



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ ŽÁROVĚ POZINKOVANÝCH PLECHŮ POMOCÍ HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE LASER-TIG

WELDING OF HOT-DIP GALVANIZED SHEETS USING HYBRID LASER-TIG TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Bukvic

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Tomáš Bukvic**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

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 žárově pozinkovaných plechů pomocí hybridní technologie Laser–TIG

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ověřit svařování žárově pozinkovaných plechů 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 galvanicky pozinkovaných plechů. Optimalizovat procesní parametry s ohledem na mechanické vlastnosti svaru. Osvojit si metalografické vyhodnocování svarového spoje, mechanické zkoušky svaru a vyhodnocení svarových vad.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

MORAVEC, Jaromír. Teorie svařování a pájení II: Speciální metody svařování. Liberec: TUL, 2008. ISBN 978-80-7372.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

BUKVIC Tomáš: Svařování žárově pozinkovaných plechů pomocí hybridní technologie Laser-TIG

Práce se zabývá ověřením vhodnosti metody Laser-TIG pro průvarové svařování pozinkovaných plechů z ocelí WSS M1A 365-A14 50G a DC01. Elektrický oblouk zde funguje jako předehřev pro odpaření zinkové vrstvy. Jako proměnný parametr byla zvolena velikost proudu TIG zdroje 0, 20, 30 a 40 A. Byly zhotoveny zkušební sváry, které byly podrobeny tahové zkoušce a metalografickému vyhodnocení pro ověření kvality spoje a jeho mechanických vlastností. Pro galvanicky pozinkovanou ocel WSS M1A 365-A14 50G byl zaznamenán pozitivní vliv oblouku a podařilo se stanovit optimální svařovací parametry. Elektrický oblouk pozitivně ovlivňoval i svařování žárově pozinkované oceli DC01, avšak při zvolených zkušebních parametrech ne natolik, aby bylo možné zhotovit spolehlivý spoj.

Klíčová slova: svařování, Laser-TIG, WSS M1A 365-A14 50G, DC01, zinkové povlakování

ABSTRAKT

BUKVIC Tomáš: Welding of hot-dip galvanized sheets using hybrid Laser-TIG technology

Thesis is focused on verification of suitability of Laser-TIG technology for penetrating welding of galvanized sheets, made of WSS M1A 365-A14 50G steel and DC01 steel. Electric arc functions here as a preheating for evaporation of zinc layer. Electric current was chosen as a variable parameter of magnitudes 0, 20, 30 and 40 A. Test welds were made, which have been subjected to a tensile test and metallographic evaluation. The positive influence for electrolytically galvanized steel WSS M1A 365-A14 50G was registered and determination of optimal welding parameters was successful. The electric arc also had a positive effect on welding of hot-dip galvanized steel DC01, but at the selected test parameters not enough to achieve a reliable connection.

Key words: welding, Laser-TIG, WSS M1A 365-A14 50G, DC01, zinc coating

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BUKVIC, Tomáš. *Svařování žárově pozinkovaných plechů pomocí hybridní technologie Laser-TIG* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-15].

Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132381>. Diplomová práce.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
Vedoucí práce Libor Mrňa

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci na téma Svařování žárově pozinkovaných plechů pomocí hybridní technologie Laser TIG vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 18.5.2021

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za vedení práce a ochotný přístup. Dále pak Ing. Petru Horníkovi a ostatním zaměstnancům UPT za pomoc s přípravou experimentu a metalografických výbrusů, Ing. Kamilovi Podanému, Ph.D za pomoc s provedením tahové zkoušky a rodině za jejich podporu.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.2 Možnosti provedení spoje	11
2 ŽÁROVÉ ZINKOVÁNÍ.....	16
3 GALVANICKÉ ZINKOVÁNÍ	18
3.1 Srovnání žárového a galvanického zinkování	18
4 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ LASEREM – METODA 52	19
4.1 Provozní režimy a parametry laseru	21
4.2 Druhy laserů používaných v průmyslu	22
5 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ TIG – METODA 141.....	25
5.1 Druhy svařovacích proudů	26
6 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ LASER-TIG	28
6.1 Procesní parametry při svařování Laser-TIG	29
7 VADY SVARŮ.....	31
8 ZKOUŠKY SVARŮ.....	35
9 EXPERIMENT.....	37
9.1 Příprava vzorků a měření tloušťky zinkové vrstvy.....	37
9.2 Svařovací zařízení.....	39
9.3 Proces svařování	41
9.4 Výpočty vneseného tepla	42
9.5 Tahová zkouška	43
9.6 Makrostruktura	54
10 DISKUZE.....	61
11 ZÁVĚRY	63
Seznam použité literatury	
Seznam použitých zkratk a symbolů	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

ÚVOD [1, 2]

LASER je anglická zkratka, která v čeština znamená zesilování světla pomocí stimulované emise záření. Laser je prakticky svazek o vysoké hustotě záření zaostřený do velmi malé plochy. Nachází své využití v odvětvích jako je průmysl, zdravotnictví nebo výpočetní technika. V průmyslu se používá na svařování, řezání, povrchové kalení, navařování, vrtání a gravírování. Laserové svařování má široké zastoupení, zejména v automobilovém průmyslu, kde je plně automatizováno (obr. 1). Laserový svár je velice štíhlý, vzhledný, s malou tepelně ovlivněnou oblastí (obr. 2).

Bohužel většina svařovaných ocelí trpí na korozi. K potlačení jejich negativních vlivů byla vynalezena řada metod. Hojně používanou metodou je nanášení povlaku zinku, a to buď žárovým, nebo galvanickým způsobem. Zinkový povlak však způsobuje problémy při svařování, které se nevyhýbají ani moderním svařovacím technologiím jako je laser. Z tohoto důvodu se začaly používat hybridní technologie, kdy je laser doplňován elektrickým obloukem. Ten laseru pomáhá odpařit zinkový povlak před samotným svařováním.



Obr. 1 Svařování karoserie laserem [1]

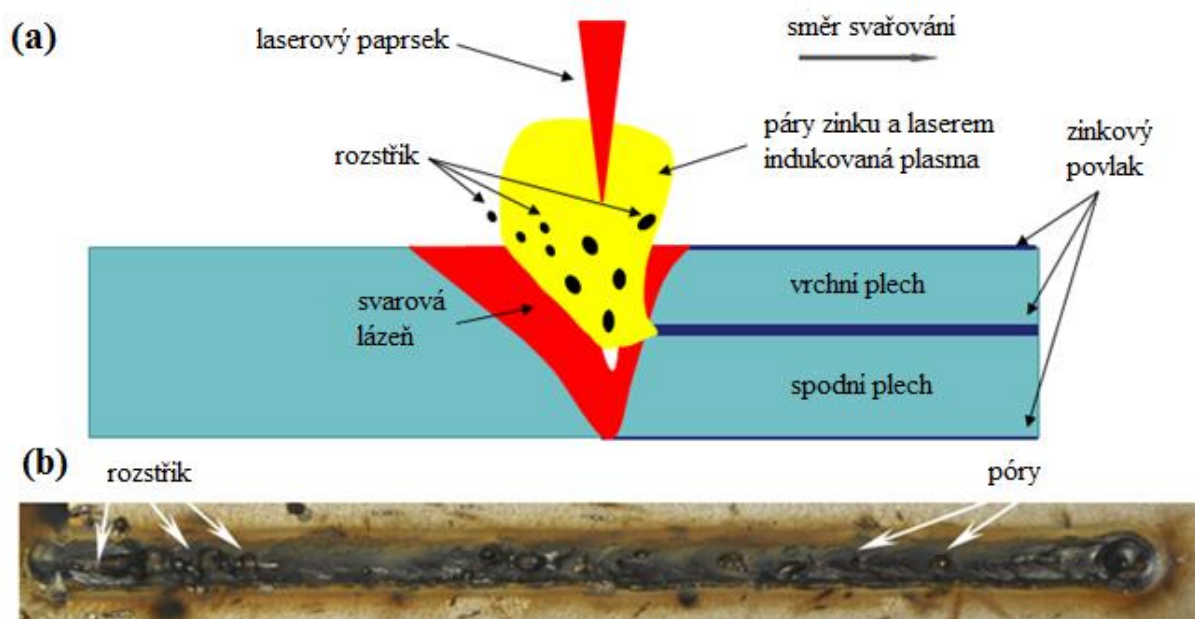


Obr. 2 Laserový svár [2]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [3, 4]

Řešeným problémem je provedení přeplátovaného svarového spoje pozinkovaných plechů hybridní metodou Laser-TIG. Konkrétní aplikace není zadána, ale předpokládá se použití pro automotive, tedy pro velké série. Testované plechy mají rozměr 14x13 cm. Polovina plechů je žárově pozinkovaná a je vyrobena z oceli DC01 o tloušťce 1 mm, což je přibližně ekvivalent EN 10131/ ČSN 11 321. Druhá polovina testovaných plechů byla pozinkována galvanicky a vyrobena z oceli WSS M1A 365-A14 50G o tloušťce 0,9 mm.

Zinkový povlak má při svařování značný vliv, neboť začíná vřít od teploty cca 906 °C, kdežto od teploty cca 1500 °C, v závislosti na chemickém složení oceli, teprve dochází k natavování oceli. Při laserovém svařování se zinek vlivem vysoké energetické hustoty laserového svazku rychle vypařuje a v případě přeplátovaného spoje bez mezery mezi plechy nemá jinou možnost úniku než skrz svarovou lázeň. Únik zinkových par skrz key-hole má vysokou dynamiku a způsobuje vytryskávání taveniny, což vede k nežádoucímu rozstříku, dutinám a pórům ve svarovém kovu, viz obr. 3. Tyto vady nejenom zhoršují vzhled, ale také negativně ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti svaru. U žárově pozinkovaných plechů oproti galvanicky pozinkovaným bude tento problém markantnější, jelikož zinková vrstva má větší tloušťku, z čehož plyne větší množství zinkových par unikajících z místa svaru.



Obr. 3 Problémy při svařování pozinkovaných plechů [3]

1.1 Problematika obloukového svařování pozinkované oceli [5, 6]

Zinkovanou ocel lze svařovat bez větších obtíží stejným způsobem a metodami jako oceli bez povlaku s tím rozdílem, že nelze použít parametry pro svařování bez povlaku, neboť povlak narušuje průběh svařování. Rušivý vliv je závislý na tloušťce zinkové vrstvy, složení a struktuře.

Při svařování pozinkované oceli je nutno dbát na tyto požadavky:

- Nízké tepelné ovlivnění kvůli vzniku deformací
- Zachování či jen mírné narušení zinkové vrstvy na základním materiálu
- Dodatečná antikorozi ochrana svarové housenky
- Vysoká stabilita procesu pro snadnou automatizaci

Při svařování pozinkované oceli se setkáváme s problémy jako větší rozstřík, menší průvar, vyšší pórovitost, nebezpečí tvorby mezikrystalických prasklin, či zvýšený vývin dýmu.

- Zvětšený rozstřík se týká zejména svařování v ochranné atmosféře MAG, kde při svařování v určitých polohách může narušovat oblouk a ulpívat v hubici hořáku a tím omezovat proudění ochranného plynu. Rozstříknutý kov také ulpívá na povrchu svařence a zhoršuje jeho vzhled.
- Hloubka průvaru je zinkem negativně ovlivňována, neboť roztavený zinkový povlak oslabuje energetickou stálost oblouku, a to má za následek změnu proudu, napětí a dynamiky oblouku.
- Tvorba pórů je způsobena zplodinami zinku a ostatními plyny, které nestačí uniknout ze svarové lázně před jejím ztuhnutím. To je typické pro svařování MAG při oboustranných koutových svarech.
- Mezikrystalové praskání je způsobeno difuzí zinku v přechodové oblasti svaru.

Pro omezení výše zmíněných problémů na přijatelnou úroveň lze zavést následující opatření:

- ❖ Použití přípravku proti rozstříku při MAG svařování, který zabraňuje ztuhnutí kapek rozstříku v hubici a svarovém okolí.
- ❖ Svařovat s mezerou 1,5 mm mezi dílci u metody MAG a 2,5 mm u metody MMA. Tím se docílí snížení pórovitosti, lepšího průvaru a eliminace mezikrystalového praskání.
- ❖ Svařovat nižšími rychlostmi a elektrodou pohybovat podél spáry takovým způsobem, aby došlo k odpaření zinkového povlaku před taveninou. Sníží se tím počet pórů a nebezpečí mezikrystalového praskání.

1.2 Možnosti provedení spoje [6–22]

Je potřeba vytvořit spolehlivý spoj. V případě několika kusů, lze uvažovat o možnosti odstranění zinkového povlaku z místa budoucího svaru broušením a po svaření libovolnou konvenční metodou ošetřit svar a obroušenou plochu zinkovým sprejem. Ten však neposkytuje tak kvalitní a odolný povlak. Pro sériovou výrobu je tato možnost zcela nepřijatelná, je tedy potřeba ověřit, které svařovací technologie jsou více či méně vhodné pro tento konkrétní případ. Nabízí se:

- Odporové svařování
Při odporovém svařování je svar vytvářen bez přídavného materiálu pomocí průchodu elektrického proudu o vysoké intenzitě (1000 až 100 000 A) skrz místo svaru po krátký časový interval (0,04 až 2 s) a působení přitlačné síly (500 až 10 000 N). Během svařovacího procesu jsou spojované plechy k sobě přitlačeny párem měděných elektrod, kterými proudí elektrický proud. Ocel má oproti mědi mnohem nižší elektrickou vodivost, tudíž při průchodu proudu vykazuje velký elektrický odpor, což vede k lokálnímu ohřátí až natavení. Za současného působení tlaku dojde ke svaření. Tato metoda je určena ke spojování ocelových plechů nebo drátů, spojených do mříží či sítí.

Existují tyto způsoby odporového svařování:

- a. Bodové – svar má podobu čocky a je vytvářen mezi bodovými elektrodami.
- b. Švové – svar má souvislý podlouhlý tvar a je vytvářen kotoučovými elektrodami.
- c. Výstupkové – svar se realizuje v místě původních nebo uměle vytvořených výstupků.
- d. Stykové – íly jsou svařovány pomocí přitlačování styčných ploch a svar je vytvořen po celé styčné ploše.

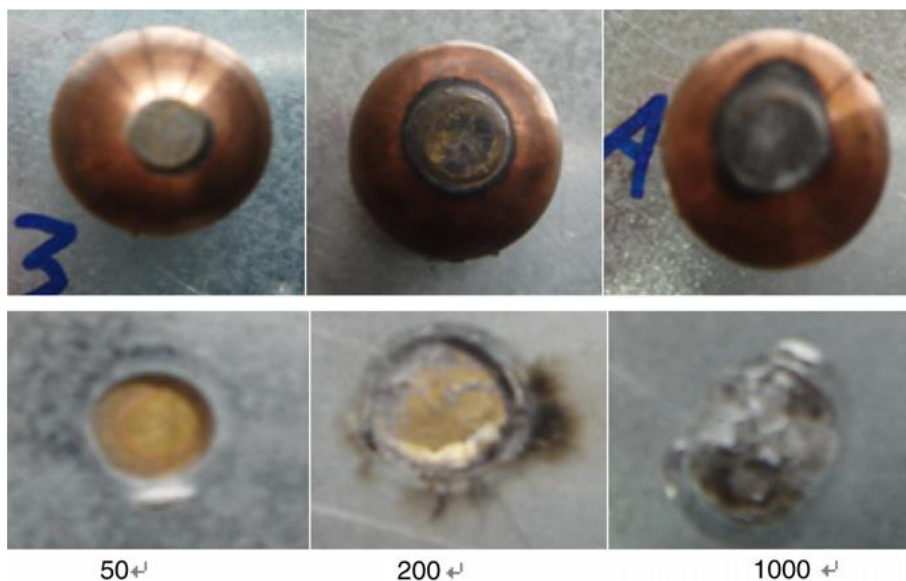
Výhody:

- Vysoká produktivita – svařovací časy jsou zlomky sekund
- Možnost využití ve velkosériové výrobě
- Možnost automatizace

Nevýhody:

- ❖ Opatřebení elektrod zhoršuje kvalitu svaru
- ❖ Vysoké pořizovací náklady

Při svařování pozinkovaných plechů dochází k zrychlené degradaci elektrod. Zinek ulpívá na čele elektrody a difuzně interaguje s jejím měděným materiálem, vzniká mosaz, což vede ke zhoršení průchodu elektrického proudu elektrodami a jejich ohřívání a následné deformaci, viz obr. 4 S ulpíváním zinku a deformací elektrod roste styčná plocha elektrody a plechu a tím klesá hustota dodávané energie, což znesnadňuje natavení a svaření plechů. Pokles hustoty energie je nutno kompenzovat delšími svařovacími časy a dodáváním většího množství elektrické energie. Degradace elektrod je velmi rychlá, a proto je nutné je často měnit. Případně je možné je opravovat přefrézováním. V případě, že by řešeným problémem bylo svařování plechů bez povlaku, jevila by se tato metoda po ekonomické stránce velice výhodná díky krátkým výrobním časům a automatizaci. Bohužel v případě svařování pozinkovaných plechů by proces zpomalovalo a prodražovalo časté měnění nebo opravy elektrod.



Obr. 4 Degradace elektrody [13]

- Svaření laserem

K natažení spojovaných materiálu dochází pomocí laserového svazku s vysokou energetickou hustotou, zaostřeného do velmi malé plochy. Dochází k rychlému lokálnímu ohřevu, který významně převyšuje rychlost odvodu tepla do materiálu. Průběh svařování je zachycen na obrázku č. 5. Výsledkem je velmi úzký svár s velmi malou tepelně ovlivněnou oblastí. Oxidaci svarové lázně brání ochranný plyn (Ar, N₂, CO₂ nebo He). Díky malému množství vneseného tepla dochází jen k malým deformacím. Pořízení laseru je velmi nákladné, lze jej tedy z důvodu rentability použít pouze pro velké série.



Obr. 5 Svařování laserem [22]

Výhody:

- Kvalita sváru
- Hluboký průvar
- Malá tepelně ovlivněná oblast
- Vysoká produktivita a snadná automatizace
- Estetika sváru
- Svařování bez přídavného materiálu a bez dotyku

Nevýhody:

- ❖ Vysoké pořizovací náklady
- ❖ Složitě příprakování
- ❖ Vznik vad při svařování pozinkovaných ocelí

Jak již bylo zmíněno v rozboru, svařování pozinkovaných plechů je problematické. Při nulové mezeře mezi plechy páry zinku explozivně unikají skrz key-hole a způsobují vznik dutin, pórů a rozstřík. Tyto vady jsou nepřipustné. Obzvláště závažné jsou při svařování tenkých plechů, kdy způsobují markantní úbytek materiálu ve svarovém kovu. To se negativně projeví na mechanických vlastnostech.

- Svaření laserem s mezerou mezi plechy

Vytvořením mezery mezi svařovanými plechy lze umožnit únik zinkových par z místa svaru a minimalizovat vznik dutin a pórů. Vymezení mezery lze provést lepením distančních nálepek, zhotovením prolisů, nebo navařením malých bodových svarů laserem na spodní plech, jakožto první operaci. Všechny tyto přípravné metody jsou zdoluhavé nebo vyžadují více operací, tudíž jejich použití pro velké série výrobků by nebylo ekonomické.

Výhody:

- Potlačení problémů se zinkovými parami
- Ostatní výhody jako u laseru

Nevýhody:

- ❖ Prodloužení výrobních časů a tím i snížení produktivity
- ❖ Ostatní nevýhody jako u laseru

- Lepení

Lepním rozumíme tvorbu nerozebíratelného spoje pomocí lepidla naneseného mezi styčné plochy spojovaných součástí a vykazujícího dobrou přilnavost k oběma spojovaným materiálům. Během nanášení je lepidlo vždy v kapalném skupenství. Na výslednou pevnost lepeného spoje mají vliv adheze, koheze, smáčivost a soudržnost lepených materiálů. Adheze představuje přilnavost lepidla k lepenému povrchu a realizuje se mechanickou nebo chemickou vazbou. Mechanická vazba je typická pro drsné či porézní povrchy, kdy je lepidlo zakotveno v povrchových nerovnostech. Adhezi ovlivňuje kvalita očištění a odmaštění styčných ploch. Koheze je pevnost hmoty lepidla a měla by být větší než pevnost lepených materiálů. Nanášení lepidla se může provádět ručně, ale lze jej i snadno automatizovat, viz obr. 6



Obr. 6 Strojní nanášení lepidla [9]

Výhody:

- Vysoká pevnost spoje
- Do konstrukce není vnášeno dodatečné napětí
- Bez vzniku deformací
- Korozní odolnost a útlum vibrací
- Možnost spojování různorodých materiálů
- Lepení nemění strukturu materiálu
- Spojování velkých ploch a tenkých materiálů

Nevýhody:

- ❖ Nízká tepelná odolnost
- ❖ Dlouhá doba pro vytvrzení lepidla
- ❖ Dosažení maximální pevnosti spoje až po určité předepsané době
- ❖ Náchylnost na zatížení tahem a zejména odlupováním

Vzhledem k dlouhým výrobním časům není tato metoda vhodná pro velké série.

- MIG pájení

Tato metoda tvrdého pájení se hojně používá v automobilovém průmyslu. Princip spočívá v použití přídatného materiálu ve formě tvrdých (vysokoteplotních) pájek, například bronzových drátů, které jsou taveny pomocí elektrického oblouku, generovaného standardním MIG/MAG zdrojem. Přitom dochází pouze k natavení přídatného materiálu a nikoli základního materiálu. Vzhledem k tomu, že má pájka nízkou teplotu tavení, se zinkový povlak sice nataví, ale odpar je minimální a zinková vrstva zůstává téměř neporušená. Zinková ochrana chybí jen mezi bronzovou housenkou a nenarušeným okolním základním materiálem. Avšak i toto místo je částečně chráněno pomocí katodické ochrany zinku.

Výhody:

- Korozivzdorný svar
- Katodická ochrana základního materiálu v okolí svaru
- Minimální odpařování zinku, rozstřík a nárok na dokončovací operace.

Nevýhody:

- ❖ Při tloušťce zinkové vrstvy převyšující 15 μm může docházet vlivem zvýšeného množství par k nestabilitě oblouku. To může způsobovat problémy při svařování zároveň pozinkovaných dílců.

- Svařování metodou Laser-TIG

Jedná se o hybridní svařovací technologii založenou na kombinaci laserového a obloukového svařování, přičemž je snaha kompenzovat nevýhody obou dílčích technologií. Existují dvě konfigurace. V jednom případě po laseru následuje TIG, který plní funkci dohřevu (např. pro oceli s vyšším obsahem uhlíku). V druhém případě slouží jako primární zdroj tepla laser a TIG plní funkci předehřevu. V případě řešeného problému v této práci, předehřev pomocí TIGu pomáhá odpařit zinek z místa svaru před samotným natavením svařovaných materiálů a tím se vyhnout vzniku dutin a pórů vznikajících při samotném laserovém svařování pozinkovaných dílců. Pro jiné aplikace může být předehřev nápomocný například pro odstranění oxidické vrstvy.

Výhody:

- Vysoká rychlost svařování
- Stabilní proces
- Vyšší účinnost než dílčí metody
- Široká paleta procesních parametrů a z toho plynoucí široká škála použití
- Možnost svařovat s i bez přídavného materiálu.
- Přidáním TIGu jsou pořizovací náklady navýšeny jen o několik desítek tisíc korun, což je oproti ceně laseru zanedbatelná částka.
- Vzhledem k tomu, že TIG také napomáhá s dodáváním tepla, lze použít méně výkonný, a tedy levnější laser.
- Odpaření zinkové vrstvy před svařováním

Nevýhody:

- ❖ Vysoké pořizovací náklady laseru
- ❖ Složité nastavování svařovacího procesu.

Se zohledněním produktivity, vlivu zinkových par, kvality svaru, ekonomičnosti a ostatních aspektů se jako nejvýhodnější jeví hybridní technologie Laser-TIG a bude na ni zaměřena literární a praktická část.

2 ŽÁROVÉ ZINKOVÁNÍ [5, 6, 23, 24]

Žárovým zinkováním se rozumí vytvoření ochranného povlaku na povrchu dílce složeného z několika vrstev slitinových Fe-Zn fází a z vnější vrstvy čistého zinku. Využívá se vzájemné rozpustnosti železa a zinku, kdy za teploty cca 450 °C dochází k tvorbě intermetalických fází na rozhraní styku povrchu dílce s roztaveným zinkem. Chemické složení se liší podle vzdálenosti od povrchu povlaku, přičemž s rostoucí vzdáleností roste podíl železa. Výsledná zinková vrstva je charakteristická relativně rovnoměrnou tloušťkou, dobrou přilnavostí a typickým vzhledem. Tato technologie je určena pro dlouhodobou ochranu dílce proti korozi.

Výhody žárového zinkování:

- Nízké vstupní náklady
- Dlouhá životnost povlaku a minimální údržba
- Rovnoměrnost a kvalita povlaku po celém povrchu dílce i na špatně přístupných plochách
- Shodná či větší tloušťka povlaku na ostrých hranách oproti rovným plochám dílce
- Dobrá mechanická odolnost povlaku

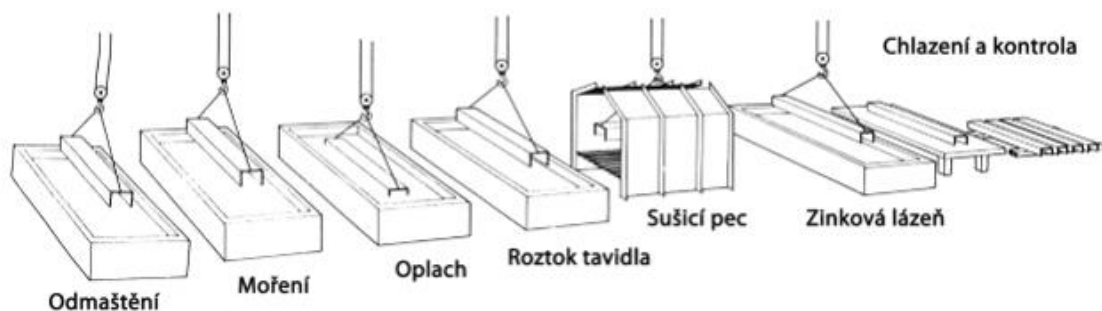
Nevýhody žárového zinkování:

- Imobilní zařízení pro provádění zinkování
- Rozměry dílce jsou limitovány velikostí lázně
- Riziko deformace dílce vlivem tepla v zinkovací lázni
- Zhoršené podmínky pro svařování pozinkovaného dílce spojené se zdravotním rizikem (například vdechnutí exhalací při svařování).
- Navýšení hmotnosti součásti

Způsoby žárového zinkování jsou:

❖ Suché zinkování

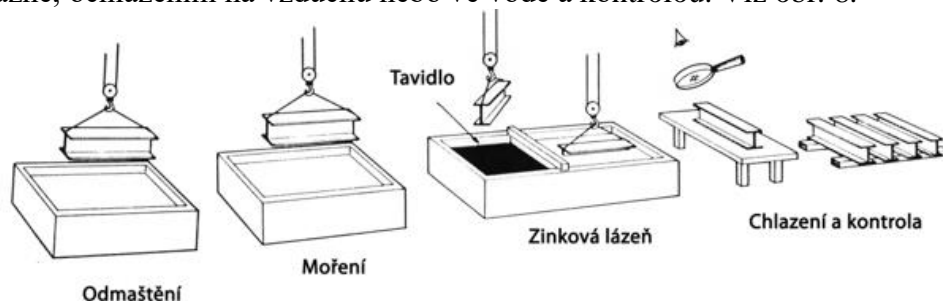
Zařazují se přípravné operace jako jsou odmaštění, moření a oplach. Následně je součást ponořena do tavidlové lázně, která se skládá z vodného roztoku chloridu zinečnatého a chloridu amonného a má za úkol rozpustit oxidy na povrchu oceli a zabránit tvorbě nových oxidů železa a tvrdého zinku. Po nanesení vrstvy tavidla se součást suší v sušící peci a poté je ponořena do lázně roztaveného zinku. Před ponořením a vynořením dílce je potřeba z hladiny lázně setřít popel ze spáleného tavidla a oxidy zinku. Proces je ukončen ochlazením dílce ve vodě případně na vzduchu a kontrolou, viz obr. 7. Suchý způsob se používá častěji než mokrý, neboť je snazší jej mechanizovat.



Obr. 7 Postup žárového zinkování suchým způsobem [5]

❖ Mokré zinkování

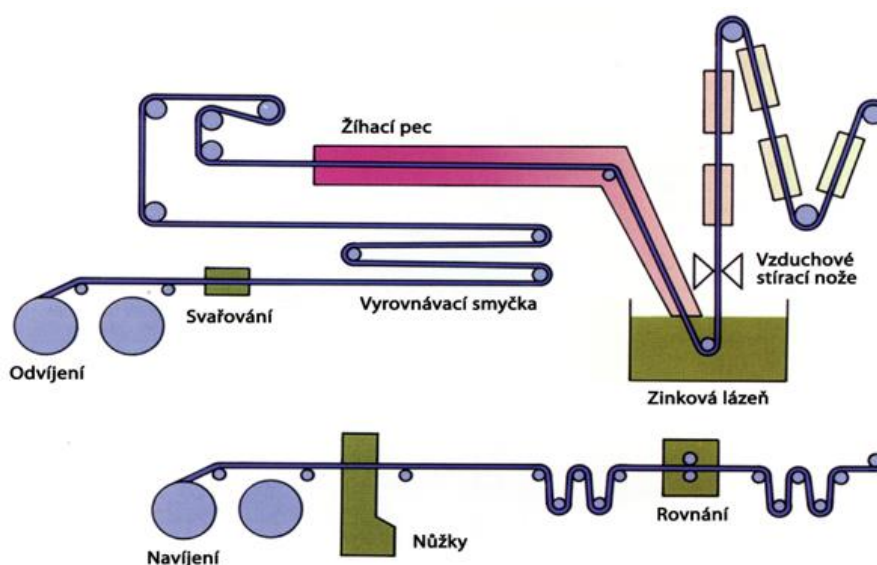
Při mokřem zinkování se zinkovací lázeň liší od suchého způsobu tím, že je hladina rozdělena přepážkou na dvě části, kde v jedné části je na hladině vrstva tavidla (chloridu amonného). Součást je po odmaštění a odmoření ponořena do zinkové lázně přes vrstvu tavidla a následně protažena do druhé části lázně s hladinou bez tavidla. Z hladiny je stírán popel ze spáleného tavidla a oxidy zinku. Proces je ukončen vytažením dílce z lázně, ochlazením na vzduchu nebo ve vodě a kontrolou. Viz obr. 8.



Obr. 8 Postup žárového zinkování mokřým způsobem [5]

❖ Kontinuální žárové zinkování ocelového pásu

Pro zinkování tenkých plechů se používá kontinuální zařízení, viz obr. 9. Vstupním materiálem je za studena válcovaný plech ve formě svitků, svařovaný na začátku procesu do nekonečného pásu. Po dokončení odmašťování a moření je povrch pásu redukčně zbaven oxidů při teplotě 950 °C, přičemž je pás zároveň žhán naměkko. Pás s kovově čistým povrchem a v ochranné atmosféře se kontinuálně zanořuje do zinkovací lázně, kterou projde za několik sekund a poté se vynořuje vzhůru mezi vzduchové stírací nože. Ty mají za úkol mírným proudem vzduchu regulovat tloušťku zinkové vrstvy na požadovanou hodnotu pomocí tloušťkoměrů a počítačů. Následují stanoviště pro ochlazování, rovnání a úpravu proti vzniku bílé rzi. Na konci procesu je plech stříhán na formátovacích nůžkách na požadovanou délku a navíjen na svitky, které poté mohou být expedovány, nebo podrobeny další technologické operaci (povlakování plastem nebo organickým povlakem, případně další tváření). Pro zinkování tenkých plechů se používá buď mikrolegovaný, nízkolegovaný, nebo vysokolegovaný zinek, přičemž nejčastějším legujícím prvkem je hliník.



Obr. 9 Postup kontinuálního žárového zinkování pásu plechu [5]

3 GALVANICKÉ ZINKOVÁNÍ [5, 25]

Galvanické zinkování je jednou ze základních protikorozních potenciálových ochran kovů, především slitin železa. Ochranný účinek vzniká vlivem rozdílného elektrochemického potenciálu základního materiálu a ochranné povrchové vrstvy. Pakliže se pokovená součást nachází ve vlhkém, korozním prostředí, vzniká galvanický člunek, přičemž dochází přednostně k oxidaci méně ušlechtilé zinkové vrstvy, a ne ušlechtilého základního materiálu. Prvním krokem přípravy součástí pro pokovení je odmaštění a očištění od rzi a okují mořením. Následuje zanoření do roztoku zinečnaté soli, která slouží jako elektrolyt a součást je zapojena jako katoda ke zdroji stejnosměrného proudu. Anodu tvoří desky z čistého zinku (elektrolytický zinek 99,995 %). Na základě zvolené zinečnaté soli mohou elektrolyty být kyselé, neutrální nebo alkalické. Po zapojení proudu se začne zinková anoda rozpouštět a ve formě zinečnatých iontů putovat směrem ke katodě (dílcí) a na ní se vylučovat.

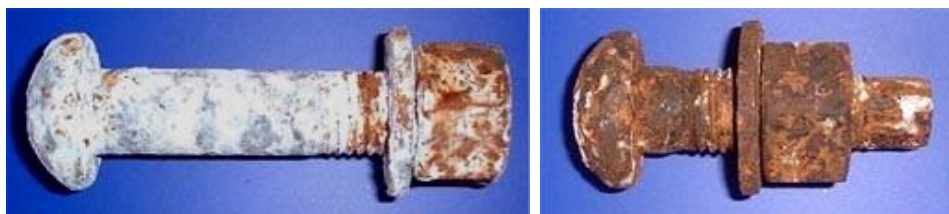
Finální vrstva má velmi jemnozrnnou strukturu a k základnímu materiálu je vázána pouze mechanickou vazbou. Normalizované tloušťky vrstvy jsou 3, 5, 8, 12 a 20 μm , přičemž standartně se používá 5 a 8 μm [5]. Tenčí vrstvy jsou používány u hromadného zboží, tlustší u součástí s jednoduchou geometrií. V případě požadavku na tloušťku povlaku přesahující 15 μm , je finančně výhodnější zvolit žárové zinkování. U galvanického zinkování lze pozorovat rozdílnou tloušťku v rámci povrchu. Ta je ovlivněna tvarem a rozmístěním anod. Pro dosažení požadované tloušťky i v zastíněných místech se používají pomocné anody. Galvanické zinkování není doporučeno pro součásti umístěné ve venkovních expozicích, vystavených povětrnostním vlivům. K tomuto účelu je vhodné zvolit zinkování žárové.

3.1 Srovnání žárového a galvanického zinkování [5, 26]

Tab. 1 Srovnání žárového a galvanického zinkování. [26]

	Žárové zinkování	Galvanické zinkování
Možnost zinkování bez předúpravy	Ne	Ne
Korozní odolnost	Velmi vysoká	Nízká
Běžná tloušťka povlaku [μm]	50-120	5-15
Kvalita a jednotnost zpracování	Nízká	Střední
Přesnost pokrytí	Nízká	Vysoká
Zdravotní škodlivost pro obsluhu	Velmi vysoká	Vysoká

Při žárovém zinkování se dosahuje mnohem větších tlouštěk povlaku a vytváří se slitinové fáze, kdežto při galvanickém zinkování je povlak na základním materiálu ukotven pouze mechanicky. Z toho plyne lepší korozní a mechanická odolnost žárového povlaku, viz obr. 10. Na druhou stranu s větší tloušťkou zinku jde ruku v ruce větší množství zinkových par při svařování, které je tedy v případě žárového povlaku složitější. Kádě pro galvanické zinkování bývají zpravidla menší než ty pro žárové a rozměry součástí pro pokovení jsou tedy více limitovány. U žárového zinkování se dosahuje horší kvality povlaku, viz tab. 1, kdy se na určitých místech mohou tvořit nálitky zhoršující vzhled, případně funkčnost. Na druhou stranu se ale dosahuje větší tloušťky povlaku na ostrých hranách dílce.



Obr.10 Vzorčky po 1500 h v solné mlze (žárové zinkování vlevo, galvanické vpravo) [26]

4 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ LASEREM – METODA 52 [14, 17, 27–34]

Vlivem vysoké koncentrace energie úzkého laserového svazku dochází k rapidnímu lokálnímu ohřevu svařovaného materiálu, který je příliš rychlý na to, aby se mohly uplatnit mechanismy sálání a vedení tepla. V závislosti na parametrech laseru, rozměrech svařovaného dílce a jeho materiálových vlastnostech může rychlost ohřevu činit až 10^5 K/s a rychlost ochlazování až 10^7 K/s. Díky těmto skutečnostem je do místa svaru vneseno malé množství tepla, což má za následek malé rozměry tepelně ovlivněné oblasti a nízkou míru deformací.

Vzhledem k vysoké rychlosti ohřevu, umožňují laserové technologie svařovat kovy s vysokou tepelnou vodivostí, jako jsou měď, stříbro a zlato, ale také materiály s vysokou teplotou tavení jako jsou wolfram, molybden, tantal, titan, či zirkonium. Laserem lze svařovat také plasty. Kvůli malému množství vneseného tepla a s tím spojenou vysokou rychlostí ochlazování nesmí obsah uhlíku u svařovaných ocelí přesáhnout 0,2 %, aby nedošlo ke vzniku křehké martenzitické struktury.

Aby nedocházelo k oxidaci svarové lázně, používají se za tímto účelem ochranné plyny, kterými mohou být argon, argon s oxidem uhličitým, dusík nebo hélium. Nejlepších výsledků se dosahuje s héliem, avšak jedná se zároveň o nejdražší ze zmíněných ochranných plynů.

Na základě výkonu laseru, průměru zaostřeného svazku, či vzdálenosti ohniska od materiálu se dosahuje konkrétní hodnoty hustoty výkonu svazku. Podle ní a dosahovaného poměru mezi hloubkou a šířkou svaru se rozlišují svařovací módy na kondukční a penetrační.

A. Kondukční mód

Kondukční mód je typický pro svařování s hustotou výkonu laseru nižší než 10^6 W/cm², kdy dochází pouze k minimálnímu odparu materiálu. Hustota výkonu laseru je dostatečná na roztavení povrchu materiálu, odkud se teplo přenáší kondukcí do zbytku materiálu, viz obr. 13. Tímto způsobem se dosahuje pouze malých hloubek svaru v řádu desetin milimetru, které jsou ovlivňovány tepelnou vodivostí svařovaných materiálů. Výsledná šířka svaru bývá o poznání větší než hloubka, viz obr. 11. Na druhou stranu je umožněno svařovat vysokými rychlostmi, což může být pro některé aplikace, kdy menší hloubka průvaru nevadí, zásadní výhodou. Kondukční svařovací mód je používán pro spojování tenkostěnných dílců, tenkých plechů, v elektronice nebo aplikacích vyžadující estetický, vyhlazený a zaoblený svar. Pro tento mód se používají pevnolátkové lasery s impulzním i kontinuálním provozním režimem.



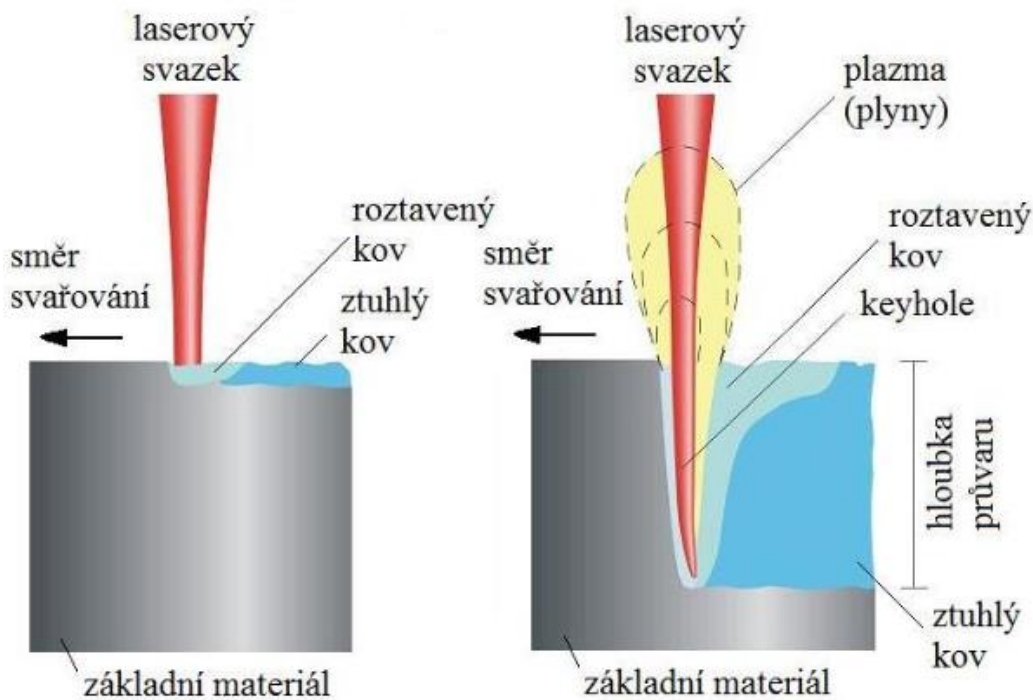
Obr. 11 Tvar svaru při kondukčním módu [28]

B. Penetrační mód

Také nazývaný key-hole mód. Při vysoké hustotě výkonu (nad 10^6 W/cm^2) je rychlost ohřevu mnohonásobně vyšší než odvod tepla do okolního materiálu a dochází nejen k tavení, ale i k odpařování části svařovaného materiálu, přičemž se vytváří plazma a dutina zvaná key-hole, viz obr. 13. Tato dutina dosahuje průměru jeden a půl až dvojnásobku průměru ohniska laseru a je vyplněna párou. Key-hole se během svařovacího procesu pohybuje společně s laserovým paprskem a z jejich stěn přestupuje vložená energie do taveniny a dále pak do tuhého materiálu, přičemž nastává rovnováha mezi přívodem a odvodem tepla. Pro udržení rovnováhy key-hole musí nastávat také rovnováha tlaku povrchového napětí snažícího se key-hole uzavřít a tlaku par kovů, který ji roztahuje. Svar zhotovený v tomto módu je úzký a hluboký, viz obr. 12, kdy hloubka svaru může být až desetkrát větší než šířka. Penetrační mód se tedy používá pro svařování silnostěnných nebo vícevrstvých materiálů. V případě svařování tenkých plechů je tloušťka plechů často menší než průměr laserového svazku na povrchu materiálu. Tudíž nemůže být dosaženo tak velkého poměru mezi hloubkou a šířkou svaru. Ke vzniku key-hole může docházet, ta je však nestabilní a nevede k takovému nárůstu absorpce.



Obr. 12 Tvar svaru při penetračním módu [28]



Obr. 13 Schéma kondukčního (vlevo) a key-hole módu (vpravo) [32]

4.1 Provozní režimy a parametry laseru [29, 34–36]

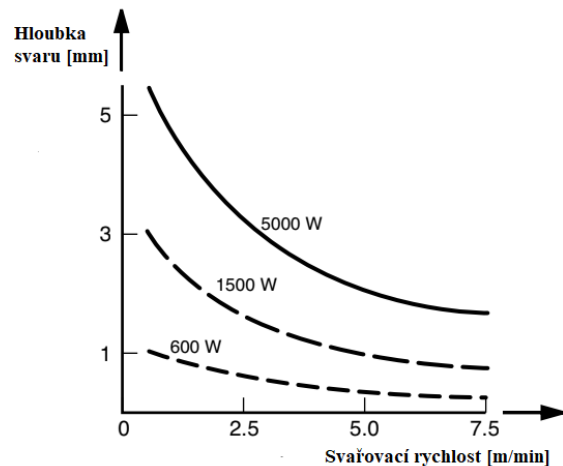
a) Kontinuální režim

Laser svařuje bez přerušování toku záření a výkon je ustálen na průměrné hodnotě během celého procesu svařování.

Při kontinuálním režimu se mezi základní parametry řadí:

- výkon laserového paprsku P [W]
- rychlost svařování v [m/min]
- parametry zaostřovacího systému.

Výkon laserového paprsku je teplotní parametr charakterizující vliv laserového paprsku na materiál během procesu svařování. Zvyšováním velikosti výkonu laseru se dosahuje větší hloubky a šířky svaru, viz obr. 14. Pro určení optimální hodnoty výkonu laseru je nutno znát mód, divergenci, polarizaci a další charakteristiky svazku. Při kontinuálním svařovacím režimu zůstává velikost výkonu v čase konstantní.



Obr. 14 Závislost hloubky svaru na svařovací rychlosti pro různé hodnoty výkonu [29]

Svařovací rychlost vyjadřuje uraženou dráhu laserovým paprskem za jednotku času. Stejně jako výkon laseru zásadně ovlivňuje geometrii, strukturu a kvalitu svaru. S rostoucí svařovací rychlostí se zmenšuje šířka a hloubka svaru, viz obr. 14. Svařovací rychlost je vhodné volit nejvyšší možnou pro daný případ, neboť se od ní odvíjí cena svaru a také se tím dosahuje menších ztrát tepelnou vodivostí.

Mezi parametry zaostřovacího systému se řadí průměr sfokusovaného paprsku, uspořádání čoček a objektivu, poloha ohniska vzhledem k povrchu materiálu a divergence paprsku. Optimální průměr svazku se doporučuje v rozmezí 0,5 až 1 mm. Při menším průměru než 0,5 mm je dodávána energie příliš velká a svar není kvalitní, při větším průměru než 1 mm klesá účinnost paprsku.

b) Pulzní režim

V pulzním režimu laser produkuje krátké pulzy o vysoké frekvenci. Mezi pulzy dochází k částečnému, nebo úplnému ztuhnutí svarového kovu a výsledný spoj je tedy tvořen množstvím překrývajících se bodových svarů, viz obr. 15. Používá se pro svařování velmi tenkých plechů a fólií přeplátovaným svarem, kde nahrazuje odporové švové svařování. Umožňuje dosažení hlubších a užších svarů s vyšší pevností a kvalitou povrchu a menších deformací.



Obr. 15 Horní pohled (a) a podélný průřez svaru (b) při pulzním režimu [36]

Při pulzním režimu se mezi základní parametry řadí:

- Energie pulzu E [J]
- Svařovací rychlost v [m/min]
- Délka pulzu τ [s]
- Frekvence pulzu f [Hz]
- Poloha ohniska vzhledem k povrchu materiálu s [mm]
- Maximální výkon pulzu P_{\max} [W]

Energie pulzu je základní energetická charakteristika, charakterizovaná jako množství energie přivedené do materiálu za dobu jednoho pulzu. Hlavní vliv má na množství vneseného tepla, ale i na další charakteristiky.

Délka impulzu představuje dobu působení svazku na svařovaný materiál, ale i dobu během které dojde k ohřevu a tavení kovu. Vhodné délky pulzu se mezi různými materiály liší a každý materiál vykazuje interval optimální doby pulzu pro dosažení kvalitního svaru bez výstřiku.

4.2 Druhy laserů používaných v průmyslu [34, 35, 37–41]

Lasery lze rozdělit podle široké škály kritérií. Podle aktivního prostředí se lasery dělí na:

- Pevnolátkové (Nd:YAG, Yb:YAG, Ti:safír),
- Plynné (He-Ne, Ar, Kr, CO₂, KrO),
- Kapalinové (fluorescein, rhodamin),
- Polovodičové (GaAs, GaN, InAsSb),
- Plazmatické.

Podle vlnové délky na:

- Infračervené (780 nm – 1 mm),
- Ve viditelném pásmu (360 nm – 780 nm),
- Ultrafialové (10 nm – 360 nm),
- Rentgenové (1 pm – 10 nm).

V neposlední řadě lze lasery rozdělit dle časového provozu na:

- Kontinuální (Nepřetržitě generování záření.),
- Pulzní (Generování pulzu o vysoké frekvenci.).

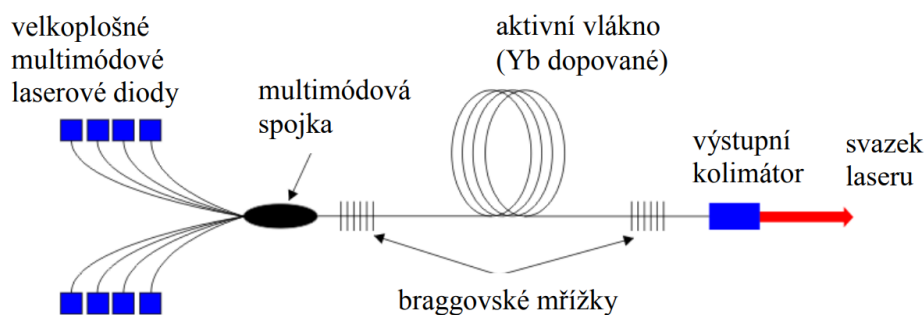
V současnosti se v průmyslu používají nejčastěji následující typy laserů:

❖ Nd:YAG laser

Jedná se o pevnolátkový laser, jehož aktivní prostředí tvoří izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu ($Y_3Al_5O_{12}$) dopovaný ionty neodymu (Nd^{3+}). Lze používat kontinuální i pulzní režim. Oproti CO_2 laseru má širší paletu využití, jako jsou řezání, vrtání, svařování a také jej lze použít jako skalpel při chirurgických zákrocích. Buzení je prováděno buď výbojkami (LPSS – lamp pumped solid state) nebo laserovými diodami (DPSS – diode pumped solid state). Účinnost přeměny elektrické energie na světelnou je u laserů buzených výbojkami nízká, protože značná část energie je přeměněna na teplo. Z tohoto důvodu je nutné vodní chlazení, což zvyšuje provozní náklady. Výhodou LPSS Nd:YAG laseru je však vysoká energie pulzu. DPSS Nd:YAG laser disponuje dvěma hlavními typy buzení a to bočním (transversálním) a zadním. Při bočním buzení se dosahuje lepší kvality svazku na úkor nižších výkonů. U zadního buzení je tomu naopak. V porovnání s LPSS lasery vykazuje vyšší účinnost, delší životnost a menší nároky na chlazení.

❖ Vláknový laser

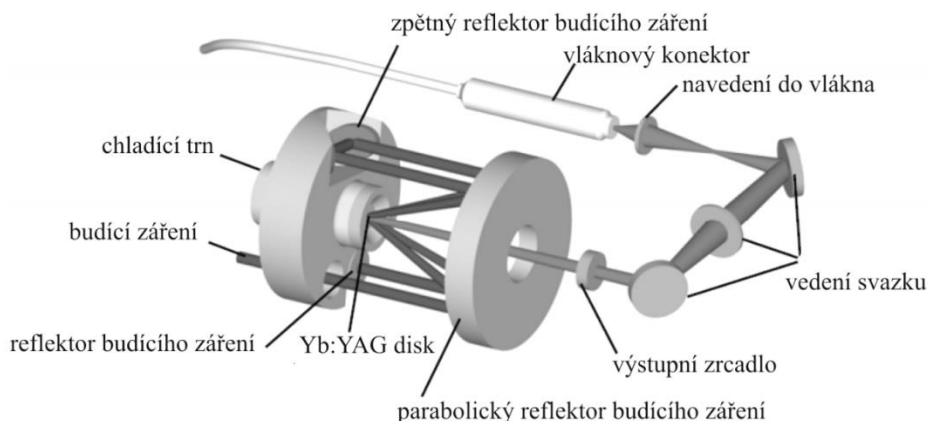
Vláknový laser je technologicky nejmodernějším typem pevnolátkového laseru, kde aktivní prostředí tvoří dlouhé optické vlákno dopované yterbiem. Buzení je prováděno pomocí laserových diod a dále je záření přes multimódovou spojku přiváděno do aktivního vlákna. Laser nevyužívá žádných opto-mechanických prvků typu zrcadel atd. Místo toho disponuje tzv. Braggovskými mřížkami, což jsou struktury vytvořené přímo na optickém vlákne, viz obr. 16. Nachází využití v řezání, svařování a značení a jeho podíl zastoupení v průmyslu stále stoupá. Provoz je možný v kontinuálním, pulzním a kvazipulzním režimu. Vyniká svou jednoduchostí, robustností, modularitou (Spojováním modulů lze navyšovat výkon.), vysokou účinností až 35 %, velmi dlouhou životností (až 100 000 h), kvalitou laserového svazku, nízkými provozními náklady a minimální údržbou. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady.



Obr. 16 Schéma vláknového laseru [38]

❖ Diskový laser

Jedná se prakticky o modifikaci Nd:YAG laseru. Aktivní prostředí obsahuje 30 % yterbia a má tvar válce, jehož výška činí několik desetin milimetru a průměr cca 100 mm. Princip je uveden na obrázku č. 17. Vzhledem k tvaru aktivního prostředí je umožněno přesné chlazení vodou nebo vzduchem a lze docílit velmi kvalitního svazku, který je stabilní i při dlouhodobém použití při vysokých výkonech. Další výhodou je, že kvalita svazku není závislá na výkonu laseru. Diskový laser disponuje účinností čerpání až 90 % a celkovou účinností 15 % až 20 %. Nachází využití zejména v aplikacích vyžadujících vysoký výkon. Používá se pro gravírování, mikroobrábění nebo tzv. remote welding.



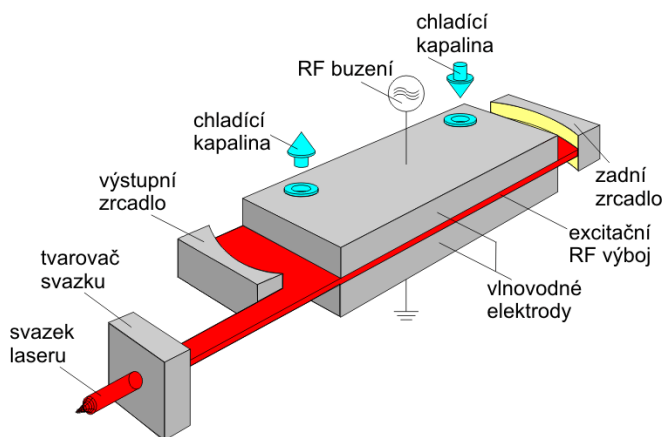
Obr. 17 Schéma diskového laseru [34]

❖ Diodový laser

Jedná se o pevnolátkový laser, jehož aktivní prostředí tvoří elektricky čerpaná polovodičová dioda. Konstrukce laseru spočívá ve spojování laserových diod do řad, bloků nebo baterií podle toho, jaký výkon je vyžadován. Kvůli větší ploše, do které je paprsek zaostřen, se používá pro laserové kalení, navařování, svařování a řezání plastů a svařování kovových fólií. Mezi jeho výhody se řadí nízké provozní i pořizovací náklady, dlouhá životnost, kompaktnost, vysoká účinnost až 60 %, možnost nastavení vlnové délky a rozsah výkonu od miliwattů po kilowatty.

❖ CO₂ laser

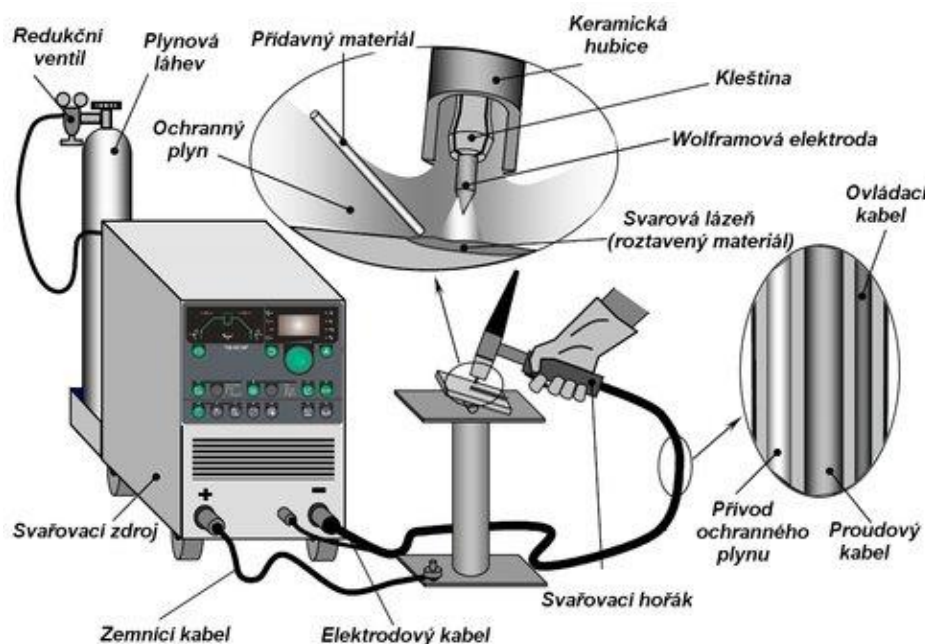
Řadí se do skupiny plynových laserů a jeho aktivní prostředí tvoří směs obsahující oxid uhličitý, dusík a hélium v poměru 1:4:5. Elektrickým výbojem dochází k nabuzení molekul dusíku do vyššího energetického stavu, které vlivem nepružných srážek předají energii molekulám oxidu uhličitého. Dochází k jejich excitaci a následnému sestupu do základního stavu a vyzáření na vlnové délce 10,6 μm . Hélium plní funkci urychlovače sestupu oxidu uhličitého do základního stavu. Celý proces se opakuje. U CO₂ laseru existují dva způsoby proudění, a to s příčným a podélným prouděním pracovní látky. Princip je uveden na obrázku č. 18. Lasery s podélným buzením jsou díky vysoké kvalitě výstupního svazku vhodné zejména pro řezání materiálů. Buzení je u nich prováděno elektrickým výbojem v ose trubice, ve které se směs plynů pohybuje rychlostí až 500 m/s. Lasery s příčným prouděním vykazují horší kvalitu svazku, díky čemuž jsou vhodné spíše pro svařování. Výhodou je však nižší spotřeba plynu a s tím spojený levnější provoz. Účinnost CO₂ laserů se pohybuje mezi 10 % až 13 %.



Obr. 18 Schéma CO₂ laseru [38]

5 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ TIG – METODA 141 [14, 42–47]

Zkratka pochází z anglického názvu Tungsten Inert Gas. Jedná se o metodu svařování netavitelnou wolframovou elektrodou, při které se využívá tepla uvolňovaného při hoření elektrického oblouku mezi elektrodou a svařovaným materiálem. Svařování lze provádět buď pouhým roztavením a slitím základních materiálů, nebo za pomoci přídavného materiálu, který může být ve formě tyčinek pro ruční, nebo cívky drátu pro strojní svařování. Metoda TIG je vhodná pro svařování materiálů jako jsou uhlíkové a korozivzdorné oceli, titan, měď, mosaz, hliník a jeho slitiny, hořčík a jeho slitiny. Schéma zařízení je vykresleno na obrázku č. 19.



Obr. 19 Schéma TIG zařízení [45]

Úkolem TIG hořáku je přívod elektrického proudu k elektrodě, přívod a usměrnění ochranného plynu, upnutí elektrody ve správné pozici a zajištění cirkulace chladicí vody. Jedná se o nejzatíženější část svařovacího zařízení. Hořáky se dělí na chlazené protékajícím plynem pro ruční vedení a velikost proudu do 150 A a vodou chlazené pro strojní vedení do velikosti proudu až 500 A. Kleštiny hořáků jsou vyměnitelné a mají za úkol fixaci a proudové napájení elektrod. Pevná fixace je zásadní pro snížení přechodového odporu mezi kleštinou a elektrodou. Další tepelně namáhanou součástí je plynová tryska, která může být keramická pro hořáky s ručním vedením a plynovým chlazením nebo kovová (měděná, pochromovaná) pro hořáky strojně vedené s vodním chlazením. V plynové trysce se pro kontrolu optimálního průtoku plynu využívá trubkových průtokoměrů s kuličkou. Optimální průtok plynu závisí na druhu svařovaného materiálu, typu ochranného plynu, velikosti proudu, velikosti plynové trysky, úhlu náklonu hořáku, typu spoje a poloze svařování.

Při TIG svařování se používají netavící elektrody, vyráběné ze spékaného wolframu s teplotou tavení 3380 °C. Elektrody mohou být čistě wolframové nebo legované oxidy thoria, lanthanu, ceru, zirkonu, yttria či vzácnými zeminami. Legury snižují míru ohřevu elektrody během svařování, prodlužují její životnost a pozitivně ovlivňují zapalování a stabilitu oblouku vlivem zvýšení emise elektronů. Volba správné elektrody je ovlivněna druhem a velikostí proudu, polaritou, typem a tloušťkou základního materiálu a typem, hloubkou a tvarem svařového úkosu. Pro značení elektrod se používají barvy na jejich konci.

Ochranné plyny mají za úkol chránit elektrodu a svarovou lázeň před oxidací okolním vzduchem, vytvářet vhodné podmínky pro zapálení a udržení oblouku, přenášet teplo do svaru a zároveň jej utvářet. Při TIG svařování se používá čistý argon nebo hélium a také směsi argonu a hélia, argonu s vodíkem a argonu s dusíkem. Argon je typický nízkou tepelnou vodivostí i ionizačním potenciálem, díky čemuž se s ním snadno zapaluje oblouk, který je i velmi stabilní. Dále je možné jej použít pro všechny svařitelné materiály, a i jeho cena je nízká. Hélium má oproti argonu vyšší tepelnou vodivost i ionizační potenciál, což způsobuje obtížnější zapalování oblouku a jeho horší stabilitu při větších délkách hoření. Vyšší tepelná vodivost je však výhodná pro svařování hliníku, mědi a jejich slitin o větších tloušťkách. Směsi argonu a hélia jsou využívány pro docílení vyšší rychlosti svařování a hloubky závaru nebo pro snížení nutného přehřevu u kovů s vysokou tepelnou vodivostí. Zvyšováním obsahu hélia ve směsi roste napětí na oblouku a jeho tepelný výkon. Směs argonu s vodíkem má obdobné vlastnosti jako směs argonu a hélia, avšak použití je možné pouze pro svařování vysoce legovaných austenitických a austeniticko-feritických CrNi ocelí, niklu a jeho slitin. U martenzitických a feritických CrNi ocelí způsobuje praskání. Přidáním vodíku dochází ke zlepšení tvaru a hloubky svaru a navýšení svařovací rychlosti. Směs argonu s dusíkem nachází uplatnění při svařování mědi a jejich slitin. Dusík vlivem vyšší tepelné vodivosti vnáší do svařovaného materiálu víc tepla.

Výhody metody TIG:

- Estetičnost svaru
- Minimální vývin jisker
- Lze svařovat tenké materiály,
- Lze svařovat s přídavným materiálem i bez
- Bez nároku na úpravu svaru po svařování
- Dobrá kontrola nad svarovou lázní

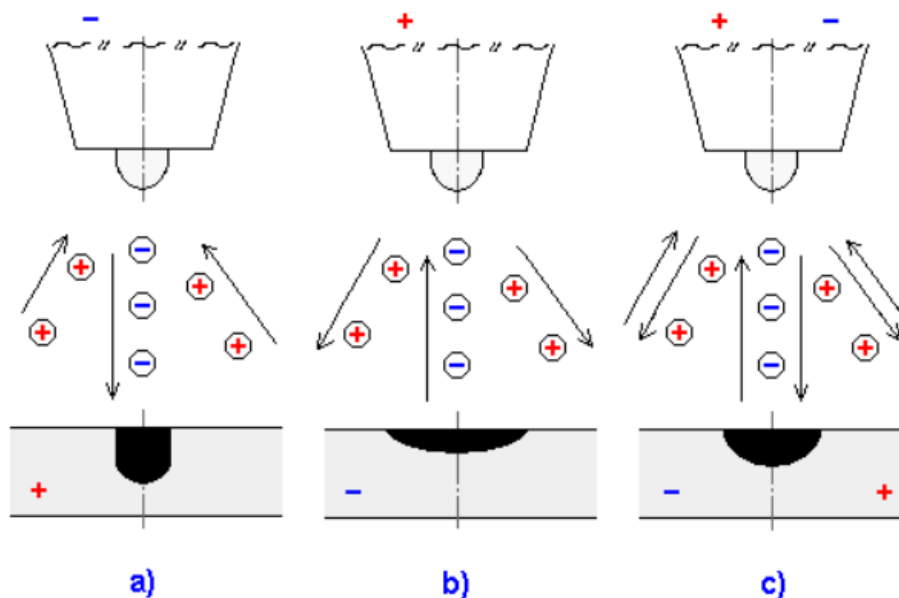
Nevýhody metody TIG:

- Dražší a technicky náročnější zařízení oproti jiným obloukovým metodám
- Malá produktivita z důvodu dlouhých svařovacích časů
- Vysoké nároky na schopnosti a zkušenosti svářeče

5.1 Druhy svařovacích proudů [14, 42, 48]

Při svařování stejnosměrným proudem se používá přímé zapojení, tedy elektroda je připojena k zápornému pólu zdroje a svařovaný materiál ke kladnému pólu. Při tomto zapojení proudí elektrony vlivem termické emise od elektrody k materiálu a kladně nabitě ionty od svařovaného materiálu k elektrodě vlivem elektrostatických sil, viz obr. 20. Standartně se používají elektrody s 2% příměsí thoria nebo s 2% příměsí ceria. Při této konfiguraci dochází k nerovnoměrnému rozdělení tepla oblouku, kdy cca 1/3 tepla připadá na elektrodu a zbylé 2/3 celkového tepla se vnáší do svařovaného materiálu. To má za následek, že nedochází k tepelnému přetěžování elektrody a dosahuje se velké hloubky průvaru. Hloubku průvaru také navyšují dopadající elektrony, kdy se jejich kinetická energie přeměňuje v teplo. Svařování stejnosměrným proudem je vhodné pro všechny druhy ocelí, pro litinu, měď, nikl, titan a jejich slitiny. Tento druh zapojení lze použít pro svařování hliníku pouze v případě použití jako ochranného plynu směsi argonu a hélia, přičemž hélium musí být alespoň 75 %. Díky vysoké tepelné vodivosti hélia se do svarové lázně dodává velké množství tepla, díky čemuž dojde i k roztavení povrchových oxidů, které se poté vyplavují na okraj taveniny a zanechávají střed svarové lázně čistý. Nepřímé zapojení není příliš využívané, neboť při něm dochází k přílišnému tepelnému namáhání elektrody, lze jej však ve výjimečných případech použít pro tenkostěnné hliníkové svařence a za nízkého proudu.

Svařování střídavým proudem nachází kvůli čistícímu účinku uplatnění ve svařování zejména hliníku, hořčíku a jejich slitin. Povrch hliníku je pokryt vrstvou oxidu hlinitého, který zamezuje další oxidaci, ale je také překážkou při svařování. Oxidická vrstva Al_2O_3 se taví při $2050\text{ }^\circ\text{C}$ a v případě použití stejnosměrného proudu zabraňuje metalurgickému spojení tím, že pokrývá povrch roztaveného hliníku, který se taví již při $658\text{ }^\circ\text{C}$. Čistícího účinku se dosahuje připojením elektrody ke kladnému pólu zdroje a probíhá dvěma způsoby. V prvním případě se na základním materiálu vytváří nestabilní katodová skvrna, přemísťující se na místa pokrytá největší oxidickou vrstvou, která mají zároveň nejnižší emisní energii pro emisi elektronů a zásahem katodovou skvrnou se oxidy snáz odpaří. Druhý typ účinku vzniká rozpadem argonu na kladné ionty a elektrony. Proud urychlených a relativně těžkých kladných iontů napomáhá dynamickým účinkem rozbít oxidickou vrstvu a stahovat ji k okraji svarové lázně. Při připojení elektrody ke kladnému pólu se dosahuje pouze malého závaru. Hloubku lze zvýšit záporným zapojením, kdy do svarové lázně dopadají urychlené elektrony. Je však třeba brát v potaz zmíněné nevýhody tohoto typu zapojení.

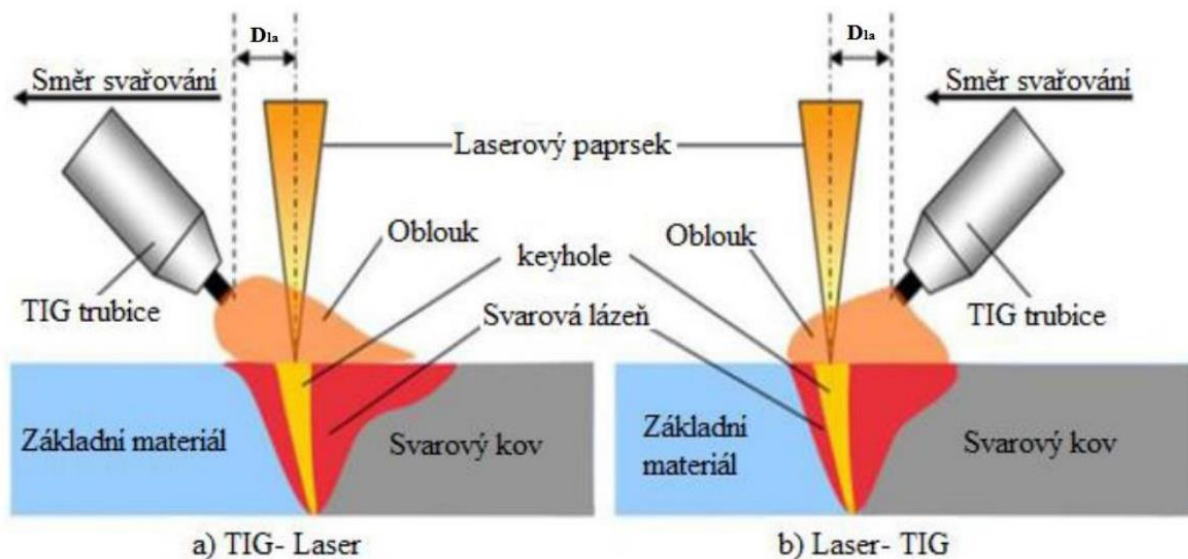


Obr. 20 Přímá polarita (a), nepřímá polarita (b), střídání polarity (c) [48]

Posledním druhem je svařování impulzním proudem, při kterém se intenzita proudu mění pravidelně v závislosti na čase mezi dvěma proudovými hladinami, což jsou základní a impulzní proud. Zapojení elektrody se nemění. Základní proud má nízkou hodnotu a slouží pouze pro ionizaci oblouku. Nastavením doby základního proudu lze vytvořit podmínky vhodné pro svařování vysokolegovaných ocelí, nebo pro vytvoření hladkého svaru s plynulým přechodem do základního materiálu. Impulzní proud má za úkol tavení svarové lázně a přídavného materiálu. Velikost lázně je závislá na amplitudě proudu a době pulzu. Při impulzním svařování je průměrná hodnota proudu nižší než při svařování s konstantním proudem a z toho důvodu je výsledná tepelně ovlivněná oblast menší a dosahuje se lepších plastických vlastností, nižší náchylnosti k praskání a menších deformací. Mezi další výhody impulzního svařování se řadí možnost svařovat tenké plechy a materiály citlivé na přehřátí.

6 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ LASER-TIG [3, 20, 21]

Jedná se o kombinovanou technologii svařování pomocí laseru a elektrického oblouku. Kombinace těchto technologií má za účel vykompenzovat nevýhody dílčích metod. Vzhledem k hluboké penetrační schopnosti a vysoké energetické hustotě se laser zpravidla používá jako primární zdroj při hybridním svařování a elektrický oblouk plní funkci předehřevu nebo dohřevu. Používají se dvě konfigurace soustavy, viz obr. 21.



Obr. 21 Konfigurace soustavy Laser-TIG [3]

V první konfiguraci (a) elektrický oblouk předchází laserový paprsek, kdy je svařovaný materiál obloukem předehřán předtím, než se dostane do kontaktu s laserovým svazkem. Zvýšená teplota materiálu zlepšuje absorpci záření, což zvyšuje účinnost přenosu energie z laseru do materiálu a umožňuje hlubší průvar. Tuto konfiguraci lze s výhodou použít při svařování pozinkované oceli, kdy TIG pomáhá odpařit zinkový povlak ze svarového místa před samotným natavením svařovaných materiálů a tím se vyhnout vzniku dutin a pórů vznikajících při samotném laserovém svařování pozinkovaných dílců.

V druhé konfiguraci (b) je TIG hořák z hlediska směru svařování umístěn za laser a plní funkci dohřevu. Dodatečným vneseným teplem elektrickým obloukem se snižuje ochlazovací rychlost svarové lázně, což je důležité například při svařování ocelí s vyšším obsahem uhlíku, u nichž je nutné zabránit zakalení svarového kovu.

Výhody technologie Laser-TIG:

- ❖ Stabilní svařovací proces a vysoká rychlost svařování
- ❖ Vyšší účinnost díky zlepšené absorpci
- ❖ Velké množství procesních parametrů umožňující širokou škálu použití
- ❖ Malá tepelně ovlivněná oblast
- ❖ Možnost svařování bez i s přídavným materiálem

Nevýhody technologie Laser-TIG

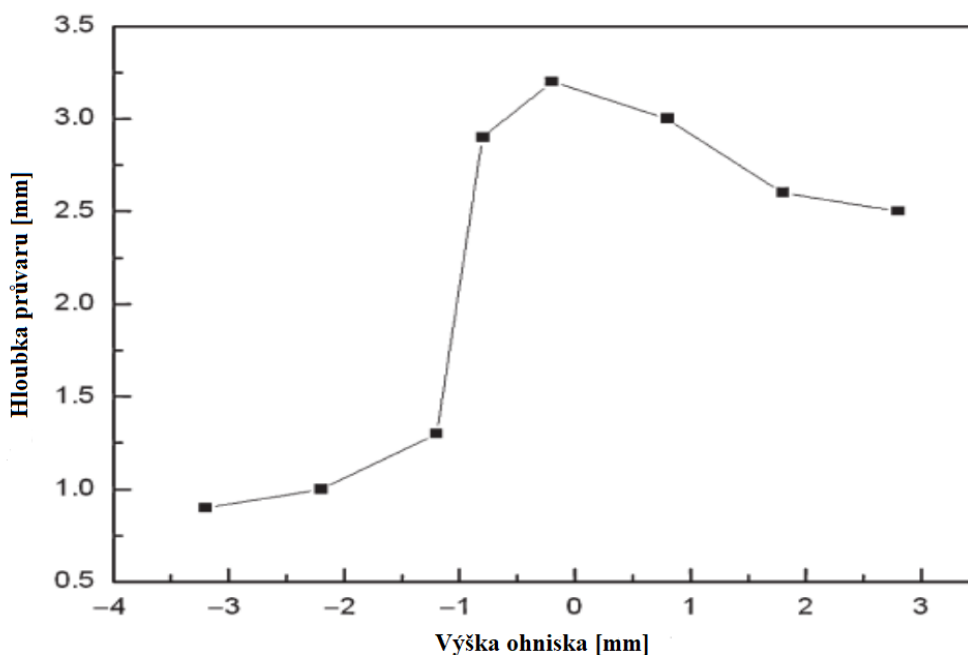
- Značné pořizovací náklady (kvůli laseru)
- Složitě nastavování svařovacího procesu kvůli velkému množství svařovacích parametrů

6.1 Procesní parametry při svařování Laser-TIG [20, 21]

Díky kombinaci dvou metod, je počet svařovacích parametrů oproti ostatním metodám vyšší. Nárůst počtu parametrů je někdy považován za nevýhodu, neboť značně komplikuje nastavení zařízení pro docílení kvalitních svarů. Mezi procesní parametry se řadí například:

❖ Výška ohniska

Charakterizuje polohu ohniska oproti svařovanému materiálu. Ovlivňuje energetickou hustotu laserového svazku a tím i hloubku průvaru. Poloha ohniska při metodě Laser-TIG se oproti laserovému svařování liší. Dynamický tlak oblouku tlačí na svarovou lázeň a způsobuje její konkávnost, díky čemuž je poloha ohniska posunuta hlouběji do materiálu. Z obrázku č. 22 vyplývá, že optimální poloha ohniska leží v intervalu od -0,8 mm do 0,8 mm, kdy se dosahuje největších hloubek průvaru. [20]



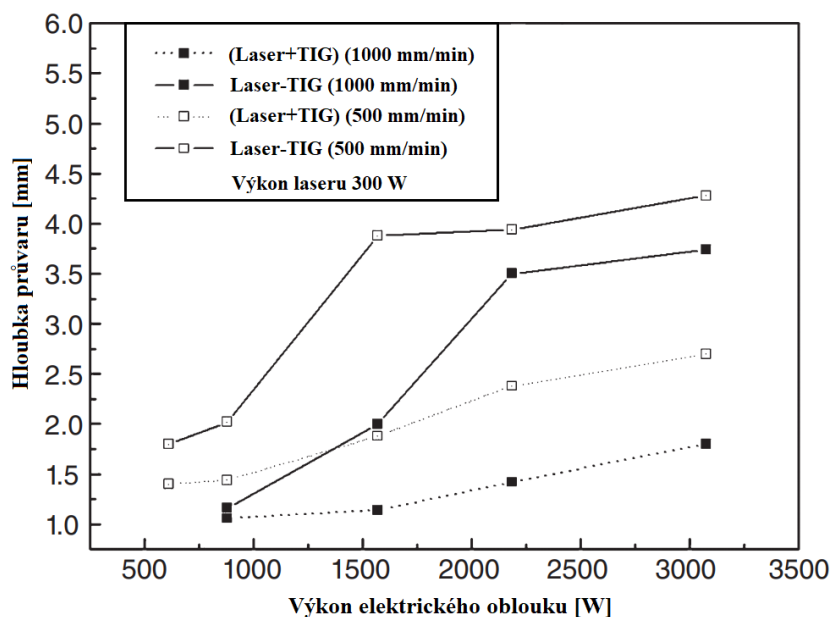
Obr. 22 Závislost hloubky průvaru na výšce ohniska [20]

❖ Vzdálenost mezi laserovým svazkem a obloukem

Je označována zkratkou D_{LA} , viz obr. 21, a jedná se o jeden z nejdůležitějších parametrů hybridního svařování. Ovlivňuje geometrii svaru a hloubku průvaru, která roste se snižující se vzdáleností mezi svazkem a obloukem. Je však třeba počítat s tím, že při přílišném přiblížení dochází ke spalování wolframové elektrody laserovým svazkem, což vede ke ztrátě stability a vzniku vad, jako jsou rozstřík a wolframové vměstky.

❖ Výkon a proud oblouku

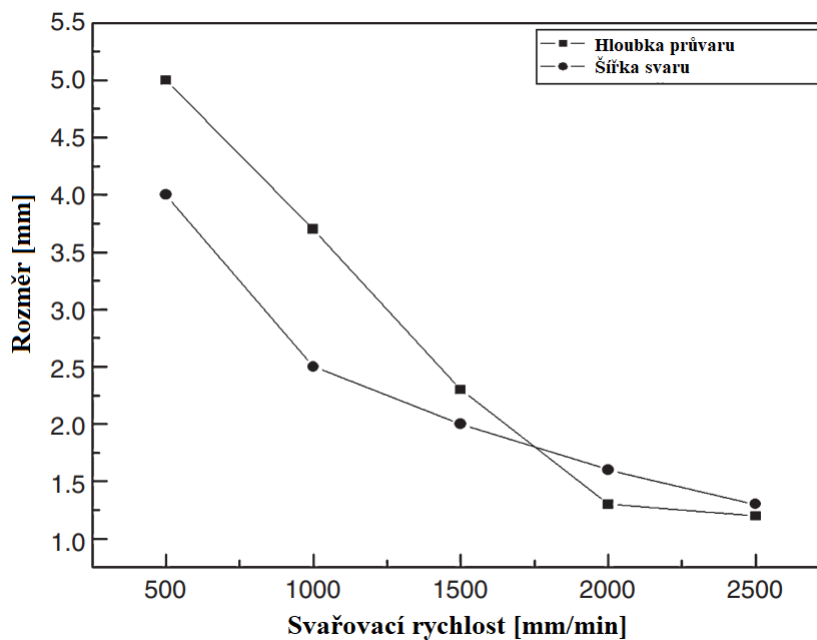
Jedná se o důležité parametry, které mají zásadní vliv na konečnou kvalitu svaru a hloubku průvaru. Metodou Laser-TIG se dosahuje až dvojnásobné hloubky průvaru než součet hloubek průvaru dílčích metod samostatně, viz obr. 23.



Obr. 23 Závislost hloubky průvaru na výkonu el. oblouku [20]

❖ Svařovací rychlost

Jedná se o parametr, od kterého se přímo odvíjí čas potřebný pro uskutečnění svařovacího procesu, který má zásadní vliv na ekonomičnost. V praxi je tedy snaha používat nejvyšší možnou svařovací rychlost, při které se ještě stále docílí kvalitního svaru. Ovlivňuje také hloubku a šířku svaru. S rostoucí svařovací rychlostí hloubka a šířka svaru rapidně klesá, viz obr. 24. To je způsobeno menším množstvím vneseného tepla do svařovaného materiálu.



Obr. 24 Závislost hloubky a šířky svaru na svařovací rychlosti [20]

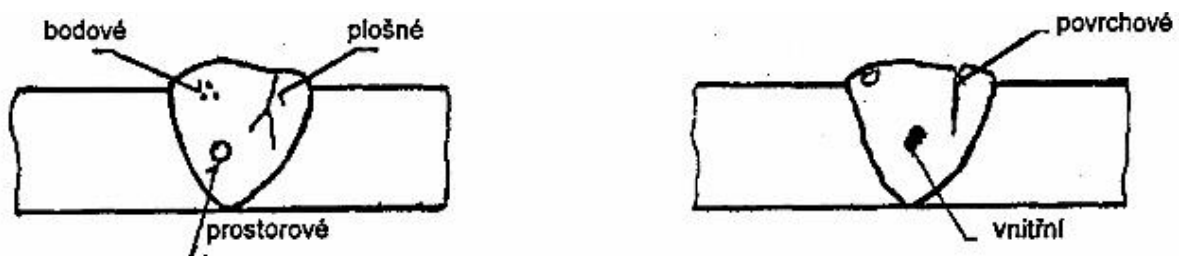
7 VADY SVARŮ [49–55]

Zásadními požadavky na výrobek je bezpečný provoz, spolehlivost a životnost. Jako bezpečný je klasifikován výrobek bez vad nebo v míře přípustnosti vad, které neohrožují funkci a bezpečnost užívání.

Vada výrobky představuje každou odchylku vlastností, jež jsou předepsány technickými normami, technickými podmínkami nebo smluvním vzorkem. Svarové vady mohou být zjištělné jednak pouhým okem či jednoduchými pomůckami nebo skryté, které se odhalují použitím patřičných přístrojů a laboratorních zkoušek.

Vady mohou být přípustné, nepřípustné, opravitelné a neopravitelné. Vady přípustné jsou normami, technickými podmínkami či smluvním vzorkem dovoleny a nemusí být odstraněny. Vady nepřípustné nesplňují dané požadavky a jsou buď odstranitelné, nebo neodstranitelné a svařenec je tedy neshodný kus.

Svarové vady se rozdělují podle tvaru a polohy výskytu, viz obr. 25. Podle tvaru se vady dělí na bodové, plošné a prostorové. Mezi bodové vady se řadí mikropóry a malé sférické vměstky, mezi plošné vady trhliny, neprůvazy a studené spoje. Do prostorových vad spadají zejména vady typu plynových dutin (póry, bubliny), vměstky (tavidlové, struskové, oxidické a kovové), staženiny (mezidendritické, kráterové), zápaly a nedodržení geometrie. Podle polohy se vady dělí na povrchové a vnitřní. Mezi povrchové vady se řadí trhliny, studené spoje na svarové ploše, neprovařený kořen, zápaly a póry. Do vnitřních vad se zařazují plynové dutiny, bubliny, vměstky a staženiny.



Obr. 25 Typy vad dle tvaru a polohy [49]

❖ Trhliny

Při obloukovém svařování je vznik trhlín obecně ovlivněn těmito faktory:

- Nevhodná kombinace přídavného a základního materiálu
- Velká vnitřní pnutí
- Neúplné zalití koncového kráteru přídavným materiálem
- Přílišná rychlost odvodu tepla z místa svaru
- Nesplnění předepsaného tepelného režimu (předehřev, dohřev, řízené ochlazování, tepelné zpracování)

Trhliny se rozlišují na:

➤ Studené trhliny

Také nazývané vodíkem indukované trhliny nebo zpožděné trhliny. Jsou typické pro feritické a martenzitické oceli. Studené trhliny vznikají v případech, kdy byla svarová lázeň kontaminována vodíkem, buď z okolní atmosféry kvůli nedostatečné plynové ochraně, nečistotám na svarových plochách, anebo z vlhkosti. Tvoří se během chladnutí svarového kovu za teploty pod 300 °C, ale mohou se také objevit i několik hodin po dokončení svařování. Vznik studených trhlín také podporuje zvýšená míra zbytkových pnutí ve svaru. Hlavním místem výskytu je tepelně ovlivněná oblast s hrubým zrnem. Příklad studené trhliny je uveden na obrázku č. 26.



Obr. 26 Studená trhlina [49]

➤ Horké trhliny

Horké trhliny vznikají ve svarovém kovu nebo tepelně ovlivněné oblasti a vyskytují se převážně v korozivzdorných austenitických ocelích a jejich příklad je znázorněn na obrázku č. 27. Příčinou jejich vzniku jsou sloučeniny síry a fosforu se železem, jejichž bod tavení je nižší než zbytku materiálu a při jejich chladnutí dochází ke vzniku zbytkových napětí a porušení krystalové mřížky. Před svařováním je vhodné zajistit, aby povrch svařovaných dílů nebyl pokryt okujemi a mastnotou, neboť tyto nečistoty mohou mít vysoký obsah síry. Horké trhliny se dále rozlišují v závislosti na umístění a způsobu výskytu na krystalizační a likvační.



Obr. 27 Horká trhlina [49]

➤ Kráterové trhliny

Ke vzniku kráterových trhlín dochází při náhlém ukončení svařování a nedostatečném zalití koncového kráteru přidavným materiálem. Vznikají v dutině kráteru a jsou způsobeny objemovým smršťováním směrem do středu během tuhnutí svaru. Tím se indukuje napětí, které vede ke vzniku trhliny.

❖ Neprůvary

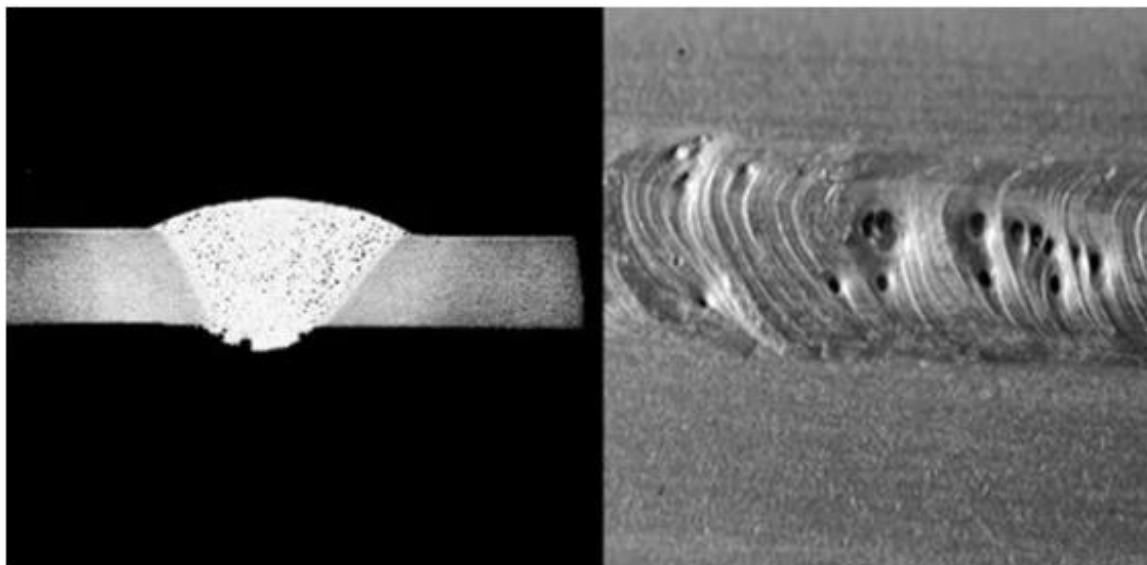
Neprůvar je typ vady vzniklý nedostatečným natavením svařovaného materiálu, případně předchozích svarových housenek při vícevrstevném svařování. Typicky k němu dochází při svařování metodou MIG nebo MAG při zkratovém režimu. Faktory vzniku neprůvarů jsou: přílišná svařovací rychlost, nízká hodnota svařovacího proudu, nevhodné úkosování, předběhnutí svarové lázně, nadměrná výška housenky, nadměrný průměr přídavného materiálu a malá mezera v kořeni svaru.

❖ Studené spoje

Studený spoj je důsledkem nedokonalého tavného spojení svarového kovu a základního materiálu nebo již navařené housenky. Studený spoj je způsoben vysokou svařovací rychlostí, nízkou hodnotou svařovacího proudu, nečistotami svarových ploch nebo přídavného materiálu, chybné vedení elektrody a nedostatečný průměr přídavného materiálu.

❖ Póry a bubliny

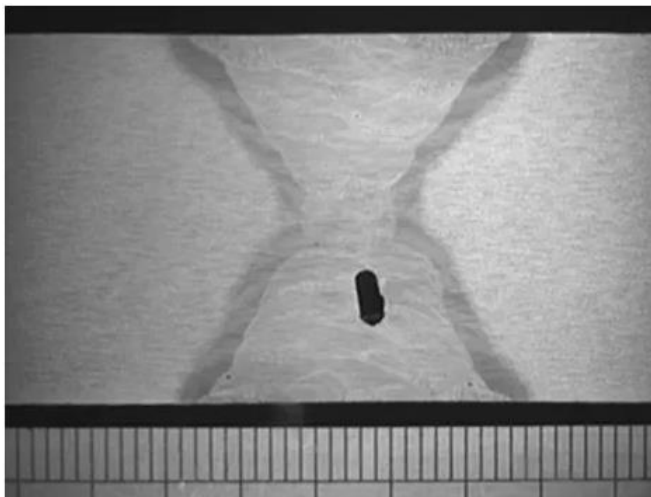
Pórovitost je typickým příkladem diskontinuity při svařování. Dochází k ní, když je během svařování ve svarové lázni uvězněno velké množství molekul plynu. Tyto plyny mohou pocházet z vlhké elektrody, neboť molekuly vody se svařovacím teplem rozloží, což má za následek zachycení kyslíku ve svarovém kovu. Významným faktorem přispívajícím ke vzniku pórů a bublin jsou povětrnostní podmínky. Vítr narušuje ochrannou atmosféru kolem oblouku a umožňuje vniknutí plynů do roztaveného kovu. Příčiny vzniku pórovitosti jsou: vzduch zachycený v ochranném plynu, vlhký obal elektrody, přílišná délka oblouku, vysoký průtok ochranného plynu způsobující turbulence, nečistoty a rychlé tuhnutí svarového kovu díky nízké hodnotě proudu a vysoké svařovací rychlosti. Příklad pórů je na obrázku č. 28.



Obr. 28 Svarové póry [55]

❖ Vměstky

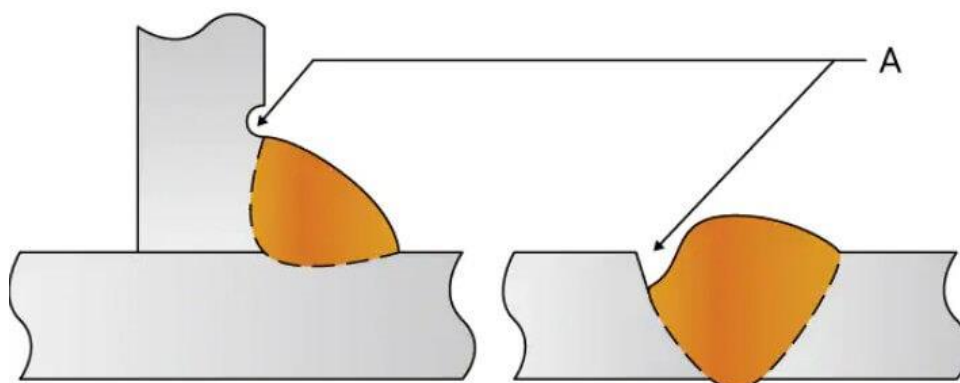
Vměstky jsou dalším typickým příkladem diskontinuit, vznikajících při svařování. Rozlišují se tyto typy vměstků: struskové, oxidické, tavidlové a kovové. Struskové vměstky vznikají, když je struska (ochranná vrstva, která má vystoupat na povrch a chránit svarovou lázeň) uvězněna mezi jednotlivými svařovanými vrstvami. Další příčinou je struska předbíhající oblouk nebo když je svarová housenka nevhodně kladena. Příčinou oxidických vměstků je převážně nedostatečné očištění povrchu svařovaných materiálů od nečistot, jako jsou rez nebo okuje. Často se setkáváme s oxidickými vměstky při svařování hliníku a horčíku, jejichž oxidy vytváří na povrchu tenkou oxidickou vrstvu s vysokým bodem tání. Vznik kovových vměstků je zapříčiněn: vysokými svařovacími proudy, kontaktem elektrody se svarovou lázní, nesprávným typem a průměrem elektrody, případně narušením ochranné atmosféry. Typickým kovovým vměstkem je wolframový vměstek, viz obr. 29, vzniklý při svařování metodou TIG.



Obr. 29 Struskový vměstek [55]

❖ Zápaly

Zápal je spolu s vměstky a pórovitostí jednou z nejčastějších vad při svařování a řadí se mezi povrchové vady. Jedná se o natavená ostrá prohloubení na rozhraní svarové housenky a základního materiálu, viz obr. 30. Obvyklý výskyt je u koutových svarů. Zápaly jsou způsobeny špatnou manipulací s hořákem (nesprávným naklopením hořáku či elektrody), kdy dojde k natavení kraje lázně bez jejího správného zaplnění. Dále pak příliš velkým svařovacím proudem, příliš dlouhým obloukem a nevhodně zvoleným průměrem přídavného materiálu. Zápaly mohou být iniciátory vzniku trhlin, ale naštěstí je lze snadno rozpoznat pouhým okem.



Obr. 30 Zápaly [55]

8 ZKOUŠKY SVARŮ [32, 56–60]

Požadavek bezpečnosti a spolehlivosti na vyrobené součásti úzce souvisí s kontrolou použitých materiálů a jejich svarových spojů. Pro ověření požadovaných vlastností se používají standardizované zkoušky, které se dělí na nedestruktivní a destruktivní. Nedestruktivní zkoušky jsou finančně náročné na koupi přístrojů, školení personálu, provoz, servis a kalibraci. Nedochozí při nich k porušení vzorků. Naopak je tomu u destruktivních zkoušek, které jsou využívány v sériové výrobě při stanovení svařovacích postupů. Slouží pro stanovení pevnostních limitů konstrukce.

Nedestruktivní zkoušky:

- Vizuální kontrola
- Zkouška prozářením
- Zkouška ultrazvukem
- Zkouška magnetická prášková
- Zkouška kapilární

Destruktivní zkoušky:

- Zkouška tahem
- Zkouška lámavosti
- Zkouška rázem v ohybu
- Zkouška tvrdosti
- Zkouška makro a mikrostruktury

❖ Vizuální kontrola

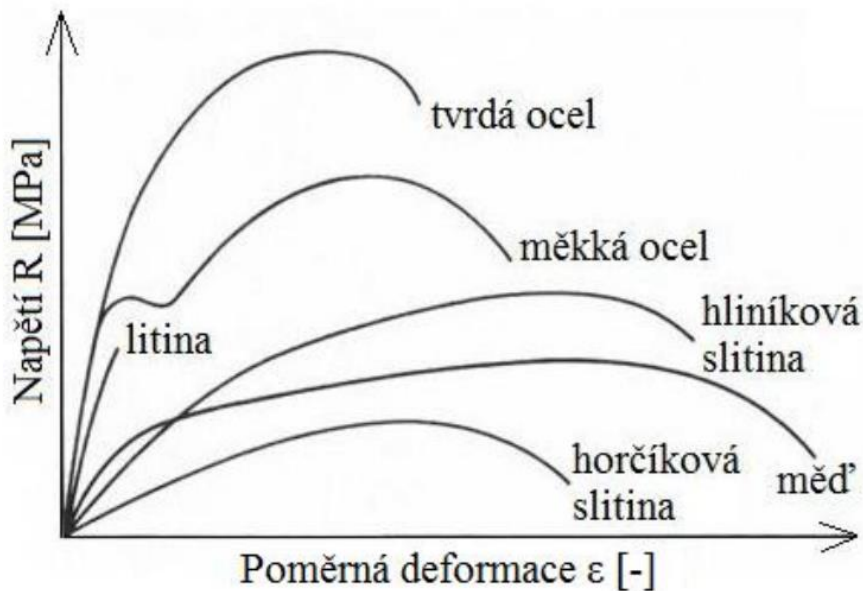
Jde o nejjednodušší, nejdostupnější a nejlevnější defektoskopickou zkoušku, při které se pouhým okem nebo za pomoci optických přístrojů s pouze několikanásobným zvětšením odhalují povrchové vady. Vlastní zkouška se řídí normou ČSN EN ISO 17637. Na základě přístupnosti ke zkoumanému povrchu se dělí na přímou (Pozorování přímo pouhým okem či lupou.) a nepřímou vizuální kontrolu, při které se používají optické přístroje např. endoskopy pro zkoumání vnitřních povrchů dutých předmětů. Pro správné vyhodnocení je důležité, aby pracovník provádějící vizuální kontrolu disponoval dobrým zrakem a pracoviště bylo adekvátně osvětleno.

❖ Příčná zkouška tahem

Zkouška se používá pro ověření pevnostních a plastických charakteristik zkoušených materiálů. Jako zkušební vzorky se používají normalizované tyče s kruhovým průřezem a pro zkoušení plechů ploché tyče. Na obou stranách zkušební tyče je zhotovena hlava pro ukotvení v trhacím stroji. Pro testování svarů jsou vzorky odebírány příčně ze svarového spoje tak, že osa svaru se nachází uprostřed délky zkušební tyče. Rozměry, způsob odběru a opracování zkušebních tyčí jsou stanoveny v normě ČSN EN ISO 4136. Vlastní tahovou zkoušku a její výsledky řeší norma ČSN EN ISO 6892-1.

Během zkoušky se zkušební tyč v trhacím stroji za předepsaných podmínek (teplota, rychlost deformace) natahuje mezi dvěma příčníky zvětšující se silou až do jejího porušení. Výsledkem tahové zkoušky je smluvní tahový diagram, vyjadřující závislost zatížení na poměrném prodloužení a z jeho průběhu se získávají následující charakteristické údaje: platnost Hookova zákona, mez kluzu R_e [MPa], mez pevnosti R_m [MPa], tažnost A [%] a kontrakce Z [%]. U některých kovových materiálů (např. měkká ocel) lze sledovat odlišnosti, kterými je horní a dolní mez kluzu. Oproti tomu vysoce pevné materiály vykazují nevýraznou mez kluzu, kdy zatížení po lineárním průběhu (Hookův zákon) pokračuje parabolickým zpevněním k mezi pevnosti, viz obr. 31. Z praktických důvodů byla stanovena tzv. smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, která se určuje pomocí průsečíku rovnoběžky s lineárním průběhem zatížení-deformace ve vzdálenosti 0,2 % z celkové deformace naměřené při tahové zkoušce a považuje se za rovnocenný ekvivalent reálné meze kluzu.

V případě testování svarových spojů je ve většině případů směr zatěžování kolmý k podélné ose svaru. Z důvodu heterogenity svarových spojů se zkouška považuje za informativní a je nutné přísně definovat místo tvorby krčku nebo lomu na zkušební tyči. Většinou se tedy u svarových spojů vyhodnocuje pouze mez pevnosti R_m .



Obr. 31 Tahové diagramy kovových materiálů [32]

❖ Zkouška makrostruktury

Makrostrukturní zkoušky lze provádět pozorováním pouhým okem, lupou nebo optickým mikroskopem za maximálně třicetinasobného zvětšení. U svarových spojů se se po vybroušení, vyleštění a případně naleptání povrchu vzorku hodnotí tvar svaru, způsob kladení svarových housenek, odmíšení svarového kovu, tvar, šířka a charakter tepelně ovlivněné oblasti, hranice natavení apod. Makrostrukturní zkoušky se dále dělí na:

○ Baumannův otisk

Jedná se o kvalitativní zkoušku sloužící pro stanovení charakteru rozložení síry v ocelích a litinách s hmotnostním obsahem síry od 0,005 % do 0,4 %. Podstatou zkoušky je chemická reakce mezi sulfidickými vměstkami, nacházejícími se v rovině výbrusu a fotografickým bromostříbrným papírem navlhčeným většinou ve zředěném roztoku kyseliny sírové. Vzorky se z materiálu odebírají buď v příčném nebo podélném směru a jejich povrch musí být řádně vybroušen a zbaven nečistot, okují a mastnoty. Baumannovy otisky se používají jako doplněk k makroleptům při kontrole kvality výroby a analýze vad. Zkouška probíhá za pokojové teploty. Z důvodu nedostatečného zobrazení nelze zkoušku provádět pro materiály s nižším hmotnostním obsahem síry než 0,005 %.

○ Makrolept

Makrolept se používá pro určení charakteru makrostruktury příslušného výbrusu vzorku. U ocelí lze tímto způsobem analyzovat primární krystalizaci, důvody vzniku trhlin, rozložení prvků a nečistot v oceli, tvar a velikost licích zrn a kvalitu svarového spoje. Povrch vzorku nesmí být při odběru tepelně ovlivněn a je nutné jej vybrousit, respektive vylestit a odstranit nečistoty a mastnotu. Vyvolání makrostruktury je docíleno leptáním ve vodných roztocích silných kyselin. Následuje oplach a vysušení vzorku proudem vzduchu.

9 EXPERIMENT

Cílem praktické části této práce je ověření, zda je možné při průvarovém svařování hybridní metodou Laser-TIG eliminovat vady, které vznikají při laserovém svařování pozinkovaných plechů. Budou zde popsány použité přístroje, příprava vzorků a měření tloušťky zinkové vrstvy, svařovací proces, výpočty vneseného tepla a vyhodnocení svarů zkouškami. Experiment probíhal na Ústavu přístrojové techniky v Brně.

9.1 Příprava vzorků a měření tloušťky zinkové vrstvy [61, 62]

Vyhodnocovanými vzorky byly dvě sady nastříhaných plechů o rozměrech 140x130 mm. Jedna sada byla vyrobena z oceli DC01 (Hlubokotažná ocel válcovaná za studena k tváření za studena se zaručenou svařitelností.) o tloušťce 1 mm (žárově pozinkované plechy), druhá z oceli WSS M1A 365-A14 50G (Extra hlubokotažná ocel s povrchovou vrstvou zinku. 50G značí gramáž zinku 50 g/mm².) o tloušťce 0,9 mm (galvanicky pozinkované plechy). Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli DC01 jsou v tabulkách č. 2 a 3 a oceli WSS M1A 365-A14 50G v tabulkách č. 4 a 5. Před svařováním byly vzorky zbaveny mastnoty a jiných nečistot pomocí technického benzínu.

Tab. 2 Chemické složení oceli DC01.[61]

Chemické složení [%]			
C _{max}	Mn _{max}	P _{max}	S _{max}
0,12	0,60	0,045	0,045

Tab. 3 mechanické vlastnosti oceli DC01.[61]

Mechanické vlastnosti				
Stav	Značka	Mez kluzu R _e [MPa]	Mez pevnosti v tahu R _m [MPa]	Tažnost A ₈₀ min. [%]
žíhaná	A	-	270-390	28
lehce převálcovaná	LC	max. 280	270-420	28
zpevněná za studena	C290	200–380	290-430	18
	C340	min. 250	340-490	-
	C390	min. 310	390-540	-
	C440	min. 360	440-590	-
	C490	min. 420	490-640	-
	C590	min. 520	590-740	-
C690	min. 630	min. 690	-	

Tab. 4 Chemické složení oceli WSS M1A 365-A14. [62]

Chemické složení [%]							
C	Mn	P	S	Si	Al	Ti	Nb
0,008	0,30	0,025	0,020	0,03	0,08	0,09	0,035

Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli WSS M1A 365-A14. [62]

Mechanické vlastnosti					
Mez kluzu R _e [MPa]	Mez pevnosti R _m [MPa]	Tažnost A ₈₀ min. [%]	r ₉₀ min.	r _{avg} min.	n ₉₀ min.
140-180	270-330	40	1,90	1,60	0,20

Pro měření zinkové vrstvy byl použit tloušťkoměr povlaků PosiTector 6000 s přesností na desetinu mikrometru. PosiTector 6000 disponuje pamětí, do které zapisuje naměřené hodnoty, z nichž vypočítá průměrnou hodnotu a směrodatnou odchylku měření. Pro každý typ zinkování byly vybrány tři plechy a na každém z nich bylo provedeno deset měření.

Byly naměřeny následující hodnoty (tab. 6 a 7):

Tab. 6 Tloušťka povlaku galvanicky pozinkovaných vzorků.

Galvanicky pozinkované vzorky										
Vzorek č.	Tloušťka povlaku [μm]									
1	5,8	5,5	5,3	4,8	6,0	7,0	8,2	5,0	4,0	6,8
2	5,8	6,0	5,3	5,6	5,4	6,2	5,2	5,1	6,5	7,1
3	5,1	3,4	6,8	5,4	6,5	5,2	5,8	8,1	6,3	4,7

Tab. 7 Tloušťka povlaku žárově pozinkovaných vzorků.

Žárově pozinkované vzorky										
Vzorek č.	Tloušťka povlaku [μm]									
1	23,1	21,4	21,4	19,3	19,6	20,9	20,0	20,5	20,6	20,7
2	21,8	20,6	20,0	22,6	19,1	20,1	21,1	21,0	19,6	20,7
3	22,0	21,5	24,0	20,7	19,2	22,0	21,8	19,9	20,7	20,3

Na obrázku č. 32 jsou vidět souhrny naměřených hodnot tloušťek zinkových povlaků pomocí tloušťkoměru PosiTector 6000, z nichž vyplývá, že průměrná hodnota všech třiceti naměřených tloušťek galvanického povlaku je 5,79 μm a směrodatná odchylka 1,05 μm . U žárově pozinkovaných plechů činila průměrná tloušťka povlaku 20,87 μm a směrodatná odchylka 1,15 μm .



Obr. 32 Tloušťky povlaku zinky pro galvanický povlak (vlevo) a žárový (vpravo)

9.2 Svařovací zařízení [63–66]

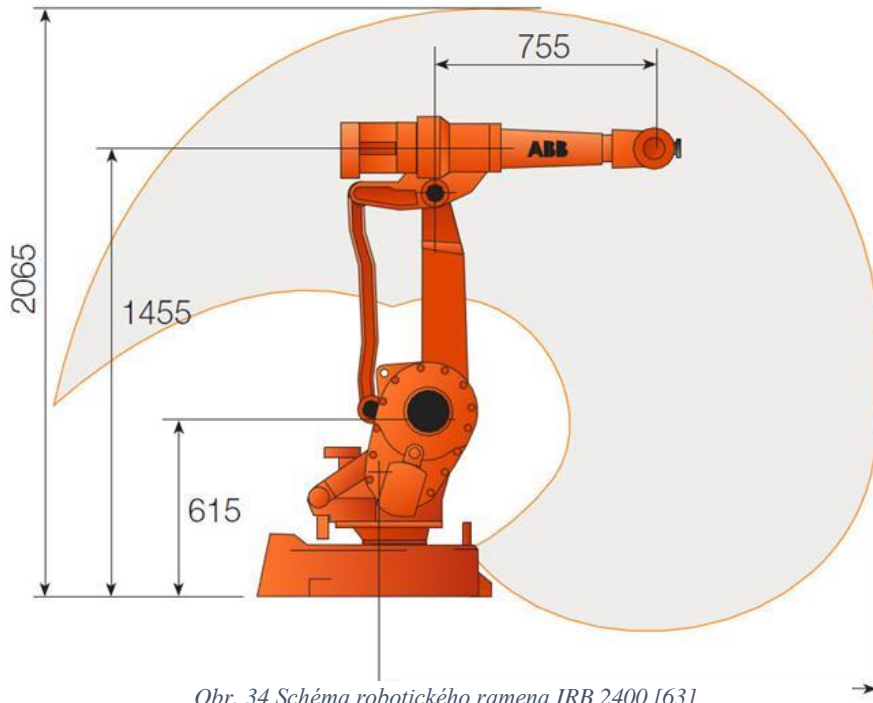
❖ Ytterbium Laser System YLS – 2000

Jedná se o vláknový výkonový laser vyráběný firmou IPG, viz obr. 33, který disponuje výkonem 2000 W na vlnové délce 1070 nm a hlavami pro konkrétní aplikace. Pomocí svařovací hlavy Precitec YW 30 lze provádět svařování kovů a transmisní svařování plastů do maximální hloubky 5 mm. Hlava Arges Rhino 31 slouží pro skenerové svařování s pracovní plochou o rozměrech 205x205 mm a pro značení povrchů kovů. Pomocí řezací hlavy Precitec YRC100 lze provádět dělení kovů a plastů v trojrozměrném prostoru do maximální tloušťky 5 mm. Přesné polohování hlav v prostoru je realizováno pomocí robotického ramene IRB 2400, viz obr. 34, vyráběného firmou ABB, jehož manipulační rozsah činí cca 1600 mm. K dispozici je dále synchronní dvouosé polohovadlo IRBP 250 s nosností 200 kg, na které lze díly taktéž upevnit. Je umožněn import a práce s modely ve formátu



Obr. 33 Laser YLS - 2000

SolidWorks. Sestava dále nabízí možnost zkoumání procesů HS kamerou, infračervenou kamerou FLIR A310 a diagnostikou plazmatu.



Obr. 34 Schéma robotického ramena IRB 2400 [63]

❖ Svařovací TIG zdroj MagicWave 1700 Job

Jedná se o plně digitalizovaný svařovací TIG zdroj vyráběný firmou Fronius, viz obr. 35. Vyznačuje se robustní a současně kompaktní konstrukcí se snadnou transportovatelností (hmotnost 15 kg). Zdroj je napájen ze sítě o napětí 230 V a rozsah pracovního napětí činí 10,1-26,0 V. Lze s ním svařovat hliník a jeho slitiny, barevné kovy, nízkolegované a vysokolegované oceli. Varianta Job disponuje také svařovacími programy. Svařovat lze stejnosměrným i střídavým proudem s maximální hodnotou 170 A při dovoleném zatížení 35 %, 130 A při zatížení 60 % a 100 A při zatížení 100 %. To vše platí pro dobu 10 minut a při teplotě 40 °C. Zdroj je možné ovládat dálkově, což jej činí vhodným pro robotické svařování. Oblouk lze zapalovat dotykem nebo vysokofrekvenčně. Při použití dvou zdrojů umožňuje synchronizované oboustranné současné svařování, což přináší značnou úsporu času při svařování tlustých plechů.

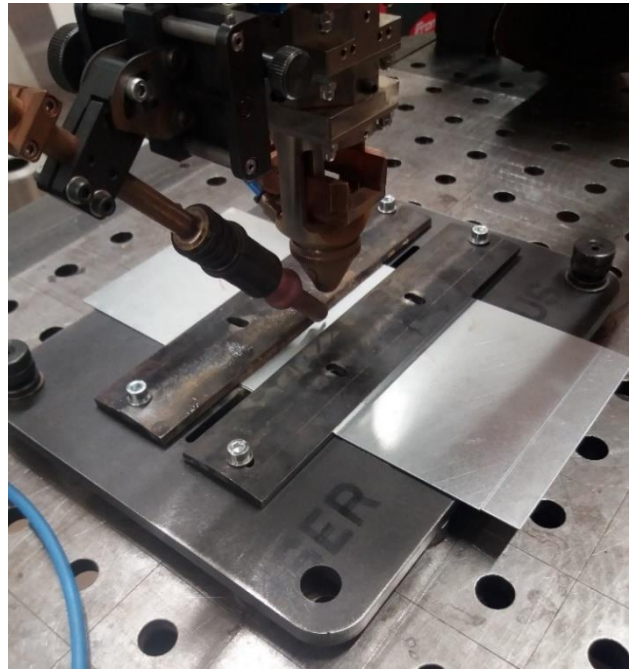


Obr. 35 Svařovací TIG zdroj MagicWave 1700 Job [65]

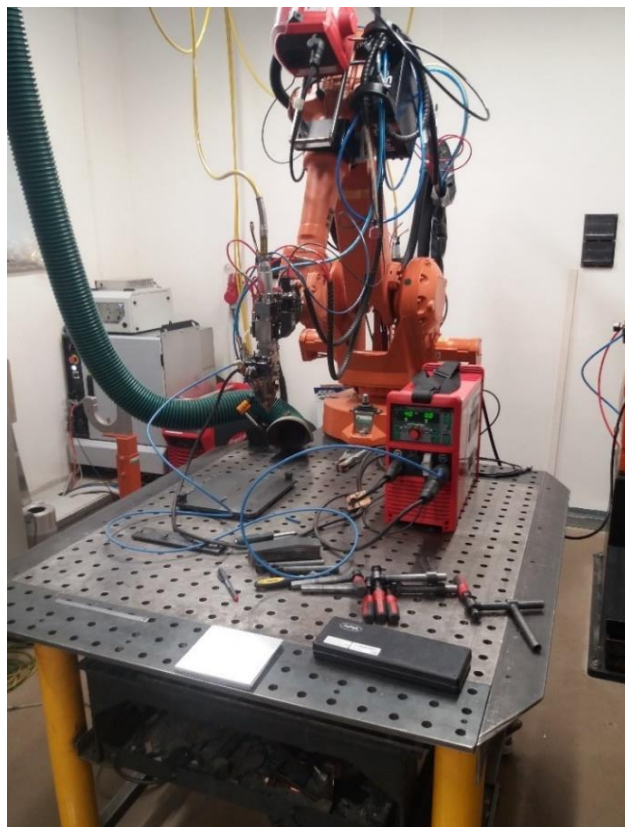
9.3 Proces svařování

Dvojice odmaštěných plechů byla přeložena částí přes sebe a zajištěna proti pohybu pomocí plechových upínek. Vzhledem k tomu, že se jednalo o přeplátovaný spoj, bylo nutné výškový rozdíl mezi plechy vykompenzovat podložním horního plechu dalším plechem o stejné tloušťce. Svařované plechy byly vloženy pod upínky tak, že každý plech byl přitisknut oběma upínkami, viz obr. 36, díky čemuž se zamezilo deformacím při tuhnutí svarové lázně. Lze však díky tomu očekávat vnesení většího napětí do materiálu, které bylo jinak zmírněno deformací svařence.

Pro každý typ zinkového povlaku byly zhotoveny čtyři svary pomocí svařovací sestavy na obrázku č. 37. První svár byl svařen pouze pomocí laseru bez TIG přehřevu a sloužil jako referenční svár pro porovnání, zda se při použití technologie Laser-TIG skutečně dosáhne kvalitnějších svarů než při použití samotného laseru. Pro zbylé tři svary byl již použit TIG přehřev s tím, že se měnila nastavená velikost proudu TIG zdroje. Hodnoty proudu činily 20, 30 a 40 A. Při svařování byla také zaznamenávána hodnota napětí na TIG zdroji, která v závislosti na čase silně kolísá. Zdroj ukazuje v průběhu procesu okamžitou hodnotu napětí



Obr. 36 Upnutí svařovaných plechů



Obr. 37 Svařovací sestava Laser-TIG

a na jeho konci průměrnou. Jako ochranný plyn byl použit argon, jehož průtokový objem činil 12 l/min. Argon byl přiváděn pouze z koaxiální trysky TIG hořáku (Při svařování pouze laserem z trysky laseru.). Výkon laseru byl ve všech případech stejný a měl hodnotu 1000 W. Ohnisko laseru bylo zaostřeno na povrch svařovaného materiálu a svařovací rychlost činila 20 mm/s. Poloha wolframové TIG elektrody byla 2 mm před laserovým svazkem a 2 mm nad svařovaným materiálem. Galvanicky pozinkované vzorky byly označeny písmenem A, zároveň pozinkované písmenem B. Následuje číslice vyjadřující proud TIG zdroje. Vzhledem k velkému poměru délky a šířky svaru a s tím spojeným problémům při pořízení detailní fotografie, byly detaily svarů nafoceny až na tahových tělesech pro budoucí tahovou zkoušku.

9.4 Výpočty vneseného tepla

Vzorec pro výpočet vneseného tepla pro laser:

$$Q_{laser} = \varepsilon_{laser} \cdot \frac{P}{v \cdot 1000} \quad (9.1)$$

kde: Q_{laser} je vnesené teplo laserem [kJ/mm]

ε_{laser} je tepelná účinnost laseru [-]

v je svařovací rychlost [mm/s]

P je výkon laseru [W]

Vzorec pro výpočet vneseného tepla pro TIG:

$$Q_{TIG} = \varepsilon_{TIG} \cdot \frac{U \cdot I}{v \cdot 1000} \quad (9.2)$$

kde: Q_{TIG} je vnesené teplo metodou TIG [kJ/mm]

ε_{TIG} je tepelná účinnost metody TIG [-]

U je svařovací napětí [V]

I je svařovací proud [A]

Vzorec pro výpočet celkového vneseného tepla:

$$Q_{celk} = Q_{laser} + Q_{TIG} \quad (9.3)$$

kde: Q_{celk} je celkové vnesené teplo [kJ/mm]

Tab. 8 Vstupní parametry a výpočet vneseného tepla pro galvanicky pozinkované vzorky.

Vzorek	A00	A20	A30	A40
Výkon laseru [W]	1000	1000	1000	1000
Svařovací napětí [V]	-	14,8	13,9	13,6
Svařovací proud [A]	-	20	30	40
Svařovací rychlost [mm/s]	20	20	20	20
Tloušťka plechu [mm]	0,9	0,9	0,9	0,9
Tepelná účinnost laser [-]	0,76	0,76	0,76	0,76
Tepelná účinnost TIG [-]	0,60	0,60	0,60	0,60
Vnesené teplo laser [kJ/mm]	0,038	0,038	0,038	0,038
Vnesené teplo TIG [kJ/mm]	-	0,00888	0,01251	0,01632
Vnesené teplo celkem [kJ/mm]	0,038	0,04688	0,05051	0,05432

Tab. 9 Vstupní parametry a výpočet vneseného tepla pro žárově pozinkované vzorky.

Vzorek	B00	B20	B30	B40
Výkon laseru [W]	1000	1000	1000	1000
Svařovací napětí [V]	-	14,9	13,2	12,4
Svařovací proud [A]	-	20	30	40
Svařovací rychlost [mm/s]	20	20	20	20
Tloušťka plechu [mm]	1	1	1	1
Tepelná účinnost laser [-]	0,76	0,76	0,76	0,76
Tepelná účinnost TIG [-]	0,60	0,60	0,60	0,60
Vnesené teplo laser [kJ/mm]	0,038	0,038	0,038	0,038
Vnesené teplo TIG [kJ/mm]	-	0,00894	0,01188	0,01488
Vnesené teplo celkem [kJ/mm]	0,038	0,04694	0,04988	0,05288

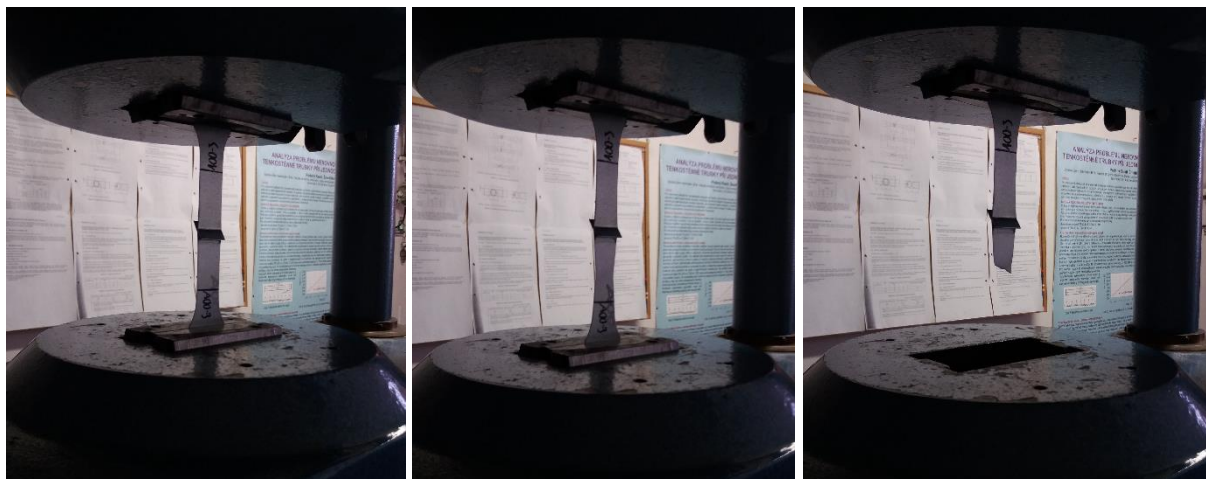
9.5 Tahová zkouška

Tahová zkouška se uskutečnila v laboratoři mechanických vlastností materiálů na Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojního inženýrství VUT. Jejím hlavním účelem bylo zjištění, zda k porušení vzorku dojde ve svaru, tepelně ovlivněné oblasti, nebo v základním materiálu. Zkouška byla provedena pomocí trhačího stroje ZD40/400kN, který disponuje inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60. Podrobnější charakteristika je uvedena v příloze č. 1. Na obrázku č. 38 jsou uvedeny příklady použitých zkušebních těles, přičemž celková délka činila 250 mm, nominální šířka zkušební části 24,5 mm (Skutečné hodnoty byly u každého vzorku měřeny na dvě desetinná místa.) a tloušťka 0,9 a 1 mm. Před zkouškou byla tahová tělesa odjehlena.



Obr. 38 Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku

Z každé dvojice svařených plechů byla vyřezána tři tahová tělesa a byla na nich vyznačena počáteční měřená délka 80 mm, tedy 40 mm od středu svaru na obě strany. Vzorky byly upnuty do čelistí trhačického stroje, které zvyšují přítláčnou sílu v závislosti na síle zatěžující. Testovaný vzorek byl po sevření čelistmi natahován rovnoměrně rostoucí tahovou silou až do jeho porušení. Zatěžující rychlost činila 10 MPa/s. Celý proces byl zaznamenáván a vyhodnocován počítačovým programem M-TEST. Na obrázku č. 39 je vidět zatěžovaný vzorek. Měkký zinkový povlak znesnadňoval sevření vzorku, což vnášelo chyby do výsledného smluvního tahové diagramu. Tyto chyby byly následně ručně opravovány, avšak i tak jsou výsledky mírně zkreslené, a tedy výsledné hodnoty poměrného prodloužení jsou kvůli prokluzu vzorku v upínacích čelistech nadhodnoceny.



Obr. 39 Průběh zatěžování vzorků při tahové zkoušce

❖ Základní materiály

Tab. 10 Naměřené hodnoty mechanických vlastností galvanicky pozinkované oceli.

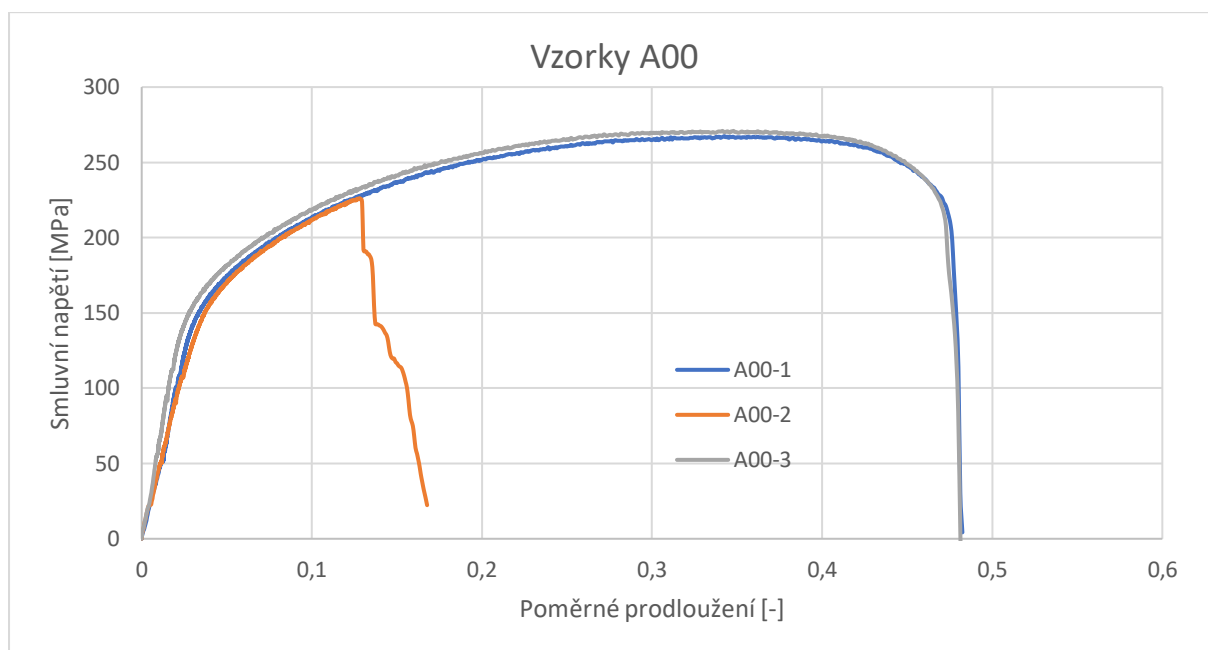
Galvanicky pozinkované	1	2	3
Počáteční tloušťka t_0 [mm]	0,9	0,9	0,9
Počáteční šířka b_0 [mm]	24,33	24,36	24,41
Mez pevnosti R_m [MPa]	269	268	268
Tažnost A_{80} [%]	45,63	45,00	43,75

Tab. 11 Naměřené hodnoty mechanických vlastností žárově pozinkované oceli.

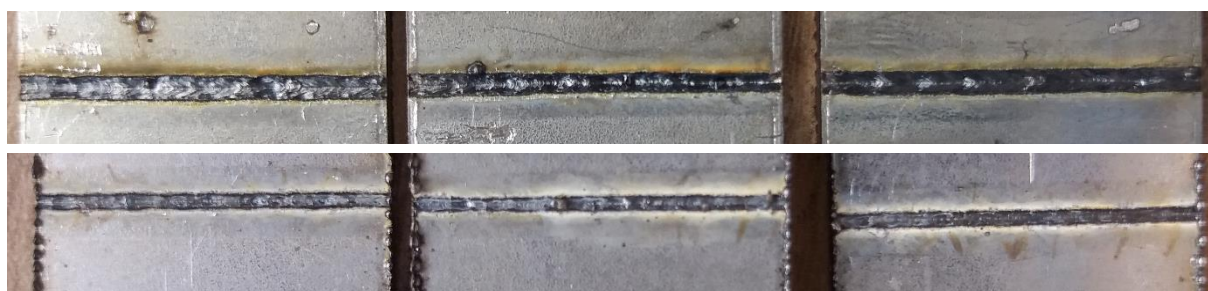
Žárově pozinkované	1	2	3
Počáteční tloušťka t_0 [mm]	1	1	1
Počáteční šířka b_0 [mm]	24,34	24,51	24,47
Mez pevnosti R_m [MPa]	396	400	402
Tažnost A_{80} [%]	31,25	31,25	30,00

U vzorků galvanicky pozinkovaného materiálu byla naměřena vyšší hodnota tažnosti a mez pevnosti se pohybovala na dolní hranici udávaného intervalu, viz tab. 10. V případě vzorku žárově pozinkovaného základního materiálu byly naměřeny hodnoty převyšující naměkko žíhaný materiál a odpovídající spíše lehce převálcovanému materiálu, viz tab. 11. Při žárovém zinkování tedy dochází k jistému vyžihání.

❖ Vzorky A00



Graf 1 Tahový diagram vzorků A00



Obr. 40 Svary vzorků A00

Tab. 12 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků A00.

Vzorek A00	1	2	3
Počáteční tloušťka t_0 [mm]	0,9	0,9	0,9
Počáteční šířka b_0 [mm]	24,32	24,50	24,52
Mez pevnosti R_m [MPa]	266	226	271
Tažnost A_{80} [%]	32,50	6,25	32,50
Místo porušení	Základní materiál	Ve svaru	Základní materiál

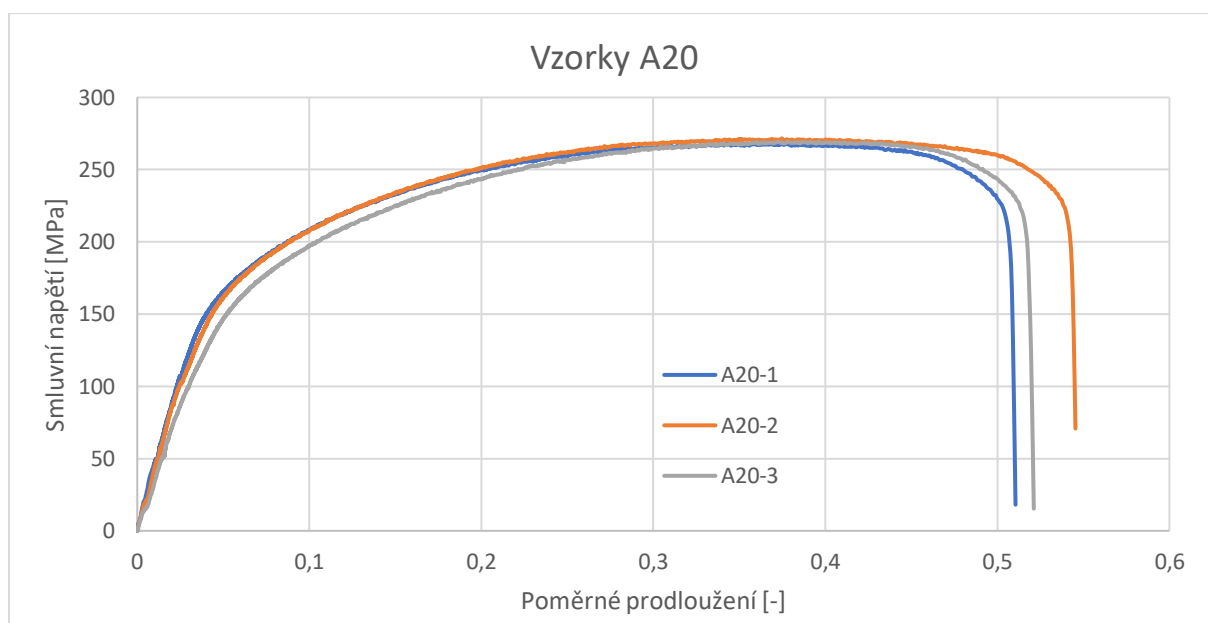
Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků A00, které byly svařovány pouze laserem, jsou uvedeny v tabulce č. 12 a průběh zkoušek je znázorněn v grafu č.1. U vzorku č.1 lze (obr.40 vlevo) pozorovat na dvou místech neúplné vyplnění svařku, které však odolnost svařku zásadně neovlivnilo a bylo dosaženo hodnoty meze pevnosti odpovídající základnímu materiálu, avšak tažnost byla naměřena nižší. Vzorek č.2 nevyhověl, neboť u něj došlo k lomu ve svaru. Na třech čtvrtinách délky svařku (obr. 40 uprostřed) se nachází proláklina doplněná o póry, vzniklé rozstříkem taveniny. Rozstřík se nacházel i na kořeni svařku. To všechno bylo patrně důvodem porušení svařku. U vzorku byly také naměřeny nízké hodnoty meze pevnosti a tažnosti. Vzorek č.3 (obr. 40 vpravo) nevykazoval žádné okem viditelné vady a došlo u něj k lomu v základním

materiálu. Vzorek č.3 vykazoval stejnou tažnost jako vzorek č.1 a bylo u něj dosaženo hodnoty meze pevnosti odpovídající základnímu materiálu. U všech vzorků byl kořen provařen.

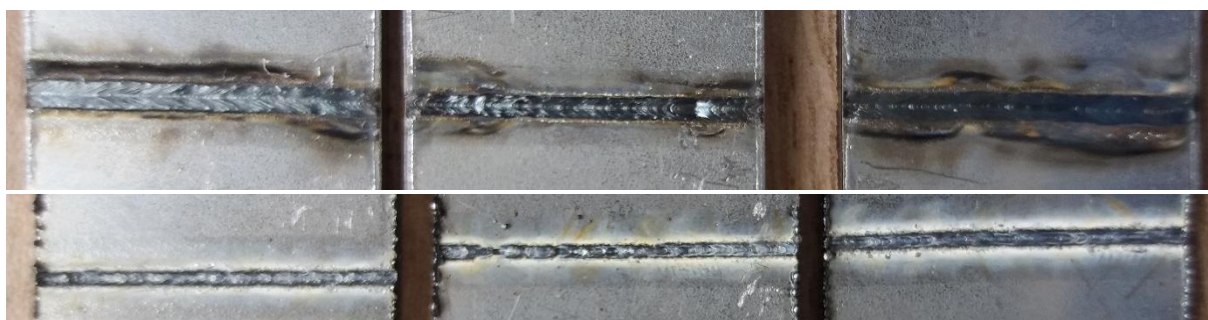
❖ Vzorky A20

Tab. 13 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků A20.

Vzorek A20	1	2	3
Počáteční tloušťka t_0 [mm]	0,9	0,9	0,9
Počáteční šířka b_0 [mm]	24,24	24,60	24,56
Mez pevnosti R_m [MPa]	268	271	269
Tažnost A_{80} [%]	33,75	37,50	32,50
Místo porušení	Základní materiál	Základní materiál	Základní materiál



Graf 2 Tahový diagram vzorků A20

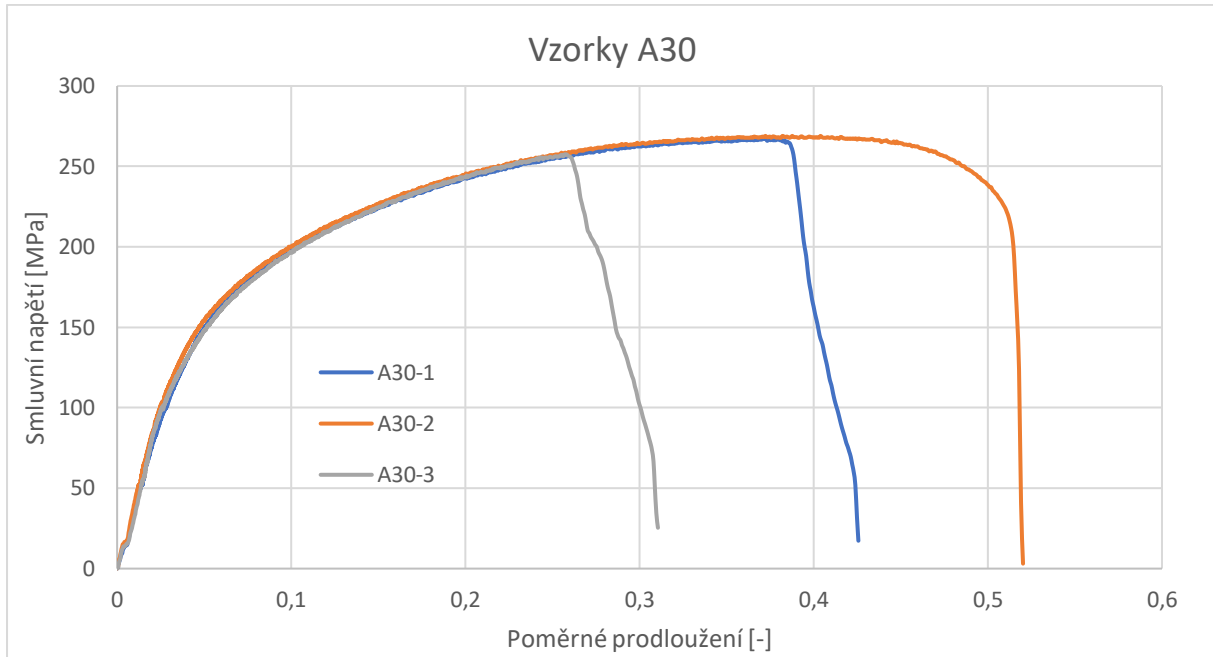


Obr. 41 Svary vzorků A20

Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků A20, které byly svařovány metodou Laser-TIG s velikostí proudu TIG zdroje 20 A, jsou uvedeny v tabulce č. 13 a průběh zkoušek je znázorněn v grafu č.2. U všech vzorků došlo k porušení v základním materiálu, což svědčí o dobré kvalitě svaru a zjevně i vhodných svařovacích parametrech. Svary vzorků nevykazovaly okem viditelné vady. Výjimkou byl vzorek č.1 (obr. 41 uprostřed), kde v jednom místě došlo k nedokonalému vyplnění svarů, které však nebylo natolik objemné, aby došlo k porušení svaru. Jako nedostatek by se dalo považovat určité

znečistění okolí svaru spalinami, což může komplikovat případné pozdější nanášení barevného nátěru či laku. U všech vzorků došlo k provaření kořene. Naměřené hodnoty meze pevnosti odpovídaly hodnotám základního materiálu, tažnost však byla naměřena nižší.

❖ Vzorky A30



Graf 3 Tahový diagram vzorků A30

Tab. 14 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků A30.

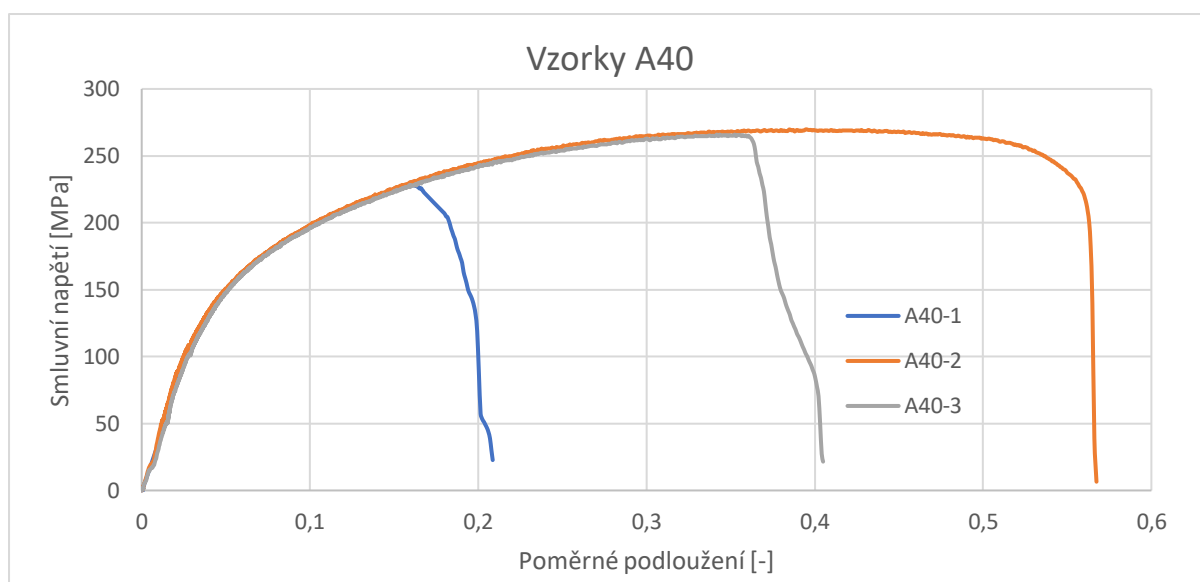
Vzorek A30	1	2	3
Počáteční tloušťka t_0 [mm]	0,9	0,9	0,9
Počáteční šířka b_0 [mm]	24,56	24,36	24,62
Mez pevnosti R_m [MPa]	267	269	257
Tažnost A_{80} [%]	21,25	32,50	15,00
Místo porušení	TOO	Základní materiál	Ze svaru do TOO



Obr. 42 Svary vzorků A30

Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků A30, které byly svařovány metodou Laser-TIG s velikostí proudu TIG zdroje 30 A, jsou uvedeny v tabulce č.14 a průběh zkoušek je znázorněn v grafu č.3. U vzorku č.1 (obr. 42 vpravo) je na okraji patrná velká dutina, která se stala původcem trhliny, táhnoucí se tepelně ovlivněnou oblastí. I přesto byla naměřena poměrně vysoká mez pevnosti, odpovídající základnímu materiálu. Tažnost však byla naměřena pouze 21,25 %. Vzorek č.2 (obr. 42 vlevo) nevykazoval žádné okem viditelné vady a došlo u něj k porušení v základním materiálu. Mez pevnosti byla také naměřena odpovídající základnímu materiálu., avšak tažnost byla cca o čtvrtinu nižší. U vzorku č.3 (obr. 42 uprostřed) je patrná na okrajové třetině svaru proláklina. Porušení bylo iniciováno v proláklině ve svarovém materiálu a šířilo se do tepelně ovlivněné oblasti. Naměřená hodnota meze pevnosti byla o něco nižší než u základního materiálu a hodnota tažnosti byla velmi nízká. U všech vzorků je svarové okolí znečištěno spalinami, které je potřeba před případným lakováním očistit. Kořen svaru byl provařen u všech vzorků.

❖ Vzorky A40



Graf 4 Tahový diagram vzorků A40



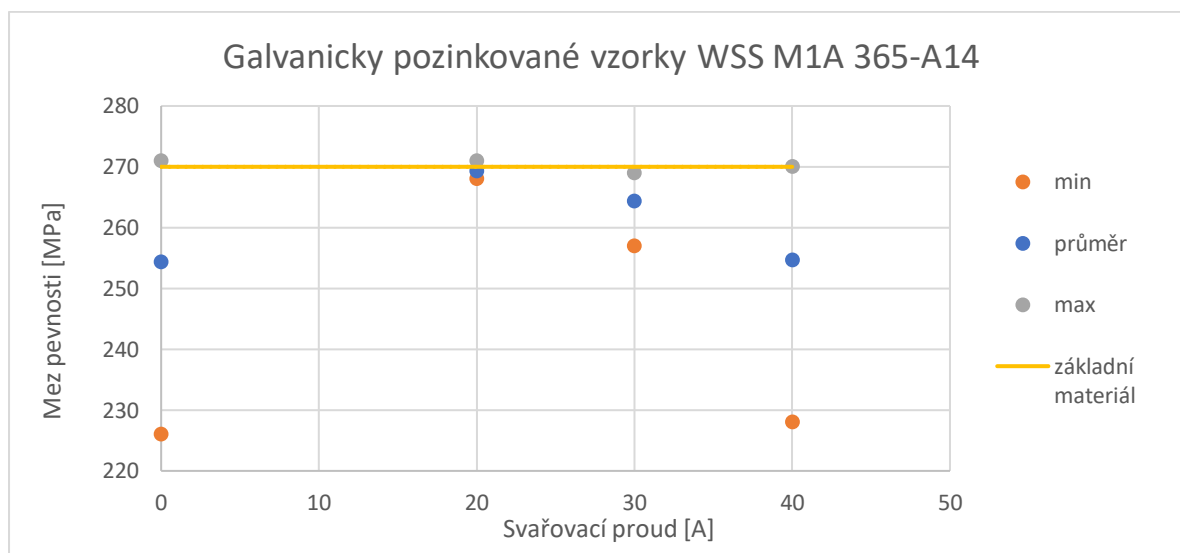
Obr. 43 Svary vzorků A40

Tab. 15 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků A40.

Vzorek A40	1	2	3
Počáteční tloušťka t_0 [mm]	0,9	0,9	0,9
Počáteční šířka b_0 [mm]	24,55	24,50	24,40
Mez pevnosti R_m [MPa]	228	270	266
Tažnost A_{80} [%]	8,75	36,25	22,50
Místo porušení	Ve svaru	Základní materiál	TOO

Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků A40, které byly svařovány metodou Laser-TIG s velikostí proudu TIG zdroje 40 A, jsou uvedeny v tabulce č.15 a průběh zkoušek je znázorněn v grafu č.4. Ve svaru vzorku č.1 (obr 43 vlevo) se nacházelo několik dutin a proláklina. Tyto vady byly příčinou porušení ve svaru a naměření velmi nízkých hodnot meze pevnosti a tažnosti. U svaru vzorku č.2 (obr. 43 vpravo) je okem patrná jedna poměrně velká dutina, která však neměla natolik velký vliv, aby došlo k porušení vzorku ve svaru. Mez pevnosti byla naměřena odpovídající základnímu materiálu. Naměřená tažnost sice nedosahovala hodnoty základního materiálu, ale přesto oproti ostatním vzorkům v rámci různých svařovacích parametrů byla druhá nejvyšší pro tuto ocel a typ povlaku. Vzorek č. 3 (obr. 43 uprostřed) vykazoval dutinu ve svaru na kraji tahového tělesa, která se stala místem iniciace trhliny šířící se tepelně ovlivněnou oblastí. Byla naměřena nízká hodnota tažnosti, ale mez pevnosti se velmi blížila hodnotě základního materiálu. Stejně jako u vzorků A20 a A30 i zde jsou okolí svarů znečištěná spaliny. Kořeny svarů jsou provařeny u všech vzorků.

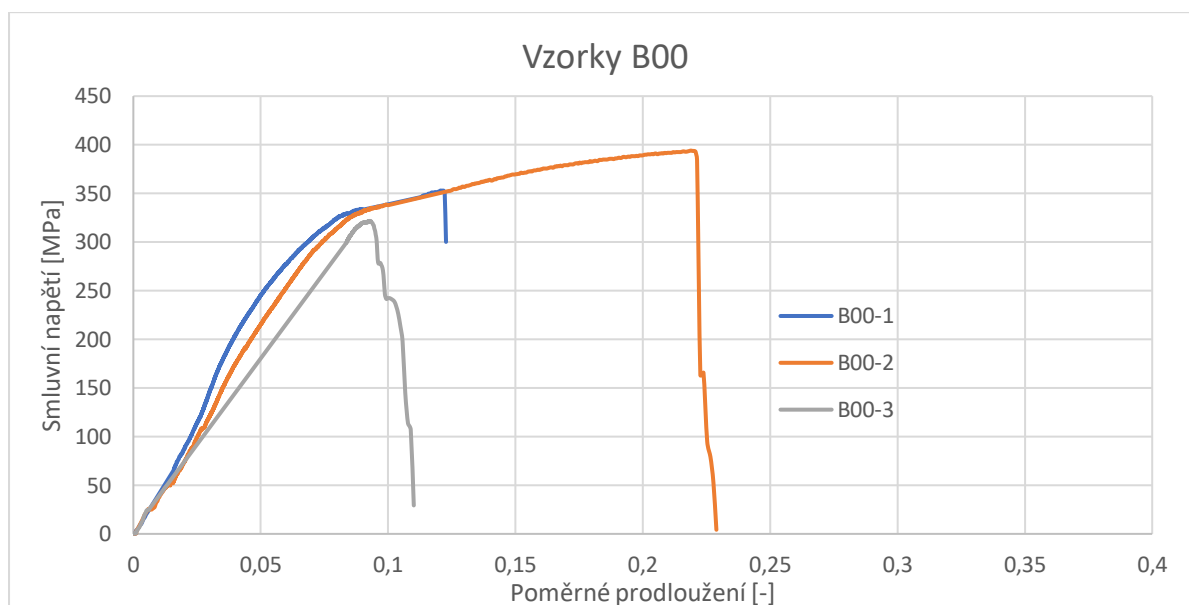
❖ Souhrn



Graf 5 Graf mezi pevnosti galvanických vzorků

V grafu č.5 jsou uvedeny rozptyly naměřených hodnot meze pevnosti pro jednotlivé galvanicky pozinkované vzorky, svařované při různých hodnotách proudu. Je patrné, že vzorky A20 vykazovali nejmenší rozdíly v naměřených mezích pevnosti, které se zároveň nejvíce blížili hodnotám základního materiálu. Značné nekonzistentnosti si lze povšimnout u vzorků A00 a A40.

❖ Vzorky B00



Graf 6 Tahový diagram vzorků B00

Tab. 16 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků B00.

Vzorek B00	1	2	3
Počáteční tloušťka t_0 [mm]	1	1	1
Počáteční šířka b_0 [mm]	24,62	24,48	24,36
Mez pevnosti R_m [MPa]	353	394	322
Tažnost A_{80} [%]	3,75	10,00	1,25
Místo porušení	Ve svaru	Ve svaru	Ve svaru

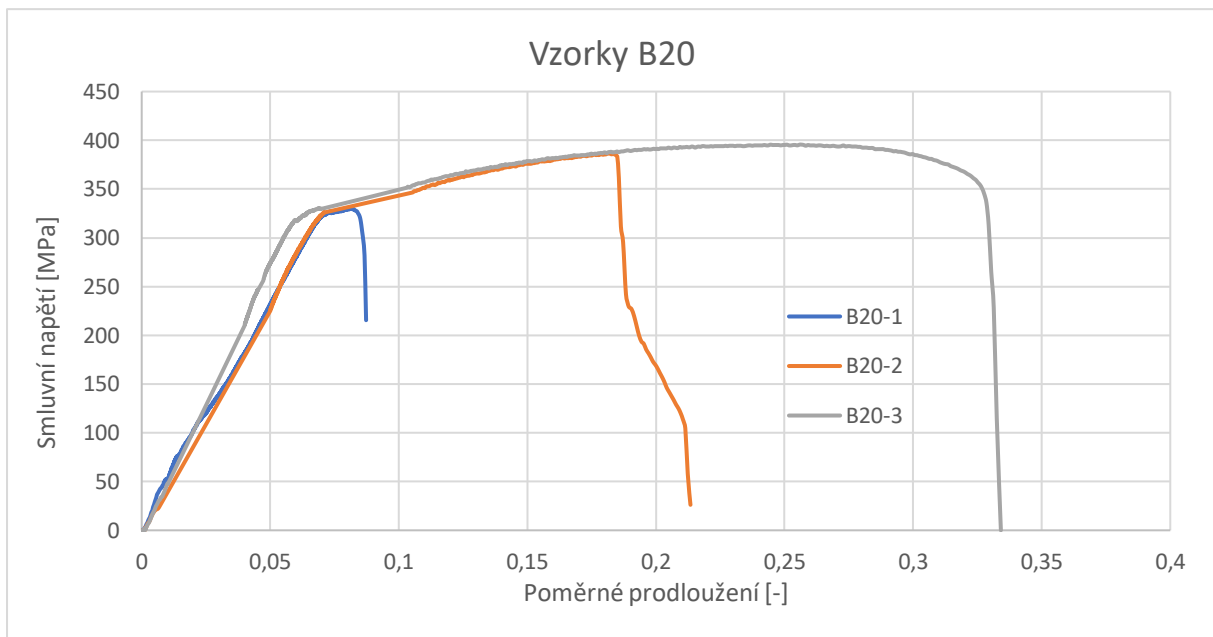


Obr. 44 Svary vzorků B00

Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků B00, které byly svařovány pouze laserem, jsou uvedeny v tabulce č.16 a průběh zkoušek je znázorněn v grafu č.6. U vzorku č.1 (obr 44 uprostřed) se nachází neúplné vyplnění svaru v celé délce a také značný rozstřík, což vedlo k porušení ve svaru. Naměřená tažnost byla velmi malá, avšak hodnota meze pevnosti spadá do intervalu předepsaném v materiálovém listu pro žíhanou ocel. Vzorek č.2 (obr 44 vlevo) vykazoval stejné vady a charakter porušení, ale mez pevnosti se velmi blížila hodnotám základního materiálu a tažnost byla naměřena vyšší, ale přesto nedostatečná. U vzorku č.3 (obr 44 vpravo) bylo také patrné neúplné vyplnění svaru, rozstřík a i dutina. Díky tomu došlo k lomu ve svaru a naměření

extrémně nízké tažnosti a neuspokojivé meze pevnosti. U všech vzorků nebyl kořen svaru kompletně provařen.

❖ Vzorky B20



Graf 7 Tahový diagram vzorků B20

Tab. 17 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků B20.

Vzorek B20	1	2	3
Počáteční tloušťka t_0 [mm]	1	1	1
Počáteční šířka b_0 [mm]	24,81	24,62	24,60
Mez pevnosti R_m [MPa]	330	386	395
Tažnost A_{80} [%]	1,88	8,75	21,25
Místo porušení	Ve svaru	Ze svaru do TOO	Základní materiál



Obr. 45 Svary vzorků B20

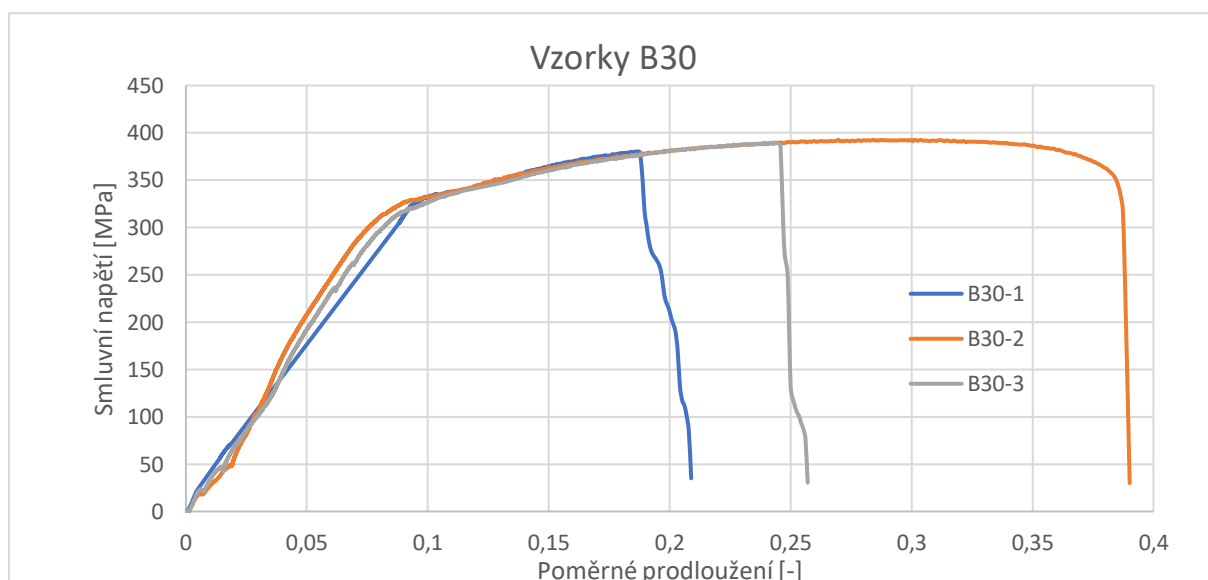
Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků B20, které byly svařovány metodou Laser-TIG s velikostí proudu TIG zdroje 20 A, jsou uvedeny v tabulce č.17 a průběh zkoušek je znázorněn v grafu č.7. Vzorek č.1 (obr. 45 vpravo) vykazuje neúplné vyplnění svaru po jeho celé délce, rozstřík a dutiny na okrajích svaru. Tímto způsobený úbytek svarového materiálu zapříčinil porušení vzorku ve svaru. Naměřená mez pevnosti byla mnohem menší než u základního materiálu, ale splňovala interval daný materiálovým listem. Tažnost však byla extrémně nízká. Vzorek č.2 (obr. 45 vlevo) taktéž trpěl na rozstřík a neúplné vyplnění svaru. Porušení vzorku bylo

iniciováno ve svaru, kterým se táhlo po cca dvě třetiny jeho délky a poté pokračovalo do tepelně ovlivněné oblasti. Přesto byla naměřena mez pevnosti poměrně vysoká, blíží se základnímu materiálu, ale tažnost byla velmi nízká. U vzorku č.3 (obr. 45 uprostřed) se vyskytuje pouze neúplné vyplnění svaru a evidentně ne v takové míře, aby došlo k porušení ve svaru a vzorek tedy praskl v základním materiálu. Mez pevnosti byla naměřena odpovídající základnímu materiálu. Vzorek vykazoval tažnost vyšší než u ostatních vzorků, ale ta i tak nedosahovala předepsané hodnoty. U všech vzorků bylo okolí svarů znečištěno spalinami a svarový kořen na určitých místech nebyl provařen.

❖ Vzorky B30

Tab. 18 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků B30.

Vzorek B30	1	2	3
Počáteční tloušťka t_0 [mm]	1	1	1
Počáteční šířka b_0 [mm]	24,42	24,50	24,41
Mez pevnosti R_m [MPa]	380	392	389
Tažnost A_{80} [%]	8,75	22,50	11,25
Místo porušení	Ve svaru	Základní materiál	Ve svaru



Graf 8 Tahový diagram vzorků B30



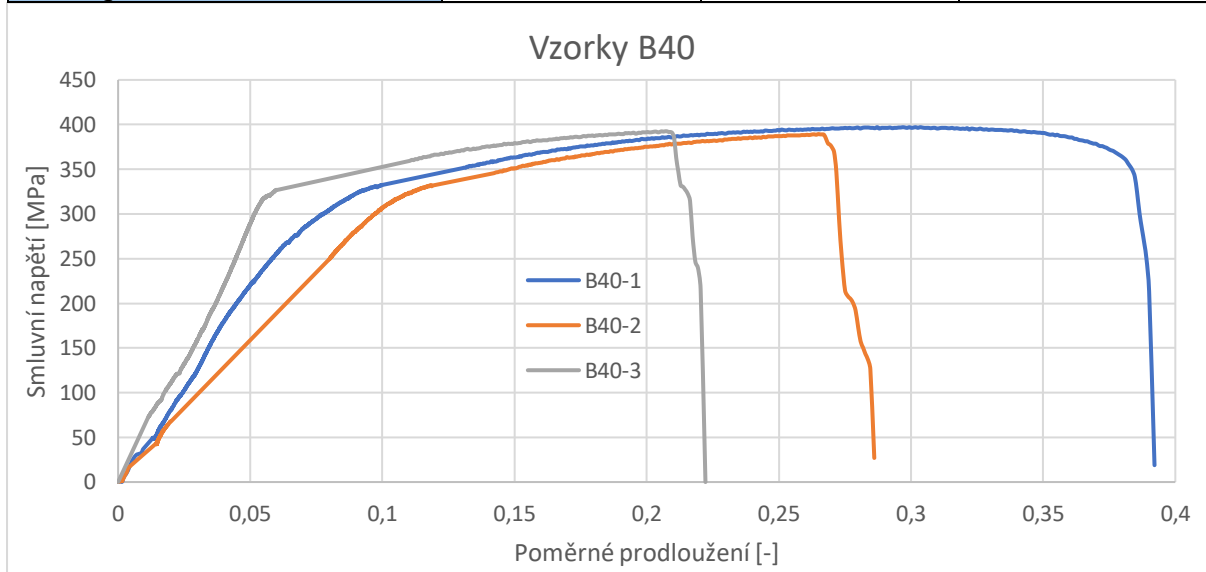
Obr. 46 Svary vzorků B30

Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků B30, které byly svařovány metodou Laser-TIG s velikostí proudu TIG zdroje 30 A, jsou uvedeny v tabulce č.18 a průběh zkoušek je znázorněn v grafu č.8. U vzorku č.1 (obr. 46 vlevo) se vyskytovala mírná proláklina, která patrně i tak dokázala způsobit lom ve svaru. Byla naměřena hodnota meze pevnosti blíží se základnímu materiálu, ale nízká hodnota tažnosti. Svar vzorku č.2 (obr. 46 uprostřed) není na několika místech kompletně vylit, ale i přesto došlo k lomu v základním materiálu. Naměřená hodnota meze pevnosti téměř odpovídala hodnotám základního materiálu, a i tažnost byla poměrně vysoká. Vzorek č.3 (obr. 46 vpravo) vykazoval souvislý zápal a došlo u něj k porušení ve svaru. Mez pevnosti byla vysoká, ale tažnosti nízká. Všechny vzorky měli provařený kořen a znečištěné okolí svaru spalinami.

❖ Vzorky B40

Tab. 19 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků B40.

Vzorek B40	1	2	3
Počáteční tloušťka t_0 [mm]	1	1	1
Počáteční šířka b_0 [mm]	24,55	24,40	24,44
Mez pevnosti R_m [MPa]	397	389	392
Tažnost A_{80} [%]	23,75	13,75	12,50
Místo porušení	Základní materiál	Ve svaru	Ve svaru



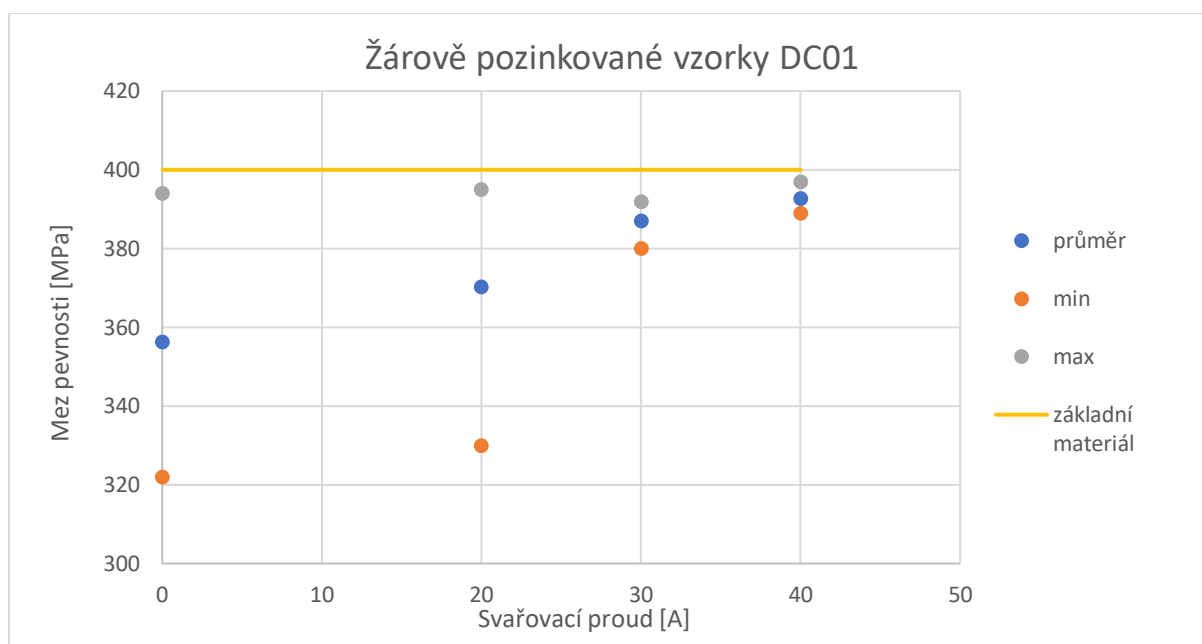
Graf 9 Tahový diagram vzorků B40



Obr. 47 Svary vzorků B40

Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků B40, které byly svařovány metodou Laser-TIG s velikostí proudu TIG zdroje 40 A, jsou uvedeny v tabulce č.19 a průběh zkoušek je znázorněn v grafu č.9. U vzorku č.1 (obr. 47 vpravo) došlo k porušení v základním materiálu a vyskytoval se u něj pouze mírný zápal. Naměřené hodnoty meze pevnosti a tažnosti byly ve srovnání s ostatními vzorky i v rámci různých svařovacích parametrů nejvyšší. Vzorek č.2 (obr. 47 vlevo) vykazoval pouze mírný zápal, přesto u něj došlo k lomu ve svaru. I tak byla u něj naměřena poměrně vysoká mez pevnosti, avšak tažnost nízká. U vzorku č.3 (obr. 47 uprostřed) je ve svaru patrná dutina a rozstřík. V kořeni svaru se nachází dvě dutiny. Porušení vzorku nastalo ve svaru a byla naměřena hodnota meze pevnosti, blížící se základnímu materiálu a nízká hodnota tažnosti. Okolí všech svarů je znečištěno spalinami a kořen svaru je u všech vzorků provařen.

❖ Souhrn

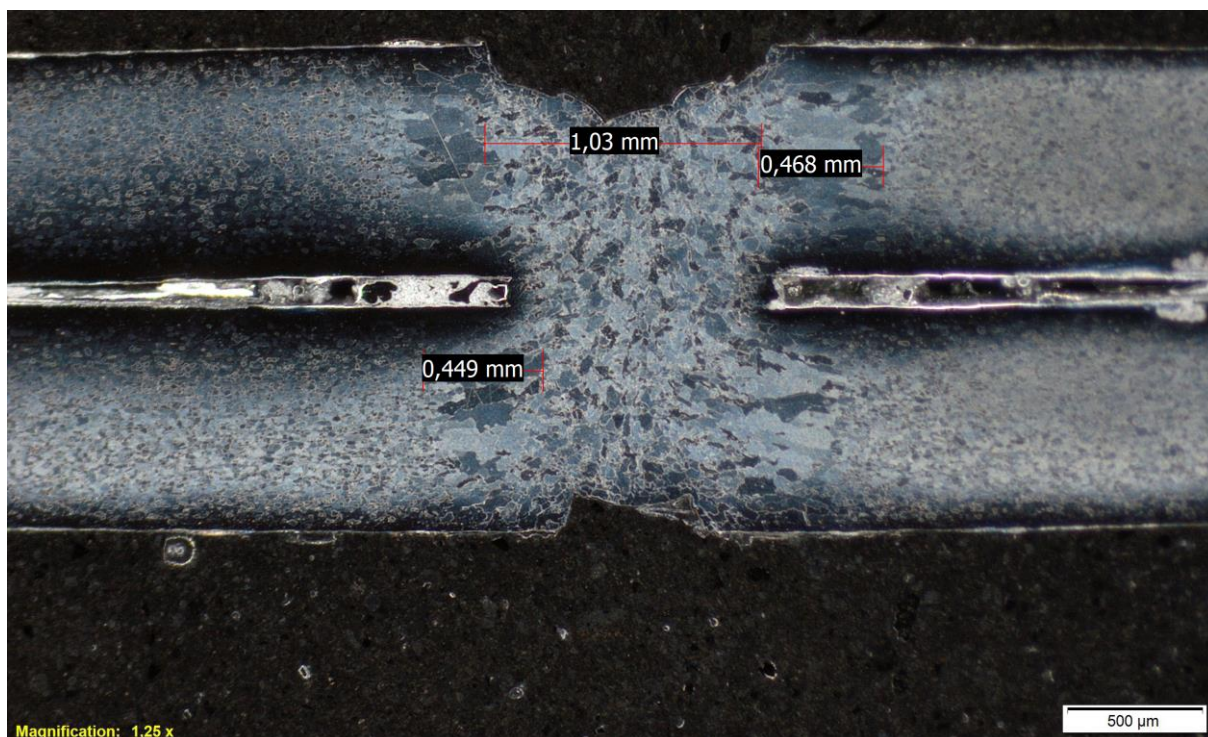


Graf 10 Graf meze pevnosti žárových vzorků

V grafu č.10 jsou uvedeny rozptyly naměřených hodnot meze pevnosti pro jednotlivé žárově pozinkované vzorky, svařované při různých hodnotách proudu. Zde jsou vidět značné rozdíly v naměřených hodnotách meze pevnosti u vzorků B00 a B20. Nejmenšího rozptylu a nejvyšších hodnot meze pevnosti je dosaženo u vzorků B40.

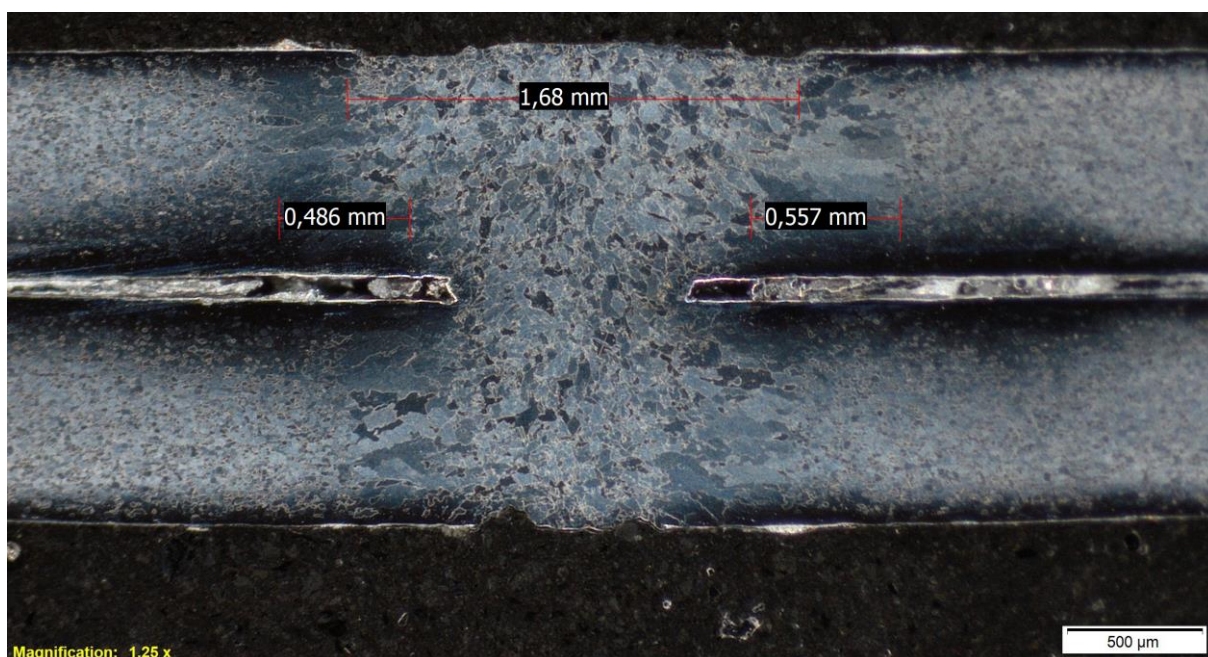
9.6 Makrostruktura

Vzorky pro vyhodnocení makrostruktury byly připraveny Ústavem přístrojové techniky v Brně. Vyhodnocování bylo provedeno na základě norem ČSN EN ISO 13919-1 pro laserové svary a ČSN EN ISO 12932 pro hybridní svary. Rozměry byly měřeny v programu LAS EZ.



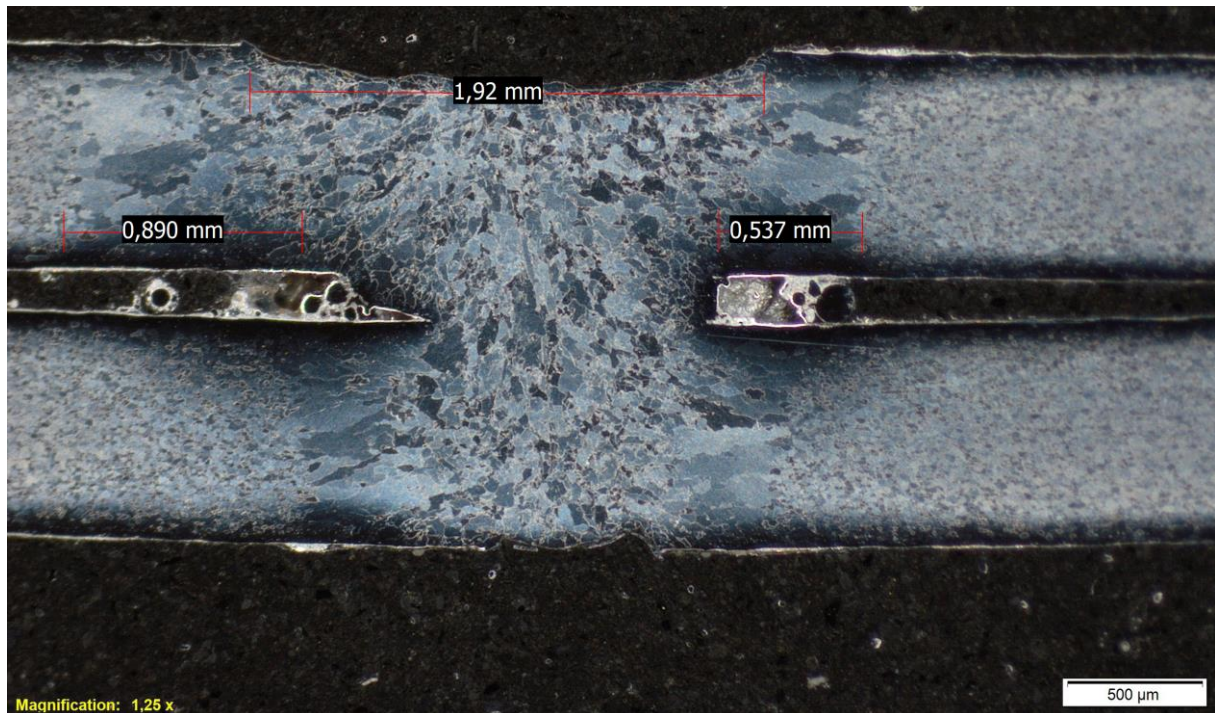
Obr. 48 Makroskopický snímek vzorku A00

Na obrázku č. 48 se nachází snímek makrostruktury vzorku A00. Svar dosahuje v nejširším místě šířky 1,03 mm a tepelně ovlivněná oblast 0,468 mm na pravé straně a 0,449 mm na levé straně. Je patrné výrazné zhrubnutí zrna v tepelně ovlivněné oblasti. Vrchní proláklina, která zjevně dále pokračuje podélně svarem má maximální hloubku 0,293 mm a není dle normy ČSN EN ISO 13919-1 přípustná pro žádný stupeň jakosti. Vzorek také vykazuje vadu ve formě konkávnosti kořene dosahujícího 0,142 mm, která splňuje stupeň C. Na vzorku lze také pozorovat rozstřík, jehož akceptovatelnost závisí na konkrétní aplikaci.



Obr. 49 Makroskopický snímek vzorku A20

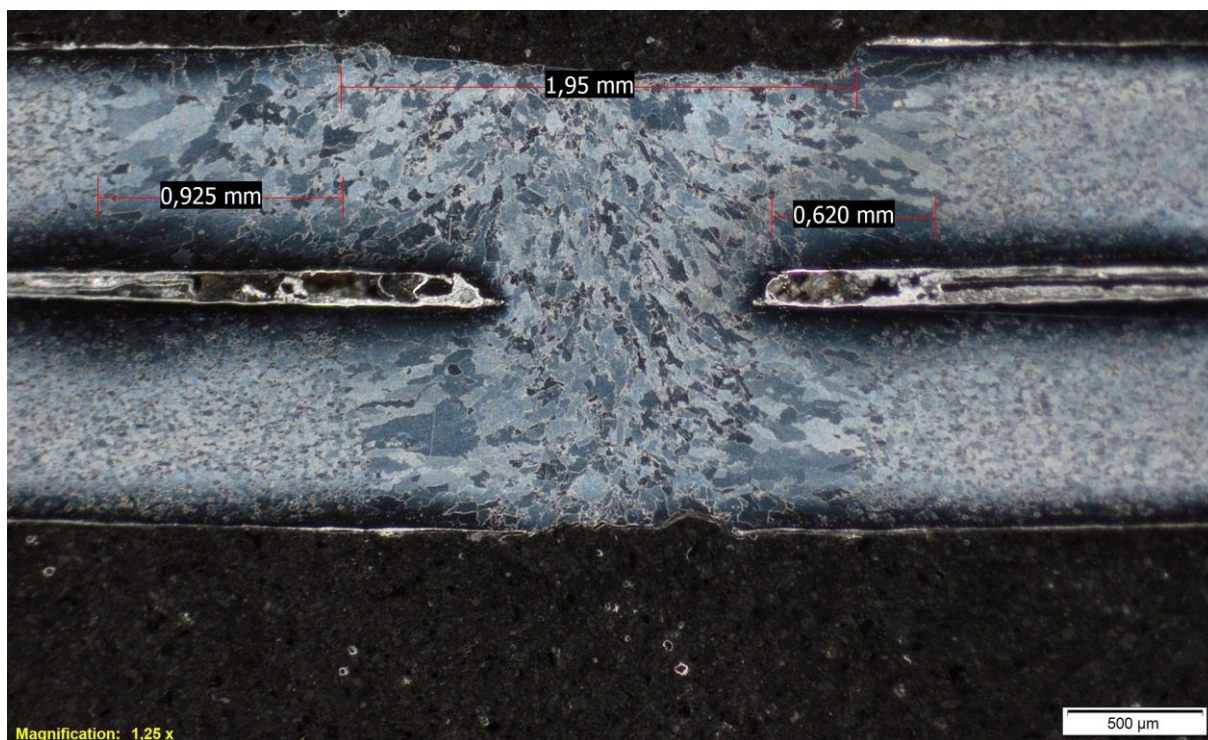
Obrázek č. 49 představuje snímek makrostruktury vzorku A20. Přidáním druhého svařovacího zdroje došlo k nárůstu vneseného tepla a tím i zvětšení šířky svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Maximální rozměr svaru je 1,68 mm. Levá tepelně ovlivněná oblast má šířku 0,486 mm a pravá 0,557 mm. Oproti vzorku A00 je vidět mnohem lepší zaplnění svaru. Ve vrchní části svaru se nachází převýšení o výšce 0,023 mm splňující dle normy ČSN EN ISO 12932 jakostní stupeň B. U kořene se vyskytují vruby s maximální hloubkou 0,071 mm, které jsou přípustné pro stupeň jakosti C. V tepelně ovlivněné oblasti dochází ke značnému hrubnutí zrna.



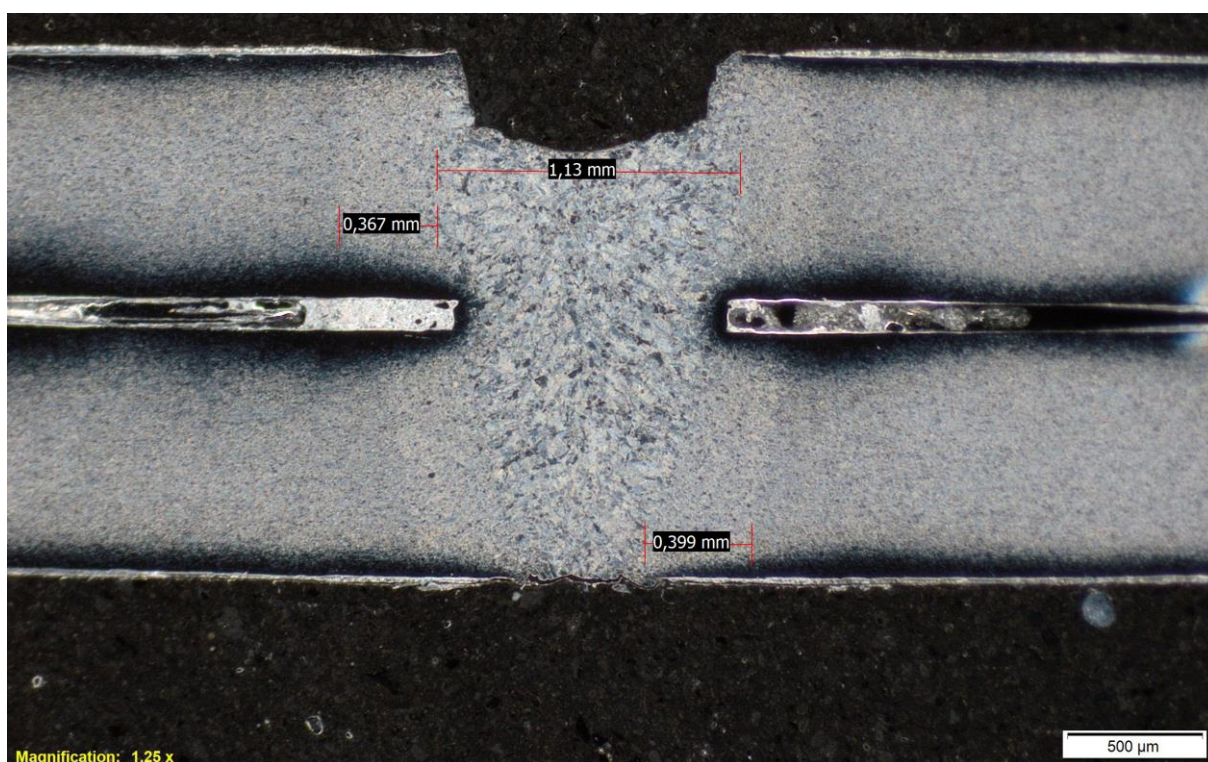
Obr. 50 Makroskopický snímek vzorku A30

Na obrázku č. 50 se nachází snímek makrostruktury vzorku A30. Při svařovacím proudu 30 A došlo nárůstem vneseného tepla ke zvětšení šířky svaru na 1,92 mm a tepelně ovlivněné oblasti na levé straně na 0,890 mm. Na pravé straně však měla tepelně ovlivněná oblast šířku jen 0,537 mm. V kořeni svaru se vyskytuje vrub o hloubce 0,057 mm, který je přijatelný pro jakostní stupeň C. Neúplné vyplnění horní části svaru o hloubce 0,149 mm splňuje stupeň D. V tepelně ovlivněné oblasti je vidět značné zhrubnutí zrna a nesouměrný odvod tepla, který byl podle všeho způsobený rozdílným přesazením plechů.

Na obrázku č. 51 je vidět snímek makrostruktury vzorku A40. Zvýšením vneseného tepla došlo k rozšíření svaru na 1,95 mm a tepelně ovlivněné oblasti na 0,925 mm vlevo a na 0,620 mm napravo. Lící část svaru byla neúplně vyplněna s hloubkou 0,115 mm, splňující jakostní stupeň D. Vrub v kořeni svaru má hloubku 0,046 mm a je přijatelný pro stupeň C. V tepelně ovlivněné oblasti došlo k výraznému zhrubnutí zrna a kvůli rozdílnému přesazení plechů k nesouměrnému odvodu tepla a s tím spojeným rozdílem v šířce.

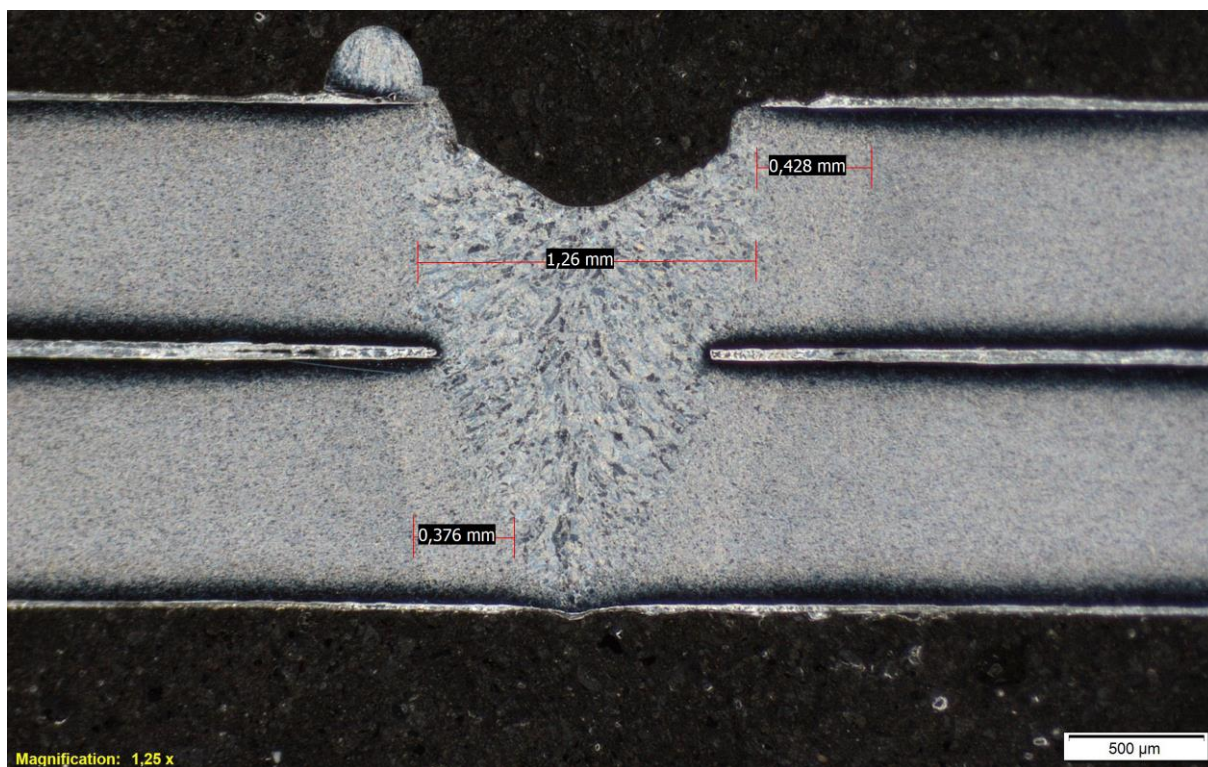


Obr. 51 Makroskopický snímek vzorku A40



Obr. 52 Makroskopický snímek vzorku B00

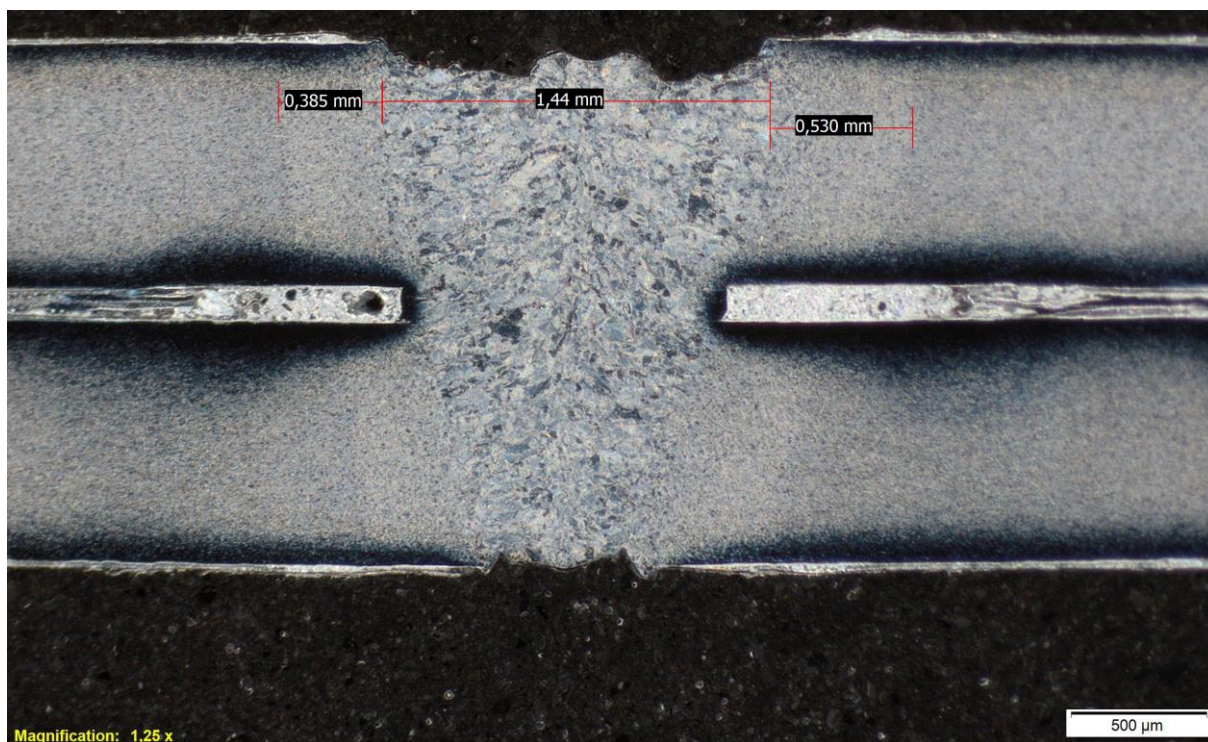
Obrázek č. 52 zachycuje snímek makrostruktury žárově pozinkovaného vzorku B00, zhotoveného pouze za použití laseru. Maximální šířka svaru zde činí 1,13 mm a tepelně ovlivněná oblast je široká maximálně 0,367 mm na levé straně a 0,399 mm na pravé. V horní části je vidět značné nevyplnění svaru, dosahující hloubky 0,353 mm, která je nepřijatelná pro všechny jakostní stupně normy ČSN EN ISO 13919-1. Dále lze na snímku pozorovat rozstřík, jehož akceptovatelnost závisí na dané aplikaci. Oproti vzorkům 'A' nedochází v tepelně ovlivněné oblasti k zhrubnutí zrna.



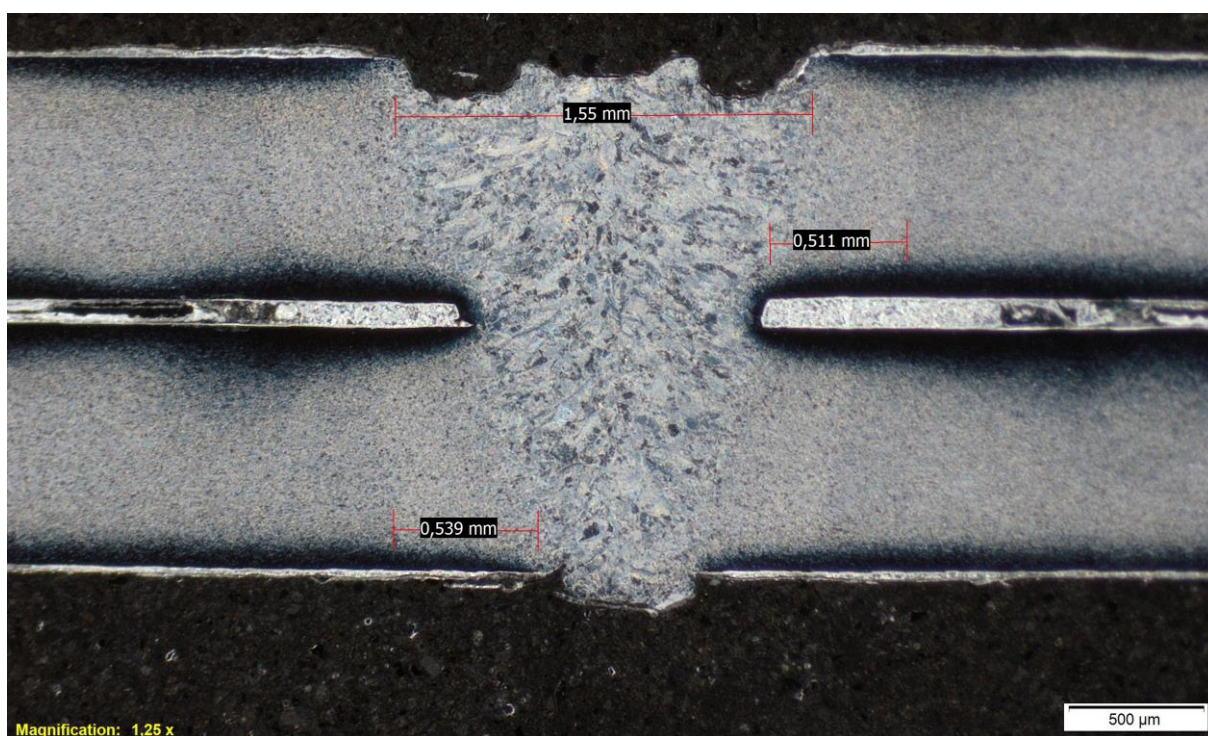
Obr. 53 Makroskopický snímek vzorku B20

Na obrázku č. 53 se nachází snímek makrostruktury vzorku B20. Navýšením vneseného tepla přidáním TIG zdroje o proudu 20 A došlo k nárůstu šířky svaru na 1,26 mm a tepelně ovlivněné oblasti na 0,376 mm vlevo a na 0,428 mm vpravo. V horní části svaru lze pozorovat, že došlo k neúplnému vyplnění svaru, které dosahuje značné hloubky 0,380 mm. Tato vada je dle normy ČSN EN ISO 12932 nepřijatelná pro všechny jakostní stupně. Po levé straně se také nachází masivní kapička rozstříku o průměru 0,352 mm. Dle normy přípustnost takové vady závisí na konkrétním použití. Mírný rozdíl v maximálních šířkách tepelně ovlivněné oblasti na levé a pravé straně je způsoben nesouměrným přesazením plechů při svařování.

Obrázek č. 54 představuje snímek makrostruktury vzorku B30. Při svařovacím proudu 30 A došlo k nárůstu maximální šířky svaru na 1,44 mm a šířky tepelně ovlivněné oblasti na 0,385 mm na levé straně a na 0,530 mm na pravé straně. Na líci svaru se vyskytuje souvislý zápal o maximální hloubce 0,148 mm, což odpovídá jakostnímu stupni D. V kořenové části svaru jsou patrné vruby, jejichž maximální hloubka dosahuje 0,060 mm a jsou tedy přijatelné pro stupeň C. V tepelně ovlivněné oblasti nedochází k růstu zrna a rozdíl v šířce oblasti na levé a pravé straně je způsoben nesouměrným přesazením plechů při svařování.



Obr. 54 Makroskopický snímek vzorku B30



Obr. 55 Makroskopický snímek vzorku B40

Na obr. 55 je vidět snímek makrostruktury vzorku B40. Při nejvyšší hodnotě svařovacího proudu, tedy 40 A se maximální šířka svaru zvětšila na 1,55 mm. Nárůst byl zaznamenán i u šířky tepelně ovlivněné oblasti a to na 0,539 mm na levé straně a na 0,511 mm na straně pravé. Na lícové straně svaru se nachází souvislý zápal s maximální hloubkou 0,168 mm, který splňuje jakostní stupeň D. Dále lze pozorovat nadměrné převýšení kořene o výšce 0,159 mm, které je přijatelné pro nejvyšší stupeň B. V tepelně ovlivněné oblasti nedošlo k růstu zrna.

Tabulka č.20 shrnuje pro jednotlivé vzorky rozměry svaru a tepelně ovlivněné oblasti, typy a míru vad a dosažený jakostní stupeň.

Tab. 20 Zhodnocení makroskopických snímků.

Vzorek	Šířka svaru [mm]	Šířka levé TOO [mm]	Šířka pravé TOO [mm]	Vady	Stupeň jakosti
A00	1,03	0,449	0,468	Neúplné vyplnění (0,293 mm), konkávnost kořene (0,142 mm), rozstřík	Nevyhovuje
A20	1,68	0,486	0,557	Převýšení (0,023 mm), vruby v kořeni (0,071 mm)	C
A30	1,92	0,890	0,537	Neúplné vyplnění svaru (0,149 mm), vrub v kořeni (0,057 mm)	D
A40	1,95	0,925	0,620	Neúplné vyplnění svaru (0,115 mm), vrub v kořeni (0,046 mm)	D
B00	1,13	0,367	0,399	Neúplné vyplnění svaru (0,353 mm), rozstřík	Nevyhovuje
B20	1,26	0,376	0,428	Neúplné vyplnění svaru (0,380 mm), rozstřík	Nevyhovuje
B30	1,44	0,385	0,530	Souvislý zápal (0,148 mm), vruby v kořeni (0,060 mm)	D
B40	1,55	0,539	0,511	Souvislý zápal (0,168 mm), převýšení kořene (0,159 mm)	D

10 DISKUZE

U galvanicky pozinkovaných vzorků z oceli WSS M1A 365-A14 bylo poměrně překvapivým výsledkem tahové zkoušky, že u vzorků svařovaných pouze laserem došlo k porušení v základním materiálu ve dvou případech ze tří. U těchto vzorků byly očekávány nejhorsí výsledky, přesto bylo dosaženo ve dvou případech obdobných mechanických vlastností jako u vzorků svařovaných hybridní technologií. Jako nejoptimálnější se jeví svařovací parametry, kdy proud TIG zdroje činí 20. Ve všech případech došlo k porušení vzorků v základním materiálu. U vzorků A20 byly naměřeny hodnoty meze pevnosti shodné s hodnotami základního pozinkovaného materiálu bez svaru. Zároveň ve srovnání s ostatními typy vzorků se jednalo o hodnoty nejvyšší a s nejmenším rozptylem, viz graf č.5. Hodnoty tažnosti ve srovnání s ostatním vzorky byly globálně nejvyšší, ale přesto byly o cca 10 % nižší oproti základnímu materiálu a cca o 5 % nižší než minimální hodnota deklarovaná výrobcem. Pro vyšší výpovědní hodnotu by bylo vhodné provést zkoušku u vzorků A20 na vyšším počtu vzorků. To by přineslo kvalitnější údaje pro potvrzení vzorků A20.

Tahová zkouška pro žárově pozinkované vzorky z oceli DC01 přinesla výsledky, na základě kterých nelze spolehlivě stanovit optimální svařovací parametry. U všech typů vzorků došlo k porušení ve svaru nebo tepelně ovlivněné oblasti minimálně ve dvou případech ze tří. Zkouška však potvrdila pro žárově pozinkovanou ocel nevhodnost laserového svařování bez předehřevu, neboť došlo k porušení ve svaru u všech vzorků a naměření nízkých hodnot mechanických vlastností. Nejvyšších hodnot meze pevnosti s nejmenším rozptylem bylo dosaženo u vzorků B40, viz graf č.10, ale přesto zde svár zátěž neustál ve dvou případech ze tří. Je vidět, že tlustší vrstva žárového zinkového povlaku má mnohem větší vliv na svařovací proces a kvalitu svarů než povlak galvanický. Na základě výsledků tahové zkoušky bych pro tento materiál doporučil provést zkoušku na více vzorcích, a i při jiných hodnotách proudu.

Souhrn výsledků vyhodnocení makrostruktury je uveden v tabulce č. 20. Vyhodnocování bylo provedeno na základě norem ČSN EN ISO 13919-1 pro laserové svary a ČSN EN ISO 12932 pro hybridní svary. U galvanicky pozinkovaných vzorků se vyskytovaly vady ve všech vzorcích. Výskyt vad byl v největší míře u vzorku svařovaném pouze laserem, kdy vzorek nevyhovoval žádnému jakostnímu stupni a lze tedy říct, laserové svařování bez předehřevu je pro galvanicky pozinkované plechy skutečně nevhodné. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u vzorku svařovaném s předehřevem o velikosti proudu TIG zdroje 20 A. V tomto případě vzorek dosáhl jakostního stupně C. Co se týče rozměrů svaru a tepelně ovlivněné oblasti, byl zaznamenán očekávaný nárůst s rostoucí mírou vneseného tepla. U vzorků A30 a A40 se šířka tepelně ovlivněné oblasti na levé vs. pravé straně znatelně lišila. Tento rozdíl byl způsoben při sestavování plechů do upínacích lišt, kdy jednotlivé přesahy plechů od budoucího svaru se lišily a při menším objemu materiálu na jednom přesahu došlo k vyššímu vyhrátí a nárustu tepelně ovlivněné oblasti na této straně. Ze snímků bylo též patrné, že ocel WSS M1A 365-A14 je náchylná na růst zrna v tepelně ovlivněné oblasti.

Vyhodnocení makrostruktury žárově pozinkovaných vzorků z oceli DC01 přineslo méně uspokojivé výsledky. Vady se vyskytovaly ve všech vzorcích. Vzorek svařený pouze laserem i vzorek s proudem TIG zdroje 20 A nedosáhl na žádný jakostní stupeň, kvůli rozměrným vadám, zejména velkému úbytku svarového kovu, vzniklého explozivním únikem zinkových par ze svarové lázně. Je zjevné, že negativní vliv zinkového povlaku na kvalitu svaru je přímo úměrný jeho tloušťce, a tedy svary z žárově pozinkovaného plechu vykazují větší míru vad než vzorky pozinkované galvanicky. Zde ani předehřev TIG zdrojem při 20 A nebyl dostatečný, pro zhotovení kvalitního spoje. Vzorky B30 a B40 dosáhly jakostního stupně D. Jako vhodnější proud TIG zdroje se jeví 30 A, kvůli menšímu tepelnému ovlivnění materiálu a menšímu rozměru vad. S rostoucí mírou vneseného tepla docházelo i v tomto případě k očekávanému

nárustu šířky svaru a tepelně ovlivněné oblasti. U vzorku B30 je nepoměr v šířce tepelně ovlivněné oblasti na levé a pravé straně. Příčina je stejná jako u galvanicky pozinkovaných vzorků. Ze snímků vyplývá, že u oceli DC01 nedochází k výraznému růstu zrna v tepelně ovlivněné oblasti.

11 ZÁVĚRY

Pro ověření vhodnosti metody Laser-TIG pro průvarové svařování přeplátovaných pozinkovaných plechů byly zhotoveny dva druhy vzorků. Prvním druhem byly galvanicky pozinkované plechy z oceli WSS M1A 365-A14 50G, u kterých byla změřena pomocí třiceti měření průměrná tloušťka zinkového povlaku 1,05 μm . Druhým druhem byly zároveň pozinkované plechy z oceli DC01, u kterých byla stejným způsobem změřena tloušťka povlaku 20,87 μm . Bohužel nebyl k dispozici stejný základní materiál s různou technologií pozinkování, díky kterému by výstupy z experimentu byly konzistentnější. Jako jediný proměnný svařovací parametr byl použit proud TIG zdroje o hodnotách 20, 30 a 40 A. Byly zhotoveny i svary pouze laserem pro srovnání s touto původní metodou. Svařené vzorky byly podrobeny zkoušce tahem a vyhodnocení makrostruktury svarového spoje.

Pro galvanicky pozinkované vzorky lze jako optimální svařovací proud doporučit 20 A. Během tahové zkoušky bylo dosaženo nejvyšších hodnot tažnosti a meze pevnosti s nejmenším rozptylem hodnot. U všech tahových těles došlo k porušení v základním materiálu. Stejně tak v případě metalografického vyhodnocení normou ČSN EN ISO 13919-1 pro laserové svary a ČSN EN ISO 12932 pro hybridní svary bylo dosaženo v rámci jednotlivých typů vzorků nejvyššího jakostního stupně, tedy stupně C. Proud 20 A se tedy jeví jako nejvhodnější ze zkoumaných parametrů svařovacího proudu. Přesto však doporučuji toto tvrzení ověřit na vyšším počtu tahových těles a metalografických výbrusů, případně i jinými zkouškami.

U zároveň pozinkovaných vzorků došlo při tahové zkoušce u všech typů vzorků k porušení ve svaru v minimálně jednom případě ze tří. Z hlediska dosažené meze pevnosti lze jako nejschůdnější zvolit vzorky B40, neboť u nich byly naměřeny nejvyšší hodnoty s nejmenším rozptylem. V případě metalografického vyhodnocení normou ČSN EN ISO 13919-1 pro laserové svary a ČSN EN ISO 12932 pro hybridní svary bylo dosaženo nejvyššího jakostního stupně, tedy D, u vzorků B30 a B40, přičemž proud 30 A se jeví jako vhodnější z důvodu menších rozměrů vad a menšího tepelného ovlivnění materiálu. Pro ověření metody Laser-TIG pro zároveň pozinkované plechy doporučuji provést další výzkum a případně zvolit jiný proměnný svařovací parametr. Při žádné ze zkoumaných hodnot proudu nelze zaručit spolehlivý svar.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Optoelectronics: a green explosion. *Physics World* [online]. 28. duben 2011 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://physicsworld.com/a/optoelectronics-a-green-explosion/>
2. Laser welding - LaserTherm. *LaserTherm* [online]. [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/eng/technologies/laser-technologies/laser-robotic-welding>
3. 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. *Welding Processes* [online]. 2012 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: doi:10.5772/53562
4. KIM, Cheolhee, Woongyong CHOI, Jeonghan KIM a Sehun RHEE. Relationship between the Weldability and the Process Parameters for Laser-TIG Hybrid Welding of Galvanized Steel Sheets. *MATERIALS TRANSACTIONS* [online]. 2008, **49**(1), 179–186. ISSN 1345-9678, 1347-5320. Dostupné z: doi:10.2320/matertrans.MER2007159
5. HAVRÁNKOVÁ, Zdeňka. *Příručka žárového zinkování*. 2. vyd. 2008.
6. ROUBÍČEK, Martin. Příspěvek do problematiky spojování pozinkovaných plechů. *adoc.pub* [online]. 2014 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <https://adoc.pub/pispvek-do-problematiky-spojovani-pozinkovanych-plech.html>
7. ZEDNÍČEK, Zbyněk. *Testování lepených ocelových plechů s povlakem zinku* [online]. Fakulta strojního inženýrství, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=92292
8. Technologie a technika lepení - základní informace. *Lepidla.cz* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html>
9. Lepení ve výrobě karoserie | MM spektrum. *www.mmspektrum.com* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lepeni-ve-vyrobe-karoserie>
10. Lepení kovů. *Lepidla.cz* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/a/lepeni-kovu.html>
11. Odporové zvarovanie. *MatNet.sk* [online]. [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=382&pg=3>
12. *Odporové svařování | ROCKWELD-GROUP* [online]. [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://www.rockweld.cz/odporove-svarovani/>
13. ZHANG, X.Q., G.L. CHEN a Y.S. ZHANG. Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels. *Materials & Design* [online]. 2008, **29**(1), 279–283. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2006.10.025
14. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení*. 1. vyd. 2001. ISBN 80-85771-81-0.

15. HÁJKOVÁ, Petra. *Svařování pozinkovaných a austenitických plechů v sériové výrobě* [online]. Fakulta strojní, 2014. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Dostupné z: http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/104907/HAJ0010_FS_N2301_2303T002_20_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y
16. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Laserové svařování I (laser welding) > LAO - lasery a optika. *Lasery a optika* [online]. 15. červenec 2011 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
17. LAPŠANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. *Portál moderní fyziky* [online]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
18. *MIG pájení pozinkovaných autokarosářských dílů* [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/mig-pajeni-mig-brazing/>
19. ZHOU, J. a H. L. TSAI. Hybrid Laser-Arc Welding. *Welding Processes* [online]. 2012 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: doi:10.5772/50113
20. OLSEN, Flemming Ove, ed. *Hybrid laser-arc welding*. Boca Raton, Fla.: CRC Press [u.a.], 2009. Woodhead publishing in materials. ISBN 978-1-84569-370-1.
21. KESSE, Martin Appiah. Laser-TIG hybrid welding process [online]. 2013 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/91432>
22. Essential considerations for laser welding. *The Fabricator* [online]. [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/laserwelding/essential-considerations-for-laser-welding>
23. Protection against rust with zinc coating. *SSAB* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/products/steel-categories/metal-coated-steels/coatings/zinc-coating>
24. CÍSAŘOVÁ, Michaela. *Vliv morfologie povlaku Zn na mezní podmínky při tažení tenkých plechů* [online]. Fakulta strojního inženýrství, 2012. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=59580
25. Zinkování alkalické. *Bárta a Cihlář - povrchové technologie* [online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <http://www.povrchove-technologie.cz/cz/technologie/zinkovani-alkalicke/>
26. Sherardování - termodifuzní zinkování - ALPHA Union, spol. s r.o. *Alphaunion* [online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <http://www.alphaunion.cz/nabidka/sherardovani-termodifuzni-zinkovani>
27. Kondukční svařování. *Trumpf.com* [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/kondukcnisvarovani/

28. Conduction Mode vs. Keyhole Mode Laser Welding. *EWI* [online]. 20. únor 2015 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://ewi.org/conduction-mode-vs-keyhole-mode-laser-welding/>
29. KANNATEY-ASIBU, E. *Principles of laser materials processing*. Hoboken, N.J: Wiley, 2009. Wiley series on processing of engineering materials. ISBN 978-0-470-17798-3.
30. Laser Welding Modes: Conduction, Transition, & Keyhole Welding. *AMADA WELD TECH* [online]. 19. leden 2016 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://amadaweldtech.com/blog/laser-welding-modes-conduction-transition-keyhole-welding/>
31. Hluboké svařování. *Trumpf.com* [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/hluboce-svarovani/
32. CHLÁD, Luboš. *Svařování ocelí s rozdílnými vlastnostmi pomocí YB-YAG laseru* [online]. Fakulta strojního inženýrství, nedatováno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <https://docplayer.cz/24124127-Svarovani-oceli-s-rozdilnymi-vlastnostmi-pomoci-yb-yag-laseru.html>
33. KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (2) - svařovací lasery | MM Průmyslové spektrum. *www.mmspektrum.com* [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery>
34. ŠEBESTOVÁ, Hana. *Vybrané aspekty laserového svařování*. Přírodovědecká fakulta, nedatováno. Disertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci.
35. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
36. CHMELÍČKOVÁ, Hana a Hana ŠEBESTOVÁ. Pulsed Laser Welding. *Nd YAG Laser* [online]. 2012 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: doi:10.5772/36414
37. Rozdělení laserů. *LASCAM systems* [online]. 2. srpen 2015 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
38. Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu > LAO - lasery a optika. *Lasery a optika* [online]. 19. únor 2013 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
39. Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red - Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení. *Leonardo technology* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
40. HOLUB, Matyáš. *Studium vlivu mezery na vlastnosti laserem provedeného tupého svaru* [online]. Fakulta strojního inženýrství, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/91954>

41. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení > LAO - lasery a optika. *Lasery a optika* [online]. 19. únor 2013 [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
42. O svařovařovací metodě TIG. *Alfin Trading* [online]. 16. únor 2018 [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: [/o-svarovani-tig](#)
43. M, Rifki. TIG Welding (GTAW) Guide. *Weld Guru* [online]. 30. listopad 2019 [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://weldguru.com/tig-welding/>
44. TIG svařování I – základní principy. *Svarinfo* [online]. 7. leden 2009 [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008011702>
45. TIG (Tungsten Inert Gas Welding). *Automig* [online]. [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatig/>
46. TIG, WIG, GTAW. *AEK svařovací technika* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.aek-svareci-technika.cz/odbornik-radi-metoda-tig.html>
47. Druhy a použití W-elektrod. *SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ* [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/druhy-a-pouziti-wolframovych-elektrod/t-30/t-107>
48. TIG svařování II – AC nebo DC? *Svarinfo* [online]. [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008122801>
49. BARTÁK, Jiří. CWS ANB: Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. 1. březen 2012 [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
50. What are cracks? > Welding Inspectors. *Welding Inspectors* [online]. 18. srpen 2015 [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <https://welding-inspectors.com/cracks/>
51. Štúdium vzniku trhlin na zvarových kovech termomechanicky spracovaných plechov typu Armax. *Engeneering.sk* [online]. [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/strojiarstvo-extra/1792-tudium-vzniku-trhlin-na-zvarovych-kovochtermomechanicky-spracovanych-plechov-typu-armox>
52. Vady ve svarech. *Elektrody.cz* [online]. [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <https://www.elektrody.cz/vady-ve-svarech>
53. Provádění NDT kontroly a hodnocení svarů na konstrukcích | Strojirensky.NET. *Strojirensky.net* [online]. 26. listopad 2009 [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <http://strojirensky.net/2009/11/26/provadeni-ndt-kontroly-a-hodnoceni-svaru-na-konstrukcich/>
54. SOUKUP, Tomáš. Konstruktor a nedestruktivní kontroly svarových spojů. *SVAROX Technology* [online]. Dostupné z: <http://svarox.cz/wp-content/uploads/Konstruktor-a-nedestruktivni-kontroly-svarov%C3%BDch-spoj%C5%AF.pdf>

55. 10 Welding Defects and Discontinuities Causes & Remedies. *weldingis.com* [online]. 31. květen 2020 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.weldingis.com/welding-discontinuities/>
56. ŠTORKÁN, Zdeněk. Problematika hodnocení svarových spojů. *Konstrukce* [online]. 9. prosinec 2014 [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
57. Hodnocení kvality svarového spoje: Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie. *ČVUT* [online]. 2011. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/104/def-kontrola-sv.pdf>
58. ČESKÁ SVÁŘEČESKÁ SPOLEČNOST ANB. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 978-80-85771-85-5.
59. ČESKÁ SVÁŘEČESKÁ SPOLEČNOST ANB. *Materiály a jejich chování při svařování: Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*. 2016.
60. VODÁREK, Vlastimil. *Metody studia struktury: učební text*. 1. vyd. 2010. ISBN 978-80-248-2559-5.
61. Oceli válcované za studena – dle EN. *Pásová ocel s. r. o.* [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.pasovaocel.cz/produkty/vyrobni-program/ocel-valcovana-za-studena-dle-en/>
62. Product Catalogue 2017. *Erdemir Group* [online]. Dostupné z: https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/Urun_katalogu_EN-1270.pdf
63. MRŇA, Libor. Výkonový laser IPG YLS2000. *Ústav přístrojové techniky* [online]. 23. leden 2018 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.isibrno.cz/cs/vykonovy-laser-ipg-yls2000>
64. IRB 2400 - Průmyslové roboty | ABB. *ABB* [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-2400>
65. MagicWave 1700. *Fronius Perfect Welding* [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: [http://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyrobky/ruční-svařování/tig/magicwave/magicwave-1700](http://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyrobky/ručni-svařování/tig/magicwave/magicwave-1700)
66. MagicWave 1700. *HBT Weld s.r.o.* [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://hbt-weld.cz/produkty/magicwave-1700/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
b_0	Počáteční šířka vzorku	[mm]
D_{LA}	Vzdálenost mezi laserovým svazkem a obloukem	[mm]
DPSS	Diode Pumped Solid State	-
E	Energie pulzu	[J]
f	Frekvence pulzů	[Hz]
I	Svařovací proud	[A]
LPSS	Lamp Pumped Solid State	-
MAG	Metal Aktiv Gas	-
MIG	Metal Inert Gas	-
MMA	Manual Metal Arc	-
P	Výkon laserového svazku	[W]
P_{max}	Maximální výkon pulzu	[W]
Q_{laser}	Vnesené teplo laserem	[kJ/mm]
Q_{TIG}	Vnesené teplo TIGem	[kJ/mm]
Q_{celk}	Celkové vnesené teplo	[kJ/mm]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
s	Poloha ohniska vzhledem k povrchu materiálu	[mm]
t_0	Počáteční tloušťka vzorku	[mm]
TIG	Tungsten Inert Gas	-
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	-
U	Svařovací napětí	[V]
v	Svařovací rychlost	[m/min]
YAG	Yttrium Aluminium Granát	-
Z	Kontrakce	[%]
ϵ_{laser}	Tepelná účinnost laseru	[%]
ϵ_{TIG}	Tepelná účinnost TIGu	[%]
τ	Délka pulzu	[s]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Svařování karoserie laserem [1]	9
Obr. 2 Laserový svár [2]	9
Obr. 3 Problémy při svařování pozinkovaných plechů [3]	10
Obr. 4 Degradace elektrody [13]	12
Obr. 5 Svařování laserem [22]	13
Obr. 6 Strojní nanášení lepidla [9]	14
Obr. 7 Postup žárového zinkování suchým způsobem [5]	16
Obr. 8 Postup žárového zinkování mokřím způsobem [5]	17
Obr. 9 Postup kontinuálního žárového zinkování pásu plechu [5]	17
Obr. 10 Vzorky po 1500 h v solné mlze (žárové zinkování vlevo, galvanické vpravo) [26] ..	18
Obr. 11 Tvar svaru při kondukčním módu [28]	19
Obr. 12 Tvar svaru při penetračním módu [28]	20
Obr. 13 Schéma kondukčního (vlevo) a key-hole módu (vpravo) [32]	20
Obr. 14 Závislost hloubky svaru na svařovací rychlosti pro různé hodnoty proudu [29]	21
Obr. 15 Horní pohled (a) a podélný průřez svaru (b) při pulzním režimu [36]	22
Obr. 16 Schéma vláknového laseru [38]	23
Obr. 17 Schéma diskového laseru [34]	24
Obr. 18 Schéma CO ₂ laseru [38]	24
Obr. 19 Schéma TIG zařízení [45]	25
Obr. 20 Přímá polarita (a), nepřímá polarita (b), střídání polarity (c) [48]	27
Obr. 21 Konfigurace soustavy Laser-TIG [3]	28
Obr. 22 Závislost hloubky průvaru na výšce ohniska [20]	29
Obr. 23 Závislost hloubky průvaru na výkonu el. oblouku [20]	30
Obr. 24 Závislost hloubky a šířky svaru na svařovací rychlosti [20]	30
Obr. 25 Typy vad dle tvaru a polohy [49]	31
Obr. 26 Studená trhlina [49]	32
Obr. 27 Horká trhlina [49]	32
Obr. 28 Svarové póry [55]	33
Obr. 29 Struskový vměstek [55]	34
Obr. 30 Zápaly [55]	34
Obr. 31 Tahové diagramy kovových materiálů [32]	36
Obr. 32 Tloušťky povlaku zinky pro galvanický povlak (vlevo) a žárový (vpravo)	39
Obr. 33 Laser YLS - 2000	39
Obr. 34 Schéma robotického ramena IRB 2400 [63]	40
Obr. 35 Svařovací TIG zdroj MagicWave 1700 Job [65]	40
Obr. 36 Upnutí svařovaných plechů	41
Obr. 37 Svařovací sestava Laser-TIG	41
Obr. 38 Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku	43
Obr. 39 Průběh zatěžování vzorků při tahové zkoušce	44
Obr. 40 Svary vzorků A00	45
Obr. 41 Svary vzorků A20	46
Obr. 42 Svary vzorků A30	47
Obr. 43 Svary vzorků A40	48
Obr. 44 Svary vzorků B00	50
Obr. 45 Svary vzorků B20	51

Obr. 46 Svary vzorků B30	52
Obr. 47 Svary vzorků B40	53
Obr. 48 Makroskopický snímek vzorku A00.....	55
Obr. 49 Makroskopický snímek vzorku A20.....	55
Obr. 50 Makroskopický snímek vzorku A30.....	56
Obr. 51 Makroskopický snímek vzorku A40.....	57
Obr. 52 Makroskopický snímek vzorku B00.....	57
Obr. 53 Makroskopický snímek vzorku B20.....	58
Obr. 54 Makroskopický snímek vzorku B30.....	59
Obr. 55 Makroskopický snímek vzorku B40.....	59

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Srovnání žárového a galvanického zinkování. [26].....	18
Tab. 2 Chemické složení oceli DC01.[61].....	37
Tab. 3 mechanické vlastnosti oceli DC01.[61]	37
Tab. 4 Chemické složení oceli WSS M1A 365-A14. [62]	38
Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli WSS M1A 365-A14. [62]	38
Tab. 6 Tloušťka povlaku galvanicky pozinkovaných vzorků.....	38
Tab. 7 Tloušťka povlaku žárově pozinkovaných vzorků.	38
Tab. 8 Vstupní parametry a výpočet vneseného tepla pro galvanicky pozinkované vzorky.	42
Tab. 9 Vstupní parametry a výpočet vneseného tepla pro žárově pozinkované vzorky.	43
Tab. 10 Naměřené hodnoty mechanických vlastností galvanicky pozinkované oceli.	44
Tab. 11 Naměřené hodnoty mechanických vlastností žárově pozinkované oceli.....	44
Tab. 12 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků A00.....	45
Tab. 13 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků A20.....	46
Tab. 14 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků A30.....	47
Tab. 15 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků A40.....	49
Tab. 16 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků B00.....	50
Tab. 17 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků B20.....	51
Tab. 18 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků B30.....	52
Tab. 19 Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků B40.....	53
Tab. 20 Zhodnocení makroskopických snímků.	60

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 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 evropské 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