



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# SVAŘOVÁNÍ HLUBOKOTAŽNÝCH OCELÍ S OCHRANNOU VRSTVOU HYBRIDNÍ TECHNOLOGIÍ LASER-TIG

WELDING OF DEEP-DRAWING STEELS WITH PROTECTIVE LAYER BY LASER-TIG HYBRID  
TECHNOLOGY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Patrik Brehovský

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2019

# Zadání diplomové práce

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

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

## **Svařování hlubokotažných ocelí s ochrannou vrstvou hybridní technologií Laser–TIG**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Ověřit svařování hlubokotažných ocelí s ochrannou kovovou povrchovou vrstvou pomocí hybridní technologie Laser–TIG. Optimalizovat procesní parametry s ohledem na mechanické vlastnosti svaru.

### **Cíle diplomové práce:**

Osvojit si technologii hybridního laserového svařování Laser–TIG.  
Osvojit si aplikaci této technologie pro svařování hlubokotažných plechů s ochrannou Zn vrstvou.  
Optimalizovat procesní parametry s ohledem na mechanické vlastnosti svaru a poškození Zn vrstvy.  
Osvojit si metalografické vyhodnocování svarového spoje, mechanické zkoušky svaru a vyhodnocení svarových vad.

### **Seznam doporučené literatury:**

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

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

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

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

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

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

**BREHOVSKÝ Patrik:** Svařování hlubokotažných ocelí s ochrannou vrstvou hybridní technologií Laser–TIG

---

Diplomová práca sa zaoberá laserovým zváraním extra hlbokotažného oceľového plechu podľa štandardu WSS-M1A365-A14 s povrchovou ochranou vrstvou na báze zinku. Oceľový plech o hrúbke 0,9 mm a vrstve zinku s gramážou  $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  je zváraný hybridnou metódou Laser-TIG. Laser, ako primárny zdroj energie, je využitý pre zváranie materiálu a elektrický oblúk, zabezpečený netaviacou sa volfrámovou elektródou, funguje ako predohrev materiálu pre natavenie a vyparenie zinkovej vrstvy. Na základe prvotných experimentov bola, ako konštantný parameter, zvolená veľkosť výkonu laseru s posunovou rýchlosťou zváraciej hlavy. Premenným parametrom bol elektrický prúd, ktorého hodnoty dosahovali 0, 20, 30 a 40 A pre preplátavaný a pre tupý zvar. Pre každú kombináciu druhu zvaru s veľkosťou elektrického prúdu bol vytvorený jeden zvar, ktorý sa následne podrobil zvarovým skúškam pre overenie jeho kvality a materiálových vlastností. Letným pohľadom pri experimente bol viditeľný rozdiel medzi zvarom laserom s použitím predohrevu TIG a bez neho. Pozitívny vplyv elektrického oblúku sa preukázal, pri vyhodnotení jednotlivých výsledkov z skúšok, dosiahnutím lepších materiálových vlastností a znížením vplyvu zvarových väd na kvalitu spoja. Zvolenie použitia metódy Laser-TIG tak prináša vhodnú voľbu v automobilovom priemysle, kde je veľkoobjemové využitie pozinkovaných plechov a stále dáva priestor na zdokonalenie procesu zvárania ďalšími výskumami.

**Kľúčové slová:** laser, TIG, Laser-TIG, LasTIG, hybridné laserové zváranie, extra hlbokotažná oceľ, oceľ WSS-M1A365-A14, zinková vrstva, zvarové vady, skúšky zvarov

## **ABSTRACT**

**BREHOVSKÝ Patrik:** Welding of Deep-drawing Steels with Protective Layer by Laser-TIG Hybrid Technology

---

The diploma thesis focuses on laser welding of extra deep-drawn steel sheet according to the standard WSS-M1A365-A14 with a protective zinc surface layer. A 0,9 mm thick steel sheet with a zinc layer with coating weight  $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  is welded by a hybrid welding method Laser-TIG. The laser, as the primary energy source, is used for welding the material. The arc, provided by a non-melting tungsten electrode, is used for preheating the material for melting and evaporation of the zinc layer. Based on the initial experiments, the magnitude of the laser power with the welding speed was chosen as a constant parameter. The magnitude of the electric current, as the variable parameter, was set up to 0, 20, 30 and 40 amperes for welding the lap and the butt welds. Only one piece of the each weld-type combination was made. The welds were afterwards tested to verify their quality and material properties. The first differences between laser welding with or without TIG preheating were visible during the experiment. The positive effects of the laser welding with preheating by TIG were confirmed. The material properties of the joints achieved better values and an influence of the welding defects on the quality of the joints was reduced. The Laser-TIG is a good choice for welding galvanized steel sheets in the mass production of automotive industry and it could be improved by more researches.

**Key words:** laser, TIG, Laser-TIG, LasTIG, hybrid laser welding, extra deep-drawing steel, WSS-M1A365-A14, zinc layer, welding defects, testing of welds

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

BREHOVSKÝ, Patrik. *Svařování hlubokotažných ocelí s ochrannou vrstvou hybridní technologií Laser-TIG*. Brno, 2020. 101s.

Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124893>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Týmto prehlasujem, že som diplomovú prácu *Svařování hlubokotažných ocelí s ochrannou vrstvou hybridní technologií Laser-TIG* vypracoval samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho diplomovej práce.

V Brne dňa 21.6.2020

.....  
Podpis

## **POĎAKOVANIE**

Moje poďakovanie patrí môjmu vedúcemu práce, doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, Ph.D. za jeho cenné, odborné rady a pripomienky, a taktiež trpezlivosť pri spracovaní diplomovej práce. Ďakujem taktiež Ing. Petrovi Horníkovi za pomoc s experimentálnou časťou práce a za pomoc pri uskutočnení skúšky ťahom ďakujem Ing. Kamilovi Podanému, Ph.D.

Ďalej by som rád poďakoval najbližšiemu kolektívu v práci, že mi vychádzali v ústrety počas obdobia tvorby diplomovej práce.

V neposlednom rade ďakujem mojím rodičom a blízkym priateľom za ich podporu a trpezlivosť.

# OBSAH

Zadanie

Abstrakt

Bibliografická citácia

Čestné prehlásenie

Poďakovanie

Obsah

ÚVOD .....	10
1 ROZBOR ZADANIA.....	11
1.1 Varianty riešenia .....	12
2 ROZBOR TECHNOLOGIE ZVÁRANIA .....	19
2.1 Zváranie laserom .....	20
2.1.1 Laser .....	20
2.1.2 Absorpcia a vlnová dĺžka žiarenia.....	22
2.1.3 Tvar prierezu laserového lúča .....	22
2.1.4 Rozdelenie laserov .....	22
2.1.5 Pevnolátkové lasery.....	23
2.1.6 Plynové lasery .....	27
2.1.7 Princíp zvárania laserom .....	28
2.2 Zváranie metódou TIG .....	31
2.2.1 Zdroje prúdu .....	32
2.2.2 Elektródy .....	33
2.2.3 Ochranný plyn .....	35
2.2.4 Zvárací TIG horák.....	38
2.2.5 Prídavné materiály.....	38
2.3 Hybridné zváranie Laser-TIG .....	39
2.3.1 Laser-TIG parametre .....	40
2.4 Zinok, povrchová ochrana oceli a korózia .....	42
2.4.1 Elektrolytické zinkovanie.....	42
2.4.2 Žiarové zinkovanie .....	43
2.4.3 Sendzimirové zinkovanie .....	43
2.5 Zvarové vady.....	44
2.6 Skúšky zvaru .....	49



## OBSAH

2.6.1	Deštruktívne skúšky .....	49
2.6.2	Nedeštruktívne skúšky .....	59
3	EXPERIMENT.....	62
3.1	Príprava a zváranie vzoriek .....	62
3.2	Skúšky zvarového spoja .....	66
3.2.1	Ťahová skúška .....	66
3.2.2	Metalografické vyhodnotenie zvaru.....	75
4	VYHODNOTENIE EXPERIMENTÁLNEJ ČASTI PRÁCE.....	80
5	ZÁVER.....	81
	Zoznam použitých zdrojov	
	Zoznam použitých symbolov a skratiek	
	Zoznam obrázkov	
	Zoznam tabuliek	
	Zoznam príloh	

## ÚVOD [1], [2], [3]

Od prvého zostrojenia laseru uplynulo už niekoľko desaťročí a za ten čas laser si našiel uplatnenie v širokom spektre aplikácií strojárskoho priemyslu, vrátane inovácie a vývoja nových druhov laserov, a s nimi spojených lepších vlastností. Je používaný pre delenie materiálu cez jeho spájanie až po aplikácie kalenia, navarovania vrstiev, gravírovania a mnoho iných technológií. I napriek vysokým počiatočným nákladom na zariadenie a celé dodatočné vybavenie, si laser ukrajuje z pomyselného koláčového grafu aplikovaných technológií v priemysle stále väčšiu a väčšiu časť. Výnimkou nie je s laserom spojené zváranie. Vďaka jeho výhodám, ďaleko prevyšujúcimi nevýhody, v konečnom dôsledku sa zanedbávajú vstupné náklady, hlavne, čo sa týka masovej výroby v automobilom priemysle. Jeho počiatok zvárania u automobiliek sa datuje od prvej polovice osemdesiatich rokov minulého storočia. Má vysoký potenciál využitia pre zváranie materiálov a kde končia jeho možnosti, dostávajú šancu hybridné metódy využívajúce laser ako primárnu metódu alebo dopĺňajúc oblúkové metódy zvárania. Prvá hybridná metóda zvárania v automobilke využívajúca laser, bola v kombinácii s MIG pre automobilku Audi, ktorá vtedy na jej vývoji spolupracovala s poprednou firmou v zváraní Fronius. Jej princíp je založený na prídavnom materiáli, čo značí navýšenie hmotnosti a vyššiu cenu polotovaru. Iný variant, ktorý sa zaobíde bez prídavného materiálu, je hybridná metóda laser-TIG, viď obr. 1. U nej elektrický oblúk pomáha laseru predohrevom, dohrevom materiálu a taktiež je využívaný pre odstránenie povrchovej vrstvy zinku, ktorá pri zváraní laserom vytvára pórovité zvary, čiže nežiadúce po kvalitatívnej stránke. Z takýchto plechov, ktoré sú povrchovo upravené zinkovaním, je montovaná väčšina karosérií automobilov, až na výnimky v podobe náhrady zliatinou hliníka, polymérom alebo materiálom z uhlíkových vlákien. Tie je nutné pevne a zároveň efektívne spojiť dohromady s čo najnižšou výslednou cenou. Niektoré automobilky sa uchýlili k lepeniu karosérie doplnené nitovaním, spájané skrutkami, samotnými nitmi a klinčovaním. I tak prevažná časť dielov zostáva spojená zvarom, ktorý prináša mnoho výhod i po stránke pevnosti celej karosérie auta. K jej spojeniu zvarom sa tak využíva bodové trecie alebo odporové zváranie, laserové zváranie a spájkovanie i elektrický oblúk. Pri využití kombinácie rôznych druhov kovových materiálov vrátane pozinkovaných plechov u karosérie, výskum a použitie technológie Laser-TIG v priemysle má zmysel.



*Obr. 1 Zváracia zostava Laser-TIG s predpripravenými plechmi k zvareniu na ÚPT*

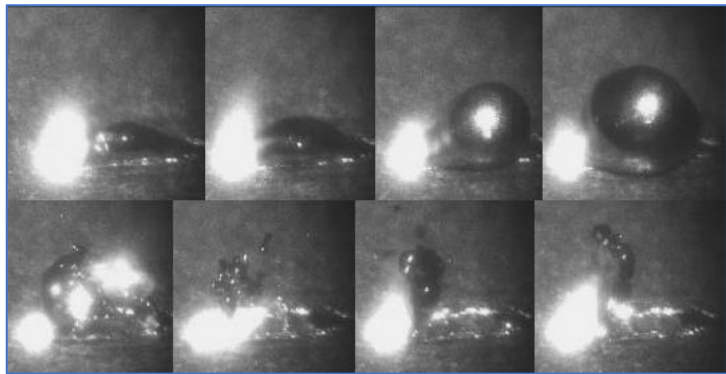
## 1 ROZBOR ZADANIA [4], [5], [6], [7]

Materiály, plechy, z ktorých sú vyrábané časti karosérie automobilov, musia spĺňať vo veci materiálových charakteristík, záležitostí na umiestnení, vysokú pevnosť a absorpciu energie, a pri tvarovaní dostatočne veľkú plasticosť. Drvivá väčšina používaných oceľových plechov nie je odolná voči korózií a preto vyžaduje doplnujúcu ochranu pomocou povrchovej vrstvy. Tá sa delí na organickú, anorganickú alebo kombináciu oboch variant. Organická vrstva môže byť náterová hmota, plast alebo z bitúmenových prípravkov. Anorganická vrstva je v podobe kovu, zliatiny alebo smaltu. Najväčšie zastúpenie u povrchových úprav má zinok, respektíve technológia žiarového a galvanického zinkovania. Pri následnom skladaní karosérie a zvaraní pomocou laseru nastáva problém, ktorý je spôsobený rozdielom teploty varu zinku a teploty tavenia oceli. Zatiaľ, čo čistý zinok (používa sa zliatina zinku s horčíkom a hliníkom) sa vyparuje približne pri 907 °C, u oceli potrebujeme teplotu nad 1500 °C, aby sme ju iba natavili, presnejšiu hodnotu teploty tavenia je možné vyčítať z binárneho diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C, záležitostí

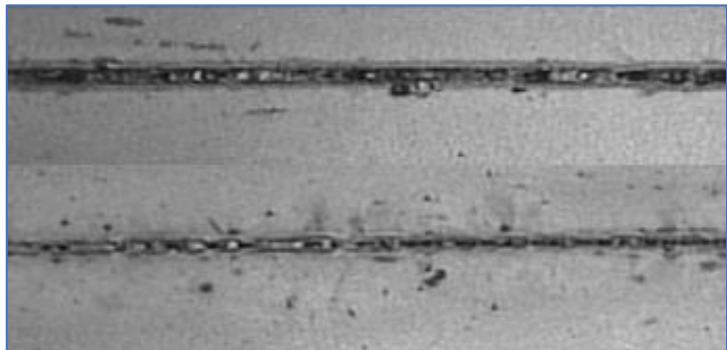
od obsahu uhlíku. Energetická hustota laserového lúča dosahuje enormných hodnôt, pomocou ktorých sa natavený zinok začne veľmi rýchlo vyparovať. Ak sa jedná o preplátavaný zvarový spoj alebo spojenie materiálov, kde sú zinkové pary dočasne uväznené medzi vrstvami plechov, pri natavení ocele začnú explozívne unikať cez keyhole, viď obr. 2.

Tá spôsobí niekoľko zvarových väd, rozstriednutie roztavenej oceli, viď obr. 3, dutiny v zvare od chýbajúceho materiálu, viď obr. 4 a pórovitosť zvaru. Tieto vady sú neprijateľné a popri výslednom neestetickom vzhľade zvaru pôsobia aj na stránku kvality, znižujú mechanické vlastnosti a taktiež odolnosť materiálu voči korózií.

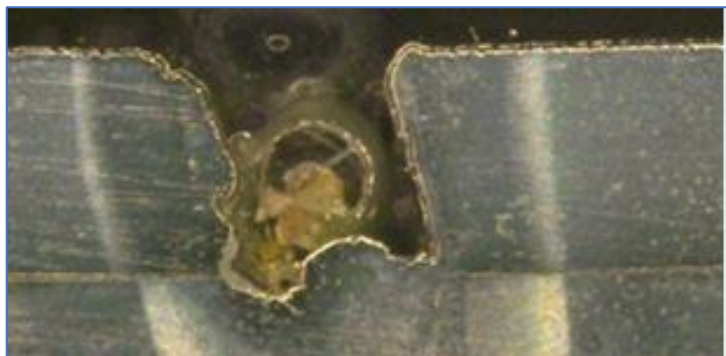
Predísť uvedeným vznikajúcim problémom je hlavnou náplňou tejto práce, ktorá spočíva v navrhnutí riešenia pre zváranie hlbokotážneho plechu s vrstvou zinku a následne experimentom to otestovať na materiáli zapožičanom od firmy venujúcej sa laserovému zváraní. Výsledné vzorky je nutné podrobiť testu skúškou ťahom a vyhodnotiť zvar po stránke metalografie.



*Obr. 2 Únik nahromadených zinkových pár z medzery medzi plechmi [6]*



*Obr. 3 Rozstriednutý materiál po zvarení laserom plechu s obojstrannou povrchovou vrstvou zinku [6]*



*Obr. 4 Dutina v zvare po zvarení laserom plechu s obojstrannou povrchovou vrstvou zinku [7]*

## 1.1 Varianty riešenia [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35]

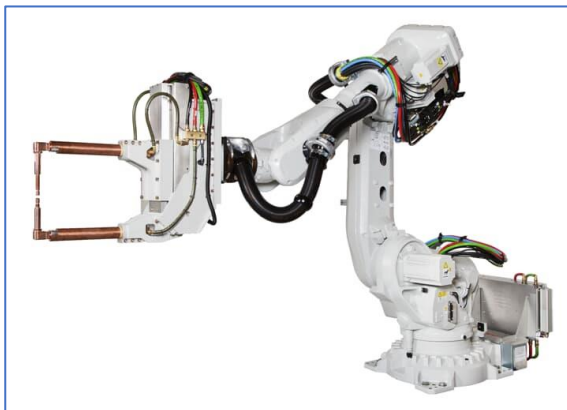
Riešenie sa ponúka v odstránení vrstvy zinku ešte pred účinkom laseru, zvýšenie medzery medzi materiálom pre dostatočný priestor na únik vzniknutých zinkových výparov alebo zvolenie inej technológie spojenia dvoch plechových komponentov. Pri výbere možných variant je potrebné brať do pozornosti miesto aplikácie daných technológií a veľkosti výroby po stránke množstva kusov i rozmerov spracovávaných dielov.

- Odporové bodové zváranie – metóda 21 podľa ČSN EN ISO 4063

Spojenie je vytvorené pritlačením dvoch kovových povrchov k sebe pomocou kliešti, respektíve medených elektród a krátkym prechodom elektrického prúdu o vysokej intenzite cez materiál v mieste budúceho zvaru, vid' obr. 5. Vysokou prítlačnou silou na plochu a energiou z elektrického prúdu sa materiál nataví a vznikne tavenina, ktorá po vypnutí prúdu stuhne a materiál zostáva spojený. Veľkosť zvaru závisí na priemere elektródy. Opatrením špičiek elektród nepočítame so 100 % spoľahlivosťou kvality zvarov v sériovej výrobe. Kvôli tomuto je vytvorený harmonogram preventívnej výmeny špičiek elektród a u aplikácií je zabudovaná spätná väzba hodnotiaca proces s automatickým nastavením procesných parametrov.



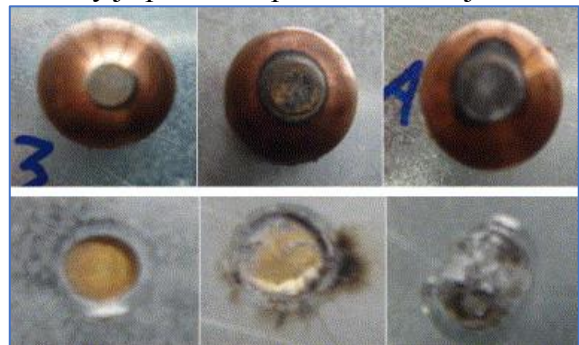
Obr. 5 Odporové bodové zváranie [142]



Obr. 6 Zariadenie pre bodové zváranie od firmy ABB [143]

Nevýhoda spočíva s degradáciou materiálu elektród, ktorá je najviac viditeľná pri zváraní plechov s povrchovou vrstvou zinku. Ten sa spája s povrchom elektródy, kde vytvára malú vrstvu mosadze, na ktorej je ešte uchytený zinok a jeho oxidy. To zapríčiňuje zlé tepelné vlastnosti, znižuje sa teplota tavenia materiálu a ulpievaním materiálu degradujú špičky elektród zvaracej pištole, vid' obr. 7.

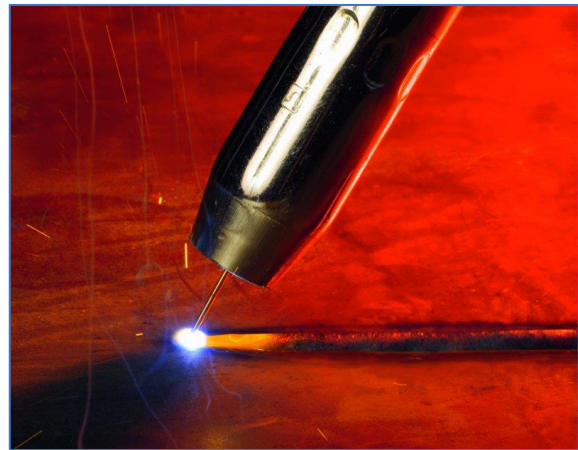
V mieste kontaktu s materiálom sa postupne zvyšuje dotyková plocha a klesá hustota dodanej energie, čo vyžaduje väčšiu spotrebu elektrickej energie a dlhšie operačné časy. Zároveň klesá výsledná kvalita zvarového spojenia. Takto poškodené elektródy je nutné frézovať alebo úplne vymeniť.



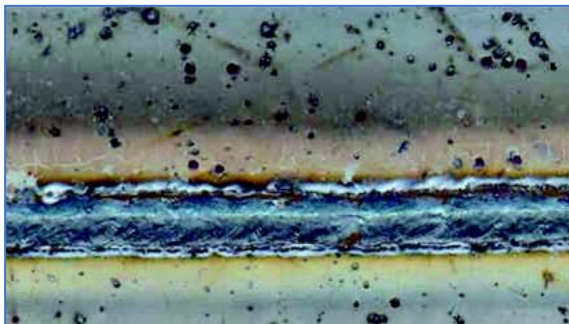
Obr. 7 Degradácia špičky elektródy [12]

- MAG zváranie – metóda 135 podľa ČSN EN ISO 4063

Metal Active Gas, v slovenčine zváranie taviacou sa elektródou v ochrannej atmosfére aktívneho plynu. Oblúk sa zapáľuje dotykom so základným materiálom po veľmi krátku dobu, vid' obr. 8, za ktorú sa koniec elektródy ohreje na vysokú teplotu dostatočnú pre termoemisiu elektrónov a následnú ionizáciu atmosféry. Oddialením elektródy sa rozvinie elektrický oblúk a začne sa natavovať elektróda vo forme drôtu, ktorý je zároveň prídavný materiál. Celý proces prebieha v ochrannej atmosfére plynu, ktorý sa zúčastňuje zvárania a zároveň chráni zvar pred okolitou atmosférou. Ako plyn sa využíva čistý CO<sub>2</sub> alebo v kombinácii s zmesou Ar a O<sub>2</sub>, najčastejšie CO<sub>2</sub> + 18 % Ar. Ochrannému plynu odpovedá aj chemické zloženie prídavného materiálu.



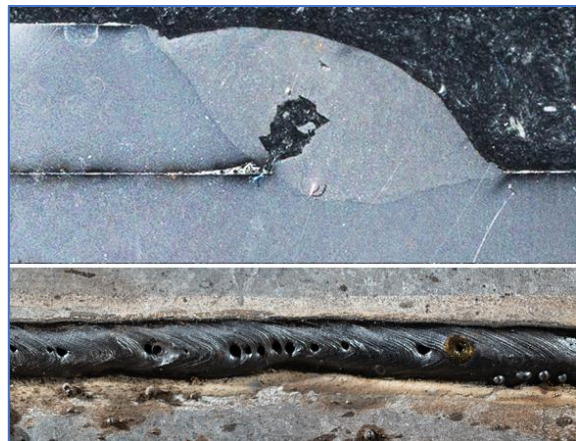
*Obr. 8 Zváranie MAG [141]*



*Obr. 9 Rozstrieknutie kovu pri MAG zváraní pozinkovaných plechov [13]*

S negatívami pri zváraní pozinkovaných plechov u metódy MAG sa môžeme stretnúť už na počiatku zapálenia oblúka, ktorým sa započne vyparovanie zinkového povlaku. Tlak zinkových pár nepriaznivo pôsobí na elektrický oblúk, ktorý je vytlačovaný a vyhľadáva miesto s najnižším elektrickým odporom na materiáli. S jeho meniacou dĺžkou sa mení aj veľkosť napätia a narúša stabilita. Vynesením elektrického oblúka mimo osu môže dôjsť až k jeho zhasnutiu. Zinkové výpary majú nepriaznivý vplyv aj na ochranný plyn, kde dochádza k ich kolízií, čo prispieva k nestabilite procesu zvárania a ohrození dostatočnej ochrany materiálu. Vráťane týchto negatív svojim tlakom pôsobia na roztavený kov, ktorému čiastočne zabraňujú v pridaní do zvarového kúpeľa a ktorý je z neho vymrštený do okolia zvaru. Spôsobuje to rozstrieknutie taveniny viditeľné na obr. 9 a zároveň pri rýchlom tuhnutí vedie k pórovitosti zvaru, vid' obr. 10. Tá znižuje mechanické vlastnosti zvaru až na neprijateľnú kvalitu. Týmto problémom je možné zabrániť vhodne situovanou medzerou medzi plechmi, ktorá by umožnila rýchly unik zinkových výparov mimo oblasť zvárania.

Výhody tejto metódy spočívajú v možnosti zvárania širokého spektra ocelí, od nelegovanej až po vysokolegovanú oceľ, s prídavným materiálom a zároveň vo veľkej rýchlosti značiac vysokú produktivitu. Je adaptabilná, vhodná pre zváranie vo všetkých polohách. Je s ňou možné zvärať v manuálnom, ako aj v poloautomatickom a plne automatickom režime.



*Obr. 10 Pórovitosť pri zváraní metódou MAG pozinkovaných plechov [144], [145]*

- MIG spájkovanie

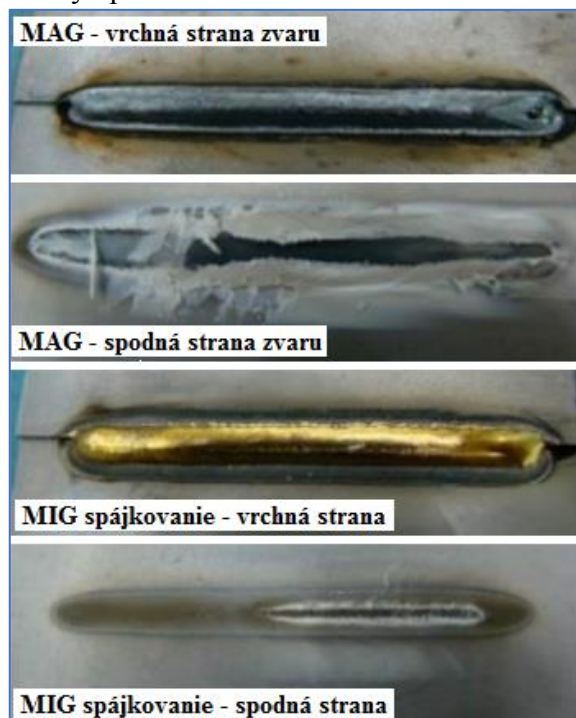
Jedná sa o tvrdé spájkovanie, u ktorého je elektrickým oblúkom natahovovaný iba prídavný materiál vo forme drôtu, vid' obr. 11. Oblúk horí medzi ním a základným materiálom, ktorý zostáva nenatavený a to je hlavný rozdiel oproti MIG zvaraniu. Prídavný materiál býva väčšinou zo zliatin na báze medi a chemických prvkov vylepšujúcich vlastnosti spájky, ako sú hliník, cín, zinok, kremík, mangán a iné prvky. Medzi najčastejšie používané materiály patrí  $\text{CuSi}_3$ ,  $\text{CuAl}_8$  a  $\text{CuSn}_6$ . Teplota tavenia týchto zliatin závisí na ich



*Obr. 11 Spájkovanie metódou MIG B-stĺpika vozidla Honda Accord [146]*

zložení a je zásadne nižšia než teplota tavenia ocelí, ale zároveň vyššia, než je teplota tavenia zinku a jeho zliatin využívaných pre ochranné povrchové vrstvy. Celý proces spájkovania prebieha pod ochrannou atmosférou inertného plynu, ktorý môže byť zložený iba z čistého argónu alebo s prímiesami  $\text{CO}_2$  a  $\text{O}_2$ , ktoré majú v konečnom hľadisku pozitívny efekt na celý proces. Obidve prímiesi zlepšujú stabilitu oblúka a znižujú povrchové napätie na materiáli pre lepšiu prenos spájky. Použitím malého množstva kyslíku však hrozí vznik oxidov medi vylučujúcich sa na hranici zrn, čo môže znamenať následný vznik trhlin. Tento jav je potlačený pomocou prvkov cínu a kremíka, ktoré majú vysoký dezoxidačný potenciál a výsledok sa prejaví iba po estetickú stránku v sfarbení spoja, ktoré je v konečnom dôsledku úplne zanedbateľné. Výhoda celej metódy spočíva vo vnesení malého množstva

teploty, ktorou sa obmedzuje vyparovanie zinku, ktoré je i napriek tomu prítomné počas procesu. Za krátky čas sa nestihne vypariť množstvo zinku, ktoré by ohrozilo koróznou odolnosť povrchu a po premiesení zinku s meďou získavame mosadz, ktorá je taktiež odolná voči korózií, i keď v inej miere než je čistá meď alebo zinok. Rozdiel medzi spojením plechov pomocou zvarania MAG metódou a MIG spájkovaním je možné vidieť na obr. 12. Na vrchnej strane po spojení plechov zvaraním zostáva spoj bez ochrannej protikoróznej vrstvy, zatiaľ čo spájka je zo zliatiny odolnej voči korózií. Zároveň je viditeľný rozdiel vplyvu vneseného tepla na zostatok vrstvy zinku. Pevnosť výsledného spojenia je dostatočná a vďaka nízkemu vnesenému teplu získavame úzku tepelne ovplyvnenú oblasť a malé deformácie základného materiálu. Túto metódu je možné aplikovať na kútové, tupé a preplátované spoje.



*Obr. 12 Rozdiel medzi MAG zvaraním a MIG spájkovaním [22]*

Nevýhoda spájkovania metódou MIG spočíva v hrúbke povrchovej vrstvy zinku, ktorá keď prekročí hodnotu  $15 \mu\text{m}$ , môže zapríčiniť nestabilitu elektrického oblúka, vznik pórov a znížiť kvalitu výsledného spojenia materiálov. Nesprávnym nastavením procesu, respektíve dodaním nízkeho množstva vneseného tepla hrozí vznik studených spojov.

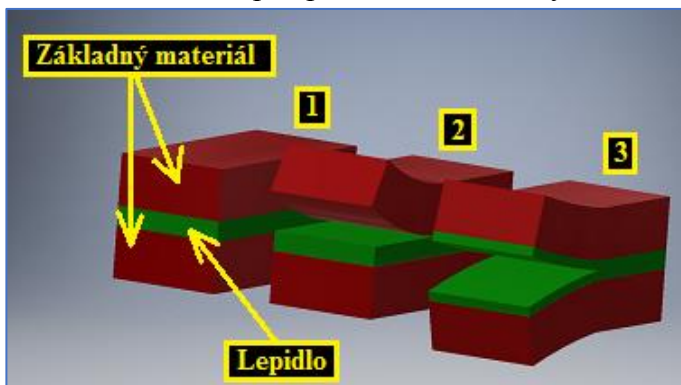
- Lepenie

Nekonvenčná technológia spájania, ktorá je založená na trvalom spojení plôch materiálov pomocou lepidla. Jedná sa o látku, na prírodnej alebo syntetickej báze, schopnú vytvoriť trvalý pevný spoj dvoch materiálov na základe adhézie, čo je príľnavosť lepidla k materiálu a kohézie znamenajúcej súdržnosť samotného lepidla. Pevnosť spoja okrem vyššie vymenovaných závisí aj na zmáčavosti a pevnosti lepeného povrchu. Adhézia je závislá z mechanickej stránky na zachytení lepidla medzi



Obr. 13 Nanášanie lepidla na karosériu [19]

nerovnosťami lepených materiálov, ktorá sa zanedbáva u leštených povrchov, a taktiež z špecifickej stránky na chemických a fyzikálnych silách ako sú van der Waalsové sily, difúzne sily apod. Tuhnutie lepeného spoja prebieha vyparením rozpúšťadiel alebo u reaktívnych lepidiel externým podnetom. Ten môže byť vplyvom vlhkosti, zamedzením prístupu vzduchu, pridaním tužidiel, svetlom, UV žiarením alebo zvýšenou teplotou, ktorá je v automobilovom priemysle rozšírená. Dochádza k nej pri lakovaní karosérie vozidla, kedy sa farba necháva vypaľovať. Pred samotným nanosením lepidla je potrebné lepený povrch očistiť a odmastiť s cieľom maximalizovať adhéziu. Táto úprava prebieha podľa technologického postupu, ktorý sa striktnie riadi predpismi výrobcu používaného lepidla. Výhody zvolenej technológie začínajú u vysokej pevnosti spoja, schopnosti spájať rôzne druhy kovových i nekovových materiálov, s rovnakým alebo rozdielnym zložením a odolávať korózií. Výsledné lepené spoje majú vrátane spojenia pozitívny vplyv aj na elektrické, tepelné, izolačné, vibračné vlastnosti a tuhosť celej karosérie vozidla. Vo veľkej miere sú využívané kaučukové a epoxidové lepidla. U kaučukových lepidiel využívame ich tlmiace vlastnosti pre pohltie vzniknutých vibrácií a sú taktiež aplikované pre miesta



1 - Lepený spoj, 2 - Adhézny lom, 3 - Kohézny lom

Obr. 14 Adhézny a kohézny lom

s zníženou koróznou odolnosťou ako napríklad rezné hrany plechových dielov, vid' obr. 13. Epoxidové lepidla vynikajú vysokou pevnosťou a sú využívané na spevnenie s zvýšením tuhosti karosérie s možnosťou aplikácie i na mastné povrchy. Medzi možné typy spojov, ktoré je možné vytvoriť lepením, patrí tupý, šikmý, preplátavaný, dvojité preplátavaný, vystužený pásikom a dvojito vystužený pásikom. S množstvom

výhod je lepenie známe i svojimi nevýhodami. Tie sú spojené s mnohokrát vysokými požiadavkami na prípravu lepených plôch, okolitými podmienkami prostredia ako je teplota a vlhkosť na pracovisku, správnu maximálnou hrúbkou vrstvy a množstvom lepidla, apod. Nedodržaním správnej technológie alebo predpisov od výrobcu lepidla môže dôjsť k porušeniu spoja, lomu, vid' obr. 14. Z oblasti adhézie je to adhézny lom, u kohézie ide o kohézny lomom. Vrátnane bežných technologických skúšok je nutné testovať spojenia i laboratórne na možné vplyvy prostredia počas životnosti a funkcie lepeného spoja. Medzi negatíva je vhodné považovať i absenciu univerzálnosti lepidla, ktoré sa líši zložením pre rôzne kombinácie spájaných materiálov.

- Laserové zváranie – metóda 52 podľa ČSN EN ISO 4063



*Obr. 15 Zváranie laserom [148]*

Využitie laserového lúča pre spájanie materiálov ma veľký rád výhod a mnoho možnosti použitia vrátane kombinácie, súčasne s inými metódami. Jeho použitie v priemysle nie je nič neobvyklé a radí sa medzi štandardné technológie, ak je kladený veľký dôraz na efektívnosť a presnosť výroby. Zváranie, respektíve natavenie materiálov, prebieha absorpciou energie z laserového lúča s použitím ochranného plynu, ktorý zabraňuje prístupu okolitej atmosféry k natavenému kovu. Vďaka vysokej hustote

energie lúča na malý obsah plochy a rýchlosti posuvu, je počas zvárania vnesená značne nízka hodnota tepla do oblasti zvaru v porovnaní s ostatnými metódami, čo má veľmi pozitívne účinky na ovplyvnenie chemických a mechanických vlastností okolitého materiálu. Jedná sa o bezkontaktnú metódu, vid' obr. 15, ktorá ešte navyše vyniká oproti

ostatným, pri zvolení skenerového zvárania, označovaného aj ako „Remote welding“. Je známe použitím optickej sústavy, ktorá vychyluje a zároveň zaostruje laserový lúč v trojrozmernom priestore s možnosťou posuvu zváracej hlavy, ktorá je uchytená na robotické rameno, vid' obr. 16. Výsledok sa dostavuje v flexibilita a znížení medzioperačných časov, respektíve pozitívnemu dopadu na výrobnú cenu. S laserom je možné zvärať materiály hrúbky začínajúcej

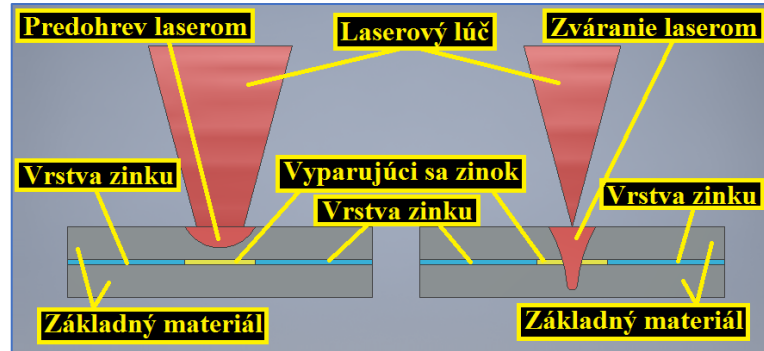


*Obr. 16 Skenerové zváranie laserom [147]*

od desiatín milimetra až po viac ako desať milimetrov, od nelegovaných až po vysokolegované ocele, kovy s vysokou teplotou tavenia alebo s vysokou teplotnou vodivosťou a polymérové materiály. Prekážkou nie je ani zložitá trajektória zvaru. Tak ako u oblúkových metód má i laser možnosť zvárania s prídavným materiálom. V kombinácii s ním vo forme drôtu dokážeme vyplňať chýbajúci objem materiálu, modifikovať zloženie v mieste zvaru použitím kovu alebo zliatiny s rozdielnymi charakteristikami ako má základný materiál. Medzi nevýhodné vlastnosti, plynúce zo zvárania laserom, patrí zvýšené riziko nekvalitného spojenia, týkajúce sa hlavne komponentov s povrchovou vrstvou zinku a jeho vyparovania alebo pri väčšej hrúbke materiálu, u ktorej dochádza k rýchlemu ochladeniu miesta zvaru. Je nutné klásť vysoký dôraz na prípravky pre zváranie a kvalitu predpripraveného miesta pre budúci zvar. Nevýhodnou vlastnosťou môžu byť aj počiatočné náklady spojené s obstaraním zariadenia vrátane nadstavieb, ktoré podľa mňa nemusia byť viditeľným záporom pri strednej a až veľkosériovej výrobe.



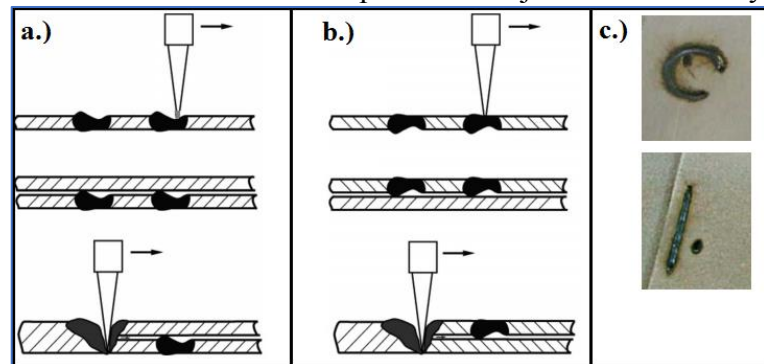
Pri zváraní pozinkovaných plechov existuje variant s dvojitým prechodom laseru, zobrazeným na obr. 17. Znamená to, že prvým prechodom laseru po trajektórii budúceho zvaru je ohnisko zaostrené vysoko nad oceľový plech, čím je znížená hustota energie dopadajúca na materiál. Zvolením správnej kombinácie výkonu, rýchlosti



Obr. 17 Dvojprechodné zváranie pozinkovaného plechu laserom [31]

posunu a polohy ohniska sa materiál ohreje na dostatočnú teplotu, pri ktorej sa vrstva zinku odparí. Druhým prechodom trajektóriou laserom s nastavením pre zváranie je materiál zvarovaný.

Ďalšou variantou je laser dimpling mechanism, ktorý v preklade znamená vytváranie vyvýšení na povrchu ocele pomocou natavenia materiálu laserom. Takto vytvorené vyvýšeniny udržiavajú medzeru medzi plechmi, cez ktorú unikajú zinkové výpary bez toho, aby prenikali do nataveného materiálu a vytvárali vady zvaru. Aby vznikla dostatočne veľká medzera pre odvod výparov, tak výška vyvýšenín sa pohybuje od

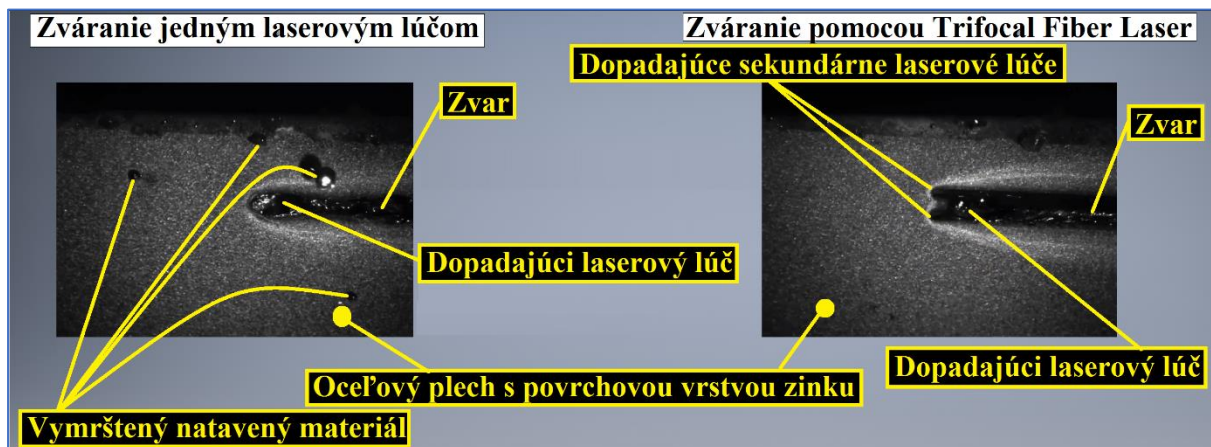


- a.) Vytváranie vyvýšeniny z vrchnej strany
- b.) Vytváranie vyvýšeniny z spodnej strany
- c.) Kruhový a lineárny zvar

Obr. 18 Laser dimpling mechanism [32]

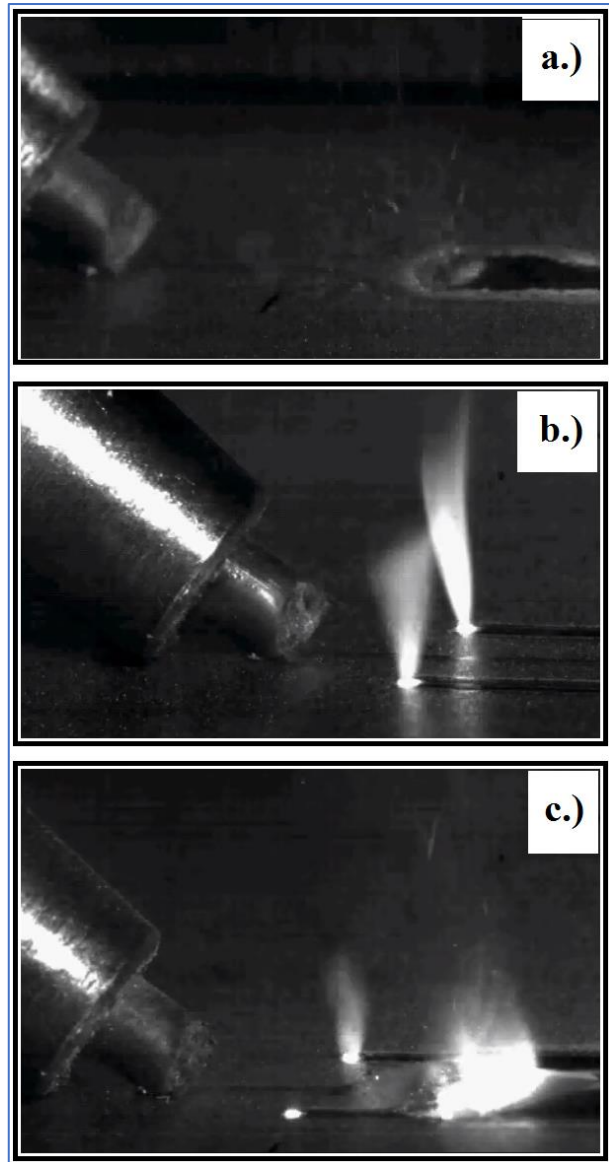
0,1 do 0,2 mm a závisí od nastavenia výkonu laseru, respektíve hustoty energie v laserovom lúči a jeho móde, rýchlosti posunu a na hrúbke zváraného materiálu. Po zasiahnutí materiálu a absorpcií laserového lúča vzniká keyhole, ktorú obopína prúd roztaveného kovu a v protismere pohybu zostáva nahromadený roztavený materiál, ktorý po stuhnutí vytvorí potrebnú vyvýšeninu. Záležiac od daného nastavenia laseru je ich možné vytvárať nielen z vrchnej ale aj z spodnej strany materiálu a taktiež umožňuje vytváranie kruhových zvarov nahradzujúcich bodové zváranie, viď obr. 18.

Tretou variantou, určenou nielen pre zváranie ocele ale aj spájkovanie, je kombinácia viacerých laserových lúčov. Primárny lúč z nich je určený pre zváranie alebo spájkovanie ocele, zvyšné – sekundárne lúče slúžia na predohrev materiálu alebo odstránenie povrchových vrstiev



Obr. 19 Rozdiel medzi zváraním pozinkovaného plechu laserom a vláknovým Trifocal laserom [33], [159]

a nečistôt. Firma IPG photonics prišla na trh s vláknovým laserom, pod obchodným názvom Trifocal Fiber Laser, ktorý je zložený z viacerých modulov generujúcich laserové žiarenie. Až na dve moduly sú lúče z všetkých ostatných spojené pomocou multimódovej spojky do jedného – primárneho. Zvyšné dva moduly generujú laserové žiarenie, ktoré je separátne privedené k zváracej hlave a plnia vyššie spomínanú sekundárnu funkciu. Vedenie laserového žiarenia je zabezpečené tromi optickými vláknami zakomponovanými do jedného káblu. Pomocou optickej sústavy sú zaostrené a predsadené pred primárny lúč obopínajúc po bokoch trajektóriu budúceho zvaru. Daná kombinácia umožňuje nastaviť výkon a ostatné parametre jednotlivo pre každý lúč. Ich výkon je zásadne nižší než u primárneho ale pre svoj účel postačujúci. Na obr. 19 sú vytvorené snímky zo zvárania ocelových plechov s povrchovou vrstvou zinku, kde na ľavej strane je aplikovaný jeden lúč ako u bežného zvárania. Zinkové výpary po ich nahromadení a zvýšení tlaku unikajú z medzivrstvy, pričom vymršťujú aj natavenú oceľ. Na pravej strane obr. 19 je snímok z použitia Trifocal Fiber Laser, kde sekundárne lúče stíhajú odstrániť vrstvy zinku a primárny laserový lúč zvara ocelové plechy. Jednotlivé pôsobenie lúčov je zobrazené na obr. 20.



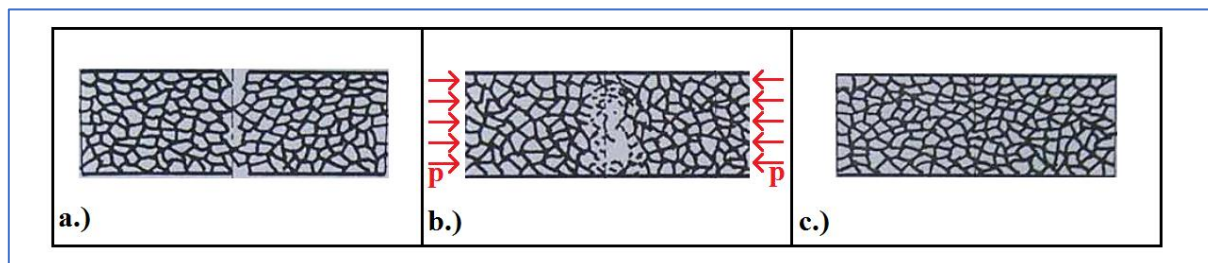
- a.) Primárny laserový lúč  $P=1500\text{ W}$   
 b.) Sekundárne laserové lúče  $P= 2\cdot 150\text{ W}$   
 c.) Primárny lúč kombinovaný so sekundárnymi  
 $P=1500\text{ W} + 2\cdot 150\text{ W}$

**Obr. 20** Rozdelenie jednotlivých lúčov Trifocal laseru  
 [159]

Zo všetkých vymenovaných metód si volím zváranie laserom pre jeho pozitívne vlastnosti, ktorým sa podrobne budem venovať v nasledujúcich kapitolách a ktoré prevažujú nad tými negatívnymi. Tie budú ešte viac potlačené použitím doplnujúceho zdroja tepla, u ktorého je uprednostnený elektrický oblúk TIG. Ten je ešte možné nahradiť vyššie spomínanou metódou založenou na predohrevu pomocou sekundárneho laserového lúča, ktorá je ale omnoho zložitejšia v nastavení a počiatočnou cenou prevyšuje vstupné náklady oproti TIG. Elektrický oblúk tak bude laseru sekundovať v odstránení povrchovej vrstvy zinku a s tým spojených zvarových vád. Ich kombinácia je známa pod označením Laser-TIG alebo LasTIG.

## 2 ROZBOR TECHNOLOGIE ZVÁRANIA [28], [36], [37], [38], [39], [40]

Zváranie, kovov a ich zliatin, je nerozoberateľné spojenie, ktoré nastáva pôsobením medziatomových síl a väzieb na plochách aktivovaných teplom alebo tlakom, ktoré sú počas zvárania v plastickom alebo roztavenom stave. K zvareniu dvoch materiálov je potrebné súčasné alebo jednotlivé pôsobenie tepla a tlaku, s možnosťou voľby zvärať s prídavným materiálom, alebo bez neho, ktorý môže mať rovnaké alebo podobné zloženie ako základný materiál.



- a.) Opracované povrchy jednotlivých materiálov priložené k sebe  
b.) Vzniknutá plastická deformácia materiálu pomocou tlaku a stlačenie výstupkov  
c.) Výsledný stav po difúzii, rekryštalizácii a prekryštalizácii kovu v mieste vzniku zvaru

**Obr. 21** Schéma spojenia a zvarenia dvoch povrchov plastických kovových telies v tuhom stave [28]

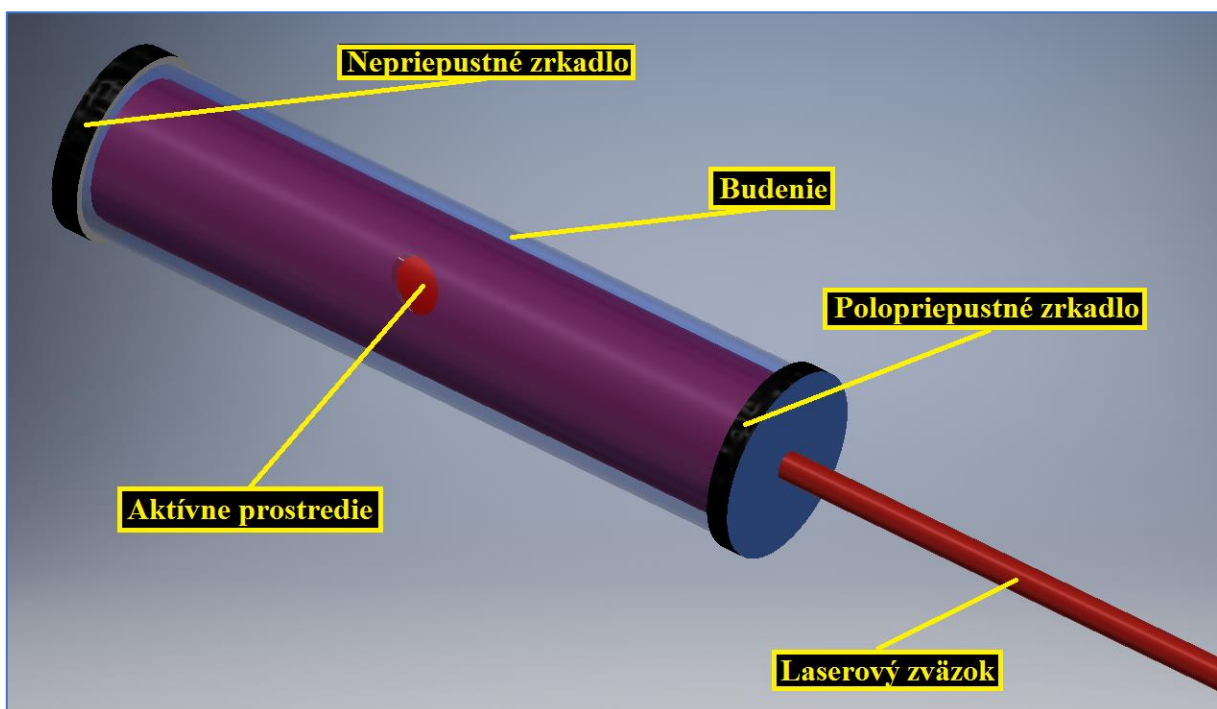
Na obr. 21 sú zobrazené jednotlivé fázy zvárania, ktoré začína priblížením zváraných plôch na veľmi krátku vzdialenosť a pôsobením sily dôjde k stlačeniu výstupkov na povrchu a začne prebiehať lokálna plastická deformácia. Dodaním aktivačnej energie sa prekonajú bariéry potenciálnej energie sústavy atómov na povrchových vrstvách a sprevádzajúcimi difúznymi procesmi sa premiešajú častice za vzniku nových zŕn a zániku stykovej plochy. Všetky bežné metódy zvárania je možné rozdeliť na dve skupiny, na tavné alebo tlakové. U tavnej dochádza prívodom tepla k nataveniu materiálu. U tlakovej pôsobením síl vznikajú mikro a makro deformácie, ktoré priblížia spojované povrchy na vzdialenosť pôsobenia medziatomových síl, čím vznikne spoj. Spojenie materiálov vytvorené zvarom sa javí výhodné po stránke pevnosti, tesniacich vlastností a trvanlivosti spoja. Taktiež je to možnosť ako pomocou jednoduchých komponentov vytvoriť celú konštrukciu, zariadenie, ktoré sa môže líšiť materiálými vlastnosťami a charakteristikami ako je napríklad pevnosť použitých ocelí a zároveň ušetriť potrebný objem aj zložité technologické požiadavky s postupmi. Nevýhodou tejto technológie je nerozoberateľné spojenie a pri zvolení nesprávneho technologického postupu môžu nastať neprijateľné zmeny v materiálových vlastnostiach, vznik prnutí, deformácií a väd vedúcich až k porušeniu spojenia.

K zvareniu ocelí je potrebné, aby bola dodržaná zvärateľnosť ako jednotlivých vstupujúcich materiálov, tak ich kombináciami. To je podmienené u tavnej zvärateľnosti chemickým zložením, spôsobom výroby, tepelným spracovaním, hrúbkou materiálu, a taktiež má vplyv technológia a proces zvárania, návrh zvaru, prostredie a poloha zvárania i spôsob namáhania zvaru. Správna voľba technológie a nastavenie zväracích parametrov závisí od ARA a IRA diagramov zváraných ocelí, a normami, ktoré sa odvolávajú na normu ISO/TR 18608. Zváranie ocele u oblúkových metód sa riadi normami ČSN EN 1011-1, ČSN EN 1011-2 a ČSN EN 1011-3, u zvárania ocele laserom je to podľa normy ČSN EN 1011-6. Pre zjednodušenie posúdenia zvärateľnosti ocele u oblúkových metód je možné využiť uhlíkový ekvivalent, ktorý je tzv. ukazovateľom zvärateľnosti vplyvom chemického zloženia. Čím sú hodnoty  $C_e$  a CET väčšie, tým je horšia zvärateľnosť danej ocele, potreba zaradiť do procesu zvárania predohrev alebo ohrev po zváraní. U laserového zvárania je proces ohrevu a ochladzovania omnoho rýchlejší než pri oblúkovom zváraní, čo vedie ku korekciám zásad pri použití uhlíkového ekvivalentu. Jednotlivé rozdelenie metód je dané normou ČSN EN ISO 4063.

## 2.1 Zváranie laserom [41]

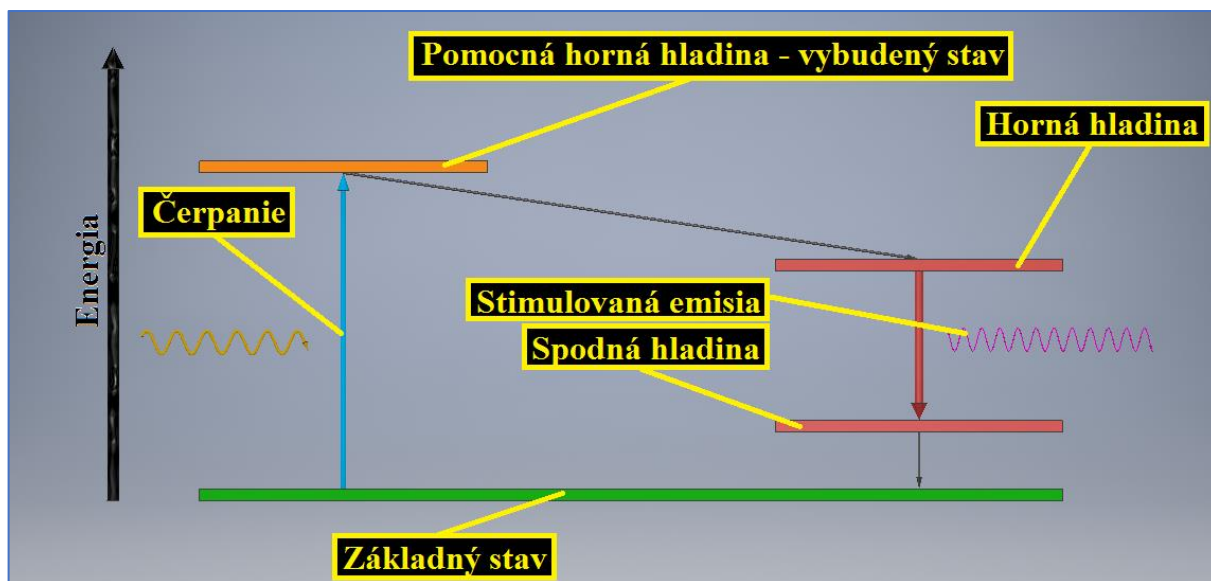
Laser je slovo zložené z prvých písmen slovného spojenia Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, v preklade do slovenčiny zosilnenie svetla stimulovanou emisiou žiarenia. Pri slove laser si predstavujeme v dnešnom svete zariadenie, ktoré vyžaruje tenký lúč svetla, ktorý je využívaný v technologickom priemysle a medicíne, a laik si spojí s ním možnosť deliť materiály, alebo potenciálne nebezpečenstvo pre organizmus. Nachádza využitie v širokom spektre aplikácií od zábavného priemyslu, cez operačné zákroky v medicíne, meracie prístroje a priemyselné technológie. V priemysle si s ním spojíme najčastejšie delenie (rezanie) materiálov pomocou laseru, ale taktiež pomocou neho nerozoberateľne spájame materiály zváraním, spájkovaním, gravírujeme povrchy, vrtáme, kalíme ocele a meriame vzdialenosti s vysokou presnosťou. Pri zváraní je využitý pre spojenie dvoch materiálov do jedného celku, prípadne pomocou prídavného materiálu navarujeme vrstvu po vrstve na základný materiál.

### 2.1.1 Laser [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47]



Obr. 22 Všeobecná schéma laseru [41]

Laser alebo správne označenie laserové zariadenie, je prístroj, ktorého funkcia spočíva v zosilnení elektromagnetického žiarenia pomocou stimulovanej emisie žiarenia. Zjednodušene sa skladá z aktívneho prostredia, ktoré je budené a dvoch zrkadiel, respektíve odrazových plôch, ktoré slúžia ako rezonátor, vid' obr. 22. Zrkadlo na zadnej strane dosahuje plnej odraziteľnosti svetla a na prednej strane je inštalované polopriepustné zrkadlo, ktoré prepúšťa žiarenie v podobe svetelného zväzku po dosiahnutí kontinuálnej svetelnej vlny. Pre funkciu pulzného režimu je do rezonančného obvodu pred polopriepustné zrkadlo vložený optický spínač, označovaný ako Q-switch, pracujúci na vysokej frekvencii. Výsledné žiarenie vystupujúce z laseru je vo forme úzkeho zväzku kolimované, koherentné a monochromatické s možnosťou ho zaostriť do veľmi malého bodu. Prvý funkčný laser skonštruoval vedec Theodore Maiman v lete roku 1960. Budenie (absorpcia) je dej, ktorý spočíva vo vybudení atómu v aktívnom prostredí na vyššiu energetickú hladinu z hladiny základného stavu. Energia môže byť dodaná pomocou optického žiarenia, elektrickým poľom, výbojom, chemickou reakciou, elektrónovým zväzkom, tepelnou zmenou alebo injektovaním nosičov náboja.

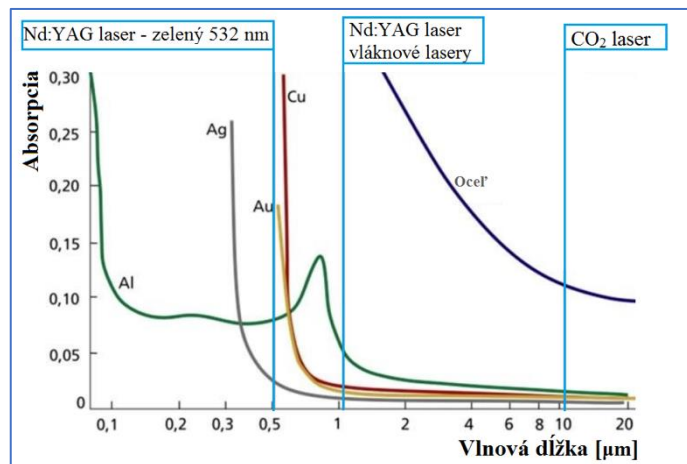


Obr. 23 Stimulovaná emisia v energetických hladinách [42]

Stimulovaná emisia prebieha nárazom fotónu do takto vybudeneho atómu, ktorý znižuje energiu do základného stavu s tým, že pri prechode atóm vylúči ďalší fotón, pričom zachová koherentné žiarenie. Predpovedaná bola už v roku 1917 Albertom Einsteinom, pozorovaná až 1928 vedcami Rudolfom Ladenburgom a Hansom Kopfermannom. Štartérom stimulovanej emisie býva spontánna emisia. Spontánna emisia prebieha samovoľne a znamená, že časť vybudených elektrónov sa vráti do základného stavu a vybudí fotóny narážajúce do susediacich vybudených elektrónov. Pre dosiahnutie populačnej inverzie, aby sa zosilnilo elektromagnetické žiarenie, je potrebné, aby prebehlo viac dejov stimulovanej emisie než absorpcie, na ktorú sa spotrebúva energia vo forme fotónov. Za normálnych podmienok prebieha viac absorpčných dejov, než stimulovanej emisie, čo značí, že elektromagnetické žiarenie sa oslabuje prechodom hmotným prostredím. Pri 2-hladinovom systéme u využitia fotónu by sme dosiahli maximálne rovnakého počtu absorpčných dejov a stimulovaných emisií, ktoré nám neumožňuje potrebné využiť daný systém. Takýto systém nachádza využitie u pulzného režimu v mikrovlnnej oblasti. K zosilneniu je nutné dosiahnuť viac energetických hladín, 3 až 4 hladiny. Pri 3-hladinovom systéme absorbovaním energie vybudíme atómy na vyššiu energetickú hladinu. Populačná inverzia nastane, ak atómy dosiahnu vysokú pravdepodobnosť prechodu na nižšiu energetickú hladinu, pri ktorej vôbec nemusí byť vylúčený fotón. Fotón bude vylúčený až pri prechode z nižšej energetickej úrovne na základnú energetickú úroveň s rozdielnou frekvenciou žiarenia, než bola počiatočná. Pri 4-hladinovom systéme zobrazenom na obr. 23, podobne ako u 3-hladinového systému, absorbovaním energie vybudíme atómy na vyššiu energetickú hladinu, odkiaľ rýchlym spontánnym prechodom prechádzajú atómy na nižšiu metastabilnú energetickú hladinu bez vylúčenia fotónu. Z tejto hladiny pomocou stimulovanej emisie prechádza atóm na nižšiu energetickú hladinu, kedy je vylúčený fotón, avšak nie úplne na základnú energetickú úroveň. Na základnú energetickú úroveň sa dostáva neskôr, no bez vyžiarovania fotónu. V priemysle, kvôli ekonomickej stránke, široké zastúpenie tvoria lasery pracujúce na 4-hladinovom systéme.

### 2.1.2 Absorpcia a vlnová dĺžka žiarenia [48], [49], [50], [51]

Možnosť absorpcie svetla, respektíve elektromagnetického žiarenia závisí na schopnosti materiálu zvýšiť svoju energiu o energiu dopadajúceho fotónu a môže sa prejavovať vyššie spomenutou emisiou žiarenia, premenou na kinetickú energiu spôsobujúcu zvýšenie teploty v materiáli alebo odrazom žiarenia bez jeho pohltienia, čo je podmienené absorpčným koeficientom. Ten závisí od stavu materiálu, jeho chemického zloženia, vid' obr. 24, teploty, druhu a štruktúry povrchu, vlnovej dĺžke

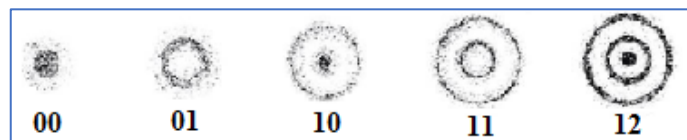


Obr. 24 Závislosť absorpcie na vlnovej dĺžke [157]

žiarenia a jeho kolmosti dopadu na daný materiál. Absorpcia predstavuje dôležitú vlastnosť pre efektívne využitie laserové lúča, čím je vyššia, tým je potrebný nižší výkon laseru.

### 2.1.3 Tvar prierezu laserového lúča [52]

Označovaný aj ako TEM, je stacionárne rozloženie intenzity elektromagnetického žiarenia. Je závislé na rezonančnom obvode, respektíve na geometrii aktívneho prostredia a zrkadiel. Na obr. 25 sú zobrazené niektoré módy, pre hustotu energie sú najčastejšie využívané TEM<sub>00</sub> a TEM<sub>01</sub>.



Obr. 25 TEM módy [52]

### 2.1.4 Rozdelenie laserov [46], [48]

Existuje mnoho typov laserov používaných v priemysle, z ktorých každý má iné vlastnosti nielen po konštrukčnej stránke, ale aj z hľadiska využitia. Delíme ich do niekoľko kategórií, z ktorých najčastejšie sú:

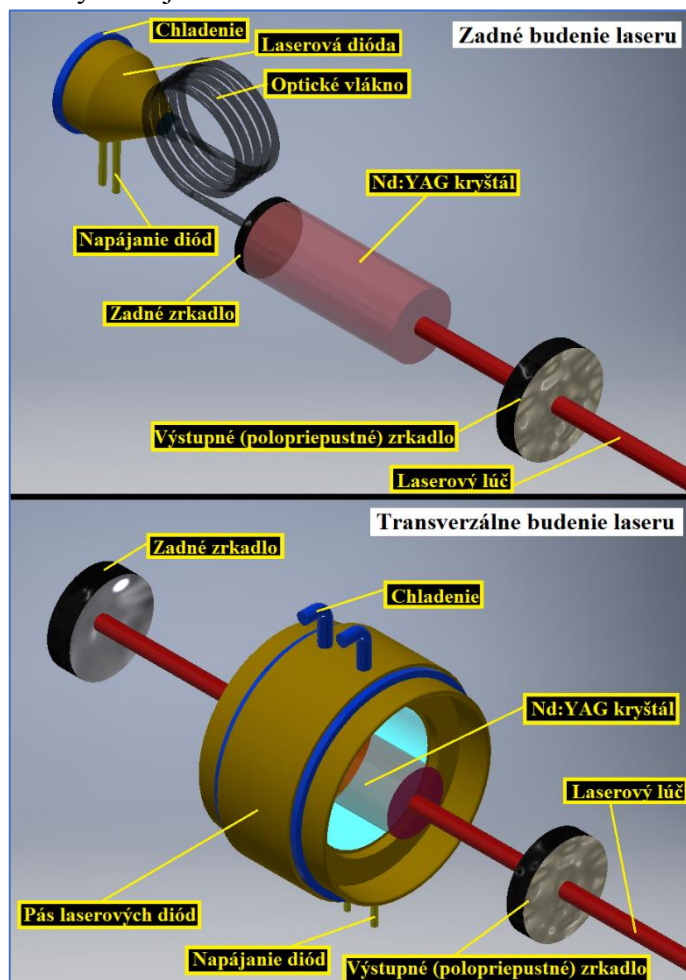
- Podľa aktívneho prostredia:
  - Pevnolátkové
    - Nd:YAG
    - Diskový laser
    - Vláknový laser
    - Polovodičový laser
  - Plynové
    - CO2 laser
  - Kvapalinové
  - Plazmatické
- Podľa vlnovej dĺžky:
  - Infračervené
    - od 780 nm do 15 μm
  - Okom viditeľné svetlo
    - od 360 nm do 780 nm
  - Ultrafialové
    - od 10 nm do 360 nm
  - Röntgenové
    - od 1 pm do 10 nm
- Podľa režimu práce:
  - Kontinuálne (CW) - laser pracuje bez prerušenia toku elektromagnetického koherentného žiarenia a výkon je ustálený na priemernej hodnote od zapnutia až po samotné vypnutie toku
  - Pulzné (PW) - laser pracuje v režime krátkych pulzov, ale s vysokou frekvenciou výstrelov
  - Impulzné (QS) - laser dosahuje vysokej energie počas pulzu, ale s nízkou frekvenciou výstrelov

### 2.1.5 Pevnolátkové lasery [28], [46], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78]

Aktívne prostredie tvorí pevná, opticky priepustná látka, z umelo vytvoreného kryštálu (rubín -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , YAG -  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{YVO}_4$ ) dopovaného iónmi zo vzácnych zemín - lantanoidmi (Nd, Cr, Yb, Er, Tm alebo Ho), alebo tvorená zo skla. Energia potrebná pre budenie je získavaná pomocou fotónov emitovaných z výbojky alebo diód, ktoré prinášajú výrazne vyššiu účinnosť a životnosť (servisnú dobu) oproti výbojkám. Zvýšenie účinnosti je dosiahnuté pomocou čerpanej vlnovej dĺžky, ktorá má hodnotu zodpovedajúcu maximálne možnej absorpcii aktívneho prostredia, ktorá je 808 nanometrov. Pevnolátkové lasery sa delia na tyčové, vláknové a diskové. Zaradujeme sem rubínový laser, Nd:YAG, Cr:YAG, Yb:YAG, Ho:YAG, Er:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub> a Nd:YAP laser.

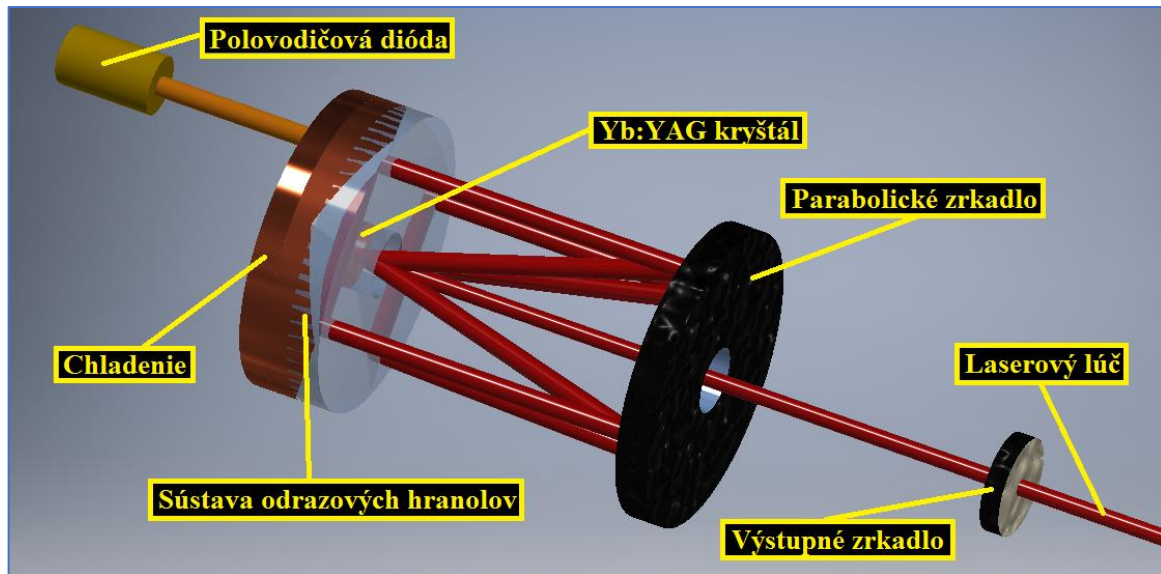
- Nd:YAG Laser

Pevnolátkový, tyčový laser pracujúci na vlnovej dĺžke žiarenia 1064,2 nm. Iné využiteľné vlnové dĺžky 1440, 1320, 1120, 940, 532, 355 a 224 nm je možné dosiahnuť pomocou nelineárnej optiky. Aktívne prostredie laseru tvorí izotropný YAG ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) kryštál dopovaný kationmi neodymia ( $\text{Nd}^{3+}$ ) a výroba tohto kryštálu je veľmi dobre zvládnutá s dosiahnutím vysokej optickej kvality. Na obr. 26 je znázornená schéma konštrukcie Nd:YAG laseru, vrátane variant s zadným a transverzálnym budením. Výhoda zadného budenia spočíva vo vyššej kvalite laserového zväzku a transverzálne je výhodnejšie po stránke vyššej účinnosti. Budenie je zabezpečené polovodičovými diódami, pri ktorých laser dosahuje účinnosti okolo 7 %, ale v rámci transverzálneho budenia je možné diódu nahradiť kryptónovou alebo oblúkovou výbojkou s dosiahnutím maximálnej účinnosti okolo 2 až 3 %. Nd:YAG laser dokáže pracovať v kontinuálnom režime s výkonom maximálne do 6 kW a v pulznom režime s dosiahnutím 10 kW vďaka krátkym pulzom. Nevýhodná nízka účinnosť nesie so sebou veľké množstvo odpadného tepla, ktoré je nutné chladiť kvapalinou, pri nízkych výkonoch do desiatok wattov si zariadenie vystačí s núteným prietokom vzduchu ako chladiacim médiom. S jednoduchosťou konštrukcie tohto typu laseru, pomerne vysokým výkonom a jeho vlnovou dĺžkou nachádza široké využitie pre rezanie a zváranie materiálov. Vedenie laserového lúča je možné zabezpečiť pomocou optického vlákna až na miesto aplikácie. Lepšou variantou je diskový typ laseru, ktorý prináša zvýšenie účinnosti, lepšiu stabilitu a kompaktnjšie rozmery.



Obr. 26 Schéma konštrukcie Nd:YAG laseru, transverzálne (bočné) a zadné budenie laseru [53]

- Diskový laser



*Obr. 27 Schéma konštrukcie diskového laseru [74]*

Diskový laser, zobrazený na obr. 28, pracuje na podobnom princípe ako laser Nd:YAG, zmenou je len aktívne prostredie, ktoré je tvorené diskom namiesto tyče, najčastejšie z kryštálu YAG s kationmi Yterbia (vlnová dĺžka 1030 nm) alebo YVO<sub>4</sub> kryštálom s kationmi neodýmia (vlnová dĺžka 1064 nm). Existujú ešte kombinácie Yb:CaGdAlO<sub>4</sub>, Yb:YVO<sub>4</sub> a iné. Najnovšie sa pracuje na materiáloch ako je Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ktorý dosahuje vysokej účinnosti až 80 %. Proces laseru spočíva vo viacnásobnom budiacom žiarení, ktoré je pomocou odrazových zrkadiel nasmerované na aktívne prostredie, disk, zobrazené na obr. 27. Ten má niekoľko desiatok milimetrov na priemer a výšku len pár desiatín milimetra. Je uchytený na chladiči pre udržanie stálej teploty a ideálneho tvaru, aby sa zabránilo depolarizácii výsledného žiarenia. Celá koncepcia má výrazne pozitívny vplyv na kvalitu zväzku a stabilitu i za stáleho vysokého výkonu s dosiahnutím účinnosti 15 až 20 %. Laser pracuje v kontinuálnom i pulznom režime, kde v dĺžke trvania pulzu 10<sup>-9</sup> až 10<sup>-15</sup> sekúnd vygeneruje žiarenie s vysokou energetickou hodnotou. Maximálny dostupný výkon laseru na trhu, v ohľade na cenu a rozumne zvolené použitie, je viac ako 32 kW pomocou zariadenia zloženého z viacerých diskov, označované ako multimode. Týmto skladaním diskových laserov dostaneme nielen vyšší výkon súčtovo, ale zvýšime i výkon vystupujúci zo samotných diskov. Vďaka jeho

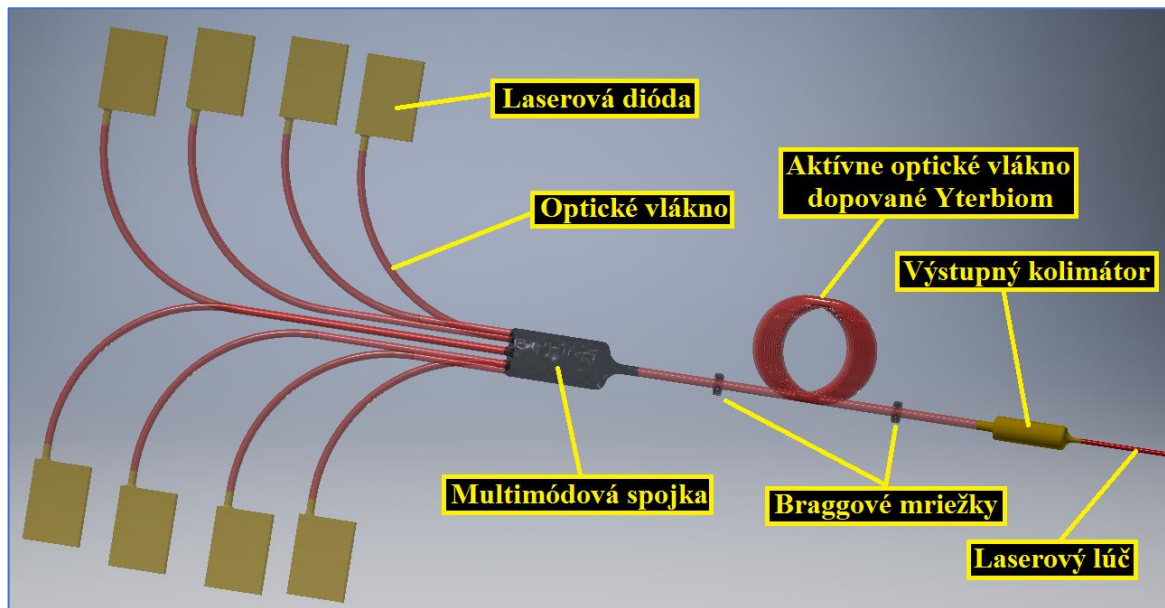


*Obr. 28 Diskový laser TruDisk od firmy Trumpf [73]*

vlnovej dĺžke je taktiež možné viesť laserový lúč pomocou optického vlákna až k mieste aplikácie. Okrem vyššie spomínaných vlnových dĺžok, dokáže úpravou pracovať v oblasti zeleného svetla, cca 515 nm, ktoré je omnoho vhodnejšie pre zvarovanie medi. Absorpcia tohto žiarenia meďou je až 8-krát vyššia než u infračerveného, čím je potrebný menší výstupný výkon laseru.



- Vlákňový laser

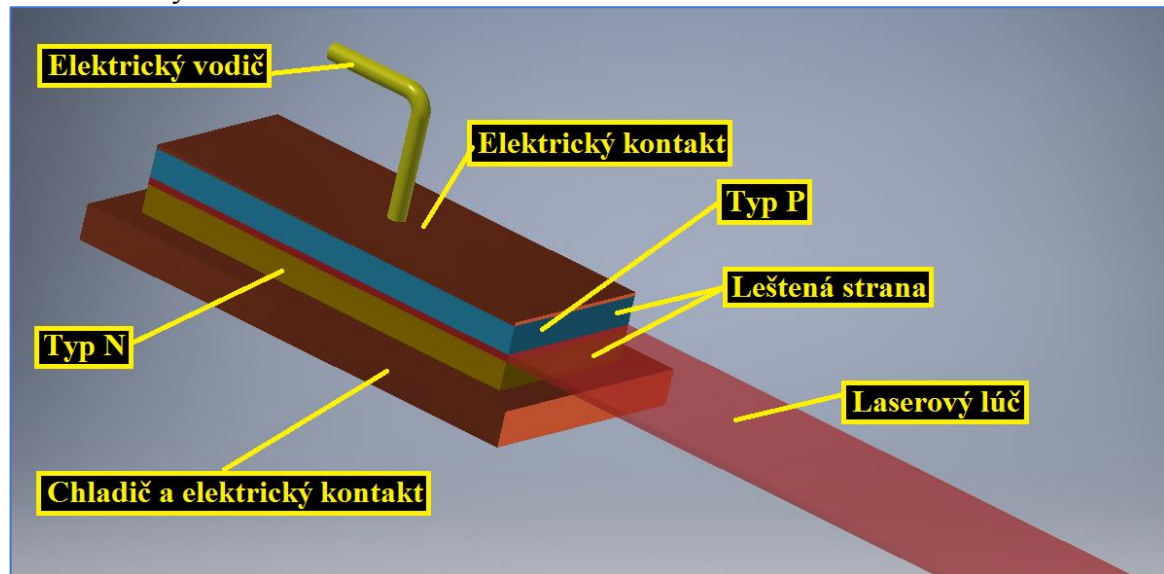


*Obr. 29 Schéma konštrukcie vlákňového laseru [57]*

Pevnolátkový laser, ktorého aktívne prostredie je tvorené dlhým optickým vláknom z oxidu kremíka, dopované prvkami vzácnych zemín ako yterbium, erbium, prazeodým, ich kombináciami, najnovším využitým prvkom je lantanoid túlium. Závisiac od použitia prvku je výsledná dĺžka výstupného žiarenia od 0,5 do 5,2  $\mu\text{m}$ , najznámejšia je 1064 nm použitím yterbia. Zdrojom energie je polovodičová dióda, respektíve sada niekoľkých diód, vid' obr. 29, generujúcich žiarenie a namierených kolmo na prierez zosilňovacích vlákien. Tie vstupujú do optickej spojky - zlučovača, kde sú jednotlivé lúče žiarenia spojené do jedného a následne nasmerované na aktívne vlákno, ktoré pozostáva z jadra po obvode obaleným vnútorným budiacim vláknom a vonkajším plášťom, obojstranne uzavreté Braggovými optickými mriežkami. Budiace vlákno má menší index lomu než samotné jadro a obopína ho, slúži na vstup a rozptýlenie získanej energie vo forme žiarenia po celej dĺžke jadra. Vonkajší plášť odráža a udržuje žiarenie vo vnútri vlákna, aby neprenikalo do okolia. Takto odrazené žiarenie prechádza jadrom dopovaným o vyššie spomenuté prvky vzácnych zemín, ktoré ho čiastočne pohltia a prebehne zosilnenie pomocou stimulovanej emisie. Mriežky plnia funkciu zrkadiel ako u ostatných laserov, čím je vytvorený rezonátor. HR-Braggová mriežka sa chová ako nepriepustné, 100% odrazové zrkadlo. LR-Braggová mriežka, podobne ako polopriepustné zrkadlo, odrazí iba časť žiarenia, zvyšok smeruje na výstupný kolimátor pomocou optického vlákna určeného na prenos žiarenia o vzniknutej vlnovej dĺžke. Braggové optické mriežky sú v jadre aktívneho vlákna vytvorené pomocou UV laseru, ktorý „vypáli“ plôšky meniace index lomu, čo zapríčini, že takto narušený materiál, respektíve plocha, odráža žiarenie určitej vlnovej dĺžky. Tým dostávame absenciu použitia zrkadiel, ktoré boli vďaka vznikajúcemu teplu od lúča náchylné na zmenu tvaru, zložité nastavenie pozície, uhla a rezonančnej frekvencie. Celé zariadenie sa tak stáva odolnejším voči poškodeniu a vplyvom okolitého prostredia. Zaručene to má výrazný vplyv na kvalitu výsledného žiarenia, ktoré môže byť pomocou optických prvkov zaostrené do bodu (kruhu) s veľmi malým priemerom. Samotné vlákno „spája“ s prostredím veľká plocha, ktorá napomáha chladeniu a za využitia nižšieho výkonu, už tak dostatočného na rezanie a zváranie materiálov, si zariadenie vystačí s chladením použitím núteného prietoku vzduchu. Použitím polovodičových diód sa zvyšuje doba prevádzkyschopnosti a účinnosť zariadenia v kombinácii polovodičová dióda - optické vlákno sa pohybuje na hodnote 25 - 35 %, nie je výnimočné dosiahnuť účinnosti až 45 %.

Daný typ laseru nesie so sebou mnoho ďalších výhod, no medzi hlavné zaradzujeme nízke prevádzkové náklady, životnosť, robustnosť celku, schopnosť pracovať v kontinuálnom i pulznom režime a možnosť poskladať si laser voliteľného výkonu pomocou tzv. kaziet. Každá kazeta obsahuje samostatný laser a pomocou optického zlučovača je možné spojením lúčov dosiahnuť výkonu stoviek kilowattov, no najmenší výkon je dostupný už od desiatok miliwattov. V pulznom režime je možné dosiahnuť dĺžku trvania pulzu menej než 30 femtosekúnd. Firma IPG ponúka zostavy dosahujúce výkon od 1 kW až nad 500 kW na báze aktívneho vlákna dopovaného yterbiom a chladených vodou. S aktívnym vláknom dopovaným erbiom, túliom sú dostupné výkony od 1 do 5 kW.

- Polovodičový laser



Obr. 30 Schéma konštrukcie polovodičového laseru [53]

Aktívne prostredie je tvorené polovodičovým materiálom, prevažne sa jedná o GaAs, CdSe a CdS, kde sa nachádzajú nerovnovážne elektróny a voľné nosiče náboja, ktoré je možné obsadiť iným elektrónom. Existujú dva možnosti, ako budiť laser, elektrónovým zväzkom alebo elektrickým prúdom. Pri budení zväzkom elektrónov, prechádzajúcich blokom vytvoreným z polovodičov, je započatý prechod nábojov z valenčnej do vodivej časti. Daným prechodom vzniká stimulovaná emisia žiarenia o vlnovej dĺžke od 808 do 840 nanometrov a výkon sa pohybuje od 0,03 do 8 kW. Ako polovodič môže byť použitý akýkoľvek z troch vyššie uvedených materiálov. Druhým spôsobom je budenie elektrickým prúdom, kedy sa jedná o zariadenie zložené z polovodičov typu P-N, ktorého konštrukčná schéma je zobrazená na obr. 30. Rekombináciou elektrónov s voľnými nosičmi náboja, pri prechode elektrického prúdu, sa emituje žiarenie, ktoré následne prechodom P-N materiálom GaAs za použitia zrkadiel spôsobí stimulovanú emisia žiarenia. Chladenie je zabezpečené pomocou chladiča, na ktorý sú nainštalované polovodičové diódy, pričom ako chladiace médium môže byť použitý nútený prietok vzduchu alebo kvapalina za vyššieho výkonu zariadenia. U tohto typu laserov sa účinnosť pohybuje v najvyšších číslach, konkrétne firma Trumpf uvádza hodnotu 40 %, firma Laserline dosahuje účinnosti cez 50 %. Firma nLIGHT dosiahla pri testoch za kryogenickej teploty pod 150 Kelvinov hodnotu účinnosti až 76 %. Všeobecný rozsah vlnových dĺžok je od 380 nanometrov do 3,4 mikrometra a maximálny viac ako 25 kW. Hlavnou nevýhodou polovodičových laserov je nekvalitný laserový zväzok, v porovnaní s ostatnými typmi laserov, ktorého príčinou je výstup žiarenia z polovodičového prechodu v tvare obdĺžnika. Druhá nevýhoda je závislosť

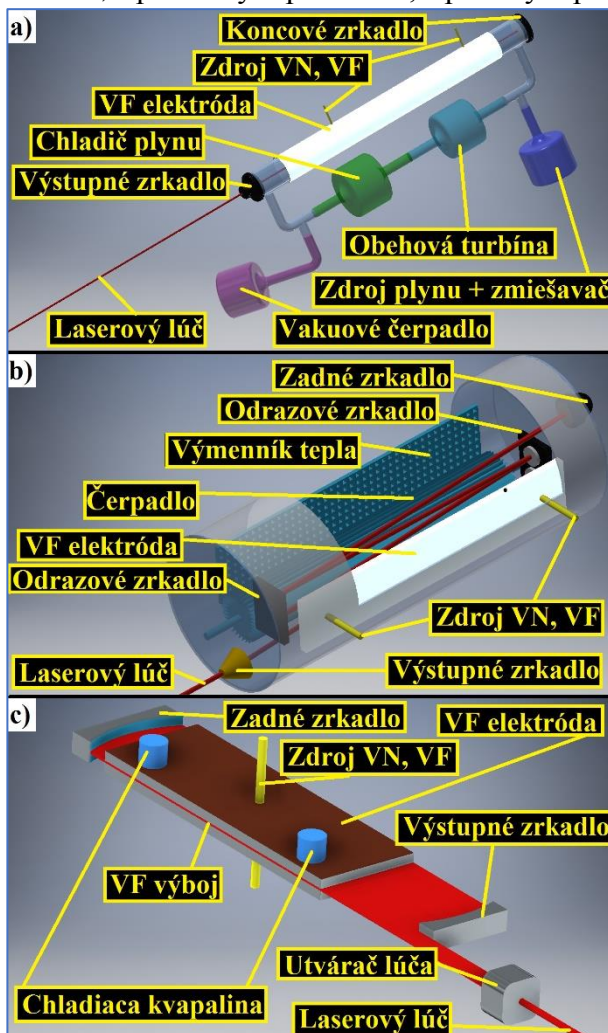
vygenerovaného žiarenia od teploty aktívneho prostredia z polovodičov, ktorá má taktiež vplyv na výslednú kvalitu zväzku žiarenia.

### 2.1.6 Plynové lasery [28], [41], [45], [46], [48], [79], [57], [59], [72], [80], [81]

Aktívne prostredie je tvorené plynom alebo zmesou niekoľkých plynov. Budenie je zabezpečené pomocou elektrického výboja, zväzkom elektrónov alebo opticky, no zastúpenie má aj chemická reakcia, fotodisociácia a rýchla expanzia plynu. Do skupiny plynových laserov patria CO, CO<sub>2</sub>, Ar, He-Ne, Kr (KrO) a excimerové lasery (XeCl, KrF a ArF).

- CO<sub>2</sub> laser

Je najznámejším laserom, využívaným pre zváranie i rezanie materiálov. Využíva k budeniu elektrický výboj alebo RF vlnový generátor a aktívne prostredie je tvorené zmesou CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He v pomere blížiacemu sa k 1:2:8. Spustením budenia sa molekuly dusíka vybudia do vyššieho energetického stavu a nepružnými zrážkami s molekulami oxidu uhličitého ich privedú do nabudeného stavu. Oxid následne pri prechode do základného stavu, urýchlený molekulami hélia, emituje žiarenie. Hélium zároveň slúži ako vodič tepla a pomáha ochladzovať laser. Konštrukčne sú dostupné tri varianty laserov, zobrazené na obr. 31, s pozdĺžnym prúdením, s priečnym prúdením plynu a najnovší je SLAB (doskový)



a) Pozdĺžne prúdenie b) Priečne prúdenie c) SLAB

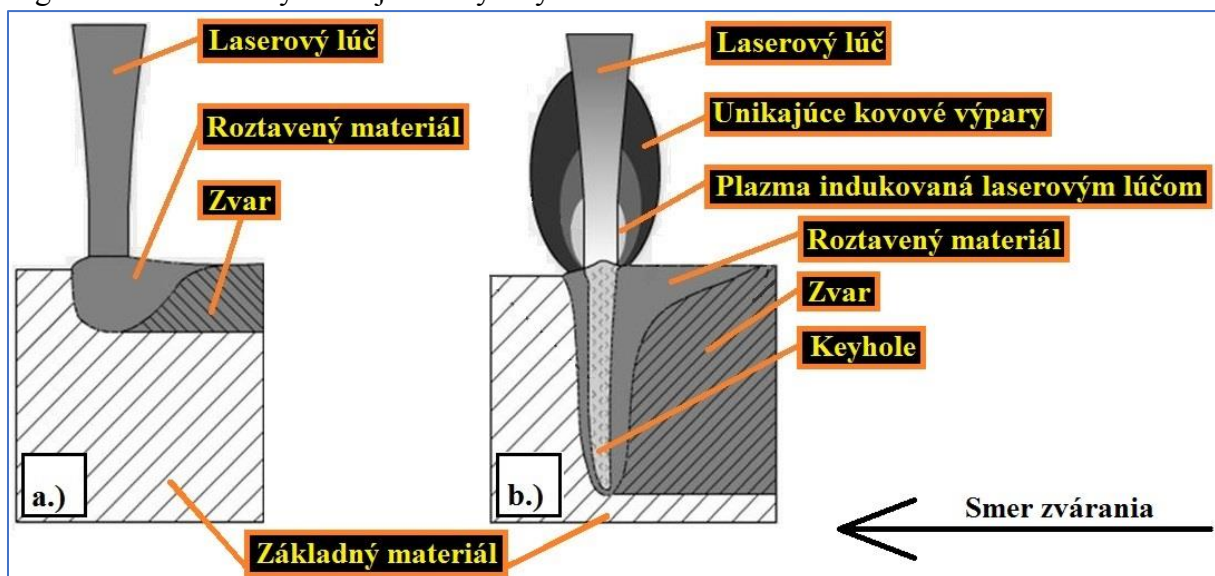
Obr. 31 Varianty laserov [81]

obťažne nastaviteľná a vyžaduje si častú kalibráciu. Účinnosť sa pohybuje od 5 do 10 %.

Laser s pozdĺžnym prúdením pracuje s budením elektrickým výbojom, ktorý prebieha rovnobežne s osou trubice, cez ktorú prúdi zmes plynov vysokou rýchlosťou. Vyniká vyššou kvalitou zväzku ( $K > 0,4$ ) a dosahuje výkon až 20 kW. Laser s priečnym prúdením plynu je budený vysokofrekvenčným prúdom pomocou elektród, pomedzi ktorými prúdi plyn nízkou rýchlosťou. Kvalita zväzku je nižšia ( $K > 0,14$ ) ale má aj zároveň nižšie náklady na prevádzku. SLAB laser je najnovší typ CO<sub>2</sub> laseru, ktorý dosahuje veľmi vysokú kvalitu zväzku ( $K > 0,95$ ) a výkon je do 8 kW. Budenie prebieha pomocou vysokofrekvenčného prúdu privedeného na vodou chladené plošné elektródy, rezonátor je vytvorený odrazovými zaoblenými zrkadlami a výstupný zväzok žiarenia má obdĺžnikový tvar. Ten je následne upravený do rotačne symetrického prierezu. CO<sub>2</sub> laser pracuje v pulznom i kontinuálnom režime, s vlnovou dĺžkou žiarenia 10,6 μm. Tá neumožňuje viesť žiarenie pomocou optického vlákna, ani skla. Pre vedenie žiarenia je potrebná refrakčná optika ZnSe, Ge alebo GaAs a reflexná optika Si/Cu s prídavkom Au. Vzniká tak optická sústava, ktorá je

## 2.1.7 Princíp zvárania laserom [27], [28], [82], [83], [84], [85], [86], [87]

Zváranie využitím laseru, podľa ČSN EN ISO 4063 označené pod číslom 52, s podkategóriami pre pevnolátkový (521), plynový (522) a diódový laser (523) sa využíva nielen z dôvodu zvárania materiálov, ktoré sú bežnými metóda obťažne, prípadne vôbec nezvárateľné, ale aj kvôli ušetreniu času. V neposlednom rade správne odladená technológia prináša so sebou, z pohľadu presnosti a veľmi dobrých materiálových charakteristík, kvalitný zvar. S možnosťou zaostriť zväzok žiarenia do veľmi malého prierezu tak vďaka veľkej hustote energie na malý plošný obsah vnášame do materiálu menej tepla, vzniká malá tepelne ovplyvnená oblasť a znižujeme, prípadne eliminujeme deformácie materiálu na prijateľnú hodnotu a taktiež trhliny. Hĺbka zvaru je značne väčšia než samotná šírka a dosahujeme vysokých rýchlosti zvárania pri pravidelnom, hladkom zware s nízkou pórovitosťou. Vďaka bezkontaktnému spôsobu zvárania znižujeme možnosť kontaminácie nežiaducimi prvkami a dostať sa k čistému výslednému zvaru nie je neobvyklé, navyše povrch je vysokokvalitný a opracovanie po zváraní stráca zmysel. Avšak zváranie laserom vyžaduje dôkladnú prípravu medzery medzi zváranými materiálmi, čo so sebou môže niesť zložité prípravky a časovú náročnosť na prípravu pred zváraním. Princíp samotného zvárania laserom spočíva v pôsobení zväzku žiarenia, o určitej vlnovej dĺžke, na materiál a absorpciou fotónov v mriežkach materiálu zvýšením frekvencie vibrácií, čím sa výrazne v danom mieste zvýši teplota. V závislosti na absorpčnom koeficiente materiálu je pohltená iba časť žiarenia. V príprave pred zváraním kvôli nízkej absorpcii materiálu býva potrebné pridať operácie, ako je zdrsenie alebo prekrytie daného povrchu materiálom s vyššou absorpciou, horšou variantou z hľadiska časovej náročnosti je morenie. Keďže absorpcia závisí aj od teploty materiálu a so stúpajúcou teplotou stúpa aj absorpcia, tak je možný predohrev laserom s kratšou vlnovou dĺžkou, ktorý sa negatívne odrazí na výslednej cene výroby.



a.) Kondukčný režim    b.) Penetračný režim

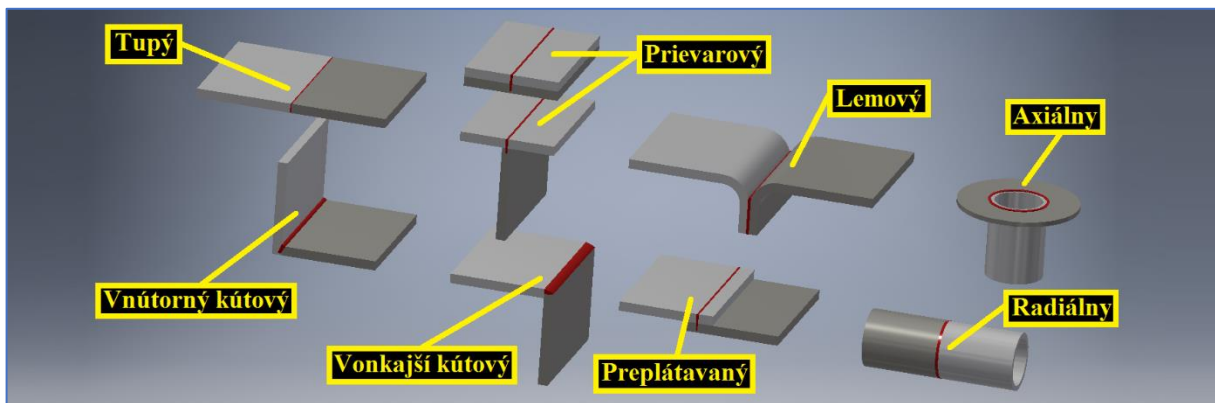
Obr. 32 Rozdiel medzi kondukčným a penetračným režimom [82]

Pri penetrácii laserovým žiarením sa materiál, v našom prípade kov, ohrieva na vysokú teplotu, až dosiahne bod tavenia. U nedokonalne nastavených podmienok zvárania alebo veľmi vysokým výkonom u penetračného režimu, sa dodaná energia nestíha odvádzať a natavený kov sa vyparuje. Ďalším pôsobením žiarenia sa výpary ionizujú v plazmu unikajúcu von zo zvarovej oblasti. Výsledná plazma o veľkom množstve tak bráni prenikat' zväzku fotónov do materiálu a znižuje účinnosť procesu zvárania s tým, že materiál chladne a klesá množstvo vzniknutej plazmy. Automaticky nastáva zvýšenie priepustnosti fotónov, ohrev a takýmto kolísaním medzi oboma stavmi vzniká nestabilný proces zvárania. Riešenie sa ponúka pomocou odľukovania

plazmy čistým héliom alebo héliom s prímiesou argónu. Zváranie u tejto metódy sa okrem zvolenia druhu laseru líši i režimom zvárania, kondukčným a penetračným, zobrazeným na obr. 32.

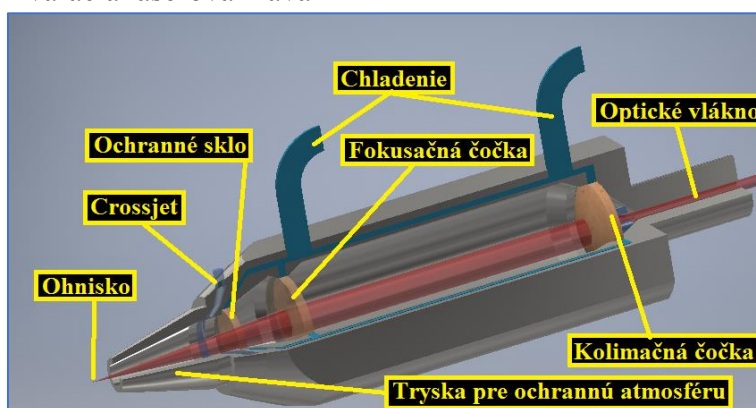
Pri kondukčnom režime sa využíva radovo nižší výkon a materiál je natavený iba povrchovo bez značného vyparovania. Výsledný zvar je opačného charakteru, ako bolo vyššie spomenuté, je širší než hlbší, zároveň tepelne ovplyvnená oblasť je oveľa väčšia. Svoje využitie našiel pri plytkom a zároveň rýchlom zváraní tenkých plechov, kde sa doraz nekladie na hĺbku zvaru a pri zváraní s prídavným materiálom vo forme drôtu.

U penetračného režimu využívame až o dva rady vyšší výkon než pri kondukčnom a výsledný zvar je hlbší, úzky a tepelne ovplyvnená oblasť malá. Avšak stretávame sa tu s vyššie popísaným problémom vznikajúcej plazmy. Vzniká tu tzv. keyhole, úzka štrbina spôsobená výparmi kovu a obklopená nataveným materiálom. Jej veľkosť je limitovaná odvedom tepla a absorpciou žiarenia materiálom. Postupným pohybom laserového zväzku dopredu sa dutina za pomoci rovnovážnych síl, tlaku pár a tekutého kovu zalieva nataveným materiálom, vyplňa prázdny objem a stuhnutím vzniká zvar. Využitie nachádza u zváraní materiálu s rôznou hrúbkou jediný prechodom zaisťujúcim plné zvarenie materiálu. Medzi typy laserových zvarov patrí tupý, priearový, lemový, preplátavaný, axiálny, radiálny, vnútorný alebo vonkajší kútový zvar zobrazené na obr. 33.



Obr. 33 Typy laserových zvarov [85]

- Zváracia laserová hlava



Obr. 34 Konštrukčná schéma laserovej zváracie hlavy [85]

Jej základnou funkciou je presná fokusácia laserového žiarenia do miesta budúceho zvaru a prenos plynov zúčastňujúcich sa procesu zvárania. Schéma znázorňujúca základné časti hlavy je na obr. 34. Na obr. 35 je laserová zváracia hlava od firmy Precitec Group v základnom prevedení označovaná ako basic. Môže byť doplnená o rôzne nadstavby, ako je napríklad kamerový systém. Pri využití



Obr. 35 Precitec YW 30  
Základné prevedenie [158]

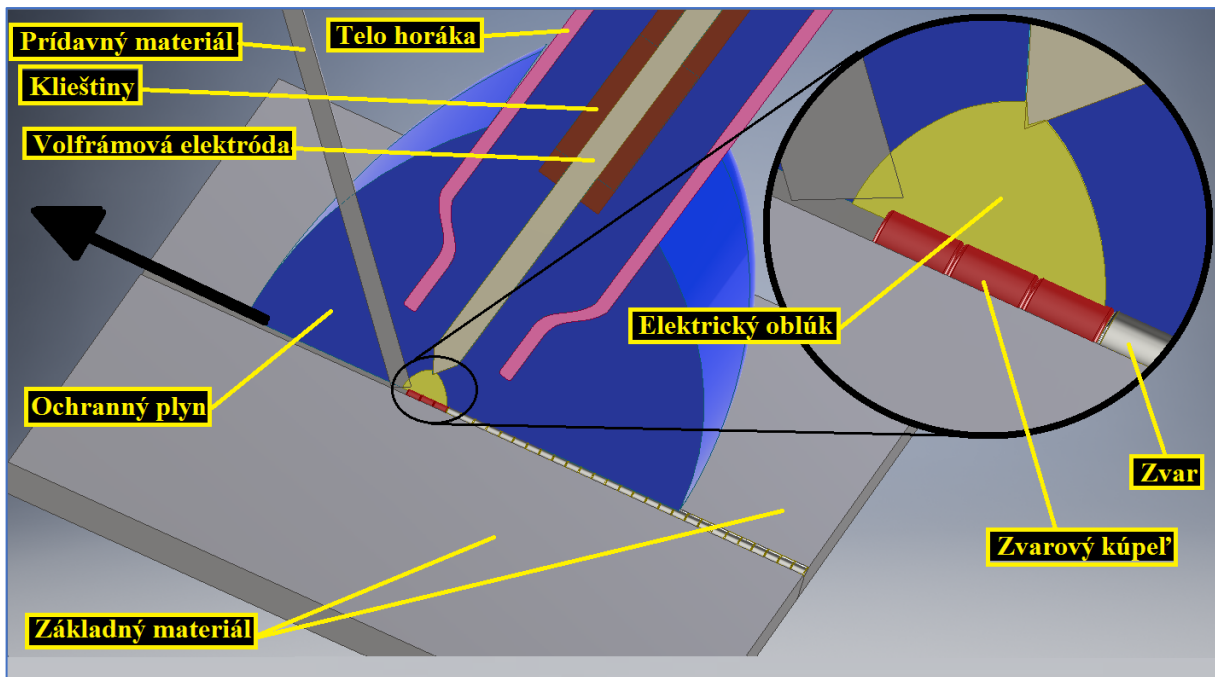
u hybridného zvarovania obsahuje nadstavbu pre zvarovanie MIG/MAG alebo TIG, ktorá je uchytená na nastaviteľnom držiaku pre nastavenie polohy medzi ohniskom laserového lúča a koncovým bodom elektródy. Prevažne ju nájdeme uchytenú na robotickom ramene, čo umožňuje zjednodušenie prístupu k miestu zvaru v 3D priestore.

- Vlastnosti a parametre zostavy laserového pracoviska ovplyvňujúce proces zvarovania:
  - Meniteľné
    - Výkon a režim práce lasera
    - Poloha, respektíve výška ohniska laserového lúča voči materiálu
    - Zváracia (posunová) rýchlosť
    - Ochranný plyn, jeho prietok a kvalita
  - Nemeniteľné
    - Vlnová dĺžka laserového žiarenia
    - Optika zváracej hlavy

Na ich správnom nastavení z veľkej časti závisí nielen výsledná kvalita zvaru, ale aj efektívne využitie lasera pre zvarovanie. Zo všetkých parametrov sa snažíme dosiahnuť najvyššej rýchlosti zvarovania, najnižšieho potrebného výkonu lasera s najkvalitnejšie možným zvarom. Množstvo parametrov z vyššie vymenovaných ovplyvňuje tie ostatné, ale každé z nich je zvolené na základe vlastností materiálu, ktorý sa zvara. Zvolením správnej vlnovej dĺžky, respektíve typu lasera, je možné dosiahnuť vyššej absorpcie žiarenia a tým znížiť potrebný výkon alebo zvýšiť posunovú rýchlosť. Nastavením polohy ohniska, miesta v laserovom lúči s najväčšou hustotou energie na plochu, výrazne ovplyvňujeme hĺbku zvaru materiálu a taktiež to má vplyv na rýchlosť, ak počítame so zachovaním nezmenenej hĺbky. Zvyčajne je laserový lúč zaostrý na povrch materiálu a s zväčšujúcou sa hĺbkou ohniska v materiáli sa prehlbuje i samotný zvar. Ochranný plyn slúži nielen k ochrane zvarového kúpeľa pred nežiaducimi oxidmi, ale zároveň chráni optickú sústavu pred prípadným poškodením od nataveného materiálu, znižuje škodlivý vplyv vzniknutej plazmy na laserový lúč a odvádza výpary mimo oblasť zvarovania. Nepočítajúc vlastnosti základného materiálu, do procesu vstupujú aj nečistoty na jeho povrchu, ktoré nemajú výrazne škodlivý vplyv na proces pre ich nízke množstvo, ktoré je odstránené (vyparené) laserom. Inou kategóriou sú povrchové úpravy nanosené na základnom materiáli pre jeho ochranu pred procesom zvarovania, počas prevozu a uskladnenia, ale aj po procese zvaru slúžiace ako napríklad antikoročná vrstva. Tie sa môžu vyznačovať rozdielnou teplotou tavenia oproti základnému materiálu a vďaka tomu zapríčiniť nežiaduce vlastnosti zvaru.

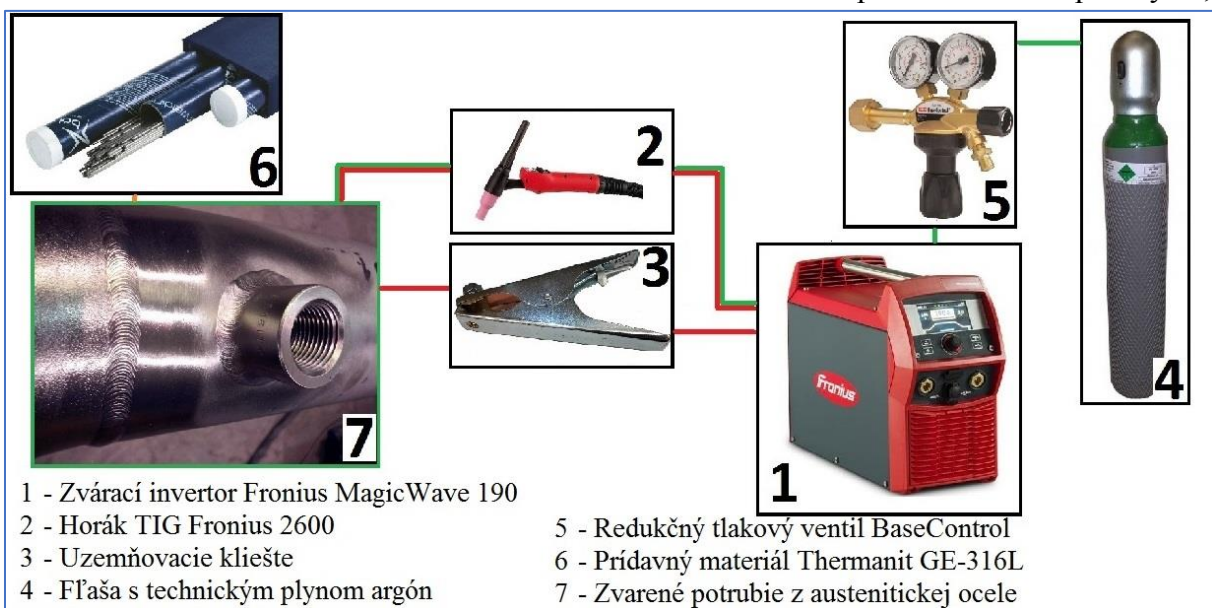
- Výhody zvarovania pomocou lasera:
  - Vysoká rýchlosť zvarovania vyplývajúca z vysokej hustoty energie
  - Zvarovanie s možnosťou bez prídavného materiálu
  - Vysoká presnosť, čistý a kvalitný zvar pri správne nastavených parametroch
  - Veľmi štíhly zvar (výška  $\gg$  hrúbka) a malá tepelne ovplyvnená oblasť
  - Možné vytvoriť preplátavaný spoj
  - Bezkontaktné zvarovanie a „Remote welding“
  - Jednoduchšia automatizácia procesu
  - Možnosť navarovať materiál na materiál a zvarať rozdielne druhy materiálov
- Nevýhody zvarovania pomocou lasera:
  - Vysoké počiatočné náklady na zariadenia
  - Zložité prípravky kvôli presnosti, vysoký dôraz na predpripravené kontaktné miesta zvaru
  - Nutnosť predohrevu pri zvarovaní materiálu s veľkou hrúbkou

## 2.2 Zváranie metódou TIG [28], [88], [89], [90], [91]



Obr. 36 Schematický princíp zvárania TIG [91]

Metóda TIG, s číslom 141 podľa ČSN EN ISO 4063, označuje oblúkové zváranie materiálu netaviacou sa elektródou v ochrannej atmosfére inertného plynu, znázornené na obr. 36. Skratka je vytvorená z anglického slovného spojenia Thugsten Inert Gas, kde slovo Thugsten znamená v preklade volfrám. Z tohto materiálu je vyrobená elektróda, ktorá musí zvládnuť vysoké teploty kvôli horeniu oblúka medzi elektródou a materiálom bez toho, aby došlo k jej roztaveniu. TIG umožňuje zvärať bez prídavného materiálu alebo s prídavným materiálom, ktorý sa pridáva vo forme drôtu. Zvarový kúpeľ a volfrámová elektróda sú chránené ochranným plynom, ktorý nereaguje s základným materiálom a zabraňuje vstupu kyslíku, a iných nežiadúcich prvkov do zvaru. Medzi najväčšie výhody metódy TIG označujeme stabilitu elektrického oblúka, výbornú kontrolu nad zvarovým kúpeľom a zváranie austenitických ocelí, zliatin hliníku s horčíkom a titánu. Použitie nachádza v oblasti potravinárskeho priemyslu,



1 - Zvárací invertor Fronius MagicWave 190

2 - Horák TIG Fronius 2600

3 - Uzemňovacie kliešte

4 - Fľaša s technickým plynom argón

5 - Redukčný tlakový ventil BaseControl

6 - Prídavný materiál Thermanit GE-316L

7 - Zvarené potrubie z austenitickej ocele

Obr. 37 Zostava pre zváranie metódou TIG vrátane výsledného zvaru [149], [150], [151], [152], [153], [154], [155]

potrubných systémov, výmenníkov tepla, kotlov v energetickom priemysle a leteckom priemysle pri použití materiálov zložitých na zvarenie. V neposlednom rade s metódou TIG sa môžeme stretnúť pri výrobe pohľadových výrobkov pre jeho silnú stránku vo veci vzhľadu výsledného zvarového spojenia. Potrebné vybavenie pre zváranie metódou TIG, ak pominieme osobné ochranné prostriedky určené pre prácu zvárača, je za potreby obstarat' si set zložený zo zdroja prúdu, horáku na zváranie metódou TIG, uzemňovacích kliešti, fľaše s inertným plynom, redukčného ventilu, elektrických káblov pre zváranie a vzduchových hadíc, znázornené na obr. 37. Pre zváranie s prídavným materiálom je potreba vybrať si vhodný materiál vo forme drôtu rovnaký ako základný materiál, prípadne blízky zložením alebo mechanickými vlastnosťami základnému materiálu.

### 2.2.1 Zdroje prúdu [28], [91], [92], [93]

Výber vhodného zdroja prúdu volíme na základe materiálu, ktorý chceme spojiť pomocou zvaru. Vyberáme si z viacerých možností, a to zváranie jednosmerným prúdom s voľbou polarity na elektróde, zváranie striedavým prúdom a pulzujúcim prúdom.

- **Jednosmerný prúd**

Na elektródu je privedená iba záporná alebo kladná polarita prúdu. Medzi najpoužívanejšie metódy zaradujeme zváranie jednosmerným prúdom, kde elektróda má záporný pól a kladný pól je privedený na základný materiál. Týmto zapojením je z veľkej časti generované teplo z oblúku bližšie k základnému materiálu, elektróda je vystavená menšiemu príkonu tepla a pri zváraní je zaistený hlbší prievar do základného materiálu. Celý proces spočíva v prenose elektrónov zo špičky záporne nabitej elektródy v plazmovom oblúku na pozitívne nabitý základný materiál. Vzniknutá plazma je vysokoteplotný ionizovaný plynový stĺpec, ktorý vzniká pri narážaní elektrónov v elektrickom oblúku do molekúl ochranného plynu. Po náraze atóm plynu stráca jeden alebo viac elektrónov a stáva sa pozitívne nabitým. Elektróny a výsledná plazma sa hromadí, za stúpajúceho tlaku plazmy, na špičke elektródy. Od elektródy cez elektrický oblúk sa elektróny presúvajú k základnému materiálu, čím elektrický oblúk hrubne a klesá hustota zároveň s tlakom plazmy. Pri náraze elektrónu do základného materiálu sa uvoľní teplo, ktoré zahrieva materiál až na potrebnú teplotu. Pri použití jednosmerného prúdu s zápornou polaritou sa kladne nabité plynné ióny v plazme presúvajú smerom k záporne nabitej elektróde a elektróny smerom k materiálu, kde vzniká najväčší podiel tepla. Je vhodné pre všetky druhy ocelí, niklu, titánu a medi.

Pri zváraní jednosmerným prúdom s kladnou polaritou na elektróde prebieha daný dej opačne a vyšší podiel, presnejšie až dve tretiny, tepla vzniká na elektróde. Práve kvôli tomu sa používa elektróda s väčším priemerom dosahujúcim i štvornásobok priemeru elektródy použitej pri zápornej polarite. Prienik do materiálu je samozrejme menší, no šírka zvaru je väčšia. Pri kladnej polarite elektródy sa vzniknuté plynné ióny presúvajú na základný materiál, kde môžu narážať do povrchových oxidov, poškodiť ich, odstrániť z miesta budúceho zvaru a umožniť tak zvariť materiály ako je hliník a horčík. Druhým javom, ktorý nastáva, je vytvorenie katódovej škvrny na povrchu materiálu a jej zásah zoxidovanej vrstvy, čím sa daná vrstva ľahšie odparí z miesta zvaru. Bez týchto javov by nebolo možné zvariť kovy s nízkou teplotou tavenia, ktoré na povrchu zoxidovali, pretože teplota tavenia daných oxidov kovu leží niekoľko násobne vyššie než základný materiál. Pre porovnanie teplota tavenia zliatiny AlMg3 sa pohybuje od 595 do 645 °C, zatiaľ čo oxid hlinitý  $Al_2O_3$  má teplotu tavenia 2072 °C. Je vhodné pre kovy ako hliník, mosadz, bronz a zliatiny tvoriace povrchové oxidy.



- Striedavý prúd

Na elektróde sa mení polarita prúdu v závislosti na čase v tvare sínusovej alebo obdĺžnikovej vlny, prípadne iných tvarov priebehu veľkosti prúdu. Zváranie striedavým prúdom spája výhody zvárania jednosmerným prúdom s kladnou i zápornou polaritou na elektróde. Keďže časť periódy priebehu elektrického prúdu je na elektróde záporná polarita, ktorá zabezpečuje veľkú hĺbku zvaru a druhú polovicu periódy je polarita obrátená, ktorá odstraňuje vytvorené oxidy, sa daná metóda javí ako najvhodnejšia pre zváranie materiálov s povrchovými oxidmi. Avšak povrchové oxidy majú zlú elektrickú vodivosť a tak pri striedavom cykle v časti periódy, kedy je na elektróde kladná polarita, dochádza k vzniku tzv. DC component, kedy sa mení striedavý prúd na jednosmerný prúd s zápornou polaritou, ktorý smeruje naspäť do zdroja prúdu, kde môže spôsobiť poškodenie. Preto je potrebné pri zváraní materiálov s oxidovanými povrchmi si vybrať zdroj prúdu s ochranou proti tomuto nežiaducemu javu.

- Pulzný prúd

Metóda pulzujúceho prúdu spočíva v zmene veľkosti zväracieho prúdu medzi dvoma hodnotami, základným prúdom a hlavným prúdom, v nastaviteľných časových intervaloch. Základný prúd je využívaný pre ionizáciu okolia oblúku a udržanie elektrického oblúku, avšak k nataveniu materiálu je nedostačujúci. Hodnotu základného prúdu je odporúčané nastaviť cca 30 % veľkosti hlavného prúdu. Hlavný prúd používame už pre samotné natavenie základného materiálu, prípadne aj prídavného materiálu. Pomocou nastavenia dĺžky trvania základného a hlavného prúdu, ich veľkosti dokážeme získať požadovaný tvar a rozmery zvaru, regulovať množstvo vneseného tepla a tým zmenšiť tepelne ovplyvnenú oblasť po zváraní i zlepšiť mechanické vlastnosti zvaru.

### 2.2.2 Elektródy [94], [95], [96], [97], [98], [99]

Vyššie spomenuté použitie netaviacich sa elektród je zabezpečené použitím čistého spekaného volfrámu, alebo volfrámu s prísadami oxidov zirkónia, tória, lantánu, ceria alebo yttria. Podiel jednotlivých oxidov a farebného označenia elektród pre rozlíšenie okom je uvedený v tabuľke 1. Čistý volfrám má teplotu tavenia 3695 K (3421,85 °C) a vyznačuje sa elektrickým odporom 52,8 nΩ · m. Použitím prísady bod teploty tavenia elektródy automaticky klesá, no zvyšuje sa odolnosť elektródy, znižuje sa riziko znečistenia zvaru volfrámom a zlepšujú vlastnosti zväracieho oblúku, keďže pri zváraní sa oxid uvoľňuje pokrývajúci špičku elektródy, čím zvyšuje emisiu elektrónov.

**Tab. 1** Typy a značenie elektród vrátane hodnôt podielu oxidu v zmesi [94]

Materiál a prísada oxidu	Podiel oxidu v zmesi [%]	Označenie podľa ISO	Farebné označenie elektródy
Čistý volfrám	0	WP	Zelená
Lymox (zmes oxidov)	1,8 až 2,2	Lymox	Ružová
W+ CeO <sub>2</sub>	1,8 až 2,2	WC20	Sivá
W+ La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9 až 1,2	WL10	Čierna
W+ La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,4 až 1,6	WL15	Zlatá
W+ La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,9 až 2,1	WL20	Modrá
W+ ZrO <sub>2</sub>	0,7 až 0,9	WZ8	Biela
W+ ThO <sub>2</sub> (Rádioaktívne)	0,8 až 1,2	WT10	Žltá
W+ ThO <sub>2</sub> (Rádioaktívne)	1,7 až 2,2	WT20	Červená
W+ ThO <sub>2</sub> (Rádioaktívne)	2,8 až 3,2	WT30	Fialová
W+ ThO <sub>2</sub> (Rádioaktívne)	3,8 až 4,2	WT40	Oranžová

- **Elektróda z čistého volfrámu**  
Elektróda je vhodná pre zváranie hliníkových zliatin pomocou striedavého prúdu, kedy sa vyznačuje výbornou stabilitou elektrického oblúku. Avšak nevhodná v kombinácii s jednosmerným prúdom.
- **Elektróda s obsahom ThO<sub>2</sub>**  
Elektróda s obsahom tória sa vyznačuje lepšími vlastnosťami, než čistý volfrám, má lepšiu životnosť a dobré zapalovanie oblúku. Používa sa pri jednosmernom prúde, zvárajú sa s ňou korózií odolné alebo vysokolegované oceli, meď, tantal a titán. Jej hlavnou nevýhodou, pre ktorú je nahradzovaná inými typmi elektród, je tórium, ktoré je rádioaktívne (žiarič alfa častíc). Jeho nebezpečie spočíva v jemnom rádioaktívnom prachu, ktoré môže operátor pri zváraní a pri brúsení elektród vdychnúť. AWS (American Welding Society) odporúča pri používaní týchto elektród použiť odsávanie priestorov a respiračné ochranné prostriedky, hlavne pri samotnom brúsení elektród.
- **Elektróda s obsahom CeO<sub>2</sub>**  
Jedná z variant k tóriovým elektródam, ktorá nie je rádioaktívna. Používa sa v kombinácii s jednosmerným prúdom, avšak za jeho nízkych hodnôt. Oxidy céria pri použití vysokých prúdov putujú k špičke elektróde, kde následne miznú, čím sa vytrácajú vlastnosti danej elektródy. Je vhodná pre zváranie vysokolegovaných ocelí, korózií odolných ocelí, hliníku a titánu. Pri použití pri nízkych prúdoch má výborné zapalovanie elektrického oblúku a pomerne často je používaná pri orbitálnych zväračkách na trubky.
- **Elektróda s obsahom La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**  
Volfrámová elektróda s obsahom oxidu lantánu, 1,5 % z celého objemu, je najlepšia alternatíva k tóriovým elektródam. Lantán nie je rádioaktívny, pri podiele v objeme má zhodné vlastnosti ako tóriové elektródy a bez zmeny nastavení je možná ich obmena v priemysle, kde si našiel uplatnenie pri robotickom zváraní. Používa sa v kombinácii so striedavým prúdom, má výbornú stabilitu a dobré zapalovanie oblúku.
- **Elektróda s obsahom ZrO<sub>2</sub>**  
Daná elektróda s obsahom oxidu zirkónia sa používa pri striedavom prúde, má výborné vlastnosti a veľmi dobrú odolnosť voči kontamináciám. Je však málo používaná, hlavne pre zhoršené zváranie pri použití jednosmerného prúdu. Nahrádza sa vyššie spomenutými W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> elektródami.
- **Elektródy s obsahom rôznych oxidov**  
Volfrám so zmesou oxidov, zo vzácnych zemín (bez rádioaktívnych), tvoriaci elektródy značky Lymox, E3 a WGE3 im dal univerzálne použitie. Používajú sa na zváranie vysoko i nízkolegovaných ocelí hliníkových zliatin, tak i samotného hliníka, nerezových ocelí, meď, bronzu a titánu. Majú veľmi dobré vlastnosti a životnosť, použitie so striedavým i jednosmerným prúdom. Používajú sa ako v ručnom, tak i automatizovanom zváraní, vhodná pre TIG a plazmu.
- **Rozmery elektród**  
V závislosti na prúdovej zaťažiteľnosti, zvolenom druhu prúdu, hrúbke a druhu materiálu volíme priemer, typ a spôsob brúsenia danej volfrámovej elektródy. Čo sa týka dĺžky elektród, tá je štandardne 175 mm, no dodáva sa aj v dĺžkach 50, 75 a 150 mm. Z priemerov podľa zdroja [28] sú k dispozícii 0,5 mm, 1,0 mm, 1,6 mm, 2,0 mm, 3,0 mm, 3,2 mm, 4,0 mm, 4,8 mm, 8,0 mm a 10 mm. Vo všeobecnosti najbežnejšie sú od 1,0 mm do 6,4 mm.

V tabuľke 3 je možné vidieť príklady výberu elektródy o určitom priemere v závislosti na hrúbke materiálu, avšak je to len orientačné a väčší dôraz by som kládol na prúdové zaťaženie elektródy podľa tabuľky 2. Je možné použiť i elektródu o menšom priemere než je vhodná, avšak daný zvärač spotrebuje viac času na vytvorenie kvalitného zvaru materiálu, kde už narážame do veľkosti ceny výsledného zvaru. Na základe priemeru výrobcovia volfrámových elektród odporúčajú dodržať vzdialenosť špičky elektródy od materiálu rovnajúcu sa jej priemere.

**Tab. 2** Závislosť priemeru elektródy na prúdovom zaťažení [95]

Priemer elektródy [mm]	Jednosmerný prúd (záporný pól) [A]		Jednosmerný prúd (kladný pól) [A]		Striedavý prúd [A]	
	W	W + oxidy	W	W + oxidy	W	W + oxidy
1	do 65	do 75	-	-	do 25	do 30
1,6	45 až 90	60 až 160	do 20	do 20	30 až 90	30 až 120
2,4	80 až 160	150 až 250	10 až 25	10 až 25	80 až 140	100 až 210
3,2	150 až 290	220 až 330	15 až 30	15 až 30	130 až 190	150 až 260
4	180 až 360	310 až 490	25 až 45	25 až 45	180 až 270	240 až 350
4,8	240 až 450	460 až 640	40 až 60	40 až 60	250 až 350	310 až 450
6,4	350 až 800	480 až 850	50 až 90	50 až 90	320 až 460	380 až 530

**Tab. 3** Odporúčaná priemer elektród v závislosti na hrúbku ocele [99]

Priemer elektródy [mm]	1	1,6	2	2,4	3,2	4
Hrúbka ocele [mm]	do 1,5	2 až 6	5 až 10	8 až 14	18 až 20	20 až 40

### 2.2.3 Ochranný plyn [28], [100], [101], [102], [103]

Ochranný plyn pri zváraní plní viacero funkcií, vrátane ochrany zvaru pred kyslíkom (atmosférickou oxidáciou) a inými nežiaducimi prvkami, ochladzuje volfrámovú elektródu, je vodičom tepla z elektrického oblúka do okolia zvaru a tvaruje výsledný tvar zvaru. Zároveň je nevyhnutný pre stabilitu elektrického oblúka a uľahčenie jeho zapálenia. Ako ďalšia nevyhnutná vlastnosť ochranného plynu je absencia spoločnej reakcie s zváraným materiálom, kvôli ktorej sa používajú inertné plyny argón, hélium a zmesi týchto plynov v určitom pomere množstva v celkovom objeme. Správny výber plynu má vplyv nielen na kvalitu zvaru, ale aj na samotné finančné náklady pri zváraní.

- Čistota plynu

Čistotou plynu definujeme obsah nečistôt v objeme technického plynu. Medzi nečistoty sa dá uviesť obsah vody, kyslíku, prípadne dusíku, ak sa nejedná hlavný produkt, ktorý kupujeme. Kompletné informácie sú uvedené v certifikáte k predávanému plynu. Nečistoty sú uvádzané v jednotkách ppm (parts per million), kedy 1% znamená 10000 častíc nečistôt v 1000000 častíc objemu plynu. V tabuľke 4 je znázornené priradenie označenia k čistote plynu, podľa ktorého sa orientujeme pri nákupe technických plynov. V označení prvá číslica značí počet desiatok percentuálnom zastúpení plynu a druhé číslo nasleduje ako posledné za desiatkou. Napríklad 4.8 znamená 4 desiatky a za nimi nasledujúce číslo osem v tvare 99,998 %.

Tab. 4 Príklady označenia obvykle používaných technických plynov [102]

Označenie	Čistota plynu [%]	Zvyškové nečistoty [ppm]	Zvyškové nečistoty [%]
2.0	99	10000	1
2.5	99,5	5000	0,5
3.0	99,9	1000	0,1
3.5	99,95	500	0,05
4.8	99,998	20	0,002
5.0	99,999	10	0,001
5.5	99,9995	5	0,0005
7.0	99,99999	0,1	0,00001

- Argón**

Inertný plyn, ktorý sa značí Ar, je bezfarebný plyn, bez chuti a zápachu, je vo vyšších koncentráciách dusivý. V zemskej atmosfére tvorí 0,934 % z celkového objemu a má väčšiu hustotu než vzduch. Jeho hmotnosť prináša mnoho výhod, ako menšie nároky na veľkosť prietoku plynu a zároveň čiastočná ochrana zvärača pred kovovými výparmi. Spôsobuje ľahšie zapálenie elektrického oblúku a jeho stabilitu počas zvarovania, čo je dôsledkom ľahkej ionizácie argónu. Získavame ho pomocou frakčnej destilácie z kvapalného vzduchu absorpciou do aktívneho uhlia a následným čistením do požadovanej kvality alebo pri výrobe amoniaku, kedy vzniká ako vedľajší produkt výroby. Uskladnený je buď vo forme plynu v tlakových fľašiach, alebo ako kvapalina v kryogénnej nádrži. Dodávaný argón dosahuje čistoty 4.6, ktorá je na trhu bežná. Ďalšie udávané čistoty využiteľné pre TIG sú 4.8 a 5.0, prípadne je možné dostať argón o čistote 6.6.
- Hélium**

Inertný plyn, bez zápachu a farby, ktorý je v celosvetovom meradle vedený ako nedostatočný. Vysoké podiel hélia je získaný z ložísk plynu, prevažne v oblasti Severnej Ameriky a Kanady, prípadne zahrievaním minerálov na vysokú teplotu a následným oddelením od ostatných plynov. Nachádza široké zastúpenie od zábavného priemyslu až po hightech medicínske a technické aplikácie. Pri technológii zvarovania je pre nás zaujímavý ako ochranný plyn, ktorý je použiteľný u metódy TIG. Jeho nižšiu hustotu, ako má okolitý vzduch, je nutné vykompenzovať vyšším prietokom, aby bola zabezpečená dostatočná ochranná atmosféra pri zvarovaní. Má vyšší ionizačný potenciál ako argón, kvôli čomu je potreba vynaložiť viac energie pre jeho ionizáciu. Táto vlastnosť značí ťažšie zapálenie elektrického oblúku a jeho nižšiu stabilitu, hlavne vo vyššej vzdialenosti elektródy od materiálu. Znížením stability oblúku dochádza k zvýšeniu rozstreknutia kovu. Jeho hlavnou výhodou je vyššia tepelná vodivosť  $0,1513 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  oproti argónu, ktorý má vodivosť  $0,01772 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . To je hlavne využívané pri zvarovaní vyššie tepelne vodivých materiálov ako je meď, prípadne hliník s väčšími hrúbkami materiálu, samozrejme ich zliatiny, alebo pre zvýšenie rýchlosti zvarovania.
- Zmes argónu s héliom**

Za použitia ochrannej atmosféry pozostávajúcej iba z hélia je potrebné použiť prvotne argón a zdroj prúdu s napätím naprázdno až 100 V k zapáleniu elektrického oblúku. Pri započítaní vysokej ceny plynu hélia si preto nachádza miesto alternatíva v podobe zmesi argónu s héliom v určitých pomeroch, ktoré prinášajú jednotlivé výhody oboch plynov. Takéto zmesi plynov sa využívajú prevažne pre zvarovanie medi, hliníku a zliatin s vysokým obsahom týchto kovov. Už pri 5 % hélia v zmesi argón-hélium sa zvyšuje rýchlosť zvarovania a prievar materiálu, klesá pórovitosť zvaru. Bežne dostupné sú zmesi s obsahom hélia od 15% do

90 %, pričom zmes s obsahom hélia od 50 % a vyššie je používaná prevažne pre strojné zváranie.

- Zmes argónu s vodíkom

Voľba zmesi argónu a vodíka je možnou variantou argónu s héliom, avšak iba pri vysokolegovaných a chróm-niklových austenitických oceliach, u ktorých je využitá vysoká tepelná vodivosť a redukčný charakter vodíku. Týmto je dosiahnutý lepší prievar materiálu a zvyšuje sa rýchlosť zvárania. Pri zváraní ostatných druhov ocelí, martenzitických a chróm-niklových feritických ocelí, sú výsledné zvarené materiály náchylné k prasknutiu za studena. Zváranie medi, hliníku a ich zliatin touto ochrannou atmosférou spôsobuje vysokú pórovitosť výsledného zvaru. Je dostupný s obsahom vodíka v zmesi do 10 %, bežne dostupné zmesi obsahujú od 2 do 7,5 % vodíka. V kombinácií s kyslíkom obsiahnutým v okolitej atmosfére vzniká nebezpečie výbuchu a je preto potrebné zabezpečiť veľmi dobré odsávanie zvaracích priestorov.

- Zmes argónu s dusíkom

Ochranný plyn zložený z argónu a dusíka zabezpečuje, pomocou vysokej tepelnej vodivosti dusíka, lepší prenos tepla do materiálu a zvýšenie rýchlosti zvárania, lepší prievar a stabilný elektrický oblúk. Používa sa pri zváraní hliníka, jeho zliatin a duplexných ocelí. Významnou prednosťou tejto zmesi je stabilizácia podielu austenitu pri zváraní duplexných ocelí.

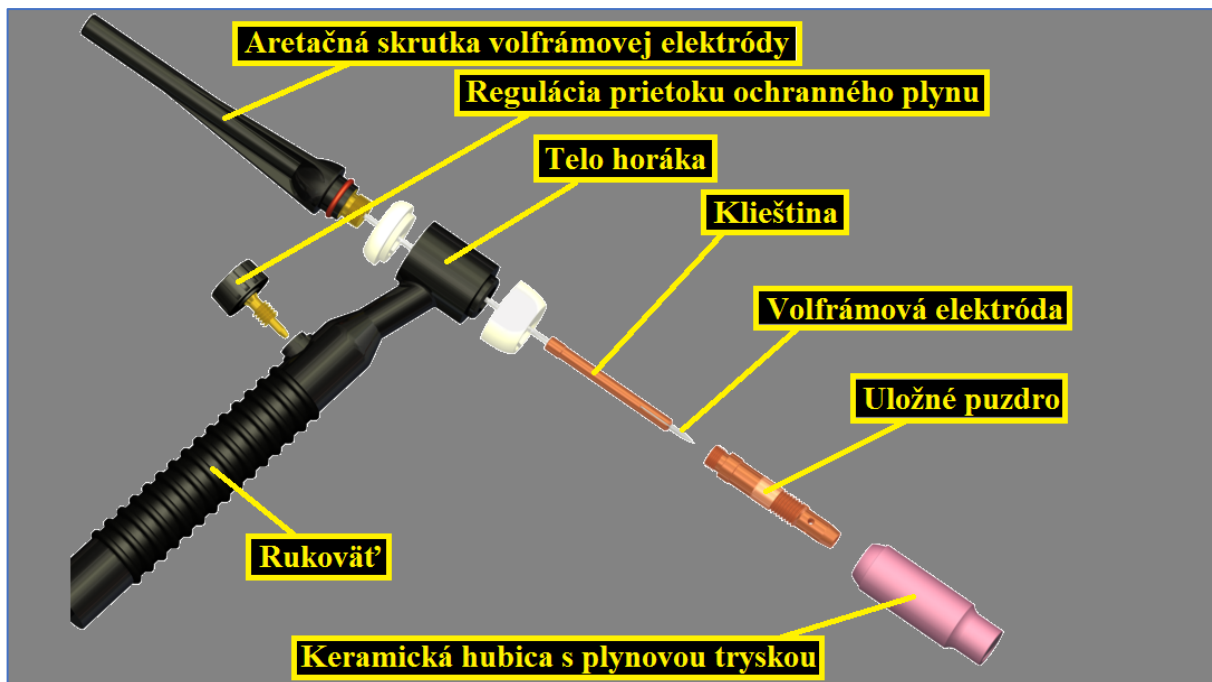
- Zmesi argónu a viacerých plynov

Vyššie opísané zmesi plynov je možné vylepšiť pridaním ďalšieho plynu do zmesi a dosiahnuť tak požadované vlastnosti, prípadne ich zlepšiť. Pri zváraní TIG ako ochranné plyny tak môžeme použiť kombinácie argón-hélium-dusík, argón-hélium-vodík.

- Formovacie plyny

Plyny slúžiace na ochranu koreňa zvaru a tepelne ovplyvnenej oblasti proti oxidácií z vnútornej strany dutého materiálu. Zastúpenie tu nachádzajú inertné plyny, redukčné a ostatné plyny nereagujúce s materiálom, ktorý zvarame. Pre vysokolegované autentické ocele a ocele s vysokým podielom niklu, ktoré nie sú náchylné na vodíkovú krehkosť, sú využívané zmesi argónu s vodíkom a dusíku s vodíkom. Podiel vodíku v zmesi argón-vodík je do obsahu 10 %, vo variante dusík-vodík je do 20 % obsahu zmesi. Druhou a bezpečnejšou variantou je použitie zmesi hélia a argónu. Táto zmes je určená pre materiály a kovy náchylné k vodíkovej krehkosti a pórovitosti, ako je titán, zirkónium, vanád, martenzitické, feritické oceli, oceli dosahujúce pevnosť v ťahu nad 1000 MPa a tvrdosť nad 32 HRC, meď a hliník. Pri použití zmesi plynov ľahšej ako okolitá atmosféra je zmes vpúšťaná do uzavretého dutého materiálu smerom zhora nadol, aby vytlačila ostatné nežiaduce plyny, hlavne kyslík. Ak sa jedná o zmes ťažšiu v porovnaní s okolitou atmosférou, je potrebné napúšťať zmes smerom zdola nahor. Pri použití vodíka s obsahom 5 a viac % v zmesi je potreba zabezpečiť na výpustnej strane uzavretého materiálu spaľovanie nahromadeného množstva vodíku, aby sa zamedzilo nebezpečenstvu výbuchu. Pri napúšťaní je potreba dodržať predom stanovený tlak pomocou regulácie prietoku, aby koreň zvaru neprepadol, ale ani nebol vydutý. Výsledná atmosféra vo vnútri dutého materiálu je kontrolovaná pomocou prietokomeru a sondy, ktorá meria obsah kyslíku.

## 2.2.4 Zvárací TIG horák [28], [104]



Obr. 38 Konštrukčná schéma zváracieho TIG horáku [28], [156]

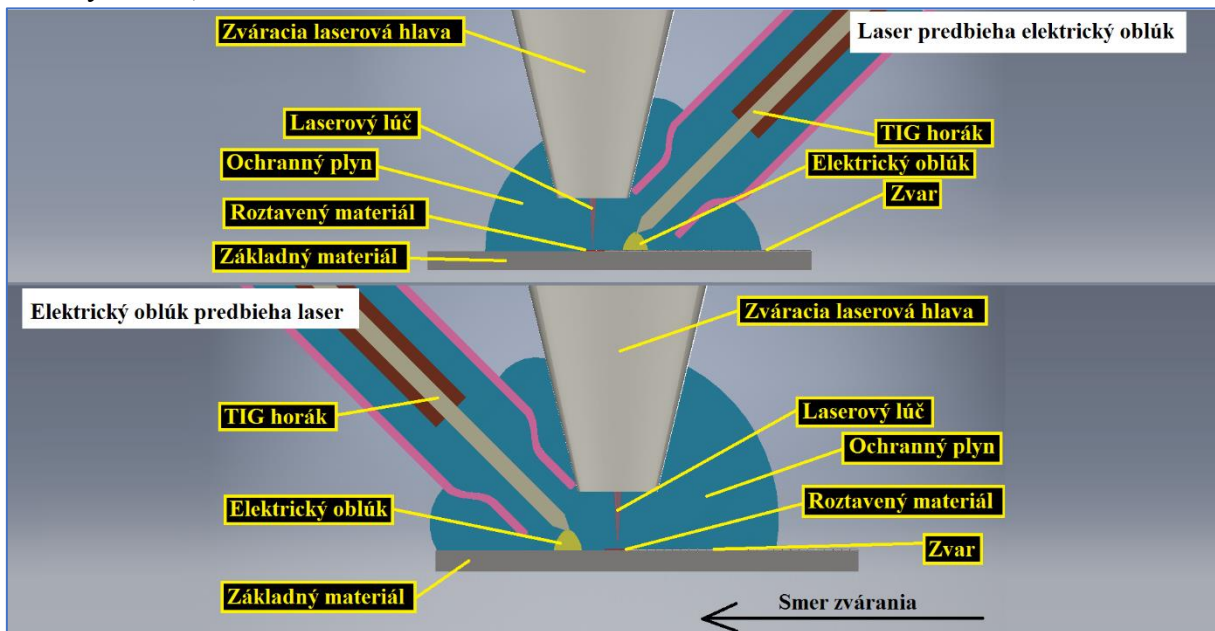
Zvárací horák, ako súčasť zostavy, zabezpečuje prechod elektrického prúdu, cez puzdro a klieštinu, volfrámovou elektródou, ktorú zároveň v sebe fixuje a pomocou aretačnej skrutky nastavuje jej vysunutie. Jeho sekundárnou funkciou je prívod ochranného plynu a nasmerovanie smerom k zvarovému kúpeľu zároveň s chladením elektródy. Na obr. 38 sú zobrazené najdôležitejšie časti horáka, ktorý je ukončený keramikou hubicou. Chladienie u variant približne do 200 A je zabezpečené pomocou plynu, s väčšou prúdovou záťažou sa používa chladienie pomocou kvapaliny. Vráťane rozdielu v chladiení sa horák líši v spôsobe použitia pre ručné a strojové zváranie, kde je podľa toho usposobený pre uchytenie.

## 2.2.5 Prídavné materiály [28]

Prídavný materiál pri metóde TIG sa používa vo forme tyčí alebo drôtov, záležiac na voľbe ručného alebo strojného zvárania. Pri ručnom zváraní používame tyče o priemere 1 až 8 mm, s dĺžkou od 600 do 1000 mm, ktoré sú buď s plným prierezom alebo obsahujú legujúce prvky a iné prísady pre zlepšenie kvality zvaru. Pri strojnom zváraní používame drôt navinutý na cievku o priemere od 0,6 do 2,4 mm. Pre zaistenie posuvu pri mäkkších materiáloch ako je meď, hliník a ich zliatiny je požadovaný strední stupeň pevnosti pri spevnení. Využitie prídavného materiálu pri zváraní naberá dôležitosť pri potrebe doplniť objem zváraného kovu, legovať ho pomocou prísad za účelom zlepšenia vlastností zvaru a priaznivo ovplyvniť metalurgické deje počas zvárania. Prídavný materiál nám dáva v neposlednom rade možnosť tvarovať výsledný zvar a zlepšiť pracovné podmienky pri náročných polohách pri zváraní. Chemické zloženie prídavného materiálu musí byť rovnaké, najvyššie podobné základnému materiálu. Ak sa jedná o zváranie pevnostných konštrukcií je potrebné použiť materiál, ktorý má lepšie mechanické vlastnosti než základný materiál, čím znížime riziko poruchy funkcie takejto konštrukcie v zvaru. Pri zváraní ocelí, ktoré majú vysokú odolnosť voči korózii je potrebné dodržať rovnaké zloženie prídavného materiálu a základného materiálu. Ak je daná oceľ stabilizovaná titánom, je nutné použiť materiál legovaný niobom, aby sa predišlo prepáleniu materiálu.

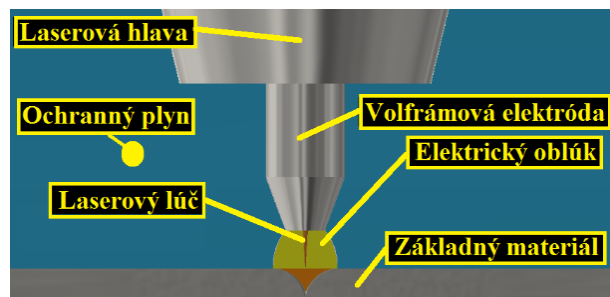
## 2.3 Hybridné zváranie Laser-TIG [40], [105], [106], [107]

Laser-TIG definovaný z hľadiska kvality normou ČSN EN ISO 12932, označuje kombináciu zváracích metód, laserového žiarenia a elektrického oblúku TIG, s viacerými variantami záležiac na zvolení primárneho zdroja tepelnej energie a využitím sekundárneho zdroja pre zlepšenie procesu zvárania vrátane rýchlosti a výslednej kvality zvaru. Ako primárny zdroj je prevažne využívaný laser pre jeho hustotu energie zaisťujúcu hlbší prievar materiálu a TIG plní sekundárnu, podpornú, funkciu procesu zvárania. Takto zvolenú variantu označujeme ako laserové zváranie podporované elektrickým oblúkom, do ktorej ešte spadá možnosť zámény TIG s metódami MIG/MAG (LAGMAW) alebo PAW (PALW). Druhou variantou je laserom podporované konvenčné zváranie, kde primárnu funkciu preberá TIG a sekundárnu laser s nižším výkonom. Treťou variantou je možnosť nahradiť TIG druhým laserom, ktorý sa môže líšiť výkonom, vlnovou dĺžkou alebo kvalitou laserového žiarenia.



Obr. 39 Paralelné usporiadanie zostavy laseru a elektrického oblúku TIG [105]

Z hľadiska usporiadania v smere zvárania máme tri možné kombinácie zostavy, dve paralelne, ktoré sú schematicky znázornené na obr. 39. a jednu koaxiálnu zostavu schematicky znázornenú na obr. 40. Tá je založená na princípe dutej volfrámovej elektródy, cez ktorú prechádza laserové žiarenie a spoločne tak pôsobia na materiál v jednom bode. Prevažne je pre tieto účely nutné využiť laser s vysokou kvalitou zväzku a zároveň nižšou vlnovou dĺžkou kvôli pohlcovaniu žiarenia plazmou, ako má napríklad Nd:YAG laser (1064 nm). Má pozitívny vplyv na možnosť zvýšiť prúd pre elektrický oblúk a navýšiť tak rýchlosť zvárania so súčasným znížením pórovitosti zvaru kvôli symetrickej oblasti okolo keyhole.



Obr. 40 Koaxiálne usporiadanie zostavy laseru a elektrického oblúku TIG [106]

U paralelnej zostavy, kedy laser predbieha elektrický oblúk, je ich kombinácia využívaná pre spomalenie poklesu teploty po zvarení, tzv. dohrev materiálu. Druhú paralelnú kombináciu, kedy elektrický oblúk predbieha laser, je možné využiť pre viacero funkcií, od predohrevu až k nataveniu materiálu, odstráneniu povrchovej nečistoty, ochrannej alebo zoxidovanej vrstvy. Takto predpripravený povrch prispieva k lepšiemu výslednému zvaru a lepšej absorpcii

laserového žiarenia. Laser má pozitívne účinky na elektrický oblúk, keďže svojou vysokou výkonovou hustotou prispieva k vyparovaniu materiálu v oblasti zvarového kúpeľa a pary poskytujú lepšiu vodivú cestu pre elektrický oblúk.

### 2.3.1 Laser-TIG parametre [6], [28], [85], [108], [109], [110], [111]

U metódy hybridného zvarovania sa stretávame s nárastom, viac než len súčtom, nastavení procesných parametrov oboch metód závislých na sebe vrátane niekoľkých spoločných, ktorými sú zvaracia rýchlosť a vzdialenosť laserového lúča od elektródy. U laseru sa nastavuje vzdialenosť ohniska, respektíve jeho výška voči materiálu, výkon laseru, režim práce (pulzný/kontinuálny) a podľa možnosti ochranný plyn, ktorý zároveň môže byť rovnaký ako u elektrického oblúku. Vlnová dĺžka žiarenia, druh laseru a optika závisia od vybavenia prostredia, a nedá sa povedať, že by ich bolo možné automaticky meniť vzhľadom na počítačové náklady nákupu zariadení. Pre elektrický oblúk volíme vyššie spomenutý ochranný plyn vrátane jeho čistoty, veľkosť priemeru elektródy a uhol jej špičky, vzdialenosť medzi jej špičkou elektródy a povrchom materiálu s jej odklonom od normály daného povrchu, veľkosť a druh prúdu, a možný bočný odstup elektródy od krivky zvarovania.

- Výpočet vnášaného tepla

Výkon obidvoch metód súvisí s veľkosťou dodaného tepla pre nahriatie, natavenie základného materiálu alebo materiálu, z ktorého je zložená povrchová vrstva prípadne prídavného materiálu. Od toho sa následne odvíjajú rozmery výsledného zvaru vrátane ovplyvnenia jeho okolitej oblasti a má zásadný vplyv na maximálne možnú rýchlosť zvarovania. Udávaný výkon laseru nie je konečná hodnota, s ktorou by bolo možné počítať ako s plne využitou pre natavenie materiálu. Časť laserového žiarenia je odrazená, časť pohltaná plazmou unikajúcou z keyhole, nepatrná časť žiarenia prechádza skrz materiál a časť sa absorbuje závisiac od absorpčného koeficientu. Z absorbovaného žiarenia, ktoré sa premení na tepelnú energiu, je následne časť využitá pre natavenie materiálu a zvyšok sa rozšíri do materiálu a okolia vedením, prúdením alebo opätovným žiarením nahriateho materiálu. Celkové straty sú zahrnuté a vyjadrené koeficientom účinnosti  $k_{LASER}$  v rovnici 2.1. Zvarovanie elektrickým oblúkom je taktiež ako laser sprevádzané stratami tepelnej energie do materiálu a okolia, ktoré sú vyjadrené taktiež koeficientom účinnosti zvarovania, označeného ako  $k_{TIG}$  v rovnici 2.2.

$$Q_{LASER} = k_{LASER} \cdot \frac{P \cdot 60}{v_s} \quad [kJ \cdot m^{-1}] \quad 2.1$$

kde:  $Q_{LASER}$  – tepelný príkon laseru  $[kJ \cdot m^{-1}]$   
 $P$  – Výkon laserového zdroja energie pre zvarovanie [W]  
 $k_{LASER}$  – koeficient tepelnej účinnosti laseru  
 $v_s$  – zvaracia rýchlosť  $[mm \cdot min^{-1}]$

$$Q_{TIG} = k_{TIG} \cdot \frac{U \cdot I \cdot 60}{v_s} \quad [kJ \cdot m^{-1}] \quad 2.2$$

kde:  $Q_{TIG}$  – tepelný príkon elektrického oblúku TIG  $[kJ \cdot m^{-1}]$   
 $k_{TIG}$  – koeficient tepelnej účinnosti elektrického oblúku TIG  
 $U$  – zvaracie napätie zdroja [V]  
 $I$  – zvarací prúd [A]

$$Q_{SUM} = Q_{TIG} + Q_{LASER} \quad [kJ \cdot m^{-1}] \quad 2.3$$

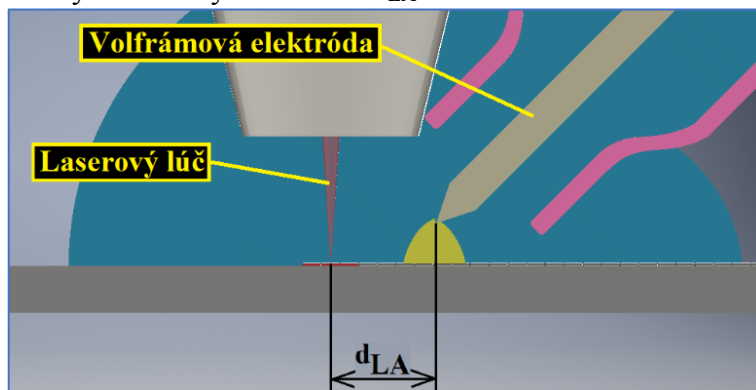
kde:  $Q_{SUM}$  – Celkový tepelný príkon  $[kJ \cdot m^{-1}]$



Veľkosť prúdu u elektrického oblúku pozitívne ovplyvňuje tvorbu zvarových vád u zvárania pozinkovaných plechov. Zvyšovaním hodnoty prúdu do určitého bodu, s ohľadom na vlastnosti materiálu a technologické možnosti, dochádza k dodaniu väčšieho množstva tepla, ktoré pri interakcii s vrstvou zinku ju nataví, dôjde k jej vyparovaniu a odstráneniu z okolia trajektórie zvaru, čím sa zamedzí tvorbe pórov a zníži sa rozstrek zvarového kovu pri laserovom zváraní od výparov zinku. Celkový tepelný príkon využitý pre zvar materiálu vrátane predohrevu je vyjadrený ako súčet jednotlivých príkonov v rovnici 2.3.

- **Rýchlosť zvárania**  
Od zvárackej rýchlosti sa odvíja výsledná cena zvarového spoja a celková možná produkcia za určitý čas. Okrem ekonomickej stránky má vplyv na šírku a hĺbku zvaru, dynamické procesy zvarového kúpeľa a tvorbu pórov. Jej zvyšovaním dochádza k zmenšeniu dodaného tepla na dĺžku, znižuje sa prievar materiálu od laserového lúča, a u pozinkovaných plechov stúpa veľkosť pórovitosti znížením dodaného tepla od elektrického oblúku pri metóde Laser-TIG.
- **Výška ohniska laserového žiarenia voči ploche materiálu**  
Poloha ohniska laserového lúča ovplyvňuje hustotu energie žiarenia pri kontakte s povrchom základného materiálu – ocele a má vplyv na tok roztaveného kovu. Pri hybridnom zváraní je poloha ohniska odlišná oproti použitiu samotného lasera. Elektrický oblúk pôsobí dynamickým tlakom na zvarový kúpeľ a spôsobuje jeho konkávnosť, čiže znižuje pôvodnú výšku materiálu. Tento jav je potrebné kompenzovať znížením výšky ohniska, respektíve jej nastavením tesne pod povrch materiálu ešte pred začatím procesu zvárania. Výsledkom je zachovanie hĺbky zvaru, prípadne čo najefektívnejšie využitie disponibilného výkonu.
- **Vzdialenosť medzi špičkou elektródy a laserovým lúčom –  $d_{LA}$**

Jeden z najdôležitejších parametrov hybridného zvárania popri výkone, rýchlosti zvárania a výške ohniska, zobrazený na obr. 41. Má výrazný vplyv na výslednú geometriu zvaru, rozstrek zvarového kovu a veľkosť pórovitosti zvaru. Pozitívny vplyv sa dostavuje v jej zvyšovaní, čím sa znižuje objem rozstreku



Obr. 41 Vzďialenosť  $d_{LA}$  [111]

zvarového kovu a opotrebenie elektródy. Naopak jej znižovaním sa mierne zvyšuje pórovitosť zvaru vrátane rozstreku a dosahuje sa väčšej hĺbky zvaru materiálu, ktorá je najväčšia pri dopade laserového lúča na najnižšiu časť oblúka. Znižovaním  $d_{LA}$  dochádza k pozitívnemu ovplyvneniu stability oblúka z interakcie oboch metód, avšak elektróda je vystavená väčšiemu teplu, čím je degradovaná a pri skoro nulovej vzdialenosti sa znižuje absorpcia laserového žiarenia materiálom.

## 2.4 Zinok, povrchová ochrana oceli a korózia [4]

Korózia, definovaná normou ČSN EN ISO 8044, je vzájomné pôsobenie kovu, respektíve ocele s jeho okolitým prostredím. Negatívnym výsledkom je zhoršenie mechanických, fyzikálnych alebo chemických vlastností materiálu. Tým dochádza k narušeniu jeho funkcie, zvýšenému opotrebeniu alebo úbytku materiálu. Chrániť oceľ je možné pomocou legovania chrómom, zmenou prostredia alebo jeho vlastností, či katódovou ochranou, kedy sa galvanickým skorodovaním obetuje jeden kov namiesto toho druhého. Štvrtou možnosťou, ako chrániť oceľ pred koróziou, sú ochranné povlaky, ktoré, ako bolo spomenuté na začiatku práce, sa delia na anorganické a organické. Táto práca je zameraná na zváranie oceľového plechu s povrchovou vrstvou zinku, ktorý patrí medzi anorganické povlaky. Po zhodnotení budúcich podmienok prostredia aplikácie, stupňa koróznej agresivity podľa normy ČSN EN ISO 9223 a cenových nákladov spojených s počiatočným zinkovaním sa určí spôsob zinkovania a jeho vlastnosti. Medzi najpoužívanejšie spôsoby zinkovania zaradzujeme žiarové a elektrolytické (galvanické) zinkovanie. Skupinu ostatných tvorí žiarové striekanie, mechanické zinkovanie, šerardovanie (difúzne zinkovanie), sendzimirové zinkovanie, neelektrolyticky nanášané mikrolamelové povlaky zinku a náterové hmoty s vysokým obsahom zinku.

### 2.4.1 Elektrolytické zinkovanie [4], [112]

U elektrolytického zinkovania je potrebné najprv predpripraviť povrch chemickým odmastením. To prebieha v organických rozpúšťadlách, vodných zásaditých roztokoch alebo emulziách. Nasleduje morenie, ktorým sa odstráni okuje a prípadná hrdza na povrchu ocele. K moreniu sa používajú silné kyseliny jednotlivo alebo ich zmiešané roztoky, najčastejšie je to kyselina sírová, kyselina chlorovodíková a zmes kyseliny dusičnej s chlorovodíkovou. Po nich nasleduje elektrochemické odmastenie alkalickým roztokom za pôsobenia jednosmerného prúdu, kedy vzniká hydroxid. Po odmastení sa povrch aktivuje ponorom v kyseline chlorovodíkovej po určitú dobu, čím sa odstráni posledné zbytky oxidov vytvorené prevažne z predchádzajúcich technologických krokov. Nasleduje samotné zinkovanie, kedy je diel z ocele ponorený vo vodnom roztoku, elektrolyte, zinočnatej soli a je zapojený ako katóda k zdroju jednosmerného prúdu. Zinočnatá soľ je zvolená podľa druhu elektrolytu, ktorý môže byť zásaditý, neutrálny alebo kyslý. Anódu tvoria dosky zo zinku s čistotou 99,995 %. Zapnutím zdroja a prechodom prúdu cez obvod sa začne z anódy vylučovať zinok v podobe zinočnatých iónov, ktoré sa usadzujú na povrchu katódy. Je potrebné dbať na správne nastavenie prúdu kvôli jeho veľkosti pre využitie na vylúčenie zinku. Zvyšný, nadbytočný, prúd spôsobuje vylučovanie vodíka, ktorý má negatívny vplyv na ocele náchylné na vodíkovú krehkosť. Vzniknutá vrstva zinku na katóde drží iba pomocou mechanických síl. Normalizované hrúbky vrstvy sú 3, 5, 8, 12 alebo 20 mikrometrov. Na niektorých miestach podľa závislosti geometrie telesa je nutné použiť pomocné anódy pre dodržanie správnej vrstvy zinku. Povrch vzniknutý zinkovaním je veľmi hladký, má strieborný lesk a použitím lesk vytvárajúcich prísad je možné dosiahnuť veľmi lesklý povrch. Pozinkované povrchy sa dodatočne upravujú pasiváciou pomocou chrómu. Historicky používaný šesťmocný chróm je obmedzený na základe smernice RoHS pre jeho karcinogenitu a preto sa využívajú roztoky trojmocného chrómu. Konečný povrch po pasivácii (chromátovaní) môže byť bez zmeny farby alebo nadobudnúť svetlomodrú, žltú, zelenú a čiernu farbu záležiac na hrúbke povlaku a zložení pasivačného roztoku. Finálna úprava spočíva v lakovaní, kedy pomocou vodou riediteľného laku sa utesní zinkový povlak, aby bol chránený pred vlhkosťou a koróznym prostredím. Lak po vyschnutí už viac nie je rozpustný vo vode. Okrem lakovania je za každou operáciou zavedený medzikrok v podobe oplachu, aby sa predĺžila jednotlivá životnosť chemických kúpeľov.

#### 2.4.2 Žiarové zinkovanie [4], [113], [114]

Je charakterizované dlhou životnosťou, odolnosťou, nízkymi vstupnými nákladmi, rovnomerným a kvalitným povlakom po celom povrchu vrátane vnútorných strán, ostrých hrán a výstupkov. Uskutočňuje sa ponorením materiálu, respektíve súčiastky alebo polotovaru v forme plechu, trubiek a pod. do kúpeľa s roztaveným zinkom. Celý proces sa skladá z predúpravy rozdelenej na mechanickú a chemickú časť, a zinkovania. Mechanickou úpravou sa očisťuje povrch od nečistôt, zlepšujú jeho mechanické vlastnosti, vytvárajú sa podmienky pre príľnavosť vrstiev a povlakov, zvyšuje sa korózna ochrana a odolnosť voči opotrebeniu po zinkovaní a zaisťuje požadovaný výsledný vzhľad povrchu. Patrí sem tryskanie, kefovanie, brúsenie a leštenie povrchu. Nasleduje chemická úprava s prvotným odmastením povrchu od tukov a olejov, pomocou alkalických alebo kyslých roztokov, kde pri použití kyslého roztoku je možné vynechať oplach. Najnovšie s prihliadnutím na ekologickejšie procesy výroby sú nahradzané kúpeľmi s tenzidmi a baktériami rozkladajúcimi tuky a oleje. Po odmastení a možnom oplachu nasleduje morenie, ktorým sa odstráni hrdza a okuje v roztokoch kyseliny chlorovodíkovej (10 až 12 %) alebo kyseliny sírovej (maximálne 20 %). Pre zvýšenie účinnosti morenia roztoky obsahujú železnaté soli. Po oplachu je potrebné na materiál naniesť tavivo, ktoré zabraňuje tvorbe oxidov a nasledujúcim ponorením do roztaveného zinku rozpusti oxidy na povrchu oboch kovov, čím dôjde k ich vzájomnému kontaktu. Spôsob nanášania taviva sa delí na dva spôsoby, označené ako suché a mokré zinkovanie.

U suchého zinkovania je po odmastení, morení a oplachoch materiál ponorený do roztoku chloridu zinočnatého a chloridu amónneho. Na jeho povrchu sa zostane tenká vrstva taviva. Pred ponorením a vynorením dielu sa zotru oxidy zinku a popol z spáleného taviva a materiál sa nechá ochladiť vo vode alebo na vzduchu.

U mokrého zinkovania je zinkový kúpeľ rozdelený na dve časti pomocou prekážky. V časti, cez ktorú sa materiál ponára do roztaveného zinku hneď po odmastení, morení a oplachu, je na jeho hladine tavivo, respektíve chlorid amónny. Potom je materiál pretiahnutý do druhej časti, kde sa pred jeho vynorením taktiež zotrie popol z spáleného taviva s oxidmi zinku z jej hladiny a nechá sa ochladiť vo vode alebo na vzduchu.

Tenké plechy sa žiarovo zinkujú v kontinuálnom zariadení, ktorý je založený na uzavretom systéme. Oceľový plech, valcovaný za studena, sa odvíja zo zvitku a je zvarovaný do nekonečného pásu. Prechádza odmastením, po ktorom sa povrch morí alebo necháva zoxidovať. Následne je žíhaný a zbavený oxidov redukciou pri teplote 950 °C. Výsledkom je kovovo čistý povrch chránený pred účinkami vzduchu ochrannou atmosférou a ponorený do roztaveného zinku. Zinkuje sa buď mikrolegovaným, nízkolegovaným alebo vysokolegovaným zinkom. Z neho ďalej vystupuje a prechádza úpravou pomocou ofukovania stlačeným vzduchom, ktorým sa upravuje konečná hrúbka povlaku. Celý tento proces je riadený pomocou elektroniky a snímačov, ktoré merajú jeho hrúbku. Po ňom je plech ochladený, vyrovnaný, ošetrený proti bielej hrdzi, nastrihaný nožnicami a navinutý do zvitkov. Hrúbka zinkového povlaku sa pohybuje od 7 do 42 μm.

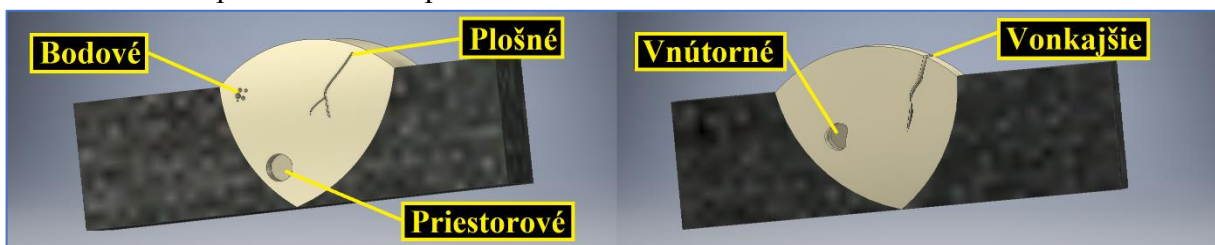
#### 2.4.3 Sendzimirové zinkovanie [115]

Metóda zinkovania, u ktorej je oceľový plech valcovaný za studena, kontinuálne preťahovaný kúpeľom z roztaveného zinku a po ochladení zavalcovaný. Tým sa dosiahne hrúbka zinkového povlaku veľmi podobná ako je u elektrolytického zinkovania, približne od 17 do 23 μm.

Vznikajúcim problémom pri zváraní pozinkovaných plechov je venovaný rozbor zadania na začiatku práce.

## 2.5 Zvarové vady [116], [117], [118], [119], [120], [121], [122], [123], [124]

Vlastnosti materiálu, dielu, či celej konštrukcie, ktoré sa odchyľujú od vlastností predpísaných podľa noriem, technických podmienok alebo vlastností dohodnutých na základe zmlúv podľa prototypu. Často bývajú hlavným štartérom zániku funkčnosti dielu, kedy dochádza k hromadeniu napätí, zmene mechanických, fyzikálnych alebo chemických vlastností materiálu, ktoré za určitých podmienok vyvrcholia k porušeniu jeho celistvosti a vzniku únavového alebo krehkého lomu. Následkom toho dochádza od zanedbateľných škôd až po fatálne škody s možnými obeťami na ľudských životoch. K ich odhaleniu, pokiaľ sú zjavné, nám mnohokrát vystačí pohľad ľudským okom alebo použitie pomôcok určených k ich zisteniu. Druhou variantou sú skryté vady, u ktorých k ich odhaleniu potrebujeme prístroje vrátane laboratórnych skúšok. Po zistení vady alebo väd ich zaradzujeme medzi tie, ktoré sú prípustné a teda nenarúšajú ani nijak inak neovplyvňujú funkciu dielu v požadovanej miere vrátane bezpečnosti a neprípustné, kedy celý diel, prípadne zostava alebo konštrukcia nie je schopná prevádzky bez ohrozenia funkčnosti dielu alebo bezpečnosti. U oboch prípadoch vady delíme ešte na opraviteľné a neopraviteľné.



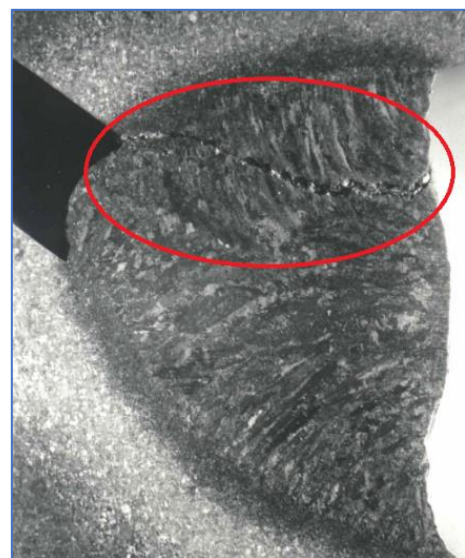
Obr. 42 Typy vad podľa tvaru a polohy [118]

Podľa výskytu vady ich delíme na vonkajšie alebo vnúťorné a podľa tvaru na bodové, plošné a priestorové, vid' obr. 42. Ich vznik závisí od druhu zváraného materiálu a metódy zvárania. Všeobecne sa vady delia podľa normy ČSN EN ISO 6520-1 na trhliny, dutiny, vtrúseniny (tuhé prímiesky), vady odtavovania a závaru, vady tvaru a rozmerov zvaru, a iné vady. Trhliny, jedny z najzávažnejších väd, delíme do štyroch základných typov na horúce, studené, žihacie a lamelárne trhliny. Podľa tvaru je ich možné deliť na pozdĺžne, priečne, hviezdicové, kráterové, skupinu nespojitých trhlín a rozvetvené trhliny. Výskyt trhlín v zvaru býva kombináciou niekoľkých druhov trhlín ako sú napríklad studené s lamelárnymi apod.

- Horúce trhliny

Horúce trhliny, vid' obr. 43, vznikajú v materiáli pri procese zvárania za vysokých teplôt pod solidusom. Delia sa na kryštalizačné, ktoré sa tvoria v procese tuhnutia zvarového kovu (kryštalizácie), likvačné, ktoré sa tvoria počas miestneho natavenia eutektických fáz zvarového kovu ohriateho na teploty pod solidusom a polygonizačné trhliny tvoriace sa v rozsahu teplôt od 600 do 900 °C v dôsledku zvyšných stavov napätosti.

Kryštalizačné a likvačné trhliny súvisia s zníženou ťažnosťou materiálu počas prítomnosti tekutej fázy v tvare filmu na hraniciach zŕn a dendritov. U kryštalizačných trhlín, na ktoré je kov náchylný počas poslednej fázy tuhnutia, dendrity postupne vytvárajú sieťovinu, ktorá bráni v premiestňovaní zvyškov taveniny. Najnebezpečnejšou oblasťou pre ich vznik je stretávanie dendritov v ose zvaru, respektíve uhol ich stretnutia, ktorý ak je veľký ( skoro 180 °), zabraňuje v premiestneniu



Obr. 43 Horúca trhlina [118]

nižšietaviteľných fáz von zo zvarového kovu. Tie sú následne príčinou trhlín, ktoré môžu prechádzať po hraniciach dendritov, buniek a blokov buniek, a vznikajú vo zvarovom kove. U likvačných trhlín sa vznik tekutého filmu vysvetľuje pomocou segregácie alebo penetrácie. V tepelne ovplyvnenej oblasti, kde likvačné trhliny vznikajú, je počas fáze ohrevu prítomná segregácia prvkov s nižšou teplotou tavenia na hraniciach zŕn s následkom zníženia teploty tavenia. Druhou variantou, kedy sa vyprecipitované nižšietaviteľné fázy zachytávajú počas ohrevu na hraniciach migrujúcich zŕn, kde sa natavia a preniknú do hraníc zŕn. Likvačné trhliny sú interkryštalické a šíria sa po hraniciach zŕn.

Hlavnou príčinou ich vzniku v oceliach sa považuje prítomnosť fosforu a síry, ktoré spolu so železom tvoria nízkoteplotné zlúčeniny. Prítomnosť síry je možné eliminovať mangánom, ktorý má vyššiu afinitu k síre tvoríť zlúčeniny. Fosfor nie je možné eliminovať touto cestou a je preto nutné využiť jeho vyššiu rozpustnosť cez  $\delta$ -ferit namiesto austenitu. Preto má vysoký vplyv aj obsah uhlíku, ktorý, nad 0,16 % obsahu, posúva kryštalizáciu do pásma, kde sa vylučuje austenit.

Polygonizačné trhliny vznikajú v tepelne ovplyvnenej oblasti a taktiež v oblasti zvarového kovu. Sú charakteristické pre vysokolegované austenitické ocele a Ni-zliatiny, a súvisia s poruchami na hraniciach migrujúcich zŕn počas ochladzovania v oblasti rekryštalizačnej teploty.

K obmedzeniu horúcich trhlín je potrebné používať ocele, vrátane prídavného materiálu, s veľmi nízkymi obsahmi nečistôt ako je fosfor a síra, legované mangánom. Prospieva zníženie tepelného príkonu kvôli zníženiu objemu nataveného kovu, stupňu segregácie a rastu zrna, prospešné je taktiež zvolenie vhodného tvaru zvaru, čím sa obmedzia deformácie a stavy napätosti.

- Studené trhliny

Studená trhlina, vid' obr. 44, častokrát označovaná aj ako studená vodíkom indukovaná, prípadne neskorá trhlina. Príčinou ich vzniku je difúzny vodík v kombinácii s zvyškovým napätím v materiáli a vlastnosťami jeho mikroštruktúry. Vznikajú v tepelne ovplyvnenej oblasti v koreni a na hranici zvarových spojov, a v zvarovom kove v koreni zvaru a miesta spojenia väčších hrúbok. Tvoria sa počas fázy chladnutia po zvarení pri teplotách nižších ako 300 °C. Príčinou vzniku zvyškového napätia v okolí zvaru je lokálne zahrievanie pri zváraní a ochladzovanie po ňom. Závisí od vlastností základného a prídavného materiálu, ich hrúbky, typu zvaru, postupu zvárania a počiatočnej teploty materiálu (predohrev).

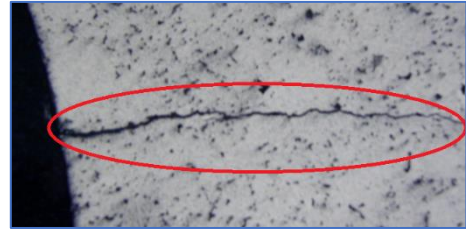


Obr. 44 Studená trhlina [118]

Orientácia šírenia studených trhlín závisí na základe orientácie zvyškových napätí. Z hľadiska mikroštruktúry bol prijatý názor, že podiel martenzitu má vplyv na vznik studených trhlín. Najdôležitejšiu úlohu pri ich vzniku hrá difúzny vodík, ktorého vplyv súvisí priamo so spôsobom zvárania. Preniká (difunduje) do miest s koncentráciou napätia, kde spôsobuje lokálne skrehnutie materiálu a pri prekročení kritického napätia iniciuje trhlinu. Jeho zdrojom môže byť základný i prídavný materiál, nečistoty, vlhkosť prostredia a spôsob ochrany pri zváraní. Ich zákernosť spočíva v oneskorenej dobe vzniku, ktorá môže nastať aj niekoľko dní po zvarení. Obmedziť možnosť vzniku studených trhlín sa naskytá v predohreve materiálu, u ktorého existuje rád postupov a výpočtov pre daný druh ocele. K zníženiu možnosti vzniku trhliny taktiež prispieva zníženie obsahu vodíka vo vstupujúcich prvkoch do procesu zvárania a dohrevom materiálu po zvarení, kde sa teplota pohybuje od 200 do 300 °C po dobu niekoľko hodín, za ktorú stihne vodík uniknúť z oblasti zvaru na maximálne tolerovanú hodnotu.

- Žihacie trhliny

Jedná sa o interkryštalické trhliny, ktoré môžu za bežné poškodenie austenitických, žiarupevných precipitačne spevnených feritických ocelí, ktoré pracujú za zvýšených alebo vysokých teplôt a niklových superzliatin. Vznikajú počas žihania na zníženie vnútorných napätí, pri tepelnom ovplyvnení mnohovrstvových zvarov (húseníc) alebo počas prevádzky za vysokých teplôt. Na výskyt žihacích trhlín, ako je napríklad trhlina na obr. 45, má vplyv chemické zloženie základného materiálu, typ mikroštruktúry v tepelne ovplyvnenej oblasti, vysoký počet zvyškových deformácií v kombinácii so stupňom triaxiality a teplota v oblasti relaxácie deformácie.



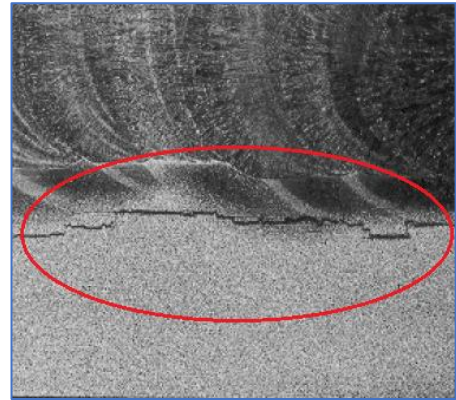
*Obr. 45 Trhlina po žihaní [160]*

Tieto faktory vplyvajú na mikroštruktúru zvaru, úroveň precipitačného a transformovaného spevnenia, úroveň segregácie a rozloženie s veľkosťou zvyškových napätí. Tepelným spracovaním (žiháním) po zváraní je pomocou plastických deformácií znížená veľkosť zvyškových napätí. V mikroštruktúre s náchylnosťou na žihacie trhliny, najčastejšie na hraniciach pôvodných austenitických zŕn, sa nachádzajú oblasti s minimálnou schopnosťou sa plasticky deformovať. Trhliny tak môžu vzniknúť na hraniciach natevenia, v hrubozrnnej tepelne ovplyvnenej oblasti alebo v zvare. Základ pre ich vznik je zotrvanie materiálu na teplotách blízko bodu tavenia, kedy dochádza k rozpusteniu karbidov, karbidnitridov a niektorých typov inklúzií. Rozsah rozpustenia je závislý na parametroch zvárania a pri dostatočnom rozpustení prestanú byť hranice pôvodných zŕn blokované, a začnú rásť. Počas ochladzovania sa tieto oblasti transformujú, na základe vlastností základného materiálu, na martenzit alebo bainit a teda dochádza k transformačnému spevneniu. Počas tepelného ovplyvnenia dochádza k precipitácii karbidov, čím sa spevňuje materiál a zvyšuje stav napätosti v tepelne ovplyvnenej oblasti zvaru. Karbidy vo vnútri zŕn vrátane spevnenia materiálu blokujú zníženie napätosti pomocou spomaľovania pohybu dislokácií. Karbidy vytvárané na pôvodných hraniciach austenitických zŕn rastú oveľa rýchlejšie než tie vo vnútri. Výsledkom tohto procesu je mikroštruktúra s precipitačne spevnenou maticou a s hranicami zŕn s horšou plasticitou. Zvyškové napätia sa, kvôli malej plastickej deformácii mikroštruktúry, zhrnú do úzkych oblastí na hraniciach zŕn, čo vyústi v interkryštalický lom. Druhým negatívnym dejom môže byť segregácia, kedy prvky ako siera, fosfor, cín, antimón, arzén, hliník, bór a mangán môžu segregovať na hraniciach pôvodných austenitických zŕn a znížiť ich kohéziu.

Žihacie trhliny delíme na nízkoteplotné, vysokoteplotné a podnávarové. Nízkoteplotné sa započnú v priebehu ohrevu na teploty žihania pri 200 až 300 °C. Vysokoteplotné vznikajú už pri ohreve materiálu alebo prvých štádiách žihania na zníženie vnútorných pnutí. Rozsah teplôt je od 445 do 700 °C. Podnávarové trhliny sú tzv. podkategóriou vysokoteplotných, akurát žihanie je nahradené viacvrstvom zváraním. Najväčší problém spôsobujú v jadrovej energetike počas navarovania materiálu alebo opravy zvárania. Vyskytujú sa prevažne v hrubozrnnej tepelne ovplyvnenej oblasti, ktorá je pomocou cyklov zvárania nahriata na teplotu pod Ac1. Trhliny sú orientované pod uhlom od 45 do 90 ° k smeru zvárania. Prvky ako chróm, meď, molybdén, vanád, niób a titán podporujú vznik žihacích trhlín, najmä u chróm-molybdén-vanádiových nízkolegovaných ocelí pri obsahu vanádu nad 0,1 %. Vzniku žihacích trhlín je možné predísť limitovaním obsahu legovacích prvkov, použitím medzioperačných teplôt od 150 do 300 °C, veľmi pomalým ohrevom na teploty žihania alebo zvolením dvojstupňového žihania, zvýšením teploty predohrevu, dokonalou úpravou zvaracích hrán, zavedením intermediálneho tepelného spracovania alebo „temperbead“ technik.

- Lamelárne trhliny

Pri pôsobení zvyškových napätí v smere hrúbky plechu môže dochádzať u niektorých zvarových spojov k vzniku trhlín s charakteristickým vzhľadom kaskád, vid' obr.46. Tie sa prednostne iniciujú v hrubozrnnom pásme tepelne ovplyvnenej oblasti alebo základného materiálu a šíria sa oblasťami výskytu zlúčenín síry. Dané trhliny sa prevažne vyskytujú u konštrukcií zvarovaných z valcovaných plechov s obsahmi týchto sírnych zlúčenín a nevznikajú pri prevádzke ale už počas výroby daného dielu, zostavy alebo celej konštrukcie. Za počiatok môžeme brať obsah nečistôt z ingotov, ktoré sú vyrábané klasickou metalurgiou. Pri ich tuhnutí dochádza k segregáčnym a likvačnym procesom, kedy sa prímеси (nečistoty) o nižšej teplote tavenia hromadia medzi dendrity a stredné časti ingotov. Pri spracovaní ingotov valcovaním sa dosiahne rozvalcovanie týchto nečistôt pozdĺžne v smere valcovania a pri pôsobení síl kolmo na povrch plechu sa znížia jeho pevnostné hodnoty. Obmedziť vznik lamelárnych trhlín je možné úpravou zvarového spoja, zmenou v návrhu konštrukcie, použitím oceli s obsahom hliníka a s nízkym obsahom síry, alebo dopovaním cériom, ktorý pozitívne upravuje tvar zlúčenín síry.



**Obr. 46** Lamelárna trhlina [124]

- Kráterové trhliny

Jedná sa o špecifický druh horúcich trhlín, ktoré vznikajú v dutine krátera pri tuhnutí kovu po náhlom ukončení zvarovania, vid' obr. 47.

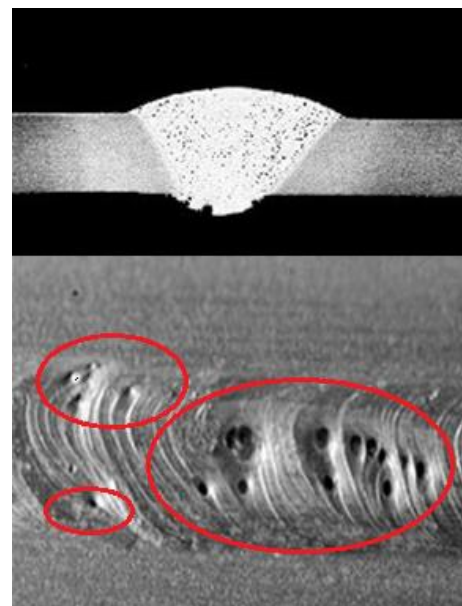


**Obr. 47** Kráterová trhlina [118]

- Plynové dutiny

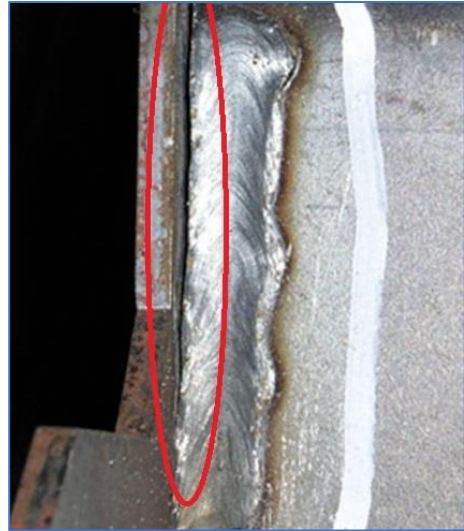
U dutín, zastupujúcich druh zvarových väd, sa jedná o priestorovú vadu, ktorá môže ale aj nemusí byť viditeľná, záležiac na jej polohe. Je ich možné rozdeliť podľa ČSN EN ISO 6520-1 na plynové dutiny, staženiny a mikrostaženiny. U stažení existuje špecifická podkategória medzidendritická staženina.

Plynové dutiny sú objemové vady guľovitého alebo pretiahnutého tvaru, vyplnené plynom. Ich príčinou vzniku môže byť prítomná vlhkosť alebo nečistoty v okolí nataveného kovu vrátane znečisteného ochranného plynu a vysoká rýchlosť zvarovania spojená s rýchlym tuhnutím kovu, pre ktorý bubliny zostanú uzavreté vo vnútri zvaru. Plynové dutiny sa delia na bubliny, zhluky bublín, riadky bublín, červovité dutiny a póry zobrazené na obr. 48.



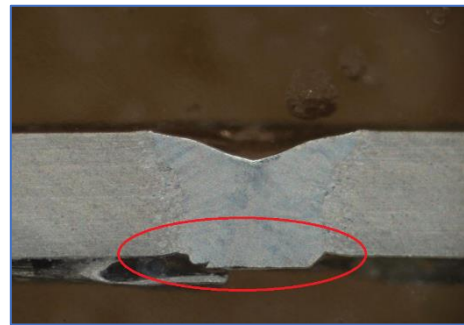
**Obr. 48** Póry v zvarovom spoji [161]

- Vady odtavovania a závaru  
Medzi tento druh väd patria studené spoje a neprevarené korene. Podstatou studených spojov je nedokonalé tavné spojenie zvarového kovu s základným materiálom alebo ďalšou zvarovou húsenicou, ktoré vyústi v nespojenie materiálu zobrazené na obr. 49. Medzi príčiny patrí nesprávne nastavenie zvaracích parametrov súvisiace s dodaním tepla, ako je nedostatočný výkon zdroja a vysoká rýchlosť zvarovania. U neprevarených koreňov dochádza k čiastočnému nataveniu základného materiálu alebo zvarových húseníc. Medzi hlavné príčiny vrátane nedostatočného výkonu zdroja a vysokej rýchlosti patrí ešte nevhodná príprava zvaracích skosení, predbehnutie zvarového kúpeľa a príliš vysoká zvarová húsenica. U zvarovania elektrickým oblúkom má vplyv aj nesprávny priemer elektródy.



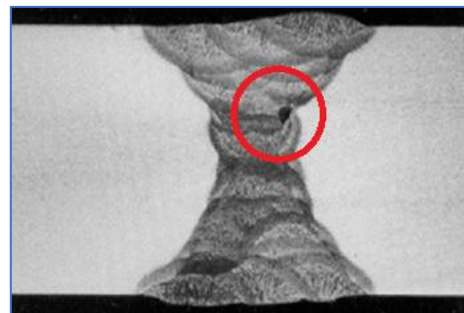
**Obr. 49** Studený spoj [162]

- Vady tvaru  
Jedná sa o chybný tvar vonkajšieho povrchu alebo nedokonalú geometriu zvaru. Medzi vady tvaru patrí zápal, prepadnutý koreň a kvaple. Zápal je charakterizovaný ako ostro natavené prehĺbenie na hraniciach základného materiálu a zvarovej húsenice. Medzi jeho hlavnú príčinu patrí nadmerne vysoký výkon zdroja, u elektrického oblúku je jeho príčinou vrátane výkonu dlhý oblúk a nesprávne vedenie elektródy. U prepadnutého koreňa sa jedná o viditeľný pokles zvarového kovu oproti rovinám základného materiálu, vid' obr. 50. Špeciálny prípad hlbokého prepadnutia koreňa zvaru sa nazýva kvaple.



**Obr. 50** Prepadnutý koreň zvaru [163]

- Vtrúseniny  
Jedná sa o nežiadúce cudzie telesá v zvarovom kove. Delia sa na troskové, tavivové, oxidačné a kovové vtrúseniny. Troskové, zobrazené na obr. 51, vznikajú nedokonalým odstránením trosky medzi jednotlivými zvarovými húsenicami, keď troska predbieha oblúk alebo zlým položením zvarovej húsenice. Oxidačné sú zapríčinené nedokonalým odstránením nečistôt z povrchu základného materiálu pred natavením materiálu, ako sú napríklad oxidy hliníka. Príčinou vzniku kovových vtrúsením je u elektrického oblúku vysoký výkon, dotyk (volfrámovej) elektródy s zvarovým kúpeľom a porušenie plynovej ochrany.



**Obr. 51** Trosková vtrúsenina [164]



- Iné vady  
Patria sem všetky ostatné vady, ktoré nie je možné zaradiť medzi vyššie uvedené typy, ako je napríklad rozstrek materiálu. Jedná sa o zachytenie vymršteného zvarového kovu na základnom materiáli. Medzi hlavné príčiny vzniku patrí vlhkosť a nečistoty v okolí zvarovej plochy, nadmerne vysoký výkon. U elektrického oblúku vrátane nich sa ako príčina uvádza aj nesprávna polarita a dlhý oblúk. Rozstrek materiálu je zobrazený na obr. 3 a obr. 9 na začiatku práce v kapitole rozbor zadania.

Prípustnosť jednotlivých vád závisí od ich druhu, veľkosti a početnosti výskytu v závislosti od typu zvaru a dielu, zostave alebo konštrukcií. Ich hodnotenie vychádza z možnej vzájomnej interakcie geometrie celého výrobku, stavov napätostí, orientácie a typom vád s ich veľkosťou, mechanických vlastností zvarov, pracovného prostredia výrobku apod. Podľa toho prípustnosť jednotlivých vád stanovuje konštrukcia a ovplyvňuje to technológia. Interval veľkosti vád sú uvedené pre tri stupne akosti označené ako B, C a D. Kvalitu zvarových spojov ocele, vytvorených tavným zváraním okrem zvárania zväzkom elektrónov a laserom, stanovuje norma ČSN EN ISO 5817. Norma ČSN EN ISO 13919-1 stanovuje kvalitu zvarových spojov ocele vytvorených práve laserom a zväzkom elektrónov. Pre hybridné zváranie a ním vytvorené zvarové spoje ocele, je kvalita stanovená normou ČSN EN ISO 12932.

## 2.6 Skúšky zvaru [125]

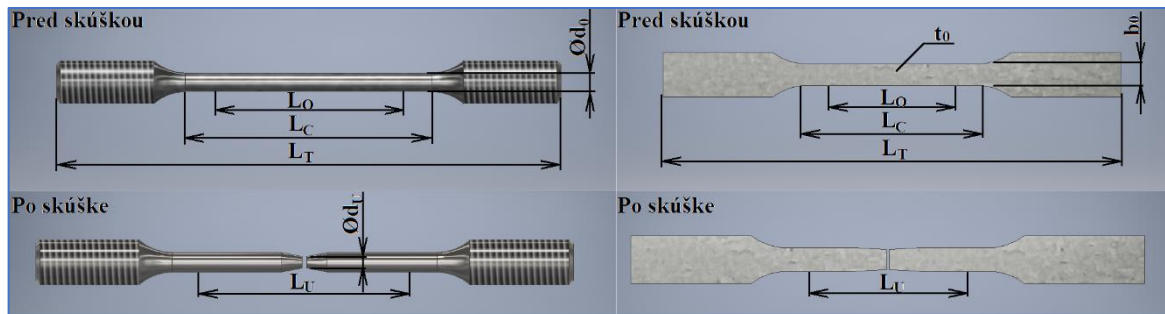
Pri navrhovaní akéhokoľvek dielu alebo celej konštrukcie sa vrátane životnosti kladie vysoký dôraz na spoľahlivosť a bezpečnosť počas prevádzky, i mimo nej. Záležiac na legislatíve, technických normách a požiadavkách zákazníka, s ktorými súvisí prostredie a jeho podmienky počas prevádzky, návrh použitého materiálu a jeho funkcie vrátane konečnej podoby, je nutné daný výrobok zaradiť, klasifikovať a kategorizovať. Následne od toho projektant stanoví jednotlivé okrajové podmienky pre všetky oblasti vrátane akosti výrobku a na ich základe je konštruktérom vytvorená výrobná výkresová dokumentácia. Ďalším krokom je technologické oddelenie, kde vytvorí sa výrobo-technologická dokumentácia, stanoví objem potrebného materiálu, vytvorí návrhy prípravkov, technologických postupov, inštrukcií apod. Predpis požiadaviek na stupeň kvality zvarových spojov, a s tým spojených spôsobov kontrol a ich rozsahu stanovuje projektant alebo konštruktér. Systém managementu akosti, pri zváraných dieloch, sa riadi normou ČSN EN ISO 3834-2,-3,-4, u koľajových vozidiel je to ČSN EN 15085. Pre kontrolu zvarových spojov a zaručenie ich vlastností boli vytvorené štandardizované skúšky. Ak sa nejedná o mikroskopické vady, pre ktoré by bolo potreba zabezpečiť špecializované pracoviská s nákladným vybavením, tak k zisteniu takýchto, makroskopických, vád zvaru stačí vizuálna kontrola, použitie ultrazvuku apod. Skúšky zvarových spojov sa delia na dva skupiny, na deštruktívne a na nedeštruktívne.

### 2.6.1 Deštruktívne skúšky [125], [126], [127], [128], [129], [130], [131], [132]

Jedná sa o skupinu skúšok, u ktorých je celistvosť materiálu úplne porušená. Overujeme pomocou nich úžitkové vlastnosti, ktoré zaisťujú odolnosť voči vonkajším vplyvom ako je zaťaženie a jeho charakter, okolité prostredie a štruktúrny stav. Sú vhodné pri veľkosériovej výrobe a stanovení postupu zvárania. Systém kvality vykonávania deštruktívnych skúšok sa riadi normou ČSN EN ISO 17025. Medzi deštruktívne skúšky patrí skúška ťahom, skúška rázom v ohybe, skúška lámavosti, skúška tvrdosti, skúška mikroštruktúry a makroštruktúry.

- Skúška ťahom  
Je to základná mechanická skúška, ktorá sa vykonáva podľa normy ČSN EN ISO 6892-1 pre pokojové teploty, pre zvýšené teploty je to podľa normy ČSN EN ISO 6892-2 a pre nízke teploty podľa normy ČSN EN ISO 6892-3.

Postup uskutočňovania skúšok a rozmery skúšobných vzoriek pre tupé zvarové spoje sú podľa normy ČSN EN ISO 4136 a pre preplátavané zvarové spoje sú podľa normy ČSN EN ISO 9018.



Obr. 52 Modely skúšobných telies pre skúšku ťahom [127]

$L_0$  – počiatočná dĺžka meraného úseku

$L_C$  – dĺžka úseku podrobeného skúške

$L_U$  – konečná meraná dĺžka po lome

$L_T$  – celková dĺžka skúšobného telesa

$\varnothing_{d_0}$  – počiatočný priemer skúšobného telesa v mieste meraného úseku

$\varnothing_{d_u}$  – konečný (minimálny) priemer skúšobného telesa v mieste meraného úseku

$t_0$  – počiatočná hrúbka skúšobného telesa v mieste meraného úseku

$b_0$  – počiatočná šírka skúšobného telesa v mieste meraného úseku

Služi pre zistenie pevnostných a plastických charakteristík, a spočíva v namáhaní telesa na ťah plynulým zvyšovaním sily až do medzného stavu, kedy sa teleso, ktorého model je zobrazený na obr. 52, roztrhne. Proces skúšky začína prípravou skúšobného telesa. Zvarový diel sa nareže na jednotlivé vzorky takým spôsobom, aby zvar bol umiestnený v strede telesa. Od stredu v rovnakej vzdialenosti sa vyznačia koncové body (rysky), ktorých vzájomná vzdialenosť udáva rozmer  $L_0$ . Je potrebné dbať na to, aby hĺbka neovplyvnila výsledok celej skúšky. Ak sa jedná o tyč kruhového prierezu, je odmeraná jej priemer na troch miestach, v jej strede a na koncoch počiatočného meraného úseku ( $L_0$ ) mikrometrom s presnosťou na 0,01 mm. U plochej tyče sa zmeria jej hrúbka v mieste zvaru s presnosťou na 0,01 mm a taktiež v tom mieste jej šírka s presnosťou na 0,1 mm. Z týchto rozmerov sa prepočíta obsah prierezu telesa v meranom úseku, ktorý je potrebný pre výpočty materiálových charakteristík. Po zvolení silového rozsahu s rýchlosťou zaťažovania sa vzorky vystredia a upnú do čelusti trhacieho stroja. Zapnutím merania chvíľu trvá, pokiaľ sa čeluste „zahryznú“ do telesa. Následne potom je možné zaznamenávať objektívne výsledky, ako je veľkosť sily a deformácia na jednotku času. Proces merania je ukončený roztrhnutím telesa lomom na dve časti a nasleduje výpočet materiálových charakteristík z vykresleného ťahového diagramu. Materiály je možné rozdeliť do skupín podľa medze klzu na materiály s výraznou (hornou a dolnou) medzou klzu ako majú napríklad mäkké ocele a nevýraznou medzou klzu u vysokopevnostných materiálov. Pre tieto prípady sa stanovuje zmluvná medza klzu, ktorá je rovnocennou náhradou reálnej medze klzu. Určuje sa pomocou ťahového diagramu, kde sa narysuje priamka rovnobežná s lineárnou časťou grafu posunutá o 0,2 % veľkosti deformácie. Priesečník tejto priamky a priebehu v diagrame udáva zmluvnú medzu klzu. Tento postup je možné použiť iba pre prípady, keď bol dodržaný prevod deformácie 10:1. V prípade menšieho prevodu je možné určiť približnú medzu klzu zo sily, kde sa začína odklon od lineárnej časti priebehu. Pre výpočet ťažnosti sa používa konečná meraná dĺžka po lome  $L_U$ , ktorá sa odmera priložením roztrhnutých častí k sebe a zaznamenaním vzdialenosti rysiek pôvodnej  $L_0$ . Tento postup je taktiež možné použiť iba pre prípady, kedy vzdialenosť lomu od miesta koncovkej značky je jedna tretina dĺžky  $L_0$ . Pri nesplnení tejto podmienky je hodnota ťažnosti neplatná kvôli nerovnomernému rozloženiu deformácií po celej dĺžke tyče. Hodnota ťažnosti je ovplyvňovaná dĺžkou  $L_0$ , ktorú je nutné uviesť v označení. Pri krátkej tyči je rovná 5-násobku priemeru  $d_0$ , u dlhšej tyče je to

desaťnásobok. Pre tenké plechy, drôty a profily sa volí väčšia dĺžka ako napríklad 50, 80, 100 a 200 mm, s tým, že je ju taktiež nutné uviesť v meraní. Na ťahovú skúšku využívame už predtým spomenuté trhacie stroje, ktoré môžu byť mechanické alebo hydraulické. Pozostávajú z rámu stroja, zaťažovacieho zariadenia a zo zariadení na meranie veličín.

Priebeh ťahového diagramu je možné rozdeliť do niekoľkých oblastí. V prvej oblasti do medze klzu je priebeh medzi zaťažujúcou silou a pružnou deformáciou lineárny. Po prekonaní medze klzu nastáva trvalé predĺženie telesa a deformácia sa rozkladá po celej dĺžke skúšaného úseku. Pri pokračovaní vo zvyšovaní záťaže telesa nastáva spevňovanie materiálu, stúpa sila až do maximálnej hodnoty  $F_m$ . Od tejto hodnoty sa na telese objaví zúženie, nazvané kŕčok, kde sa znižuje prierez, znižuje sa pôsobiaca (odporová) sila, teleso sa rozťahuje až do úplného roztrhnutia. Materiálové vlastnosti vypočítateľné z ťahového diagramu:

- Hookov zákon (lineárna závislosť deformácie na napätí)
 
$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad [MPa] \quad 2.4$$
 kde:  $\sigma$  – napätie [MPa]  
 $\varepsilon$  – pomerné predĺženie [-]  
 $E$  – modul pružnosti v ťahu [MPa]
  
- Medza klzu
 
$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [MPa] \quad 2.5$$
 kde:  $R_e$  – medza klzu [MPa]  
 $F_e$  – zaťaženie na medzi klzu [N]  
 $S_0$  – počiatočný obsah prierezu skúšobného telesa [mm<sup>2</sup>]
  
- Medza klzu zmluvná
 
$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [MPa] \quad 2.6$$
 kde:  $R_{p0,2}$  – medza klzu zmluvná [MPa]  
 $F_{p0,2}$  – zaťaženie, pri ktorom teleso dosiahne trvalé predĺženie 0,2 % z celkovej počiatočnej dĺžky [N]
  
- Medza pevnosti
 
$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [MPa] \quad 2.7$$
 kde:  $R_m$  – medza pevnosti [MPa]  
 $F_m$  – maximálne zaťaženie [N]
  
- Kontrakcia
 
$$Z = \frac{S_0 - S_U}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad 2.8$$
 kde:  $Z$  – kontrakcia [%]  
 $S_U$  – najmenší obsah prierezu po pretrhnutí skúšobného telesa [mm<sup>2</sup>]
  
- Ťažnosť
 
$$A = \frac{L_U - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad 2.9$$
 kde:  $A$  – ťažnosť [%]  
 $L_U$  – konečná meraná dĺžka po lome [mm]  
 $L_0$  – počiatočná dĺžka meraného úseku [mm]

- Skúška rázom v ohybe  
Deštruktívna skúška na zistenie húževnatosti materiálu, ktorá sa vykonáva podľa normy ČSN ISO 148-1, -2, -3 kde kyvadlovým kladivom, vid' obr. 53, sa skúša prerazenie skúšobného telesa. Materiál, respektíve zvar by mal okrem pevnostných vlastností vykazovať dostatočnú húževnatosť, aby sa predišlo krehkému lomu. Húževnatosťou materiálu sa rozumie spotrebovaná mechanická energia na plastickú deformáciu materiálu a je vyjadrená kombináciou pevnosti a tvárnosti, daná plochou ťahového diagramu. Je veľmi závislá od teploty materiálu, stavu napätosti, podmienok namáhania a rýchlosti deformácie. Pre jej zistenie sa v praxi pomocou skúšky rázom v ohybe meria spotrebovaná energia využitá na porušenie skúšobnej telesa (tyče) obsahujúcej vrub s tvarom U alebo V, ktoré je umiestnené a orientované podľa normy ČSN EN ISO 9106. Výsledkom je rázová húževnatosť označovaná KC.



Obr. 53 Charpyho kyvadlové kladivo [165]

$$KC = \frac{K}{S_0} \quad [J \cdot cm^{-2}] \quad 2.10$$

kde: KC – rázová húževnatosť  $[J \cdot cm^{-2}]$

K – nárazová práca [J]

$S_0$  – plocha priečného prierezu telesa pod vrubom  $[cm^{-2}]$

$$K = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) \quad [J] \quad 2.11$$

kde: m – hmotnosť kladiva [kg]

g – gravitačné zrýchlenie =  $9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$

$h_1$  – počiatočná výška vyzdvihnutého kladiva oproti skúšobnému telesu [m]

$h_2$  – maximálna výška oproti skúšobnému telesu, ktorú kladivo dosiahne po prerazení skúšobného telesa [m]

Meranie začína odmeraním výšky  $a$  a šírky  $b$  pod vrubom skúšobného telesa, z ktorých sa vypočíta obsah prierezu. Následne sa skúšobné teleso o teplote  $t$  položí na podpery kladiva tak, aby rovina súmernosti kladiva prechádza osou vrubu s medznou odchýlkou  $\pm 0,2 \text{ mm}$ . Po prelomení telesa kladivom sa na stupnici zariadenia odčíta veľkosť spotrebovanej energie, z ktorej sa stanoví rázová húževnatosť.

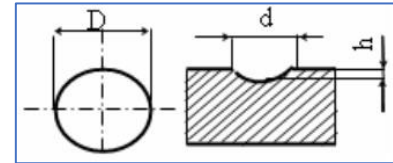
- Skúška tvrdosti  
Tvrdosť, vyjadrená ako odpor voči deformáciám vnikaním geometricky definovaného telesa, je ďalšia z veľmi dôležitých materiálových vlastností, častokrát rozhodujúca. Žiadaná u trieskového obrábania, tvárnenia alebo meracích prístrojov, na druhej strane jej vysoká hodnota u zvaru môže značiť vznik problémov, napríklad krehkosť spojenia a tým narušenú funkčnosť dielu. Je ju možné vyjadriť ako funkciu závislú na pružných (modul pružnosti v ťahu a smyku, rázová húževnatosť) a plastických vlastnostiach materiálu vrátane deformačného



Obr. 54 Univerzálny tvrdomer SHR-187.5 [166]

spevňovania, taktiež na tvare, rozmeroch a tvrdosti vtlačaného telesa, jeho rýchlosťou vtlačania a veľkosťou pôsobiacej sily na materiál, a ich vzájomným trením. Metódy na skúšanie tvrdosti je možné rozdeliť na vtlačanie, vrypové, kyvadlové a odrazové. Z hľadiska rýchlosti zaťažovania na statické a dynamické. Medzi najpoužívanejšie metódy sa zaradzujú vtlačacie ako sú skúšky tvrdosti podľa Brinella, Vickersa a Rockwella merané tvrdometrom, obr. 54.

Skúška tvrdosti podľa Brinella, definovaná podľa noriem ČSN EN ISO 6506-1, -2, -3, -4, spočíva vo vtlačaní guličky z ocele (HBS) alebo spekaného karbidu (HBW) do povrchu skúšaného materiálu za pôsobenia sily. Z odmeraného priemeru otlačku, zobrazeného na obr. 55, sa vypočíta obsah obtlačeného povrchu v materiáli podľa rovnice 2.12:



Obr. 55 Priemer guličky  $D$  a priemer vtlačku  $d$  s hĺbkou  $h$  u skúšky podľa Brinella [128]

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [N \cdot mm^2] \quad 2.12$$

kde: HB – tvrdosť podľa Brinella [ $N \cdot mm^{-2}$ ]  
 F – zaťažujúca sila pôsobiaca na guličku [N]  
 D – priemer oceleovej guličky [mm]  
 d – maximálny priemer vtlačku [mm]

Priemer guličky sa volí 1, 2, 2,5, 5 a 10 mm, pričom hodnota závisí od rozmerov skúšobného telesa. Prednostne sa volí 10 mm, ale platí zásada, že hrúbka telesa musí byť 10-násobná než je hĺbka vtlačku, vzdialenosť od okraja 2,5-násobok priemeru vtlačku a vzdialenosť medzi nimi musí byť najmenej 4-násobok ich priemeru. Veľkosť zaťažujúcej sily sa volí podľa priemeru guličky a predpokladanej tvrdosti skúšobného materiálu podľa rovnice 2.13 a je potrebné, aby maximálny priemer vtlačku bol v intervale od 25 do 60 % priemeru guličky.

$$F = 9,81 \cdot K \cdot D^2 \quad [N] \quad 2.13$$

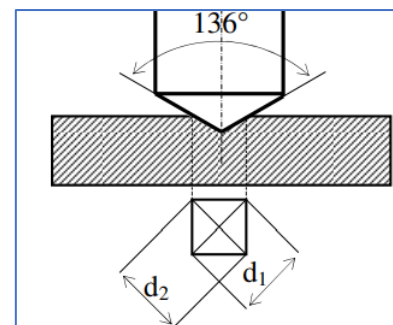
kde: K – konštanta závislá od druhu materiálu a jeho tvrdosti

Hodnota konštanty napríklad pre cín alebo olovo sa rovná 1, u hliníku 5 a liatiny je to až 30. Čas pôsobenia guličky pod záťažou je pre zliatiny železa od 10 do 15 sekúnd, pre neželezné kovy to môže byť až 180 sekúnd a volí sa taktiež od druhu materiálu a predpokladanej tvrdosti. Pri rozhodnutí zvoliť odlišný čas je potrebné, aby bol uvedený v zápise výsledkov z merania. Napríklad zo zápisu 550 HBS 1/30/20 je možné vyčítať, že výsledná dosiahnutá hodnota tvrdosti je 550  $N \cdot mm^{-2}$  pri vtlačaní oceleovej guličky o priemere 1 mm so zaťažujúcou silou 294 N po dobu 20 sekúnd.

U skúšky podľa Vickersa, definovaná podľa noriem ČSN EN ISO 6507-1, -2, -3, -4, je namiesto guličky používaný štvorboký diamantový ihlan s vrcholovým uhlom 136°, kde sa po odľahčení zmerajú uhlopriečky vtlačku s presnosťou na  $\pm 0,001$  mm, z ktorých sa vypočíta stredná hodnota (priemer). Tvrdosť podľa Vickersa je podľa rovnice 2.14:

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2} \quad [N \cdot mm^2] \quad 2.14$$

kde: HV – tvrdosť podľa Vickersa [ $N \cdot mm^{-2}$ ]  
 F – zaťažujúca sila [N]  
 d – stredná hodnota uhlopriečok  $d_1$  a  $d_2$  [mm]



Obr. 56 Rozmery uhlopriečok  $d_1$  a  $d_2$  vrátane veľkosti uhlu štvorbokého ihlanu u skúšky podľa Vickersa [128]

U skúšky sa volia hodnoty zaťažujúcej sily podľa tabuľky 5.

Tab. 5 Hodnoty zaťažujúcej sily skúšky podľa Vickersa [128]

Označenie	1	2	2,5	3	5	10	20	30	50	100
Zaťažujúca sila [N]	9,8	19,6	24,5	29,5	49	98	196	294	490	980

Pri skúške podľa Vickersa musí byť dodržaná vzdialenosť vtláčkov od seba navzájom i od okraja minimálne 2,5-násobku strednej hodnoty  $d$ , hrúbka skúšobného telesa najmenej 1,5-násobku strednej hodnoty  $d$ . Doba trvania zaťaženia sa určuje podobne ako u Brinella, pokiaľ je odlišná než obvyklá pre daný druh materiálu, je potrebné, aby taktiež bola uvedená vo výsledku. Napríklad 550 HV30/20 znamená, že výsledná tvrdosť  $550 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  bola zistená pri vtláčaní intendoru (štvorbokého ihlanu) silou 294 N po dobu 20 sekúnd.

Skúška tvrdosti podľa Rockwella, definovaná normami ČSN EN ISO 6508-1, -2, -3, -4, je uskutočnená vtláčaním diamantového kužeľa s vrcholným uhlom  $120^\circ$  pre stupnice A a C, a kalenou oceľovou guľičkou s priemerom  $D = 1,587 \text{ mm}$  pre stupnicu B. Pri meraní tvrdosti podľa stupníc A a C začína priložením hrotu kužeľa k povrchu materiálu a zaťažením počiatočnou silou, čím vznikne prienik do materiálu. Stupnica prístroja sa v tú chvíľu nastaví do východiskovej polohy a následne sa zaťaží prídavným zaťažením, ktoré nastupuje plynulým vzrastom do svojej maximálne zvolenej hodnoty po dobu od 2 do 8 sekúnd. Po ustálení vnikania hrotu do materiálu sa odstaví prídavné zaťaženie a zníži sa tým hĺbka vtláčenia o pružnú deformáciu, no hrot ostane v plasticky deformovanom vtláčku. Základná hĺbka pre túto metódu je 0,2 mm, ktorá je rozdelená do stupnice o 100 dielikoch (1 dielik = 0,002 mm). Výsledná tvrdosť sa vypočítava podľa rovnice 2.15:

$$HRA = HRC = 100 - e \quad [-] \quad 2.15$$

kde: HRA/HRC – tvrdosť podľa Rockwella [-]

$e$  – hĺbka hrotu v plasticky deformovanom vtláčku vyjadrená dielikmi [-]

U skúšky podľa Rockwella pre stupnicu B je postup podobný až na rozdielny intendor v tvare guľičky, veľkosť zaťažovacej sily a základnú hĺbku so stupnicou. Základná hĺbka 0,26 mm a je rozdelená do stupnice o 130 dielikoch (1 dielik = 0,002 mm).

$$HRB = 130 - e \quad [-] \quad 2.16$$

kde: HRB – tvrdosť podľa Rockwella [-]

U Rockwellovej skúšky je dôležité, aby skúšobné teleso bolo uložené na tuhom telese, a styčné plochy medzi telesom a podložkou prístroja boli čisté. Minimálna hrúbka telesa sa musí rovnať 8-násobku hĺbky vtláčku.

Počiatočné zaťaženie 98 N, je pre stupnice A, B a C rovnaké, rozdiel je až v prídavnej zaťažovacej sile, kde u HRA je sila 490 N, u HRB 883 N a u HRC to je 1373 N. Výsledná veľkosť sa označuje v tvare veľkosť tvrdosti a za tým nasleduje označenie skúšky podľa stupnice, napríklad 34 HRC.

Tvrdosť je možné určiť i komparačnou metódou s Poldi kladivkom. Princíp spočíva vo vložení etalónu, u ktorého poznáme jeho tvrdosť, medzi intendor a úderník, viď obr. 57. Úderom kladiva po úderníku intendor vytvorí vtláčok do etalónu a taktiež skúšobného materiálu, kde zmeriame ich priemery, ktoré dosadíme do porovnávacej rovnice 2.17:

$$HB_M = HB_T \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d_T^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_M^2}} \cdot \text{mm}^2 \quad 2.17$$

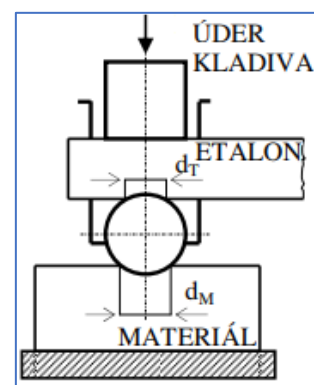
kde:  $HB_M$  – tvrdosť materiálu podľa Brinella [ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ]

$HB_T$  – tvrdosť etalónu podľa Brinella [ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ]

$D$  – priemer oceľovej guľičky [mm]

$d_T$  – maximálny priemer vtláčku v etalóne [mm]

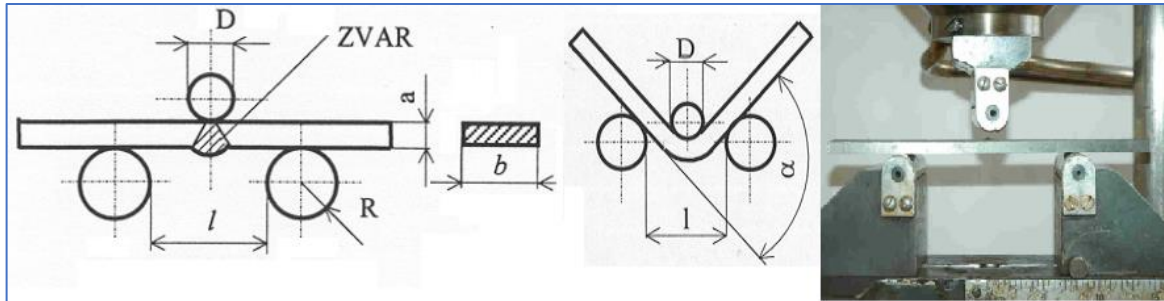
$d_M$  – maximálny priemer vtláčku v materiáli [mm]



Obr. 57 Princíp Poldiho kladivka [128]

- Skúška ohybom

Pri skúške ohybom, definovanou normou ČSN EN ISO 7438, sa určuje deformačná schopnosť kovu namáhaním na ohyb, presnejšie sa skúšobná tyč ohýba pomocou zaokrúhleného trňa až do stavu, kedy na strane s ťahovým napätím vznikne trhlina, prípadne sa dosiahne predpísaný uhol, rovnobežnosť ramien alebo ohyb až do doľahnutia ramien.



$D$  – priemer trňa

$R$  – polomer zaoblenia podpôr

$l$  – vzdialenosť podpôr

$a$  – hrúbka skúšobného materiálu

$b$  – šírka skúšobného materiálu

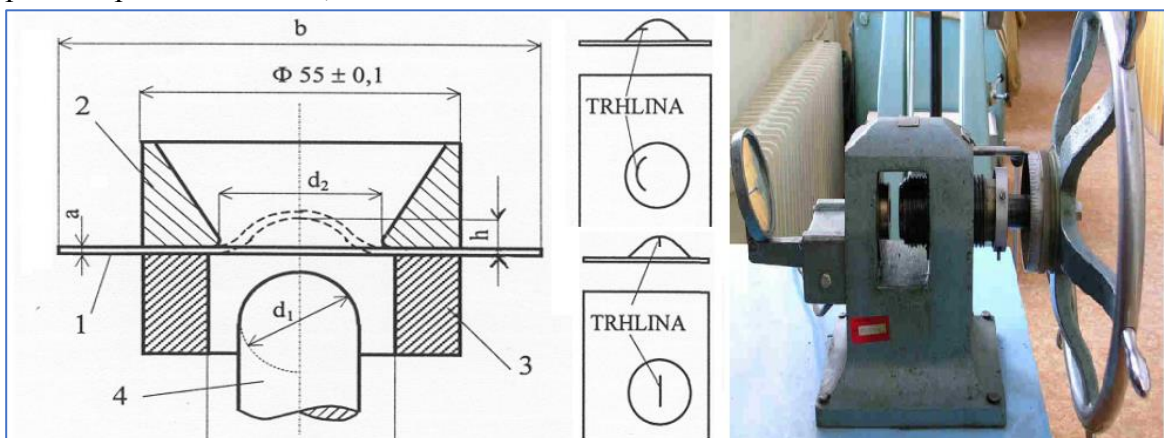
$\alpha$  – uhol ohybu

**Obr. 58** Princíp skúšky ohybom [129]

Skúšobné tyče sú kruhového, obdĺžnikového, štvorcového alebo mnohouholníkového prierezu. Tyče so šírkou do 20 mm sa používajú bez nejakých úprav veľkosti šírky. Pri väčších šírkach sa odoberú vzorky so šírkou od 20 do 50 mm, pričom hrúbka by mala zodpovedať jej polovici. Ak je hrúbka väčšia ako 25 mm, je nutné tyč upraviť obrábaním na hrúbku 25 mm a uložiť do stroja orientovanú tak, aby neopracovaná časť bola vo výsledku na strane s ťahovým napätím. Tyče, s kruhovým alebo mnohouholníkovým prierezom, je možné testovať do priemeru maximálne 50 mm, nad tento priemer je ich nutné opracovať, aby spĺňovali podmienku. Ak počas skúšky s predpísaným uhlom ohybu a priemerom trňa nevznikla trhlina na materiáli, skúška dopadla úspešne.

- Skúška hĺbením plechov a pásov podľa Erichsena

Pre posúdenie tvárniteľnosti plechov od 0,1 do 2 mm máme k dispozícii skúšku hĺbením plechov podľa Erichsena, definovanú normou ČSN EN ISO 24842.



1 – skúšobný plech

2 – ťažnica

3 – pridržiavač

4 – ťažník

$d_1$  – priemer guľovitej časti ťažníka

$d_2$  – vnútorný priemer ťažnice

$d_3$  – vnútorný priemer pridržiavača

$h$  – veľkosť hĺbky prehĺbenia

$a$  – hrúbka plechu

$b$  – šírka plechu

**Obr. 59** Princíp skúšky hĺbením podľa Erichsena [129]

Princíp skúšky spočíva vo vtláčaní ťažníka s guľovitým zakončením do skúšobného plechu, ktorý je medzi pridržiavačom a ťažnicou prítlačnou silou 10 kN, zobrazeným na obr. 59. Ťažník, pomocou hydraulického alebo mechanického systému, sa vtláča až do okamihu vzniku trhliny v skúšobnom plechu a následne sa odmeria veľkosť prehĺbenia s presnosťou na  $\pm 0,1$  mm, ktoré je charakteristikou materiálu u Erichsenovej skúšky. Rýchlosť vtláčania je konštantná od 5 do  $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . U hlbokoťažných plechov dochádza k trhline vo vrstevniciach, ktorá má typický okrúhly tvar (obr. 59 vyššie umiestnená trhlina). Pre vláknité materiály, nevhodné pre tvárnenie, je tvar trhliny vychádzajúci zo stredu (obr. 59 nižšie umiestnená trhlina). Materiál je vyhovujúci, ak jeho výsledné prehĺbenie je rovné alebo väčšie než predpísané v materiálovom liste.

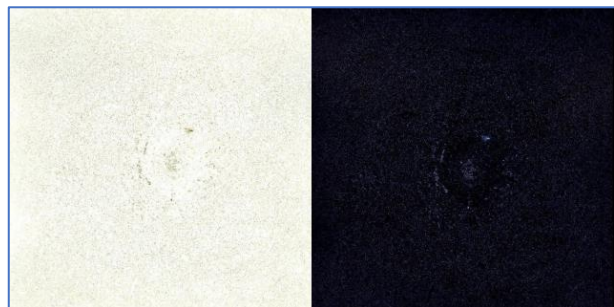
- Metalografické vyhodnotenie

Skúšky, definované normou ČSN EN ISO 17639, ktoré sa využívajú pre zviditeľnenie štruktúry a sledovanie jej vlastností pomocou voľného oka, svetelného alebo elektrónového mikroskopu. Podľa veľkosti zväčšenia použitého pre skúmanie štruktúry sú skúšky rozdelené do dvoch skupín, na makroskopickú a mikroskopickú kontrolu.

U makroskopickej postačuje použitie samotného oka pre zhodnotenie vlastností, lupy alebo mikroskopu do 50-násobného zväčšenia. Uskutočňuje sa na vzorku zvarového kovu odobraného priečne na osu zvaru, ktorý obsahuje zvarový kov, tepelne ovplyvnenú oblasť a základný materiál. Medzi makroskopické skúšky patrí makrolept a Baumannov odtlačok.

Makrolept predstavuje vnútornú kontrolu materiálu, respektíve vizuálne hodnotenie makro-výbrusu po jeho naleptaní. Pri odbere vzorky musí byť dodržané, aby jej povrch nebol tepelne ovplyvnený metódou odberu a výbrusom, musí byť bez nečistôt a odmastený. Makroštruktúra je vyvolaná naleptaním, ktoré spočíva v ponorení materiálu alebo opakovaným potrením povrchu leptadlom (roztokmi silných kyselín) s vhodným zložením závislým na chemickom zložení materiálu. Intenzita naleptania závisí od materiálu a štruktúrnych parametroch, ktoré chceme zhodnotiť. Po naleptaní sa povrch opláčne vodou, liehom a nechá vysušiť prúdom vzduchu. Pomocou makroleptu je možné skúmať kvalitu zvarových spojov, odliatkov a tvárnených materiálov. Skúma sa usmernenie štruktúry, tvar s veľkosťou zŕn a dendritov, prítomnosť dutín a rozriedených oblastí, výskyt hrubých vtrúsenín, zhluk karbidických častíc, segregáciu a trhliny. Makrolept pre znázornenie je možné vidieť na mnoho predchádzajúcich obrázkov, napríklad obr. 51.

Baumannov odtlačok, zobrazený na obr. 60, sa používa pre kvalitatívnu analýzu rozloženia sulfidových vtrúsenín v oceliach a liatinách s obsahom síry v intervale od 0,005 do 0,4 hm.%. Je používaná ako doplnková metóda k makroleptu u kontroly výroby a analýze vád kvôli obsahu sulfidov nereagujúcich s roztokmi kyselín pre leptanie. Predstavujú negatívny odtlačok povrchu a sú založené na reakcii sulfidov mangánu v oceli a fotografickým papierom navlhčeným v zriedenom roztoku kyseliny dusičnej. U skúšobnej vzorky je nutné aby povrch bol čerstvo vybrúsený, neobsahoval nečistoty, okuje alebo nejaké zbytky olejových emulzií. Za pokojovej teploty je kyselinou navlhčený fotografický papier priložený k povrchu materiálu, kedy prebieha chemická reakcia za vzniku sírovodíka. Reakciou sulfidu s halogenidmi striebra vzniká nerozpustný sulfid striebra, ktorý sa na odtlačku na



*vľavo originál, vpravo invertované farby*

**Obr. 60** Baumannov odtlačok [131]



papieri prejaví hnedým sfarbením. Po reakčnej dobe je papier vypraný vo vode, zafixovaný v ustalovači a vysušený. Okrem miest s obsahom síry sa sfarbenie môžete vytvárať u pórov a trhlín, ktoré môžu byť chybné vysvetlené ako sulfidy v oceli.

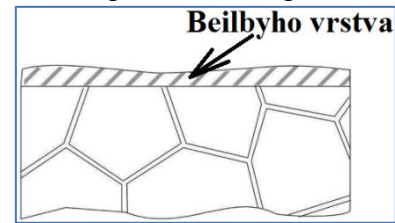
Mikroskopická skúška je zameraná na vzhľad mikroštruktúry, množstva a výskytu základných štruktúrnych fáz ako je ferit, martenzit, austenit a cementit alebo štruktúrnych zložiek bainitu a perlitu, ich plošnému podielu, určení množstva nekovových vtrúsenín a veľkosti zrna. U skúšky sa používa 50 až 500 násobné zväčšenie.

Príprava zahŕňa odobranie vzorku a jeho preparáciu, brúsenie, leštenie a leptanie. Základným pravidlom je, aby odobratá vzorka plne charakterizovala skúšobný materiál, čo už môže spĺňať jedna vzorka, ale u nehomogénnych štruktúr je nutné odobrať viac vzoriek. U veľmi malých vrstiev, ako sú napríklad nitrídané povrchy ocelí, je nutné odoberať vzorku šikmým rezom, čím dosiahneme tzv. optické zväčšenie pozorovateľné mikroskopom. Pri skúmaní štruktúry materiálu s výskytom vád ako je napríklad lom, sa odoberá vzorka z miesta poškodenia a taktiež z neporušeného miesta. Odobratie môže prebiehať rozličnými spôsobmi, rezaním, vŕtaním, frézovaním alebo rozbrusovaním. Pri odobraní materiálu je potrebné zväžiť najvhodnejšiu metódu nielen k veľkosti a druhu materiálu, ale aj vznikajúcemu teplu, ktoré je nežiadúce a je ho nutné odvádzať chladiacou kvapalinou, aby sa minimalizoval jeho vplyv na pôvodnú materiálovú štruktúru. U veľmi malých komponentoch je možné si dopomôcť zaliatím do polymérnej živice, čím sa zväčší plocha a zjednoduší odber vzorky.

Odobratá vzorka sa následne pripravuje za studena alebo za tepla. U studenej metódy sa materiál, v tomu určenej nádobke, zaleje kvapalinou, ktorá ho obklopí a časom stuhne. Je vhodná pre materiáli citlivé na vysoké teploty a tlak. Ako kvapalinu je možné zvoliť Dentakryl, akrylátovú alebo epoxidovú živicu. Akrylátová živica je vhodná pre rutinnú kontrolu, kedy prevažuje rýchlosť jej tuhnutia. Jej nevýhodou sú vyššie teploty tuhnutia okolo 79 až 122 °C a veľké zmršťovanie, kedy vzniká medzera medzi živicom a vzorkou. Je to možné kompenzovať zvolením zvýšeného tlaku počas tuhnutia. Epoxidová živica vyniká malým zmršťovaním, a taktiež veľmi dobrým zatekaním do medzier a pórov, ktoré je možné ešte zlepšiť zvolením tuhnutia vo vákuu. Záležiac na type epoxidovej živice sa teploty tuhnutia pohybujú od 30 do 170 °C. Jej nevýhodou je vysoká doba tuhnutia, ktorá môže dosahovať skoro hodinu pri dosiahnutí teploty tuhnutia 170 °C alebo až 9 hodín pri teplote tuhnutia 30 °C. Preparácia za tepla sa používa pre vzorky, kde nehrozí od dosahovanej teploty narušenie materiálovej štruktúry a zároveň zaručuje výbornú ochranu hrán, konzistentný tvar a veľkosť vzoriek. Uskutočňuje sa zasypaním vzorky práškovou živicom, usadením do tlakovej nádoby a za spoločného pôsobenia tepla a tlaku sa prášok roztaví a zaleje vzorku. Prášková živica býva s obsahom drevených plnív, sklenených plnív ako napr. oxidu kremičitého, medeného prášku alebo grafitu. U krehkých poréznych materiálov sa materiál zalieva živicom, ktorá vyplní póry a spevní vzorku.

Takto pripravované vzorky nasledovne podstupujú ručné alebo mechanizované brúsenie. U neho dochádza k intenzívnemu odobreraniu materiálu z povrchu vzorky, čím sa docielí vysoká rovinnosť povrchu s minimálnym poškodením odstrániteľným leštením. Je závislé od druhu povrchu brusného kotúča, typu, veľkosti a tvaru častí brusiva, veľkosti prítlačnej sily, rýchlosti otáčania kotúča a použitého zmáčadla s chladiacim médiom. Brusné častice sú uchytené alebo voľne sa pohybujú po podložke. Ako brusivo môže byť použité  $Al_2O_3$ ,  $SiC$ ,  $ZrO_2$ ,  $B_4C$ ,  $Si_3N_4$  alebo diamant a platí čím tvrdší je materiál, ktorý brúsime, tým je nutné použiť tvrdšie brusivo. Tvar brusiva by mal mať tvar nepravidelných mnohostenov a jeho veľkosť (drsnosť brúsneho papiera) by sa mala pri brúsení postupne znižovať, aby sa dosiahol dokonalý výbrus. Bežne sa vzorky brúsia prítlačnou silou od 1 do 100 N

a rýchlosťou otáčania kotúča od 30 do 300 otáčok za minútu. Pri brúsení vzniká Beilbyho vrstva, vid' obr. 61, ktorá popisuje tvárnenú časť materiálu. Materiál pritom stráca pôvodnú štruktúru. Jej hrúbka závisí od výšky teploty, tlaku a rýchlosti brúsenia a pohybuje sa v radoch desiatiny až šestiny veľkosti brúsnych častíc a je ju možné ovplyvniť použitím prívodu vhodnej chladiacej kvapaliny na vodnej báze alebo etanolu. Po vybrúsení vzorku je vhodné ho očistiť pomocou ultrazvuku, čím sa zbavíme častíc brusiva.

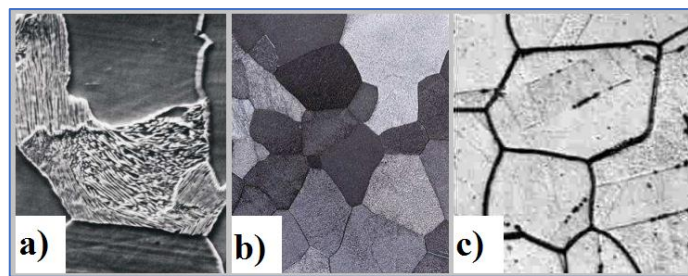


Obr. 61 Beilbyho vrstva [167]

Nasleduje leštenie, ktoré sa rozdeľuje na mechanické, elektrolytické a chemické. Dosiahne sa ním povrch o veľmi nízkej drsnosti a proces u mechanického leštenia je podobný brúseniu. Používajú sa nižšie prítlačne sily a rýchlosť otáčania. Materiál pre leštenie je buď textilné plátno alebo leštiace častice zabudované do kovových podložiek. Častice sa do seba líšia chemickým zložením alebo tvrdosťou a ako možný druh materiálu môže byť použitý diamant,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  alebo  $\text{CeO}_2$ . Preferuje sa zaoblený tvar častíc a kvôli menšiemu vzniku tepla sa používa menej chladiacej kvapaliny než u brúsenia a obsahuje leštiaci prášok. Pri elektrolytickom leštení je materiál ponorený do roztoku elektrolytu a zapojený ako anóda. Katódu tvorí elektróda z nerezovej ocele a pri prechode prúdu sa na materiáli vytvára anodická viskózna vrstva s nízkou elektrickou vodivosťou. V miestach, kde je prepad materiálu, vrstva dosahuje omnoho väčšie hrúbky než v miestach výstupkov. Nastavením vhodných podmienok sa tieto výstupky rozpúšťajú a zarovnáva sa povrch. Jej výhodou je potlačený vznik Beilbyho vrstvy a nevýhodou súčasne naleptanie štruktúry vzorky.

Už takto, leštením pripravený povrch je vhodný pre pozorovanie väd materiálu, dutín, obsahu grafitu alebo vtrúsenín. Pri potrebe potrebnejšieho sledovania detailov jednotlivých štruktúr (hranice zŕn, dvojčatá) je potrebné vzorku po leštení naleptať, čím sa zviditeľnia štruktúry. To sa uskutočňuje ponorom alebo natieraním vhodného chemického roztoku, ktorého význam spočíva vo vzniku selektívnej korózie. Leptacie činidlo sa zameriava na miesta ako sú hranice zŕn, fázové rozhrania, miesta s nahromadenou deformačnou energiou (Beilbyho vrstva). Spôsob leptania závisí od druhu zvoleného roztoku a teploty, a rozdeľuje sa na selektívne, plošné a leptanie na hranice zrna.

Selektívne sa používa pre farebné odlišenie jednotlivých štruktúr v materiáli, ktoré spočíva v ich rôznej odolnosti voči leptadlám. Rozdiel sa javí v rýchlosti rozpúšťania, vzniku oxidačnej vrstvy rôznej hrúbky, ktoré majú vzhľadom k interferenciám svetla rozličné sfarbenie. U plošného leptania sa farebne odlišujú jednotlivé zrna. Polykryštalický materiál je zložený z monokryštálov, ktoré sú náhodne rozmiestnené. Každá takáto kryštalografická rovina má inú energiu a preto aj inak odoláva leptadlám. Plochy zrne rozdielne interferujú so svetlom, vďaka čomu je možné rozlíšiť jednotlivé druhy zŕn podľa svetlejšieho alebo tmavšieho sfarbenia. U leptania na hranice zŕn dochádza k napadnutiu hraníc pomocou leptadla, čím je možné odlišiť jednotlivý tvar zŕn, ale bez farebného odlišenia. Znázornenie odlišnosti naleptaných vzoriek záleží na základe spôsobu leptania je možné vidieť na obr. 62.



a) Selektívne                      b.) Plošné                      c) Na hranice zrna

Obr. 62 Leptanie materiálu [167]

## 2.6.2 Nedeštruktívne skúšky [117], [125], [129], [133], [134], [135]

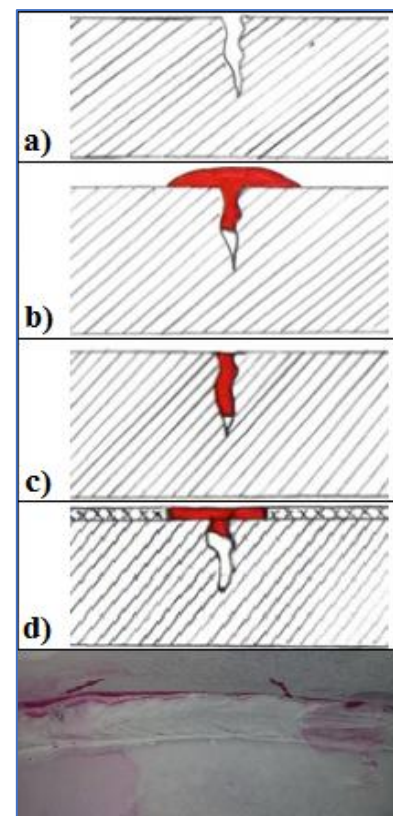
Patria medzi jedny z najrozšírenejších skúšok a ich podstatnou výhodou, ako napovedá názov, je priebeh skúšky bez zničenia a straty funkčnosti dielu, zostavy alebo konštrukcie. Sú definované normou ČSN EN ISO 17635. Preukazujú čiastočné vady materiálu so zameraním na povrchové a vnútorné vady. Medzi metódy zisťujúce povrchové vady zaradzujeme vizuálnu, penetračnú a magneticko-práškovú skúšku. Vnútorné vady, na pohľad neviditeľné sa zisťujú pomocou prežiarenia alebo ultrazvukom.

- Vizuálna skúška (kontrola) (VT)

Najjednoduchšia a častokrát prvotná skúška, u ktorej iba pomocou oka alebo lupy zisťujeme povrchové vady zvaru. Je definovaná normou pre tavné zvary ČSN EN ISO 17637 a všeobecné zásady pre priame a nepriame vizuálne skúšky, záležiac od prístupnosti kontrolovaného povrchu, definuje norma ČSN EN 13018. Základnými piliermi pre vykonanie skúšky je dobre prístupný a očistený povrch od trosky, rozstreku apod., dobré prirodzené alebo umelé osvetlenie pracoviska kontroly a ostrý zrak pozorovateľa pre rozpoznanie detailov vo zvaru. Vizuálna kontrola spravidla býva doplnená meraním rozmerov zvaru a v prípade pochybností je doplnená magnetickou alebo kapilárnou (penetračnou) skúškou. Skúška by mala predchádzať pred ostatnými skúškami z dôvodu, že skúsený defektoskopický pracovník dokáže posúdiť kvalitu práce zvárača a tým už predurčiť výskyt možných vád.

- Penetračná (kapilárna) skúška (PT)

Skúška, veľmi citlivá na otvorené povrchové vady kvôli zatekaniu kvapaliny, je definovaná normami ČSN EN ISO 3452-1, -2, -3, -4, -5, -6. Princíp metódy, vid' obr. 63, spočíva v zatekaní detekčnej tekutiny za využitia kapilárnych javu ako je zmacavosť a kapilarita pre určenie porušenia celistvosti materiálu zasahujúceho až do povrchu. Skúška začína prípravou povrchu, ktorý sa umyje a odmastí, následne sa naniesie detekčná kvapalina na skúšaný povrch. Ak sa jedná o menší diel, je možné dostať kvapalinu na povrch ponorením celého dielu, u väčších dieloch sa nános uskutočňuje natretím alebo nastriekaním. Tretím krokom je odstránenie prebytku, kedy je nutné dávať pozor, aby bolo primerané, pretože pri nedodatočnom odstránení hrozí zobrazenie nepravých vád, u pri veľmi dôkladnom vymytí hrozí vyplavenie detekčnej kvapaliny a neodhalenie vyskytujúcich sa vád. Po tomto kroku sa povrch nechá osušiť a nasleduje nanosenie vývojky. Vývojka, častokrát tvorená oxidom zinočnatým rozptýleným v acetóne, vytvára „nasiakavý“ podklad pre detekčnú kvapalinu. Podľa detekčných kvapalín rozoznávame metódu farebnej indikácie, kde odhalenie vád je spojené s farebným kontrastom za využitia denného svetla a fluorescenčnú metódu, u ktorej detekčná kvapalina je fluoreskujúca s odhalením pomocou ultrafialového svetla. Treťou metódou je dvojúčelová, u ktorej je možné vady zviditeľniť denným alebo ultrafialovým svetlom. Poslednou fázou je vizuálna kontrola, detekcia vád a ich vyhodnotenie, ktoré je subjektívne s potrebou skúsenosti.



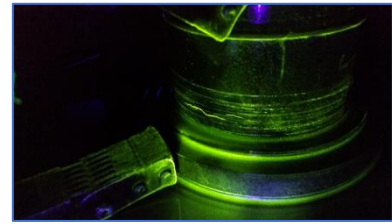
- a) Očistenie povrchu
- b) Nanosenie detekčnej kvapaliny
- c) Odstránenie prebytku detekčnej kvapaliny
- d) Nanosenie vývojky

**Obr. 63** Kapilárna skúška [168], [169]

Nevýhoda tejto skúšky tkvie v potrebe čistého, hladkého povrchu a v nestálosti výsledkov. Penetračná skúška býva doplnená o skúšku prežiarením a ultrazvukovú skúšku.

- Magnetická prášková skúška (MT)

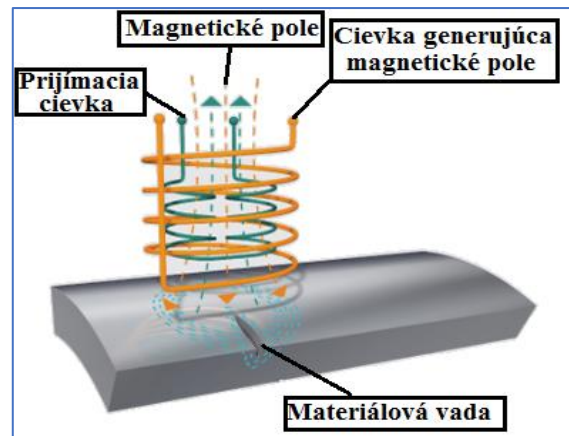
Skúška, definovaná normou ČSN EN ISO 17638, umožňuje detekciu väd na povrchu a tesne pod povrchom do 2-3 mm. Jej princíp spočíva v magnetizme, kedy pomocou magnetických siločiar vystupujúcich na povrch feromagnetického materiálu (ocele) sa zviditeľnia trhliny pod a nad povrchom spôsobom, že ich siločiarly obchádzajú. Je to založené na magnetickom toku v magnetizovanej oceli (okrem austenitických ocelí), ktorý vzniká v mieste necelistvosti alebo trosky. Siločiarly je možné zviditeľniť pomocou železného prachu (pilín) nasucho alebo rozptýleného v kvapaline, prípadne fluorescenčná suspenzia, kde výsledok skúšky je zobrazený na obr. 64. Jeho čiastočky sa usadia v mieste trhliny. Podľa druhu magnetického poľa rozoznávame magnetizáciu pozdĺžnu, priečnu a kombinovanú. U pozdĺžnej magnetizácií je možné magnetické pole vytvoriť trvalými magnetmi alebo pomocou elektromagnetov. Siločiarly prebiehajú skúšobnou vzorkou pozdĺžne a je možné zisťovať priečne trhliny. U priečnej magnetizácií je skúšobná vzorka zmagnetizovaná pozdĺžnym prechodom prúdom a zisťujú sa pozdĺžne trhliny. Kombinovaná metóda nám umožňuje priečnym a zároveň pozdĺžnym zmagnetizovaním vzorky detekovať trhliny s akoukoľvek smerovou orientáciou. Pozdĺžna magnetizácia je vytvorená pomocou jednosmerného prúdu a priečna striedavým prúdom. Pri indukčnej metóde, podľa (rozptylových polí) je časť indukčného toku v zmagnetizovanom materiáli vychýlená na povrch vzorky necelistvosťami. Rozptylové pole, priamo nad necelistvosťou, je indukované pomocou Permaloyovej alebo Hallovej sondy.



*Obr. 64 Magnetická prášková skúška – fluorescenčné zobrazenie trhlín [169]*

- Skúška metódou vírivých prúdov (ET)

Definovaná normou ČSN EN ISO 17643, ktorou sa necelistvosť materiálu zisťuje poklesom elektrickej vodivosti v povrchovej vrstve materiálu. Je bezdotyková, vhodná i pre nemagnetické materiály a citlivosť metódy závisí od stavu a štruktúre povrchu. Skúška sa uskutočňuje generovaním vysokofrekvenčného elektromagnetického poľa s jednou alebo dvomi frekvenciami. Tým v materiáli vznikajú vírivé prúdy, ktoré generujú sekundárne elektromagnetické pole. Senzor (prijímacia cievka) ho sníma a pomocou hardwaru a softwaru vyhodnotí. Princíp merania je znázornený na obr. 65. Jej najvyšší význam je pri kontrole potrubí z feromagnetických materiálov určených pre energetické zariadenia.



*Obr. 65 Skúška vírivými prúdmi [135]*

- Skúška ultrazvukom (UT)

Je definovaná normou ČSN EN ISO 17640. Princípom skúšky je odraz vlnenia na rozhraní dvoch prostredí s vplyvom odlišných vlastností na šírenie vln pri detekcii skrytých väd v materiáli. Najčastejšie je využívaná prechodová a odrazová metóda. U prechodovej metódy je ultrazvuk vysielaný skrz materiál a zachytení na jeho druhom konci. Zariadením

sa nedá zistiť príčina zníženia amplitúdy prijatého signálu oproti tomu odoslanému a ani miesto zníženia. U odrazovej metódy princíp spočíva v prijímaní ultrazvukových vln odrazených od akusticky rozdielnych prostredí, u ktorých to môže znamenať necelistvosť v materiáli alebo jeho protíahlú stranu. Odrazené vlny sa tak na meracom zariadení, vid' obr. 66, prejavia ako odpory a nastavením správnej mierky je možné určiť ich vzdialenosť.

U novej metódy TOFD (Time of Flight Diffraction), definovanej normou ČSN EN ISO 10863, ktorá sa používa skoro výhradne pre zvarové spoje. Bola vyvinutá roku 1985 v Harwelovom centre s účelom zistenia veľkosti trhlin zvarov v jadrovom reaktore. Je založená na princípe interakcie ultrazvuku s okrajmi vúd, kedy daný okraj po kontakte s ultrazvukom emituje difrakčné vlnenie. To je zaznamenávané a na základe časového posunu jednotlivých

vlnení je možné zmerať veľkosť, umiestnenie a typ trhliny v celom objeme zvaru i vúd, ktoré sú nevhodne orientované pre odrazovú metódu. Jej nevýhodou je nepresnosť pri meraní vúd blízko povrchu kvôli vzájomnému miešaniu signálov od laterálnej vlny.

Ďalšia nedeštruktívna ultrazvuková metóda Phased Array, definovaná pre zvarové spoje normou ČSN EN ISO 13588, využíva viacnásobné ultrazvukové elementy a elektronické časovanie pulzov k vytvoreniu ultrazvukových zväzkov, ktoré je možné elektronicky zaostriť, nasmerovať a vychýliť. Dosahuje veľmi vysokej presnosti zároveň s rýchlosťou merania i pri viacnásobných uhlových kontrolách. Metódou sa vytvárajú podrobné rezy vnútorných štruktúr.



**Obr. 66** Skúška ultrazvukom  
Odrazová [169]

- Skúška prežarovaním (RT)

Skúška, podľa normy ČSN EN ISO 17636-1 a -2, je založená na pohlcovaní ionizačného žiarenia v skúšobnej vzorke a zviditeľnení prechádzajúceho žiarenia k tomu určeným detektorom. Slúži k zisťovaniu vnútorných vúd v materiáli a je možné ju využiť i pre neprístupné povrchové vady. Využíva vlastnosti prvkov, ktoré majú rôzne silné pohlcovacie schopnosti ionizačného žiarenia, najčastejšie röntgenového alebo žiarenia gama zvoleného v závislosti na hrúbke prežarovaného materiálu. Ako ich zdroj sa používajú röntgenové lampy, gama žiarič v podobe rádioizotopu irídia a kobaltu, vid' obr. 67, alebo lineárne urýchľovače. Detektor žiarenia môže byť digitálny detektor alebo rádiografický film. Pri prechode žiarenia zvarom (materiálom) je časť žiarenia pohltaná prvkami v závislosti od ich hrúbky a atómového čísla, a ďalšia časť o rôznej intenzite sa dostáva až k detektoru. Väčšia intenzita sa dosahuje u miest výskytu prvkov s nižším atómovým číslom alebo miest s menšou hrúbkou, ktorú môžu zapríčiniť zvarové vady, kedy miesto nie je vyplnené materiálom a prejaví sa to tmavším miestom vo výslednom rádiograme. Jedná sa o veľmi citlivú skúšku zisťujúcu objemové vady, no menej citlivú na povrchové vady.



**Obr. 67** Gama žiarič [169]

### 3 EXPERIMENT

V tejto časti práce sú opísané prístroje zúčastňujúce sa procesu zvárania, príprava vzoriek, výpočet vneseného tepla. Po zvarení vzoriek sa uskutočňuje ich vyhodnotenie pomocou skúšok zvaru. Ako vhodné skúšky z hľadiska zloženia a množstva materiálu, ktoré bolo k dispozícii, bola zvolená ťahová a metalografická skúška.

#### 3.1 Príprava a zváranie vzoriek [136], [137], [138]

Diplomová práca mala od počiatku určený typ ocele, pre ktorý sa overovala zvárateľnosť hybridnou metódou Laser-TIG. Jednalo sa o oceľ A14 50G, označená podľa štandardu WSS-M1A365, s hrúbkou 0,9 mm. Je to extra hlbokotážná oceľ s povrchovou vrstvou zinku s gramážou  $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  a s obsahom legujúcich prvkov podľa tabuľky 6. a mechanických vlastností podľa tabuľky 7.

Tab. 6 Chemické zloženie ocele WSS-M1A365-A14 [139]

Chemický prvok	C	Mn	P	S	Si	Al	Ti	Nb
Maximálny obsah [hm %]	0,008	0,30	0,025	0,020	0,03	0,08	0,09	0,035

Tab. 7 Mechanické vlastnosti oceli [139]

Mechanická vlastnosť	Medza klzu $R_e$ [MPa]	Medza pevnosti $R_m$ [MPa]	Ťažnosť $A_{80}$ [min. %]	$r_{90}$ min.	$r_{avg}$ min.	$n_{90}$ min.
-	140-180	270-330	40	1,90	1,60	0,20

Materiál bol nastrihaný na obdĺžniky P 0,9 - 140 x 130 s zaoblenými ostrými hranami po strihaní a povrch bol pred zváraním odmastený, a zbavený iných nečistôt. Zváranie materiálu prebiehalo na Ústave prístrojovej techniky Akadémie vied Českej republiky, ktorý disponuje vhodnými zariadeniami pre hybridné zváranie:

- Yb-YAG laser YLS – 2000

Jedná sa o pevnolátkový, vláknový výkonový laser, vid' obr. 68, od firmy IPG Photonics s výkonom 2000 W, vlnovou dĺžkou 1070 nm, kontinuálnym alebo pulzným režimom práce a účinnosťou 30 %. S možnosťou výmeny hláv je s laserom možné zvärať, gravírovať a rezať. Pomocou hlavy Precitec YW 30 je laser využitý pre zváranie kovov a transmisné zváranie plastov až do hĺbky 5 mm. Skenerové zváranie a značenie povrchu kovov laserom je možné vďaka výmene zväracej hlavy za hlavu Arges Rhino 31 s pracovnou plochou 205 x 205 mm. Zvolením hlavy Precitec YRC100 laser dokáže deliť kovy a plasty s hrúbkou až 5 mm v trojrozmernom priestore. Uchytenie a polohovanie hláv zabezpečuje robotické rameno IRB 2400 od firmy ABB a vrátane zväracieho stola je k dispozícii synchronne dvojsose polohovadlo IRBP 250 tiež od firmy ABB.

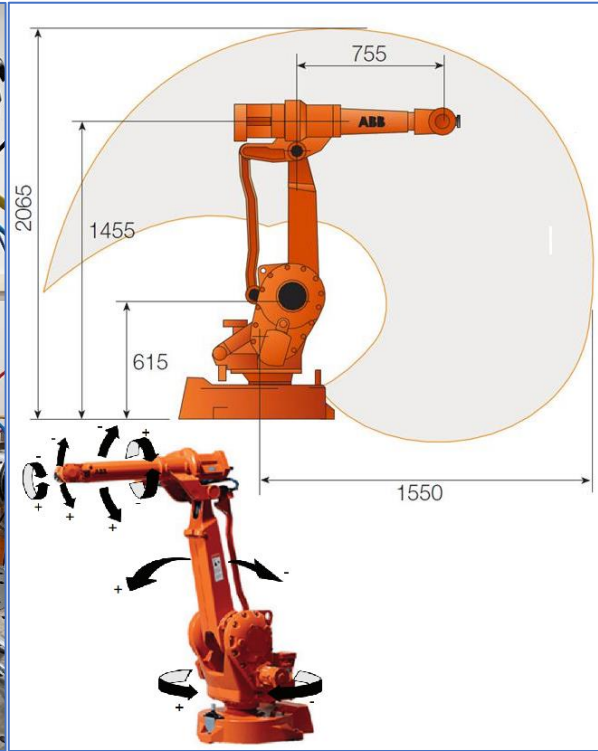


Obr. 68 Laser IPG YLS – 2000 na ÚPT AVČR

- Manipulačný robot IRB 2400/10



*Obr. 69 ABB IRB 2400/10 na ÚPT AVČR*



*Obr. 70 Pracovný rozsah robota IRB 2400/10 vrátane jeho ôs [137]*

Šesťosí manipulačný robot IRB 2400, vid' obr. 69, od firmy ABB s priemernou presnosťou polohy  $RP = 0,3$  mm (maximálna  $RP = 0,7$  mm) a maximálnym pracovným dosahom 1550 mm, vid' obr. 70, má nosnosť až 10 (12) kg záležiac od upnutia predmetu k uchopovaču nástrojov.

- Zvárací zdroj MagicWave 1700 Job  
Elektrický oblúk pri hybridnom zváraní zabezpečuje digitálne ovládaný zvärací zdroj MagicWave 1700 v prevedení Job, s mnohými pokročilými funkciami, od firmy Fronius, vid' obr. 71. Umožňuje zvärať jednosmerným i striedavým prúdom, disponuje mnohými prúdovými nastaveniami vrátane voľby režimov. Dosahuje maximálnu prúdovú hodnotu 170 A pri 35 % zaťažení, 130 A pri 60 % a 100 A pri 100 % zaťažení (10 minút do okolitej teploty  $40^{\circ}\text{C}$ ) s napätím naprázdno 88 V. Disponuje možnosťou ovládať ho diaľkovým zariadením, čo mu umožňuje využitie pri robotickom zváraní a je ho možné napájať zo siete 1x 230 V. Výrobcom je odporúčaný pre zváranie hliníku a jeho zliatin, farebných kovov, nízkolegovaných a vysokolegovaných ocelí. Jeho hmotnosť je 15 kg.



*Obr. 71 Zvärací zdroj MagicWave 1700 Job s pripojeným diaľkovým ovládaním na ÚPT AVČR*

Pre hybridné zváranie Laser-TIGom bola použitá laserová hlava Precitec YW 30 s ohniskom 200 mm a s TIG horákom pre strojové upnutie, vid' obr. 72. Zvolená volfrámová elektróda WT 20 o priemere 2,4 mm bola nastavená vo výške 2 mm nad povrchom materiálu a 3 mm pred osou laserového lúča so sklonom TIG horáku 45 ° od normály. Laserový lúč bol zaostrený na povrch materiálu. Upnutie materiálu bolo zabezpečené pomocou úpiniek z ohnutého plechu k pracovnému stolu, vid' obr. 73, aby sa zabránilo samovoľnému pohybu so zmenou trajektórie zvárania. Ako ochranný plyn bol zvolený argón s čistotou 4.6 a prietokom  $15\text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , ktorý prúdil iba cez hubicu TIG horáku. U zvárania plechov preplátavaným zvarom bol dodatočne použitý plech o rovnakej hrúbke 0,9 mm kvôli vypoďloženiu vyššie položeného plechu pre dodržanie ich vzájomnej rovnobežnosti a rovnakej medzery v mieste ich dotyku. Pri zváraní tupým zvarom boli plechy priložené k sebe očistenými hranami a vzájomne pristehované, aby nedochádzalo pri chladnutí materiálu k zmene medzery medzi nimi a zabránilo sa neprevareniu oboch plechov. Prvé sa uskutočnilo zváranie plechov preplátavaným zvarom (označenie PS)



Obr. 72 Upnuté vzorky pripravené k zvareniu

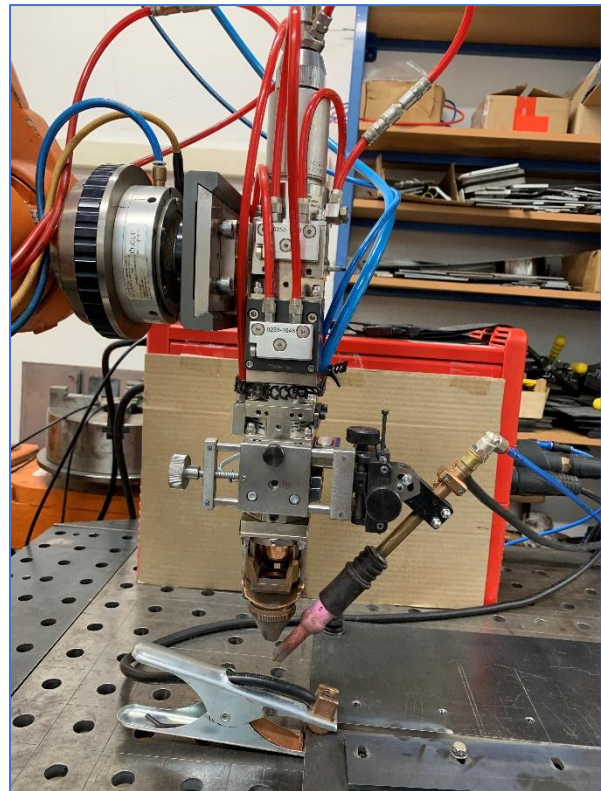
a následne pri pozmenených parametroch boli plechy zvarené tupým zvarom (označenie TS). Zváracie parametre pre laser boli nastavené s prihľadnutím na správne prevarenie materiálu a sú zadané v tabuľke 8 a tabuľke 9, kde vzorky zvarov 1\_PS a 1\_TS na rozdiel od ostatných sú zvárané iba laserom bez predohrevu TIG. Vnesené teplo pre jednotlivé plechy bolo prepočítané podľa rovníc 2.1 a 2.2, kde koeficienty účinnosti pre jednotlivé metódy boli  $k_{LASER} = 0,76$  a  $k_{TIG} = 0,60$ . Pre laserom vnesené teplo sa parametre zvolené od počiatku zvárania pre daný druh zvaru nemenili a teda boli konštantné. Menila sa veľkosť prúdu u elektrického oblúku, ktorého hodnoty 0, 20, 30 a 40 A boli zvolené empiricky na základe dlhoročných skúsenosti a mali dostatočne pokrývať rozsah vneseného tepla pre správny účinok na vrstvu zinku. Celková veľkosť vneseného tepla metódou Laser-TIG bola vypočítaná podľa rovnice 2.3.

Vzorový výpočet hodnôt pre vzorku 2\_PS:

$$Q_{LASER} = k_{LASER} \cdot \frac{P \cdot 60}{v_s} = 0,76 \cdot \frac{1000\text{ W} \cdot 60}{1200\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}} = 38,0\text{ kJ} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$Q_{TIG} = k_{TIG} \cdot \frac{U \cdot I \cdot 60}{v_s} = 0,60 \cdot \frac{16,3\text{ V} \cdot 20\text{ A} \cdot 60}{1200\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}} = 9,78\text{ kJ} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$Q_{SUM} = Q_{TIG} + Q_{LASER} = (38,0 + 9,78)\text{ kJ} \cdot \text{m}^{-1} = 47,78\text{ kJ} \cdot \text{m}^{-1}$$



Obr. 73 Laserová hlava Precitec YW 30 s TIG horákom upnutá na robotickom ramene na ÚPT AVČR

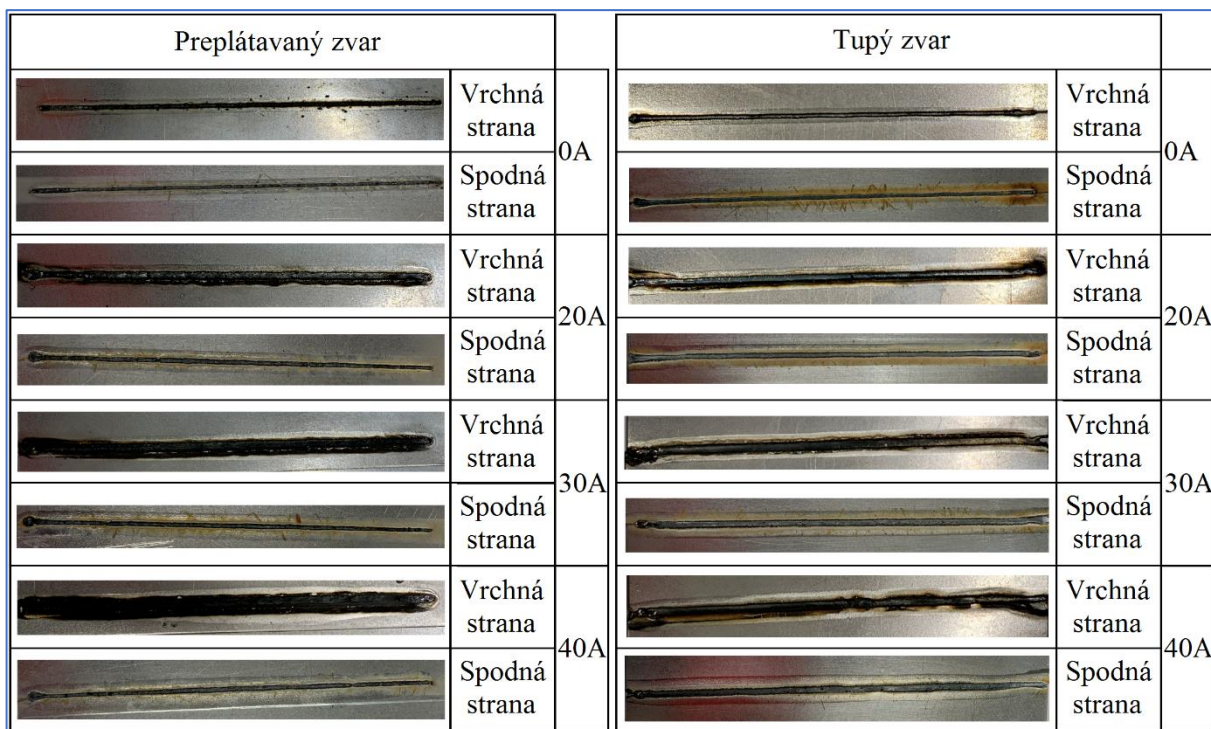


**Tab. 8** Parametre pre výpočet vneseného tepla pre preplátavaný zvar

Číslo vzorky	[-]	1_PS	2_PS	3_PS	4_PS
Hrúbka materiálu	[mm]	0,9	0,9	0,9	0,9
Výkon laseru	[W]	1000	1000	1000	1000
Posunová rýchlosť	[mm·min <sup>-1</sup> ]	1200	1200	1200	1200
Zváracie napätie	[V]	-	16,3	15,5	15,7
Zvárací prúd (DC)	[A]	-	20	30	40
Vnesené teplo - laser	[kJ·m <sup>-1</sup> ]	38,00	38,00	38,00	38,00
Vnesené teplo - TIG	[kJ·m <sup>-1</sup> ]	-	9,78	13,95	18,84
Celkové vnesené teplo	[kJ·m <sup>-1</sup> ]	38,00	47,78	51,95	56,84

**Tab. 9** Parametre pre výpočet vneseného tepla pre tupý zvar

Číslo vzorky	[-]	1_TS	2_TS	3_TS	4_TS
Hrúbka materiálu	[mm]	0,9	0,9	0,9	0,9
Výkon laseru	[W]	800	800	800	800
Posunová rýchlosť	[mm·min <sup>-1</sup> ]	1200	1200	1200	1200
Zváracie napätie	[V]	-	13,8	15	12,5
Zvárací prúd (DC)	[A]	-	20	30	40
Vnesené teplo - laser	[kJ·m <sup>-1</sup> ]	30,40	30,40	30,40	30,40
Vnesené teplo - TIG	[kJ·m <sup>-1</sup> ]	-	8,28	13,50	15,00
Celkové vnesené teplo	[kJ·m <sup>-1</sup> ]	30,4	38,68	43,90	45,40



**Obr. 74** Vzhľad jednotlivých zvarov odфотографovaný tesne po zvarení plechov bez akéhokoľvek čistenia povrchu zvaru a jeho okolia

Rozstrek materiálu, jedna zo zvarových vád spojená s zvaraním pozinkovaných plechov laserom, sa prejavila už na počiatku experimentu, ktorý je možné vidieť na obr. 74 v riadku zobrazujúcom vrchnú stranu plechu pri zvaraní, bez predohrevu elektrickým oblúkom, preplátavaným zvarom. Za nežiadúci jav by som označil aj začudnenie zvaru a jeho okolia, ktoré i napriek možnému vyhovujúcemu zvaru môže vyžadovať dodatočné úpravy, zvyšujúce

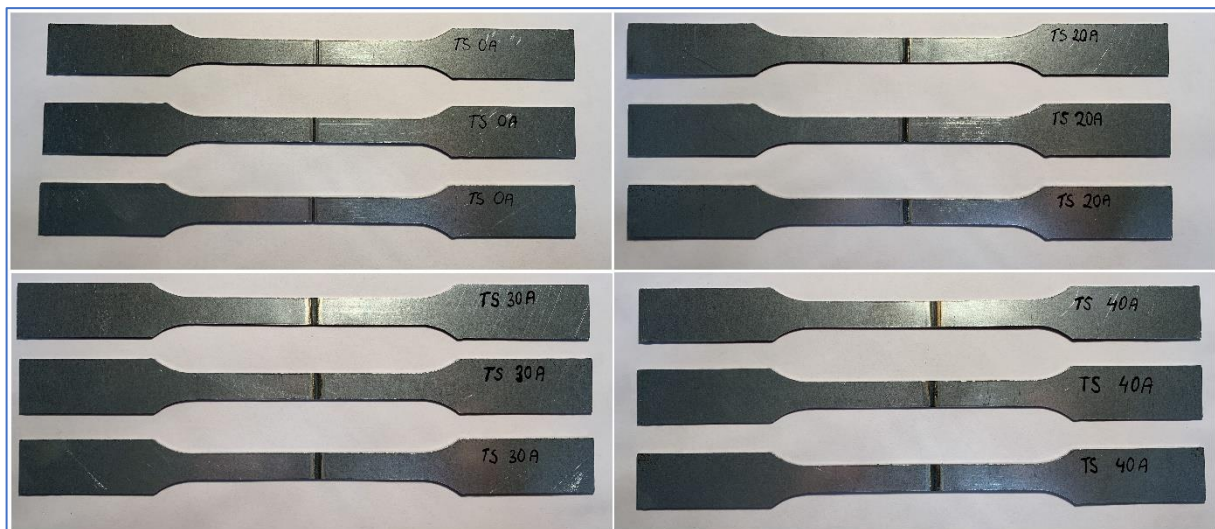
cenu výroby, spojené s jej odstránením kvôli príprave podkladu pre vrstvu farby, prípadne lepenia iných komponentov k zváranému materiálu.

### 3.2 Skúšky zvarového spoja

S prihliadnutím na množstvo dostupného materiálu pre experiment a kvôli zisteniu jeho pevnostných a deformačných charakteristík, bola zvolená ťahová skúška, ktorá patrí medzi základné skúšky materiálu. Využila sa pre overenie vlastností základného materiálu pred zváraním a následne pre zistenie vlastností ocele a ich zmien po zvarení. Na základe výsledkov z ťahovej skúšky bolo ešte zvolené, ako nutné, metalografické vyhodnotenie makroštruktúry pre zistenie jednotlivých oblastí zvaru, ich posúdenie a odhalenie zvarových vád.

#### 3.2.1 Ťahová skúška

Skúška sa konala v laboratóriu mechanických vlastností materiálov na Ústave strojírenské technológie z Fakulty strojního inženýrství VUT v Brne. Laboratórium je vybavené skúšobným strojom ZD 40, vid' príloha 1, ktorého súčasťou je inkrementálny dĺžkový snímač polohy priechnikov s rozlíšením 0,01 mm a snímač sily s riadiacou jednotkou EDC 60.



*Obr. 75 Laserom vyrezané skúšobné telesa (tyče) pre ťahovú skúšku – Tupý zvar*



*Obr. 76 Laserom vyrezané skúšobné telesa (tyče) pre ťahovú skúšku – Preplátavaný zvar*

Zo zvarovaných plechov sa laserom vyrezali skúšobné tyče, po 3 kusy z každej vzorky, s rozmermi zodpovedajúcimi normám ČSN EN ISO 4136 a ČSN EN ISO 9018, vid' obr. 75 a obr. 76, doplnené o 3 kusy tyčí zo základného materiálu. Z skúšanej dĺžky 110 mm sa

vyznačila počiatočná meraná dĺžka 80 mm s umiestnením zvarového spoja v jej strede, t.j. každý jej vyznačený okraj sa nachádzal 40 mm od stredu zvaru. Značenie vrátane číselného označenia vzoriek bolo vytvorené permanentným popisovačom. Počiatočná hrúbka materiálu bola 0,9 mm a počiatočná šírka 11,8 mm odmeraná v oblasti meranej dĺžky.

Prvým krokom ťahovej skúšky bolo upnutie vzorky do skúšobného stroja pomocou klieští, viď obr. 77, ktorých tvar je prispôbený tomu, aby sa so zväčšujúcou ťahovou silou zároveň zväčšovala prítlačná sila pridržávajúca vzorku. Po zahryznutí klieští do materiálu začalo prebiehať roztáhovanie vzorky rovnomerne sa zväčšujúcou ťahovou silou až do momentu roztrhnutia materiálu. Rýchlosť skúšky bola zvolená na  $10 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ . Celý priebeh skúšok bol zaznamenávaný v počítači pomocou programu, ktorý zároveň graficky vykreslil priebeh skúšky a vyhodnotil mechanické vlastnosti materiálu.



Obr. 77 Vzorka upnutá v stroji ZD 40

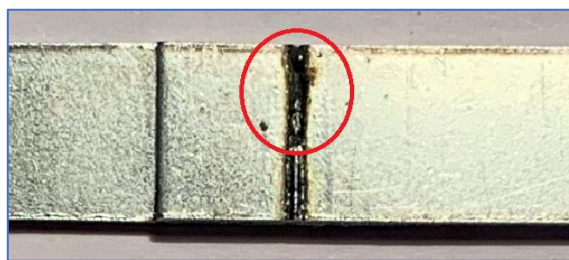
Výsledky základného materiálu preukázali nezhodu s údajmi v tabuľke 7, u ktorých ťažnosť materiálu bola pod deklarovanou hodnotou 40 %, presne 37,5 %, viď tabuľka 10, kde bunka s touto hodnotou je označená svetlo červenou farbou. Jemne zelenou sú vyznačené mechanické vlastnosti spadajúce do intervalu vlastností deklarovaných výrobcami ocele.

Tab. 10 Namerané hodnoty mechanických vlastností základného materiálu z ťahovej skúšky

Skúšobné teleso základného materiálu	[-]	1	2	3
Počiatočná hrúbka vzorky $a_0$	[mm]	0,9	0,9	0,9
Počiatočná šírka vzorky $b_0$	[mm]	11,8	11,8	11,8
Počiatočný obsah prierezu vzorky $S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	10,62	10,62	10,62
Maximálna zaťažujúca sila $F_m$	[N]	3150,8	2141,6	3150,8
Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$	[MPa]	169,153	169,153	153,220
Medza pevnosti $R_m$	[MPa]	296,686	295,819	296,686
Ťažnosť $A_{80}$	[%]	40,625	37,50	42,50

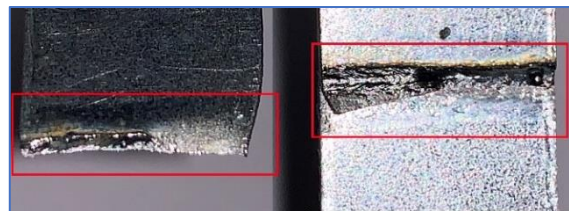
Priebeh skúšky ťahom bol kvôli druhu materiálu, respektíve jeho nízkej tvrdosti, mierne komplikovaný. Čeluste sa v začiatkoch skúšky zahľbovali do materiálu dlhší čas než je obvyklý, čo negatívne ovplyvnilo priebeh závislosti ťahového napätia na pretvorení. Z tohto dôvodu bolo nutné manuálne upraviť vnesené chyby, avšak i napriek tomu sú výsledky jemne skreslené. Výsledky mechanických vlastností skúšobných tyčí sú zapísané nižšie v tabuľkách zvlášť pre každú vzorku a doplnené diagramom priebehu napätia v závislosti na pretvorení.

U preplátavaného zvaru 1\_PS, bez predohrevu elektrickým oblúkom, došlo u dvoch skúšobných tyčí k roztrhnutiu v oblasti zvarového kovu. Ako dôvod sa javí veľké množstvo chýbajúceho materiálu, ktoré bolo vystrieknuté výparmi zinku a oslabilo tak zvarový spoj. Vizualným pohľadom, už pri vkladaní vzorky do skúšobného stroja, bolo

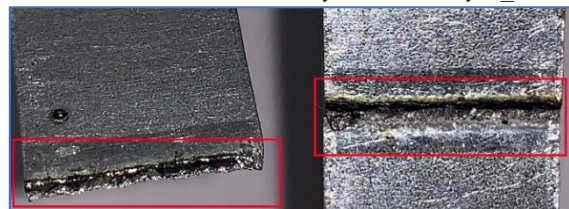


Obr. 78 Dutina v preplátavanom zvare

veľmi dobre vidieť dutinu kvôli chýbajúcemu, pomerne veľkému, objemu materiálu. Dutina hĺbkou viditeľne skoro presahovala do druhej vrstvy plechu a dosahovala veľkú časť z celkovej dĺžky skúšobného zvaru, vid' obr. 78. Na obr. 79 a obr. 80 je možné vidieť svetlejšie a tmavšie sfarbený povrch v priereze skúšobnej tyče v mieste lomu. Tmavšie miesto značí začmudenú oceľ, čo signalizuje v danom mieste nevyplnený priestor – dutinu. Svetlejšie miesto je roztrhnutý zvarový spoj. Namerané mechanické vlastnosti materiálu vzorky 1\_PS sú písané v tabuľke 11.



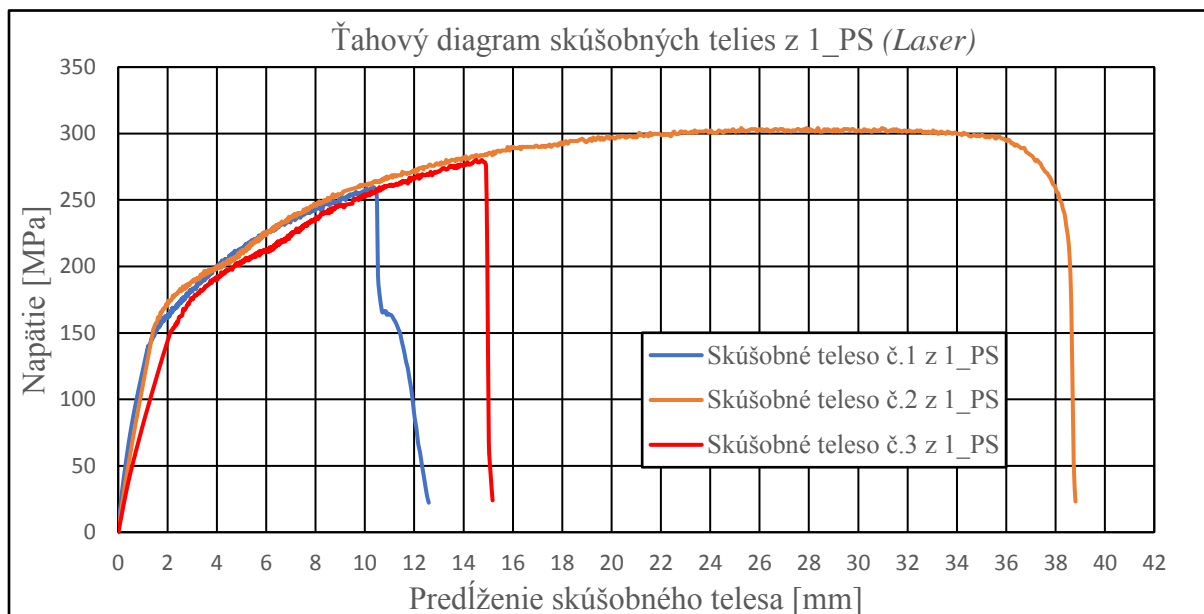
Obr. 79 Lom - skúšobná tyč č.1 z vzorky 1\_PS



Obr. 80 Lom - skúšobná tyč č.3 z vzorky 1\_PS

Tab. 11 Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 1\_PS (Laser) z ťahovej skúšky

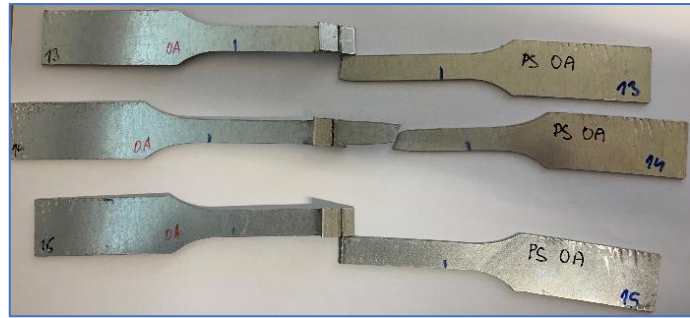
Skúšobné teleso z vzorky 1_PS	[-]	1	2	3
Počiatočná hrúbka vzorky $a_0$	[mm]	0,9	0,9	0,9
Počiatočná šírka vzorky $b_0$	[mm]	11,52	11,76	11,76
Počiatočný obsah prierezu vzorky $S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	10,37	10,58	10,58
Maximálna zaťažujúca sila $F_m$	[N]	2746,0	3216,4	2962,4
Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$	[MPa]	176,89	181,25	177,70
Medza pevnosti $R_m$	[MPa]	264,85	303,89	279,89
Ťažnosť $A_{80}$	[%]	-	33,75	-



Graf 1 Ťahový diagram skúšobných telies z vzorky 1\_PS (Laser)

V grafe č.1 je vykreslený priebeh ťahovej skúšky, kde u skúšobných tyčí č.1 a č.3 došlo k lomu v mieste zvaru. Priebeh ich napätí je odrazom v pomere plochy, ktorú v priereze zaberá dutina a zvarový kov. Dutina u tyče č.3 dosahovala v celej dĺžke zvaru skoro konštantnú hĺbkú, čo je vidieť aj na priebehu lomu. U tyče č.1 dutina zaberala menšiu časť dĺžky zvaru a väčšiu časť zaberá zvarový kov. Pri šírení lomu je v grafe zreteľne vidieť, ako materiál v tom mieste kládol odpor, čo sa prejavilo skokovou zmenou pri poklese napätia. Skúšobná tyč č.2 bola odobratá z

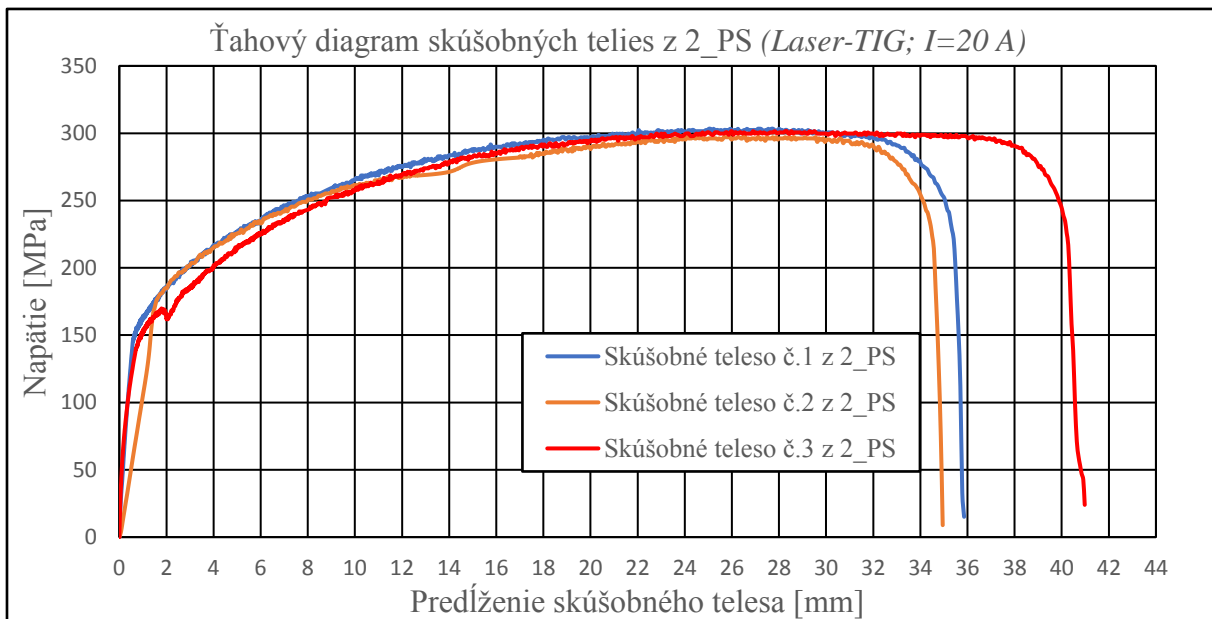
vzorky 1\_PS v mieste s veľmi malým podielom dutín, vďaka čomu zvar ustál ťahovú skúšku a lom nastal v oblasti základného materiálu, vid' obr. 81. Skúšobná tyč č.3 dosiahla i napriek lomu veľkosť hodnoty medze pevnosti nachádzajúcu sa v intervale hodnôt podľa tabuľky 7.



Obr. 81 Skúšobné telesá z vzorky 1\_PS po ťahovej skúške

Tab. 12 Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 2\_PS(Laser-TIG; I=20 A) z ťahovej skúšky

Skúšobné teleso z vzorky 2_PS	[-]	1	2	3
Počiatková hrúbka vzorky $a_0$	[mm]	0,9	0,9	0,9
Počiatková šírka vzorky $b_0$	[mm]	11,76	11,52	11,75
Počiatkový obsah prierezu vzorky $S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	10,58	10,37	10,57
Maximálna zaťažujúca sila $F_m$	[N]	3207,2	3150,4	3188,4
Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$	[MPa]	166,18	148,77	164,54
Medza pevnosti $R_m$	[MPa]	303,02	303,86	301,50
Ťažnosť $A_{80}$	[%]	30,00	28,75	35,00



Graf 2 Ťahový diagram skúšobných telies z vzorky 2\_PS (Laser-TIG; I=20 A)

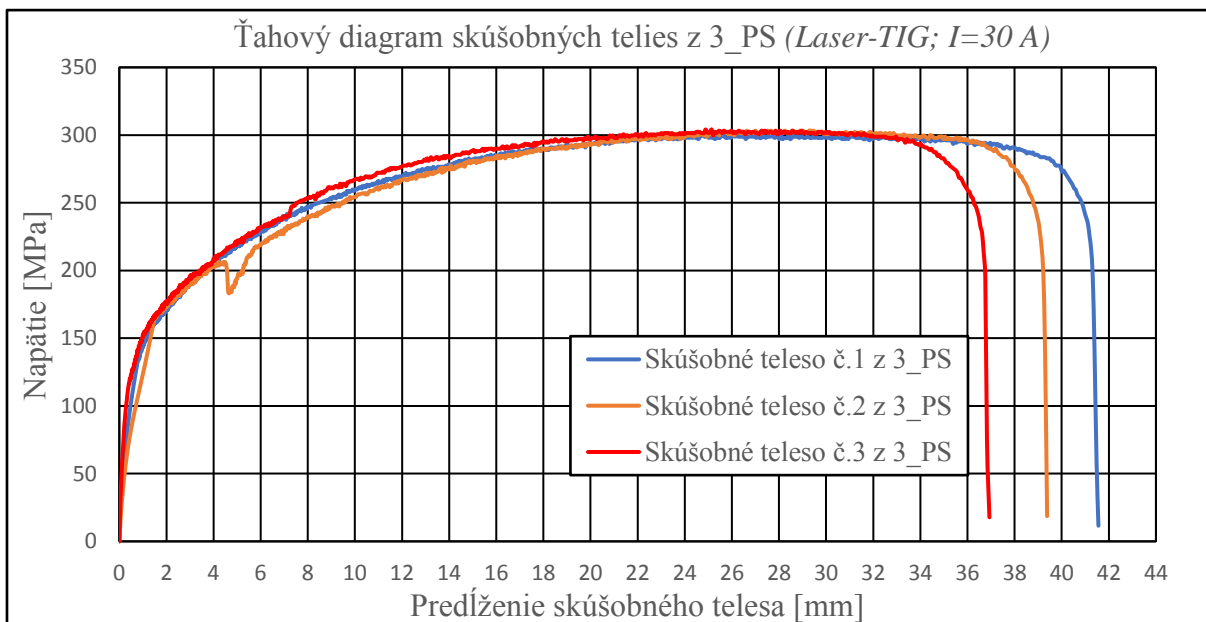
Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 2\_PS, ktorá zastupuje preplátavaný zvar vytvorený metódou Laser-TIG s veľkosťou elektrického prúdu 20 A, sú zapísané v tabuľke 12 a priebeh skúšky ťahom je vykreslený v grafe číslo 2. U všetkých troch skúšobných tyčí nastal lom v mieste základného materiálu, vid' obr. 82. Hodnoty zmluvnej medze klzu a medze pevnosti, okrem hodnoty ťažnosti, spadajú do intervalu hodnôt deklarovaných výrobcou plechu.



Obr. 82 Skúšobné telesá z vzorky 2\_PS po ťahovej skúške

**Tab. 13** Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 3\_PS (Laser-TIG; I=30 A) z ťahovej skúšky

Skúšobné teleso z vzorky 3_PS	[-]	1	2	3
Počiatková hrúbka vzorky $a_0$	[mm]	0,9	0,9	0,9
Počiatková šírka vzorky $b_0$	[mm]	11,58	11,71	11,74
Počiatkový obsah prierezu vzorky $S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	10,41	10,54	10,57
Maximálna zaťažujúca sila $F_m$	[N]	3169,6	3270,2	3216,4
Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$	[MPa]	169,64	174,56	170,89
Medza pevnosti $R_m$	[MPa]	304,13	304,32	304,41
Ťažnosť $A_{80}$	[%]	37,50	31,25	34,38



**Graf 3** Ťahový diagram skúšobných telies z vzorky 3\_PS (Laser-TIG; I=30 A)

Pri ťahovej skúške tyčí z vzorky 3\_PS, ktorá označuje preplátavaný zvar vytvorený metódou Laser-TIG s veľkosťou elektrického prúdu 30 A, došlo u skúšobnej tyči č.1 k vzniku dvojitého krčku, vid' obr. 83. Jeho vznik je pravdepodobne zapríčinený vadou v základnom materiáli, ktorá tam bola prítomná ešte pred zváraním plechov. Okrem tejto zvláštnosti nenastalo nič neobvyklé a všetky tri lomy, vid' obr. 84, vznikli v oblasti základného materiálu, čo značí, že zvarový spoj obstál v ťahovej skúške úspešne. Hodnoty materiálových vlastností namerané počas skúšky sú zapísané v tabuľke 13 a priebeh ťahovej skúšky je vykreslený v grafe číslo 3. Hodnoty zmluvnej medze klzu a medze pevnosti spadajú do intervalu hodnôt deklarovaných výrobcom. Do intervalu nespádajú jednotlivé ťažnosti materiálu, vyznačené jemne červenou farbou v tabuľke 13.



**Obr. 83** Druhý krčok na skúšobnej tyči č.1

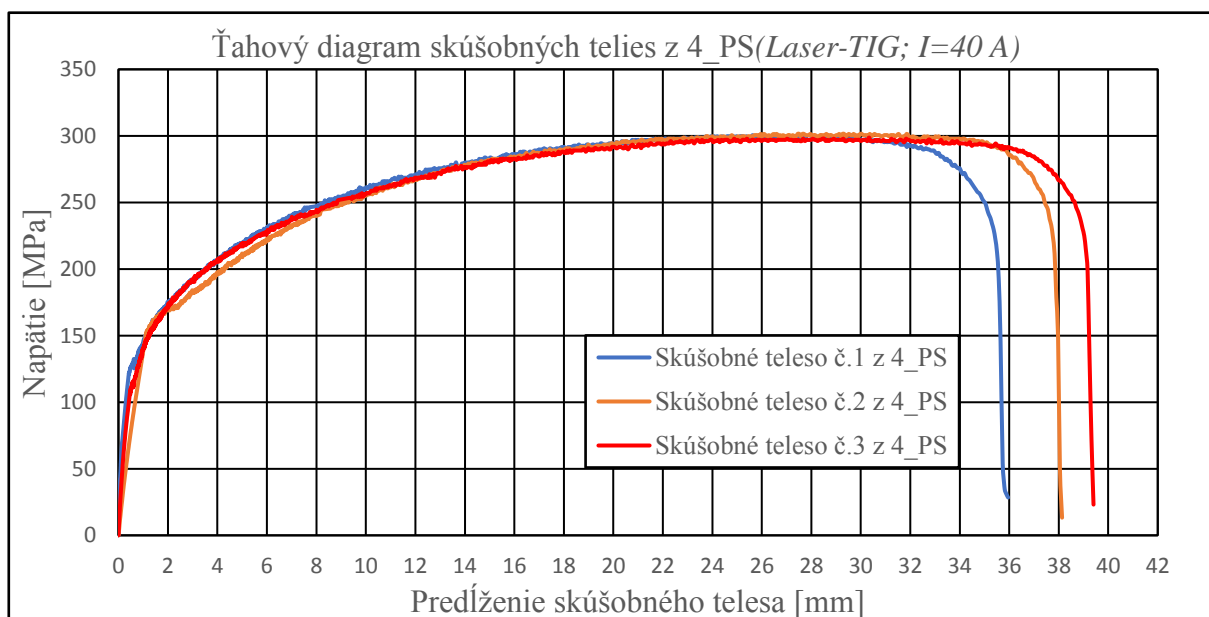


**Obr. 84** Skúšobné telesá z vzorky 3\_PS po ťahovej skúške

Hodnoty zmluvnej medze klzu a medze pevnosti spadajú do intervalu hodnôt deklarovaných výrobcom. Do intervalu nespádajú jednotlivé ťažnosti materiálu, vyznačené jemne červenou farbou v tabuľke 13.

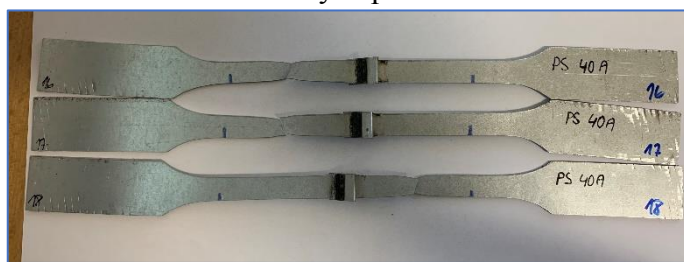
Tab. 14 Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 4\_PS (Laser-TIG; I=40 A) z ťahovej skúšky

Skúšobné teleso z vzorky 4_PS	[-]	1	2	3
Počiatočná hrúbka vzorky $a_0$	[mm]	0,9	0,9	0,9
Počiatočná šírka vzorky $b_0$	[mm]	11,78	11,78	11,59
Počiatočný obsah prierezu vzorky $S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	10,60	10,60	10,43
Maximálna zaťažujúca sila $F_m$	[N]	3178,8	3188,4	3160,0
Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$	[MPa]	175,63	170,31	171,30
Medza pevnosti $R_m$	[MPa]	299,83	300,74	302,94
Ťažnosť $A_{80}$	[%]	31,88	31,25	33,75



Graf 4 Ťahový diagram skúšobných telies z vzorky 4\_PS (Laser-TIG; I=40 A)

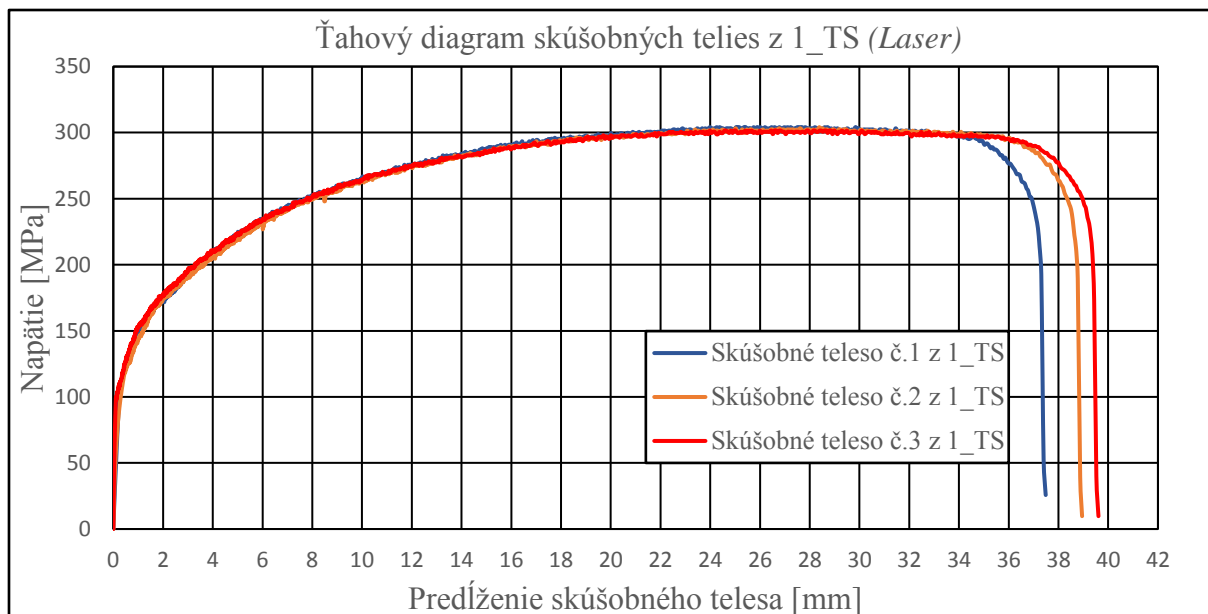
Preplátavaný zvar, vytvorený metódou Laser-TIG s elektrickým prúdom o hodnote 40 A, obstal u ťahovej skúšky úspešne. Hodnoty zo skúšky sú zapísané v tabuľke 14 a priebeh napätí je vykreslený v grafe číslo 4. U všetkých troch tyčí nastal lom v základnom materiáli, vid' obr. 85. Medze pevnosti a zmluvné medze klzu sa nachádzali v intervale deklarovanom výrobcom, avšak ťažnosť materiálu sa nachádzala mimo interval, respektíve pod 40 %.



Obr. 85 Skúšobné telesá z vzorky 4\_PS po ťahovej skúške

Tab. 15 Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 1\_TS (Laser) z ťahovej skúšky

Skúšobné teleso z vzorky 1_TS	[-]	1	2	3
Počiatočná hrúbka vzorky $a_0$	[mm]	0,9	0,9	0,9
Počiatočná šírka vzorky $b_0$	[mm]	11,65	11,73	11,73
Počiatočný obsah prierezu vzorky $S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	10,48	10,56	10,56
Maximálna zaťažujúca sila $F_m$	[N]	3216,4	3216,4	3188,4
Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$	[MPa]	165,95	183,50	166,60
Medza pevnosti $R_m$	[MPa]	306,76	304,67	302,02
Ťažnosť $A_{80}$	[%]	33,13	34,38	35,00



**Graf 5** Ťahový diagram skúšobných telies z vzorky 1\_TS (Laser)

U všetkých skúšobných tyčí z vzorky 1\_TS, označujúcej tupý zvar vytvorený laserom bez predohrevu, došlo k lomu v oblasti základného materiálu a zvarový spoj úspešne obstal v skúške ťahom, vid' obr. 86. Priebeh napätia v závislosti na pretvorení je vykreslený v grafe číslo 5 a namerané hodnoty mechanických vlastností materiálu sú zapísané v tabuľke 15.



**Obr. 86** Skúšobné telesá z vzorky 1\_TS po ťahovej skúške

**Tab. 16** Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 2\_TS (Laser-TIG;  $I=20$  A) z ťahovej skúšky

Skúšobné teleso z vzorky 2_TS	[-]	1	2	3
Počiatková hrúbka vzorky $a_0$	[mm]	0,9	0,9	0,9
Počiatková šírka vzorky $b_0$	[mm]	11,51	11,74	11,72
Počiatkový obsah prierezu vzorky $S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	10,36	10,7	10,55
Maximálna zaťažujúca sila $F_m$	[N]	3141,2	3207,2	3196,6
Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$	[MPa]	173,41	178,00	173,87
Medza pevnosti $R_m$	[MPa]	303,23	303,54	300,49
Ťažnosť $A_{80}$	[%]	35,00	41,25	33,75

Pri skúške ťahom u všetkých troch skúšobných telies vyrezaných z vzorky 2\_TS, u ktorej bol tupý zvar vytvorený metódou Laser-TIG s veľkosťou elektrického prúdu 20 A, došlo k lomu v základnom materiáli a zvarový spoj obstal v skúške úspešne, vid' obr. 87. Pri skúšobnej vzorke č.2 sa znovu vyskytli dva krčky, pričom lom vznikol u krčku, ktorý sa nachádzal na rovnakej strane plechu ako ostatné dva lomy.



**Obr. 87** Skúšobné telesá z vzorky 2\_TS po ťahovej skúške

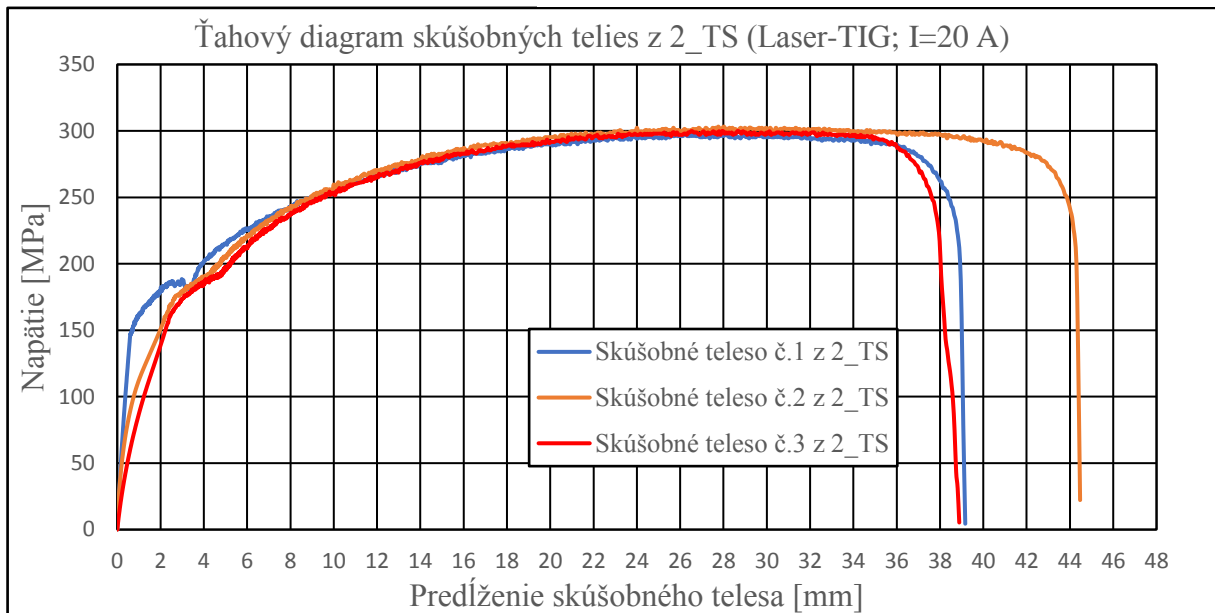
Mechanické vlastností materiálu namerané počas skúšky sú zapísané



v tabuľke 16 a priebeh napätí v závislosti na pretvorení je vykreslený v grafe číslo 6. Detail na vzniknutý druhý krčok je zobrazený na obr. 88.



Obr. 88 Druhý krčok na skúšobnej tyči č.2



Graf 6 Ťahový diagram skúšobných telies z vzorky 2\_TS (Laser-TIG; I=20 A)

Skúšobné telesa z vzorky 3\_TS, označujúcej tupý zvar vytvorený Laser-TIGom s veľkosťou elektrického prúdu 30 A, v skúške ťahom obstáli pevnosťou zvaru úspešne.

Tab. 17 Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 3\_TS (Laser-TIG; I=30 A) z ťahovej skúšky

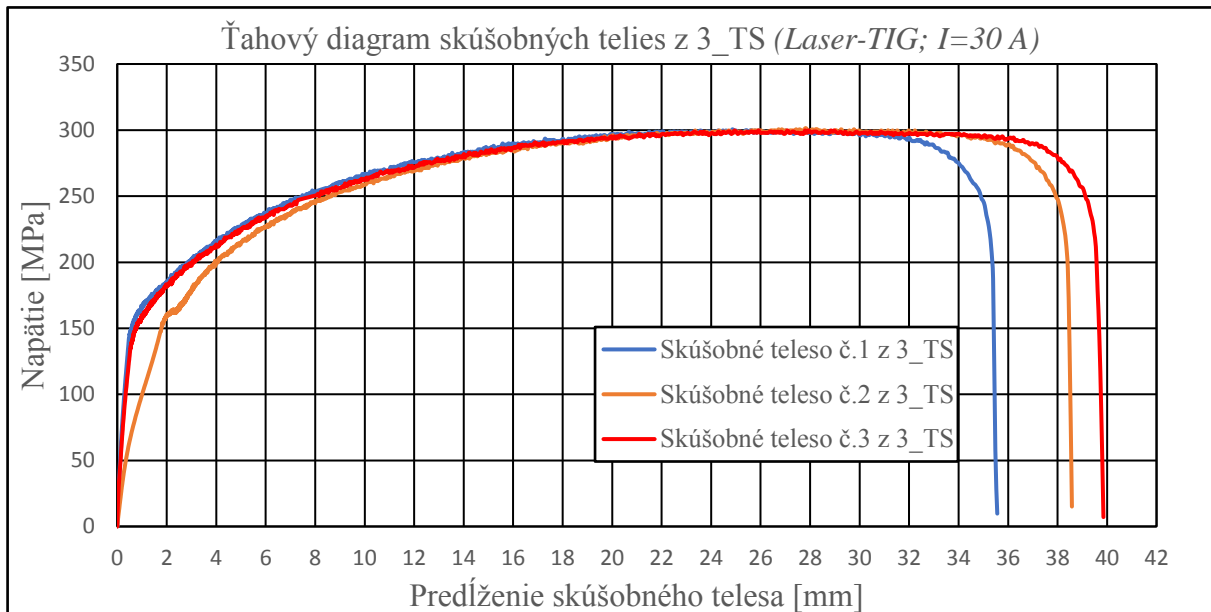
Skúšobné teleso z vzorky 3_TS	[-]	1	2	3
Počiatočná hrúbka vzorky $a_0$	[mm]	0,9	0,9	0,9
Počiatočná šírka vzorky $b_0$	[mm]	11,74	11,69	11,75
Počiatočný obsah prierezu vzorky $S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	10,57	10,52	10,57
Maximálna zaťažujúca sila $F_m$	[N]	3178,8	3188,4	3169,6
Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$	[MPa]	180,69	163,56	164,54
Medza pevnosti $R_m$	[MPa]	300,85	303,05	299,73
Ťažnosť $A_{80}$	[%]	31,25	33,13	37,50

Lom u skúšobných telies nastal v mieste základného materiálu pomerne ďaleko od tepelne ovplyvnenej oblasti, vid' obr. 89. Namerané mechanické vlastnosti sú zapísané v tabuľke 17 a priebeh jednotlivých napätí je vykreslený v grafe číslo 7. Z mechanických vlastností boli medze pevnosti v intervale hodnôt deklarovaných výrobcom. Zo zmluvnej medze klzu sa tyč č.1



Obr. 89 Skúšobné telesa z vzorky 3\_TS po ťahovej skúške

nachádzala hodnotou zanedbateľne mimo interval, čo predstavovalo o 0,69 MPa viac, než deklaruje výrobca pre danú oceľ. Hodnoty ťažnosti boli vo všetkých prípadoch pod hodnotou 40 %



**Graf 7** Ťahový diagram skúšobných telies z vzorky 3\_TS (Laser-TIG; I=30 A)

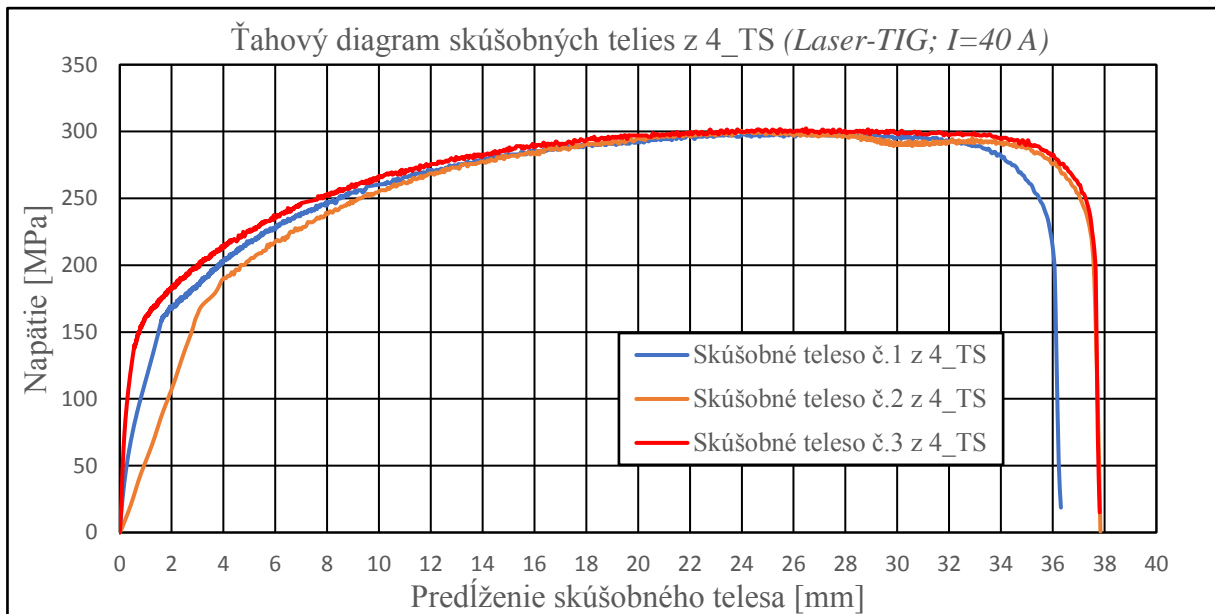
Zvarové spoje u skúšobných telies z vzorky 4\_TS, označujúcej tupý zvar vytvorený zvaracou metódou Laser-TIG s veľkosťou elektrického prúdu 40 A, ustáli namáhanie na ťah a lom nastal v oblasti základného materiálu, taktiež vzdialeného od tepelne ovplyvnenej oblasti, vid' obr. 90. Z nameraných materiálových vlastností bola u všetkých troch skúšobných telies v intervale hodnôt deklarovaných výrobcom iba medza pevnosti. Ťažnosť dosahovala maximálne 31,25 % a zmluvná medza klzu bola v intervale u skúšobných telies č.1 a č.2. Všetky namerané hodnoty z skúšky ťahom sú zapísané v tabuľke 18 a priebeh napätí vykreslený v grafe číslo 8.



**Obr. 90** Skúšobné telesá z vzorky 4\_TS po ťahovej skúške

**Tab. 18** Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 4\_TS (Laser-TIG; I=40 A) z ťahovej skúšky

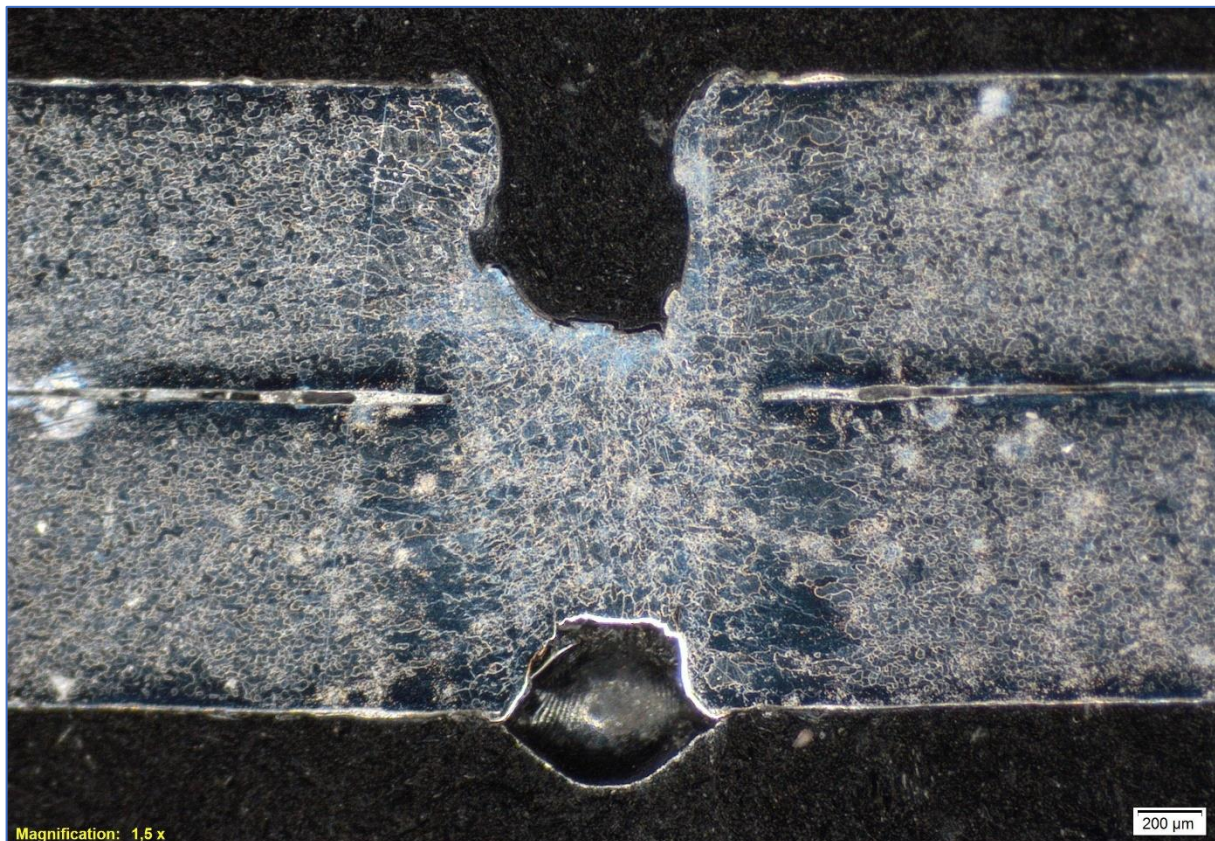
Skúšobné teleso z vzorky 4_TS	[-]	1	2	3
Počiatková hrúbka vzorky $a_0$	[mm]	0,9	0,9	0,9
Počiatková šírka vzorky $b_0$	[mm]	11,63	11,80	11,70
Počiatkový obsah prierezu vzorky $S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	10,47	10,62	10,53
Maximálna zaťažujúca sila $F_m$	[N]	3160,0	3178,8	3197,6
Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$	[MPa]	177,01	181,54	169,69
Medza pevnosti $R_m$	[MPa]	301,90	299,32	303,67
Ťažnosť $A_{80}$	[%]	30,00	28,75	31,25



**Graf 8** Ťahový diagram skúšobných telies z vzorky 4\_TS (Laser-TIG; I=40 A)

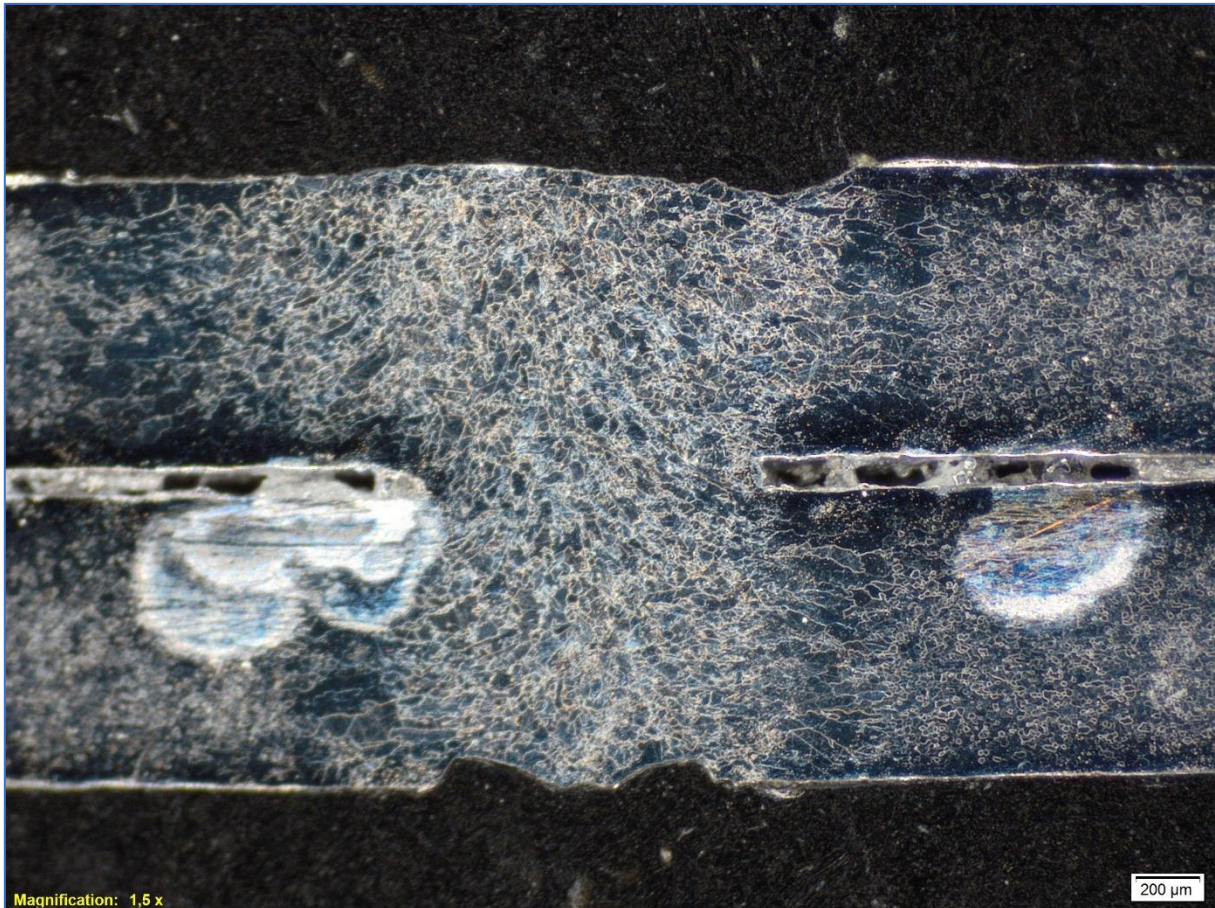
### 3.2.2 Metalografické vyhodnotenie zvaru

Po zaliatí vzoriek zvarových spojov a ich výbruse pre makroskopické pozorovanie sa pomocou mikroskopu Olympus SZ 61 vytvorili jednotlivé snímky pre obidva typy zvarov a zároveň všetky štyri voľby veľkosti prúdu. V grafickom programe spolupracujúcom s mikroskopom sa zmerala veľkosť zvarov, tepelne ovplyvnených oblastí a rozmery prípadných zvarových väd. Následne podľa noriem ČSN EN ISO 13919-1 a ČSN EN ISO 12932 sa určila prípustnosť objavených väd s zaradením pre 3 stupne kvality.



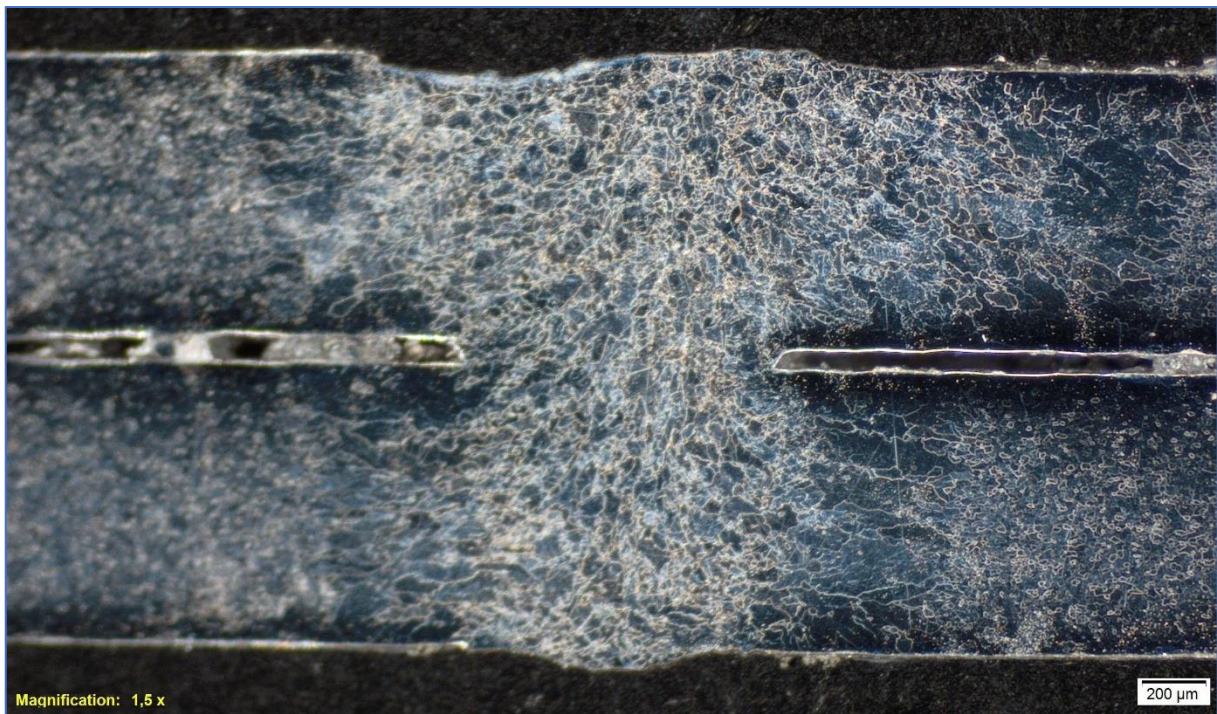
**Obr. 91** Snímka makroštruktúry zvarového spoja I\_PS (Laser)

Pri preplátavanom zvaru na obr. 91 šírka zvarového spoja dosahovala v najširšom mieste 0,95 mm a maximálna šírka tepelne ovplyvnenej oblasti bola 1,61 mm. Na fotke zvaru je možné pozorovať vzhľadom k hrúbke plechov hlboké dutiny a iné druhy väd, ktoré sú hodnotené podľa normy ČSN EN ISO 13919-1. Vrchná dutina sa javí ako pozdĺžna, ktorá sa tiahne rovnobežne s trajektóriou zvaru a dosahuje hĺbku 0,77 mm, čím sa stáva neprípustnou pre všetky tri stupne B, C a D. Nadmerne prepadnutý koreň zvaru, s veľkosťou 0,24 mm, je možné pozorovať za dutinou v spodnej časti zvaru, čím je taktiež neprijateľná pre všetky tri stupne. Nadmerne prepadnutý koreň, i napriek danej veľkosti, spĺňa požiadavky kvality pre najvyšší stupeň B.



**Obr. 92** Snímka makroštruktúry zvarového spoja 2\_PS (Laser-TIG I=20 A)

Vzniknuté vady u prepletávaného zvaru na obr. 92 zvolením predohrevu pomocou TIG s veľkosťou elektrického prúdu 20 A, nie sú tak výrazne ako u zvaru 1\_PS, napriek tomu ich obsahuje. Šírka zvaru dosahuje 1,79 mm a šírka tepelne ovplyvnenej oblasti je 2,81 mm, čo je následkom dodania zvýšeného množstva tepla zapríčineného elektrickým oblúkom. Patrne je možné pozorovať aj zvýšenie medzery medzi plechmi na viac ako 0,1 mm. Jednotlivé vady v tomto zvarovom spoji sú hodnotené podľa normy ČSN EN ISO 12932. Vo vrchnej časti zvaru je pri pohľade na pravú stranu zvaru vidieť preliačinu, ktorá dosahuje hĺbku 0,11 mm a je prípustná iba pre stupeň D, nie pre C ani B. V spodnej časti sú viditeľné vruby v koreni zvaru s hĺbkou 0,1 mm, ktoré sú akceptovateľné iba pre stupeň D.



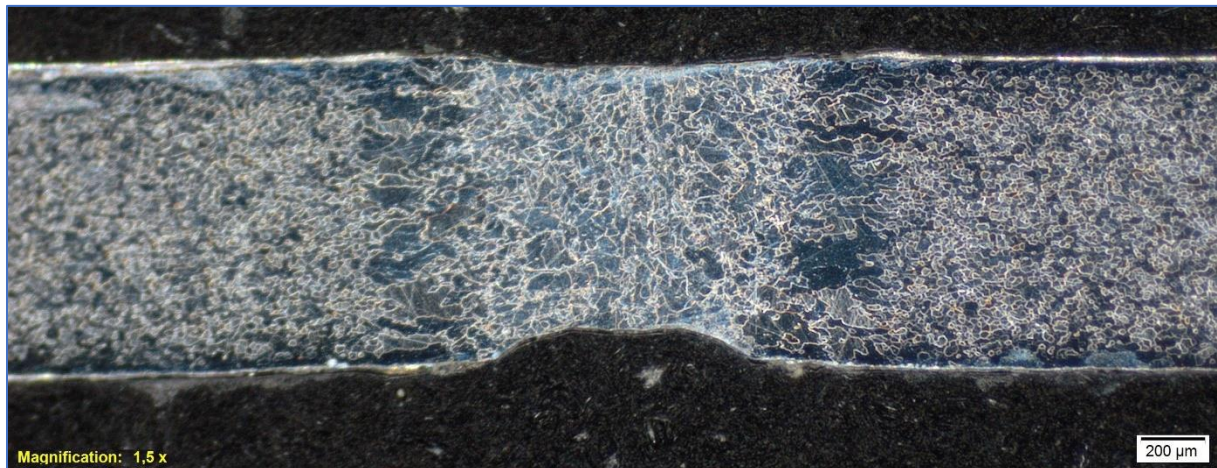
**Obr. 93** Snímka makroštruktúry zvarového spoja 3\_PS (Laser-TIG I=30 A)

U preplátavaného zvaru na obr. 93 je viditeľné zlepšenie z stránky počtu väd a ich prípustnosti. Šírka zvaru dosahuje 1,79 mm a zvýšením dodaného tepla elektrickým oblúkom sa maximálna šírka tepelne ovplyvnenej oblasti zvýšila na 3 mm, pričom je možné pozorovať jej nerovnomernú veľkosť po stranách zvaru. Vo vrchnej časti pri pohľade na ľavú stranu zvaru je spozorovaná preliačina, ktorá dosahuje hĺbku 0,09 mm a smerom napravo je prevýšenie s výškou 0,04mm. Preliačina je prípustná pre stupeň C a prevýšenie je prípustné pre stupeň B. V spodnej časti zvaru je prevýšenie koreňa dosahujúce 0,08 mm, ktoré je prípustné pre stupeň B. Zvarové vady u tohto druhu zvaru boli hodnotené podľa normy ČSN EN ISO 12932.



**Obr. 94** Snímka makroštruktúry zvarového spoja 4\_PS (Laser-TIG I=40 A)

Na obr. 94 je snímka preplátavaného zvaru vytvoreného metódou Laser-TIG s veľkosťou prúdu 40 A. Zvýšením prúdu sa viditeľne zhoršili vlastnosti zvarového spoja spájané s nárastom závažnosti vzniknutých väd zvaru. Šírka zvaru dosiahla zväčšenie na 1,89 mm a tepelne ovplyvnená oblasť dosahuje šírku 3,31 mm. Taktiež došlo k zvýšeniu medzery medzi plechmi na 0,14 mm. Zvarové vady sa hodnotili podľa normy ČSN EN ISO 12932. Vo vrchnej časti zvaru sú preliačiny s maximálnou hĺbkou 0,09 mm, ktoré sú prípustné pre stupeň C. V spodnej časti sa nachádzajú vruby v koreni zvaru s hĺbkou 0,16 mm, ktoré sú prípustné pre stupeň D, nie pre C ani B. Na snímke je taktiež patrne viditeľná nerovnomernosť medzi veľkosťou tepelne ovplyvnenej oblasti, ktorá na pravej strane je omnoho väčšia než na ľavej strane.



*Obr. 95 Snímka makroštruktúry zvarového spoja 1\_TS (Laser)*

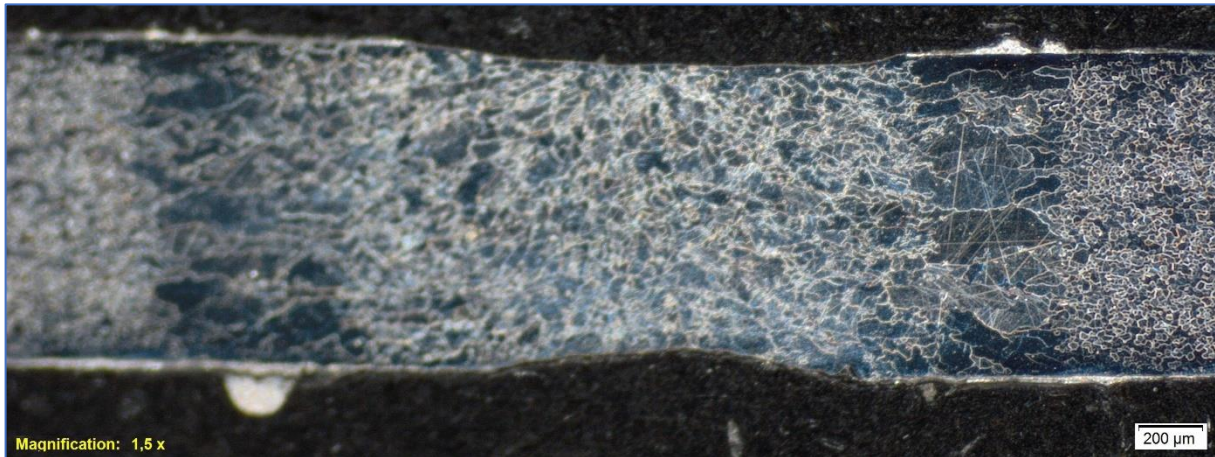
Tupý zvar na obr. 95, ktorý je vytvorený laserom, dosahuje maximálnu šírku 0,98 mm a šírka tepelne ovplyvnenej oblasti je 1,73 mm. Zvarový spoj obsahuje vady na oboch stranách, ktoré sú hodnotené podľa normy ČSN EN ISO 13919-1. Na vrchnej časti zvaru sa nachádza preliačina s hĺbkou 0,05 mm, ktorá je prípustná pre stupeň B. V spodnej časti je viditeľný chudý koreň zvaru s hĺbkou 0,14 mm, ktorý je prípustný pre stupeň C. Zvarový spoj vytvára uhlové presadenie veľkosťou prípustné maximálne pre stupeň D.



*Obr. 96 Snímka makroštruktúry zvarového spoja 2\_TS (Laser-TIG; I=20 A)*

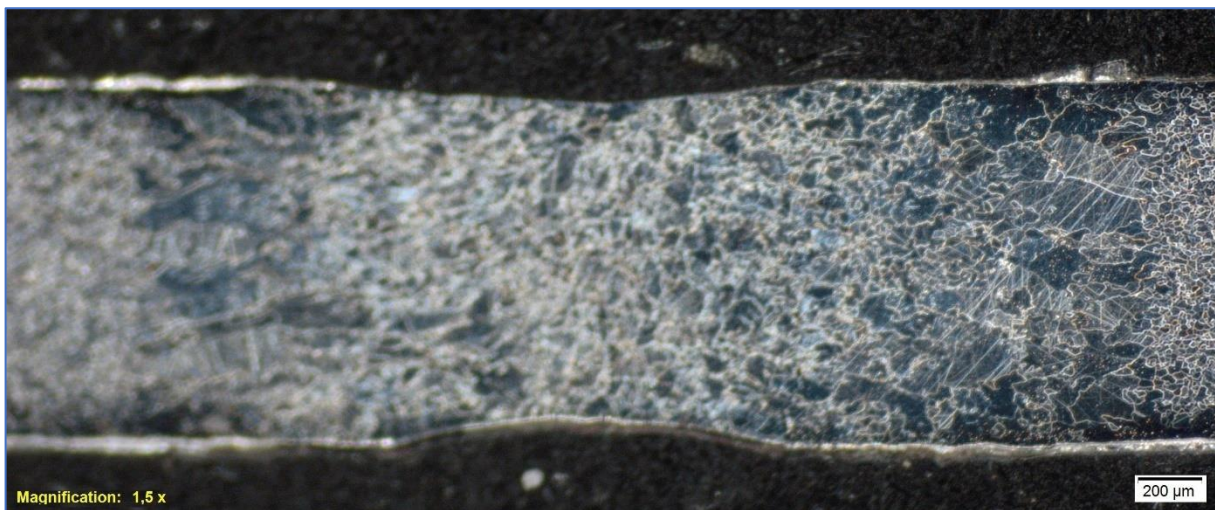
Na obr. 96 je snímok tupého zvaru vytvorený metódou Laser-TIG s veľkosťou elektrického prúdu 20 A. Veľkosť zvaru na šírku dosahuje 1,65 mm a tepelne ovplyvnená oblasť je široká 2,46 mm. Z letného pohľadu je viditeľná deformácia zvarového spoja, u ktorého nastalo lineárne presadenie s veľkosťou 0,07 mm, ktoré je prípustné pre stupeň B a uhlové presadenie taktiež prípustné pre stupeň B. Vo vrchnej časti zvaru vznikla preliačina s hĺbkou 0,09 mm, ktorá je prípustná pre stupeň C a taktiež pre ten istý stupeň je prípustný chudý koreň zvaru

s hĺbkou 0,08 mm, viditeľný v spodnej časti zvarového spoja. Zvarové vady boli u tohto zvaru hodnotené podľa normy ČSN EN ISO 12932.



*Obr. 97 Snímka makroštruktúry zvarového spoja 3\_TS (Laser-TIG; I=30 A)*

Na obr. 97 je zobrazený tupý zvar, ktorý je taktiež vytvorený metódou Laser-TIG s zvýšenou veľkosťou elektrického prúdu na 30 A. S nárastom prúdu došlo k zvýšeniu šírky zvaru na 1,83 mm a tepelne ovplyvnenej oblasti na 2,98 mm. Ako v predchádzajúcom zvare, tak i v tomto sú prítomné zvarové vady, ktoré sú hodnotené podľa normy ČSN EN ISO 12932. Na snímke zvaru je možné vidieť jemné uhlové presadenie, ktoré po odmeraní veľkosti uhlu je prípustné maximálne pre stupeň C. Preliachina z vrchnej časti zvaru dosahuje 0,07 mm, čo je prípustné pre stupeň C a v spodnej časti je viditeľný chudý koreň zvaru s veľkosťou 0,09 mm, čo je prípustné taktiež pre stupeň C.



*Obr. 98 Snímka makroštruktúry zvarového spoja 4\_TS (Laser-TIG; I=40 A)*

Na obr. 98 je zobrazený snímok tupého zvaru vytvoreného metódou Laser-TIG s veľkosťou elektrického prúdu 40 A. Maximálna šírka zvaru, ktorá bola u tejto varianty dosiahnutá, je 1,54 mm a je menšia než pri elektrickom oblúku s prúdmi 20 a 30 A. Nárast šírky nastal u tepelne ovplyvnenej oblasti na 3,2 mm, ktorá je pri pohľade na snímok na pravej strane zvaru omnoho väčšia než na ľavej strane. Po zvážení, že trajektória zvaru prechádzala stredom prípravku vrátane rovnako vzdialených úpiniek a teda vzniku rovnakých podmienok pre odvod tepla, môj predpoklad vzniku tohto javu spočíva vo vybočení elektrického oblúka. Tento jav nastal taktiež u predchádzajúcich zvarových spojoch 3\_PS (Laser-TIG; I=30 A) na obr. 93 a 4\_PS (Laser-TIG; I=40 A) na obr. 94 kedy bol použitý vyšší elektrický prúd. Z vad zvaru, hodnotených podľa normy ČSN EN ISO 12932, je vo vrchnej časti preliachina s hĺbkou 0,09 mm prípustná pre stupeň C a chudý koreň zvaru s hĺbkou 0,9 mm prípustný pre stupeň C

v spodnej časti zvaru. Je taktiež prítomné uhlové presadenie s veľkosťou prípustnou pre stupeň C.

**Tab. 19** Výsledné hodnotenie zvarových spojov podľa stupňa kvality

Zvarový spoj	Hodnotené podľa normy	Výsledný stupeň kvality
Preplátavaný zvar 1 PS	ČSN EN ISO 13919-1	Nevyhovel
Preplátavaný zvar 2 PS	ČSN EN ISO 12932	D
Preplátavaný zvar 3 PS	ČSN EN ISO 12932	C
Preplátavaný zvar 4 PS	ČSN EN ISO 12932	D
Tupý zvar 1 TS	ČSN EN ISO 13919-1	D
Tupý zvar 2 TS	ČSN EN ISO 12932	C
Tupý zvar 3 TS	ČSN EN ISO 12932	C
Tupý zvar 4 TS	ČSN EN ISO 12932	C

U makroskopickej skúšky, pri metalografickom vyhodnotení zvarového spoja, sa zvarové vady prevažne opakovali v rôznej miere u každého druhu zvaru. Každá zo zistených väd bola zhodnotená podľa príslušnej normy k použitej metóde zvárania. Z celkového pohľadu kvality bol každý zvar hodnotený spôsobom, že najhorší dosiahnutý stupeň bol zvolený ako výsledný. Výsledky pre všetky testované zvary sú zapísané v tabuľke 19.

#### 4 VYHODNOTENIE EXPERIMENTÁLNEJ ČASTI PRÁCE

S prihliadnutím na výsledky z ťahovej skúšky vrátane materiálových vlastností po zvarení plechov a metalografickom vyhodnotení so stupňom kvality vrátane veľkosti zvaru a tepelne ovplyvnenej oblasti odporúčam zvoliť zváracie parametre podľa tabuľky 20:

**Tab. 20** Odporúčané zváracie parametre pre materiál WSS-M1A365-A14 50G o hrúbke 0,9 mm

Typ zvaru	[ - ]	Preplátavaný	Tupý
Výkon laseru ( $\lambda = 1070 \text{ nm}$ )	[W]	1000	800
Posunová rýchlosť	[mm · min <sup>-1</sup> ]	1200	1200
Zvárací prúd (DC)	[A]	30	20
Typ elektródy podľa zloženia	[ - ]	WT20	WT20
Priemer elektródy	[mm]	2,4	2,4
Výška elektródy nad materiál	[mm]	2	2
Vzdialenosť $d_{LA}$	[mm]	3	3
Sklon TIG horáku od normály	[°]	45	45
Poloha ohniska	[mm]	0	0
Ochranný plyn	[ - ]	Argón 4.6	Argón 4.6
Prietok plynu	[l · min <sup>-1</sup> ]	15 (iba TIG horák)	15 (iba TIG horák)
Vnesené teplo - laseru	[kJ · m <sup>-1</sup> ]	38,0	30,4
Vnesené teplo - TIG	[kJ · m <sup>-1</sup> ]	13,95	8,28

U preplátavaného zvaru pri vyššie zvolených parametroch došlo k najlepšiemu výsledku dosiahnutému u skúšky ťahom, kedy výsledné materiálové vlastnosti boli spomedzi všetkých štyroch najbližšie k základnému materiálu. Zvarový spoj pri metalografickom vyhodnotení dosahoval taktiež najvyšší stupeň kvality C podľa normy ČSN EN ISO 12932. U tupého zvaru taktiež bol zvolený variant, u ktorého výsledné materiálové vlastnosti boli hodnotami najbližšie základnému materiálu a ktorý dosiahol stupeň kvality C podľa normy ČSN EN ISO 12932. Stupeň kvality C dosiahli taktiež tupé zvary s nastavením elektrického prúdu 30 a 40 A, u ktorých bola vyššia šírka zvaru i tepelne ovplyvnenej oblasti a dosiahnutá nižšia ťažnosť. Pri technológii Laser-TIG zároveň došlo k zníženiu prietoku ochranného plynu oproti samotnému zváraníu laseru o 2 l · min<sup>-1</sup>, ktorý prúdil k zvarovému kúpeľu cez hubicu TIG horáku.



## 5 ZÁVER

Diplomová práca sa venuje hybridnej technológii Laser-TIG pre zváranie ocelí s povrchovou ochrannou vrstvou na báze zinku. Jej cieľom je overiť schopnosť zvariť dva polotovary z 0,9 mm hrubého extra hlbokoťažného plechu WSS-M1A365-A14 s vrstvou zinku v gramáži  $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ . V rozbere práce bola práve táto metóda zvolená ako najvhodnejšia s najmenším zásahom do pracoviska vybaveného laserom. V procese zvárania, u technológie Laser-TIG, laserový lúč slúži ako primárny zdroj energie a je doplnený elektrickým oblúkom metódy TIG, ktorý vytvára potrebné množstvo tepla pre natavenie a následné vyparenie zinkovej vrstvy z okolia trajektórie zvaru predtým, než na dané miesto dorazí laserový lúč.

Pre overenie funkčnosti metódy a kvality vytvorených zvarov bol uskutočnený experiment, u ktorého sa vytvorili 4 vzorky pre preplátavaný zvar a 4 vzorky pre tupý zvar. Pred zahájením zvárania boli plechy nastrihané na polotovary s obdĺžnikovým tvarom, ich hrany boli brúsením zbavené nerovností a výstupkov, a povrch očistený od mazív a iných nečistôt. Týmto krokom sa vytvorili rovnaké podmienky pre každú vzorku v teste s výsledkami, na ktoré mali vplyv iba zváracie parametre, vybavenie s prostredím pracoviska a samotný základný materiál. Prvotný zvar, vytvorený laserom, u oboch typov zvaru slúžil pre porovnanie účinku pridania elektrického oblúku do procesu zvárania. Ostatné 3 vzorky pre každý zvar boli vytvorené s prídavným elektrickým oblúkom, u ktorého sa menili hodnoty elektrického jednosmerného prúdu 20, 30 a 40 ampérov. Po vytvorení vzoriek zvarov boli zvarované plechy narezané na telesa, ktoré slúžili pre skúšku ťahom a metalografické vyhodnotenie makroskopickej štruktúry.

Skúškou ťahom sa potvrdili pozitívne účinky elektrického oblúku najmä pre preplátavaný zvar. U tohto typu zvaru boli vrstvy zinku uzavreté medzi dvomi oceľovými plechmi a pri ich natavovaní laserom dochádzalo k vzniku neprípustných zvarových väd vrátane znemožnenia zvärať tento druh polotovaru. Pre tupý zvar sa u tejto skúšky neprejavil pozitívny vplyv v takom rozsahu kvôli zváraným styčným plochám, ktoré boli strihaním a brúsením zbavené vrstiev zinku. Zinok sa nachádzal iba na hornej a dolnej ploche základného materiálu, a do procesu vstupoval rozsahom úmernému šírke zvarového spoja. K lomu v mieste zvaru došlo u preplátavaného spoja vytvoreného iba laserom u dvoch z troch skúšobných tyčí. Tieto lomy boli predvídané už pred zahájením skúšky kvôli chýbajúcemu, pomerne veľkému množstvu, zvarového kovu zisteného vizuálnou kontrolou. Z mechanických vlastností vzoriek bola nameraná medza pevnosti, zmluvná medza klzu a ťažnosť. U obidvoch druhov medzí sa ich hodnoty pohybovali v intervaloch, zistených od výrobcu plechu, s malým výskytom vybočení, ktoré boli do 1 %. Pri lome skúšobného telesa č.3 v mieste zvaru sa medza pevnosti taktiež nachádzala v intervale, dosahujúc 279,89 MPa. Ťažnosť sa pohybovala v intervale od 28,75 do 41,25 % a hodnotu presahujúcu minimálne 40 % dosiahla iba v jednom prípade, ktorý bol u skúšobného telesa z tupého zvaru vytvoreného technológiou Laser-TIG a veľkosti elektrického prúdu 20 A. Pri metalografickom vyhodnotení bolo zistených niekoľko druhov väd materiálu a žiaden zo vzniknutých zvarov nebol bez vady. Tie boli ohodnotené podľa noriem prislúchajúcich metódam zvárania.

Na základe výsledkov a informácií, získaných z oboch skúšok, sa určili pre preplátavaný zvar zváracie parametre použité pri zváraní ocele technológiou Laser-TIG s veľkosťou elektrického prúdu 30 A a pre tupý zvar boli určené zváracie parametre použité pri zváraní ocele technológiou Laser-TIG s veľkosťou elektrického prúdu 20 A. Pri obidvoch zvarových spojoch dosahoval materiál stupeň kvality C podľa normy ČSN EN ISO 13932 a spomedzi všetkých prúdových variant mali najlepšie materiálové vlastnosti. Z celkových dosiahnutých výsledkov je technológia Laser-TIG vhodná pre zváranie ocele WSS-M1A365-A14 s povrchovou vrstvou zinku v gramáži  $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ . Pre stanovenie optimálnych zváracích parametrov kvôli dosiahnutiu ešte vyššieho stupňa kvality zvarového spoja, by bolo vhodné uskutočniť ďalší výskum.

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV [140]

- [1] STAUFER, Herbert a Gerhard MIESSBACHER. *LaserHybrid Welding and LaserBrazing: State of the Art in Technology and Practice by Examples of Audi A8 and VW-Phaeton*. ISSN 0361-8765. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/9121/f2f359f68af8a22667ef83777ede82abee07.pdf>
- [2] Světová premiéra svařování systémem LaserHybrid. *MM Průmyslové spektrum: Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2001, **4**(10), 28 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svetova-premiera-svarovani-systemem-laserhybrid.html>
- [3] Thermal joining techniques. *ABB Group - Leading digital technologies for industry* [online]. Affolternstrasse 44, 8050 Zurich, Switzerland: ABB Asea Brown Boveri Ltd, 2020 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/manufacturing-solutions/body-in-white/technologies-and-process-expertise/thermal-joining-techniques>
- [4] HAVRÁNKOVÁ, Zdeňka. Příručka žárového zinkování. In: *Zinkoza a.s. Krompachy* [online]. Praha: Asociace českých zinkoven, Asociácia slovenských zinkovní (AČSZ), 2007 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: [http://www.zinkoza.sk/prirucka\\_ziaroveho\\_zinkovania.pdf](http://www.zinkoza.sk/prirucka_ziaroveho_zinkovania.pdf)
- [5] Lehké konstrukce automobilů - Specifické povlaky hlubokotažných ocelí. *MM Průmyslové spektrum: Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2016, **19**(12), 118 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lehke-konstrukce-automobilu-specificke-povlaky-hlubokotaznych-oceli.html>
- [6] KIM, Cheolhee, Woongyong CHOI a Sehun KIM. Relationship between the Weldability and the Process Parameters for Laser-TIG Hybrid Welding of Galvanized Steel Sheets. In: *Materials Transactions* [online]. The Japan Institute of Metals, 2008, s. 179-186 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/6621/fa42c28f444bb0ce8e6bec0b3b18879be513.pdf>
- [7] MA, Junjie, Fanrong KONG, Blair CARLSON a Radovan KOVACEVIC. Mitigating Zinc Vapor Induced Weld Defects in Laser Welding of Galvanized High-Strength Steel by Using Different Supplementary Means. In: *Welding Processes* [online]. InTech, 2012 [cit. 2020-03-29]. DOI: 10.5772/53562. ISBN 978-953-51-0854-2. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/welding-processes/mitigating-zinc-vapor-induced-weld-defects-in-laser-welding-of-galvanized-high-strength-steel-by-usi>
- [8] Odporové zvarovanie. *MatNet Slovensko* [online]. Slovensko: Aglo solutions Powered by: SysCom, 2006 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=382&pg=3>
- [9] Bodové zvarovanie. *Industrial intelligence 4.0\_beyond automation / KUKA AG* [online]. Zugspitzstraße 140 86165 Augsburg, Německo: KUKA Aktiengesellschaft, 2020 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/sk-sk/produkty-a-slu%C5%BEby/procesn%C3%A9-technol%C3%B3gie/2016/07/bodov%C3%A9-zv%C3%A1ranie>
- [10] European Harmonized Training for Personnel working with Car Body Repair Technology: Training Handbook. In: *CARBOREP* [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <http://carborep.eu/documents/IO3-ECBRT%20Curriculum%20Adaptation%20and%20Development%20of%20Training%20Materials.pdf>

- [11] Zváranie taviacou sa elektródou v ochrane plynu (MIG/MAG). *MatNet Slovensko* [online]. Slovensko: Aglo solutions Powered by: SysCom, 2006 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=383>
- [12] ZHANG, X.Q., G.L. CHEN a Y.S. ZHANG. Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels. In: *Materials and Design 29* [online]. ShangHai JiaoTong University, ShangHai 200030, China: Elsevier, 2020, s. 179-283 [cit. 2020-04-03]. ISSN 0261-3069. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0261306906003244?token=8854C5FCDD74D6BF8238AFDEFD5C2050CB6501BDEE70AC2BEA9D96CA138A30DC14B879291981A7AEE1275371CD7D065C>
- [13] MAG zváranie pozinkovaných plechov v ochrannom plyne CO<sub>2</sub> a Ar + 18 % CO<sub>2</sub>. *Časopis KONSTRUKCE - informace o uplatnění konstrukcí a návazných oborů při stavbách ve stavebnictví a strojírenství* [online]. Starobělská 1133/5, 700 30 Ostrava: KONSTRUKCE Media, s.r.o., 2020 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/mag-zvaranie-pozinkovanych-plechov-v-ochrannom-plyne-co2-a-ar-18-co2/>
- [14] MIG pájení pozinkovaných autokarosářských dílů. *Internetový magazín Automig* [online]. Tolstého 474/2 415 03 Teplice 3: Migatronik CZ a.s. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/mig-pajeni-mig-brazing/>
- [15] Praktické problémy pri oblúkovom zváraní pozinkovaných plechov a obecné možnosti ich riešenia. <http://www.techpark.sk/> [online]. TechPark, o. z., Pltnická č. 4, 010 01 Žilina: TechPark, o.z., 2008 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/technika-52009/prakticke-problemy-pri-oblukovom-zvarani-pozinkovanych-plechov-a-obecne-moznosti-ich-riesenia.html>
- [16] SPÁJKOVANIE POZINKOVANÝCH PLECHOV METÓDOU CMT. *Prvý strojársky server - Strojárstvo / Strojírenství* [online]. Moyzesova 35, 010 01 Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., publishing house, 2020 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/strojarsstvo-extra/3643-spajkovanie-pozinkovanych-plechov-metodou-cmt>
- [17] MIG pájení. *Lorch - svařovací zdroje, hořáky a automatizace* [online]. Im Anwänder 24 – 26 71549 Auenwald Germany: Lorch Schweifstechnik GmbH, 2019 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.lorch.eu/cs/znalosti/mig-pajeni/>
- [18] MIG pájení. *SVARINFO - váš zdroj informací o svařování, server ze skupiny SVARBAZAR* [online]. 2005 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2007101201>
- [19] Lepení ve výrobě karoserie. *MM Průmyslové spektrum: Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2017, **21**(7), 80 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lepeni-ve-vyrobe-karoserie.html>
- [20] Technologie a technika lepení - základní informace | Lepidla.cz. *Lepidla.cz - Opravdu vše o lepení* [online]. Třída Soukenická 93, Olivětín, 550 01 Broumov: Z - TRADE s. r. o., 2016 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html>
- [21] Lepení kovů | Lepidla.cz. *Lepidla.cz - Opravdu vše o lepení* [online]. Třída Soukenická 93, Olivětín, 550 01 Broumov: Z - TRADE s. r. o., 2016 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/a/lepeni-kovu.html>

- [22] KIM, Yong, Kiyoung PARK a Sungbok KWAK. A Review of Arc Brazing Process and Its Application in Automotive. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* [online]. 2016, **5**(4), 5 [cit. 2020-04-10]. DOI: 10.18178/ijmerr.5.4.246-250. ISSN 22780149. Dostupné z: <http://www.ijmerr.com/uploadfile/2016/1121/20161121023814263.pdf>
- [23] *Svařování laserovým paprskem* [online]. Johann-Maus-Straße 2 71254 Ditzingen: TRUMPF GmbH + Co. KG, 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/)
- [24] *Aditivní výroba* [online]. Johann-Maus-Straße 2 71254 Ditzingen: TRUMPF GmbH + Co. KG, 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/)
- [25] *Aplikace průmyslových laserů - Průmyslové lasery | Medicom a.s. - laser* [online]. Ženíškova 1647 149 00 Praha 4: MediCom a.s. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <http://www.medicom.cz/p.php?p=prumyslove,aplikace>
- [26] Laserové svařování s přídavným drátem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, **18**(1), 82 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani-s-pridavnym-dratem.html>
- [27] SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ I (LASER WELDING). *LAO - lasery a optika* [online]. Na Floře 1328/4 143 00 Praha 4: LAO - průmyslové systémy s.r.o., 2014 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
- [28] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. Ostrava: ZEROSS, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
- [29] LLEWELLYN, D.T. a R.C. HUDD. *1.10.2 Mechanical Joining*. Elsevier. ISBN 978-0-7506-3757-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt004LYZG2/steels-metallurgy-applications/mechanical-joining>
- [30] MRŇA, Libor. Aktuální možnosti v laserovém svařování. *MM Průmyslové spektrum: Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2018, **21**(1), 44 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-moznosti-v-laserovem-svarovani.html>
- [31] KOVACEVIC, Radovan. *Welding Processes*. 1. Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia: IntechOpen, 2012. DOI: 10.5772/2884. ISBN 978-953-51-0854-2.
- [32] GU, Hongping. Laser lap welding of zinc coated steel sheet with laser-dimple technology. *Journal of Laser Applications*. 2010, **22**(3), 87-91. DOI: 10.2351/1.3485596. ISSN 1042-346X. Dostupné z: <http://lia.scitation.org/doi/10.2351/1.3485596>
- [33] REIMANN, Wilfried, Michael DOBLER, Martin GOEDE, Michael SCHMIDT a Klaus DILGER. Three-beam laser brazing of zinc-coated steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, **90**(1-4), 317-328. DOI: 10.1007/s00170-016-9361-2. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-016-9361-2>
- [34] Fiber Lasers: Multiple laser beam materials processing. *Laser Focus World* [online]. Endeavor Business Media, LLC., 2020 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16547084/fiber-lasers-multiple-laser-beam-materials-processing>
- [35] YLS-BR+Brochure. In: *Fiber Laser Sources & Solutions | IPG Photonics* [online]. IPG Photonics Corporation, 2020 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/108/FileAttachment/YLS-BR+Brochure.pdf>

- [36] BENEŠ, Libor. *Svařování* [online]. In: . s. 39 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT\\_01\\_Prehled\\_svarovani\\_T08.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf)
- [37] Skupiny základních materiálů dle ISO/TR 15608. *SVARINFO - váš zdroj informací o svařování, server ze skupiny SVARBAZAR* [online]. 2005-2020 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=skupiny15608>
- [38] Základní materiál – ekvivalent uhlíku CET – metoda B. *Techportál.cz* [online]. Evropská 423/178, P. O. Box 124, 160 41 Praha 6: Dashöfer Holding, Ltd., Verlag Dashöfer, nakladatelství, spol. s r. o., 2020 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCyd9d4JCL8DCdYqYzdXTICOlQ](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCyd9d4JCL8DCdYqYzdXTICOlQ)
- [39] AMBROŽ, Oldřich. *SVARITELNOST MATERIÁLU*. In: *Odbor technologie svařování ÚST FSI VUT Brno* [online]. Technická 2896/2 616 69 Brno: ÚST o. TSPÚ, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/fsm\\_svaritelnost\\_materialu\\_ambroz.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/fsm_svaritelnost_materialu_ambroz.pdf)
- [40] OLSEN, Flemming. *Hybrid Laser-Arc Welding* [online]. Abington Hall, Granta Park, Great Abington, Cambridge CB21 6AH, UK: Woodhead Publishing Limited, 2009 [cit. 2020-05-03]. ISBN 978-1-84569-652-8. Dostupné z: <https://www.elsevier.com/books/hybrid-laser-arc-welding/olsen/978-1-84569-370-1>
- [41] KORÁŇ, Pavel. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení. *LAO - lasery a optika* [online]. Na Floře 1328/4 143 00 Praha 4: LAO - průmyslové systémy s.r.o., 2014 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [42] LUCAS, Jacques, Pierre LUCAS, Thierry MERCIER, Alain ROLLAT a William DAVENPORT. *17.2.1 Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)*. Elsevier. ISBN 978-0-444-62735-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U8OMJ2/rare-earths-science-technology/erbium-doped-fiber-amplifier>
- [43] Cesta k objevu. *LASER A JEHO VYUŽITÍ* [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k12.htm>
- [44] Princip laseru. *LASER A JEHO VYUŽITÍ* [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
- [45] MRŇA, Libor. Základy laserové techniky. In: *Odbor technologie svařování ÚST FSI VUT Brno: Studijní opory* [online]. ÚST o. TSPÚ, 2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_zaklady\\_laserove\\_techniki\\_2013\\_mma.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techniki_2013_mma.pdf)
- [46] Rozdelenie laserov. *LASCAM systems - priemyslové laserové a kamerové systémy* [online]. Chmeľová dolina 27, 949 01 Nitra: LASCAM systems s.r.o., 2019 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/sk/rozdelenie-laserov/>
- [47] Historie vývoje laseru. *Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení* [online]. Ulička 37, Hlohovec, 691 43 Česká republika: Leonardo technology s.r.o., 2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/historie-vyvoje-laseru>
- [48] Možné dělení typů a druhů laserů. *Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení* [online]. Ulička 37, Hlohovec, 691 43 Česká republika: Leonardo technology s.r.o., 2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>

- [49] Vlnové vlastnosti světla. In: *Gymnázium sv. Cyrila a Metoda v Nitre* [online]. Farská 19, 94901 Nitra: Gymnázium sv. Cyrila a Metoda [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: [http://www.gcm.sk/www/predmety/fyzika/dokumenty/01\\_VlnoveVlastnostiSvetla.pdf](http://www.gcm.sk/www/predmety/fyzika/dokumenty/01_VlnoveVlastnostiSvetla.pdf)
- [50] Fyzikální praktikum pro nefyzikální obory. In: *PHYSICS.MUNI.CZ* [online]. Botanická 554/68a 602 00 Brno: Ústav výpočetní techniky Masarykova univerzita, 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: [https://www.physics.muni.cz/kof/vyuka/fpno\\_07.pdf](https://www.physics.muni.cz/kof/vyuka/fpno_07.pdf)
- [51] Co rozhoduje při volbě typu laseru. *MM Průmyslové spektrum: Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. Přípotoční 1519/10a, 101 00 Praha 10: MM publishing, s.r.o., 2011, **14**(9), 91 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
- [52] HUNG, Tsung-Pin, Hao-En SHI a Jao-Hwa KUANG. Temperature Modeling of AISI 1045 Steel during Surface Hardening Processes. *Materials*. 2018, **11**, 1815. DOI: 10.3390/ma11101815.
- [53] Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Megablog | Bud'te v obraze. Mluvte s námi* [online]. Megaflex, 2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
- [54] Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red. *Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení* [online]. Ulička 37, Hlohovec, 691 43 Česká republika: Leonardo technology s.r.o., 2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
- [55] Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů na vlnové délce 355 nm - UV spektrum. *Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení* [online]. Ulička 37, Hlohovec, 691 43 Česká republika: Leonardo technology s.r.o., 2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-na-vlnove-delce-355-nm-uv-spektrum>
- [56] Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů se zeleným světlem 532 nm. *Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení* [online]. Ulička 37, Hlohovec, 691 43 Česká republika: Leonardo technology s.r.o., 2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-se-zelenym-svetlem-532-nm>
- [57] Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu > LAO - lasery a optika. *LAO - lasery a optika* [online]. Na Floře 1328/4 143 00 Praha 4: LAO - průmyslové systémy s.r.o., 2014 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [58] Nekonenční metody obrábění – 4. díl. *MM Průmyslové spektrum: Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2008, **11**(3), 80 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- [59] Lasery pro průmysl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, **11**(7), 32 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
- [60] Diskový laser. *TRUMPF GmbH + Co. KG / TRUMPF* [online]. Johann-Maus-Straße 2 71254 Ditzingen: TRUMPF GmbH + Co. KG, 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/produkty/laser/diskovy-laser/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/diskovy-laser/)
- [61] Vlákňové lasery. *OptiXs – Dodávateľ a integrátor laserových technológií* [online]. Křivoklátská 37 Praha 9: OptiXs, 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/sk/lasery-28k/vlaknove-lasery-49k>

- [62] Vlákňové lasery. *MediCom a.s. Praha laser - laserové systémy* [online]. Ženišková 1647 149 00 Praha 4: MediCom a.s. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: [http://www.medicom.cz/p.php?p=prumyslove.aplikace.laser.laser\\_fibre](http://www.medicom.cz/p.php?p=prumyslove.aplikace.laser.laser_fibre)
- [63] High Power - Fibre Bragg Gratings. In: *LASER COMPONENTS Deutschland* [online]. Werner-von-Siemens-Str. 15 82140 Olching Nemecká spolková republika: LASER COMPONENTS, 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: [https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user\\_upload/home/Datasheets/ixblue/fiber-bragg-gratings\\_hp.pdf&no\\_cache=1](https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/ixblue/fiber-bragg-gratings_hp.pdf&no_cache=1)
- [64] High Power CW Fiber Lasers. *Fiber Laser Sources & Solutions / IPG Photonics* [online]. IPG Photonics Corporation, 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/high-power-cw-fiber-lasers>
- [65] HLAVÁČ, Marek. *Optické vlákňové senzory s rozloženými parametrami na báze OTDR*. Bratislava, 2011.. Dizertačná. Slovenská technická univerzita v Bratislave Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Prof. Ing. Jozef Jasenek, PhD.
- [66] Diodové lasery. *LASCAM systems - priemyslové laserové a kamerové systémy* [online]. Dělnická 1192/22, Holešovice, 170 00 Praha 7: LASCAM systems s.r.o., 2019 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/produkty/laserove-periferie-a-komponenty/prumyslove-lasery/diodove-lasery/>
- [67] Vlákňové lasery. *LASCAM systems - priemyslové laserové a kamerové systémy* [online]. Dělnická 1192/22, Holešovice, 170 00 Praha 7: LASCAM systems s.r.o., 2019 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/produkty/laserove-periferie-a-komponenty/prumyslove-lasery/vlaknove-lasery/>
- [68] *nLIGHT / Semiconductor Fiber Lasers* [online]. 5408 NE 88th Street, Building E, Vancouver, WA 98665, USA: nLIGHT, Inc., 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.nlight.net/>
- [69] *Industrial Lasers and Laser Solutions / Coherent* [online]. 5100 Patrick Henry Drive, Santa Clara, CA 95054 USA: Coherent, Inc., 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.coherent.com/>
- [70] CO2 laser. *TRUMPF GmbH + Co. KG / TRUMPF* [online]. Johann-Maus-Straße 2 71254 Ditzingen: TRUMPF GmbH + Co. KG, 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/produkty/laser/co2-laser/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/co2-laser/)
- [71] *Laser Company for Industrial Laser Solutions / LASERLINE* [online]. Fraunhofer Straße 56218 Mülheim-Kärlich, Nemecká spolková republika: Laserline GmbH, 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/>
- [72] *TRUMPF GmbH + Co. KG / TRUMPF* [online]. Johann-Maus-Straße 2 71254 Ditzingen: TRUMPF GmbH + Co. KG, 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/)
- [73] VASILASH, Gary, ed. Laser: The Disk Advantage. *AutoBeat: The Pulse of the Automotive Industry* [online]. 6915 Valley Ave. Cincinnati, OH 45244: Gardner Business Media, 2020 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.autobeatonline.com/articles/laser-the-disk-advantage>
- [74] SÜDMEYER, T., C. KRÄNKEL, C. BAER et al. High-power ultrafast thin disk laser oscillators and their potential for sub-100-femtosecond pulse generation. *Applied Physics B*. 2009, **97**(2), 281. DOI: 10.1007/s00340-009-3700-z. ISSN 1432-0649. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00340-009-3700-z>

- [75] ROMINGER, Volker, Matthias KOITZSCH, Vincent KUHN et al. Latest trends in high power disk laser technology. In: *Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik e.V.* [online]. Konrad-Zuse-Str. 3/5 91052 Erlangen: Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik e.V. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: [https://www.wlt.de/lim/Proceedings2015/Stick/PDF/Contribution105\\_final.pdf](https://www.wlt.de/lim/Proceedings2015/Stick/PDF/Contribution105_final.pdf)
- [76] METZGER, Thomas. TRUMPF LASER: TRUMPF Scientific Lasers. In: *MEDEA / Molecular Electron Dynamics investigated by Intense Fields and Attosecond Pulses* [online]. 2020 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <http://www.mede-horizon2020.eu/wp-content/uploads/2015/11/Trumpf.pdf>
- [77] PASCHOTTA, Rüdiger. Thin-disk Lasers. In: *RP Photonics - consulting on laser technology, nonlinear optics, fiber optics; simulation and design software* [online]. 17 78073 Bad Dürkheim Deutschland: RP Photonics Consulting GmbH [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/thin\\_disk\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/thin_disk_lasers.html)
- [78] Laser Diodes. In: *RP Photonics - consulting on laser technology, nonlinear optics, fiber optics; simulation and design software* [online]. 17 78073 Bad Dürkheim Deutschland: RP Photonics Consulting GmbH [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/laser\\_diodes.html](https://www.rp-photonics.com/laser_diodes.html)
- [79] (AWS), American. *5.2 CO2 Lasers*. American Welding Society (AWS). ISBN 978-0-87171-777-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010QN2SR/recommended-practices/co2-lasers>
- [80] Princip CO2 laseru. *Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení* [online]. Ulička 37, Hlohovec, 691 43 Česká republika: Leonardo technology s.r.o., 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>
- [81] CHMELÍČKOVÁ, Hana. Plynové lasery pro průmyslové využití. In: *Portál moderní fyziky* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: [https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1\\_3prez.pdf](https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_3prez.pdf)
- [82] BERCEL, M a G BUZA. Relationship between the keyhole laser welding and the plasma. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, **448**, 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/448/1/012051.
- [83] Laserové technologie v průmyslu. *MM Průmyslové spektrum: Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2010, **13**(3), 30 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-technologie-v-prumyslu.html>
- [84] Průmyslové lasery (2) - svařovací lasery. *MM Průmyslové spektrum: Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko* [online]. 2012, **15**(4), 28 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>
- [85] MRŇA, Libor. Technologie využívající laser. In: *Odbor technologie svařování ÚST FSI VUT Brno: Studijní opory* [online]. ÚST o. TSPÚ, 2020 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_svarovani\\_lasere\\_m\\_2013\\_mma.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_lasere_m_2013_mma.pdf)
- [86] Laserové technologie. *Ústav přístrojové techniky | Akademie věd České republiky, v.v.i.* [online]. Královopolská 147 612 64 Brno: Institute of Scientific Instruments of the Czech Academy of Sciences, 2001-2020 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://www.isibrno.cz/cs/laserove-technologie>



- [87] HAROONI, Masoud, Blair CARLSON a Radovan KOVACEVIC. *Effect of process parameters on the weld quality in laser welding of AZ31B magnesium alloy in lap joint configuration* [online]. Laser Institute of America, 2013, , 509-519 [cit. 2020-05-02]. DOI: 10.2351/1.5062923. ISBN 978-0-912035-98-7. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.2351/1.5062923>
- [88] TIG svařování I - základní principy. *SVARINFO - váš zdroj informací o svařování, server ze skupiny SVARBAZAR* [online]. 2005-2020 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <http://svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008011702>
- [89] HUGHES, Steven. *5.2.7 Pulse Transfer*. Woodhead Publishing. ISBN 978-1-84569-641-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008WPET1/quick-guide-welding-weld/pulse-transfer>
- [90] WEMAN, Klas. *1.1.1 Resistance Welding*. Woodhead Publishing. ISBN 978-0-85709-510-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00BT3FK1/welding-processes-handbook/resistance-welding>
- [91] O svařovařovací metodě TIG. *Alfin-Trading.cz - Svářečky a stroje* [online]. Nádražní 980, Náměšť nad Oslavou, 675 71, Česká republika: Alfin Trading CZ, 2020 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.alfin-trading.cz/o-svarovani-tig>
- [92] WEMAN, Klas. *4.2.6 Generation of Welding Fumes*. Woodhead Publishing. ISBN 978-0-85709-510-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00BT3HG1/welding-processes-handbook/generation-welding-fumes>
- [93] ROYBAL, Matt. What Is Pulse Welding? And What Do You Use It For?. *Jattus* [online]. Jattus LLC, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://jattus.com/what-is-pulse-welding-and-what-do-you-use-it-for>
- [94] WOLFRAMOVÉ ELEKTRODY. *Svářečky, svářečka, svářecí technika, inventory,co2* [online]. Hasičská 2641 756 61 Rožnov pod Radhoštěm: Stroje a vybavení s.r.o., 2008-2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.svarecky-obchod.cz/info/40-wolframove-elektrody.htm>
- [95] WOLFRÁMOVÉ Elektrody. *Zvářačky-Brusivo* [online]. Muškátová 6/B 90028 Zálesie: Vladislav Vanta WELD - EXPERT, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.zvaracky-brusivo.sk/kategoria/prislusenstvo/zvaracie-horaky/wolframove-elektrody/>
- [96] Jak se dělí wolframové elektrody?. *Svářecí technika a nářadí | Svartop* [online]. Kumberská 293, 330 33 Plzeň-Město Touškov: Honzík Stanislav HS, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.svartop.cz/clanky/jak-se-deli-wolframove-elektrody/>
- [97] Wolframové a molybdenové tyče, elektrody, dráty a plechy. *INKOSAS - niklové, titanové, měděné, mosazné polotovary a speciální slitiny* [online]. Antala Staška 1859/34, 140 00 Praha 4: Inkosas, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.inkosas.cz/templates/wolframove-molybdenove-slitiny-elektrody-tyce-draty-plechy.php>
- [98] WOLFRAMOVÉ-ELEKTRODY-TIG-NORLING-KATALOG-WEB.pdf. In: *NORLING - nekompromisní svářečská výbava - Norling* [online]. Industry, 2016 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://norling.cz/wp-content/uploads/2019/04/WOLFRAMOV%C3%89-ELEKTRODY-TIG-NORLING-KATALOG-WEB.pdf>
- [99] Druhy a použití wolframových elektrod | SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ. *SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ - profesionální e-shop se svařovací technikou* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/druhy-a-pouziti-wolframovych-elektrod/t-30/t-107>

- [100] Argon | Linde Gas a.s. *Home Page / Linde Gas a.s.* [online]. U Technoplynu 1324 Praha 9 19800: Linde, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: [https://www.linde-gas.cz/cs/produkty\\_and\\_zasobovani/gases\\_atmospheric/argon.html](https://www.linde-gas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/gases_atmospheric/argon.html)
- [101] Helium | Linde Gas a.s. *Home Page / Linde Gas a.s.* [online]. U Technoplynu 1324 Praha 9 19800: Linde, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: [https://www.linde-gas.cz/cs/produkty\\_and\\_zasobovani/gases\\_atmospheric/helium.html](https://www.linde-gas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/gases_atmospheric/helium.html)
- [102] Čistota technických plynů. *Air Products and Chemicals, Inc. - Manufacturer of industrial gases* [online]. Air Products and Chemicals, Inc., 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://www.airproducts.com/Company/news-center/2007/05/0501-cistota-technickyh-plynu.aspx>
- [103] HATALA, Michal, Ondrej HÍREŠ a Jan KAŠPAR. Vliv čistoty ochranného plynu na jakost svarových spojů - Strojárstvo / Strojírrenství. *Časopis/Magazine - Strojárstvo / Strojírrenství* [online]. Moyzesova 35, 010 01 Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., publishing house, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/zvaranie/8903-vlivcistotyochranneho-plynu-na-jakost-svarovych-spoju>
- [104] 8798271: Preklad pôvodného návodu na použitie. In: *EXTOL - elektrické, ruční a pneumatické nářadí pro každého* [online]. MADAL BAL, 2013 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <http://www.extol.cz/media/manuals/8798271.pdf>
- [105] KESSE, Martin. *Laser-TIG hybrid welding process*. Yliopistonkatu 34, 53850 Lappeenranta, Fínsko, 2013, 114 s. Dostupné z: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/91432/Laser-TIG%20hybrid%20welding%20process.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Diplomová práce. Lappeenranta University of Technology. Vedoucí práce Jukka Martikainen.
- [106] DOI, Makoto. Coaxial hybrid process of hollow cathode TIG and YAG laser welding. *Welding International* [online]. 2010, **24**(3), 188-196 [cit. 2020-05-03]. DOI: 10.1080/09507110902843131. ISSN 0950-7116. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09507110902843131>
- [107] ACHERJEE, B. Chapter 9 - Laser Arc Hybrid Welding. *Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies*. Woodhead Publishing, 2018, s. 203-234. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101252-9.00009-1>. ISBN 978-0-08-101252-9. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081012529000091>
- [108] LAMPA, Conny. *Laser welding: energy redistribution and weld geometry*. 971 87 Luleå, Švédsko, 1997.. Dizertačná práca. Luleå University of Technology. Vedoucí práce Claes Magnusson.
- [109] SOKOLOV, Mikhail a Antti SALMINEN. Methods for Improving Laser Beam Welding Efficiency. *Physics Procedia*. 2014, **56**. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.148.
- [110] What is the difference between heat input and arc energy? - TWI. *Joining Innovation with Expertise - TWI* [online]. Granta Park, Great Abington, Cambridge, CB21 6AL, UK: TWI Ltd (Head Office), 2020 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-the-difference-between-heat-input-and-arc-energy>
- [111] NING, Jie, Lin-Jie ZHANG, Suck-Joo NA, Xian-Qing YIN, Jing NIU, Jian-Xun ZHANG a Huan-Ran WANG. Numerical study of the effect of laser-arc distance on laser energy coupling in pulsed Nd: YAG laser/TIG hybrid welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2017, **91**(1-4), 1129-1143 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1007/s00170-016-9812-9. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-016-9812-9>

- [112] HAMAL, Jan. *Galvanické zinkování*. Brno, 2014, 36 s.. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Ladislav Žák, Ph.D.
- [113] CÍSAŘOVÁ, Michaela. *Vliv morfologie povlaku Zn na mezní podmínky při tažení tenkých plechů*. Brno, 2012, 92 s.. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.
- [114] Protection against rust with zinc coating. *SSAB high-strength steel - sheet, plate, coil, tube, profile - SSAB* [online]. Klarabergsviadukten 70, D6 Box 70 101 21 Stockholm: SSAB Head Office, 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/products/steel-categories/metal-coated-steels/coatings/zinc-coating>
- [115] Antikorozní ochrana a povrchové úpravy prvků systému. *Drátěné kabelové žlaby - největší výrobce a dodavatel v ČR - ARKYS s.r.o.* [online]. Tuřanka 115a, Brno 627 00: ARKYS, 2013 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.arkys.cz/cs/system-linear/antikorozni-ochrana-a-povrchove-upravy-prvku-systemu>
- [116] Konstruktor a nedestruktivní kontroly svarových spojů. In: *Tomáš Soukup - SVAROX Technology* [online]. Karlovarská 121, 323 00, Plzeň [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <http://svarox.cz/wp-content/uploads/Konstruktor%20a%20nedestruktivni%20kontroly-svarov%20ch-spojov%20af.pdf>
- [117] Provádění NDT kontroly a hodnocení svarů na konstrukcích. In: *Strojirensky.NET* [online]. Mariánské nám. 617/1 617 00 Brno: TESIYO, s.r.o. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <http://strojirensky.net/2009/11/26/provadeni-ndt-kontroly-a-hodnoceni-svaru-na-konstrukcich/>
- [118] BARTÁK, Jiří. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. In: *CWS ANB - česká svářečská společnost* [online]. Velflíkova 4, 160 75, Praha 6 - Dejvice: CWS-ANB, 2006-2020 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- [119] *Ukazovatele celistvosti zvarových spojov* [online]. In: . s. 116-143 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: [http://histproject.no/sites/histproject.no/files/2\\_11\\_Pojem\\_praskania\\_pri\\_oceliach\\_-\\_Bernasovsky,\\_Mr%20a\\_Br\\_.pdf](http://histproject.no/sites/histproject.no/files/2_11_Pojem_praskania_pri_oceliach_-_Bernasovsky,_Mr%20a_Br_.pdf)
- [120] Štúdium vzniku trhlin na zvarových kovocho termomechanicky spracovaných plechoch typu Armox. *Strojárstvo / Strojirenství* [online]. CB Media, s.r.o., 2020 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/stroj-arstvo-extra/1792-tudium-vzniku-trhlin-na-zvarovych-kovoch-termomechanicky-spracovanych-plechoch-typu-armox>
- [121] Omezení vzniku trhlin za horka. In: *Techportál.cz* [online]. Evropská 423/178, P. O. Box 124, 160 41 Praha 6: Dashöfer Holding, Ltd., Verlag Dashöfer, nakladatelství, spol. s r. o., 2020 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydqtBP7--afGG7m6JsATyca](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydqtBP7--afGG7m6JsATyca)
- [122] Omezení vzniku trhlin za studena. In: *Techportál.cz* [online]. Evropská 423/178, P. O. Box 124, 160 41 Praha 6: Dashöfer Holding, Ltd., Verlag Dashöfer, nakladatelství, spol. s r. o., 2020 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydqtBP7--afGH-KPLJjYwEI2wWZsatCpG](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydqtBP7--afGH-KPLJjYwEI2wWZsatCpG)

- [123] Lamelární (terasovitě) praskání. In: *Techportál.cz* [online]. Evropská 423/178, P. O. Box 124, 160 41 Praha 6: Dashöfer Holding, Ltd., Verlag Dashöfer, nakladatelství, spol. s r. o., 2020 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydyq8BIR5tUGrFJmoQGSOtGA](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydyq8BIR5tUGrFJmoQGSOtGA)
- [124] What are cracks?. *Welding Inspectors* [online]. Welding Inspectors, 2020 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <http://welding-inspectors.com/cracks/>
- [125] Problematika hodnocení svarových spojů. *Konstrukce* [online]. Starobělská 1133/5, 700 30 Ostrava: KONSTRUKCE Media, s.r.o., 2020 [cit. 2020-05-27]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
- [126] TREJTAR, Josef. Destruktivní zkoušky svarových spojů. *Techportál.cz* [online]. Evropská 423/178, P. O. Box 124, 160 41 Praha 6: Dashöfer Holding, Ltd., Verlag Dashöfer, nakladatelství, spol. s r. o., 2020 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/destruktivni-zkousky-svarovych-spoju-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EuvDzS7ep4R2shHvEcodyGA/?justlogged=1>
- [127] Stanovení pevnosti oceli v tahu. In: *Digitální knihovna SP3 stavební Opava* [online]. 2012 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: [http://dk.spsopava.cz:8080/docs/pdf/stavebni\\_laborator/cviceni/35\\_stanoveni\\_pevnosti\\_oceli\\_v\\_tahu.pdf](http://dk.spsopava.cz:8080/docs/pdf/stavebni_laborator/cviceni/35_stanoveni_pevnosti_oceli_v_tahu.pdf)
- [128] MIHALIKOVÁ, Mária. Úvod do materiálového inžinierstva. In: *Oddelenie materiálového inžinierstva* [online]. s. 79 [cit. 2020-05-27]. ISBN 978-80-553-1479-2. ISBN 978-80-553-1479-2. Dostupné z: [http://web.tuke.sk/hf-knom/content/studenti/predmety/nom\\_sjf/uvod\\_do\\_materialoveho\\_inzinierstva.pdf](http://web.tuke.sk/hf-knom/content/studenti/predmety/nom_sjf/uvod_do_materialoveho_inzinierstva.pdf)
- [129] MIHALIKOVÁ, Mária. Štruktúra a vlastnosti materiálov. In: *Oddelenie materiálového inžinierstva* [online]. s. 75 [cit. 2020-05-28]. ISBN 978-80-553-1641-3. Dostupné z: [http://web.tuke.sk/hf-knom/content/studenti/predmety/nom\\_sjf/struktura\\_a\\_vlastnosti\\_materialov.pdf](http://web.tuke.sk/hf-knom/content/studenti/predmety/nom_sjf/struktura_a_vlastnosti_materialov.pdf)
- [130] Metalografie I. In: *Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství* [online]. Technická 5 166 28 Praha 6 – Dejvice: ŠCHT Praha, 2014 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Metalografie%20I.pdf?redirected>
- [131] Metody studia struktury. In: *Personalizace výuky prostřednictvím e-learningu* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2009-2012 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/MSS/Metody%20studia%20struktury.pdf>
- [132] *Hanyko Praha | Vše pro zkoušení materiálů* [online]. Křížová 1018, 151 21 Praha 5: Jan a Vladimír Suchánkovi - HANYKO Praha s.r.o., 2016 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/>
- [133] Hodnocení kvality svarového spoje. In: *Ústav strojírenské technologie, ČVUT v Praze* [online]. Technická 4 166 07 Praha 6 – Dejvice: Ústav strojírenské technologie ČVUT v Praze, Fakulta strojní [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/104/def-kontrola-sv.pdf>
- [134] NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ metody, technologie, diagnostika. *Techmagazín* [online]. Petržilova 3304/19 143 00 Praha 4: TECH MEDIA PUBLISHING s.r.o., 2012, 3(8), 60 [cit. 2020-05-31]. ISSN 1804-5413. Dostupné z: [http://www.techmagazin.cz/ke\\_stazeni/ndt/ndt2.pdf](http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/ndt/ndt2.pdf)

- [135] *Tschechien / Institut Dr. Foerster GmbH und Co. KG* [online]. U Tvrze 13/30, 108 00 Praha 10, Česká republika: FOERSTER Holding GmbH, 2020 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <http://www.foerstergroup.cz/cs/cze/>
- [136] MRŇA, Libor. Výkonový laser IPG YLS2000. In: *Ústav přístrojové techniky | Akademie věd České republiky, v.v.i.* [online]. Královopolská 147 612 64 Brno Česká republika: ÚPT AV ČR, v.v.i. Brno, 2001-2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.isibrno.cz/cs/vykonovy-laser-ipg-yls2000>
- [137] *ABB Group, přední dodavatel digitálních technologií pro průmysl* [online]. Affolternstrasse 44, 8050 Zurich, Switzerland: ABB, 2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://new.abb.com/cz>
- [138] MagicWave 1700. *HBT Weld s.r.o.* [online]. Okružní 720, 370 01 České Budějovice: HBT Weld s.r.o., 2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://hbt-weld.cz/produkty/magicwave-1700/>
- [139] Erdemir Product Catalogue 2017. In: *Erdemir* [online]. Uzunkum No:7 Kdz. Ereğli 67330 ZONGULDAK, Turkey: Erdemir Group, 2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: [https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/Urun\\_katalogu\\_EN-1270.pdf](https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/Urun_katalogu_EN-1270.pdf)
- [140] *CITACE PRO* [online]. Lidická 700/19 602 00 Brno Česká republika: Citace.com, s.r.o., c2012–2016 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz/>
- [141] Mig-mag\_welding\_process\_saf-fro\_2015-596.jpg. In: *SAF-FRO | the expert for industrial Welding and Cutting* [online]. 2020 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: [https://www.saf-fro.com/sites/saffro/files/styles/retina\\_cover\\_page/public/2016/10/28/mig-mag\\_welding\\_process\\_saf-fro\\_2015-596.jpg?itok=CmCPNcFI](https://www.saf-fro.com/sites/saffro/files/styles/retina_cover_page/public/2016/10/28/mig-mag_welding_process_saf-fro_2015-596.jpg?itok=CmCPNcFI)
- [142] Spot-Welding-1200x800.jpeg. In: *Stud Welding Machines / UK Stud Welder Machine Manufacturers* [online]. England: Taylor Studwelding Systems Limited, 2016 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.taylor-studwelding.com/wp-content/uploads/Spot-Welding-1200x800.jpeg>
- [143] 9IBA255882\_400x400.jpg. In: *ABB Group - Leading digital technologies for industry* [online]. Affolternstrasse 44, 8050 Zurich, Switzerland: ABB Asea Brown Boveri Ltd, 2020 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: [https://cdn.productimages.abb.com/9IBA255882\\_400x400.jpg](https://cdn.productimages.abb.com/9IBA255882_400x400.jpg)
- [144] Ok-aristorod-mostporosity.jpg. In: *ESAB Asia Pacific* [online]. 38 Joo Koon Circle, Jurong, Singapore 629063: ESAB, 2020 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.esabasia.com/shared/content/images/ok-aristorod-mostporosity.jpg>
- [145] Ok-aristorod-standard70s6-1.jpg. In: *ESAB Asia Pacific* [online]. 38 Joo Koon Circle, Jurong, Singapore 629063: ESAB, 2020 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.esabasia.com/shared/content/images/ok-aristorod-standard70s6-1.jpg>
- [146] 12397.jpg. In: *I-CAR Repairability Technical Support Portal* [online]. N127 South Park Drive Appleton, WI 54914: I-CAR Tech Center, 2019 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://rts.i-car.com/images/crn/12397.jpg>
- [147] Csm\_Lasers-applications-scanner-welding-car-door\_41158f7f0b.jpg. In: *TRUMPF GmbH + Co. KG / TRUMPF* [online]. Johann-Maus-Straße 2 71254 Ditzingen: TRUMPF GmbH + Co. KG, 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF\\_Master/\\_processed\\_/5/0/csm\\_Lasers-applications-scanner-welding-car-door\\_41158f7f0b.jpg](https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/_processed_/5/0/csm_Lasers-applications-scanner-welding-car-door_41158f7f0b.jpg)

- [148] Csm\_Trulaser-Weld-technology-special-header\_de7f228a09.jpg. In: *TRUMPF GmbH + Co. KG / TRUMPF* [online]. Johann-Maus-Straße 2 71254 Ditzingen: TRUMPF GmbH + Co. KG, 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF\\_Master/\\_processed\\_/a/b/csm\\_Trulaser-Weld-technology-special-header\\_de7f228a09.jpg](https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/_processed_/a/b/csm_Trulaser-Weld-technology-special-header_de7f228a09.jpg)
- [149] MagicWave 190 Web 18540x866px. In: *Zváracia technika – Fronius* [online]. Froniusstraße 1 A-4643 Pettenbach: Fronius International GmbH, 2020 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/~protected-media/imported-media/13/15/m-131507.png?q=70&iw=770&ih=433&crop=1&imgtype=JPG>
- [150] TTG 2600A Handschweissbrenner\_1540x866px\_Web. In: *Zváracia technika – Fronius* [online]. Froniusstraße 1 A-4643 Pettenbach: Fronius International GmbH, 2020 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/~protected-media/imported-media/07/02/m-70214.png?q=70&iw=770&ih=433&crop=1&imgtype=JPG>
- [151] 1920x1080c\_og6l4r4j-povrch-svaru-na-nerez-potrubi.jpg. In: *Svatoš a Pánek | ProfiSvářeči.cz* [online]. Zdeněk Svatoš, Jan Pánek, 2017–2020 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: [https://www.profisvareci.cz/files/thumbs/1920x1080c\\_og6l4r4j-povrch-svaru-na-nerez-potrubi.jpg](https://www.profisvareci.cz/files/thumbs/1920x1080c_og6l4r4j-povrch-svaru-na-nerez-potrubi.jpg)
- [152] Ks-500.jpg. In: *Svářečí technika, svářečky Brno | CHOBOLA s.r.o.* [online]. Řípská 1153/20a, Slatina, 627 00 Brno: CHOBOLA s.r.o., 2020 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <http://www.chobola.cz/file/891/ks-500.jpg>
- [153] Redukcni-ventil-argon-basecontrol-1524-1-large.jpg. In: *Svařovací technika WELDPOINT - svařovací stroje, plazmové řezačky, materiály* [online]. Zakřany 141 664 84 Zakřany: WELDPOINT s.r.o., 2006-2018 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://weldpoint.eu/shop/sor/redukcni-ventil-argon-basecontrol-1524-1-large.jpg>
- [154] Thermanit-tig-rod-32-6d95f886.jpg. In: *Home / welding.westerfeld.de* [online]. Mainzer Str. 150 D-66121 Saarbrücken: Gustav Westerfeld GmbH, 2020 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://welding.westerfeld.de/assets/images/6/thermanit-tig-rod-32-6d95f886.jpg>
- [155] B61621d8a26f7533d572b5da08bca2ff.jpg. In: *TECH SOLUTION - zváracia technika, zváracie inventory, samostmievacie kukly, nabíjačky autobaterií, plazmové rezačky | TECHSOLUTION.sk* [online]. Biovetská 32 949 05 Nitra - Krškany, Slovensko: TECHSOLUTION.sk, 2010–2020 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.techsolution.sk/images/cache/b61621d8a26f7533d572b5da08bca2ff.jpg>
- [156] *Large.png* [online]. In: . [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://d2t1xqejof9utc.cloudfront.net/screenshots/pics/332d4fbb5918f9ed557eddd0d1e7a22c/large.png>
- [157] BRUECKNER, Frank, André SEIDEL, Riede MIRKO, Elena LOPEZ, Robin WILLNER, Beyer ECKHARD a Leyens CHRISTOPH. *Enhanced Manufacturing Possibilities Using Multi-Materials in Laser Metal Deposition (1301) (Peer Reviewed)*. 2017.
- [158] Csm\_YW30\_Basis\_06\_acc4289932.jpg. In: *Precitec Group - Laser material processing, laser cutting, laser soldering, laser welding and optical measuring technology* [online]. Precitec GmbH & Co. KG, 2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: [https://www.precitec.de/typo3temp/\\_processed\\_/csm\\_YW30\\_Basis\\_06\\_acc4289932.jpg](https://www.precitec.de/typo3temp/_processed_/csm_YW30_Basis_06_acc4289932.jpg)
- [159] Trifocal Fiber Laser Brazing & Welding with IPG's YLS-BR. In: *Youtube* [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=73GKUZO-x9g> Kanál užívateľ'a IPG Photonics

- [160] Pn-37352-central-lab-report-2.jpg. In: *Induction Heat Treating Companies in Ohio* [online]. Zion Industries, 2020 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://zioninduction.com/wp-content/uploads/2009/12/pn-37352-central-lab-report-2.jpg>
- [161] Welding-Discontinuities.jpg. In: *Weldingis.com* [online]. 2020 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.weldingis.com/wp-content/uploads/2017/05/Welding-Discontinuities.jpg>
- [162] Siad10-rgb. In: *Časopis KONSTRUKCE* [online]. Starobělská 5/1133, 700 30 Ostrava - Zábřeh: KONSTRUKCE Media, s.r.o., 2020 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/svarovani-a-deleni-materialu/vady-pri-svarovani-a-tepelnem-deleni-265>
- [163] NERÁDOVÁ, Martina, Mário ONDRUŠKA a Pavel KOVAČÓCY. *Zváranie hliníka pulzným laserom* [online]. In: . Brno, s. 6 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: [http://konsyst.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_11/lists/papers/1032.pdf](http://konsyst.tanger.cz/files/proceedings/metal_11/lists/papers/1032.pdf)
- [164] Slag-inclusions.jpg. In: *Welding Inspectors* [online]. 2020 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <http://welding-inspectors.com/wp-content/uploads/2018/11/slag-inclusions.jpg>
- [165] Charpy2.jpg. In: *Střední průmyslová škola strojnická a Střední odborná škola profesora Švejcara* [online]. Thákurova 3, Praha 6 – Dejvice, 160 00: NETservis s.r.o., 2020 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: [http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef\\_gruber/kom/raz/charpy2.jpg](http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/kom/raz/charpy2.jpg)
- [166] 348a511dff7a43bf7ae5a520fed9000a.png. In: *Manufacturer of Vision Measuring Machine & Optical Measurement Instruments etc / Sinowon* [online]. A1,KaiSong Park, 2# Baima Xianfeng Road,South District, DongGuan city, Guangzhou province, China: Sinowon Innovation Metrology Manufacture Limited, 2018 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://img4956.weyesimg.com/uploads/www.sinowon.com/images/348a511dff7a43bf7ae5a520fed9000a.png>
- [167] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. In: . [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8177076-Zaklady-pripravy-vzorku-pro-optickou-metalografii.html>
- [168] Kapilární defektoskopie. In: *Portál e-learningových prezentací* [online]. [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/print.php?page=6385&typ=html](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=6385&typ=html)
- [169] *B-mat / Defektoskopia* [online]. Horná 13, 038 61 Vrútky, Slovenská republika: B-mat Group, 2017 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <http://b-mat.sk/>

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Označenie	Legenda	Jednotka
3D	Trojrozmerný priestor	[-]
A	Ťažnosť	[%]
ARA diagram	Anizotermický rozpad austenitu - diagram	[-]
$b_0$	Počiatočná šírka skúšobného telesa v mieste meraného úseku	[mm]
$C_e$	Uhlíkový ekvivalent	[%]
CET	Uhlíkový ekvivalent	[%]
CW	Kontinuálny režim práce	[-]
ČSN	Česká technická norma	[-]
D	Priemer oceleovej guľičky	[mm]
d	Maximálny priemer vtlačku	[mm]
$d$ (rovnic 2.14)	Stredná hodnota uhlopriečok $d_1$ a $d_2$	[mm]
$D$ (rovnic 2.17)	Priemer oceleovej guľičky	[mm]
DC	Jednosmerný prúd	[A]
$d_{LA}$	Vzdialenosť medzi laserovým lúčom a hrotom elektródy	[mm]
$D_M$	Maximálny priemer vtlačku v materiáli	[mm]
$D_T$	Maximálny priemer vtlačku v etalóne	[mm]
E	Modul pružnosti v ťahu	[MPa]
e	Hĺbka hrotu v plasticke deformovanom vtlačku vyjadrená dielikmi	[-]
EN	Európska norma	[-]
F	Zaťažujúca sila pôsobiaca na guľičku	[N]
$F_e$	Zaťaženie na medzi klzu	[N]
$F_m$	Maximálna zaťažujúca sila	[N]
$F_{p0,2}$	Zaťaženie na zmluvnej medzi klzu	[N]
g	Gravitačné zrýchlenie	[N · kg <sup>-1</sup> ]
$h_1$	Počiatočná výška vyzdvihnutého kladiva oproti skúšobnému telesu	[m]
$h_2$	Maximálna výška oproti skúšobnému telesu, ktorú kladivo dosiahne po prerazení skúšobného telesa	[m]
HB	Tvrdosť podľa Brinella	[N · mm <sup>-2</sup> ]
$HB_M$	Tvrdosť materiálu podľa Brinella	[N · mm <sup>-2</sup> ]
$HB_T$	Tvrdosť etalónu podľa Brinella	[N · mm <sup>-2</sup> ]
HR	Vysoko odrazový	[-]
HRA/HRB/HRC	Tvrdosť podľa Rockwella	[-]
HV	Tvrdosť podľa Vickersa	[N · mm <sup>-2</sup> ]
I	Zvárací prúd	[A]
IRA diagram	Izotermický rozpad austenitu	[-]
ISO	Medzinárodná organizácia pre normalizáciu	[-]
K	Kvalita laserového zväzku	[-]
K	Nárazová práca	[J]
$K$ (rovnic 2.13)	Konštanta závislá od druhu materiálu a jeho tvrdosti	[-]
KC	Rázová húževnatosť	[J · cm <sup>-2</sup> ]
$k_{LASER}$	Koeficient tepelnej účinnosti laseru	[-]
$k_{TIG}$	Koeficient tepelnej účinnosti elektrického oblúku TIG	[-]
$L_0$	Počiatočná dĺžka meraného úseku	[mm]



$L_0$	Počiatočná dĺžka meraného úseku	[mm]
LAGMAW	Hybridná technológia zvarovania laserom a MIG/MAG	[-]
Laser	Light amplification by stimulated emission of radiation	[-]
Laser-TIG (LasTIG)	Hybridná technológia zvarovania laserom a TIG	[-]
$L_C$	Dĺžka úseku podrobeného skúške	[mm]
LR	Nízko odrazový	[-]
$L_T$	Celková dĺžka skúšobného telesa	[mm]
$L_U$	Konečná meraná dĺžka po lome	[mm]
$m$	Hmotnosť kladiva	[kg]
MAG	Metal active gas	[-]
MIG	Metal inert gas	[-]
$\varnothing_{d0}$	Počiatočný priemer skúšobného telesa v mieste meraného úseku	[mm]
$\varnothing_{du}$	Konečný (minimálny) priemer skúšobného telesa v mieste meraného úseku	[mm]
$P$	Výkon zdroja	[W]
PALW	Hybridná technológia zvarovania laserom a plazmou	[-]
PAW	Metóda plazmového zvarovania	[-]
ppm	Počet častíc na milión	[-]
PW	Pulzný režim práce	[-]
$Q_{LASER}$	Tepelný príkon laseru	[kJ · m <sup>-1</sup> ]
QS	Impulzný režim práce	[-]
$Q_{SUM}$	Celkový tepelný príkon	[kJ · m <sup>-1</sup> ]
$Q_{TIG}$	Tepelný príkon elektrického oblúku	[kJ · m <sup>-1</sup> ]
$R_e$	Medza klzu	[MPa]
RF	Vysokofrekvenčný	[-]
$R_m$	Medza pevnosti	[MPa]
RoHS	Smernica Európskeho parlamentu a rady	[-]
RP	Presnosť polohy	[mm]
$R_p$	Medza pružnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Zmluvná medza pružnosti	[MPa]
$S_0$	Počiatočný obsah prierezu skúšobného telesa	[mm <sup>2</sup> ]
SLAB	Bezprietochý difúzne chladený laser	[-]
$S_U$	Najmenší obsah prierezu po pretrhnutí skúšobného	[mm <sup>2</sup> ]
$t_0$	Počiatočná hrúbka skúšobného telesa v mieste meraného úseku	[mm]
TIG	Thugsten inert gas	[-]
TR	Technická správa	[-]
$U$	Zváracie napätie zdroja	[V]
$v_s$	Posunová rýchlosť (zváracia rýchlosť)	[mm · min <sup>-1</sup> ]
$Z$	Kontrakcia	[%]
$\varepsilon$	Pomerné predĺženie	[%]
$\lambda$	Vlnová dĺžka	[nm]
$\sigma$	Napätie	[MPa]

## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Zváracia zostava Laser-TIG s predpripravenými plechmi k zvareniu na ÚPT.....	10
Obr. 2 Únik nahromadených zinkových pár z medzery medzi plechmi .....	11
Obr. 3 Rozstrieknutý materiál po zvarení laserom plechu s obojstrannou povrchovou vrstvou zinku .....	11
Obr. 4 Dutina v zvaru po zvarení laserom plechu s obojstrannou povrchovou vrstvou zinku .....	11
Obr. 5 Odporové bodové zváranie .....	12
Obr. 6 Zariadenie pre bodové zváranie od firmy ABB .....	12
Obr. 7 Degradácia špičky elektródy .....	12
Obr. 8 Zváranie MAG .....	13
Obr. 9 Rozstrieknutie kovu pri MAG zvaraní pozinkovaných plechov .....	13
Obr. 10 Pórovitosť pri zvaraní metódou MAG pozinkovaných plechov .....	13
Obr. 11 Spájkovanie metódou MIG B-stĺpika vozidla Honda Accord .....	14
Obr. 12 Rozdiel medzi MAG zvaraním a MIG spájkovaním .....	14
Obr. 13 Nanášanie lepidla na karosériu .....	15
Obr. 14 Adhézny a kohézny lom.....	15
Obr. 15 Zváranie laserom .....	16
Obr. 16 Skenerové zváranie laserom .....	16
Obr. 17 Dvojprenosné zváranie pozinkovaného plechu laserom.....	17
Obr. 18 Laser dimpling mechanism.....	17
Obr. 19 Rozdiel medzi zvaraním pozinkovaného plechu laserom a vláknovým Trifocal laserom .....	17
Obr. 20 Rozdelenie jednotlivých lúčov Trifocal laseru .....	18
Obr. 21 Schéma spojenia a zvarenia dvoch povrchov plastických kovových telies v tuhom stave.....	19
Obr. 22 Všeobecná schéma laseru .....	20
Obr. 23 Stimulovaná emisia v energetických hladinách .....	21
Obr. 24 Závislosť absorpcie na vlnovej dĺžke .....	22
Obr. 25 TEM módy .....	22
Obr. 26 Schéma konštrukcie Nd:YAG laseru, transverzálne (bočné) a zadné budenie laseru .....	23
Obr. 27 Schéma konštrukcie diskového laseru .....	24
Obr. 28 Diskový laser TruDisk od firmy Trumpf .....	24
Obr. 29 Schéma konštrukcie vláknového laseru .....	25
Obr. 30 Schéma konštrukcie polovodičového laseru .....	26
Obr. 31 Varianty laserov .....	27
Obr. 32 Rozdiel medzi kondukčným a penetračným režimom .....	28
Obr. 33 Typy laserových zvarov .....	29
Obr. 34 Konštrukčná schéma laserovej zvaracej hlavy .....	29
Obr. 35 Precitec YW 30 .....	29
Obr. 36 Schematický princíp zvarovania TIG .....	31
Obr. 37 Zostava pre zvarovanie metódou TIG vrátane výsledného zvaru.....	31
Obr. 38 Konštrukčná schéma zvaracieho TIG horáku .....	38
Obr. 39 Paralelné usporiadanie zostavy laseru a elektrického oblúku TIG.....	39
Obr. 40 Koaxiálne usporiadanie zostavy laseru a elektrického oblúku TIG .....	39
Obr. 41 Vzdialenosť $d_{LA}$ .....	41
Obr. 42 Typy vad podľa tvaru a polohy .....	44
Obr. 43 Horúca trhlina .....	44
Obr. 44 Studená trhlina .....	45
Obr. 45 Trhlina po žíhaní .....	46
Obr. 46 Lamelárna trhlina .....	47
Obr. 47 Kráterová trhlina .....	47
Obr. 48 Póry v zvarovom spoji .....	47
Obr. 49 Studený spoj .....	48

Obr. 50 Prepadnutý koreň zvaru .....	48
Obr. 51 Trosková vtúsenina .....	48
Obr. 52 Modely skúšobných telies pre skúšku ťahom .....	50
Obr. 53 Charpyho kyvadlové kladivo .....	52
Obr. 54 Univerzálny tvrdomer SHR-187.5 .....	52
Obr. 55 Priemer guličky D a priemer vtlačku d s hĺbkou h u skúšky podľa Brinella .....	53
Obr. 56 Rozmery uhlopriečok $d_1$ a $d_2$ vrátane veľkosti uhlu štvorbokého ihlanu u skúšky podľa Vickers..	53
Obr. 57 Princíp Poldiho kladivka .....	54
Obr. 58 Princíp skúšky ohybom.....	55
Obr. 59 Princíp skúšky hĺbením podľa Erichsena .....	55
Obr. 60 Baumannov odlačok .....	56
Obr. 61 Beilbyho vrstva .....	58
Obr. 62 Leptanie materiálu .....	58
Obr. 63 Kapilárna skúška .....	59
Obr. 64 Magnetická prášková skúška – fluorescenčné zobrazenie trhlín .....	60
Obr. 65 Skúška vírivými prúdmi .....	60
Obr. 66 Skúška ultrazvukom.....	61
Obr. 67 Gama žiarič .....	61
Obr. 68 Laser IPG YLS – 2000 na ÚPT AVČR.....	62
Obr. 69 ABB IRB 2400/10 na ÚPT AVČR.....	63
Obr. 70 Pracovný rozsah robota IRB 2400/10 vrátane jeho ôs.....	63
Obr. 71 Zvárací zdroj MagicWave 1700 Job s pripojeným diaľkovým ovládaním na ÚPT AVČR.....	63
Obr. 72 Laserová hlava Precitec YW 30 s TIG horákom upnutá na robotickom ramene na ÚPT AVČR..	64
Obr. 73 Upnuté vzorky pripravené k zvareniu.....	64
Obr. 74 Vzhľad jednotlivých zvarov odфотографovaný tesne po zvarení plechov.....	65
Obr. 75 Laserom vyrezané skúšobné telesá (tyče) pre ťahovú skúšku – Tupý zvar.....	66
Obr. 76 Laserom vyrezané skúšobné telesá (tyče) pre ťahovú skúšku – Preplátavaný zvar.....	66
Obr. 77 Vzorka upnutá v stroji ZD 40.....	67
Obr. 78 Dutina v preplátavanom zvare.....	67
Obr. 79 Lom - skúšobná tyč č.1 z vzorky 1_PS.....	68
Obr. 80 Lom - skúšobná tyč č.3 z vzorky 1_PS.....	68
Obr. 81 Skúšobné telesá z vzorky 1_PS po ťahovej skúške.....	69
Obr. 82 Skúšobné telesá z vzorky 2_PS po ťahovej skúške.....	69
Obr. 83 Druhý kĺčok na skúšobnej tyči č.1.....	70
Obr. 84 Skúšobné telesá z vzorky 3_PS po ťahovej skúške.....	70
Obr. 85 Skúšobné telesá z vzorky 4_PS po ťahovej skúške.....	71
Obr. 86 Skúšobné telesá z vzorky 1_TS po ťahovej skúške.....	72
Obr. 87 Skúšobné telesá z vzorky 2_TS po ťahovej skúške.....	72
Obr. 88 Druhý kĺčok na skúšobnej tyči č.2.....	73
Obr. 89 Skúšobné telesá z vzorky 3_TS po ťahovej skúške.....	73
Obr. 90 Skúšobné telesá z vzorky 4_TS po ťahovej skúške.....	74
Obr. 91 Snímka makroštruktúry zvarového spoja 1_PS (Laser) .....	75
Obr. 92 Snímka makroštruktúry zvarového spoja 2_PS (Laser-TIG I=20 A).....	76
Obr. 93 Snímka makroštruktúry zvarového spoja 3_PS (Laser-TIG I=30 A).....	77
Obr. 94 Snímka makroštruktúry zvarového spoja 4_PS (Laser-TIG I=40 A).....	77
Obr. 95 Snímka makroštruktúry zvarového spoja 1_TS (Laser).....	78
Obr. 96 Snímka makroštruktúry zvarového spoja 2_TS (Laser-TIG; I=20 A).....	78
Obr. 97 Snímka makroštruktúry zvarového spoja 3_TS (Laser-TIG; I=30 A).....	79
Obr. 98 Snímka makroštruktúry zvarového spoja 4_TS (Laser-TIG; I=40 A).....	79

## ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Typy a značenie elektród vrátane hodnôt podielu oxidu v zmesi.....	33
Tab. 2 Závislosť priemeru elektródy na prúdovom zaťažení.....	35
Tab. 3 Odporúčaný priemer elektród v závislosti na hrúbku ocele.....	35
Tab. 4 Príklady označenia obvykle používaných technických plynov.....	36
Tab. 5 Hodnoty zaťažujúcej sily skúšky podľa Vickersa.....	53
Tab. 6 Chemické zloženie ocele WSS-M1A365-A14.....	62
Tab. 7 Mechanické vlastnosti oceli.....	62
Tab. 8 Parametre pre výpočet vneseného tepla pre preplátavaný zvar.....	65
Tab. 9 Parametre pre výpočet vneseného tepla pre tupý zvar.....	65
Tab. 10 Namerané hodnoty mechanických vlastností základného materiálu z ťahovej skúšky.....	67
Tab. 11 Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 1_PS (Laser) z ťahovej skúšky.....	68
Tab. 12 Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 2_PS(Laser-TIG; I=20 A) z ťahovej skúšky.....	69
Tab. 13 Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 3_PS (Laser-TIG; I=30 A) z ťahovej skúšky.....	70
Tab. 14 Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 4_PS (Laser-TIG; I=40 A) z ťahovej skúšky.....	71
Tab. 15 Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 1_TS (Laser) z ťahovej skúšky.....	71
Tab. 16 Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 2_TS (Laser-TIG; I=20 A) z ťahovej skúšky.....	72
Tab. 17 Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 3_TS (Laser-TIG; I=30 A) z ťahovej skúšky.....	73
Tab. 18 Namerané hodnoty mechanických vlastností vzorky 4_TS (Laser-TIG; I=40 A) z ťahovej skúšky.....	74
Tab. 19 Výsledné hodnotenie zvarových spojov podľa stupňa kvality.....	80
Tab. 20 Odporúčané zvaracie parametre pre materiál WSS-M1A365-A14 50G o hrúbke 0,9 mm.....	80

## **ZOZNAM PRÍLOH**

Príloha č.1 - Hydraulický zkušební stroj ZD40

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

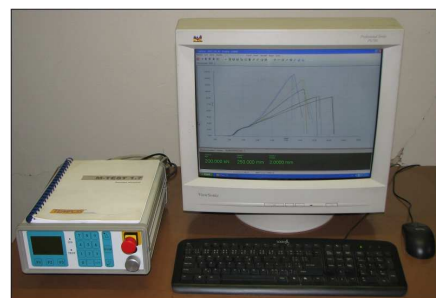
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

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

Technické parametry:

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

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



Řídicí jednotka EDC 60