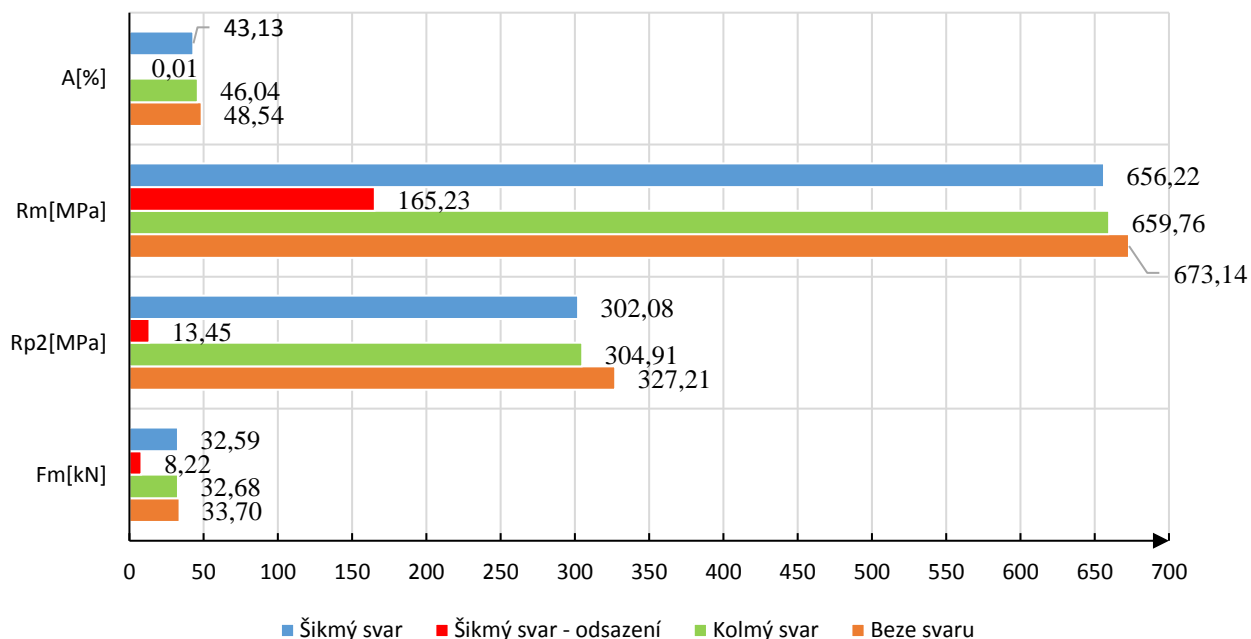
Při tahové zkoušce byly nejprve zjištěny mechanické a pevnostní vlastnosti materiálu X5CrNi18-10. Tento materiál má průměrnou mez kluzu $R_{p2} = 327$ MPa, mez pevnosti $R_m = 673$ a tažnost 48,5%. Tyto hodnoty slouží k porovnání vlastností materiálu po provedení svarů.

U vzorků svařených skenerovou hlavou kolmo byla zjištěna nižší tažnost průměrně o 2,5%, to je způsobeno nižší tažností v oblasti svaru a tepelně ovlivněné oblasti. Mez kluzu R_{p2} je snížena o 22 MPa na 304,9 MPa, mez pevnosti R_m je snížena o 13 MPa na 660 MPa. Tato snížení jsou způsobena tepelným ovlivněním v oblasti svaru a následnou zvýšenou tvrdostí v této oblasti.

Při svařování pod úhlem nastal problém se správným odsazením paprsku od svarové mezery. Proto byla první část vzorků nedokonale provařena. Nicméně i tak na těchto vzorcích byla provedena tahová zkouška. Nedokonale svařené vzorky všechny praskly při zatěžování ve svaru a tak v tomto případě nejsou data ze zkoušky relevantní. Pro představu byly naměřené hodnoty ponechány ve srovnání. Po nastavení lepšího odsazení vykazují vzorky svařené metodou pod úhlem jen mírné snížení pevnostních charakteristik. Při srovnání s metodou kolmé svařování byla tažnost snížena na 43% a to je jen o 3 % nižší hodnota oproti kolmé metodě. Mez kluzu je snížena o 3 MPa na 302 MPa a mez pevnosti se snížila na 656 MPa, což je o 4 MPa nižší hodnota. Tato snížení jsou způsobena větší tepelně ovlivněnou oblastí a tím také větší oblastí, kde jsou vlastnosti materiálu nepříznivě ovlivněny vneseným teplem.

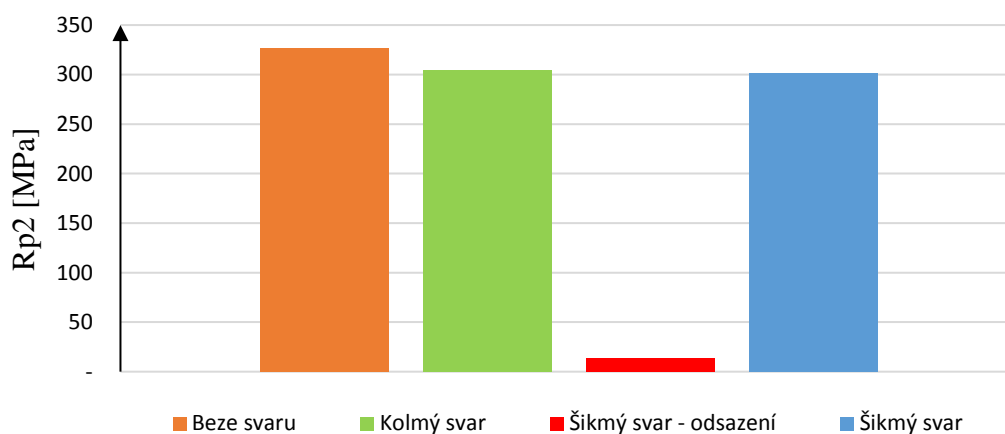
V grafu 19 jsou zobrazeny průměrné hodnoty pro tažnost, mez pevnosti, mez kluzu a maximální zatěžovací sílu. V grafu 20 jsou hodnoty pro mez kluzu, další hodnoty jsou součástí přílohy 6.

Porovnání výsledků tahové zkoušky X5CrNi18-10



Graf 19 Porovnání výsledků tahové zkoušky X5CrNi18-10

Porovnání mezi kluzu Rp2 X5CrNi18-10



Graf 20 Porovnání meze kluzu u X5CrNi18-10

V příloze 6 jsou detailně rozepsány hodnoty z provedeného měření. Jsou zde zaznamenány hodnoty maximální zatěžující síly, meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti. V poznámce je označeno, jestli vzorek praskl ve svarovém spoji. Vzorky S1 až S3 byly referenční, bez svaru. Vzorky S4 až S6 byly svařeny kolmou metodou a S7 až S12 byly svařeny pod úhlem, s tím, že u vzorků S7 až S9 byl nedokonalý průvar obou svařovaných plechů.

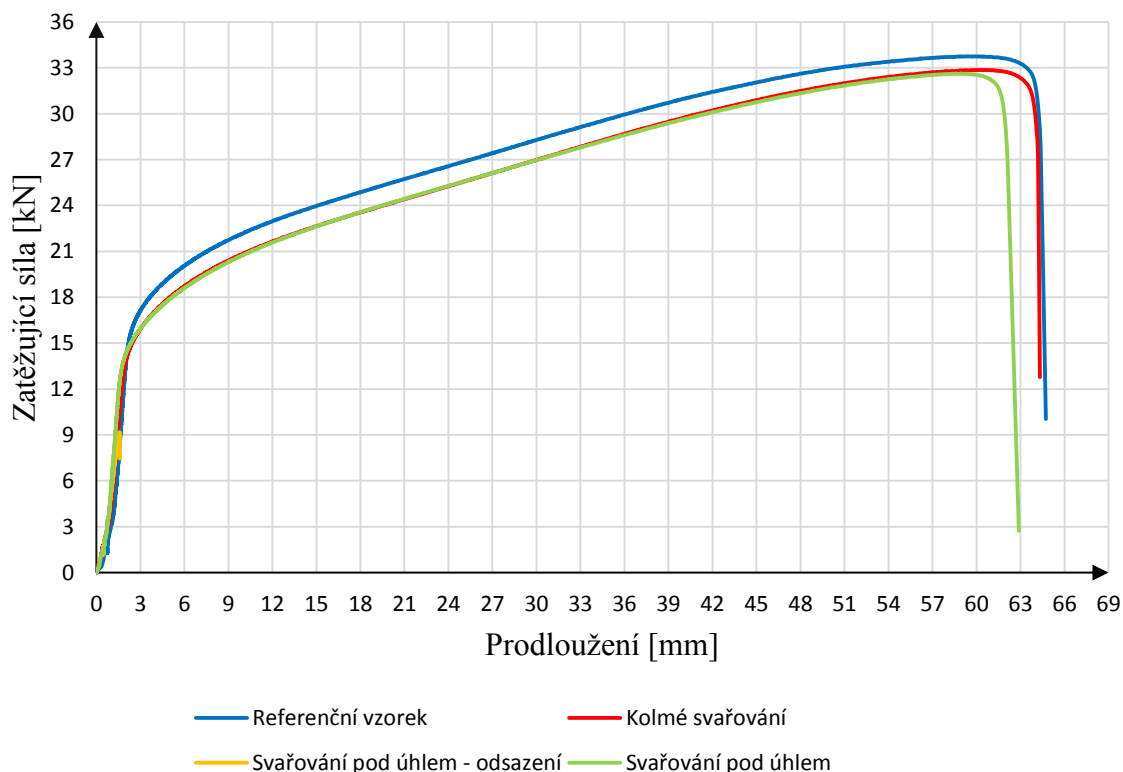
Tab. 26 Průměrné hodnoty výsledků u X5CrNi18-10

| Průměrné hodnoty jednotlivých typů svarů – X5CrNi18-10 | | | | |
|--|------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| | F_m [kN] | R_{p2} [MPa] | R_m [MPa] | A [%] |
| Beze svaru | $33,70 \pm 0,16$ | $327,21 \pm 5,11$ | $673,14 \pm 3,12$ | $48,54 \pm 0,29$ |
| Kolmý svar | $32,68 \pm 0,15$ | $304,91 \pm 1,05$ | $659,76 \pm 4,14$ | $46,04 \pm 3,4$ |
| Šikmý svar - odsazení | $8,22 \pm 1,19$ | 13,45 | 165,23 | 0,01 |
| Šikmý svar | $32,59 \pm 0,14$ | $302,08 \pm 2,26$ | $656,22 \pm 2,79$ | $43,13 \pm 3,11$ |

Pro zjednodušení a zpřehlednění výsledků byly pro každou metodu vypočítány průměrné hodnoty. Ty jsou zaneseny v tabulce 26, zde je možno také vidět hodnoty rozptylu a směrodatné odchylky pro toto statistické zhodnocení jednotlivých metod. U vzorků S7 až S9, jež byly nedokonale svařeny metodou pod úhlem s odsazením, došlo k předčasnému porušení vzorků, a tak nemělo smysl zde počítat směrodatnou odchylku. V grafu 21 jsou vyobrazeny křivky závislosti zatěžující síly na prodloužení u všech metod svařování v tomto experimentu.

Pro přesnější výsledky by v budoucnu bylo vhodné analyzovat mechaniku lomu v místě roztržení vzorků. Je potřeba zjistit, zdali roztržení nebylo způsobeno náhodným vrubem, či nedokonalostí materiálu. Na obrázku 42 jsou zobrazeny roztržené vzorky, jeden je roztržen ve svaru a jeden v ZM.

Porovnání typů svařování X5CrNi18-10



Graf 21 Porovnání typů svařování X5CrNi18-10



Obr. 42 Ukázka vzorků X5CrNi18-10 po tahové zkoušce

➤ Vyhodnocení materiálu S235JR

Stejně jako u předchozího materiálu i u oceli S235JR byly nejprve podrobeny tahové zkoušce vzorky materiálu bez svaru. Tyto hodnoty jsou brány jako referenční a vůči nim jsou srovnávány hodnoty tahových zkoušek svařených vzorků.

Průměrná změřená hodnota u materiálu bez svarů je pro mez kluzu $R_{p2} = 205,6$ MPa, pro mez pevnosti $R_m = 344$ MPa a pro tažnost $A = 43,8$ %.

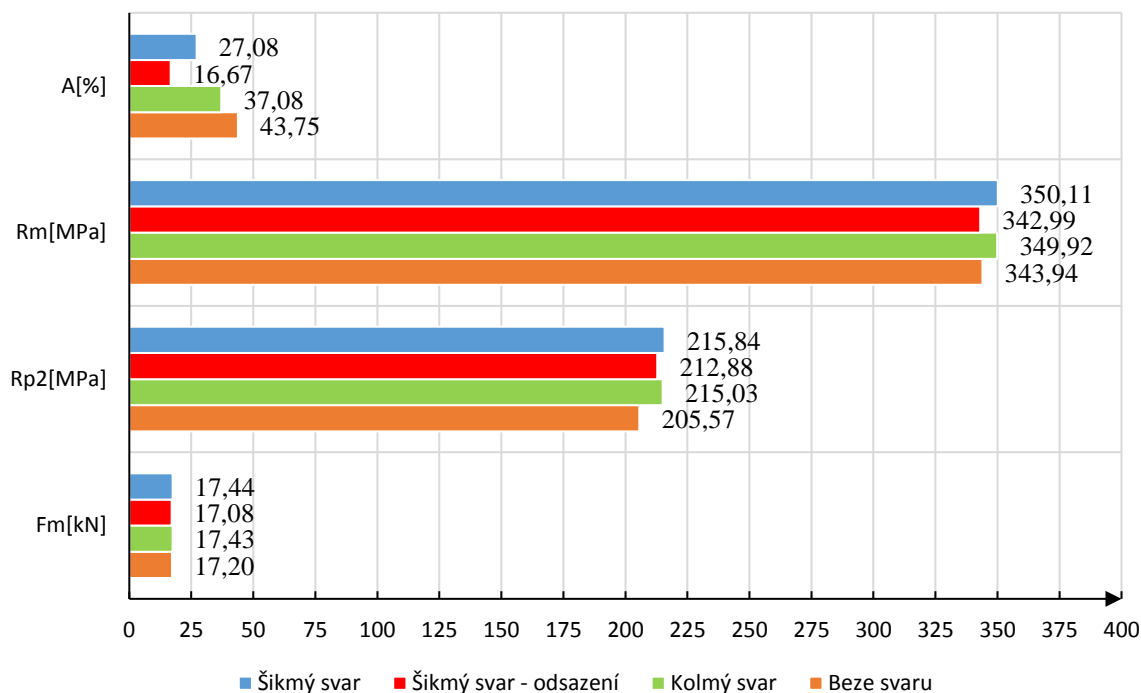
Při použití metody kolmé svařování dosahují mez kluzu i mez pevnosti vyšších hodnot než byla naměřena u referenčních vzorků. Mez pevnosti R_m je vyšší o 6 MPa a dosahuje 350 MPa, mez kluzu R_{p2} je u této metody vyšší dokonce o 9,5 MPa a je 215 MPa. Naopak tažnost A klesla z 43,8 % u referenčního materiálu na 37,1 % u kolmé svařování. Zvýšené pevnostní charakteristiky jsou způsobeny tepelně ovlivněnou oblastí, kde vzniká pevnější, tvrdší a křehčí martenzit. Z toho důvodu také klesá tažnost.

Při šikmém svařování skenerovou hlavou jsou pevnostní charakteristiky ještě vyšší než u metody kolmé svařování. Zvýšení je jen velmi mírné, mez kluzu oproti kolmému svařování je vyšší jen o 1 MPa a mez pevnosti jen o 0,2 MPa. Tažnost naopak velmi dramaticky klesla, z 37,1 % u kolmé svařování na 27,1 % u šikmé svařování. Zvýšení pevnosti je způsobeno větším objemem tepelně ovlivněné oblasti. Dramatické snížení tažnosti je pravděpodobně způsobeno ne úplně dokonalým provařením kořene při svařování dvou plechů k sobě. Tento experiment by bylo vhodné provést znovu a zajistit dokonalé provaření obou svařovaných plechů.

Při podrobení tahové zkoušce šikmých, odsazených vzorků, je tažnost nejnižší, jen 16,7 %. Mez kluzu $R_{p2} = 213$ MPa a mez pevnosti $R_m = 343$ MPa jsou plně srovnatelné s předchozími metodami.

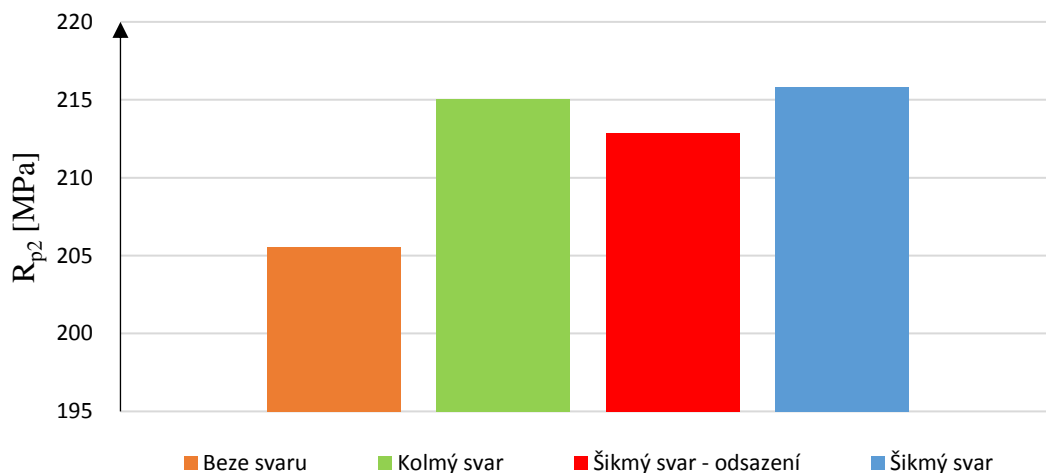
V grafu 22 můžeme vidět průměrné hodnoty tažnosti, maximální zatěžující síly, mezi kluzu a pevnosti u všech použitých metod při tomto experimentu. V grafu 22 jsou zaneseny hodnoty mezi kluzu. Další informace jsou v příloze 5.

Porovnání výsledků



Graf 22 Porovnání výsledků tahové zkoušky S235JR

Porovnání meze kluzu R_{p2}



Graf 23 Porovnání meze kluzu u S235JR

V příloze 5 jsou detailněji zobrazeny hodnoty tahových zkoušek. Vzorky C1 až C3 jsou referenční materiál, C4 až C6 jsou vzorky svařeny kolmou metodou, C7 až C9 jsou vzorky svařeny šikmou metodou a jsou odsazené, vzorky C10 až C12 jsou vzorky svařeny šikmou metodou s dokonalejším odsazením. V poznámce jsou vyznačeny vzorky, jež praskly ve svaru.

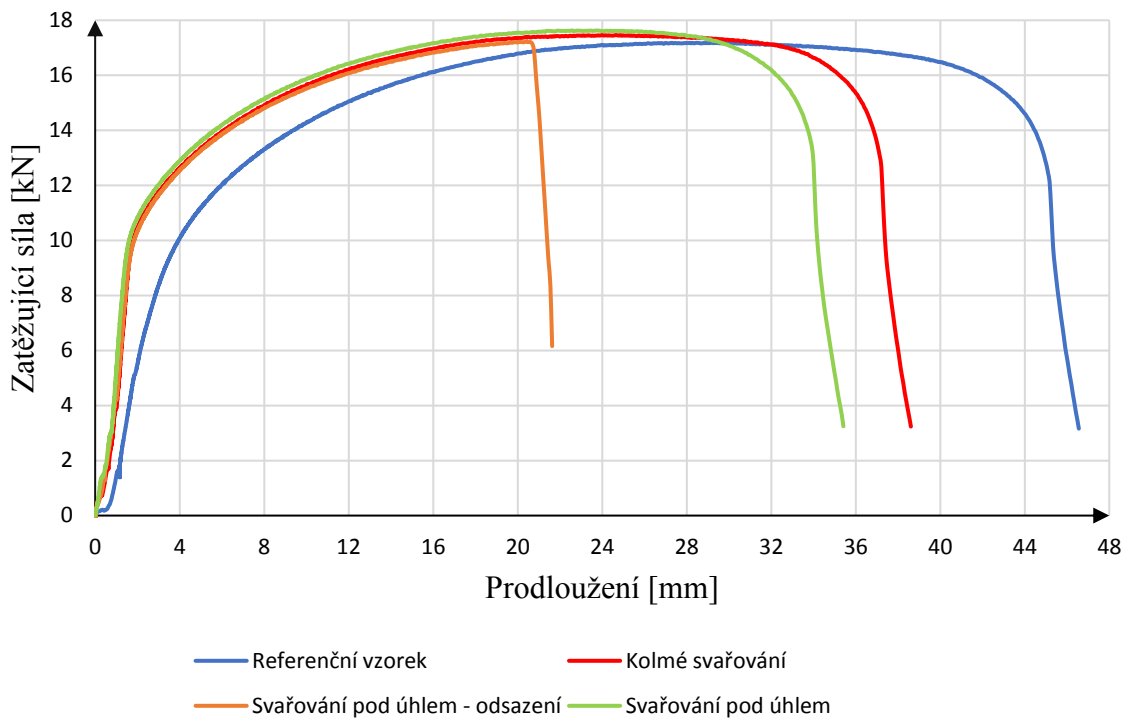
Tab. 27 Průměrné hodnoty výsledků u S235JR.

| Průměrné hodnoty jednotlivých typů svarů – S235JR | | | | |
|---|--------------|----------------|---------------|--------------|
| | F_m [kN] | R_{p2} [MPa] | R_m [MPa] | A [%] |
| Beze svaru | 17,20 ± 0,05 | 205,57 ± 5,16 | 343,94 ± 1,06 | 43,75 ± 0 |
| Kolmý svar | 17,43 ± 0,03 | 215,03 ± 0,64 | 349,92 ± 0,53 | 37,08 ± 0,59 |
| Šikmý svar - odsazení | 17,08 ± 0,29 | 212,88 ± 1,6 | 342,99 ± 5,86 | 16,67 ± 2,95 |
| Šikmý svar | 17,44 ± 0,29 | 215,84 ± 0,55 | 350,11 ± 5,75 | 27,08 ± 8,56 |

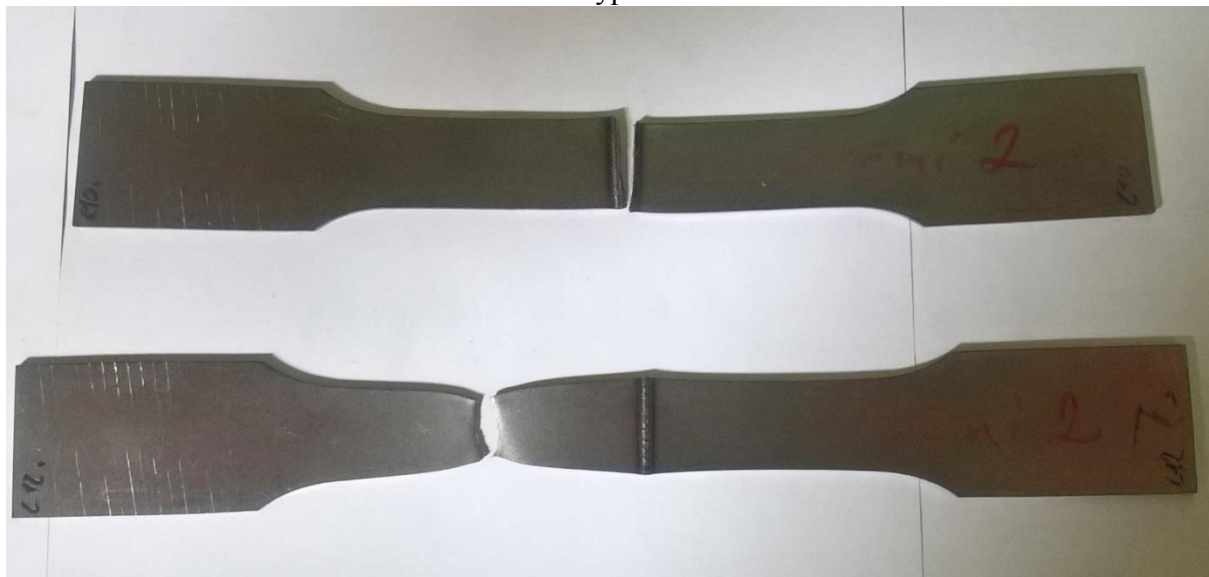
V tabulce 27 jsou zobrazeny průměrné hodnoty pro jednotlivé typy svařování a k nim také směrodatné odchylky pro tento výpočet. V grafu 24 jsou vyobrazeny křivky závislosti zatěžující síly na prodloužení u všech metod svařování v tomto experimentu.

Pro přesnější výsledky by v budoucnu bylo vhodné zase analyzovat mechaniku lomu v místě roztržení vzorků. Je potřeba zjistit, zdali roztržení nebylo způsobeno náhodným vrubem, či nedokonalostí materiálu. Na obrázku 43 jsou zobrazeny roztržené vzorky, jeden je prasklý ve svaru a jeden v ZM.

Porovnání typů svařování S235JR



Graf 24 Porovnání typů svařování S235JR



Obr. 43 Ukázka vzorků S235JR po tahové zkoušce

3.5 Stroje a přístroje použité pro experimenty

- Svařovací skenerová hlava



Obr. 44 Skenerová hlava Argese Fiber Rhino [13]

Ke skenerovému svařování byla použita svařovací skenerová hlava Fiber Rhino od německého výrobce Argese. Jedná se o 2D skenerovou hlavu, jež je určena pro použití společně s vláknovými anebo diodovými lasery. Hlavu lze použít pro velké spektrum použití, jako třeba pro svařování, řezání, značení, gravírování, vrtání, 3D tisk tak i pro tepelné zpracování.

- Laser

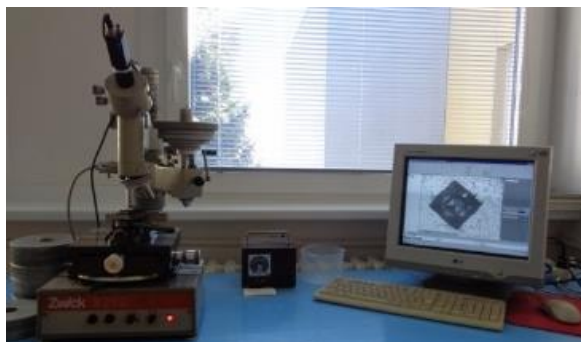
Pro svařování byl použit vláknový laser YLS 2000 od firmy IPG Photonics. Vlnová délka tohoto kontinuálního laseru je 1070 nm a účinnost je více jak 40%. Tento laser je využíván pro řezání, svařování, gravírování i jiné aplikace. Více informací je v přílohách.

- Trhací stroj

Na tahové zkoušky byl využit trhací stroj ZD40 (400kN). Tento hydraulický zkušební stroj je schopen provádět tahové, tlakové i ohybové zkoušky až do zatížení 400 kN. Stroj je osazen řídicí jednotkou EDC 60, chyba měření dráhy je $\pm 0,01$ mm a chyba měření síly je $\pm 1\%$ jmenovitému rozsahu síly.

- Tvrdoměr

Pro vyhodnocení tvrdosti byl použit tvrdoměr Zwick 3212, tento stroj pracuje na principu zatěžování pomocí závaží a měří tvrdost podle Vickerse. Možný rozsah měření je od HV0,2 do HV10. Pro mé měření bylo použito zatížení 5 kg, takže měření bylo HV5. Stroj i s vyhodnocovacím počítačem je zobrazen na obrázku 46. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí softwaru testXpert Master.



Obr. 46 Tvrdoměr Zwick 3212



Obr. 45 Laser YLS 2000 [22]

4 TECHNICKO EKONOMICKÉ HODNOCENÍ [17], [39]

Po porovnání kvalitativních vlastností jsou v této kapitole porovnány technické a ekonomické vlastnosti. Pro ekonomické zhodnocení je použita modelová situace z výroby automobilů, přesněji Volkswagen Golf. Podle dostupných dat bylo v roce 2016 vyrobeno 491 681 kusů tohoto vozidla, tyto vozy jsou svařovány pomocí metody skenerového svařování. Na jednom vozidle je 70 metrů svaru a celkový počet robotů, které provádějí tyto svary, je 250. Při použití metody skenerového svařování je možné použít robot s menšími manipulačními vlastnostmi, neboť je zde možné směřovat laserový paprskem pomocí skenerové hlavy. Náklady na servis, náhradní díly a na ochranný stlačený vzduch byly odhadnuty. U metody skenerového svařování je díky možnosti vychýlení paprsku použití jednodušších a tím také levnějších přípravků. Ve srovnání jsou zanedbány mzdové náklady na výrobu a také náklady na výrobní prostor, tyto jsou obdobné u obou metod svařování.

Cena jednoho laseru YLS-2000 je 2 240 000 Kč, což znamená odpisy 448 000 Kč ročně.
Tab. 28 Porovnání nákladů

| | Cena za kus [Kč] | Odpisy/cena | Skenerové svařování 250 ks svařovacích robotů [Kč] | Přímé svařování 250 ks svařovacích robotů [Kč] |
|--|-----------------------|-----------------------------------|--|--|
| Počet pracovních hodin za rok | 6 048 hod | | | |
| Počet vyrobených automobilů (2016) | 491 681 | 70 m svaru na výrobu 1 automobilu | | |
| Cena jednoho laseru YLS-2000 | 2 240 000 | 448 000 | 112 000 000 | 112 00 000 |
| Cena skenerové svařovací hlavy | 960 000 | 192 000 | 48 000 000 | - |
| Stlačený vzduch - cross jet | 0,5 Kč/m ³ | 25 m ³ /hod | 18 900 000 | 18 900 000 |
| Servis | 100 000 | | 25 000 000 | 25 000 000 |
| Náhradní a spotřební díly | 50 000 | | 12 500 000 | 12 500 000 |
| Cena robotu ABB IRB 2400/16 M2004 | 470 000 | 94 000 | - | 23 500 000 |
| Cena robotu ABB IRB 2400/16 M98 SC4 | 340 000 | 68 000 | 17 000 000 | - |
| Svařovací přípravky - skenerové svařování | 100 000 | 20 000 | 5 000 000 | |
| Svařovací přípravky - přímé svařování | 150 000 | | - | 7 500 000 |
| | | | | |
| Celkové roční náklady | | | 238 400 000 | 199 400 000 |
| Náklady na 1 metr svaru | | | 6,93 | 5,79 |
| Cena za 1 m po přepočítání podle efektivity | 3,81 vyšší efektivity | | 1,82 | |

V tabulce 28 je zobrazena detailní kalkulace. Po spočítání ročních nákladů při třisměnném provozu vychází finančně lépe metoda přímá, nicméně je nutno zahrnout do výpočtů také 3,81 krát vyšší efektivity. Po tomto přepočtu vychází 1 metr skenerového svařování na 1,82 Kč, zatímco přímá metoda stojí 5,79 Kč za 1 metr svaru. Efektivitu skenerového svařování by šlo dále zvýšit použitím synchronního pohybu skenerové hlavy s robotem. To by však vyžadovalo další investice.

5 ZÁVĚRY

Bylo provedeno srovnání dvou laserových svařovacích metod. Metody konvenčního laserového svařování s metodou skenerového svařování. Toto srovnání bylo provedeno pro dva typy ocelí. Prvním typem oceli je konstrukční ocel S235JR a druhým je korozivzdorná austenitická ocel X5CrNi18-10. U metod byly porovnávány svařovací časy u dvou typů svařovaných geometrií, geometrie a hloubka svaru, tvrdost svaru a také byly provedeny tahové zkoušky. Jako poslední bylo provedeno ekonomické srovnání těchto metod při sériové výrobě.

Svařovací časy byly výrazně menší u metody skenerového svařování než u metody konvenčního svařování. Nejvíce je to dáno možností použití vyšších svařovacích rychlostí. U kruhové svařované geometrie byla časová úspora až 81% a u převážně lineární geometrii až 71%. Při použití synchronizace skenerové svařovací hlavy s robotem by časové úspory dosáhly ještě výrazně větších hodnot, to by však vyžadovalo software vhodný pro tuto synchronizaci a také je zde nevýhoda ve složitém programování a nastavení synchronizace.

Z porovnání geometrií svarů vyplývá, že u metody skenerového svařování je dosahováno větší hloubky svaru. To platí u obou svařovaných materiálů a také u obou typů svařování, kolmém i pod úhlem. Při srovnání typů svařování vychází větší hloubky svarů u typu kolmého svařování.

Největší tvrdosti dosahují svary provedené metodou přímé svařovací hlavy za vyšší svařovací rychlosti ($v = 30$ mm/s). Při srovnání stejných rychlostí ($v = 20$ mm/s) je větší tvrdost u metody skenerového svařování, avšak rozdíl u kolmého svařování je zanedbatelný. A to jak u metody kolmého svařování, tak u metody svařování pod úhlem u materiálu X5CrNi18-10. U materiálů S235JR je rozdíl v tvrdosti mezi typem kolmého svařování a svařování pod úhlem výraznější, větší tvrdost je dosažena u svařování pod úhlem.

Z provedených tahových zkoušek vyplývá, že metoda skenerového svařování dosahuje hodnot pevnostních charakteristik jen mírně nižších, než bylo naměřeno u referenčních nesvařovaných vzorků. Největším problémem je správné nastavení polohy laserového paprsku u svařování pod úhlem, tak aby došlo k dokonalému provaření obou dílců.

Při srovnání ekonomických aspektů vychází výrazně výhodněji použití skenerového svařování. Náklady na 1 metr jsou u skenerového svařování 1,82 Kč a to je 3,2 krát méně než u konvenčního svařování. Náklady by šly ještě snížit použitím skenerového svařování se synchronním pohybem svařovací hlavy a robotu. To by však vyžadovalo složitější programování a také nákup potřebného softwaru.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [7]

1. AKIHIKO, Tsuboi. Remote welding head and its application. *Welding International* [online]. Taylor, 2010, **24**(10), 768-772 [cit. 2017-02-24]. DOI: 10.1080/09507111003655309. ISSN 09507116.
2. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
3. BEA, Martin, Ruediger BROCKMANN a David HAVRILLA. Remote laser welding in automotive production. In: *Industrial Laser Solutions* [online]. Industrial Laser Solutions, 2016 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-26/issue-5/features/remote-laser-welding-in-automotive-production.html>
4. BENKO, Bernard. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
5. BRAUNREUTHER, S., V. HAMMERSTINGL, M. SCHWEIER, G. THEODOSSIADIS, G. REINHART a M.F. ZAEH. Welding joint detection by calibrated mosaicking with laser scanner systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. Elsevier, 2015, **10**, 16-23 [cit. 2017-02-24]. DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.03.002. ISSN 17555817.
6. BRETENAKER, Fabien a Nicolas TREPS. *Laser: 50 years of discoveries*. 1. Hackensack, N.J.: World Scientific, c2015. ISBN 978-981-4612-40-1.
7. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/dokument/ILZ9SBvKg6W3h63K>
8. Čištění laserem. *Narran laser precision* [online]. Brno [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.narran.cz/cistici-lasery/>
9. DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 80-867-0619-2.
10. DULEY, Walter W. *Laser welding*. 1. New York: Wiley, c1999. ISBN 04-712-4679-4.
11. DUTTA MAJUMDAR, J a I MANNA. Laser material processing. *International Materials Reviews* [online]. 2013, **56**(5-6), 341-388 [cit. 2017-01-25]. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000003. ISSN 0950-6608. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743280411Y.0000000003>
12. DVOŘÁK, Milan a KOLEKTIV. *Technologie II*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
13. FIBER RHINO. In: *ARGES* [online]. Wackersdorf [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.arges.de/industrial-products/2d-scan-heads/fiber-rhino/>
14. FLIMEL, Karol. LASER jako nástroj pro vysokorychlostní čištění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. <http://www.mmspektrum.com>, 2016, (1), 108 [cit. 2017-03-18]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laser-jako-nastroj-pro-vysokorychlostni-cisten.html>

15. GILBERT, Nick. Structural Steel - S235, S275, S355 Chemical Composition, Mechanical Properties and Common Applications. In: *AZO Materials* [online]. Manchester, 2012 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022>
16. GILLOON, Matthew a Christine GROSS. Remote laser welding boosts new Ford Mustang. In: *Industrial Laser Solutions* [online]. Industrial Laser Solutions, 2017 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-32/issue-1/features/remote-laser-welding-boosts-production-of-new-ford-mustang.html>
17. Global Robots ltd - ABB robots. *Global Robots ltd* [online]. Bedfordshire, UK: Global Robots Limited, 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.globalrobots.com/robots.aspx?brand=1>
18. HATWIG, Jens, Pascal MINNERUP, Michael F. ZAEH a Gunther REINHART. An automated path planning system for a robot with a laser scanner for remote laser cutting and welding. In: *Mechatronics and Automation (ICMA), 2012 International Conference on* [online]. IEEE, 2012, s. 1323-1328 [cit. 2017-02-24]. DOI: 10.1109/ICMA.2012.6284328. ISBN 9781467312752.
19. CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi I.: Základní konstrukční součásti laserů* [online]. In: . Olomouc: SLO UP a FZÚ AVČR, 2011 [cit. 2017-02-03].
20. IMMONEN, Veli Pekka. INTEGRATED LASER PROCESSING. In: *HighTech Finland: Profiling the latest and the best in Finnish technology* [online]. Helsinki: HighTech Finland, 2009 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://www.hightechfinland.com/direct.aspx?area=htf&prm1=826&prm2=article>
21. Informace o laserovém kalení. *LASCAM systems* [online]. Praha, 2015 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/laserove-kaleni/#>
22. IPG Photonics - Products. In: *IPG Photonics* [online]. Oxford, MA, 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers>
23. JEDELSKÝ, J., P. NĚMEC, D. VESELÝ a P. KALENDA. Povrchová úprava materiálů pomocí laseru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2005, (4), 82 [cit. 2017-03-18]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/povrchova-uprava-materialu-pomoci-laseru.html>
24. KAH, Paul, Jinhong LU, Jukka MARTIKAINEN a Raimo SUORANTA. Remote Laser Welding with High Power Fiber Lasers. *Engineering* [online]. 2013, **05**(09), 700-706 [cit. 2017-02-25]. DOI: 10.4236/eng.2013.59083. ISSN 1947-3931. Dostupné z: <http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/eng.2013.59083>
25. Kalení laserem urychluje výrobu součástí a nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2011, (7), 60 [cit. 2017-03-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html>
26. KANNATEY-ASIBU, Elijah. *Principles of laser materials processing*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2009. Wiley series on processing of engineering materials. ISBN 978-0-470-17798-3.

27. KATAYAMA, Seiji, ed. *Handbook of laser welding technologies*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials. ISBN 978-0-85709-264-9.
28. KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (2): Svařovací lasery. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2012, (4), 28 [cit. 2017-02-11]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>
29. KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (3): Laserové svařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2012, (5), 74 [cit. 2017-02-11]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-3-laserove-svarovani.html>
30. KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (5): Laserové řezání. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2012, (10), 50 [cit. 2017-03-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html>
31. KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY: HLAVNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU. *LAO - průmyslové systémy s.r.o.* [online]. Praha, 2013 [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
32. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery: Základní princip laseru a jejich dělení. In: *Lasery a optika: SERIÁL NA TÉMA LASERY* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2013 [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
33. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování* [online]. In: . Brno: Ústav strojírenské technologie, 2005 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_svarovani__5te_etv_etv-k__kubicek.pdf
34. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie výroby I - svařování* [online]. In: . Brno: Ústav strojírenské technologie, 2005 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_vyroby_I__svarovani__kubicek.pdf
35. KUSALA, Jaroslav. Laser a jeho využití: Aplikace laserů. In: *Lasery kolem nás* [online]. ČEZ, 2004 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/kap3.htm>
36. KWOK-SAN, Lee, Tong SHIU-SING a Janny LEUNG. What is laser. *Physics: Faculty of Science, The Chinese University of Hong Kong* [online]. Hong Kong [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: http://www.phy.cuhk.edu.hk/phyworld/articles/laser/laser_e.html
37. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. ISBN 978-80-87240-65-6.
38. LARSSON, Johnny K. Laser development at Volvo. In: *Industrial Laser Solutions* [online]. Industrial Laser Solutions, 2016 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-2/features/laser-development-at-volvo.html>
39. LARSSON, Johnny. Laser welding, structural adhesive bonding, for body-in-white assembly: Competing or complementary joining methods? *The Fabricator* [online].

- Elgin, IL: FMA Communications, 2007, **36**(7) [cit. 2017-05-18]. ISSN 0888-0301.
Dostupné z: <http://www.thefabricator.com/article/laserwelding/laser-welding-structural-adhesive-bonding-for-body-in-white-assembly>
40. Laserové a elektronové svařování: Laserové svařování. *Welding.cz: Svařování v České republice* [online]. 2007 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: http://www.welding.cz/vyvoj/svar_98/98_2-4.htm
41. LASEROVÉ KALENÍ. *LAO - průmyslové systémy* [online]. Praha [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/povrchove-upravy-93/laserove-kaleni-94>
42. LASEROVÉ KALENÍ. *VÚTS Liberec* [online]. Liberec [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.vuts.cz/laserove-kaleni-1.html>
43. Laserové navařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2001, (4), 67 [cit. 2017-03-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-navarovani.html>
44. LASEROVÉ NAVAROVÁNÍ. *VÚTS Liberec* [online]. Liberec [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.vuts.cz/laserove-navarovani.html>
45. LASEROVÉ ŘEZÁNÍ. *LAO - průmyslové systémy* [online]. Praha [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-rezani-80>
46. Lasery pro 3D tisk kovů. *LASCAM systems s.r.o.* [online]. Praha [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/aplikace/3d-tisk-prototyping-sls/>
47. Lasery pro navařování. *LASCAM systems* [online]. Praha, 2014 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/aplikace/navarovani/>
48. Lasery pro řezání. *LASCAM systems* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/aplikace/rezani/?gclid=CL3zgcrk4tICFc-6Gwod5TAErQ>
49. LEE, Su-Jin, Seiji KATAYAMA, Yousuke KAWAHITO, Keisuke KINOSHITA a Jong-Do KIM. Weldability and keyhole behavior of Zn-coated steel in remote welding using disk laser with scanner head. *Journal of Laser Applications* [online]. 2013, **25**(3), 512-525 [cit. 2017-02-24]. DOI: 10.2351/1.4795456. ISSN 1042346X.
50. LIEBOWITZ, Jay. High-power direct-diode lasers for cutting and welding: Wavelength beam combining enables ultra-high brightness at any wavelength. In: *Industrial Laser Solution* [online]. Industrial Laser Solution, 2014 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-29/issue-3/features/high-power-direct-diode-lasers-for-cutting-and-welding.html>
51. LUFT, Axel a Tobias STITTGEN. Diode Lasers and Remote Welding. *Laser Technik Journal* [online]. Weinheim: WILEY- VCH Verlag, 2014, **11**(5), 32-35 [cit. 2017-03-03]. DOI: 10.1002/latj.201400052. ISSN 16137728.
52. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd.* Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-857-7185-3.
53. MRŇA, Libor. Laserové technologie v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2015, (2), 78 [cit. 2017-02-11]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-technologie-v-prumyslove-praxi.html>
54. MRŇA, Libor. *Svařování laserem* [online]. In: . Brno: Ústav strojírenské technologie, 2013 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z:

http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_laserem_2013__mrna.pdf

55. MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky* [online]. In: . Brno: Ústav strojírenské technologie, 2013 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techiky_2013__mrna.pdf
56. MUELLER, Robert. Got Remote Laser Welding. *SPIE Professional* [online]. 2010, , - [cit. 2017-02-25]. DOI: 10.1117/2.4201001.19. ISSN 19944403. Dostupné z: <http://www.spie.org/x38574.xml>
57. Nerezová ocel 1.4301: CHROM NIKLOVÁ austenitická nestabilizovaná. In: *INOX, spol. s.r.o.: NEREZOVÝ HUTNÍ MATERIÁL* [online]. Praha [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
58. NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (4): Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2012, (9), 126 [cit. 2017-02-11]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
59. NOVÁK, Miroslav. Remote welding – svařovací metoda s vysokou produktivitou. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2010, (3), 38 [cit. 2017-02-26]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/remote-welding-svarovaci-metoda-s-vysokou-produktivitou.html>
60. PASCHOTTA, Rüdinger. Thin disk laser head. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. RP Photonics, 2008 [cit. 2017-02-18]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/img/thin_disk_laser_head.png
61. Praktické využití. *Laboratoř aditivní výroby: Fakulta strojní, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava* [online]. Ostrava [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk-kovu.cz/prakticke-vyuziti/>
62. Production: Wide range of elements to automotive industry. In: *Postep: Partner in automotive industry* [online]. Gliwice [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://postep.pl/en/production>
63. Přehled vlastností oceli S235JR 1.0038. In: *Bolzano* [online]. Kladno: Bohdan Bolzano [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10025/MOP_prehled_vlastnosti_S235JR.pdf
64. RAMBOUSEK, Zdeněk. *Laserové stanice: zdroje, technologie, konstrukce*. Liberec: VÚTS, 2015. ISBN 978-80-87184-61-5.
65. RÜTERING, Marus a Dana BENEŠOVÁ. Co rozhoduje při volbě typu laseru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2011, **9**, 91 [cit. 2017-02-11]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
66. S235 Steel plate. In: *Leeco Steel* [online]. Illinois [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://www.leecosteel.com/s235-steel-plate.html>
67. SCHAEFFER, Ronald. PHOTOMACHINING, INC. *Introduction to laser materials processing: Course notes* [online]. Pelham, New Hampshire: PhotoMachining, 2007

- [cit. 2017-01-19]. Dostupné z:
http://www.pblprojects.org/PhotoMachining/docs/Ron_Schaeffer_Course_Notes.pdf
68. SLOUKA, David. *Lasery při výkonech v ambulanci a klinické praxi*. Plzeň: Euroverlag, c2015. ISBN 978-80-7177-968-1.
69. Stainless Steel 304/304L Pipes & Tubes. In: *Bhansali Overseas* [online]. Mumbai [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://www.bhansalioverseas.com/stainless-steel-304-304l-pipes-tubes-supplier-exporter.html>
70. Systémy pro 3D tisk kovů. *LASCAM systems s.r.o.* [online]. Praha [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/produkty/3d-tisk-sintering/>
71. ŠMÍD, Jiří. Svařování technického skla laserem a skleněným práškem. *Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2015, (1), 19 [cit. 2017-02-22]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/novinka/svarovani-technickeho-skla-laserem-a-sklenenym-praskem.html>
72. *Technical information: Laser processing: CO2* [online]. Ditzingen: TRUMPF Werkzeugmaschinen, 2007 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: http://iconmachinetool.com/education/Library_Laser_CO2_Laser.pdf
73. TRUMPF LASER WELDING TECHNOLOGY DAYS. In: *International metal tube* [online]. 2014 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://internationalmetaltube.com/processing/item/283-trumpf-laser-welding-technology-days>
74. TSOUKANTAS, G. a G. CHRYSSOLOURIS. Theoretical and experimental analysis of the remote welding process on thin, lap-joined AISI 304 sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer-Verlag, 2008, **35**(9), 880-894 [cit. 2017-02-24]. DOI: 10.1007/s00170-006-0767-0. ISSN 02683768.
75. TSOUKANTAS, G., K. SALONITIS, A. STOURNARAS, P. STAVROPOULOS a G. CHRYSSOLOURIS. On optical design limitations of generalized two-mirror remote beam delivery laser systems: the case of remote welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer-Verlag, 2007, **32**(9), 932-941 [cit. 2017-02-24]. DOI: 10.1007/s00170-005-0400-7. ISSN 02683768.
76. VILLARREAL SAUCEDO, Francisco, Bien CHANN, Bryce SAMSON a Parviz TAYEBATI. Direct diode vs. other laser systems used in laser cutting. In: *Industrial Laser Solutions* [online]. Wilmington: Industrial Laser Solutions, 2016 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-31/issue-2/features/direct-diode-vs-other-laser-systems-used-in-laser-cutting.html>
77. VOGL, Wolfgang a Florian OEFELE. Remote Welding of Fillet Seams. *Laser Technik Journal* [online]. Weinheim: WILEY- VCH Verlag, 2014, **11**(5), 39-41 [cit. 2017-02-24]. DOI: 10.1002/latj.201400045. ISSN 16137728.
78. VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1108-9.
79. WAGNER, Vladimír. Pro někoho jen rentgenový laser, pro jiného gama laser: aneb jak získat laserové záření gama, když ještě gama laser udělat neumíme. In: *Ústav*

jaderné fyziky AV ČR [online]. Praha: ÚJF AVČR Řež a FJFI ČVUT Praha [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/laser/rentgenlaser.html>

80. ZAEH, M.F., J. MOESL, J. MUSIOL a F. OEFELE. Material processing with remote technology revolution or evolution? *Physics Procedia* [online]. 2010, **5**, 19-33 [cit. 2017-03-25]. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.119. ISSN 18753892. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389210005456>
81. ZAHEER, Ahmed. Laser. In: *Kingofwallpapers* [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://kingofwallpapers.com/laser/img-055.php?pic=/laser/laser-055.jpg>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Označení | Legenda | Jednotka |
|-------------|---|----------------------|
| A | Tažnost | [%] |
| c | Rychlost světla | [km/s] |
| d | Průměr fokusace paprsku pulzu | [mm] |
| E_i | Energie | [J] |
| E_j | Energie pulzu | [J] |
| E_t | Modul pružnosti v tahu | [GPa] |
| f | Fokusace | [-] |
| F | Frekvence pulzu | [HZ] |
| F_m | Maximální zatěžující síla | [N] |
| G | Funkce pulzu | [-] |
| h | Plancova konstanta | [Js] |
| HV5 | Tvrdost podle Vickerse | [N/mm ²] |
| I | Svařovací proud | [A] |
| P | Výkon | [W] |
| P_{max} | Maximální výkon | [W] |
| Q | Odporové teplo | [J] |
| Q_s | Plošná hustota výkonu | [W/cm ²] |
| R | Elektrický odpor | [Ω] |
| R_m | Mez pevnosti | [MPa] |
| R_{p2} | Mez kluzu | [MPa] |
| s | Poloha ohniska k materiálu | [mm] |
| t | Čas | [s] |
| v | Rychlost svařování | [mm/s] |
| α | Úhel vychýlení paprsku | [$^\circ$] |
| ΔE | Energetický rozdíl hladin | [J] |
| λ | Vlnová délka záření | [m] |
| λ_t | Tepelná vodivost materiálu | [W/cm ²] |
| ν | Frekvence vyzářeného fotonu | [Hz] |
| τ | Doba trvání pulzu | [s] |
| BPP | Beam parametr product – divergence svazku | [mrad/mm] |
| DMLS | Direct metal laser sintering | |
| LC | Laser cusing | |
| SK | Svarový kov | |
| SLM | Selective laser melting | |
| SLS | Selective laser sintering | |
| WIG | Wolfram inert gas | |
| ZM | Základní materiál | |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Laserové svařování Volvo XC90 | 10 |
| Obr. 2 Součást sedadla automobilu z S235JR..... | 10 |
| Obr. 3 Použití oceli X5CrNi18-10 v petrochemickém průmyslu | 11 |
| Obr. 4 Schéma odporového bodového svařování | 12 |
| Obr. 5 Porovnání bodového a laserového svařování..... | 13 |
| Obr. 6 Skenerové svařování v automobilovém průmyslu..... | 13 |
| Obr. 7 Zobrazení svařovacích bodů karoserie Fordu Mustang 2017 | 14 |
| Obr. 8 Laser..... | 15 |
| Obr. 9 Schéma přechodů atomu z různých energetických hladin..... | 16 |
| Obr. 10 Absorpce, spontánní emise a stimulovaná emise..... | 16 |
| Obr. 11 Porovnání klasického zdroje a laseru..... | 17 |
| Obr. 12 Schéma konstrukce laseru | 19 |
| Obr. 13 Ruční laserové čištění | 20 |
| Obr. 14 Laserové čištění od koroze | 20 |
| Obr. 15 3D tisk kovu | 21 |
| Obr. 16 Laserové kalení ozubeného kola | 21 |
| Obr. 17 Laserové řezání | 22 |
| Obr. 18 Laserové navařování | 22 |
| Obr. 19 Laserové svařování | 23 |
| Obr. 20 CO ₂ laser s difúzním chlazením | 23 |
| Obr. 21 Schéma diodového laseru | 24 |
| Obr. 22 Schéma diskového laseru..... | 24 |
| Obr. 23 Schéma vláknového laseru..... | 25 |
| Obr. 24 Porovnání různých zdrojů laserového záření..... | 26 |
| Obr. 25 Laserové svařování | 26 |
| Obr. 26 Závislost absorpce na vlnové délce..... | 27 |
| Obr. 27 Režimy laserového svařování | 28 |
| Obr. 28 Pulz a jeho parametry | 29 |
| Obr. 29 Typy laserových svarů | 30 |
| Obr. 30 Možné vady u tupého svaru | 32 |
| Obr. 31 Možné vady u průvarového svaru..... | 32 |
| Obr. 32 Čočky a zrcadla ve skenerové hlavě | 33 |
| Obr. 33 2D skenerová hlava..... | 34 |
| Obr. 34 Schéma technologie skenerového svařování | 34 |
| Obr. 35 Svařované geometrie při experimentu | 36 |
| Obr. 36 Schéma rozsahu laserové hlavy při experimentu..... | 39 |
| Obr. 37 Svařování pásku na metalografické výbrusy | 39 |
| Obr. 38 Měření tvrdosti..... | 43 |
| Obr. 39 Ukázka z tahové zkoušky..... | 53 |
| Obr. 40 Znázornění hledání správného odsazení | 53 |
| Obr. 41 Vzorek pro tahovou zkoušku | 54 |
| Obr. 42 Ukázka vzorků X5CrNi18-10 po tahové zkoušce | 57 |
| Obr. 43 Ukázka vzorků S235JR po tahové zkoušce | 59 |
| Obr. 44 Skenerová hlava Arges Fiber Rhino | 60 |
| Obr. 45 Laser YLS 2000 | 60 |
| Obr. 46 Tvrdoměr Zwick 3212 | 60 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tab. 1 Chemické složení - S235JR | 11 |
| Tab. 2 Chemická složení X5CrNi18-10..... | 11 |
| Tab. 3 Porovnání mechanických vlastností..... | 11 |
| Tab. 4 Porovnání přímé a skenerové svařovací hlavy..... | 14 |
| Tab. 5 Porovnání klasického zdroje a laseru..... | 17 |
| Tab. 6 Rozdělení aktivních prostředí | 18 |
| Tab. 7 Vlnové délky a výkony laserových diod..... | 24 |
| Tab. 8 Srovnání vlastností vybraných laserů | 25 |
| Tab. 9 Porovnání různých metod svařování | 26 |
| Tab. 10 Součinitel odrazivosti vybraných materiálů | 27 |
| Tab. 11 Kombinace svařovaných materiálů | 28 |
| Tab. 12 Typy laserových svarů | 30 |
| Tab. 13 Porovnání svařovacích časů..... | 37 |
| Tab. 14 Hloubka a úhel svaru při skenerovém svařování | 40 |
| Tab. 15 Hloubka a úhel svaru při konvenčním svařování..... | 40 |
| Tab. 16 Fotografie metalografických vzorků – skenerové svařování..... | 42 |
| Tab. 17 Fotografie metalografických vzorků – konvenční svařování..... | 42 |
| Tab. 18 Nejvyšší tvrdost u X5CrNi18-10 | 45 |
| Tab. 19 Tvrdost X5CrNi18-10 Skenerové svařování | 45 |
| Tab. 20 Tvrdost X5CrNi18-10 – konvenční svař. v=20 mm/s | 46 |
| Tab. 21 Tvrdost X5CrNi18-10 – konvenční svař. v=30 mm/s | 47 |
| Tab. 22 Největší tvrdost S235JR..... | 49 |
| Tab. 23 Tvrdost – Skenerové svařování S235JR..... | 49 |
| Tab. 24 Tvrdost S235JR – konvenční svař. v=20 mm/s | 50 |
| Tab. 25 Tvrdost S235JR – konvenční svař. v=30 mm/s | 51 |
| Tab. 26 Průměrné hodnoty výsledků u X5CrNi18-10 | 56 |
| Tab. 27 Průměrné hodnoty výsledků u S235JR..... | 58 |
| Tab. 28 Porovnání nákladů | 61 |

SEZNAM GRAFŮ

| | |
|--|----|
| Graf 1 Porovnání svařovacích časů – síť kruhů | 37 |
| Graf 2 Porovnání svařovacích časů - meandr | 37 |
| Graf 3 Hloubka svarů u materiálu S235JR | 41 |
| Graf 4 Hloubka svarů u materiálu X5CrNi18-10..... | 41 |
| Graf 5 Porovnání maximálních tvrdostí materiálu X5CrNi18-10 | 44 |
| Graf 6 Průběh tvrdosti u materiálu X5CrNi18-10, pod úhlem..... | 45 |
| Graf 7 Závislost tvrdosti materiálu X5CrNi18-10 na vzdálenosti od středu svaru..... | 46 |
| Graf 8 Průběh tvrdosti konvenční svař. v=20mm/s – pod úhlem | 46 |
| Graf 9 Závislost tvrdosti materiálu X5CrNi18-10 na vzdálenosti od středu svaru..... | 47 |
| Graf 10 Průběh tvrdosti konvenční svař. v=20mm/s – kolmý | 47 |
| Graf 11 Závislost tvrdosti materiálu X5CrNi18-10 na vzdálenosti od středu svaru..... | 48 |
| Graf 12 Porovnání maximálních tvrdostí u materiálu S235JR | 48 |
| Graf 13 Průběh tvrdosti skenerového svařování – pod úhlem..... | 49 |
| Graf 14 Závislost tvrdosti materiálu S235JR na vzdálenosti od středu svaru..... | 50 |
| Graf 15 Průběh tvrdosti konvenčního svař. v=20 mm/s – kolmý | 50 |
| Graf 16 Závislost tvrdosti S235JR na vzdálenosti od středu svaru – kon svař. v=20 mm/s | 51 |
| Graf 17 Průběh tvrdosti konvenčního svař. v=30 mm/s – kolmý | 52 |
| Graf 18 Závislost tvrdosti S235JR na vzdálenosti od středu svaru – kon svař. v=30 mm/s | 52 |
| Graf 19 Porovnání výsledků tahové zkoušky X5CrNi18-10 | 55 |
| Graf 20 Porovnání meze kluzu u X5CrNi18-10 | 55 |
| Graf 21 Porovnání typů svařování X5CrNi18-10 | 56 |
| Graf 22 Porovnání výsledků tahové zkoušky S235JR..... | 58 |
| Graf 23 Porovnání meze kluzu u S235JR | 58 |
| Graf 24 Porovnání typů svařování S235JR..... | 59 |

SEZNAM PŘÍLOH

| | | |
|-----------|----------------------------------|-----|
| Příloha 1 | Materiálový list – S235JR | 1/1 |
| Příloha 2 | Materiálový list – X5CrNi18-10 | 1/2 |
| Příloha 3 | Grafy tvrdostí – Skenerová hlava | 1/2 |
| Příloha 4 | Grafy tvrdostí – Přímá hlava | 1/4 |
| Příloha 5 | Tahová zkouška – S235JR | 1/1 |
| Příloha 6 | Tahová zkouška – X5CrNi18-10 | 1/1 |
| Příloha 7 | Trhací stroj | 1/1 |

| | | |
|---|----------------------|---|
| WNr. (číslo materiálu) 1.0038 | Základní ocel | OCEL Kurzname (značka) S235JRG2 |
|---|----------------------|---|

Chemické složení [hm. %] v tavebním vzorku

| | | | | |
|-----------------|----------|-----------|-----------|-------------------|
| C ¹⁾ | Mn | P | S | N ²⁾³⁾ |
| max 0,17 | max 1,40 | max 0,045 | max 0,045 | max 0,009 |

Chemické složení [hm. %] ve výrobku

| | | | | |
|-----------------|----------|-----------|-----------|-------------------|
| C ⁴⁾ | Mn | P | S | N ³⁾⁵⁾ |
| max 0,19 | max 1,50 | max 0,055 | max 0,055 | max 0,011 |

Normy DIN

- [1] DIN EN 10025-94 – výrobky válcované za tepla z nelegovaných konstrukčních ocelí
 [2] DIN 17100 – výrobky válcované za tepla z nelegovaných konstrukčních ocelí – ozn. RSt 37-2
 [3] DIN 1615 – svařované trubky z nelegovaných ocelí bez zvláštních požadavků
 [4] DIN 5512/1 – materiály pro kolejová vozidla – oceli obvyklých jakostí

Mechanické vlastnosti

| | | | | |
|-------------------------------------|----------------------|---------|-------|--------|
| Rozměr t, d [mm] | < 3 | 3–16 | 16–40 | 40–100 |
| Stav | tepelně nezpracovaný | | | |
| Mez kluzu R _{0H} [MPa] min | 235 | | 225 | 215 |
| Mez pevnosti R _m [MPa] | 360–510 | 340–470 | | |
| Tažnost A ₅ [%] | podél min | 21 | 26 | 24 |
| | napříč min | 19 | 24 | 22 |
| Nárazová práce KV [J] min | – | | 27 | |
| Tvrdość HB | – | | | |

| | | | |
|-------------------------------------|----------------------|---------|---------|
| Rozměr t, d [mm] | 100–150 | 150–200 | 200–250 |
| Stav | tepelně nezpracovaný | | |
| Mez kluzu R _{0H} [MPa] min | 195 | 185 | 175 |
| Mez pevnosti R _m [MPa] | 340–470 | 320–470 | |
| Tažnost A ₅ [%] | podél min | 21 | |
| | napříč min | 21 | |
| Nárazová práce KV [J] min | 27 | 23 | |
| Tvrdość HB | – | | |

Fyzikální vlastnosti

Hustota ρ [kg . m⁻³] 7 850

Technologické údaje**SVARITELNOST**

vhodná ke svařování

$$\text{uhlíkový ekvivalent } C_{EV} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15}$$

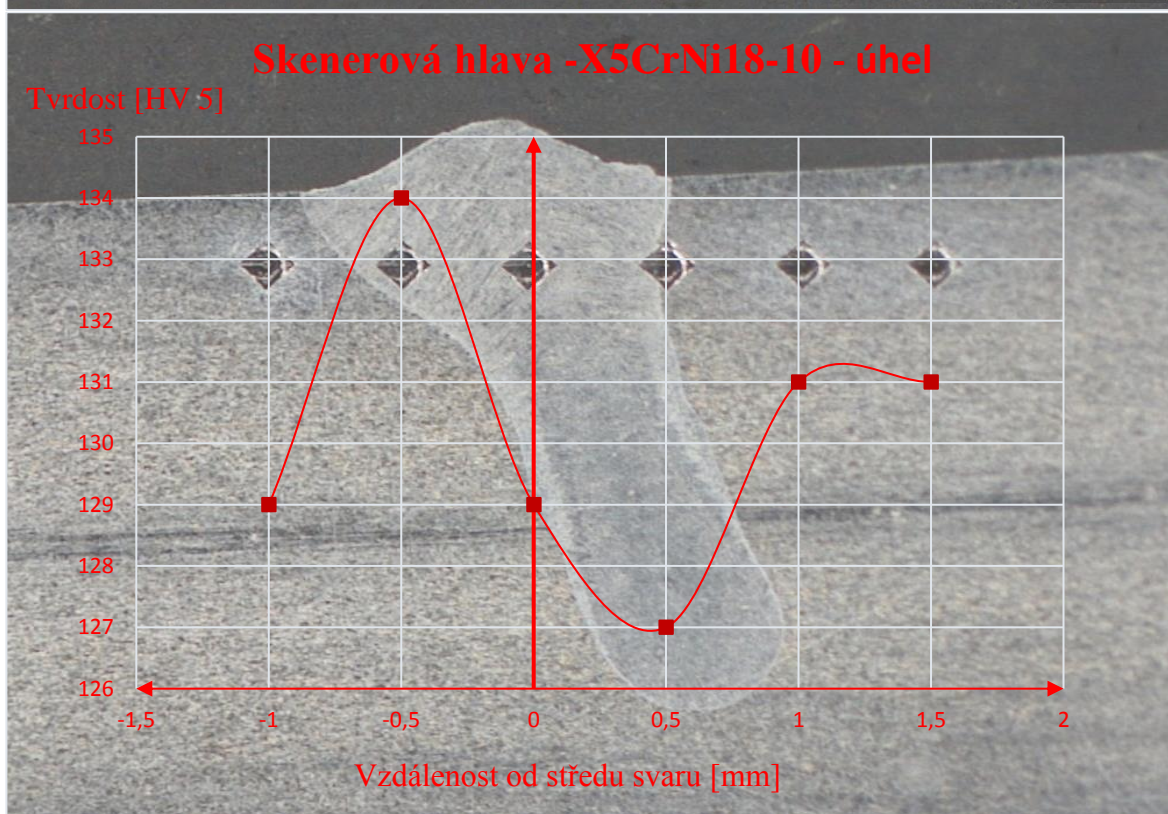
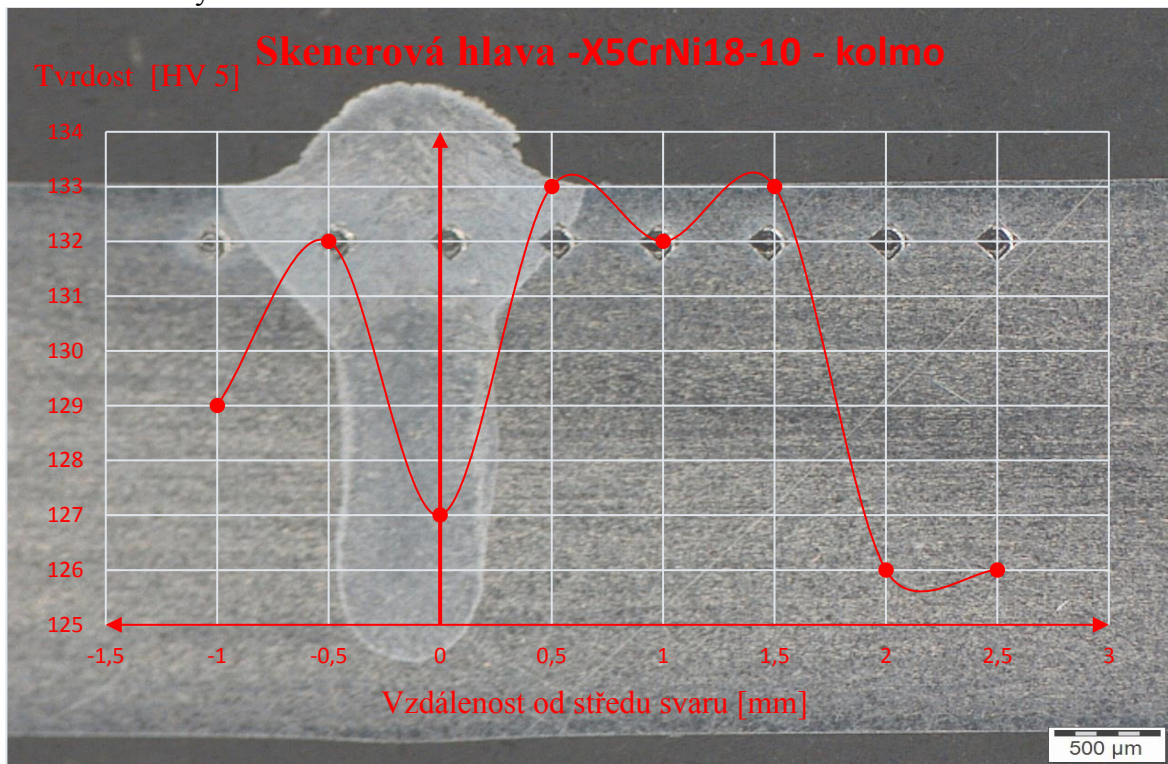
$$C_{EV} \leq 0,35 \text{ pro } t \leq 40 \text{ mm}$$

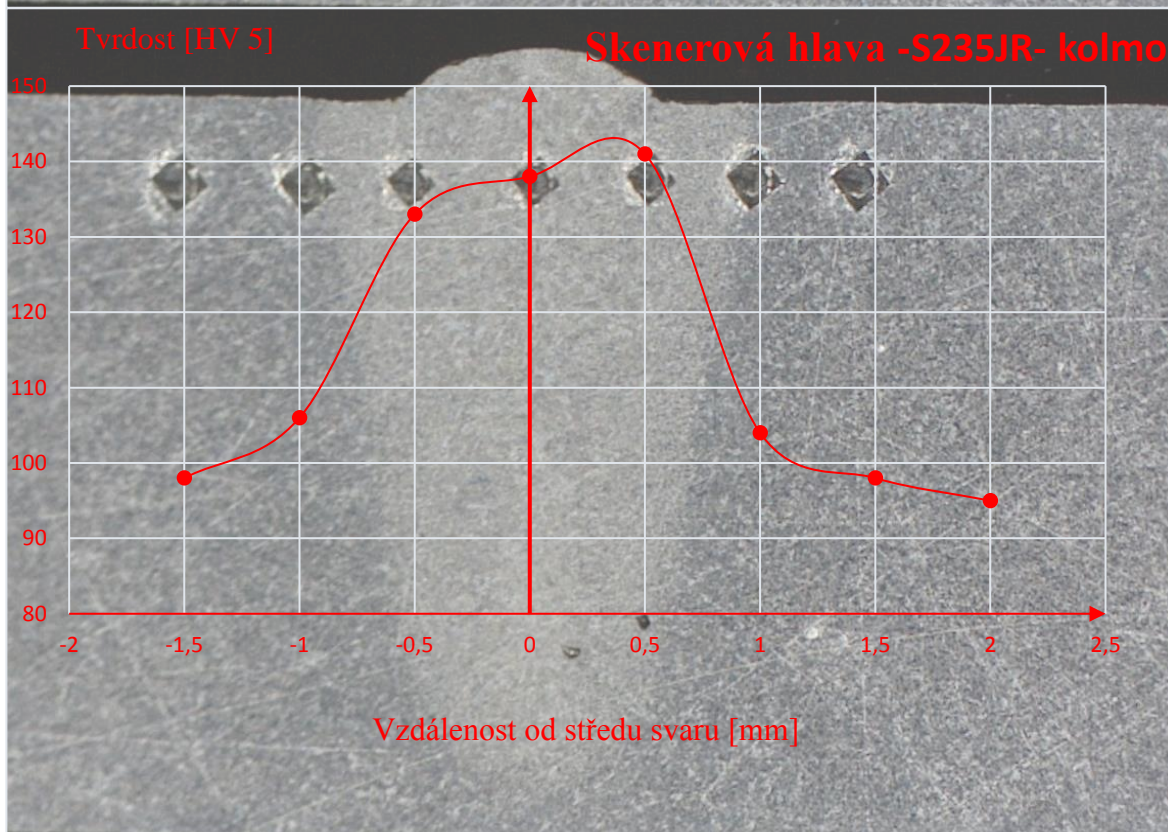
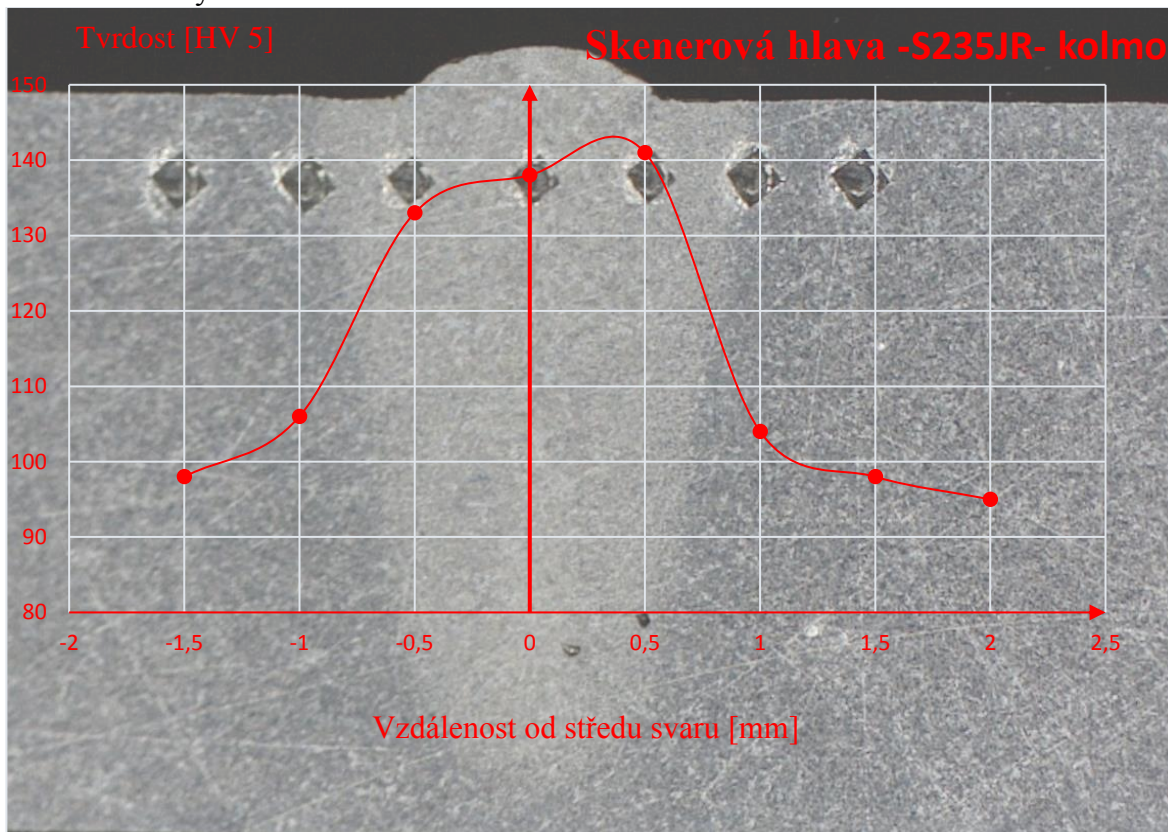
$$C_{EV} \leq 0,38 \text{ pro } t = 41\text{--}150 \text{ mm}$$

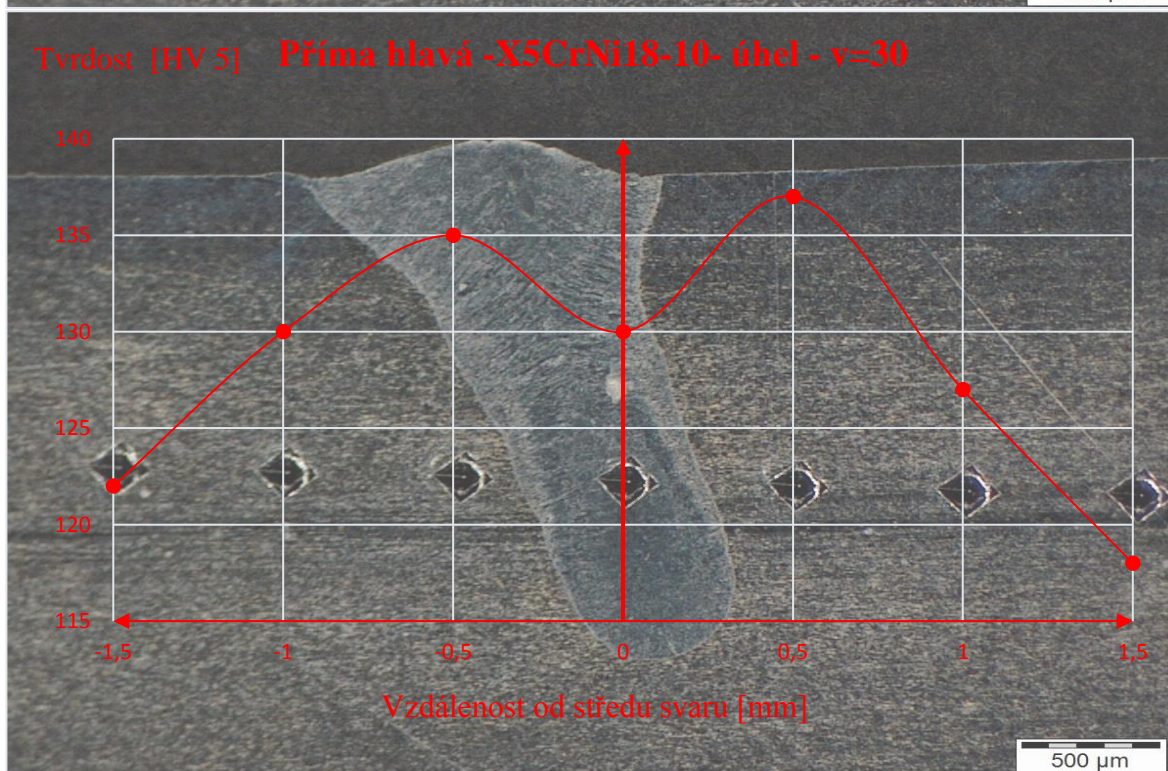
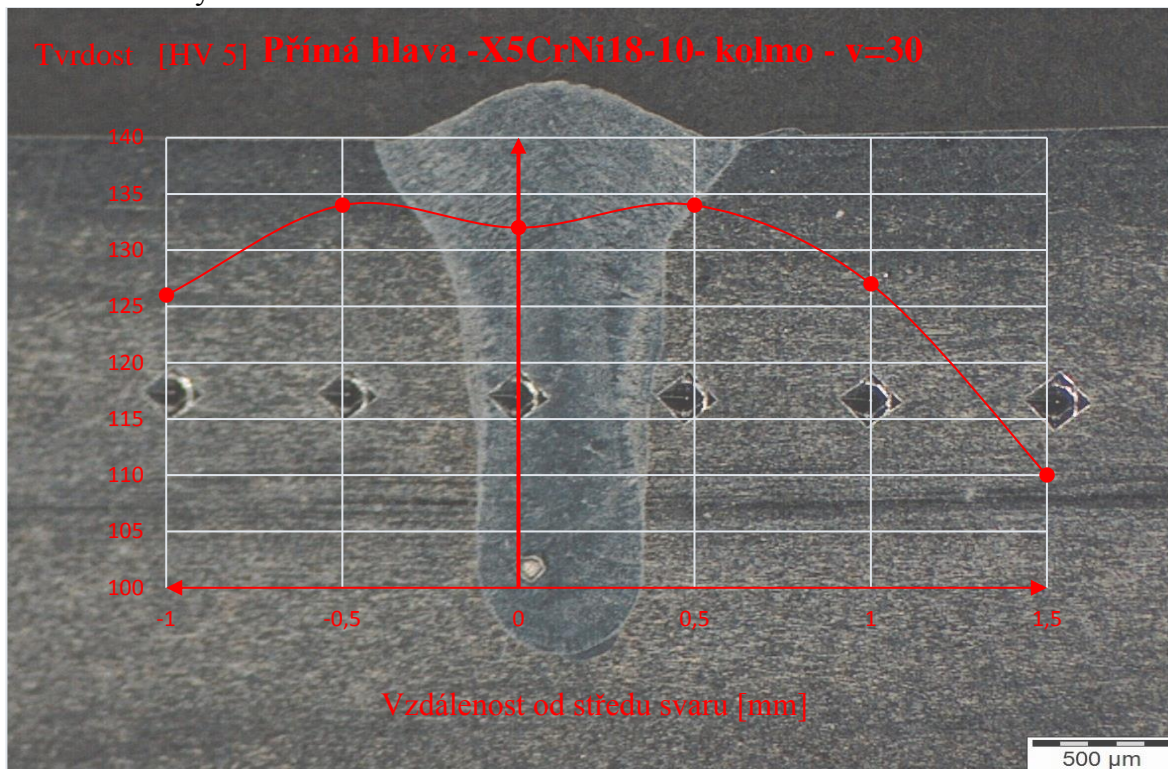
$$C_{EV} \leq 0,40 \text{ pro } t = 151\text{--}250 \text{ mm}$$

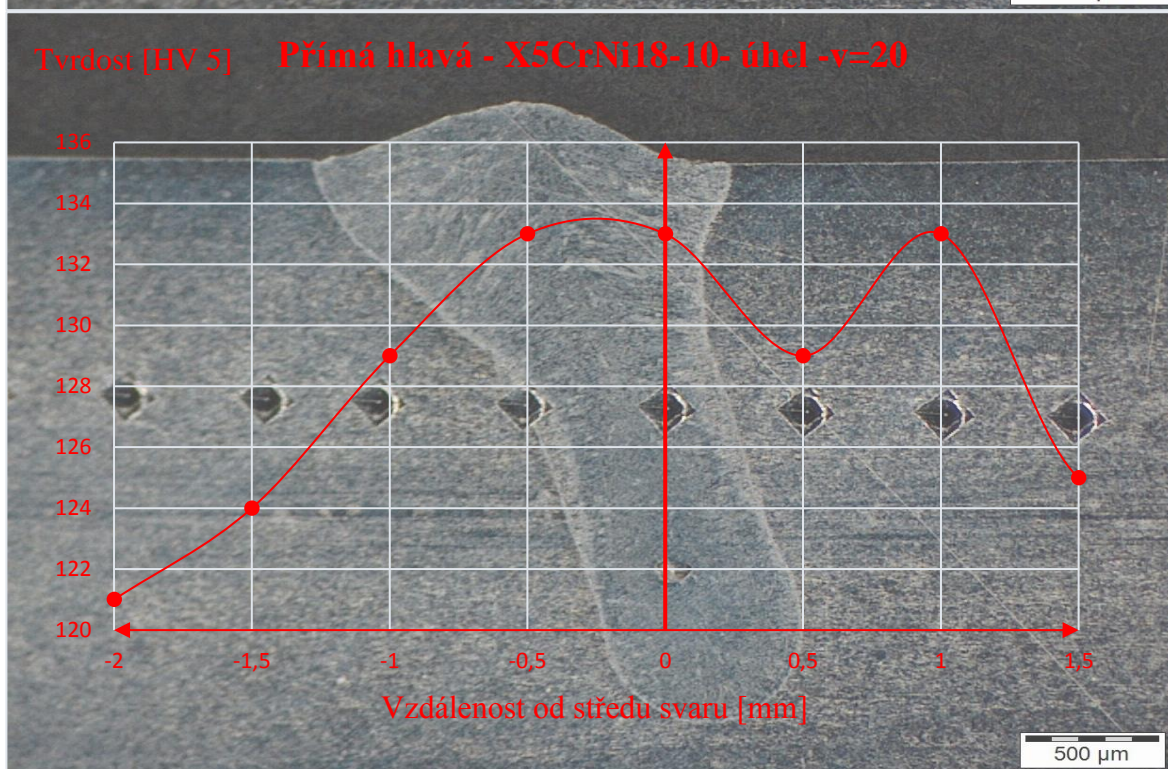
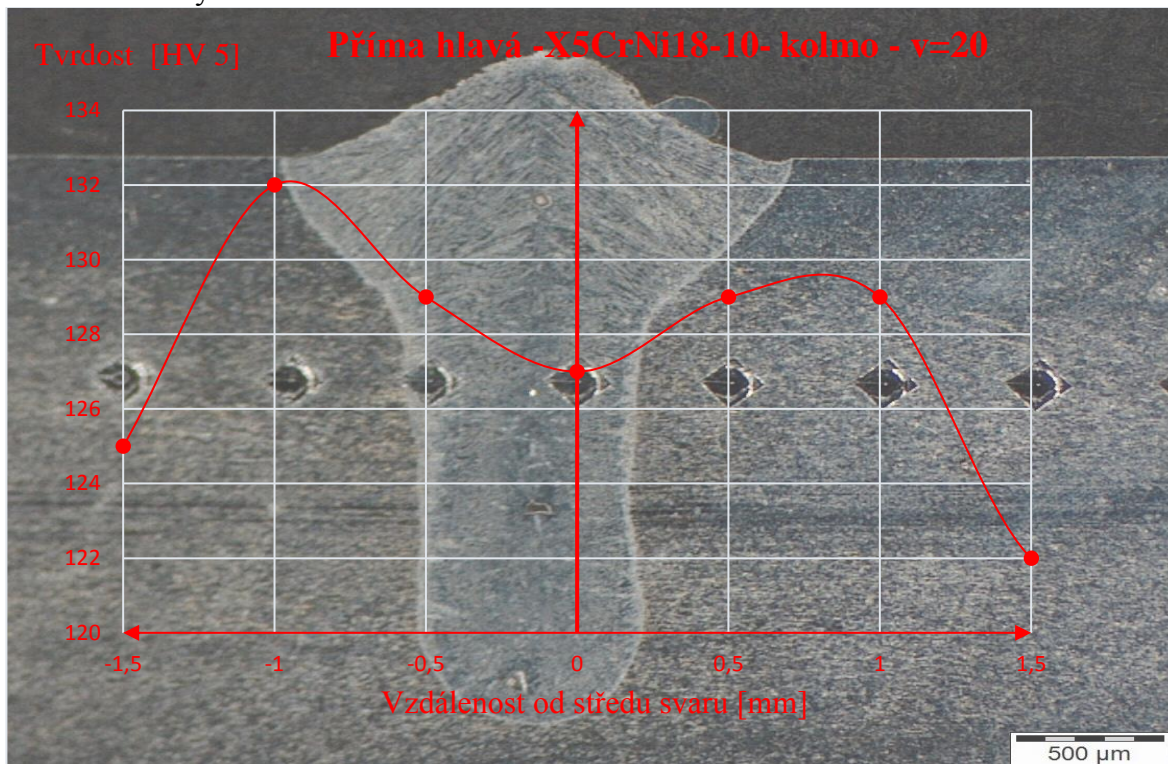
| WNr. (číslo materiálu) 1.4301 | | Cr-Ni austenitická korozivzdorná ocel | | | | OCEL Kurzne (značka) X5CrNi18-10 | |
|---|------------|--|--------------------|--------------------|-------------------------|--|----------|
| Chemické složení [hm. %] | | | | | | | |
| C | Si | Mn | P | S ¹⁾ | Cr | Ni | N |
| max 0,07 | max 1,00 | max 2,00 | max 0,045 | max 0,015 | 17,0–19,5 | 8,00–10,5 | max 0,11 |
| Normy DIN | | | | | | | |
| DIN EN 10088 /1-3-95 korozivzdorné oceli | | | | | | | |
| DIN EN 10028/7-97 ploché výrobky z ocelí na tlakové nádoby; korozivzdorné oceli | | | | | | | |
| DIN EN 100222/5-00 výkovky z oceli na tlakové nádoby; martenzitické, austenitické a austeniticko-fertické korozivzdorné oceli | | | | | | | |
| DIN EN 10250/4-00 volné výkovky z oceli pro všeobecné použití; korozivzdorné oceli | | | | | | | |
| DIN EN 10269-99 oceli a niklové slitiny na upevňovací části pro zvýšené a/nebo snížené teploty | | | | | | | |
| DIN 4133-91 ocelové komíny | | | | | | | |
| DIN 5512/3-91 oceli na kolejová vozidla; ploché výrobky z korozivzdorných ocelí | | | | | | | |
| DIN 17440-96 korozivzdorné oceli; plech, pás válcovaný za tepla a válcované tyče na tlakové nádoby, tažený drát a výkovky | | | | | | | |
| DIN 17441-97 korozivzdorné oceli; pás válcovaný za studena na tlakové nádoby | | | | | | | |
| DIN 17442-77 vývalky, výkovky a odlitky z korozivzdorných ocelí na lékařské nástroje | | | | | | | |
| Mechanické vlastnosti | | | | | | | |
| Rozměr t, d [mm] | | ≤ 6 ²⁾ | ≤ 12 ³⁾ | ≤ 75 ⁴⁾ | ≤ 160 ⁵⁾ 10) | 161–250 ⁵⁾ | |
| Stav | | po rozpouštěcím žhání | | | | | |
| Mez kluzu R _p 0,2 [MPa] min | | 230 ⁶⁾ | 210 ⁶⁾ | | 190 ⁹⁾ | | |
| Mez kluzu R _p 1,0 [MPa] | | 260 ⁶⁾ | 250 ⁶⁾ | | 225 ⁹⁾ | | |
| Mez pevnosti R _m [MPa] | | 540–750 | 520–720 | | 500–700 | | |
| Tažnost A [%] min | | 45 ⁶⁾ 7) | | 45 ⁶⁾ | 45 ⁹⁾ | 35 ⁶⁾ 9) | |
| Kontrakce Z [%] | | | | | | | |
| Nárazová práce KV [J] | podél min | – | 90 | | 100 ⁹⁾ | – | |
| | napříč min | – | 60 | | – | 60 ⁹⁾ | |
| Tvrdość HB max | | – | – | | 215 ⁹⁾ | | |
| Modul pružnosti E [GPa] | | 200 | | | | | |
| Rozměr t _n [mm] | | 250 ¹¹⁾ | | | | | |
| Stav | | po rozpouštěcím žhání | | | | | |
| Mez kluzu R _p 0,2 [MPa] min | | 200 | | | | | |
| Mez kluzu R _p 1,0 [MPa] | | 230 | | | | | |
| Mez pevnosti R _m [MPa] | | 500–700 | | | | | |
| Tažnost A % | podél min | 45 | | | | | |
| | napříč min | 35 | | | | | |
| Kontrakce Z [%] | | | | | | | |

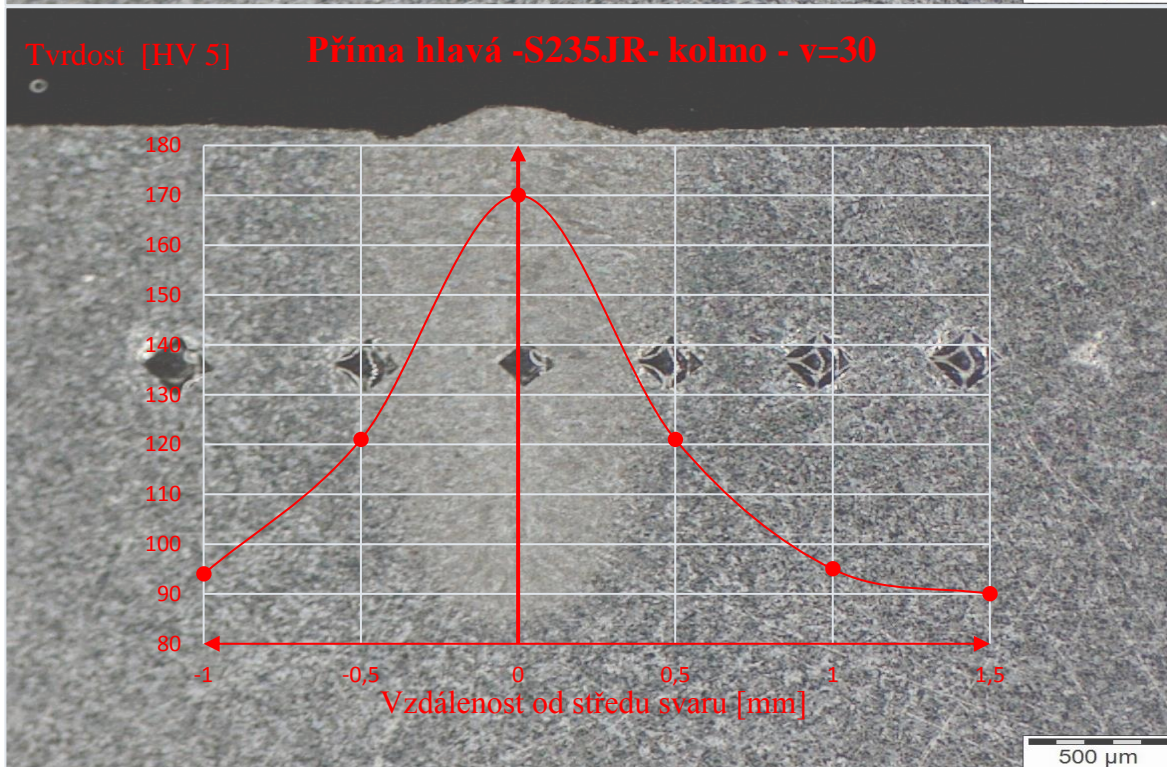
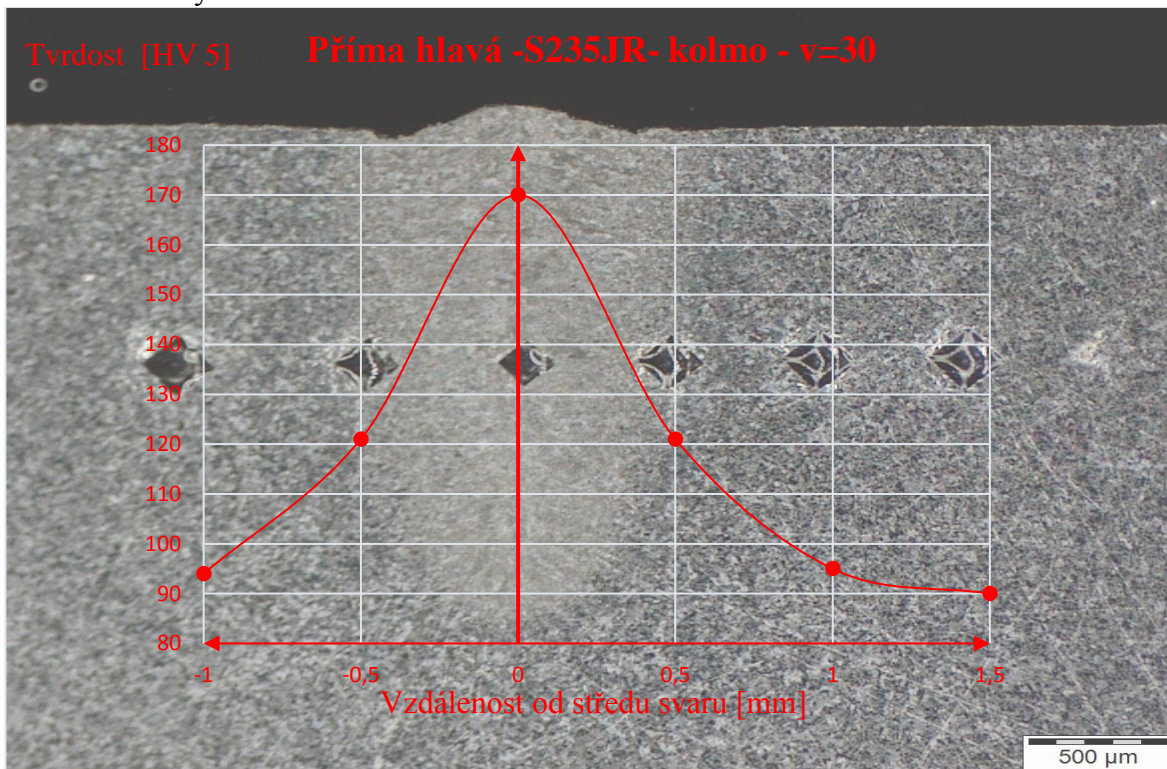
| | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|--|--|---------------------------------|-----------|---|-----------|--|-----|-----|-----|
| Nárazová práce KV [J] | podél min | 100 | | | | | | | | | |
| | napříč min | 60 | | | | | | | | | |
| KV ⁻¹⁹⁶ [J] | napříč min | 60 | | | | | | | | | |
| | Modul pružnosti E [GPa] | 200 | | | | | | | | | |
| Min. hodnoty meze kluzu R _{p0,2} a R _{p1,0} a meze pevnosti R _m při zvýšených teplotách (stav po rozpouštěcím žhání) | | | | | | | | | | | |
| Teplota [°C] | | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 |
| Mezi kluzu [MPa] | R _{p0,2} | 155 | 140 | 127 | 118 | 110 | 104 | 98 | 95 | 92 | 90 |
| | R _{p1,0} | 190 | 170 | 155 | 145 | 135 | 129 | 125 | 122 | 120 | 120 |
| Mez pevnosti R _m [MPa] | | 450 | 420 | 400 | 390 | 380 | 380 | 380 | 375 | 360 | 335 |
| Hodnoty pevnosti v tahu, tažnosti a nárazové práce ve zpevněném stavu | | | | | | | | | | | |
| Označení | | C700 | C800 | C850 | C1000 | C1150 | C1300 | | | | |
| Mez pevnosti R _m [MPa] | | 700–850 | 800–1000 | 850–1000 | 1000–1150 | 1150–1300 | 1300–1500 | | | | |
| Tažnost A [%] min | | 20 | 12 | – | – | – | – | | | | |
| Nárazová práce | KV [J] min | 80 | – | – | – | – | – | | | | |
| | KV ⁻¹⁹⁶ [J] min | 50 | – | – | – | – | – | | | | |
| Mechanické vlastnosti při nízkých teplotách | | | | | | | | | | | |
| Teplota [°C] | | -150 | | | | | -196 | | | | |
| Mez kluzu R _{p0,2} [MPa] min | | 370 | | | | | 400 | | | | |
| Mez pevnosti R _m [MPa] min | | 1400 | | | | | 1500 | | | | |
| Tažnost A [%] min | | 40 | | | | | 35 | | | | |
| Nárazové práce KV [J] min | | 60 | | | | | 60 | | | | |
| Hodnoty modulu pružnosti E při zvýšených teplotách | | | | | | | | | | | |
| Teplota [°C] | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | | | | | |
| Modul pružnosti E [GPa] | | 194 | 186 | 179 | 172 | 165 | | | | | |
| Fyzikální vlastnosti | | | | | | | | | | | |
| Hustota | | Měrná tepelná kapacita | | Teplotní součinitel roztažnosti | | Tepelná vodivost | | Rezistivita | | | |
| ρ [kg . m ⁻³] | | c _p [J . kg ⁻¹ . K ⁻¹] | | α [K ⁻¹] | | λ _t [W . m ⁻¹ K ⁻¹] | | [Ω . mm ² . m ⁻¹] | | | |
| 7 900 | | 500 | | 16.10 ⁻⁶ | | 15 | | 0,73 | | | |
| Odolnost proti degradačním procesům | | | | | | | | | | | |
| ODOLNOST PROTI MEZIKRYSTALOVÉ KOROZI | | | | | | | | | | | |
| – v dodávaném stavu: ano | | | | | | | | | | | |
| – po zcitlivění: ne | | | | | | | | | | | |
| Technologické údaje | | | | | | | | | | | |
| TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ | | | | | | | | | | | |
| rozpouštěcí žhání | | 1000–1100 °C | ochlazovat ve vodě nebo na vzduchu ⁸⁾ | | | | | | | | |
| TVARĚLNOST | | | | | | | | | | | |
| teploty tváření | | 1200–900 °C | ochlazovat na vzduchu | | | | | | | | |

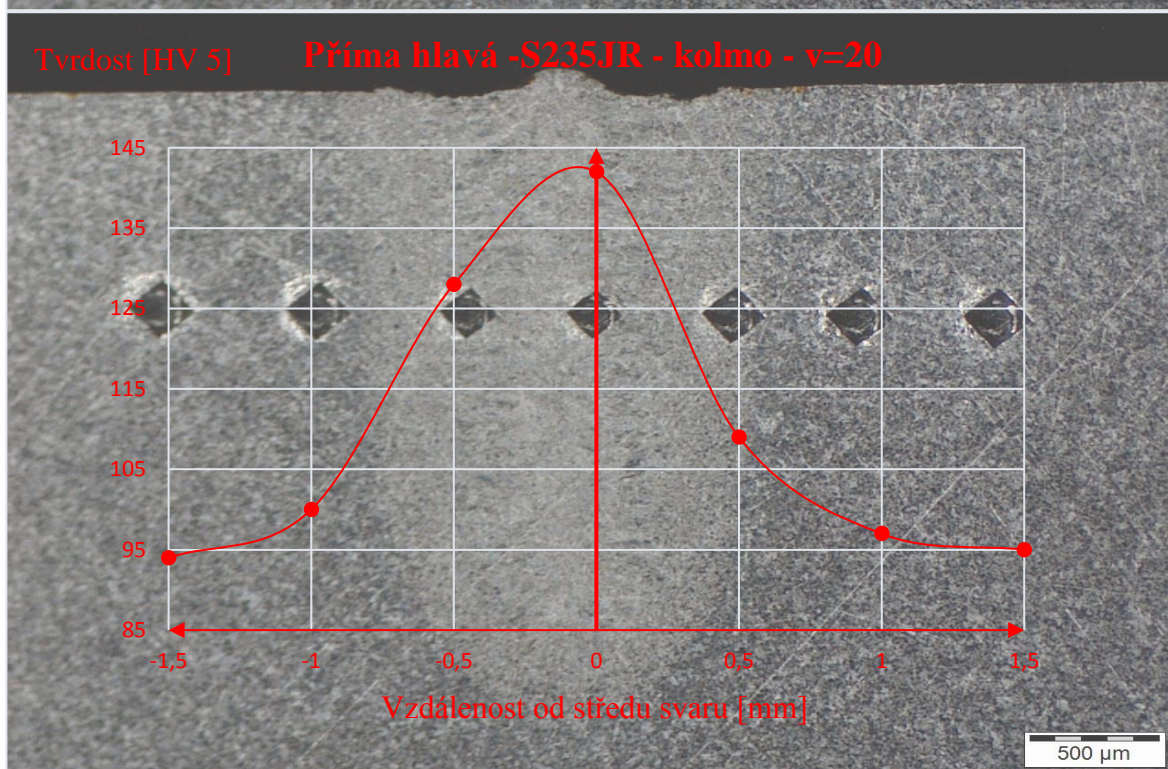






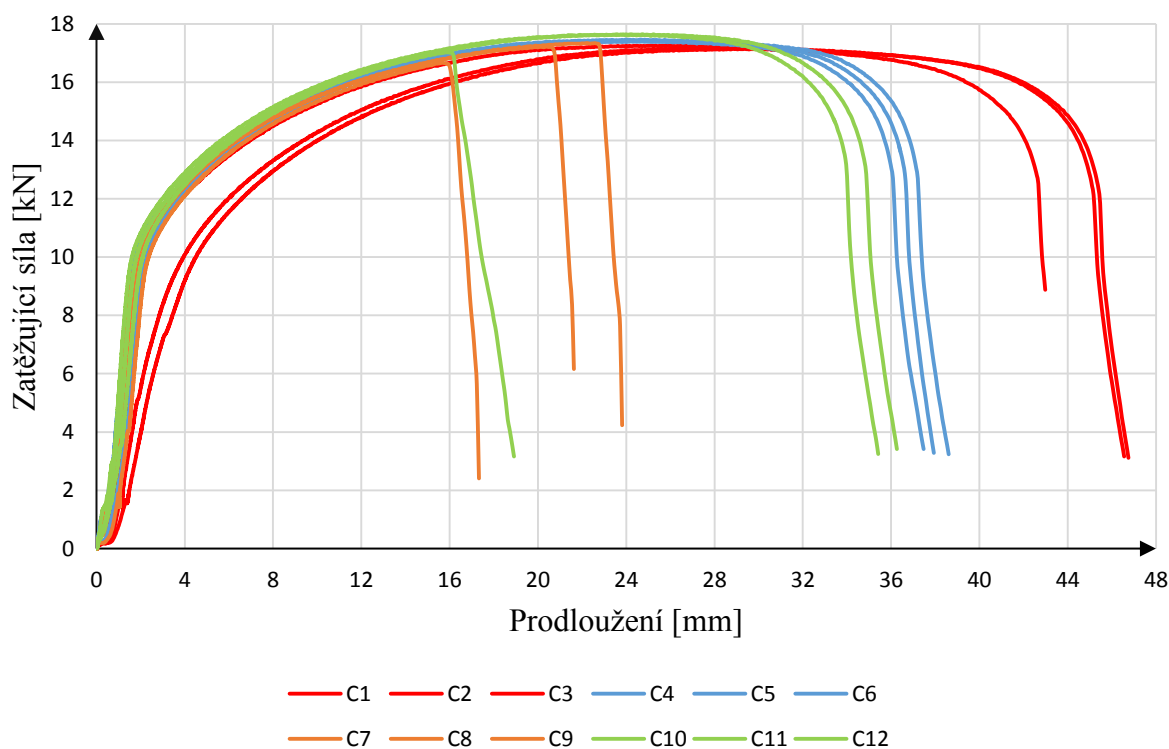






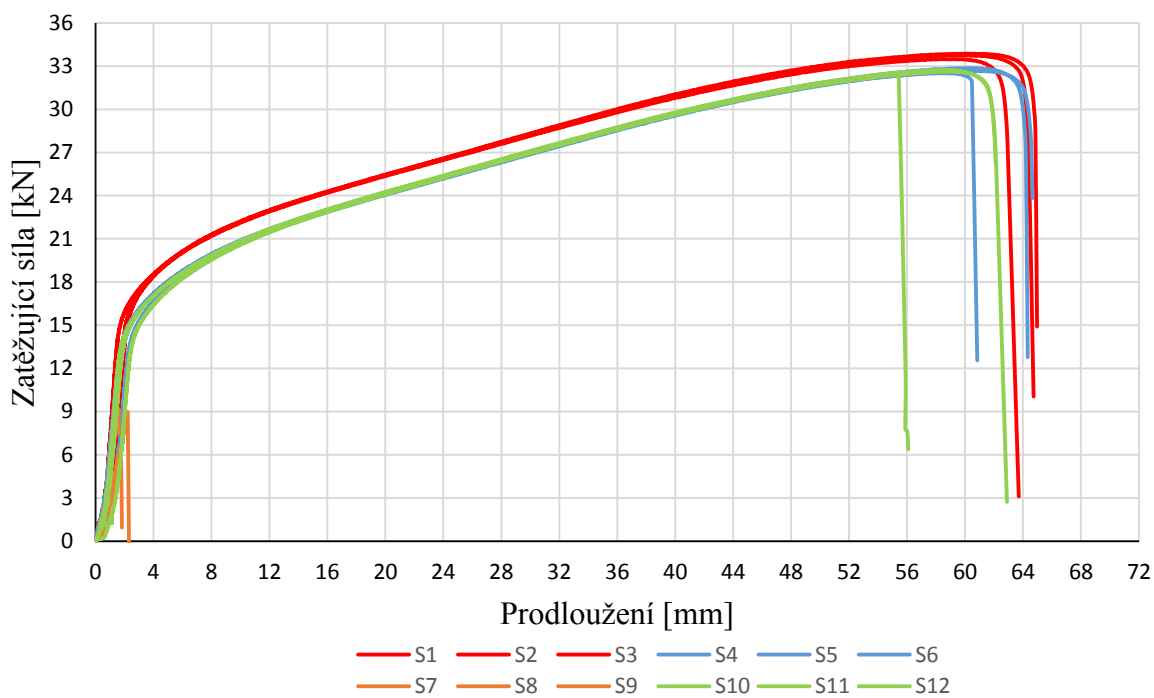
| Vzorek | F _m [N] | R _{p2} [MPa] | R _m [MPa] | A[%] | Poznámka |
|--|--------------------|-----------------------|---|-------|--------------------|
| C1 | 17 143,60 | 206,14 | 342,87 | 43,75 | |
| C2 | 17 181,20 | 198,99 | 343,62 | 43,75 | |
| C3 | 17 266,00 | 211,59 | 345,32 | 43,75 | |
| C4 | 17 463,60 | 215,65 | 350,67 | 37,50 | |
| C5 | 17 407,20 | 214,14 | 349,54 | 37,50 | |
| C6 | 17 407,20 | 215,28 | 349,54 | 36,25 | Prasknutí ve svaru |
| C7 | 16 673,60 | 212,26 | 334,81 | 12,50 | Prasknutí ve svaru |
| C8 | 17 228,40 | 211,31 | 345,95 | 18,75 | Prasknutí ve svaru |
| C9 | 17 341,20 | 215,08 | 348,22 | 18,75 | Prasknutí ve svaru |
| C10 | 17 030,80 | 215,28 | 341,98 | 15,00 | Prasknutí ve svaru |
| C11 | 17 632,80 | 215,65 | 354,07 | 33,75 | |
| C12 | 17 642,40 | 216,59 | 354,27 | 32,50 | |
| C1 až C3 – Referenční vzorky C4 až C6 – Kolmé svařování | | | C7 až C9 – Svařování pod úhlem - odsazení C10 až C12 – Svařování pod úhlem | | |

Tahová zkouška - S235JR



| Vzorek | F _m [N] | R _{p2} [MPa] | R _m [MPa] | A[%] | Poznámka |
|------------------------------|--------------------|-----------------------|---|-------|--------------------|
| S1 | 33 752,00 | 328,77 | 672,35 | 48,75 | |
| S2 | 33 488,40 | 320,31 | 669,77 | 48,13 | |
| S3 | 33 864,80 | 332,54 | 677,30 | 48,75 | |
| S4 | 32 868,00 | 306,11 | 665,34 | 48,13 | |
| S5 | 32 660,80 | 305,07 | 658,48 | 48,75 | |
| S6 | 32 510,40 | 303,56 | 655,45 | 41,25 | Prasknutí ve svaru |
| S7 | 9 160,00 | -15,35 | 184,68 | 0,01 | Prasknutí ve svaru |
| S8 | 6 536,00 | 66,67 | 131,24 | 0,01 | Prasknutí ve svaru |
| S9 | 8 952,80 | -10,95 | 179,78 | 0,01 | Prasknutí ve svaru |
| S10 | 32 407,20 | 304,12 | 653,37 | 38,75 | Prasknutí ve svaru |
| S11 | 32 736,00 | 303,18 | 660,00 | 45,00 | |
| S12 | 32 632,80 | 298,93 | 655,28 | 45,63 | |
| S1 až S3 – Referenční vzorky | | | S7 až S9 – Svařování pod úhlem - odsazení | | |
| S4 až S6 – Kolmé svařování | | | S10 až S12 – Svařování pod úhlem | | |

Tahová zkouška - X5CrNi18-10



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 příčniku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropské výrobci 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