



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**SVAŘOVÁNÍ GALVANICKY POZINKOVANÝCH PLECHŮ
POMOCÍ HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE LASER-TIG**

WELDING OF GALVANIZED SHEETS USING HYBRID LASER-TIG TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Antes

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Jiří Antes
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 galvanicky pozinkovaných plechů pomocí hybridní technologie Laser–TIG

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ověřit svařování galvanicky 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

ANTES, Jiří: Svařování galvanicky pozinkovaných plechů pomocí hybridní technologie Laser-TIG

Práce se soustředí na problematiku svařování hlubokotažných plechů se zinkovou ochrannou vrstvou metodou Laser-TIG. Problematika je nejprve probrána z teoretického hlediska, kde jsou rozebrány technologie svařování, vliv materiálu a použití diagnostických metod pro odhalení svarových vad. Zbytek práce se pak věnuje praktickému experimentu, který spočíval ve zkoumání vlivu výbojového proudu na kvalitu svarů vzorků se dvěma použitými typy spojů.

Klíčová slova: Svařování, WSS-M1 A365 A14, galvanické zinkování, laser, TIG, Laser-TIG

ABSTRACT

ANTES, Jiří: Welding of galvanized sheets using hybrid Laser-TIG technology

This master thesis deals with the welding of zined deep drawing steel using Laser-TIG technology. The first section of the thesis describes the topic from the theoretical point of view, which includes analysis of welding technologies, influence of used material and application of diagnostic methods. The second part of the thesis is focused on monitoring of welding current impact for weld quality of two types of joints.

Keywords: Welding, WSS-M1 A365 A14, zinc electrogalvanizing, laser, TIG, Laser-TIG

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ANTES, Jiří. *Svařování galvanicky pozinkovaných plechů pomocí hybridní technologie Laser-TIG* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132380>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto práci na téma *Svařování galvanicky pozinkovaných plechů metodou Laser-TIG* vypracoval samostatně na základě konzultací s vedoucím práce a uvedené literatury a podkladů.

V Uničově 17.5.2021

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D za vedení při vypracování této práce a zaměstnancům ÚPT AV ČR a Miele technika s.r.o., kteří mi byli nápomocní při vyhodnocování provedených zkoušek. Dále pak děkuji svým blízkým za podporu během celého studia.

OBSAH

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.1 Možnosti řešení	10
2 SVAŘOVÁNÍ LASEREM	14
2.1 Lasery v průmyslu	14
2.2 Princip laserového svařování.....	17
2.3 Svařování pomocí TIG	20
2.4 Hybridní svařování Laser-TIG	21
3 SVAŘOVANÝ MATERIÁL.....	23
3.1 Zinkování.....	23
3.2 Vady svaru.....	25
3.3 Nedestruktivní zkoušky	27
3.4 Destruktivní zkoušky	29
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	32
4.1 Příprava svarů	32
4.2 Vizuální hodnocení.....	35
4.3 Metalografické hodnocení	36
4.4 Tahová zkouška	43
4.5 Hodnocení mikrostruktury.....	54
4.6 Shrnutí experimentální části	56
4.7 Technicko-ekonomické hodnocení.....	57
5 ZÁVĚRY	58

Seznam literatury

Seznam zkratk

Seznam tabulek

Seznam obrázků

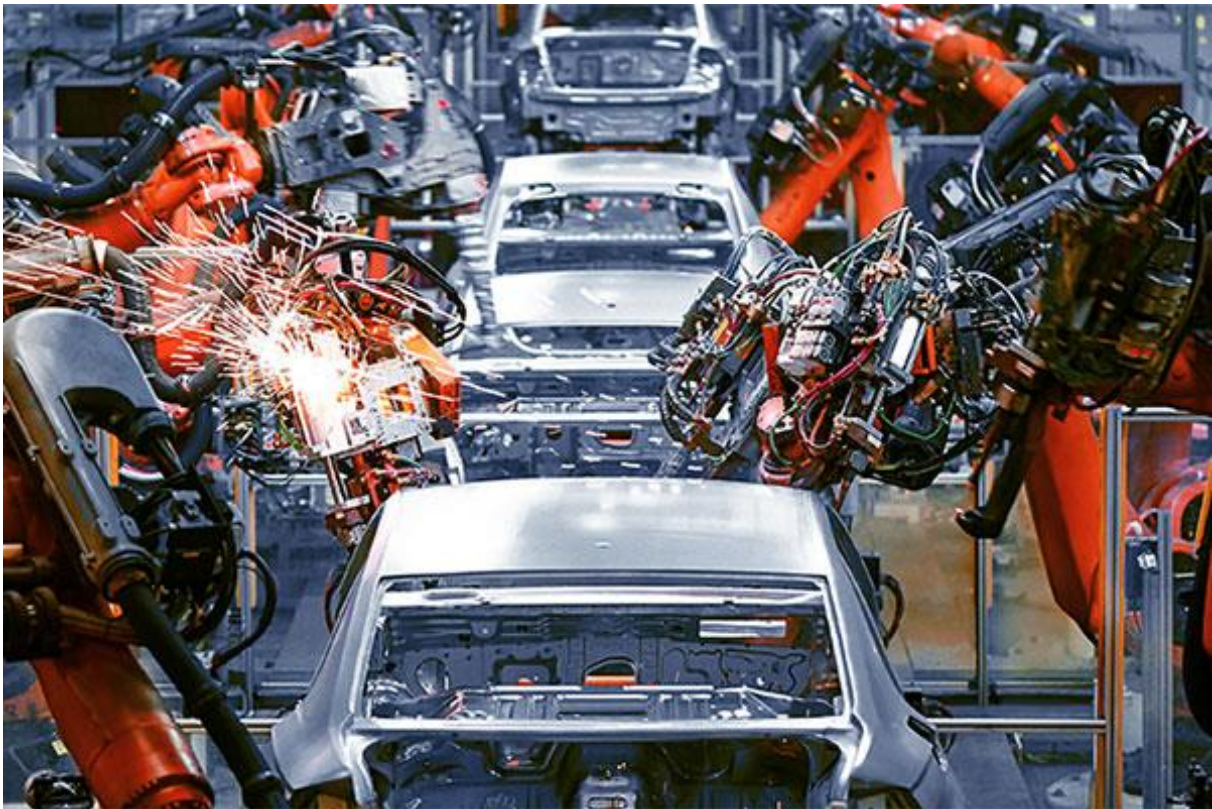
Seznam příloh

ÚVOD [57]

S výrobou spotřebního zboží je kladen velký důraz na jeho odolnost, estetický vzhled a výrazně také na jeho výrobní cenu. Obecně lze říci, že s klesajícími náklady na výrobu, klesá i prodejní cena, která dovoluje nákup daného produktu širšímu spektru potenciálních zákazníků. Proto je rozšířena snaha využití levnějších materiálů v místech, kde to technologičnost a zamýšlené použití produktu dovolují.

V případě hlubokotažných plechů je skloubena nízká cena materiálu s výbornou tvařitelností, umožňující jejich široké využití. Tyto plechy jsou díky nízkému obsahu legujících prvků velmi levné a jejich chybějící vlastnosti jako je zvýšená koroziodolnost jsou nahrazovány povrchovými úpravami, které materiál zlepšují i po estetické stránce.

Často využívanými způsoby povrchových úprav jsou lakování, smaltování či kovové povlaky. Použití takto upravených hlubokotažných plechů je rozšířeno v mnoha odvětvích, od výroby automobilů po domácí spotřebiče. Právě při použití těchto plechů v automotive je kladen důraz na rychlé, kvalitní a šetrné metody jejich spojování. Pomineme-li mechanické technologie spojování, zabírá velké místo v této oblasti svařování, jehož mnohé způsoby jsou v automotive hojně používány (obr.1). Velké zastoupení má svařování laserem díky jeho vlastnostem, které v tomto typu průmyslu vykoupi i jeho vysokou pořizovací cenu. V případě svařování plechů s povrchovými úpravami obvykle dochází k projevu různých problémů, které nejsou pro danou aplikaci akceptovatelné a provádějí se tedy úpravy technologií či jejich kombinace, které daný problém eliminují.



Obr. 1 Svařování v automotive [57]

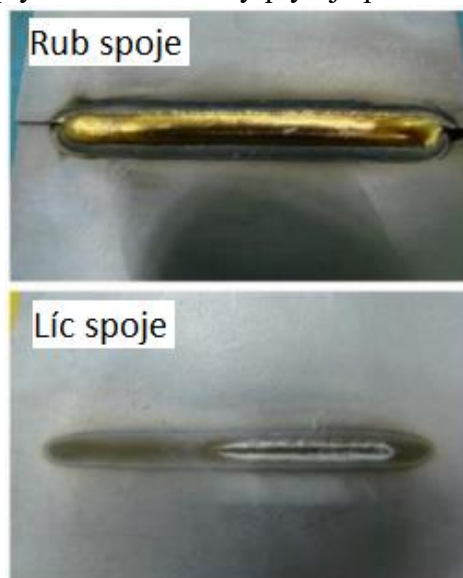
1 ROZBOR ZADÁNÍ

Při svařování pozinkovaných ocelových plechů laserem dochází k problémům, které jsou způsobené právě zinkovou vrstvou na povrchu oceli. V a okolo svarové lázně dochází, vzhledem k teplotě varu zinku 906 °C, k jeho intenzivnímu vypařování a značnému rozstříku kovu, který jednak poškozuje kvalitu povrchu svařovaného materiálu a také způsobuje nedostatek taveniny k vytvoření kvalitního svarového spoje. To také vede k výraznému zhoršení vizuální stránky objektu, na jehož povrchu ulpívají zbytky taveniny a oxidických produktů vypařujícího se zinku a roztavené oceli. Další, potenciální hrozbou je zkřehnutí vzniklé difuzí zinku do oceli.

1.1 Možnosti řešení [1, 2, 3, 4, 5, 11, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 59]

Ke spojování pozinkovaných plechů je možné použít široké spektrum technologií, které mají různý vliv na spojovaný materiál. Tyto způsoby a jejich výhody či nevýhody jsou stručně probrány zde:

- MIG pájení - V automobilovém průmyslu využívaná metoda pro spojování plechů s ochrannými vrstvami a nerezových ocelí. Jako zdroj tepla zde funguje hořící elektrický oblouk, do kterého je přiváděna pájka a ochranný plyn. Jako ochranný plyn je používán argon s možnými příměsemi. Materiál pájky je obvykle slitina mědi a s dalšími legujícími prvky, hlavně křemíkem a hliníkem. Nízká teplota tání přídavného materiálu zajišťuje vznik spoje a minimální ovlivnění povrchové vrstvy plechů a s tím spojené zachování ochrany před korozi. Na obr.2 lze vidět spoj provedený MIG pájením z rubové i lícové strany. Na spodní části obrázku lze pozorovat bílou vrstvu vzniklou opálením zinku. Míra vneseného tepla je nižší než u svařování, a proto nedochází k výrazným tepelným deformacím. Nevýhodou této metody je nutnost zajištění přídavného materiálu a vznik prostorově výrazného spoje.
- MIG/MAG svařování - Metoda obloukového svařování s tavící se elektrodou v ochranném plynu (obr. 3), který reaguje s taveninou neboli s aktivní ochrannou atmosférou (MAG) nebo s inertní ochrannou atmosférou (MIG). Jedná se se o jednu z nejpoužívanějších metod, a to díky možnosti svařování širokého spektra materiálu ve vysoké kvalitě a nízkým nákladům na zařízení. Při svařování pozinkovaných plechů metodou MIG však dochází k celé řadě problémů. K těm dochází hned při zažehnutí oblouku, který kvůli parám zinku může být nestabilní. Páry zinku způsobují změnu vodivosti v prostředí oblouku a ten přeskakuje. Zároveň s tím dochází



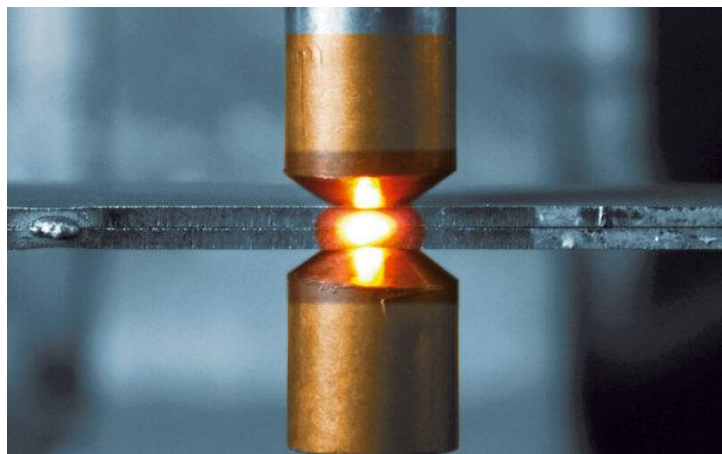
Obr. 2 Rub a líc pájeného spoje [18]

k odklonění ochranné atmosféry, která může být parami lokálně vytěsněna. Nestabilitou svařovacího procesu vzniká řada vad ve svařovém spoji. Kvůli vzniku a úniku par dochází k formování pórů ve svaru a rozstříku svařového kovu. K redukci těchto problémů může přispět správná volba ochranné atmosféry a polohování plechů tak, aby mezi nimi byla mezera, která parám umožní uniknout ze svařového spoje. Za zmínku stojí technologie CMT (cold metal transfer) od firmy Fronius, která díky velice malému vnesenému teplu a vysoce stabilnímu oblouku umožňuje svařování i rozdílných materiálů jako jsou ocel a hliník.



Obr. 3 MIG svařování [19]

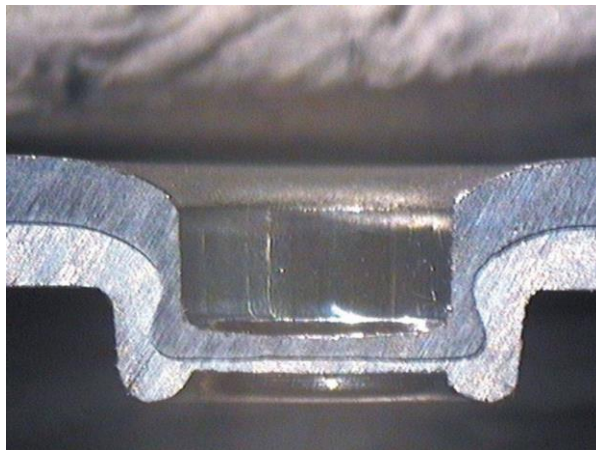
- **Odporové svařování-** Při odporovém svařování vzniká teplo díky přechodovému odporu mezi dvěma materiály, které jsou sevřeny mezi elektrodami (obr. 4). Průchodem proudu dojde k roztavení kovu v místě dotyku a zároveň spojení díky působícímu tlaku elektrod. Elektrody mohou mít různé tvary a sloužit tak pro více druhů svarů např. bodové, švové nebo výstupkové. Elektrody jsou vyráběny z mědi pro dobrou elektrickou vodivost. Proces odporového svařování je v průmyslu široce automatizován a používá se například pro svařování karoserií, objevují se však i ruční aplikace. Nevýhodou odporového svařování je nutnost údržby svařovacích elektrod, které se kvůli své měkkosti rychle otlačují, čímž se mění geometrie a kvalita svaru a u pokovených materiálu dochází k degradaci samotného materiálu



Obr. 4 Odporové svařování [20]

elektrody. Například u pozinkovaných plechů difunduje zinek do povrchu měděné elektrody a vytváří vrstvu mosazi, což zhoršuje elektrické vlastnosti elektrody. Na druhou stranu je tato technologie vhodná pro pozinkované plechy, protože díky působícímu tlaku elektrod a místě vzniku odporového tepla dochází k vytlačení taveniny a par zinku a vznikají tak kvalitní svary i pozinkovaných plechů. Dosah odporového svařování je však omezen složitou konstrukcí a nutností přilehnutí elektrod z obou stran materiálu, v případě automobilového průmyslu tak u některých složitých komponent nelze tuto technologii uplatnit.

- **Klinčování** – Technologie spojování plechů za studena, která využívá plastické deformace k vytvoření mechanického zámku mezi plechy bez přítomnosti přídavného materiálu (obr. 5). Touto technologií lze spojovat plechy o rozdílné tloušťce i z rozdílného materiálu. Klinčování je vhodné pro spojování pokovených plechů, protože nedochází k porušení povrchové vrstvy. Klinčování je alternativou k bodovému svařování a má široké uplatnění v automotive a výrobě bílé techniky. Nevýhodou této technologie je podobně



Obr. 5 Klinčování [59]

jako u odporového svařování složitost a prostorová náročnost zařízení k vytvoření některých spojů a také bodový charakter spoje, který není pro některé aplikace dostatečný.

- **Lepení** - Dochází ke spojení dvou materiálů pomocí lepidla (obr. 6), které musí dobře přilnout k povrchům materiálů (adheze) a také musí vykazovat dostatečnou pevnost sebe sama (koheze). Lepidlo musí být také dostatečně smáčivé, aby pokrylo povrch lepeného materiálu. Vazba mezi povrchem materiálu a lepidlem je dvojího druhu. Mechanická, kdy záleží na pórovitosti povrchu a schopnosti lepidla se do něj „vsáknout“ a chemická, kdy jsou využity kohezní a Van der Waalsovy síly. Lepené spoje mají velké využití v automobilovém průmyslu, kde se pro ně využívají hlavně lepidla na bázi kaučuku a epoxidových pryskyřic. Kaučukových lepidel se využívá v místech spojů, kde funguje jako tlumič vibrací. Epoxidových pryskyřic je využíváno například pro lepení lemů dveří nebo částí podlahy. Většina lepidel je jednosložková a jsou vytvrzována při zapékání laku karoserie. Jsou však využívána i lepidla dvousložková. Při lepení komponentů nedochází k porušení plechu ani povrchové vrstvy a není tak v těchto místech snížena korozi odolnost. Nevýhodou metody je nutnost úpravy povrchů pro dostatečnou adhezi lepidla, složitost zařízení, které musí zajišťovat jak nanesení lepidla, tak přitlačení jednotlivých komponent.



Obr. 6 Aplikace lepidla [22]

- Laserové svařování - Laser byl představen roku 1960 a od té doby našel široké spektrum využití. V průmyslu je využíván hlavně pro řezání, svařování (obr. 7), tepelné či povrchové úpravy. Podle normy ČSN EN ISO 4063 se dělí podle metody laserového svařování, a to na svařování pevnolátkovým laserem (metoda 521), svařování plynovým laserem (metoda 522) a svařování diodovým laserem (metoda 523). Zdroje záření budou popsány dále. Svařování laserem je velice produktivní metodou, kterou lze využít pro zpracování širokého spektra materiálů. Výhodou je také úzká tepelně ovlivněná oblast.



Obr. 7 Svařování laserem [21]

Nevýhody této technologie mohou spočívat ve vysokých rychlostech ochlazování materiálu, což vyúsťuje ve vznik křehkých oblastí, hlavně u více legovaných materiálů.

K eliminaci tohoto jevu existuje snaha využít hybridních technologií svařování, kdy je laserový zdroj energie doplněn obloukovým zdrojem tepla (MAG, MIG, TIG), který svými účinky přispívá ke vzniku spoje požadovaných vlastností. Předpokládá se, že hybridní metody mohou přinášet pozitiva i do oblasti svařování materiálů s povrchovými úpravami, které u běžně používaných metod negativně ovlivňují kvalitu svarů, což je tématem této práce. Ta je soustředěna na reálné využití hybridní metody Laser-TIG v problematice svařování hlubokotažných plechů s povrchovou úpravou zinkováním.

2 SVAŘOVÁNÍ LASEREM [9, 32]

Laser (light amplification by stimulated emission of radiation – zesílení světla stimulovanou emisí záření). Laser je optický zesilovač, který čerpá aktivní médium. Atomy aktivního prostředí jsou ozářením vlnou s danou frekvencí vybuzeny do vyšší energetické hladiny. Při navrácení se na původní (nižší) energetickou hladinu je emitován foton o energii, která je rovna rozdílu energií obou hladin. Vyzářený foton poté může putovat různým směrem a pokud narazí do jiného excitovaného atomu, je vyzářen další foton o stejné fázi, energii a směru jako původní foton. Fotony jsou usměrňovány zrcadly rezonátoru, který se skládá z jednoho odrazivého a jednoho polopropustného zrcadla. Dochází k zesílení záření, které následně prochází polopropustným zrcadlem. Z rezonátoru pak vychází laserový paprsek, který je monochromatický (záření paprsku je v úzkém rozmezí vlnové délky), koherentní (vlny paprsku mají stejnou počáteční fázi). Důležitou vlastností laseru je možnost zaostření svazku do bodu. Typický průměr fokusované oblasti je od 100 μm do 1000 μm díky čemuž můžeme dosahovat plošné hustoty výkonu až $10^{13} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ a to pro řezání. Pro svařování se nejvyšší plošné hustoty výkonu dosahuje při penetračním režimu svařování a to kolem $10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Srovnání plošné hustoty výkonu s jinými technologiemi svařování je znázorněno v tab. 1.

Tab. 1 Srovnání tepelných zdrojů [32]

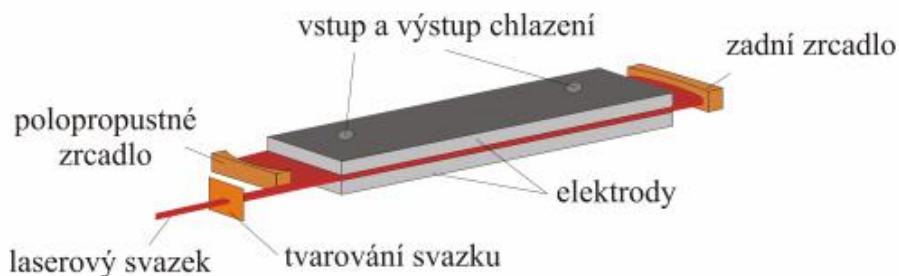
Metoda	Plošná hustota energie [W/cm^2]	Svařovací rychlosti [m/min]
Plamen	10^3	0,01
Elektrický oblouk	10^4	0,5 - 3
Plasma	10^6	0,5 - 5
Laser	10^9	10
Elektronový paprsek	10^8	0,5 - 5

2.1 Lasery v průmyslu [1, 6, 3, 7, 8, 27, 28, 31, 58, 61]

CO₂ lasery

Jedná se o nejstarší průmyslově používanou laserovou technologii. Jako aktivní prostředí je využívána směs plynů, většinou oxidu uhličitého, dusíku a helia. Používají se pro značení a gravírování. Vysokého významu však nabývají v oblasti řezání a svařování ocelových plechů, kdy jsou díky vysoké absorpci schopny vysokého průvaru až 45 mm. Široké uplatnění však mají i při zpracování organických materiálů jako dřevo, papír či kůže. Paprsek má nízkou rozbíhavost. Tento typ laseru dosahuje v kontinuálním režimu výkonu v řádu kilowatt, v impulsním režimu dokonce až terrawatt.

Tyto lasery se budí radiofrekvenčně nebo elektrickým výbojem. Účinnost buzení se pohybuje mezi 10 až 20 %, z toho plyne, že zbytek energie, který není využit pro vybuzení elektronů do excitovaného stavu, se přemění na teplo, které zatěžuje laserový zdroj. Tomuto jevu je přizpůsobena konstrukce zdroje, rezonátor může být hermeticky uzavřený nebo průtočný, obvykle je rezonátor vyroben z křemenného skla ve formě trubice, která je naplněná plynem. V případě hermeticky uzavřeného rezonátoru je nutné zajištění chlazení, které probíhá kapalným médiem, případně vzduchem, pokud se jedná o laser s nižším výkonem. Průtočným rezonátorem během činnosti plyn proudí a tím zároveň ochlazuje rezonátor. V případě průtočných rezonátorů dochází k vysoké spotřebě aktivního plynu.

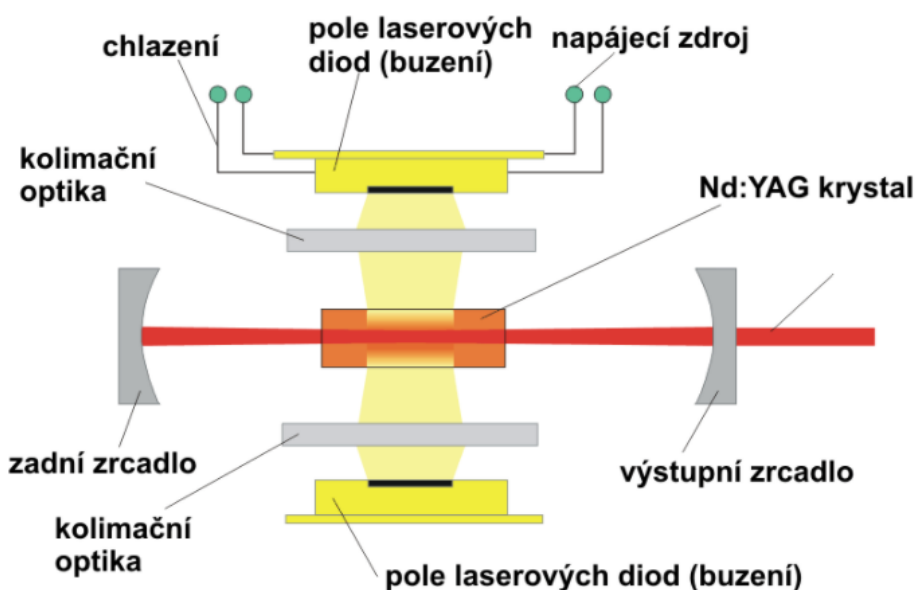


Obr. 8 SLAB laser [8]

Často využívaným typem CO₂ laserů jsou tzv. slab lasery (obr.8). Mají kompaktní rozměry a výkon kolem 5 kW. Čerpání aktivního prostředí probíhá radio-frekvenčním vlněním mezi dvěma elektrodami. Elektrodami proudí chladící médium a ty tak fungují jako chladiče.

Infračervené záření CO₂ laseru, které má vlnovou délku 10,6 μm (ale i 10,2 a 9,3 μm) není vhodné pro vedení pomocí skleněné optiky a optických vláken. Jsou proto používána zrcadla. Dosažitelný průměr spotu je kolem 0,2 mm. Zrcadla a jejich mechanické usazení způsobují komplikace při jejich údržbě a nastavení, což se odráží na nákladech i v časových prodlevách co se údržby týče. Také jsou náchylnější k mechanickému namáhání, zejména vibracím.

Nd:YAG



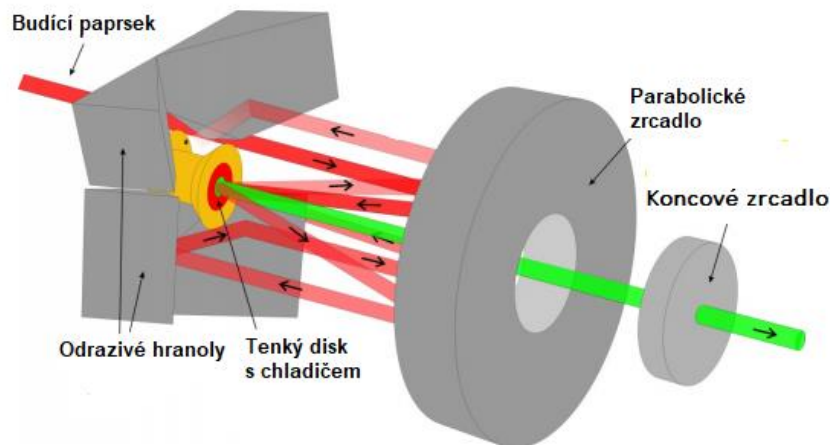
Obr. 9 Schéma Nd:YAG laseru [7]

Dlouho využívaný zdroj laserového záření, kde jako aktivní prostředí slouží matrice z yttrium hliníkového granátu, který je dopovaný ionty neodymu. Čerpání probíhá pomocí kryptonové nebo xenonové výbojky, kdy aktivní prostředí pohltí modrou a zelenou složku světla, jejichž vlnový rozsah se pohybuje od 450 μm do 850 μm a zabírají tak jen malou část z absorpčního rozsahu Nd:YAG, který je 0,790 μm až 830 μm. Z toho pramení nízká účinnost takto čerpaných laserů a nutnost chlazení vodou, kdy se energie nepřeměněná ve světelný tok mění na teplo. Tyto výbojkami čerpané lasery se využívají především pro svařování a vrtání v pulzním režimu

Pro zvýšení účinnosti Nd:YAG laserů bylo vyvinuto čerpání aktivního prostředí pomocí laserových diod namísto výbojek. Se zvýšenou účinností se zvyšuje i životnost čerpání. Konstrukce zdroje je naznačena na obr. 9.

Vlnová délka Nd:YAG laserů je $1,06\mu\text{m}$ a nachází se v oblasti krátkovlnného infračerveného záření. Toto spektrum poskytuje možnost dobrého využití pro zpracování kovů, které tuto oblast infračerveného záření snadno absorbují. Pro vedení paprsku lze použít skleněnou optiku či optická vlákna. Tento typ laseru však nedisponuje velkou kvalitou svazku, kvůli teplotním dilataci aktivního prostředí.

Diskový laser

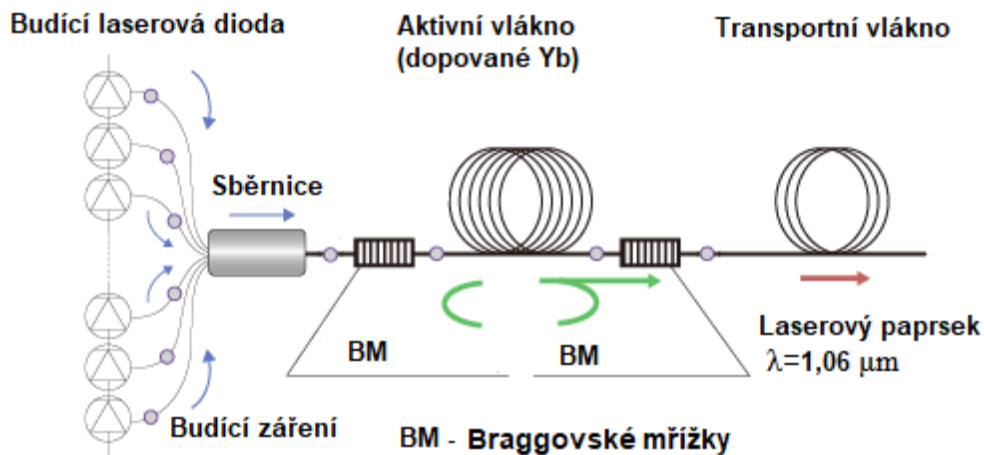


Obr. 10 Schéma diskového laseru [28]

Podobně jako u Nd:YAG je aktivní prostředí pevnolátkové. Aktivní prostředí je ve formě tenkého disku o tloušťce několika desetin milimetru a průměru až 100 milimetrů. U diskových laserů dochází ke stejnoměrnému zahřívání aktivního prostředí a díky geometrii disku v kombinaci s připevněným chladičem ze zadní strany laseru dochází k efektivnímu chlazení zařízení. To má také vliv na kvalitu výstupního svazku, která je výborná i při vysokých výkonech laseru, což byl u tyčových Nd:YAG laserů problém. Díky lepšímu zaostření svazku lze zvýšit pracovní rychlosti a tím zvýšit produktivitu práce a zmenšit tepelně ovlivněnou oblast. Diskové lasery dosahují výkonu až 16kW využívaného pro svařování a řezání kovů. Účinnost se pohybuje do 20 %. Schéma tohoto typu zdroje je vyobrazeno na obr. 10.

Vláknový

Vývojově nejmladší v průmyslových aplikacích běžně používaný pevnolátkový laser. Aktivní prostředí představuje nejčastěji ytterbiem, případně erbiem, či praseodymem dopované optické vlákno a čerpání probíhá pomocí laserových diod (obr. 11). Samotné vlákno se skládá z vnitřního aktivního vlákna a vnějšího budícího vlákna, které ho obklopuje. Celé vlákno je ještě potaženo plastem pro zvýšení odolnosti. Výhodou vláknových laserů je právě jejich



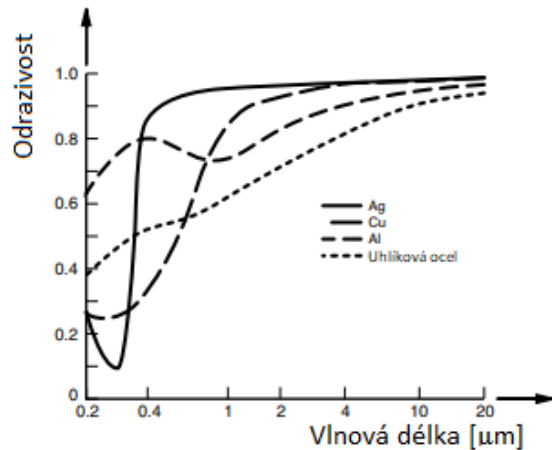
Obr. 11 Schéma vláknového laseru [27]

odolnost, kdy se v sestavě nenachází zrcadla, na kterých by docházelo ke ztrátám, musely se přestavovat nebo by byla náchylná na vibrace. Místo zrcadel ve vlákně-rezonátoru fungují Braggovy mřížky, což jsou struktury vytvořené přímo v optickém vlákně, jsou to místa v optickém vlákně, kde se mění index lomu a fungují jako zrcadla. V Braggových mřížkách samozřejmě dochází také ke ztrátám, ale blíží se nule. Vlákno má délku až několik desítek metrů a je ho tak díky velké ploše možné efektivně chladit vzduchem. Nutnost chlazení vodou nastává až při vysokých výkonech, kterých lze dosáhnout spojením více modulů dohromady, čímž lze dosáhnout výkonu až několik stovek kilowatt. Tyto lasery dosahují vynikající kvality a stability paprsku, který má vlnovou délku podobně jako jiné pevnolátkové lasery okolo 1,06 μm . Účinnost vláknového zdroje se pohybuje kolem 60 %. Díky způsobu vytvoření a vedení laserového paprsku přímo v optickém vlákně je možné jednoduché použití pro různé aplikace. Také nedochází ke ztrátám jako v případě použití optických vláken jen pro pasivní vedení paprsku mezi zdrojem a hlavou jako tomu je u klasických pevnolátkových zdrojů. Výhodou oproti pevnolátkovým zdrojům je také vyšší efektivita a ekonomičnost provozu, výrazně vyšší životnost vláknových laserů, která se pohybuje okolo 150 000 hodin oproti 20 000 hodinám u pevnolátkových. Ke spolehlivosti systému také přispívá absence optických elementů v oblasti rezonátoru. Vláknové lasery mohou pracovat v pulzním i kontinuálním režimu

2.2 Princip laserového svařování [3, 8, 9, 10, 11, 5, 24, 25, 32, 64]

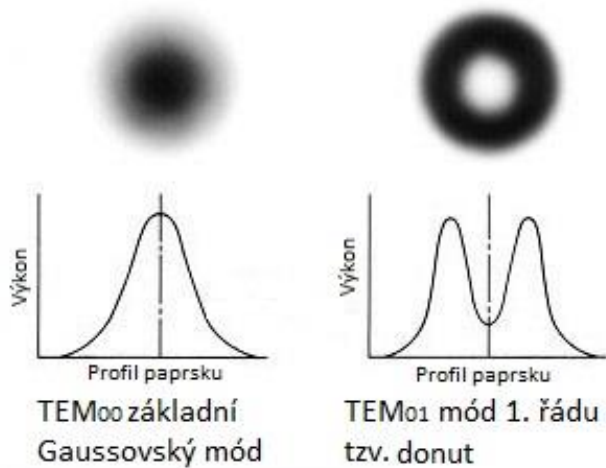
Podle ČSN EN ISO 4063 jde o metodu svařování číslo 52. Jedná se o technologii svařování s vysokou hustotou energie, pro svařování až $10^9 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Z toho pramení dobrá štíhlost svaru a malá tepelně ovlivněná oblast. V tab. 1 je stručné srovnání tavných metod svařování z pohledu plošné hustoty energie a svařovací rychlosti.

Vlastní ohřev materiálu laserem probíhá díky dopadu fotonů, které zvyšují frekvenci vibrací mřížky materiálu a zvyšuje se tak jeho teplota. Při dopadu fotonů je část pohlcena a přispívá k ohřátí materiálu a část odrazena. Tento proces je charakterizován součinitelem odrazivosti, který závisí na vlnové délce, jíž je daný materiál schopen absorbovat. Absorpce fotonů je také výrazně závislá na teplotě daného materiálu a úhlu dopadu laserového svazku na jeho povrch. Absorpci materiálu lze měnit, například pomocí předehřevu nebo použití povrchové úpravy. Na obr. 12 lze vidět závislost absorpce na vlnové délce pro různé kovy.



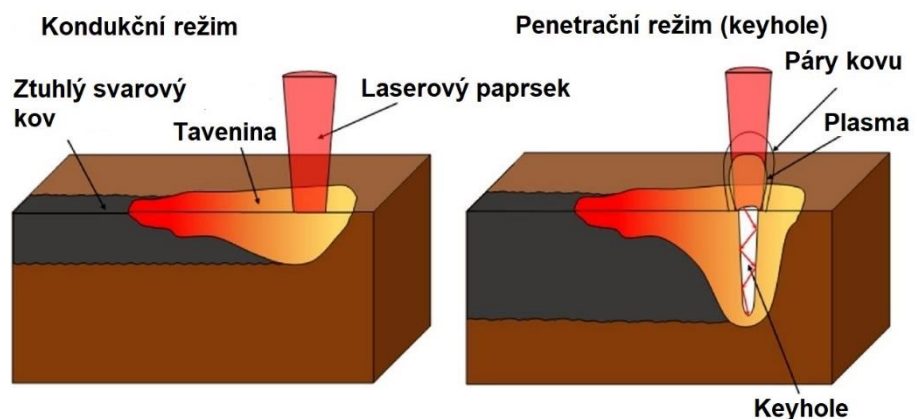
Obr. 12 Závislost odrazivosti na vlnové délce a materiálu [9]

Důležitým parametrem ovlivňujícím funkci a využití laserového svazku je příčný mód, ve kterém laser pracuje. Jedná se o rozložení energie paprsku v ploše. Základním příčným módem laserového paprsku je tzv. Gaussovský profil, kdy se záření soustředí do jednoho velmi malého bodu a dochází k nejvyšší plošné hustotě energie. Tento mód je označován jako TEM₀₀ a je používán převážně u vláknových laserů. Čím vyšší je dvojcísle za zkratkou TEM, tím více je svazek rozptýlen až po takzvaný multimodální profil (MM), kdy je záření soustředěno do dvou soustředných kružnic. V praxi je často využíván právě TEM₀₀ a TEM₀₁ (takzvaný donut), který je výhodný především pro dělení materiálu. Zmíněné dva módy jsou znázorněny na obr. 13.



Obr. 13 Příčné módy paprsku [24]

Jak bylo napsáno výše, s volbou módu souvisí samotný režim svařování, rozlišujeme dva, které jsou schematicky znázorněny na obr. 14. Prvním je kondukční režim svařování, kdy má paprsek nižší plošný výkon (do 10⁶ W·cm⁻²) a při jeho použití dochází k natavení materiálu a vytvoření svarové lázně. Při tomto svařovacím režimu se uplatňuje vedení tepla jen skrze tepelnou vodivost materiálu. To výrazně



Obr. 14 Kondukční a penetrační režim svařování [25]

U kondukčního režimu svařování se uplatňuje vedení tepla jen skrze tepelnou vodivost materiálu. To výrazně

ovlivňuje jak promíšení svarového kovu, tak tvar průřezu vzniklého svaru. Svár má hloubku několika desetin milimetru a hladký povrch. Dochází také k většímu tepelnému ovlivnění. Tento režim je vhodný pro svařování tenkých plechů. Pro zvětšení hloubky průvaru lze použít přehřev. Druhým režimem svařování je penetrační (nad $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$), kdy dochází k intenzivnímu lokálnímu ohřevu materiálu a odpaření jeho části. V případě, že je tlak plynu odpařeného kovu tak velký, že dojde k udržení kapiláry uvnitř svařovaného kovu mluvíme o tzv. keyhole, ta má obvykle průměr větší, než je průměr samotného paprsku. Uvnitř kapiláry dochází k mnohonásobnému odrazu záření, a to zvyšuje absorpci záření v místě dopadu. Díky tomuto jevu je možné dosahovat hlubokých úzkých svarů.

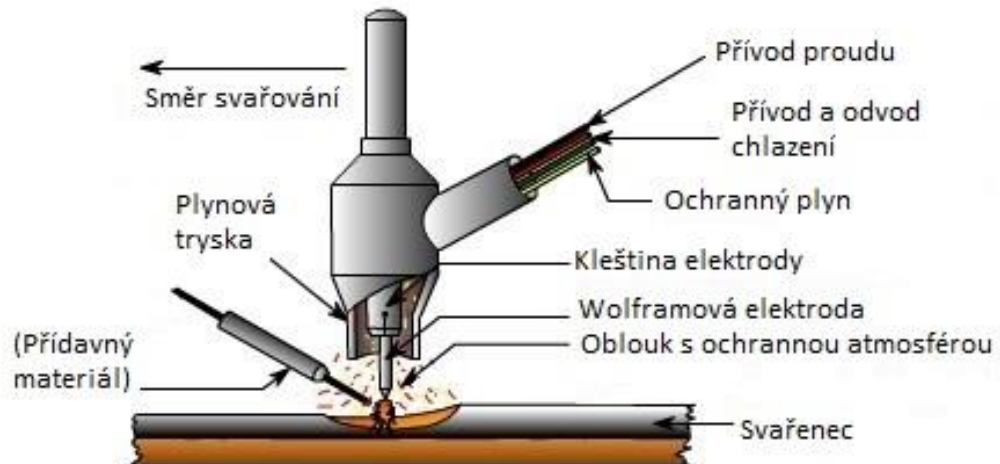
Parametry laserového svařování jsou vlastnosti systému, které mají vliv na konečné provedení svarových spojů. První z parametrů je vlnová délka záření, ta však není u zařízení nastavitelná, ale plyne z materiálu aktivního prostředí. Jedná se tedy o charakteristiku jednotlivých zdrojů. Mezi nastavitelné parametry jistě patří výkon laseru, průměr a poloha spotu, dále pak svařovací rychlost a použitý ochranný plyn. Nastavení výkonu má výrazný vliv na hloubku průvaru a podíl vneseného tepla. Dalším parametrem co ovlivňuje hodnotu vneseného tepla je rychlost svařování. Čím je rychlost svařování vyšší, tím vzniká méně vad ve formě pórů a rozstříku taveniny. S menším vneseným teplem také dochází k menšímu ovlivnění velikosti zrna a snížení náchylnosti k tvorbě horkých trhlin. Nastavení polohy a velikosti spotu má výrazný vliv na hloubku svaru a velikost tepelně ovlivněné oblasti. Významným parametrem je použitý ochranný plyn a jeho množství hnané do procesu. Svařování probíhá vždy s ochranou atmosférou, protože kov odpařovaný během penetračního svařování brání v prostupu fotonů do materiálu a snižuje se efektivita procesu. Tomu je zamezováno právě ofukováním ochrannou atmosférou, která zároveň brání oxidaci materiálu vzdušným kyslíkem. Používá se argon, helium nebo jejich směsi. Kvůli vysoké ceně helia je používán spíše argon a zmíněné směsi.

Při svařování pozinkovaných plechů dochází k brzkému odpařování povrchové vrstvy zinku, jehož páry způsobují výstřiky taveniny ze svarového spoje a vznik pórů. U svařování laserem se pro eliminaci těchto problémů používá speciální uchycení plechů (pro přeplátované svary), musí mezi nimi být mezera, která umožňuje únik vypařeného zinku, ale zároveň dovolí spojení svarových lázní horního a spodního plechu. Mezery se dosahuje vytvořením výstupků na jejich povrchu nebo pomocí uchycovacího přípravku. To však vyžaduje přidání tvářecí operace a zvýšení jak výrobního času, tak nákladů na stroje či přípravky. Celkově je pro laserové svařování sesazení svařovaných dílů jedním z důležitých kroků procesu kvůli úzké natavené oblasti, které lze pomocí laseru dosáhnout. Průměr paprsku se typicky pohybuje od 0,1 do 1 mm, z čehož plyne že i natavená část materiálu má malý objem a překlenovací schopnost této technologie je nízká oproti metodám s přídavným materiálem nebo s méně koncentrovaným výkonem. Pro eliminaci problémů spojených s odpařováním zinkové vrstvy je snaha použití přídavného zdroje energie, který odpařuje zinkovou vrstvu před provedením svaru laserovým svazkem, nebo působí jako dohřev, který udrží svarový kov déle v kapalném stavu a páry kovu tak mají možnost uniknout. Řešení s druhým laserovým svazkem však znamená výrazné náklady navíc a je tedy snaha nahradit druhý laserový svazek jiným zdrojem tepla, obvykle technologií TIG.

Výhody laserového svařování spočívají bezesporu v rychlosti procesu, vysoké štíhlosti svaru související s malou tepelně ovlivněnou oblastí, přesností, snadnou automatizací a celkově čistotou práce. Mezi nevýhody patří především pořizovací náklady na zařízení a údržbu, ale také například vysoké nároky na přesnost polohování a s tím spojené přípravky.

2.3 Svařování pomocí TIG [3, 12, 29, 30]

Svařování metodou TIG, označované i jako GTAW nebo podle ISO 4063 jako metoda číslo 141, je uskutečňováno hořením oblouku mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Svařování metodou TIG lze provádět ručně či strojně, stejně tak může být zaváděn přídavný materiál ve formě tyček nebo drátů. Celý proces je chráněn inertním plynem, který slouží k udržení elektrického oblouku a ochraně tuhajícího svarového kovu před vlivem



Obr. 15 Schéma svařování TIG [29]

atmosféry. Jako plyn je většinou použit argon, helium nebo směs těchto plynů spolu, nebo s podílem vodíku či dusíku. Na obr. 15 lze vidět schéma svařování technologií TIG.

Argon je jednoatomový inertní plyn s nízkým ionizačním potenciálem a tepelnou vodivostí. Díky tomu je dosahováno vysoké stability oblouku a jeho snadnému zapálení. Argon je také asi 1,4krát těžší než vzduch a nedochází tak k výraznému vychylování proudu plynu. Plyn je dodáván v čistotě 4.5 což odpovídá 99,995 %, pro svařování materiálů s vyšší afinitou ke kyslíku je nutné použití vyšší čistoty plynu a to 4.8 (99,998 %) nebo 5.0 (99,999 %).

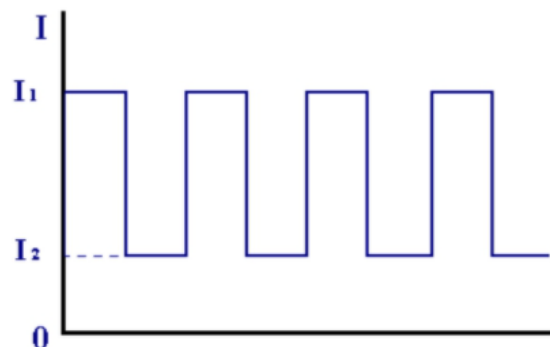
Helium je stejně jako argon inertní plyn skupiny I, což znamená že nereaguje se svařovaným materiálem a k propalu prvků dochází minimálně. Je lehčí než vzduch, a proto je nutné mít pro důkladnou ochranu svarové lázně vyšší průtok plynu. Oproti argonu je zapálení oblouku více náročné a při větších délkách oblouku je nestabilní. Díky vysokému přenosu tepla, je helium vhodné pro svařování materiálů s vyšší tepelnou vodivostí při větších tloušťkách (hliník, měď). Nevýhodou je jeho vysoká cena například oproti argonu. Dále lze využívat i směsi výše zmíněných plynů s vodíkem či dusíkem.

Jako zdroj proudu se dnes používají invertorové zdroje s vysokofrekvenčním transformátorem. Svařovat metodou TIG lze z hlediska druhu proudu ve dvou režimech. Základním způsobem je svařování stejnosměrným proudem. Zapojení elektrody a svařence může být přímé, kdy elektroda má zápornou a svařenec kladnou polaritu. V této konfiguraci dochází k nerovnoměrnému rozdělení tepla mezi elektrodou, na kterou spadá asi 1/3 tepla a zbytek pak přestupuje do svařence. Díky tomuto jevu se dosahuje vysoké hloubky průvaru a zároveň nedochází k nadměrnému tepelnému zatížení elektrody. Tohoto sestavení je využíváno pro svařování všech typů ocelí, titanu, mědi, niklu a jejich sloučenin. V případě nepřímého zapojení u stejnosměrného proudu dochází k přetěžování elektrody a není až na výjimky, používáno.

Střídavým proudem se obvykle svařují slitiny hořčíku a hliníku. U moderních zdrojů má střídavý proud obdélníkový průběh a lze nastavit jak frekvence střídání polarity, tak poměr čistící a svařovací fáze v závislosti na svařovaném materiálu a jeho povrchu.

K samočištění dochází při připojení elektrody na kladný pól díky vzniku katodové skvrny na povrchu materiálu, která je nestabilní a posouvá se směrem k plochám pokrytých oxidy. Na těchto místech je nižší emisní energie elektronů a po vstupu katodové skvrny dochází k rychlejšímu odpaření oxidů. K samočištění přispívá také proud iontů argonu, které mají vysokou hmotnost a oxidy odstraňují mechanicky.

Další možností, jak pracovat s proudem u svařování netavící se elektrodou je nastavení pulzního proudu, kdy svařování probíhá při dvou hodnotách proudu, které se střídají. Při vyšší hodnotě I_1 dochází ke vzniku svarové lázně a při nižší I_2 dochází pouze k udržení oblouku a ochlazení materiálu, průběh proudu je znázorněn na obr.16. Tento způsob je používán pro svařování nerez ocelí, tenkých plechů a k tvorbě pohledových svarů.

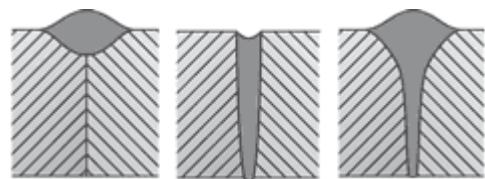


Obr. 16 Průběh proudu u pulzního svařování [30]

Pro přívod a distribuci provozních plynů, kapalin a proudu, zároveň také k upnutí elektrod se používají svařovací hořáky. Jejich konstrukce je dimenzována pro proudy od 150 do 500 A a používají se jak pro ruční, tak strojové vedení. U nižších svařovacích proudů se používá chlazení proudícím plynem a od 350 A se používá chlazení vodou. S typem chlazení souvisí také volba trysek, kdy se pro plynem chlazené hořáky využívá keramických trysek a pro vodou chlazené hořáky se pak používají měděné trysky.

2.4 Hybridní svařování Laser-TIG [13, 14, 15, 26]

V poslední době je na vzestupu využití hybridního svařování, což je kombinace laserového a obloukového zdroje tepla v jednom procesu s cílem využítí výhod každé z těchto technologií. Poprvé bylo podobné technologie použito již v sedmdesátých letech, ale až do nedávna nebyla rozvíjena. Ve většině případů se používá kombinace CO₂ či pevnolátkového laseru s MIG či TIG zdrojem. Svařovací proces je chráněn inertním plynem a to argonem, heliem nebo jejich kombinací. V případě použití MIG technologie jako druhého tepelného zdroje, je do procesu zapojen i přídavný materiál. Díky tomu se zvyšuje překlenovací schopnost svařovacího procesu a dosahuje se jak vysokých průvarů, tak dobrého zaplnění mezer svarovým kovem.



Obr. 17 Srovnání geometrie svarů [26]

Použitím přídavné obloukové technologie se zvětšuje objem vzniklého svarového kovu, a tak se snižují nároky na přesnost polohování dílů, které musí být u čistě laserového svařování dokonalé. Na obr. 17 lze vidět schematické porovnání svarů vzniklých technologií TIG, laserovou technologií a hybridní technologií.

U hybridního svařování laser slouží jako hlavní zdroj energie a zajišťuje hlavně průvar materiálu. Základní konfigurace svařovacího systému může být sestavena dvěma způsoby (obr.18). Obloukový zdroj může být předřazen laseru, kdy natavením povrchu materiálu výrazně přispívá k absorpci laserového záření a ke zvýšení hloubky průvaru. Dále pak v tomto sestavení funguje jako předehřev, čímž snižuje tepelné ztráty a zvyšuje tak účinnost laseru.



Obr. 18 Konfigurace hybridního svařování [15]

Předřazený TIG hořák může také zajišťovat čistící funkci povrchu materiálu, kdy odpařuje oxidy a další elementy, které by mohli ovlivňovat kvalitu svaru. V druhém případě následuje obloukový zdroj laser, v této kombinaci pak slouží jako dohřev. Dohřev pak zajišťuje okamžité tepelné zpracování vznikajícího svaru, které zabezpečuje požadovanou mikrostrukturu svarového kovu a TOO. Aplikací druhého tepelného zdroje také dochází k prodloužení doby, ve které tuhne vzniklá tavenina, čímž mají vznikající plyny čas opustit svarovou lázeň a dochází tak ke snížení vzniku pórů. Snižuje se také náchylnost vůči trhlinám za studena, kvůli lepší difuzi vodíku. Díky použití hybridní technologie lze dosáhnout hlubšího průvaru, vysokých rychlostí svařování, zlepšení kvality svaru a zvýšení překlenovací schopnosti svařovacího procesu. Z hlediska nákladů je nejdražší zařízení laserové technologie, obloukový zdroj je pak násobně levnější.

Správné provedení svarového spoje je závislé na vhodně zvolených svařovacích parametrech, které v případě hybridního svařování zahrnují jak procesní parametry obloukového a laserového zdroje, tak proměnné plynoucí ze současného použití dvou zdrojů. Hlavními svařovacími parametry pro hybridní Laser-TIG svařování tak jsou napětí a proud obloukového zdroje, polarita a svařovací režim. U laserového zdroje jde o fokusaci paprsku, výkon zdroje a rozložení energie paprsku. Ohnisko je běžně fokusováno lehce pod povrchem materiálu, aby nedocházelo k hlubokému propadu svaru. Je nutné si uvědomit, že při současném použití dvou svařovacích technologií se sčítá teplo vnesené do materiálu, a to by mělo být vhodně distribuované mezi oběma použitými technologiemi. Parametry vycházející ze současného použití dvou tepelných zdrojů jsou jejich vzájemná (procesní) vzdálenost a rychlost svařování. V případě příliš malé procesní vzdálenosti může docházet k odstínění laserového paprsku vzniklými parami kovu, zvýšení pórovitosti svaru a nadměrnému zahřívání elektrody. Na druhou stranu se však zvyšuje absorpce laserového záření a zlepšuje se stabilita oblouku. Rychlost svařování ovlivňuje jak hloubku svaru, tak velikost tepelně ovlivněné oblasti a také je klíčovým parametrem, od kterého se odvíjí efektivita výrobního procesu. Důležitým faktorem ve svařovacím procesu je použitý ochranný plyn. Jeho složení plyne z použitých technologií, které jsou probírány v předchozích částech práce. Záleží také na způsobu dodání ochranného plynu do okolí svaru, plyn může být zaváděn koaxiálně s laserovým paprskem nebo z boku od TIG hořáku.

3 SVAŘOVANÝ MATERIÁL [36, 37, 38]

Jedná se o galvanický pozinkovaný plech z oceli WSS-M1 A365 A14, která je určena pro tažení za studena. Plech má tloušťku 0,9 mm. Vzhledem k nízkému obsahu uhlíku a legujících prvků se jedná o ocel svařitelnou běžně prováděnými způsoby svařování. Matrici materiálu tvoří ferit s malým množstvím perlitu. Plechy jsou dodávány jak uklidněné, tak neuklidněné. Z hlediska stárnutí materiálu se mohou projevit problémy v tepelně ovlivněné oblasti svaru, kdy po rychlém zchlazení materiálu z teplot mezi 580 až 723 °C dochází ke vzniku přesyceného tuhého roztoku, který se při teplotách nad 20 °C může podílet na stárnutí a způsobovat problémy při dalším tváření, případně zvýšit tranzitní teplotu křehkého lomu. Základní mechanické vlastnosti a složení materiálu podle dodavatele je uvedeno v tab. 2.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti a složení oceli [37]

Označení oceli	Mechanické vlastnosti			Chemické složení [%]			
	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]	C max	P max	S max	Mn max
WSS-M1 A365 A14	140-180	270-330	40	0,08	0,025	0,020	0,3

3.1 Zinkování [16, 39, 54]

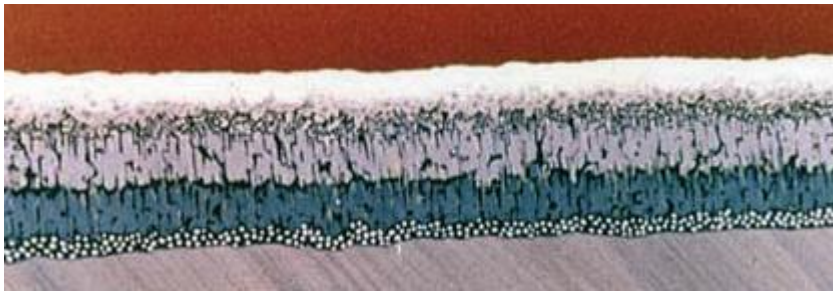
Zinek působí na povrchu oceli jako bariéra před korozním prostředím. V případě porušení zinkové vrstvy zajišťuje takzvanou katodickou ochranu, kdy v oblasti porušení zinkové vrstvy za přítomnosti elektrolytu (voda, vlhké prostředí) dochází ke vzniku galvanického článku, kde zinek zaujímá roli katody a ocel funguje jako anoda. V této konfiguraci je pak zinek korodován a ocel je tímto chráněna. Produktem korozních jevů je pak oxid a uhličitán zinečnatý, který zpomaluje korozní působení vnějšího prostředí. Pro zvýšení koroziodolnosti lze použít další úpravy, které se nanášejí na zinkový povrch. Používá se fosfátování, chromátování a případně lakování. K pokovení ocelí zinkem se nejčastěji využívá žárové či galvanické zinkování.

Žárové zinkování

Proces žárového zinkování začíná očištěním materiálu od zbytků barev, mastnoty, případně okují. K očištění se používají jak mechanické, tak chemické prostředky. Před samotným zinkováním probíhá nanesení tavidla, které brání před oxidací, jak zinkové lázně, tak pokovovaného materiálu. Podle způsobu nanášení tavidla se rozděluje zinkování na dvě metody. Proces lze provádět takzvaným suchým způsobem, kdy je materiál určený k pokovení ponořen do lázně s tavidlem, posléze je vytažen a tavidlo se nechá uschnout na povrchu. Poté následuje ponoření do roztaveného zinku. Po vytažení a vychladnutí je proces zinkování dokončen.

Druhou metodou je tzv. mokré zinkování. Zde je lázeň rozdělena na dvě části, v první je roztavený zinek, na jehož hladině se nachází vrstva tavidla. Ve druhé části je pouze roztavený zinek. Proces začíná zanořením materiálu do první lázně přes vrstvu tavidla, poté je materiál okamžitě převeden do čisté zinkové lázně. Oba používané způsoby jsou z pohledu kvality vzniklého povrchu srovnatelné.

Při žárovém zinkování se využívá schopnosti vytvářet slitinové fáze. Na obr. 19 lze vidět řez vzniklou zinkovou vrstvou. Zinkový povlak má pět vrstev, kdy ta nejbližší k ocelovému základu má nejvyšší obsah železa (21-28 % Fe) a nazývá se



Obr. 19 Řez zinkovým povlakem [54]

gamma fází, nad ní se nachází delta fáze s obsahem železa 7-11 %, dále pak zeta fáze a jako poslední je eta fáze s obsahem železa 0,03 %. Zinková lázeň se skládá z největší části z elektrolytického zinku, ke kterému jsou přidávány legury pro dosažení požadovaných vlastností. Nejvíce používanou přísadou je hliník, který přispívá k vytvoření pravidelného lesklého povlaku a ke zvýšení korozní odolnosti. Přidává se obvykle v malém množství do 0,01 %, v případě kontinuálního zinkování, ale až 55 %. Dalšími používanými prvky jsou nikl a cín, který zajišťuje charakteristický zinkový květ. Tloušťka žárového zinku se obvykle pohybuje od 50 do 200 μm .

Galvanické zinkování

Galvanického pokovení, konkrétně zinkování se využívá pro ochranu základního materiálu před působením vnějších vlivů, které může vést ke korozi materiálu a následnému narušení konstrukce dané aplikace. Proces je založen na principu elektrolýzy. Prvek, který má být pokoven je umístěn do elektrolytu a je zapojen jako katoda ke zdroji stejnosměrného napětí. Elektrolyt je tvořen roztokem zinečnaté soli a používají se čtyři kategorie elektrolytu, které jsou popsány níže. Jako anoda je do soustavy zapojena zinková deska, která při průchodu proudem uvolňuje zinkové ionty, které nahrazují ionty, co se usadily na povrchu katody a vytvořily požadovanou kovovou vrstvu. Pomocí, galvanického zinkování lze dosáhnout tloušťky povlaku 2,5 až 10 μm . Tato forma povrchové úpravy má oproti žárovému zinkování jemnozrný vzhled a nevytváří typický zinkový květ. Galvanické zinkování je používáno hlavně pro prvky určené do interiéru a pro menší tloušťky vrstvy zinku. Pro vrstvy o větší tloušťce je ekonomicky výhodnější použití zmíněného žárového zinkování.

Ke galvanickému zinkování jsou používány čtyři typy zinkovacích lázní. Prvním typem jsou lázně kyanidové, které se používají kvůli nízké ceně zařízení a kvalitě vytvořeného povlaku. Nevýhodou těchto lázní je vysoká toxicita používaných kyanidů.

V případě bezkyanidových alkalických lázní jsou vytvářeny matné povrchy a je tedy v případě potřeby lesklého vzhledu použít leskutvorných přísad. Výhodou tohoto typu lázní je jejich stálost a relativní bezpečnost.

Nejmodernějším používaným typem, jsou lázně slabě kyselé, které dovolují vytvoření povlaku s dobrou tažností. Díky vysokému proudovému výtěžku lze pokovovat i materiály náchylné k navodíkování a vzniku vodíkové křehkosti.

Posledním typem lázní jsou lázně kyselé, které se pro rychlost pokovení používají pro povlakování drátů a pásů. Zinková vrstva je bez užití leskutvorných přísad matná a hrubá.

3.2 Vady svaru [23, 34, 40, 41, 42, 43, 44, 45]

Při svařování často dochází ke vzniku různých typů vad. Za vady jsou považovány útvary vzniklé ve svarovém spoji, které se neshodují se zadaným požadavkem na jeho kvalitu. Vzhledem k přirozenému obsahu mikroskopických vad v materiálech vyráběných v průmyslových podmínkách se hledání vad soustředí v makroskopické oblasti.

Svarové vady je možné dělit podle různých hledisek. Rozlišují se na přípustné a nepřípustné, kdy vadu lze akceptovat v případě, že to nevyklučuje vztažená norma či smluvní vztah. Jedná-li se o vadu nepřípustnou, rozlišuje se pak podle toho, zda lze být opravena. Dále lze vady dělit na skryté, které jsou pod povrchem a nejsou pohledem patrné a na zjevné, které se nachází na povrchu svaru. Základní dělení podle tvaru rozděluje vady na bodové, plošné a objemové.

Podle ČSN EN ISO 6520-1 se vady typově rozdělují do šesti skupin, ve kterých jsou dále specifikovány na konkrétní podobu vad. Tab. 3 Rozdělení svarových vad [43]

Číslování a podoba vad lze vidět v tab. 3. Na ČSN EN ISO 6520-1 navazuje norma ČSN EN ISO 12932, která zavádí tři stupně kvality svarů, které specifikují parametry typových vad. Stupně se označují písmeny B, C a D s tím, že B má nejprísnější kritéria a D nejméně přísná. Je však nutné brát v potaz, že tyto stupně jsou pouze návrhem specifikace kvality svaru, ve smluvním vztahu mohou být podmínky nastaveny libovolně.

Číslo skupiny	Podoba vad
1	Trhliny
2	Dutiny
3	Pevné vměstky
4	Studené spoje a neprůvary
5	Vady tvaru a rozměru
6	Různé vady

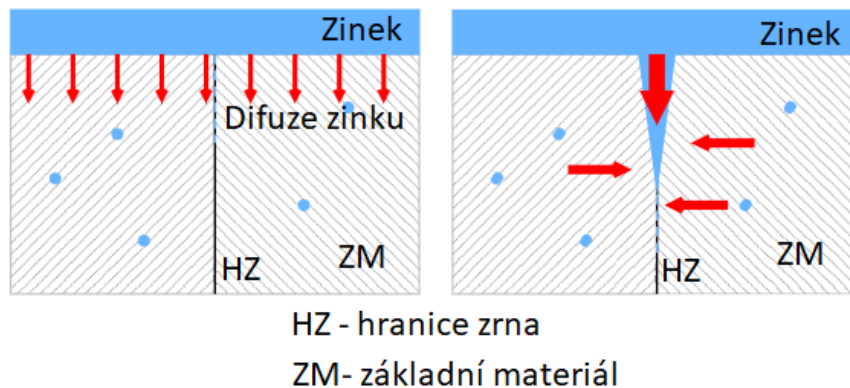
První skupina obsahuje trhliny, které jsou normou ČSN EN ISO 12932 považovány za neakceptovatelné ve všech podobách. Proto musí být díl v případě přítomnosti trhlin opraven. Často zastoupeným typem trhlin jsou trhliny vzniklé za horka. Vznikají při chladnutí svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti blízko teploty solidu v důsledku tepelných napětí a přítomnosti částic, zejména sulfidů, které snižují tažnost. K trhlinám dochází podél hranic zrn. Trhliny za horka mají několik podtypů:

- Jedním z typů horkých trhlin jsou krystalizační trhliny. K těm dochází při svařování ocelí s vyšším obsahem síry či fosforu. Vznikají v místě, které krystalizuje později čili ve středu svaru a jeho kořeni. Trhliny mají rozvětvený členitý tvar. Obvykle vznikají při svařování pod tavídkem.
- Likvační trhliny vznikají v TOO a oblasti natavení. Vznikají v případě vícevrstevných svarů, kdy nanášením housenky dochází k ohřátí housenky předchozí a tím k dřívějšímu roztavení nízkotavitelných eutektik, které expandují a usazují se po hranicích austenitických zrn, kde způsobují snížení pevnosti materiálu. Společně s tímto jevem na snížení pevnosti participuje i zvětšení zrn.
- Polygonizační trhliny vznikají kvůli vytváření polygonizačních sítí dislokací, které snižují plasticitu materiálu při teplotách blízkých 1000 °C a v důsledku tohoto jevu a tepelných napětí dochází ke vzniku trhlin.

Trhliny za studena nazývané i jako zbržděné lomy jsou trhliny vznikající kvůli přítomnosti vodíku ve svaru, struktury citlivé na vodík a tahových napětí. Tyto trhliny se mohou nacházet v různých místech svaru a mohou být orientovány jak příčně, tak podélně. Na rozdíl od trhlin za horka se jedná o transkrystalické trhliny, které se projevují lesklým nezoxidovaným povrchem. Vodík se do svaru dostává obvykle z atmosféry, případně z nečistot na základním či

přidavném materiálu. Praskání je způsobeno difuzním vodíkem, který se ve svarovém spoji nad 200 °C nachází. Při zchladnutí pod 200 °C je vodík rekombinován na H₂. Dochází k tomu v oblastech poruch mřížky kovu, kde tímto procesem narůstá tlak až na hodnotu 600 MPa, které způsobují zmíněné trhliny.

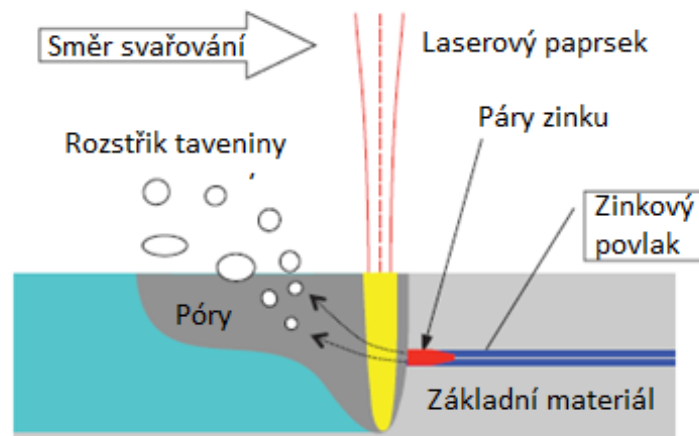
Specifickým mechanismem vzniku trhlin při svařování pozinkovaných plechů je takzvané zinkové křehnutí. Během svařování dochází ke kontaktu taveniny zinku s ocelí, kdy dochází k difuzi zinku do základního materiálu, tím se snižuje plasticita oceli a v kombinaci s tepelným napětím, které během svařování působí, vznikají povrchové trhliny. K tvoření trhlin přispívá také napětí v materiálu vyvolané předchozími úpravami, například tažením. Náchylnost ke



Obr. 20 Vylučování zinku po hranici zrn [34]

vzniku tohoto typu trhlin roste s obsahem legur a velikostí vneseného tepla. Na obr. 20 je znázorněn mechanismus difuze zinku po hranicích zrn.

V případě hybridního svařování plechů upravených zinkováním je největší pravděpodobnost vzniku vad skupiny č. 2, která zahrnuje póry a staženiny. Jedná se o póry vzniklé uzavřením plynové bubliny v tavenině. K tomu dochází kvůli nízké teplotě varu zinku, která způsobuje rychlý vývin jeho par a rychlému tuhnutí taveniny. Vznik pórů je nastíněn ve schématu k laserovému svařování na obr. 21. Póry jsou obvykle malé dutiny kulovitého tvaru, které se ve svaru nachází jak jednotlivě, tak v různě uspořádaných skupinách a také mohou být celým svým objemem pod povrchem svaru nebo vystupovat nad něj. Rozlišujeme rovnoměrně distribuované póry, dále se póry nachází ve shlucích nebo řádcích, kdy jsou orientovány rovnoběžně s osou svaru. Podobně orientovány mohou být také protáhlé póry, které mají podobu protáhlé dutiny. Poslední definovanou podobou póru je červovitý pór, jenž je trubičkovitého tvaru a jeho umístění a orientace závisí na průběhu tuhnutí taveniny a zdroji plynu.



Obr. 21 Schéma tvorby pórů [23]

Při použití hybridní technologie svařování se více mohou projevovat také vady skupiny č. 3, kdy v důsledku neočištěného zinkového povrchu může dojít k zanášení oxidických vměstků do tavné lázně. Teplota varu oxidu zinečnatého je 2360 °C, což je výrazně víc než teplota varu zinku, a to může vést ke kontaminaci svarové lázně vměstkami.

Tak jako u všech způsobů svařování, může docházet ke vzniku studených spojů, případně neprůvarů. Ty mohou být u hybridního svařování způsobeny například nízkou absorpcí laserového záření, což může být způsobeno odstíněním paprsku vznikajícími parami a plazmou. Další příčiny pak mohou být příliš velký odraz paprsku nebo špatně zvolené parametry.

Podobně pak dochází ke vzniku vad popisovaných v páté skupině, o které se zmiňuje norma ČSN EN ISO 6520-1. K těm dochází především v případě špatně sestavených dílů, kdy je svár na jedné či druhé straně propadlý, nemá provařený kořen či se objevují podobné vady geometrie. Zvláště citlivé na sestavení dílů jsou technologie s vysokou plošnou koncentrací energie jako je laser, plazma nebo elektronový paprsek.

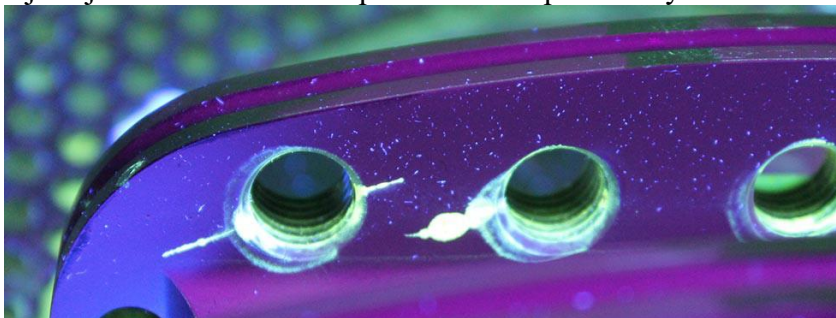
3.3 Nedestruktivní zkoušky [33, 35, 60]

Ke kontrole svarů a detekci jejich vad lze použít nedestruktivní zkoušky, u kterých není nutné fyzicky zasahovat do celistvosti svaru. Nedestruktivní metody jsou atraktivnější vzhledem k zachování zkoušeného dílu, ale nepřináší kompletní představu o vlastnostech svaru.

Nejzákladnější nedestruktivní metodou je vizuální zkouška. K jejímu provedení je potřeba pouze prostý zrak, případně jednoduché optické pomůcky jako je lupa, případně endoskop či podobná zařízení. Je nutné, aby byl svar ke zkoušce očištěn a nebyl dále upravován, například lakováním či pokovením. Pozorováním je pak hodnocen povrch svaru z hlediska přítomných defektů, případně jsou měřeny parametry svaru měrkami, či základními délkovými měřidly. Vizuální zkouška přichází v kontrole svaru na řadu jako první a řídí se normou ČSN EN ISO 17637.

Další levnou nedestruktivní zkouškou je zkouška kapilární, nebo také penetrační. Zkouška využívá kapilárního chování detekčních kapalin, především se používají látky na bázi uhlovodíků. Před zkouškou musí být povrch očištěn, odmaštěn a drsnost povrchu by měla být do Ra 3,2. Po splnění těchto předpokladů je vzorek ponořen do penetrantu nebo v případě větších rozměrů zkušebního tělesa je penetrant nanášen nástřikem nebo nátěrem. Následuje cca 30minutová prodleva, která zajišťuje důkladné zatečení penetrantu do povrchových vad. Dále

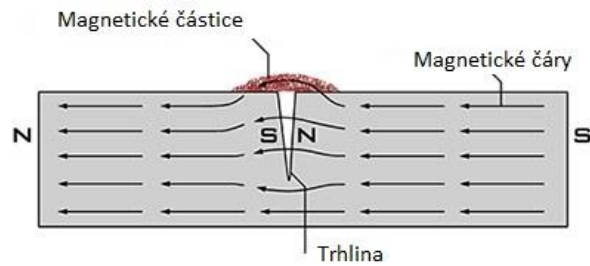
je povrch zkušebního tělesa vodou očištěn od přebytků penetrantu a je nanesena vývojka, která zajistí zvýraznění míst, ve kterých zůstal penetrant. Používají se také penetranty fluorescenční, u kterých se místo vývojky používá ultrafialové



Obr. 22 Ukázka fluorescenční kapilární zkoušky [33]

záření, výsledek tohoto typu zkoušky lze vidět na obr. 22.

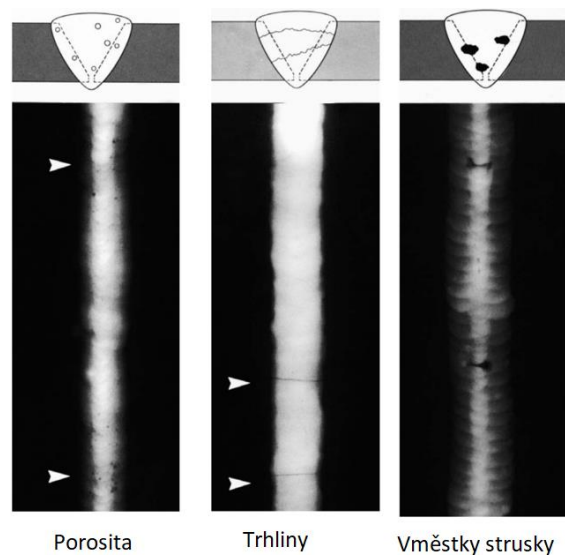
Magnetická prášková zkouška funguje díky průchodu magnetických siločar feromagnetickým materiálem. V případě, kdy je trajektorie siločáry blokována vadou, siločára kopíruje její povrch případně se siločáry uzavírají ve vzduchu a tvoří rozptylové magnetické pole. Způsob, jakým siločáry interagují s vadami v materiálu je naznačen na obr. 23. Dráha siločar je sledována pomocí ocelových částic, které se nanášejí jako prášek nebo jsou smíchány s vhodnou kapalinou. Ke zvýraznění těchto stop je základní materiál natírán kontrastní barvou nebo je k prášku přimíchána fluorescenční látka. Tato metoda je použitelná pouze pro feromagnetické materiály.



Obr. 23 Princip magnetické zkoušky [60]

Ultrazvuková zkouška pracuje na základě rozdílné rychlosti vlny v různých prostředích. Ultrazvuk má dvě metody použití, a to průchodovou a odrazovou. Metoda odrazová je nejvíce používaná a detekuje kromě vad i vnitřní strukturu materiálu a rozměry. Zkouška ultrazvukem je zvláště citlivá na plošné vady, ale u objemových vad lze jejich velikost určit pouze orientačně. Na základě ultrazvuku staví i pokročilá metoda Phased Array, která využívá více měničů a je díky nim možné ultrazvukové vlny vychylovat a fokusovat.

Pro detekci svarových vad je využíváno i prosvícování elektromagnetickým zářením, nejčastěji rentgenovým a gama zářením. Na snímku se vady projevují jako tmavší místa, v případě pórů nebo trhlin. V případě jiného odstínu na snímku se jedná o vměstek či těleso z jiného materiálu než základní materiál. Zobrazení různých materiálů se liší jejich schopností pohlcovat záření. Zkouška je velmi citlivá pro detekci objemových vad a často se kombinuje s ultrazvukovou zkouškou. Pokročilou technologií na podobném principu je počítačová tomografie, díky které je možné vytvoření digitálního 3D modelu zkoumané oblasti. Celkově se jedná o drahou metodu, která je náročná také z hlediska bezpečnosti kvůli ionizujícímu záření. Způsob rentgenového zobrazení jednotlivých typů vad ve svaru je na obr. 24.



Obr. 24 Příklady zobrazení vad [25]

3.4 Destruktivní zkoušky [36, 46, 47, 48, 49, 50, 55, 62, 63]

V případě destruktivních metod dochází k nenávratnému porušení zkoušeného materiálu. Součást tak už není možno použít. Díky tomu je však možné nahlédnout do vnitřní struktury prvku nebo zjistit jeho mechanické vlastnosti na hranici porušení.

Často používanou metodou je studium makro a mikrostruktury. K tomu je potřeba vytvoření vzorku, který je vyjmut z řezu svarového spoje a jeho okolí. Běžně jsou tyto vzorky zalévány či lisovány do podoby nízkých válečků (obr. 25), které usnadňují manipulaci během další přípravy, která zahrnuje broušení a leštění, které dnes probíhá na k tomu určených specializovaných bruskách. Po dostatečné úpravě povrchu následuje fáze leptání, která slouží ke zvýraznění jednotlivých struktur ve zkoumaném vzorku. Pro leptání se používá široká škála leptadel, které se volí podle zkoumaného materiálu. Pro přípravu vzorků lze použít i elektrochemické metody, které se používají především pro materiály zvláště odolné vůči působení kyselin a dalších činidel používaných k leptání. Díky těmto úpravám jsou odhaleny a zvýrazněny vady materiálu včetně odlišení jednotlivých fází kovů. Při pozorování do cca 30násobného zvětšení se mluví o makroskopii, při větším zvětšení pak o mikroskopii. Pro posuzování vzorků se používají jak optické, tak elektronové mikroskopy.



Obr. 25 Metalografické vzorky [62]

Jednou z nejčastěji používaných destruktivních zkoušek je zkouška tvrdosti. Pro měření tvrdosti materiálů se používá množství metod, které se rozdělují podle svého principu. Základní rozdělení metod s jejich zástupci je v tab. 4.

Tab. 4 Rozdělení metod měření tvrdosti

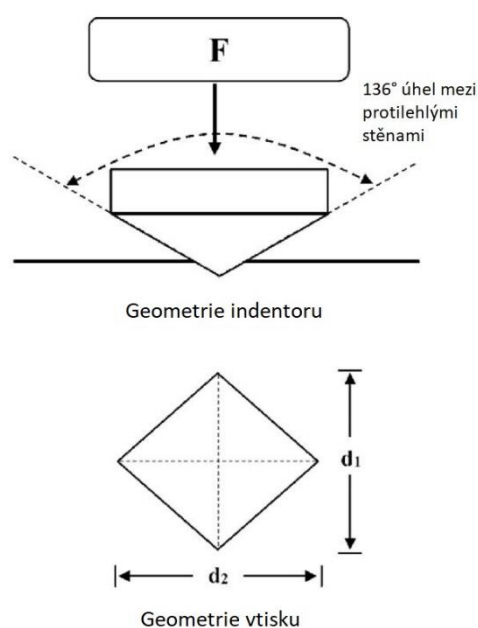
Staticko-plastické	Dynamicko-plastické	Dynamicko-elastické
Brinell	Poldi kladívko	Shoreho skleroskop
Vickers	Baumanova metoda	Duroskop
Rockwell	Leebova metoda	

Dynamické metody mají výhodu v kompaktních rozměrech zkušebních zařízení a jsou tak používány pro měření velkých dílů, které by bylo složité měřit přístroji pro statické zkoušky, které jsou využívány spíše v laboratorních podmínkách. Jednou z nepoužívanějších statických metod je měření tvrdosti podle Vickerse. U této zkoušky slouží jako indenter diamantový pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Indenter je vtačován kolmo do materiálu předepsaným zkušebním zatížením po daný čas. Výsledná tvrdost odpovídá poměru síly zatížení a povrchu vtisku, podle vztahu $HV = 01891 \cdot \frac{F}{d^2}$, kde 'd' je vypočítáno jako průměr ze dvou úhlopříček vtisku ('d1' a 'd2' na obr. 26). Zkouška se dle normy ČSN EN ISO 6507-1 rozděluje na podskupiny znázorněné v tab. 5.

Tab. 5 Rozdělení měření tvrdosti dle Vickerse [50]

Zkušební zatížení [N]	Označení	Pojmenování zkoušky
$F \geq 49,03$	HV 5 až HV 100	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F \leq 49,03$	HV 0,2 až HV 5	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F \leq 1,961$	HV 0,01 až HV 0,2	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

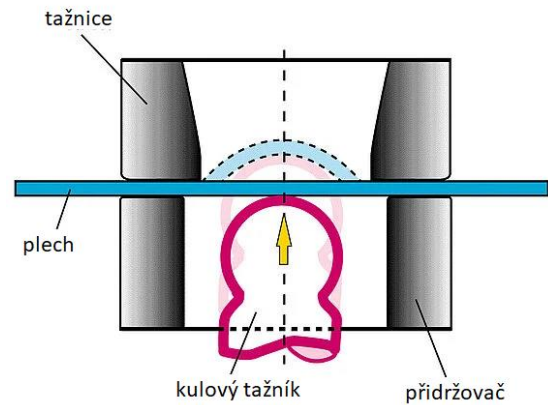
Norma specifikuje také podmínky, které musí být pro provedení zkoušky splněny. Určuje dobu plného zatížení, která by měla být od 10 do 15 s. Pro měření úhlopříček vtisku musí být vhodně nastaveno zvětšení mikroskopu tak, aby délka úhlopříčky zabírala mezi 25 a 75 % plochy zobrazované mikroskopem. Výsledná délka úhlopříček by měla dosahovat délky mezi 0,02 a 1,4 mm, jinak je vhodná změna zatížení. Tloušťka tělesa musí dosahovat alespoň 1,5násobku délky úhlopříčky vtisku a po zkoušce nesmí být z druhé strany tělesa viditelný otlak. Norma také doporučuje vzdálenost vtisků mezi sebou a od okraje vzorku. Pomocí metody dle Vickerse je možné měřit širokou škálu materiálu včetně velmi tvrdých, vrstev a dokonce i jednotlivých fází. Výsledná hodnota tvrdosti se zapisuje ve formátu 350 HV 10/30. První číslo představuje hodnotu tvrdosti, písmena HV označují metodu měření tvrdosti, číslo 10 představuje zatížení indentoru, při kterém bylo měření prováděno a číslo 30 značí čas v sekundách v případě, kdy je jiný než běžných 10-15 s.



Obr. 26 Schéma metody měření dle Vickerse [63]

Základní metodou používanou pro zjištění mechanických vlastností materiálu je tahová zkouška. Provádí se na trhačím stroji, který umožňuje upnutí obou stran zkušebních tyčí a jejich postupné jednoosé napínání vedoucí k přetržení vzorku. Výstupem zkoušky jsou mez pevnosti, mez kluzu, tažnost a kontrakce. Norma ČSN EN ISO 6892-1 se zabývá tahovou zkouškou za pokojové teploty a specifikuje požadavky na podmínky zkoušení a zkušebních vzorků. Při přípravě vzorků je nutné použití technologie, která neovlivňuje vlastnosti daného vzorku, aby byl výsledek zkoušky co nejprůkaznější. Vzorky ke zkoušení svarů se odebírají jak podélně, tak napříč svarem a mohou být tvořené základním materiálem se svarem, nebo čistě svarovým kovem.

Pro zhodnocení tvažitelnosti materiálu včetně provedeného svaru slouží zkouška hloubením podle Erichsena. Princip zkoušky spočívá v upnutí zkoušeného vzorku o formátu 90 x 90 mm do tvářecího stroje pomocí přidržovače a tažnice a následné tažení tažníkem ve tvaru koule, která má průměr 20 mm. Rychlost tažníku je konstantní a samotný pohyb je realizován mechanickým či hydraulickým způsobem. Zkouška pokračuje do okamžiku vzniku trhliny na povrchu plechu. Jako výsledek zkoušky je brán posun tažníku v okamžiku porušení, případně pak tvar a umístění vzniklé trhliny. Proces zkoušky dle Erichsena je znázorněn na obr. 27.

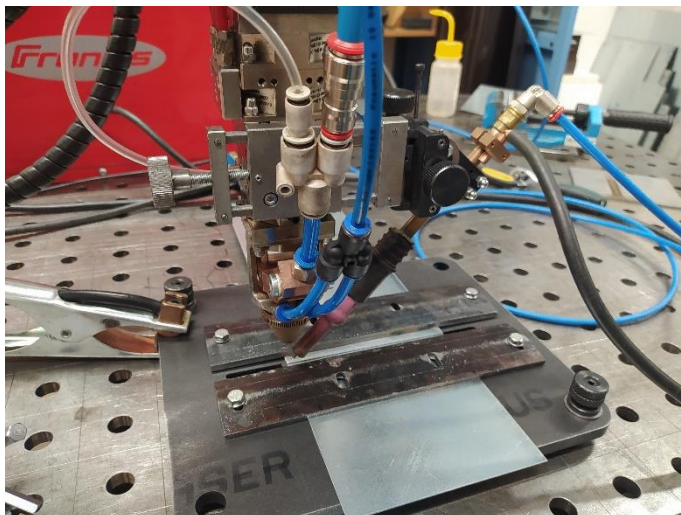


Obr. 27 Zkouška podle Erichsena [55]

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Úkolem experimentu bylo zmapování vlivu svařovacích parametrů na kvalitu svaru, konkrétně elektrického proudu TIG hořáku na svařování galvanicky pozinkovaných plechů metodou Laser-TIG. Experiment probíhal v laboratoři výkonových laserů Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky.

Pro svaření vzorků byl použit laser YLS-2000 firmy IPG Photonics. Jedná se o vláknový laser s ytterbiovým aktivním prostředím o maximálním výkonu 2 kW a vlnovou délkou 1070 nm. Zdroj může pracovat jak v kontinuálním, tak pulsním režimu. Laserový paprsek je do pracovní oblasti přiveden pomocí svařovací hlavy Precitec YW 30, ta dovoluje svařování kovů až do tloušťky materiálu 5 mm nebo svařování plastů. Laserový zdroj může také být osazen skenovací hlavou nebo hlavou pro dělení materiálu Precitec YRC100, která byla později použita pro nařezání vzorků k tahové zkoušce. K laseru je připojen TIG hořák napájený zdrojem



Obr. 28 Svařovací sestava

MagicWave 1700 Job firmy Fronius. Jedná se o invertorový zdroj, který může pracovat jak v režimu stejnosměrného, tak střídavého proudu, je tedy vhodný mimo jiné i pro svařování hliníku a jeho slitin. Maximální svařovací proud výrobce udává 170 A při 35% zatížení. Přístroj má kompaktní rozměry a nízkou hmotnost. Koordinované vedení obou zdrojů je uskutečněno pomocí průmyslového robotu IRB 2400 vyrobeného firmou ABB, který je uzpůsoben pro manipulaci se zátěží do 20 kg v dosahu do 1,8 m. Způsob uspořádání jednotlivých komponent na manipulačním ramenu je vidět na obr. 28.

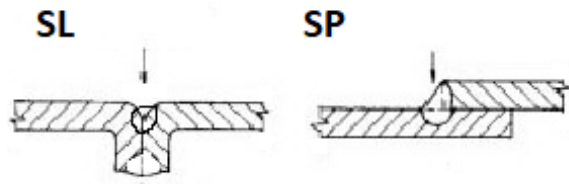
4.1 Příprava svarů [51, 52, 53]

Na úvod experimentu byl prověřen vstupní materiál. Na čistém vzorku dodaného plechu byla provedena tahová zkouška pro ověření mechanických vlastností, které byly srovnány s údaji od výrobce, které jsou sepsány v teoretické části. Dále byla na části plechu odstraněna zinková vrstva pomocí kyseliny chlorovodíkové a brusného papíru, aby byla provedena materiálová analýza na vyjiskřovacím spektrálním analyzátoru chemického složení. Díky tomu byl porovnán obsah prvků s údaji z teoretické části. Výsledky testu jsou sepsány v tab. 6 a odpovídají požadavkům na složení dané oceli.

Tab. 6 Naměřené chemické složení ZM

Označení oceli	Chemické složení [%]			
	C max	P max	S max	Mn max
WSS-M1 A365 A14	0,08	0,025	0,02	0,3

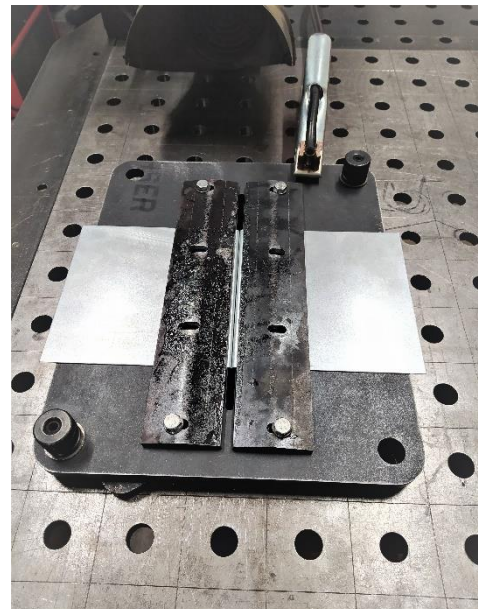
Pro experiment byly zvoleny dva typy prováděných spojů, a to spoj přeplátovaný (SP) a spoj lemový (SL), jejichž řezy jsou znázorněny na obr. 29. Výchozím materiálem pro experiment byly polotovary o rozměrech přibližně 200x150 mm, které byly nastříhány z dodaných plechů. U polotovarů pro lemový spoj byla provedena úprava ve formě ohnutí pásu na konci polotovaru o šířce přibližně 20 mm do pravého úhlu. Polotovary byly před samotným svařováním odmaštěny a zbaveny nečistot.



Obr. 29 Použité typy spojů [51]

Jak bylo popsáno v teoretické části, materiálem pro experiment byly zvoleny plechy z oceli WSS-M1 A365 A14 se zmíněnou povrchovou úpravou. Tloušťka zinkového povlaku byla před experimentem měřena přístrojem Positector 6000. Jako výsledná tloušťka byla brána průměrná hodnota z deseti měření jedné strany plechu a z deseti měření z druhé strany plechu. Průměrná tloušťka tedy byla zjištěna 6,4 μm .

Před svařováním je nutné dané polotovary pevně usadit vůči sobě, aby během procesu nedocházelo k vychýlení částí a ovlivnění kvality svaru geometrickými nepřesnostmi. Pro upnutí vzorků slouží upínací deska s drážkou uprostřed, která se nachází v dráze svaru a slouží jako okno pro laserový paprsek, případně oblouk. K upnutí plechů jsou pak přítomny další dvě desky přichycené k upínací desce pomocí šroubů. Tohoto přípravku bylo použito pro polohování přeplátovaných svarů (obr. 30), kde se tento způsob uchycení ukázal jako vhodný. Jediná úprava byla nutná, a to podložení jednoho plechu tak, aby nedošlo k úhlové výchylce jedné strany vzorku a vnášení nesymetrie do svaru. Pro lemový spoj se toto upnutí ukázalo jako nevhodné, protože sestavení dvou plechů k sobě tak aby mezi nimi nevznikala mezera bylo příliš složité. Mezera v kombinaci s malým průměrem spotu způsobovala vznik malého objemu svarového kovu a neprovaření materiálu. To vedlo k úpravě metody upínání, kdy byl namísto přípravku použit dílenský svěrák, díky kterému bylo možné udržet protilehlé plechy těsně u sebe.



Obr. 30 Přípravek pro fixaci SP vzorků

Postup svařování a změna parametrů byla odvozena od prvotního svaření obou typů spoje čistě pomocí laseru. Zde byla zvolena jako vyhovující hodnota výkonu 1 kW. Během experimentu bylo ohnisko v případě přeplátovaného spoje nastaveno na povrch horního plechu a u lemového spoje na úroveň styku rádiusů lemu. Průměr spotu byl 0,4 mm. Svařovací rychlost byla stejná pro všechny části experimentu a měla hodnotu 20 mm/s. Jako ochranný plyn byl použit argon o čistotě 4.6, jehož množství bylo v případě svařování laserem nastaveno na 16,4 l/min, kde byl přidáván koaxiálně s laserovým paprskem. Experiment spočíval ve sledování vlivu svařovacího proudu na kvalitu spoje u přídavné technologie TIG. Další vzorky byly tedy svařovány s připojeným předřazeným TIG hořákem, u kterého se měnilo nastavení proudu (DC) na hodnoty 20, 30 a 40 A. Změněn byl také způsob dodání argonu, jehož průtok byl

omezen na 12 l/min a byl přiveden pouze od trysky TIG hořáku, který byl nastaven v úhlu 45 ° od povrchu vzorku. Poloha hrotu elektrody byla nastavena 2 mm od dráhy laserového paprsku a 2 mm od povrchu vzorku (v případě lemového spoje od místa styku rádiusů ohybu). Výstupem přípravy vzorků tedy byl jeden svár provedený laserem a následně celkem tři svary s přidanou technologií TIG se změněným proudem. Stejný postup byl opakován pro oba typy spojů. Označení jednotlivých vzorků je sepsáno v tab. 7 podle nastavení proudu pro TIG a typu spoje. Celkově tedy bylo vytvořeno osm variant, ze kterých byly po experimentu vyjmuty vzorky pro provedení tahové zkoušky a posouzení makrostruktury.

Tab. 7 Označení vzorků

Typ spoje	Proud TIG [A]	Označení
Přepřátovaný	0	SP1
	20	SP2
	30	SP3
	40	SP4
Lemový	0	SL1
	20	SL2
	30	SL3
	40	SL4

Z použitých parametrů bylo vypočteno vnesené teplo pro jednotlivé vzorky. Je vypočítáno podle vztahů 4.1, 4.2, 4.3, pro součinitele absorpce tepla byly zvoleny hodnoty $k_{las} = 0,76$ a pro $k_{TIG} = 0,6$. Výpočet vneseného tepla pro všechny vzorky uvádí tab. 8.

$$Q_{las} = k_{las} \cdot \frac{P}{v_s} \quad 4.1$$

Q_{las} – vnesené teplo od laseru [$J \cdot mm^{-1}$]

k_{las} – součinitel absorpce tepla laseru [-]

P – výkon laseru [W]

v_s – rychlost svařování [$mm \cdot s^{-1}$]

$$Q_{TIG} = k_{TIG} \cdot \frac{U \cdot I}{v_s} \quad 4.2$$

Q_{TIG} – vnesené teplo od TIG [$J \cdot mm^{-1}$]

k_{TIG} – součinitel absorpce tepla TIG [-]

U – napětí [V]

I – procházející proud [A]

v_s – rychlost svařování [$mm \cdot s^{-1}$]

$$Q_{celk} = Q_{las} + Q_{TIG} \quad 4.3$$

Q_{celk} – celkové vnesené teplo od obou zdrojů [$J \cdot mm^{-1}$]

Tab. 8 Výpočet vneseného tepla

Vzorek	k_{las} [-]	k_{TIG} [-]	P_{las} [W]	I_{TIG} [A]	U_{TIG} [V]	v_s [mm·s ⁻¹]	Q_{las} [J·mm ⁻¹]	Q_{TIG} [J·mm ⁻¹]	Q_{celk} [J·mm ⁻¹]
SP1	0,76	0,6	1000	0	0	20	38	0	38
SP2	0,76	0,6	1000	20	16,1	20	38	9,66	47,66
SP3	0,76	0,6	1000	30	15,7	20	38	14,13	52,13
SP4	0,76	0,6	1000	40	15,9	20	38	19,08	57,08
SL1	0,76	0,6	1000	0	0	20	38	0	38
SL2	0,76	0,6	1000	20	15,8	20	38	9,48	47,48
SL3	0,76	0,6	1000	30	16,1	20	38	14,49	52,49
SL4	0,76	0,6	1000	40	16,2	20	38	19,44	57,44

4.2 Vizuální hodnocení

Bezprostředně po svaření vzorků bylo možné posoudit kvalitu spojů vizuálně bez zásahu do jejich celistvosti. V případě přepřátovaných spojů byly svary celkově čistší a více symetrické. U vzorku SP2 došlo k výraznému projevu povrchové pórovitosti, která byla dalším zvyšováním proudu redukována. Nedocházelo k výraznému rozstříku taveniny, pouze byl povrch plechu po stranách svaru znečištěn od oxidů zinku. Všechny spoje měly provařený kořen. Na žádném ze vzorků přepřátovaných spojů nebyl patrný výrazný propad či převýšení svaru.









U spojů lemových byl patrný výrazně větší rozstřík taveniny a vývin zinkových plynů, což bylo pravděpodobně způsobeno právě konstrukcí spoje, kdy laserový paprsek ovlivňuje v jednom okamžiku větší část zinkového povlaku než při přepřátovaném spoji. Při pohledu shora jsou viditelné kuličky kovu zaklíněné nad místem styku obou lemů, dochází k tomu stejným mechanismem jako u rozstříku taveniny, jen tekutý kov ulpí uvnitř úzké mezery mezi plechy. Ve svarech pravděpodobně došlo ke vzniku velkého množství pórů, což je jev spojený právě s rozstříkem taveniny. Póry nebylo možné změřit z důvodu „utopení“ svaru v ohybu materiálu, proto bude struktura materiálu lépe zhodnocena po odkrytí vnitřního prostoru tahovou zkouškou.

U obou typů spoje došlo k propalu plechu na začátku svaru, což je způsobeno absencí materiálu na kraji plechu, odkud teplo nemůže být dostatečně rychle odvedeno a dochází k odtavení materiálu. Zároveň je patrné rozšiřování svaru se zvyšujícím se proudem, dobře to lze porovnat na vzorku SP1 a SP4, kde je šířka SP4 téměř dvojnásobná oproti SP1. Fotografie všech svarů z horního pohledu jsou seřazeny v tab. 9.

Pro hodnocení kvality svarů byla použita norma ČSN EN ISO 12932, která specifikuje svarové vady a kategorizuje je do tří stupňů kvality podle nároků kladených na jejich provedení. Z hlediska povrchové pórovitosti norma uvádí, že svar může obsahovat póry o průměru menším, než jsou tři desetiny šířky svaru (3–4 mm) aby byl akceptovatelný pro stupeň kvality D. V kategoriích C a B jsou pak póry nepřijatelné. Podle těchto kritérií nesplňují požadavky na kategorii D svary SP2, SP3 a SP4. Největší naměřené průměry pórů těchto spojů jsou ve stejném pořadí 2,25 mm, 2,85 mm a 1,85 mm. Měření proběhlo analogovým posuvným měřidlem s rozlišením 0,05 mm. Hodnocení tímto způsobem proběhlo pouze u svarů s přepřátovaným spojem, jelikož zde bylo možné jednoznačně určit, kdy se jedná o pór a kdy

nikoliv. U lemových spojů to nebylo možné kvůli existenci mezery, která je přítomna nad svarem a obsahuje množství ztuhlých kapek taveniny, což brání detailnímu zhodnocení této problematiky

Tab. 9 Stav vzorků po svaření

	SP1 - laser 1 kW
	SP2 - laser 1 kW TIG 20 A
	SP3 - laser 1 kW TIG 30 A
	SP4 - laser 1 kW TIG 40 A
	SL1 - laser 1 kW
	SL2 - laser 1 kW TIG 20 A
	SL3 - laser 1 kW TIG 30 A
	SL4 - laser 1 kW TIG 40 A

4.3 Metalografické hodnocení [56]

Z provedených svarů byly vyřezány vzorky pro metalografické posouzení svaru v příčném řezu. Vzorky byly odebrány přibližně ve středu délky svaru, kvůli snížení vlivu defektů vzniklých zapálením oblouku. Příprava vzorků byla provedena v metalografické laboratoři ÚPT AV ČR.

Dělení materiálu proběhlo na laboratorní pile Struers Secotom-60, jedná se o zařízení vybavené posuvným stolem s T-drážkami sloužícími k připevnění širokého spektra upínacích přípravků. Posuv je automatický a jeho rychlost je nastavitelná. Dále pila disponuje chladícím zařízením a regulací otáček řezného kotouče. Podle děleného materiálu je pak volen materiál

řezného kotouče, či další parametry řezání. Celý proces je chlazen vodou k eliminaci tepelného ovlivnění zpracovávaného materiálu.

Pro fixaci vzorků byla použita pryskyřice Struers MultiFast. Jedná se o fenolovou pryskyřici dodávanou v sypké formě, kterou je vzorek zasypán a následně zalisován při teplotě 180 °C a tlaku 25 MPa. K tomuto bylo použito zařízení Citopress-1 firmy Struers. Výsledný vzorek je formě válce o průměru 30 mm a výšce přizpůsobené velikosti odebraného vzorku.

Po vylisování proběhlo broušení a leštění na brusce Tegramin-20 stejné firmy, kterou lze vidět na obr. 31. Ta disponuje unašečem dimenzovaným pro práci s výše popsány vzorky. V procesu je možné nastavit rychlost otáčení unašeče i brusného tělesa, dále pak sílu přtlaku na broušené vzorky. Přístroj má automatizovaný systém chlazení vodou a také nastavitelné dávkování leštících emulzí pro vyšší stupně přípravy povrchu. Úprava vzorku na brusce začíná broušením na smirkových výsecích, na které navazuje broušení pomocí brusných emulzí unášených pomocí k tomu určených těles. Příprava je zakončena leštěním za použití textilních kotoučů a leštících past či kapalin. Proces úpravy vzorků pro tuto práci končil vyleštěním povrchu diamantovou pastou s částicemi o velikosti do 1 μm.

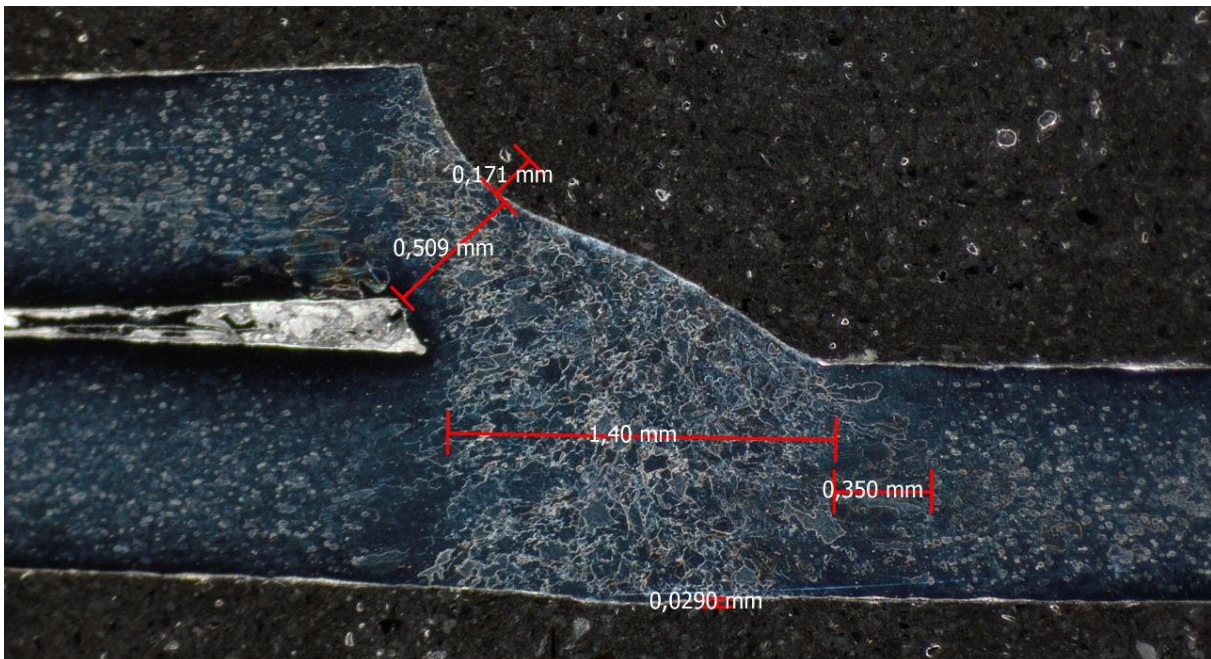


Obr. 31 Bruska Tegramin [56]

Po leštění následoval oplach a leptání 4% roztokem Nitalu (roztok kyseliny dusičné a ethanolu) po dobu 8 sekund při pokojové teplotě. Po oplachu vodou a methanolem proběhlo pozorování a nafocení struktury kovu na mikroskopu s možností laserového skenování Keyence VHX-5000. Měření jednotlivých vad při zkoumání makrostruktury proběhlo v softwaru LAS EZ. Je zde nutné uvést, že přesnost měření je minimálně o řád nižší, než je rozlišení měřícího programu, ale pro toto hodnocení makrostruktury je to dostačující. Díky naleptání lze pozorovat hranice zrn a určovat tak velikost tepelného ovlivnění základního materiálu a stav zrna svarového kovu.

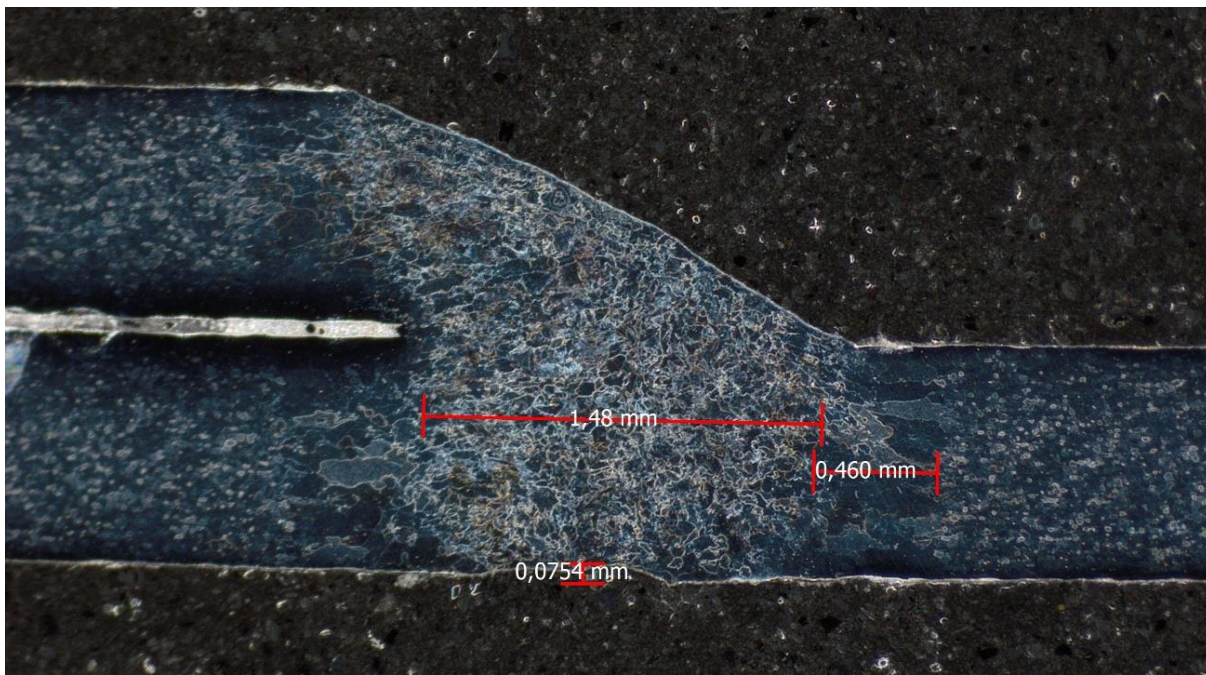
Hodnocení vad svarového spoje je orientačně prováděno s použitím normy ČSN EN ISO 12932, nalezené odchylky jsou podle ní měřeny a zařazeny. U jednotlivých vzorků bude uvedeno, které požadavky podle zmíněné normy splňují, v tomto případě se však bude uvažovat pouze stav hodnocených metalografických řezů bez ohledu na předešlé vizuální hodnocení.

Na obr. 32, což je řez přeplátovaného svaru 'SP1' je vidět výrazný propad po obou stranách svaru, větší z nich byl hluboký 0,17 mm, což je akceptovatelné pro kategorii kvality 'D', jak uvádí norma ČSN EN ISO 12932. Podélný zápal svaru je charakteristický projev svařování laserem ale v tomto případě je umocněn nerovnoběžností plechů, ke které došlo v této části svaru. Je možné že se jedná o lokální deformaci hrany plechu či k tomuto jevu dochází po celé délce vzorku. Jedná se však o vadu, kterou zmíněná norma označuje jako úhlové přesazení a v tomto případě dosahuje 4° a řadí se tak do kategorie 'D'. Převýšení kořene je minimální a jeho výška dosahuje cca 0,03 mm, což splňuje požadavky i na stupeň 'B'. Za zmínku stojí i skutečnost, že kvůli zmíněnému propadu svaru po stranách a úhlovému přesazení došlo k výraznému zúžení části svaru, která přiléhá k hornímu plechu a má tloušťku pouze 0,5 mm což je méně než samotná tloušťka plechu. V řezu nejsou patrné póry či trhliny. Šířka tepelně ovlivněné oblasti je přibližně 0,35 mm. V mezeře mezi plechy lze vidět velké množství roztaveného zinku.



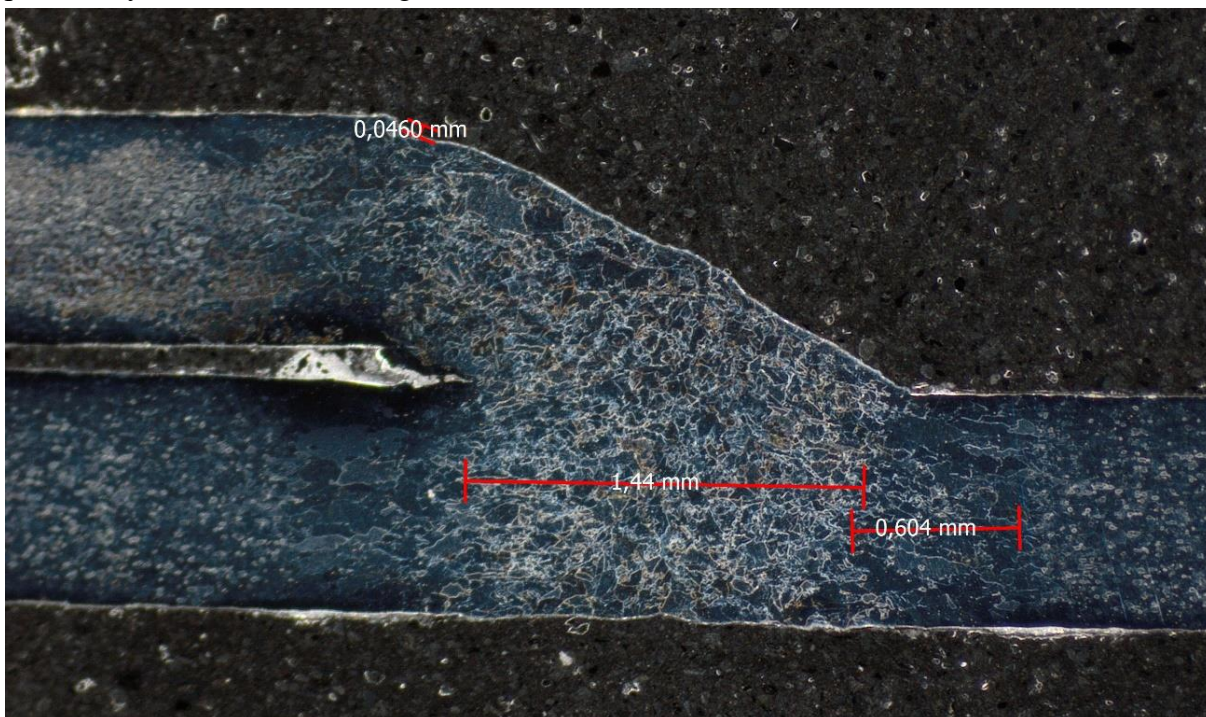
Obr. 32 Makrosnímek SP1

V případě svaru 'SP2' na obr. 33 je patrná rovnoběžnost obou svařených plechů, na rozdíl od předchozího případu tedy nedošlo k úhlovému přesazení plechů. Na řezu také není patrná přítomnost trhlín a pórů. Lze pozorovat rozšíření plochy svarového kovu a výrazné zhrubnutí zrna v TOO. Ta má šířku 0,46 mm. Výrazným prvkem je vyhlazení svaru, kdy na jeho horní straně nedochází k žádnému zvlnění, nýbrž je téměř rovný. Pravděpodobně se jedná o projev přidaného tepelného zdroje (TIG 20 A), ten ovlivnil jak geometrii svaru, tak rozšíření oblasti svarového kovu v řezu, TOO a zhrubnutí zrna. Ve spodní části je patrný vrub kořene, jehož hloubka je 0,07 mm což tento svar podle výše zmíněné normy řadí do kategorie 'C'.



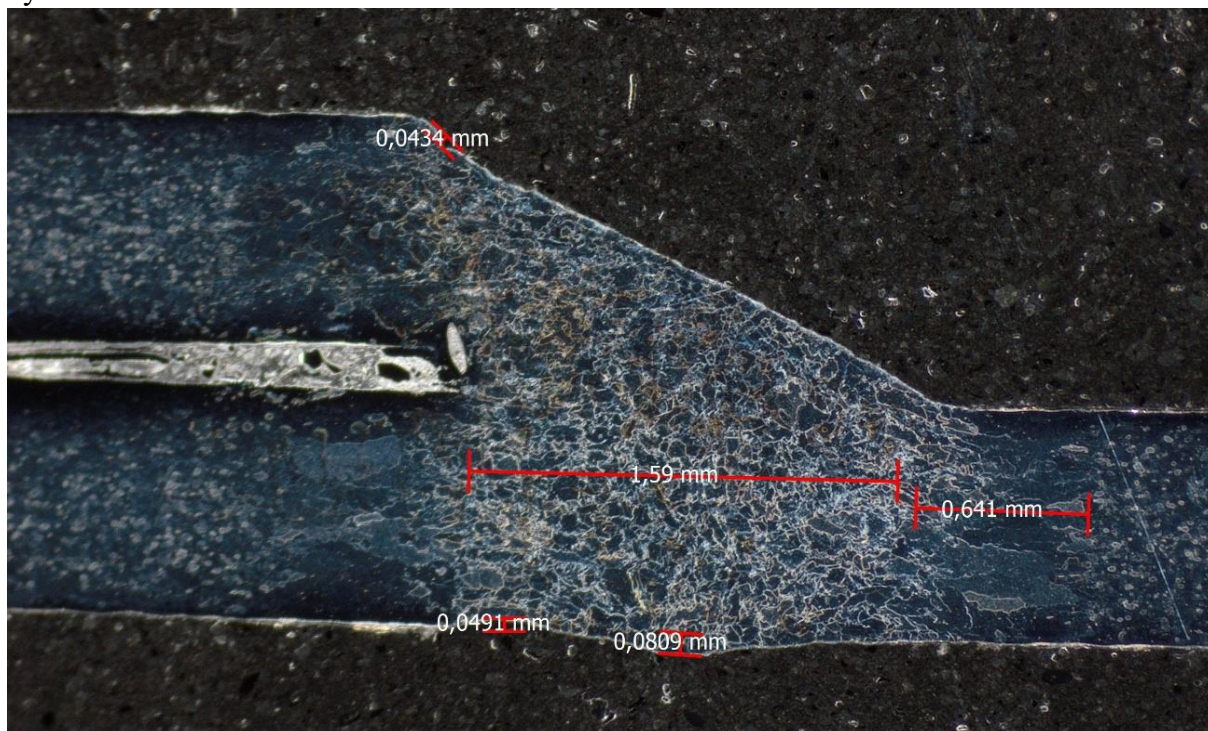
Obr. 33 Makrosnímek SP2

U řezu svaru 'SP3', který je na obr. 34 lze vidět úhlové přesazení o velikosti 2° , svár tak podle tohoto kritéria splňuje požadavky k zařazení do kategorie 'B'. Kvůli této odchylce vznikla mezera mezi plechy, která je částečně zaplněna zinkem. Nejsou zde patrné póry ani trhliny. Na předělu horního plechu a svarového kovu je viditelný propad svaru o hloubce 0,046 mm, což jej řadí do skupiny 'C' podle zmíněné normy. Opět lze pozorovat rozšíření oblasti svarového kovu společně s TOO, která má šířku 0,6 mm. Projevuje se tak vyšší tepelný příkon způsobený zvýšeným proudem na TIG. Na základě změřených vad, splňuje tento svár požadavky na zařazení do kategorie 'C'.



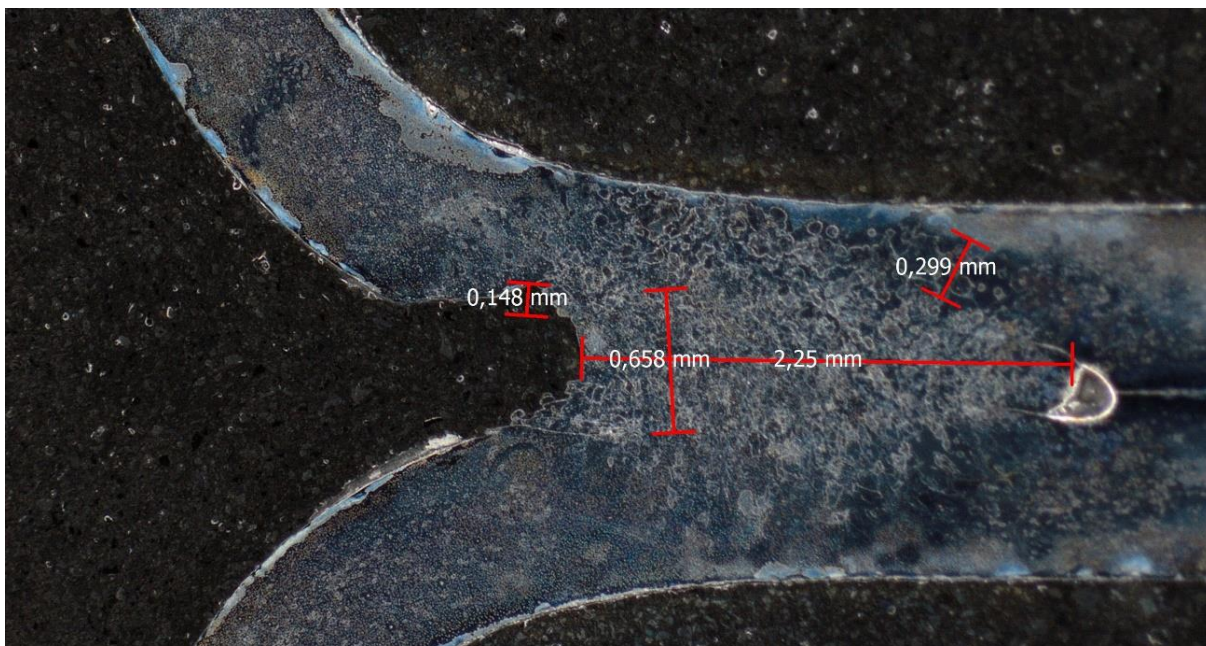
Obr. 34 Makrosnímek SP3

Na makroskopickém snímku svaru 'SP4' (obr. 35) je patrné úhlové přesazení plechů, které svírají úhel 2° . U tohoto svaru byl použit nejvyšší tepelný příkon (laser 1 kW a TIG 40 A) a je zde opět patrný trend projevující se u předchozích svarů, kdy je s přidaným tepelným zdrojem povrch svaru vyhlazován. V tomto případě se nachází propad svaru opět na předělu horního plechu a svarového kovu. Je hluboký 0,043 čímž je touto vadou řazen do kategorie B. Ke stejnému jevu dochází v kořeni svaru, kde je přítomno i převýšení svaru o výšce 0,08 mm, hloubka propadu je cca 0,05 mm, svár tedy odpovídá kategorii C. Oblast svarového kovu a TOO je opět širší než předchozí svary. Šířka TOO je 0,64 mm a šířka svarového kovu v nejširším místě je 1,59 mm. V oblasti mezery mezi oběma svařovanými plechy je patrné výrazné nahromadění zinku.



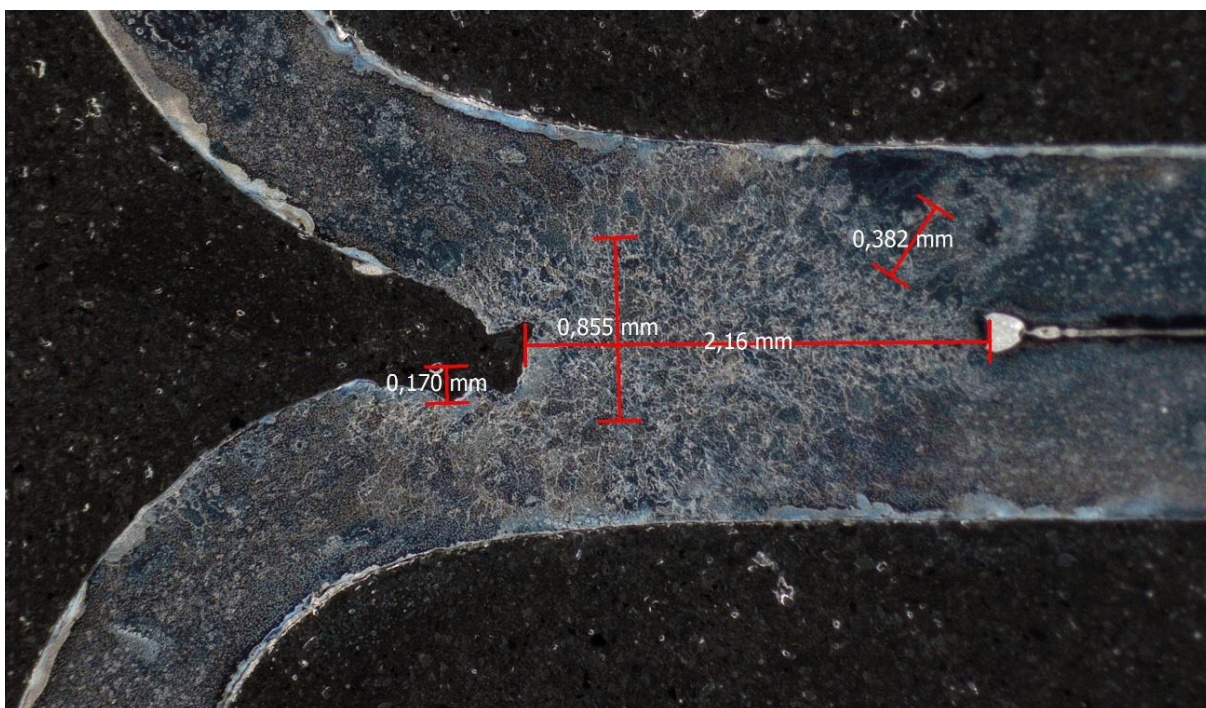
Obr. 35 Makrosnímek SP4

V případě vzorku 'SL1' (k vidění na obr. 36) byly plechy svařeny pouze za pomoci laseru o výkonu 1 kW s lemovým spojením. Na makrosnímku je patrné, že horní plech (poloha vzorku při svařování odpovídala obrázku otočenému o 90° ve směru hodinových ručiček) byl nataven výrazněji než plech spodní. Tento jev byl pravděpodobně způsoben nepřesným vedením laserového paprsku v mezeře spoje. Během svařování zde vznikl propad o hloubce přibližně 0,15 mm. Také lze vysledovat, že povrch svaru je velmi hrubý a kov v tomto místě pravděpodobně chybí z důvodu rozstříku taveniny způsobeného expanzí zinkových par. Plocha TOO a svarového kovu zabírá celou šířku svařovaných plechů a je patrné zhrubnutí zrna až k povrchu svařovaných plechů. Šířka samotné TOO je cca 0,3 mm. To vytváří nebezpečnou kombinaci se zmíněnou prohlubní vzniklou na horním plechu. Spoj samotný je provařen do hloubky 2,25 mm. Pod kořenem svaru je viditelné nahromadění zinku. V oblasti svarového kovu není patrná přítomnost pórovitosti, vměstků, případně trhlin.



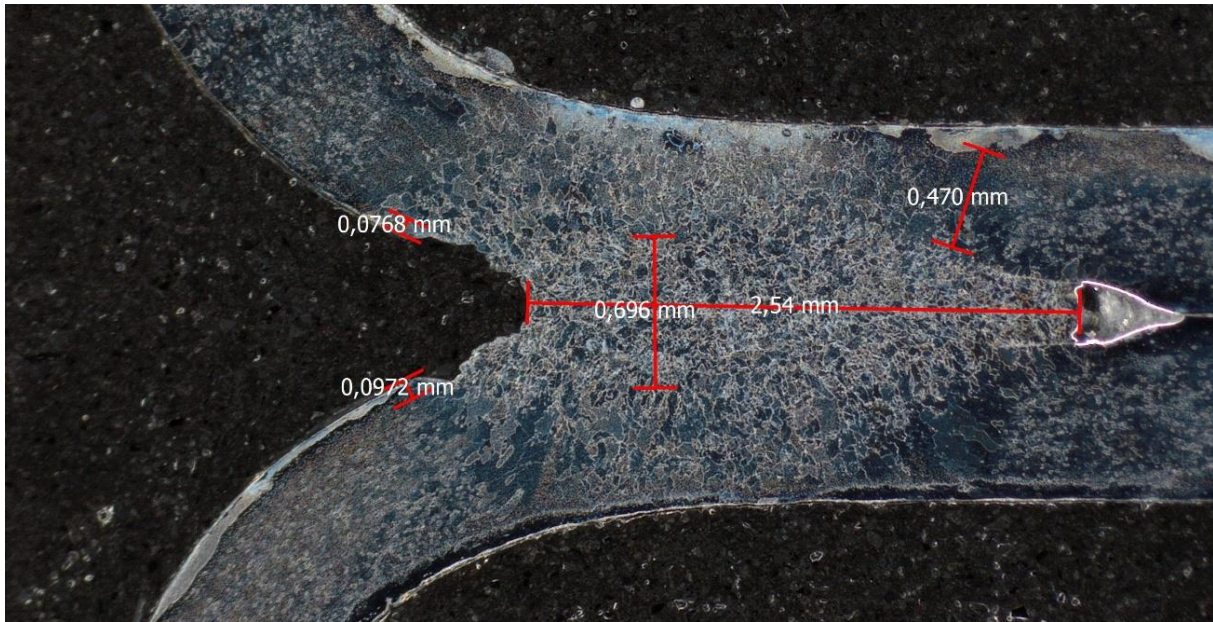
Obr. 36 Makrosnímek SL1

Na obr. 37 je zachycen svarový spoj 'SL2', u kterého již byl použit přidaný TIG (20 A). V tomto případě došlo k obdobné situaci jako u předchozího vzorku, kdy je jeden plech nataven více než druhý a část taveniny ve svaru chybí. V této oblasti dochází k vytvoření ostrých vrubů, které způsobují v kombinaci s hrubým zrnem, tvorbu míst náchylných k šíření trhlin. Propad materiálu je vzhledem k původní geometrii spoje 1,7 mm. Kvůli zvýšenému vnesenému teplu se také zvětšila TOO (šířka kolem 0,36 mm) i oblast svarového kovu. Celková hloubka průvaru je 2,16 mm což je nejspíše způsobeno větším propadem materiálu ze strany působení laseru. Není zde patrný vznik pórů, vměstku a trhlin. Opět je patrná oblast pod kořenem svaru zaplněna zinkem.



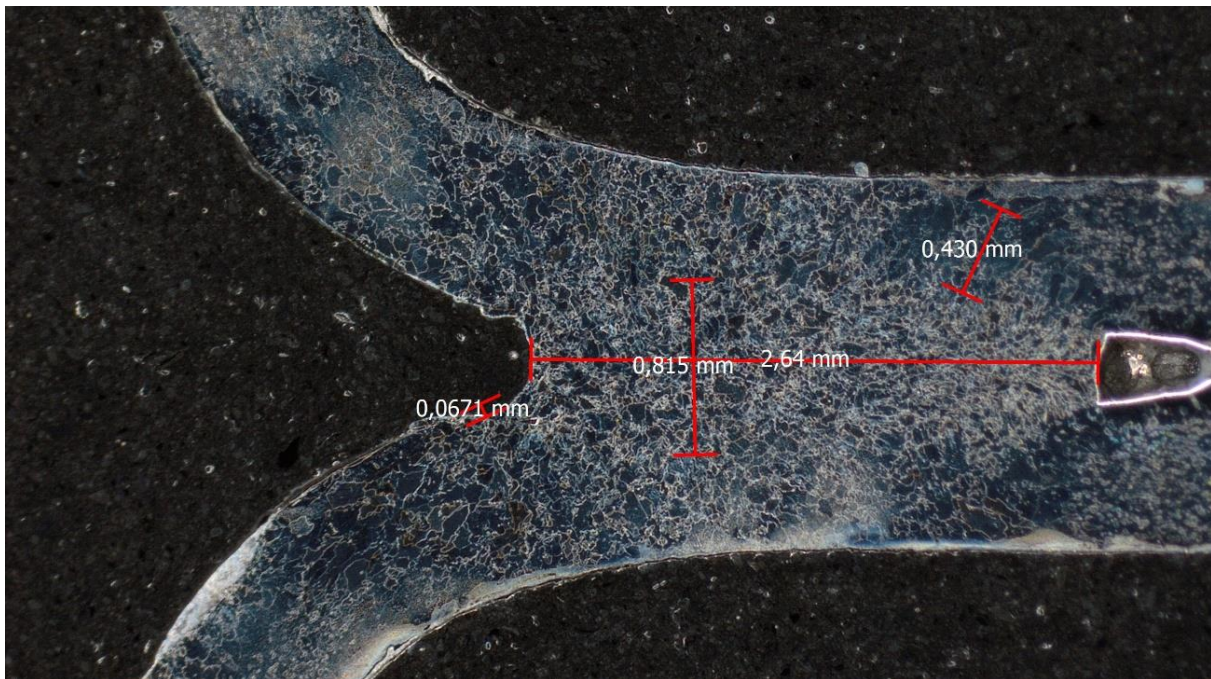
Obr. 37 Makrosnímek SL2

Svarový spoj 'SL3', který lze pozorovat na obr. 38, byl opět svařován s přídavnou technologií TIG, tentokrát s proudem 30 A. Na rozdíl od předchozích svarů je patrné, že je více symetrický. Je zde sice pozorovatelná propadlina v oblasti spodního plechu před svarovým kovem, její hloubka je však 0,09 mm. K podobnému jevu dochází i ve stejné oblasti na horním plechu, kdy je propadlina mělká a má hloubku oproti původní geometrii plechu, opět tyto vruby v kombinaci s polohou v oblasti se zvětšeným zrnem mohou způsobit šíření trhlin při zatížení. Oblast svarového kovu a TOO je rozšířena a je symetrická vzhledem k ose svaru. Šířka svarového kovu dosahuje hodnoty 0,69 mm a šířka TOO dosahuje až k povrchu plechů (šířka TOO je kolem 0,47 mm). Hloubka svaru pak dosahuje hodnoty 2,54 mm. Nejsou patrné známky přítomnosti pórů, vměstků nebo trhlin. Stejně jako v předchozích případech došlo k vytvoření kapsy vyplněné zinkem pod kořenem svaru.



Obr. 38 Makrosnímek SL3

V případě poslední varianty svaru (obr. 39), a to vzorku 'SL4' došlo ke svaření při nejvyšším tepelném příkonu. Lze konstatovat, že z lemového typu spoje se jedná o svar, který je nejvíce symetrický. Ke vzniku propadliny došlo pouze u spodního plechu, zde má hloubku 0,067 mm. Oproti předchozím svarům však nedochází k výraznému zmenšení průřezu jednoho z plechů. Lze zde vyzorovat také skutečnost, že oblast svarového kovu a TOO je největší z lemových svarů. TOO opět dosahuje k povrchu materiálu a má 0,43 mm. Svár je provařen do hloubky 2,64 mm. Opět nejsou patrné póry, vměstky, či trhliny.



Obr. 39 Makrosnímek SL4

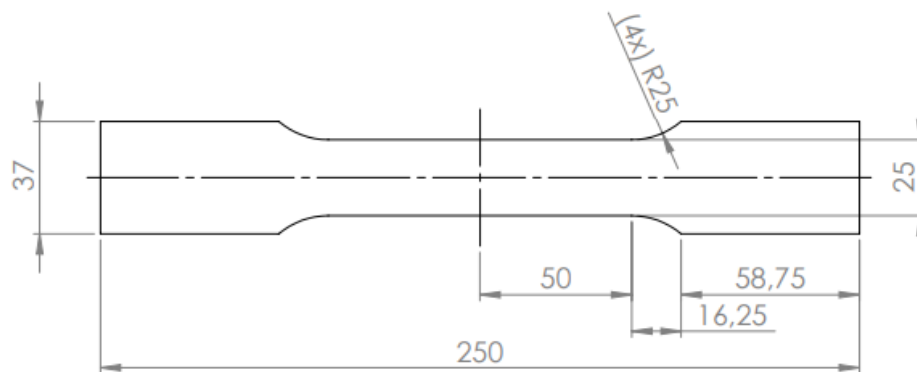
4.4 Tahová zkouška [65]

Další zkouškou prováděnou k zjištění stavu provedených svarů byla tahová zkouška. Ta proběhla v laboratoři firmy Miele technika s.r.o. v Uničově. Z každého svařeného vzorku byly laserem vyřezány tři tělesa pro tahovou zkoušku. Zkouška pak byla provedena na každém z nich. Příprava zkušebních těles proběhla na ÚPT AV ČR. Před samotnou zkouškou byla zkušební tělesa odjehlena a očištěna, aby bylo možné pevné uchycení těles v čelistech trhacího stroje a aby samotná zkouška byla co nejméně ovlivněna potenciálními vruby vzniklými při řezání laserem. Pro měření tažnosti byl připojen průtahoměr, což je zařízení sloužící pro hodnocení tažnosti materiálu, ten byl nastaven na hodnocení tažnosti na délce 80 mm. Tažnost byla jedním z parametrů zjišťovaných pro porovnání jednotlivých svarů. Dalšími zjišťovaným parametrem byla mez pevnosti. Pro výpočet napětí ve vzorku bylo před zkouškou nutné změřit tloušťku (a_0) a šířku (b_0) zkoušené oblasti vzorku. Pro zkoušku bylo zvoleno předpětí o velikosti 5 MPa, díky kterému byly na výstupu zkoušky eliminovány vlivy možného pohybu materiálu na začátku zkoušky. Pro zkoušku byl použit trhací stroj Zwick Roell (obr. 40) vybavený snímačem Xforce P stejného výrobce s měřícím rozsahem do 50 kN. K záznamu a vyhodnocení průběhu zkoušky slouží počítač připojený k trhacímu stroji, vybavený softwarem firmy Zwick Roell.



Obr. 40 Trhací stroj Zwick Roell

Výstupem zkoušky je grafický záznam závislosti napětí na relativní deformaci tělesa a tabulka s kvantifikovanými, výše zmíněnými parametry. Rozměry zkušebních těles jsou uvedena na obr. 41.

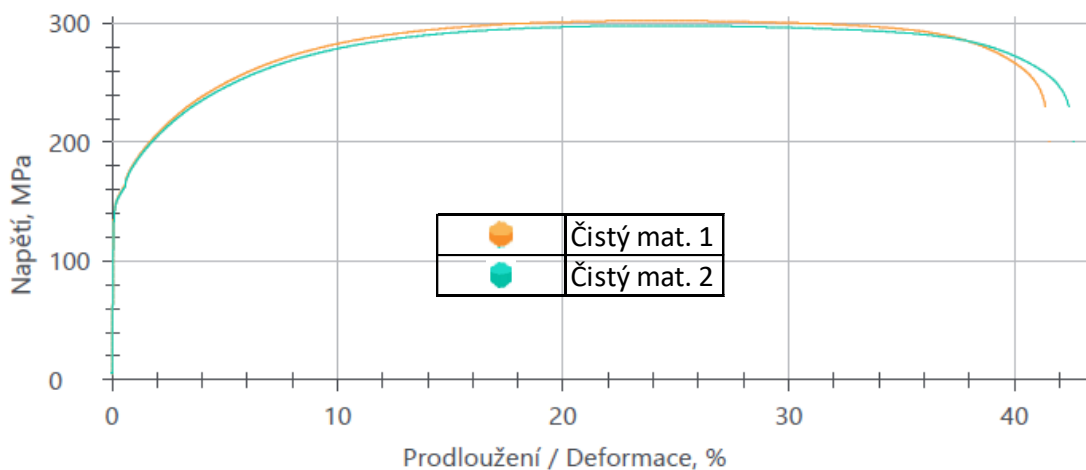


Obr. 41 Schéma použitého tahového tělesa [65]

Jako první byla provedena tahová zkouška na vzorku z čistého plechu bez svaru pro ověření udávaných vlastností. Byla provedena pouze na dvou vzorcích z důvodu nedostatku materiálu. V obou zkouškách však byly mechanické vlastnosti udávané v materiálovém katalogu potvrzeny. Vyhodnocené parametry z obou vzorků jsou sepsány v tab. 10. Grafický průběh zkoušky se nachází na obr. 42.

Tab. 10 Tahová zkouška ZM

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
Čistý mat. 1	154	302	41,8	0,86	24,74
Čistý mat. 2	153	298	42,9	0,87	24,71



Obr. 42 Graf tahové zkoušky ZM

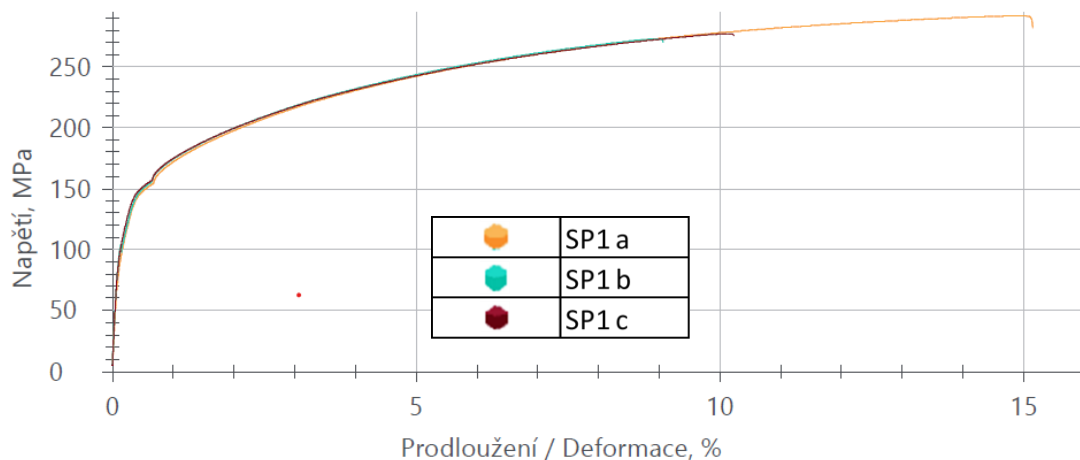
V případě zkoušky přeplátovaného spoje 'SP1' svařeného pouze za pomoci laserového svazku o výkonu 1 kW lze konstatovat, že výsledky se blíží mechanickým vlastnostem základního materiálu. Vzorky byly označeny stejným způsobem jako v předchozích částech práce a jednotlivé tahové zkoušky byly označeny písmeny 'a, b, c'. Ve všech třech vzorcích došlo k přetržení v TOO. Každý ze vzorků praskl v oblasti horního plechu, který byl přivařen po hraně. Přetržený vzorek 'SP1 b' je na obr. 43. Svary na zkoušených vzorcích neobsahovali viditelné póry, trhliny ani jiné potenciální vruby. Na obr. 44 lze pozorovat grafický vývoj tahové zkoušky. Všechny vzorky mají podobný průběh grafů všech tří tahových zkoušek. Výrazný rozdíl je v hodnotách R_m a A_{80} mezi vzorky 'a' a 'b, c'. Označení písmeny pouze rozlišuje jednotlivé vzorky, ale bohužel neříká nic o tom, jak za sebou vzorky původně následovali ve svaru. Je proto možné, že rozdíl, který je charakterizován v tab. 11 je způsoben úhlovým vychýlením osy svaru ku dráze laserového svazku, čímž mohlo dojít k natavení menší části hrany horního plechu a k vytvoření slabšího spoje. V tomto případě by pak posloupnost vzorků ve svaru byla 'a, c, b' nebo naopak.



Obr. 43 Přetržený vzorek SP1 b

Tab. 11 Tahová zkouška svaru SP1

Vzorek	R_m [MPa]	A_{80} [%]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
SP1 a	292	14,61	0,873	24,59
SP1 b	273	8,72	0,877	24,81
SP1 c	277	9,86	0,873	24,59



Obr. 44 Graf tahové zkoušky svaru SP1

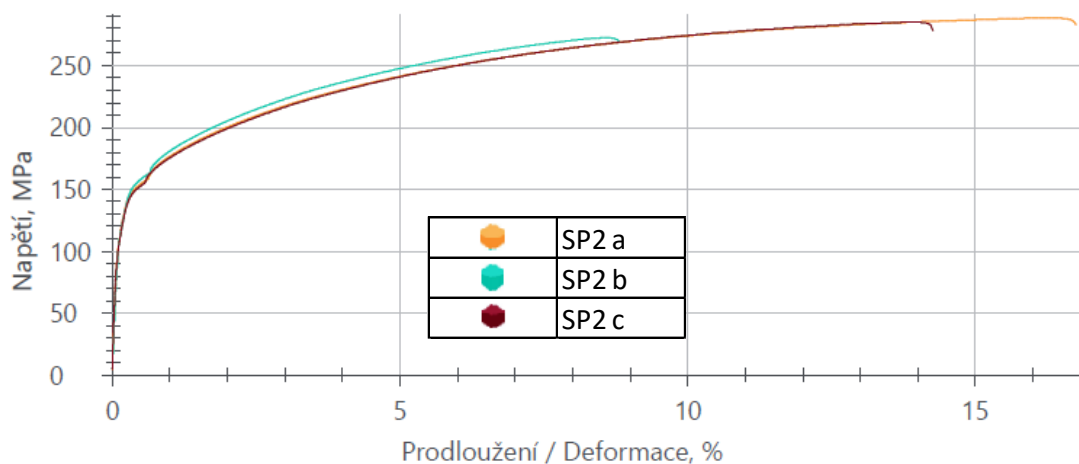
Při tahové zkoušce svaru 'SP2' byl výsledek výrazně ovlivněn vznikem povrchových pórů v oblasti svarového kovu. K přetržení vzorků došlo stejně jako v předchozím případě v oblasti hrany horního plechu spoje. U zkoušky vzorků 'SP2 a' a 'SP2 b' se trhlina šířila od kraje svaru, kde vznikla v TOO a dále se šířila svarovým kovem v oblasti vzniklých pórů. V okamžiku vstupu trhliny do oblasti svarového kovu bez viditelných vad se trhlina, patrně vlivem napětí a spojitého svarového kovu, přesunula přes TOO do základního materiálu. V této chvíli bylo dosaženo výrazného poklesu napětí a tahová zkouška byla přerušena. V případě vzorku 'SP2 c' byl průběh šíření trhliny podobný, ale na konci zkoušky nebyla přenesena do oblasti základního materiálu, jak lze pozorovat na obr. 45. Z hlediska výsledků tahové zkoušky (tab. 12, obr. 46) lze pozorovat téměř stejný vývoj napětí do oblasti meze kluzu. Další vývoj se již liší, protože každý vzorek dosáhl jiné meze porušení. Nejvyšší pevnosti dosáhl vzorek 'SP2 a', u kterého byla naměřena mez pevnosti 288 MPa, což odpovídá i požadavkům na základní materiál.



Obr. 45 Přetržený vzorek SP2 c

Tab. 12 Tahová zkouška svaru SP2

Vzorek	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]
SP2 a	288	16,5	0,876	24,91
SP2 b	273	8,6	0,87	24,65
SP2 c	285	14,1	0,876	24,91



Obr. 46 Graf tahové zkoušky svaru SP2

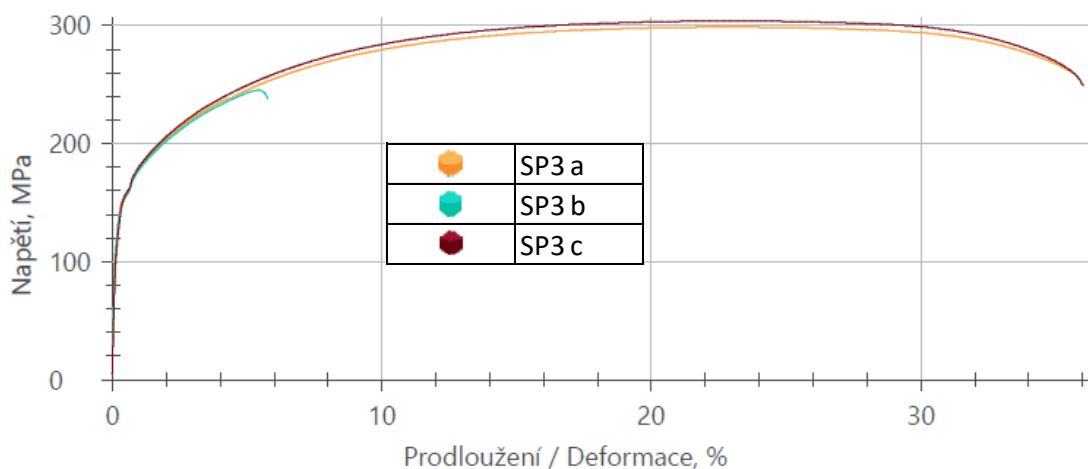
V případě tahové zkoušky svaru 'SP3' byl dobře poznat rozdíl mezi tahovou zkouškou svaru ovlivněného póry a svaru bez viditelných vad. Ze svařence byla opět vyjmuta tři zkušební tělesa, kdy vzorky 'SP3 a' a 'SP3 c' obsahovali čistý svar bez viditelných pórů a trhlin. V případě vzorku 'SP3 b' se v oblasti svaru nacházela řada pórů o velikosti kolem 1 mm. V případě vzorků s nepřerušovaným svarovým spojem došlo k přetržení vzorku mimo svarový kov a TOO jako je vidět na obr. 47 u vzorku 'SP3 a'. U třetího vzorku vznikla trhlina v oblasti jednoho z pórů, jehož poloha byla blízká hraně vzorku. Trhlina se šířila napříč svarovým kovem, kdy spojovala jednotlivé póry a při vstupu do oblasti spojitého svarového kovu vybočila do TOO a následně do základního materiálu, kde šíření trhliny přestalo. Popsaný průběh chování zkoušených těles byl samozřejmě zaznamenán i graficky a důležité charakteristiky byly změřeny (tab. 13 a obr. 48) Grafický průběh tahové zkoušky vzorků 'SP3 a' a 'SP3 c' byl téměř totožný. Vývoj tahové zkoušky vzorku 'SP3 b' kopíroval křivky dvou zbylých vzorků až do oblasti meze kluzu a od ostatních se liší opět v řádu jednotek. K rozdílu dochází v oblasti plastické deformace, kdy pravděpodobně došlo ke vzniku několika krčků v oblasti materiálu mezi póry, což doprovázel pokles napětí a ukončení zkoušky.



Obr. 47 Přetržený vzorek SP3 a

Tab. 13 Tahová zkouška svaru SP3

Vzorek	R_m [MPa]	A_{80} [%]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
SP3 a	298	35,3	0,869	21,44
SP3 b	245	5,6	0,871	21,57
SP3 c	304	35,8	0,869	21,44



Obr. 48 Graf tahové zkoušky svaru SP3

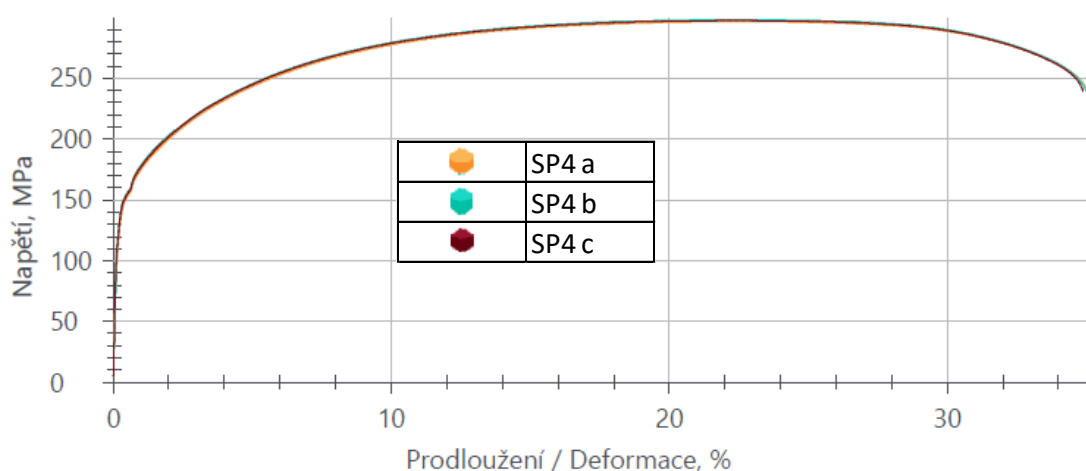
Pro zkoušku svařence 'SP4' byl k dispozici nejlépe provedený svar za použití přídavného TIG hořáku u daného typu spoje. Na povrchu svaru zkušební tělesa 'SP4 a' nebyly před provedením zkoušky patrné žádné póry, trhliny, či jiná porušení materiálu. U vzorku 'SP4 b' byl přítomen jeden povrchový pór o průměru cca 1 mm. Nacházel se uprostřed šířky zkušební tělesa a téměř ve středu samotného svaru (obr. 49). V případě 'SP4 c' byla po jedné straně svaru patrná tři místa s lokálním propadem materiálu. Vzhledem ke kvalitě svarů byly všechny vzorky v průběhu tahové zkoušky přetrženy v oblasti základního materiálu. Z pohledu na grafický výstup zkoušky, který je znázorněn na obr. 50 lze konstatovat, že všechny tři vzorky měli stejný průběh napětí a deformace. Vzhledem k distribuci vzorků v oblasti svařence je tedy možné vyslovit názor, že svar měl po celé délce stejné vlastnosti. Zjištěné mechanické vlastnosti byly u všech vzorků v rámci jednotek stejné (tab. 14). Mez pevnosti odpovídá požadavkům na základní materiál. Tažnost vzorku byla zhruba o 5 % nižší, než je požadováno u základního materiálu, což je ale způsobeno přítomností svaru ve zkoušené oblasti. Hodnoty tažnosti také odpovídají nejvyšším dosaženým tažnostem zjištěných u předchozích zkoušených svarů.



Obr. 49 Přetržený vzorek SP4 b

Tab. 14 Tahová zkouška SP4

Vzorek	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]
SP4 a	296	34,9	0,876	24,86
SP4 b	298	34,8	0,873	24,68
SP4 c	297	34,7	0,873	24,68



Obr. 50 Graf tahové zkoušky SP4

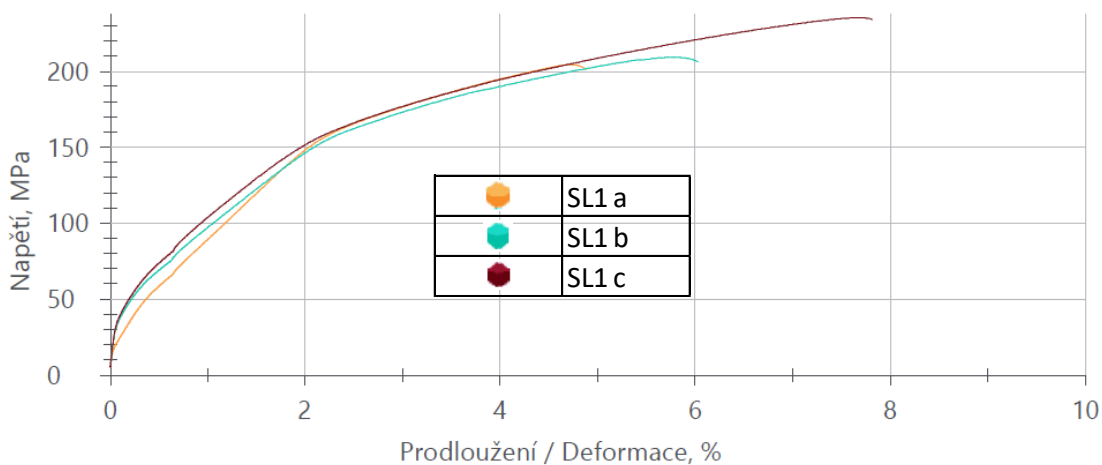
V případě lemových svarů SL1 byly tahovou zkouškou potvrzena očekávání zmíněná v části věnované vizuálnímu hodnocení spojů. Ve všech vzorcích svaru byla tahovou zkouškou odhalena vysoká porozita svaru, kdy nejvíce pórů bylo přítomno ve vzorku 'SL1 b', které je na obr. 51. Dále se projevil také jev popisovaný v posuzování makrosnímků, kdy u svaru 'SL1' je patrné zmenšení tloušťky na jednom z plechů. Výrazně se to projevilo u vzorku 'SL1 a', u kterého došlo k poměrně malé plastické deformaci a k okamžitému přetržení ve zmíněném místě, které bylo navíc oslabeno dvěma póry jejichž původní velikost se blížila průměru 1 mm. V případě vzorků 'SL1 b' a 'SL1 c' byl průběh zkoušky obdobný, v oblasti svaru byl však výrazně vyšší obsah pórů. Zmíněné póry jsou v oblasti svaru nerovnoměrně rozmístěny, mají různou velikost, která se pohybuje od 0,5 po 2 mm a jsou jak vnitřní, tak povrchové. Pravděpodobně však nebyl tolik zúžen jeden z plechů tak jak to bylo popsáno výše, a proto vzorky samotné dosáhly vyšších pevnostních charakteristik. Ve všech případech se trhlinka šířila přes TOO i svarový kov což vzhledem k členitosti a špatné přístupnosti k celému svaru nelze jednoznačně určit. Výsledky zkoušky jsou shrnuty v tab. 15 a obr. 52.



Obr. 51 Přetržený vzorek SL1 b

Tab. 15 Tahová zkouška SL1

Vzorek	R_m [MPa]	A_{80} [%]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
SL1 a	204	4,5	0,878	24,74
SL1 b	209	5,7	0,879	24,73
SL1 c	235	7,4	0,878	24,74



Obr. 52 Graf tahové zkoušky SL1

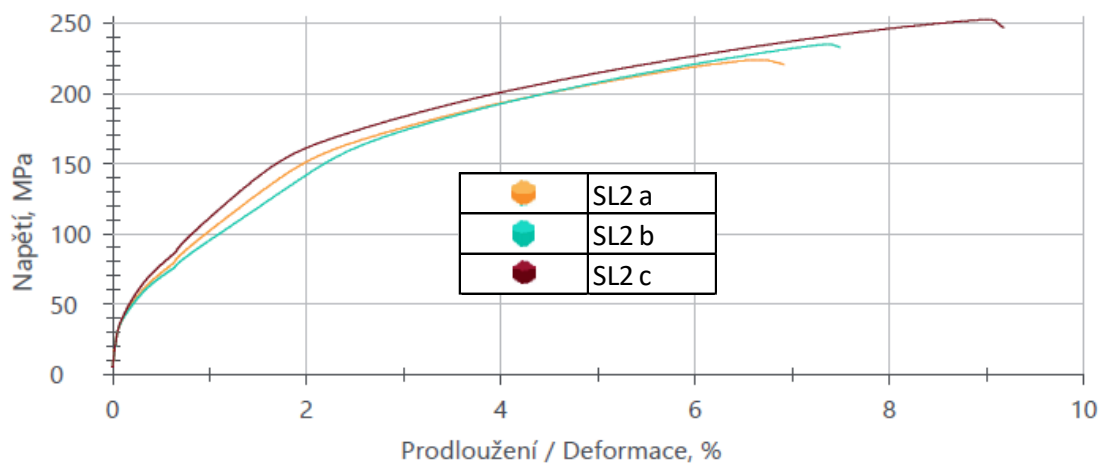
Při zkoušce sady svarů 'SL2' bylo podobně jako u předchozího spoje potvrzeno, že svar obsahuje velké množství jak povrchových, tak vnitřních pórů. Svar však působí více spojitým dojmem. Pórovitost je sice výrazná, ale jedná se hlavně o póry menšího průměru do 0,5 mm, ojediněle pak větší póry do průměru 1 mm. Trhlina se během zkoušky šířila opět skrz TOO i svarový kov s ohledem na póry. Průběh trhliny u vzorku 'SL2 b' lze pozorovat na obr. 53. Zvýšený tepelný příkon se na svaru projevil především vlivem na pevnost spoje. Nejvyšší meze pevnosti dosáhl vzorek 'SL2 c', o hodnotě 253 MPa. Tato hodnota již odpovídá požadavkům na základní materiál. Stejně tak u ostatních vzorků došlo ve srovnání s předchozím svarem ke zvýšení mechanických vlastností, včetně nepatrného zvýšení tažnosti, jejíž nejvyšší hodnota byla naměřena u vzorku 'SL2 c' a to 8,8 %. Ve srovnání s přeplátovaným spojem stejných parametrů však nedosahují takových pevnostních charakteristik ani tažnosti, jejichž hodnoty jsou uvedeny v tab. 16. Vývoj tahové zkoušky je u všech vzorků téměř stejný, což lze pozorovat na obr. 54.



Obr. 53 Přetržený vzorek SL2 b

Tab. 16 Tahová zkouška SL2

Vzorek	R_m [MPa]	A_{80} [%]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
SL2 a	224	6,6	0,88	24,74
SL2 b	235	7,1	0,879	24,63
SL2 c	253	8,8	0,878	24,78



Obr. 54 Graf tahové zkoušky SL2

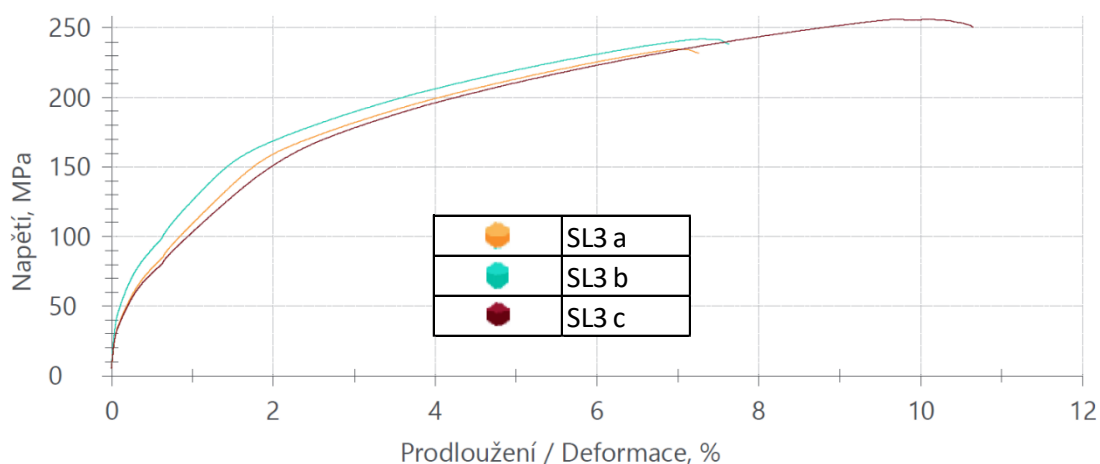
U zkoušky svaru 'SL3' bylo roztržením materiálu, stejně jako u předchozích zkoušek svarů 'SL', odhaleno množství pórů a nepravidlostí v oblasti svarového spoje. Póry byly změřeny a nejvyššího průměru dosáhl pór na vzorku 'SL3 b' o průměru 1,7 mm. Je třeba vzít v úvahu, že měření bylo provedeno až na porušeném vzorku a póry mohly být deformovány, předchozí stav však měření nedovoloval. Trhliny se u vzorků šířily opět podobně jako v předchozích případech, kdy procházely jak TOO, tak částečně svarovým kovem a jejich dráha byla silně ovlivněna zmíněnou pórovitostí. Ve srovnání s předchozími zkouškami lze pozorovat zvýšení meze pevnosti i tažnosti. Nejlepších hodnot dosáhl paradoxně vzorek 'SL3c', u kterého byl také zjištěn největší podíl pórovitosti což lze pozorovat na obr. 55. Zbylé dva vzorky pak měly velmi podobný průběh a dosáhly téměř stejné deformace. Vývoj tahových zkoušek a měřené hodnoty jsou patrné na obr. 56 a v tab. 17.



Obr. 55 Přetržený vzorek SL3 c

Tab. 17 Tahová zkouška SL3

Vzorek	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]
SL3 a	235	6,9	0,879	24,69
SL3 b	242	7,3	0,88	24,63
SL3 c	256	10,3	0,879	24,69



Obr. 56 Graf tahové zkoušky SL3

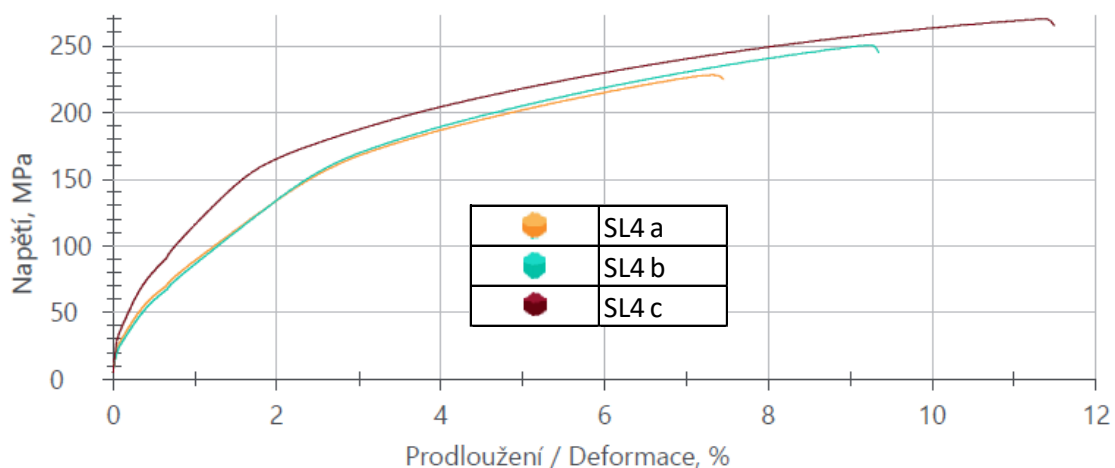
U zkoušky lemového spoje svařovaného s nejvyšším použitým tepelným příkonem, byl potvrzen trend pozorovaný u tohoto typu spoje. V oblasti svarového kovu všech tří vzorků se opět objevuje vysoká míra porozity. Ze všech svarů tohoto typu zde však bylo pórů nejméně. U vzorku 'SL4 a' se kromě dvou pórů objevilo i množství propadů svaru, což výrazně přispívá k celkové nepravidelnosti svaru. U vzorku 'SL4 b' je na obr. 57 dobře patrný propad uprostřed svaru, který kopíruje původní sestavení plechů, dále pak svár na tomto vzorku obsahuje tři póry, jejichž velikost se pohybuje od 0,8 mm po 1,4 mm. Velikost póru 1,4 mm byla nejvyšší naměřená hodnota z této sady vzorků. Na vzorcích je patrné, že trhlina se opět šíří částečně v TOO a v blízkosti pórů také svarovým kovem. Při porovnání s předchozími svary tohoto typu spoje bylo při zkoušce dosaženo nejvyšších hodnot meze pevnosti i tažnosti. Tyto hodnoty jsou však výrazně nižší než u hodnot změřených v případě zkoušek přeplátovaných svarů, natožpak požadavků na základní materiál. Tento svár dokonce dosáhl nejnižších hodnot meze kluzu v rámci celého experimentu. Rozdíly v průběhu zkoušky všech tří vzorků lze vidět na obr. 58 a naměřená data jsou shrnuta v tab. 18.



Obr. 57 Přetržený vzorek SL4 b

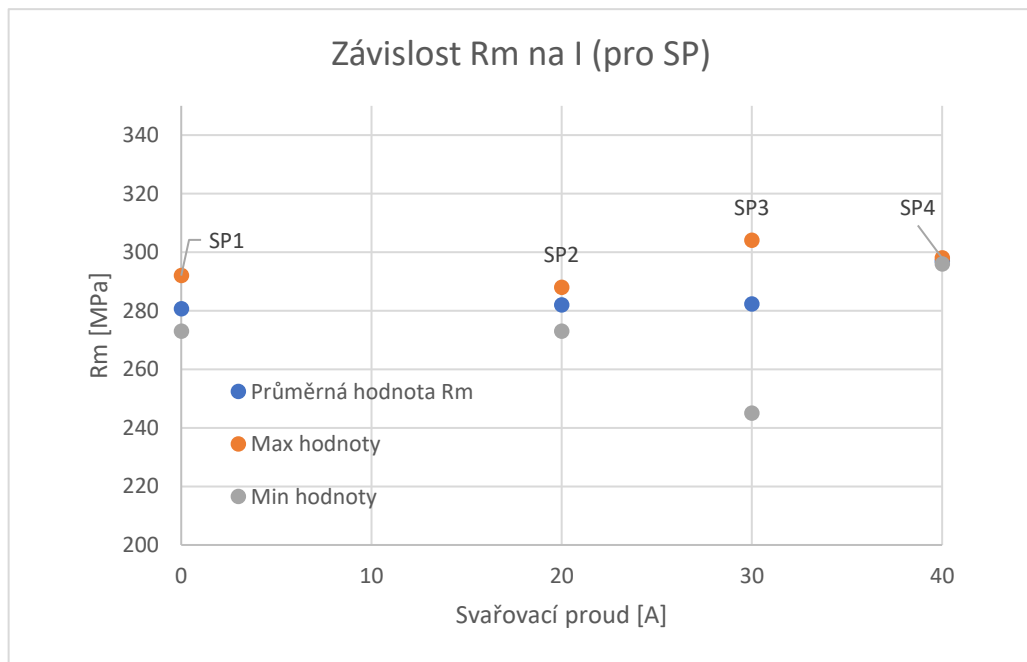
Tab. 18 Tahová zkouška SL4

Vzorek	R_m [MPa]	A_{80} [%]	a_0 [mm]	b_0 [mm]
SL4 a	228	6,83	0,88	24,71
SL4 b	250	8,62	0,875	24,67
SL4 c	270	10,93	0,879	24,74

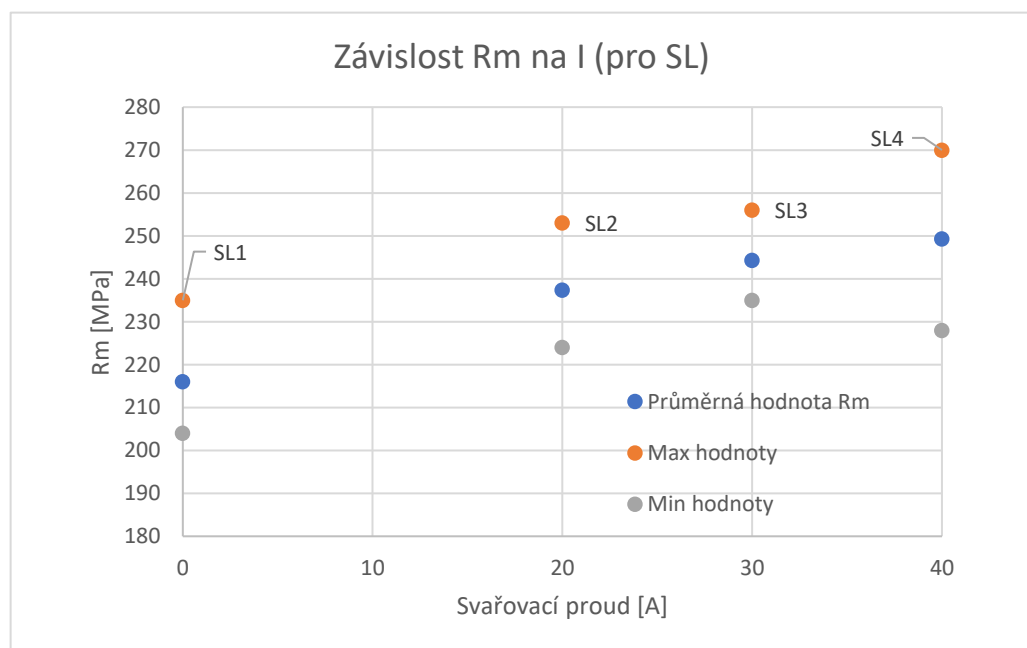


Obr. 58 Graf tahové zkoušky SL4

Hodnoty dosažené meze pevnosti u obou typů spoje byly vyneseny do obr. 59 a 60. Jsou zde zaznamenány aritmetické průměry z výsledků tahových zkoušek doplněné o maximální a minimální hodnotu meze pevnosti. Grafy jsou provedené pro každý typ spoje zvlášť a jsou zde zahrnuty také svary provedené pouze laserem.



Obr. 60 Graf závislosti Rm na I pro SP

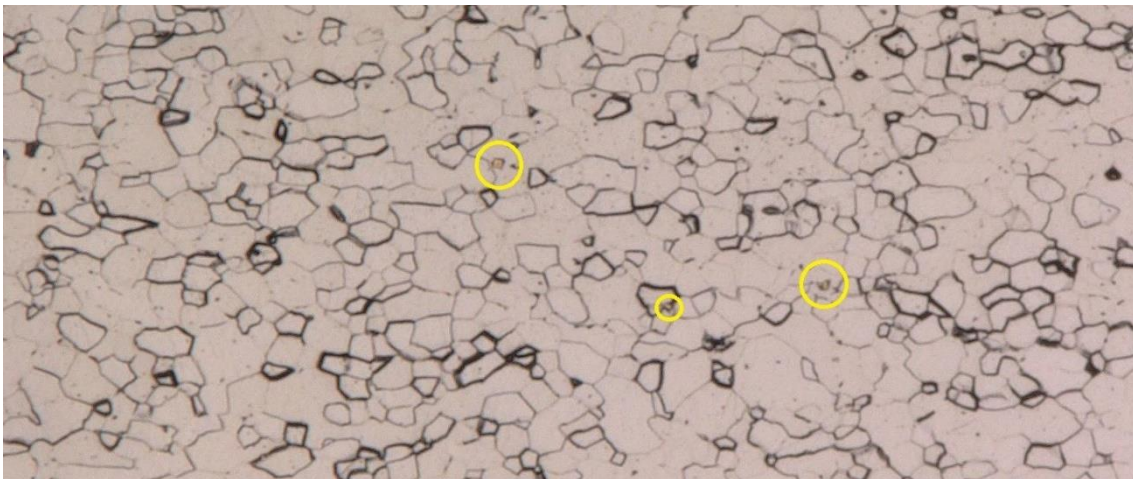


Obr. 59 Graf závislosti Rm na I pro SL

4.5 Hodnocení mikrostruktury

Jako poslední proběhlo hodnocení mikrostruktury kovu, které bylo provedeno pouze na jednom svaru a to 'SP4'. Hodnocení bylo provedeno hlavně pro srovnání jednotlivých struktur vzniklých během svařování, které jsou u jednotlivých svarů totožné a liší se pouze ve velikosti daných oblastí. Byly tedy vytvořeny mikrosnímky, které zachycují základní materiál a změnu struktury jemnozrné a hrubozrné oblasti TOO a TOO se svarovým kovem. Tyto snímky byly pořízeny v oblasti středu spodního plechu přeplátovaného svaru. Vzorky byly zpracovány obdobně jako v případě hodnocení makrostruktury, leštěny diamantovou emulzí a leptány na hranici zrn pomocí 3% roztoku nitalu. Snímky byly pořízeny na mikroskopu Keyence VHX-5000.

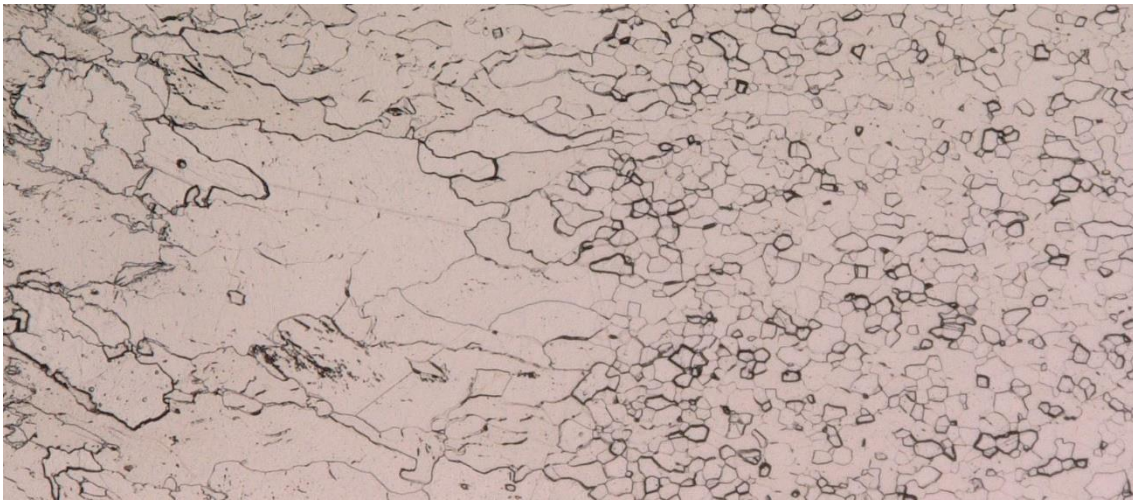
Z vytvořených snímků je patrná feritická struktura kovu. V případě oblasti základního materiálu se jedná o jemnozrnou strukturu s polyedrickým tvarem zrn. Tato podoba je výchozí strukturou dodaného materiálu bez dalších tepelných či mechanických úprav. V oblasti základního materiálu, který je zachycen na obr. 61, jsou ojediněle pozorovatelné útvary mnohoúhelníkového tvaru a zlatavé barvy (při osvětlení bílým světlem). Jedná se o nitridy titanu, které vznikají při výrobě oceli, kde je titan použit pro její uklidnění a snížení náchylnosti oceli k růstu zrna. Jsou vyznačené na obr. 61 ve žlutých kružnicích. Mikrosnímek je pořízen při 500násobném zvětšení.



Obr. 61 Mikrostruktura základního materiálu

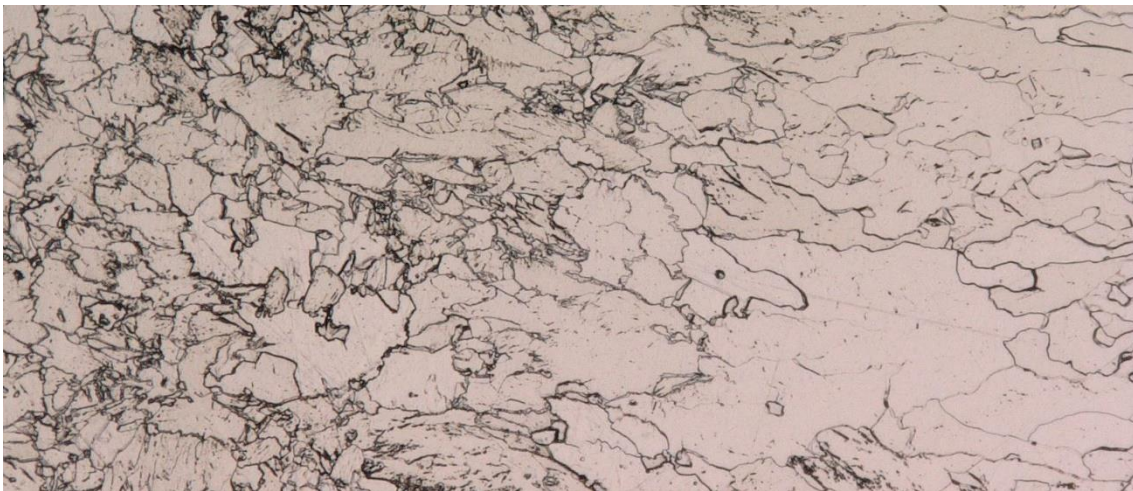
V TOO lze pozorovat, že zrno oproti základnímu materiálu násobně zhrublo, a jeho tvar je prodloužený ve směru odvodu tepla. TOO je viditelná na obr. 62, kde je zachycen její přestup z hrubozrné oblasti TOO do oblasti jemnozrné (zleva doprava), která je velmi podobná

struktury základního materiálu. V oblasti TOO se rovněž nachází částice nitridu titanu. Přiřazený snímek byl pořízen při zvětšení 300.



Obr. 62 Přechod z hrubozrnné do jemnozrnné oblasti TOO

Na obr. 63 je pozorovatelný přechod TOO přes částečně natavenou oblast do svarového kovu (zprava doleva). V oblasti svarového kovu nedošlo ke vzniku charakteristické licí struktury, pravděpodobně z důvodu pomalejšího chladnutí taveniny vlivem použitého TIG zdroje. Zrno v oblasti svarového kovu má nepravidelný tvar a orientaci.



Obr. 63 Přechod mezi TOO a svarovým kovem

Bylo provedeno také měření velikosti zrna. K tomu byla použita planimetrická metoda, která je popsána v normě ČSN EN ISO 643, v příloze B. Oblast, ve které byla hodnocena velikost zrna byla obdélníkového tvaru a její plocha byla vypočítána pomocí měřicího programu firmy Keyence. Výsledky ukázaly, že velikost zrna v základním materiálu odpovídala velikosti zrna G9 podle zmíněné normy a v TOO byla naměřena velikost G6. Označený počet zrn a plocha vzorku je uveden v příloze 1 a 2.

4.6 Shrnutí experimentální části

Z výsledků provedených zkoušek plyne, že napříč nastavením dosahovaly přeplátované spoje výrazně lepší úroveň než spoje lemové. Již při vizuálním hodnocení bylo patrné, jakým způsobem se projevovала rozdílná ovlivněná plocha zinku na těchto dvou typech spojů. Podle parametrů naměřených na pořízených makrosnímčích svarů lze pozorovat, že v případě svařování lemových spojů byly v jednom okamžiku laserovým paprskem ovlivňovány dva pozinkované povrchy o délce 2,2 až 2,6mm, hloubka průvaru se zvyšovala se zvyšujícím se svařovacím proudem. Přídavný tepelný zdroj pak dále ovlivňuje spíše horní vrstvu povrchu materiálu. V případě přeplátovaných spojů je pak ovlivněné množství zinku výrazně nižší než u spojů lemových, objem zinku se zde nachází pouze ve vrstvě odpovídající dvěma tloušťkám povrchové vrstvy zinku, která je uzavřena mezi svařovanými plechy a TIG zde působí rovnoměrněji. Z tohoto srovnání plyne rozdíl v projevené pórovitosti mezi použitými spoji, protože s vyšším množstvím odpařeného zinku se zvyšuje také tlak působící uvnitř svařované oblasti a způsobuje rozstřík taveniny a vznik pórů, jejichž přítomnost měla výrazný dopad na výsledky tahových zkoušek. U lemových spojů byla pevnost svaru negativně ovlivněna pravděpodobně také tím, že spára mezi lemy byla orientována rovnoběžně s paprskem a ve svařované oblasti vznikal poměrně malý objem taveniny. Pevnost lemových spojů byla jistě také ovlivněna vznikem vrubů, které byly zjištěny na makrosnímčích. Pro hodnocení makrostruktury svarů, byla aplikována norma ČSN EN ISO 12932 ale je nutné připomenout, že zde byla použita pro zařazení jednotlivých vad na daných makrosnímčích a nebere v úvahu celý projev svaru. Zařazení jednotlivých svarů do kategorií, které definuje je zaznamenáno v tab. 19.

Tab. 19 Zařazení dle ČSN EN ISO 12932

Vzorek	SP1	SP2	SP3	SP4	SL1	SL2	SL3	SL4
Kategorie dle ČSN EN ISO 12932	D	C	C	C	D	D	D	C

Tahové zkoušky ukázaly, že se zvyšujícím se proudem se zvyšovala pevnost spojů, a to jak u lemových, tak přeplátovaných. V případě porovnání průměrných výsledků tahových zkoušek jednoznačně vítězí přeplátované spoje, jejichž hodnoty R_m převyšují všechny průměrné hodnoty R_m provedených svarů v lemových spojiích. Z celého experimentu dosáhl nejlepších výsledků (z hlediska pevnosti) svar s nejvyšším tepelným příkonem 'SP4', jehož průměrná R_m dosáhla nejvyšších hodnot srovnatelných s výsledky u základního materiálu. V případě lemových spojů pak dobrých výsledků dosáhl svar 'SL4' ale byl zde stále silný projev porozity. Parametry svařování u těchto svarů jsou shrnuty v tab. 20.

Tab. 20 Parametry svarů s nejlepší pevností

Vzorek	Spoj	P_{las} [W]	I_{TIG} [V]	v_s [mm·s ⁻¹]	Ochranná atmosféra
SP4	Přeplátovaný	1000	40	20	Argon 4.6
SL4	Lemový	1000	40	20	Argon 4.6

4.7 Technicko-ekonomické hodnocení

Na závěr je vhodné posoudit i ekonomickou stránku věci. Rozpis základních faktorů, které mají vliv na cenu provozu čistě laserové technologie a pak svařování pomocí technologie Laser-TIG je uvedeno v tab. 21. Ve výpočtu nejsou zohledněny náklady na přípravky potřebné pro danou aplikaci, jelikož jejich konstrukce by byla pro dané technologie stejná. Pro výpočet u Laser-TIG byly brány parametry nastavení, které mělo nejlepší výsledky, a to bylo svařování s proudem 40 A na hořáku TIG. V případě změny parametrů se budou odpovídajícím způsobem měnit i náklady na provoz. Je uvažováno 30 240 pracovních hodin (3 směny), cena elektrické energie je 5,5 Kč/kWh a cena použitého ochranného plynu argon o čistotě 4.6 je 0,279 Kč/l, stroje

Tab. 21 Srovnání nákladů

Položka	Spotřeba či cena	Náklady/ hod
Laser ($v_s = 20$ mm/s)		
Příkon	6 kW	33 Kč
Mzda obsluhy	220 Kč + 35 %	297 Kč
Cena sestavy	8 000 000 Kč	264,5 Kč
Ochranný plyn	16,4 l/ min	274 Kč
Údržba	170 000 Kč/ rok	5,6 Kč
Celkové náklady za hodinu		874,1 Kč
Celkové náklady na metr svaru		12,1 Kč
Laser-TIG ($v_s = 20$ mm/s)		
Příkon	6,77 kW	37,2 Kč
Mzda obsluhy	220 Kč + 35 %	297 Kč
Cena sestavy	8 030 000 Kč	265,5 Kč
Ochranný plyn	12 l/ min	201 Kč
Údržba	182 000 Kč/ rok	6 Kč
Celkové náklady za hodinu		806,7 Kč
Celkové náklady na metr svaru		11,2 Kč

jsou pak odepisovány v období pěti let. Rozpis jednotlivých nákladů je uveden v tab. 21. Ze srovnání nákladů na provoz obou technologií plyne, že v případě svařování pomocí Laser-TIG je v případě těchto parametrů dokonce levnější než čistě laserem. To je způsobeno tím, že zde byla menší spotřeba ochranného plynu. Je nutné brát v úvahu, že toto zhodnocení uvažuje pouze parametry použité při samotném experimentu a v případě zavedení této technologie do praxe, bude využíváno i jiných kombinací parametrů. Lze však konstatovat, že se zapojením přídatné technologie TIG náklady nijak výrazně nerostou a největší finanční položku zde představuje laserový zdroj společně s robotem.

5 ZÁVĚRY

Teoretická část práce byla věnována popisu svařování hlubokotažných plechů, ošetřených galvanickým zinkováním, metodou Laser-TIG. Zabývala se také stručným popisem svařovaného materiálu a rozebrala možnosti zkoušení vytvořených svarů destruktivními a nedestruktivními diagnostickými metodami.

V případě experimentální části práce byla nejdříve popsána svařovací sestava, včetně stručné specifikace jednotlivých strojů, použítá k vytvoření testovaných svarů. Byly také popsány parametry a okolnosti, které vytvoření svarů provázely. Také byl popsán postup, jakým byly připraveny samotné vzorky pro následující zkoušky kvality svarů.

Hodnocení vytvořených svarů začalo základní vizuální zkouškou, která hodnotila nejprve přeplátované spoje z důvodu dobré dostupnosti povrchu svaru a jednoznačnému hodnocení povrchových vad. Jak bylo zmíněno výše, byla jako podklad pro hodnocení těchto svarů použita norma ČSN EN ISO 12932. Při přihlédnutí k parametrům, které tato norma vyžaduje pro zařazení svarů do jednotlivých kategorií kvality, bylo rozhodnuto, že spoje 'SP2', 'SP3' a 'SP4' neodpovídají požadavkům této normy a jsou podle ní nevyhovující z důvodu přítomnosti množství povrchových pórů. Svar provedený čistě laserem ('SP1') splňoval kritéria pro zařazení do kategorie 'B'. V případě lemových spojů byla situace zhodnocena stejným způsobem ale až po provedení tahových zkoušek. Tahová zkouška zde odhalila výrazný projev porozity u všech provedených svarů. Podle zmíněné normy, není žádný z provedených svarů dle normy akceptovatelný. Při hodnocení makrostruktury byla k posouzení vad použita stejná norma, vzhledem k charakteru spojů se jedná spíše o vodítko k hodnocení, protože norma nspecifikuje použité svarové spoje. Na provedených makrosnímčích byly naměřeny jednotlivé geometrické charakteristiky svarů. V makrostruktuře svarů nebyly nalezeny trhliny, póry ani vměstky. V případě přeplátovaných spojů bylo pozorováno několik odchylek od ideálního svarového spoje. Dále je ze všech vzorků patrné, že se zvětšuje TOO, objem svarového kovu a u lemových spojů lze pozorovat zvyšování hloubky průvaru. Dále byly svary hodnoceny pomocí tahové zkoušky. Lze zhodnotit, že v případě použití přídavného svařovacího zdroje byla se zvyšujícím se svařovacím proudem zvyšována také mez pevnosti svaru. Z tahových zkoušek tak vyšlo najevo, že pevnějším spojením je přeplátovaný spoj. Na závěr byla popsána mikrostruktura jednotlivých oblastí vzorku 'SP4' a pro orientaci bylo provedeno hodnocení velikosti zrna v TOO a základním materiálu.

Po provedení všech zkoušek bylo provedeno jejich vyhodnocení a byly rozebrány faktory nejvíce ovlivňující kvalitu spojů. Z provedených zkoušek vyšlo najevo, že spojením s nejvyšší dosaženou pevností a nízkým objemem vad ve svaru byl vzorek 'SP4', čili svar provedený metodou Laser-TIG o svařovacím proudu 40 A s přeplátovaným typem spoje. Je nutné brát v úvahu, že experiment proběhl v poměrně úzkém spektru nastavení a je tedy pravděpodobné, že existují i vhodnější varianty použitých parametrů.

SEZNAM LITERATURY [66]

1. *Technologie GMA a svařování povrchově upravených plechů*. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: MM publishing, 2006, 11.10.2006 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-gma-a-svarovani-povrchove-upravenych-plechu.html>
2. *GMA Brazing of Galvannealed Interstitial-Free Steel: A unique process that combines brazing and gas metal arc welding has displayed an ability to reach 100% joint efficiency in thin zinc-coated steel*. SUPPLEMENT TO THE WELDING JOURNAL [online]. 2013, 2013/2, 2013(29-s), 7 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_2013_02_s29.pdf
3. Kubíček, Jaroslav. *TECHNOLOGIE II ČÁST SVAŘOVÁNÍ: Díl 2 SPECIÁLNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ TLAKOVÉ SVAŘOVÁNÍ* [online]. Brno, 2006, 69 stran [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_specialni_metody_svarovani_kubicek.pdf
4. Mrňa, Libor. *Základy laserové techniky* [online]. ÚST FSI VUT Brno, 2013 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf
5. *ASM handbook. 6th print*. Materials Park: ASM International, 2003. ISBN 978-0-87170-382-8.
6. Chmelíčková, Hana. *Laserové technologie v praxi I.: Pevnolátkové lasery* [online]. Olomouc: SLO UP a FZÚ AV ČR Olomouc, 2011 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_4prez.pdf
7. Kořán, Pavel. *Hlavní typy laserů používaných v průmyslu* [online]. 19.2.2013 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
8. Lapšanská, Hana. *Laserové technologie v praxi*. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. ISBN 978-80-87240-65-6.
9. Kannatey-Asibu, Elijah. *Principles of laser materials processing*. Hoboken, N.J.:Wiley, c2009. Wiley series on processing of engineering materials. ISBN 978-0-470-17798-3.
10. Kořán, Pavel. *Seriál na téma lasery - Laserové svařování I*. In: *LAO - lasery a optika*[online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2014, 18. 02. 2013 [cit. 2021-02-13].Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-ilaser-welding-134>
11. *ČSN EN ISO 4063 (050011) A Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
12. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85-771-81-0.
13. Olsen, Flemming Ove. *Hybrid Laser-Arc Welding* [online]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009 [cit. 2021-02-13]. ISBN 978-1-84569-370-1. Dostupné

- z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHLAW0001/hybrid-laser-arc-welding/hybridlaser-arc-welding>
14. Zhou, J. a H.L. Tsai. *Hrbrid Laser-Arc Welding*. KOVACEVIC, Radovan, ed. *Welding Processes* [online]. InTech, 2012, 2012-11-21 [cit. 2021-02-13]. ISBN 978-953-51-0854-2. Dostupné z: doi:10.5772/50113
 15. Kah, P., A. Salminen a J. Martikainen. *THE INFLUENCE OF PARAMETERS ON PENETRATION, SPEED AND BRIDGING IN LASER HYBRID WELDING*. *Mechanika* [online]. 2011, 17(3), 324-333 [cit. 2021-02-13]. ISSN 1392-1207. Dostupné z: doi:10.5755/j01.mech.17.3.511
 16. Kraus, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 9788070826683.
 17. Mrňa, Libor. *Lepení materiálů* [online]. ÚST FSI VUT Brno, 2013 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_lepeni_materialu_mrna.pdf
 18. Kim, Yong, Kiyong Park a Sungbok Kwak. *A Review of Arc Brazing Process and Its Application in Automotive*. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research Vol. 5* [online]. 10/2016 [cit. 2021-02-13]. ISSN 2315-4462. Dostupné z: <http://www.ijmerr.com/uploadfile/2016/1121/20161121023814263.pdf>
 19. *MIG Welding (GMAW) Process Techniques & Tips* [online]. Weld guru, 2020 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://weldguru.com/mig-welding/>
 20. *Resistance Welding Guide* [online]. Weld guru, 2020 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://weldguru.com/resistance-welding/>
 21. *Laser welding* [online]. [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.blumenbecker.com/cz-en/industrial-automation/industrial-robotics/laser-welding>
 22. *Structural Adhesives Lighten the Load* [online]. 10/1/2018 [cit. 2021-02-27]. Dostupné z: <https://www.autobeatonline.com/articles/structural-adhesives-lighten-the-load>
 23. Tang, Herman. *Automotive Vehicle Assembly Processes and Operations Management* [online]. 2017. [cit. 2021-02-27]. ISBN 978-1-5231-2403-9. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpAVAPOM01/viewerType:toc//root_slug:automotive-vehicle-assembly/url_slug:welding-zinc-coated-steels?issue_id=kt011VWAL1&hierarchy=
 24. *Laser Safety Knowledge* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <http://www.laserto.com/laser-safety-knowledge/>
 25. Helm, Johanna, Adrian Schulz, Alexander Olowinsky, Andreas Dohrn a Reinhart Poprawe. *Laser welding of laser-structured copper connectors for battery applications and power electronics*. *Welding in the World* [online]. 2020, 64(4), 611-622 [cit. 2021-02-28]. ISSN 0043-2288. Dostupné z: doi:10.1007/s40194-020-00849-8
 26. *H LAW – INFORMACE O PROCESU* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/automation/process-solutions/hlaw/process.cfm>

27. *What is fiber laser?* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <http://www.fiberlaser.fujikura.jp/eng/products/about-fiber-laser.html>
28. Giesen, Adolf. *High Power Thin Disk Lasers* [online]. In: . German Aerospace Center Institute of Technical Physics [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/11148836.pdf>
29. *GTAW PROCESS* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <http://turbotecgroup.com/GTWDetail.aspx>
30. *Svařování TIG - AC nebo DC?* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.svarovsky-elektrody.cz/svarovani-tig-ac-nebo-dc/t-68/t-122>
31. *Možné dělení typů a druhů laserů. Leonardo technology automatizace průmyslového značení* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
32. Mrňa, Libor.: *Technologie využívající laser* [online]. ÚST FSI VUT Brno, 2013 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf
33. *Fluorescent dye penetrant testing* [online]. [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/services/certified-testing-of-materials/fluorescent-dye-penetrant-testing/>
34. Bauer, Klaus-Dieter, Mira Todorova, Kurt Hingerl a Jörg Neugebauer. *A first principles investigation of zinc induced embrittlement at grain boundaries in bcc iron. Acta Materialia* [online]. 2015, 90, 69-76 [cit. 2021-03-02]. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2015.02.018
35. *Radiographic Inspection (X-Ray) Services* [online]. [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.orangeoasttesting.com/radiographic>
36. *ČSN EN 10130 +A1 (420908) Ploché výrobky z hlubokotažných ocelí válcované za studena k tváření za studena - Technické dodací podmínky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví 2007.
37. *Urun katalogu EN1270*. [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/Urun_katalogu_EN-1270.pdf
38. *Katalog ocelí* [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://ameristeelonline.com/products/ford-material-specifications/inventory/wss-mia365-a14/>
39. Roubíček, Martin. *Příspěvek do problematiky spojování pozinkovaných plechů* [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/7354937-Prispevek-do-problematiky-spojovani-pozinkovanych-plechu.html>
40. Barták, Jiří. *Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení* [online]. 1.3.2012 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
41. *ČSN EN ISO 12932 (050112) Svařování - Hybridní laserové svařování ocelí, niklu a niklových slitin - Určování stupňů kvality*. Český normalizační institut, 2008

42. Ribic, B, T. A. Palmer a T. Debroy. *Problems and issues in laser-arc hybrid welding. International Materials Reviews* [online]. 2013, 54(4), 223-244 [cit. 2021-03-07]. ISSN 0950-6608. Dostupné z: doi:10.1179/174328009X411163
43. ČSN EN ISO 6520-1 (050005) *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování*. Český normalizační institut, 2008
44. Ling, Zhanxiang, Min Wang a Liang Kong. *Liquid Metal Embrittlement of Galvanized Steels During Industrial Processing: A Review*. CHEN, Shanben, Yuming ZHANG a Zhili FENG, ed. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2018, 2018-05-08, s. 25-42 [cit. 2021-03-07]. Transactions on Intelligent Welding Manufacturing. ISBN 978-981-10-8329-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-10-8330-3_2
45. Koukal, Jaroslav, Drahomír Schwarz a Jiří Hajdík. *Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.*
46. Podhora, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno - SMS, 2005. s. 17. ISBN 80-903386-4-X. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:c7ca3540-2bab-11e8-b257-005056825209>
47. Mollíková, Eva. *Zkouška tvrdosti dle Vickerse* [online]. [cit. 2021-03-07] Brno: Ústav materiálových věd a inženýrství, FSI VUT v Brně, 2006. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>
48. Dillinger, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.
49. *Měření tvrdosti odlitků dynamickou metodou* [online]. 12.6.2002 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-tvrdosti-odlitku-dynamickou-metodou>
50. ČSN EN ISO 6507-1 (420374) *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. CEN 2018
51. *Laserové svařování* [online]. [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: <https://www.rockweld.cz/laserove/>
52. *MagicWave 1700* [online]. [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyrobky/ru%C4%8Dn%C3%AD-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD/tig/magicwave/magicwave-1700>
53. *IRB 2400* [online]. [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-2400>
54. *Příručka žárového zinkování* [online]. Ostrava: AČSZ, 2011 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <http://zarova-zinkovna.mea.cz/upload/ck/files/prirucka-zaroveho-zinkovani.pdf>
55. *Cupping test to Erichsen* [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/industries/materials-testing/sheet-metal-forming/cupping-test/erichsen-iso-20482-olsen-astm-e-643-84/>
56. *Tegramin* [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.struers.com/en/Products/Grinding-and-Polishing/Grinding-and-polishing-equipment/Tegramin>

57. *5 Ways Aluminum Welding Is Essential In Manufacturing Aftermarket Automotive Parts* [online]. [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://subcontracteu.com/en/blog/aluminum-welding-manufacturing-aftermarket-automotive-parts>
58. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN isbn80-227-1425-9. [cit. 2021-04-04]
59. *Clinching* [online]. [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: https://cdn1.vogel.de/5FGwnWJ_M8KoVb3ret5k-Vgy3T8=/images.vogel.de/vogelonline/bdb/847000/847078/original.jpg
60. *Worman, Jim. Magnetic particle examination* [online]. 2011 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.nationalboard.org/index.aspx?pageID=164&ID=377>
61. *Moravec, Jaromír. Teorie svařování a pájení II: Speciální metody svařování*. Liberec: TUL, 2008. ISBN 978-80-7372
62. *Hot mounting consumables* [online]. [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: www.struers.com/en/Products/Mounting/Mounting-consumables
63. Sopapan, P., R. Laopainboon, J. Laopainboon, P. Gunhakoon, T. Thongklom a O. Jaiboon. *Study of bagasse and cassava rhizome effects on the physical, mechanical and structural properties of soda-lime borate glasses*. *SN Applied Sciences* [online]. 2020, 2(5) [cit. 2021-04-04]. ISSN 2523-3963. Dostupné z: doi:10.1007/s42452-020-2721-4
64. Duley W.W.: *Laser welding*, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4 [cit. 2021-04-04]
65. MRŇA, Libor. *Konzultace s vedoucím práce*. Brno, 2021
66. *Citace PRO* [online]. 2015-2020 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
A ₈₀	[%]	Tažnost na původní délce 80 mm
CMT	[-]	Přenos studeného kovu
DC	[A]	Stejnoseměrný proud
GTAW	[-]	Svařování netavící se elektrodou v ochranném plynu
I _{TIG}	[A]	Proud na TIG
k _{las}	[-]	Součinitel absorpce záření laseru
k _{TIG}	[-]	Součinitel absorpce tepla TIG
Laser	[-]	Light amplification by stimulated emission of radiation
MAG	[-]	Svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
MIG	[-]	Svařování tavící se elektrodou v inertním plynu
MM	[-]	Multimódový
P _{las}	[W]	Výkon laseru
Q _{celk}	[J·mm ⁻¹]	Teplo vnesené celkové
Q _{las}	[J·mm ⁻¹]	Teplo vnesené od laseru
Q _{TIG}	[J·mm ⁻¹]	Teplo vnesené od TIG
R _m	[MPa]	Mez pevnosti
R _{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
TEM	[-]	Příčný mód
TOO	[-]	Tepelně ovlivněná oblast
TIG	[-]	Svařování netavící se elektrodou v inertním plynu
U _{TIG}	[V]	Napětí na TIG
YAG	[-]	Yttrito hlinitý granát
ZM	[-]	Základní materiál

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Srovnání tepelných zdrojů [32].....	14
Tab. 2 Mechanické vlastnosti a složení oceli [37]	23
Tab. 3 Rozdělení svarových vad [43]	25
Tab. 4 Rozdělení metod měření tvrdosti	29
Tab. 5 Rozdělení měření tvrdosti dle Vickerse [50]	30
Tab. 6 Naměřené chemické složení ZM	32
Tab. 7 Označení vzorků	34
Tab. 8 Výpočet vneseného tepla	35
Tab. 9 Stav vzorků po svaření.....	36
Tab. 10 Tahová zkouška ZM	44
Tab. 11 Tahová zkouška svaru SP1	45
Tab. 12 Tahová zkouška svaru SP2	46
Tab. 13 Tahová zkouška svaru SP3	47
Tab. 14 Tahová zkouška SP4	48
Tab. 15 Tahová zkouška SL1	49
Tab. 16 Tahová zkouška SL2.....	50
Tab. 17 Tahová zkouška SL3	51
Tab. 18 Tahová zkouška SL4.....	52
Tab. 19 Zařazení dle ČSN EN ISO 12932	56
Tab. 20 Parametry svarů s nejlepší pevností.....	56
Tab. 21 Srovnání nákladů	57

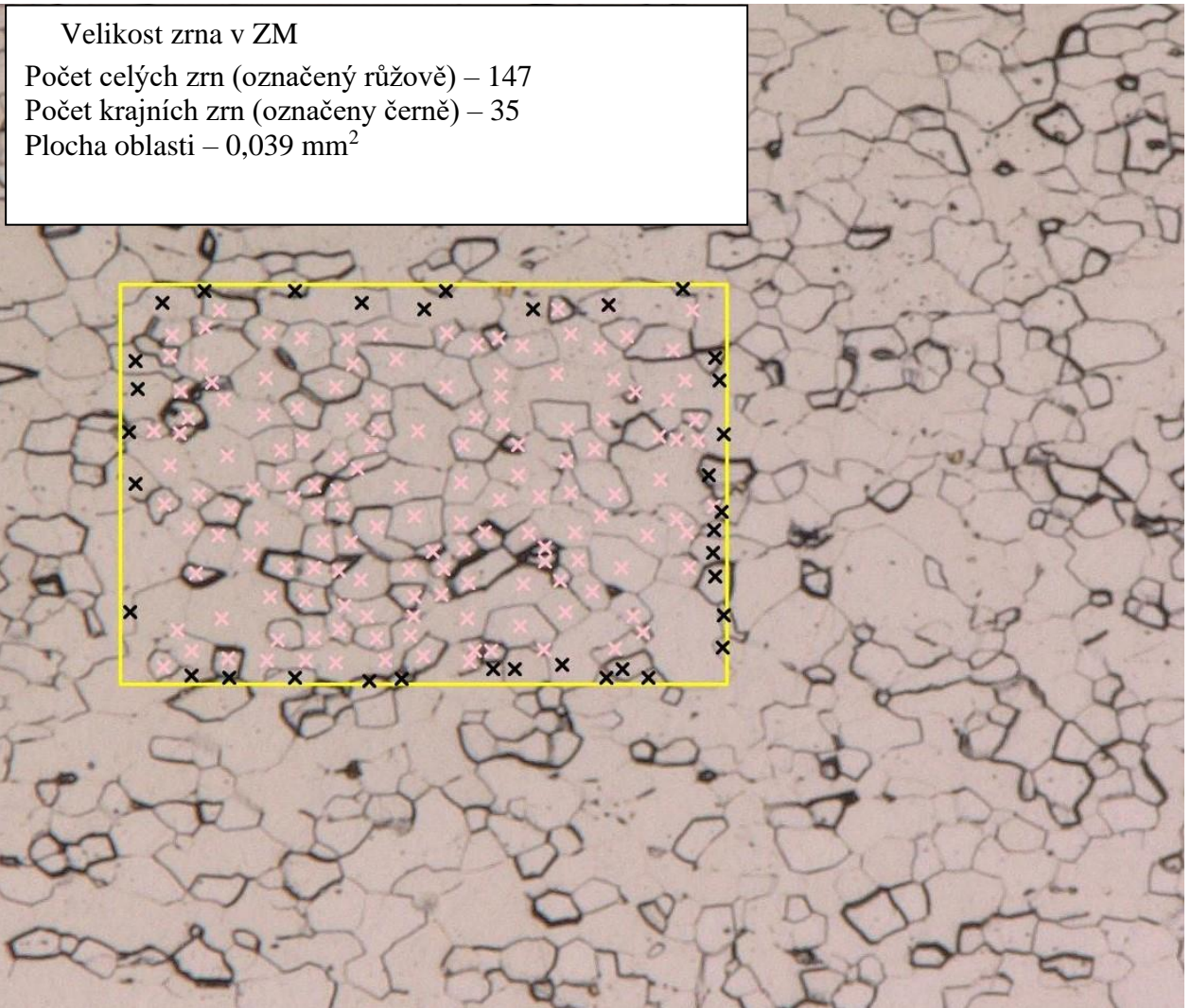
SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Svařování v automotive [57].....	9
Obr. 2 Rub a líc pájeného spoje [18]	10
Obr. 3 MIG svařování [19].....	11
Obr. 4 Odporové svařování [20]	11
Obr. 5 Klinčování [59]	12
Obr. 6 Aplikace lepidla [22].....	12
Obr. 7 Svařování laserem [21]	13
Obr. 8 SLAB laser [8]	15
Obr. 9 Schéma Nd:YAG laseru [7]	15
Obr. 10 Schéma diskového laseru [28]	16
Obr. 11 Schéma vláknového laseru [27]	17
Obr. 12 Závislost odrazivosti na vlnové délce a materiálu [9]	18
Obr. 13 Příčné módy paprsku [24]	18
Obr. 14 Kondukční a penetrační režim svařování [25]	18
Obr. 15 Schéma svařování TIG [29]	20
Obr. 16 Průběh proudu u pulzního svařování [30].....	21
Obr. 17 Srovnání geometrie svarů [26].....	21
Obr. 18 Konfigurace hybridního svařování [15].....	22
Obr. 19 Řez zinkovým povlakem [54]	24
Obr. 20 Vylučování zinku po hranici zrn [34]	26
Obr. 21 Schéma tvorby pórů [23]	26
Obr. 22 Ukázka fluorescenční kapilární zkoušky [33].....	27
Obr. 23 Princip magnetické zkoušky [60].....	28
Obr. 24 Příklady zobrazení vad [25]	28

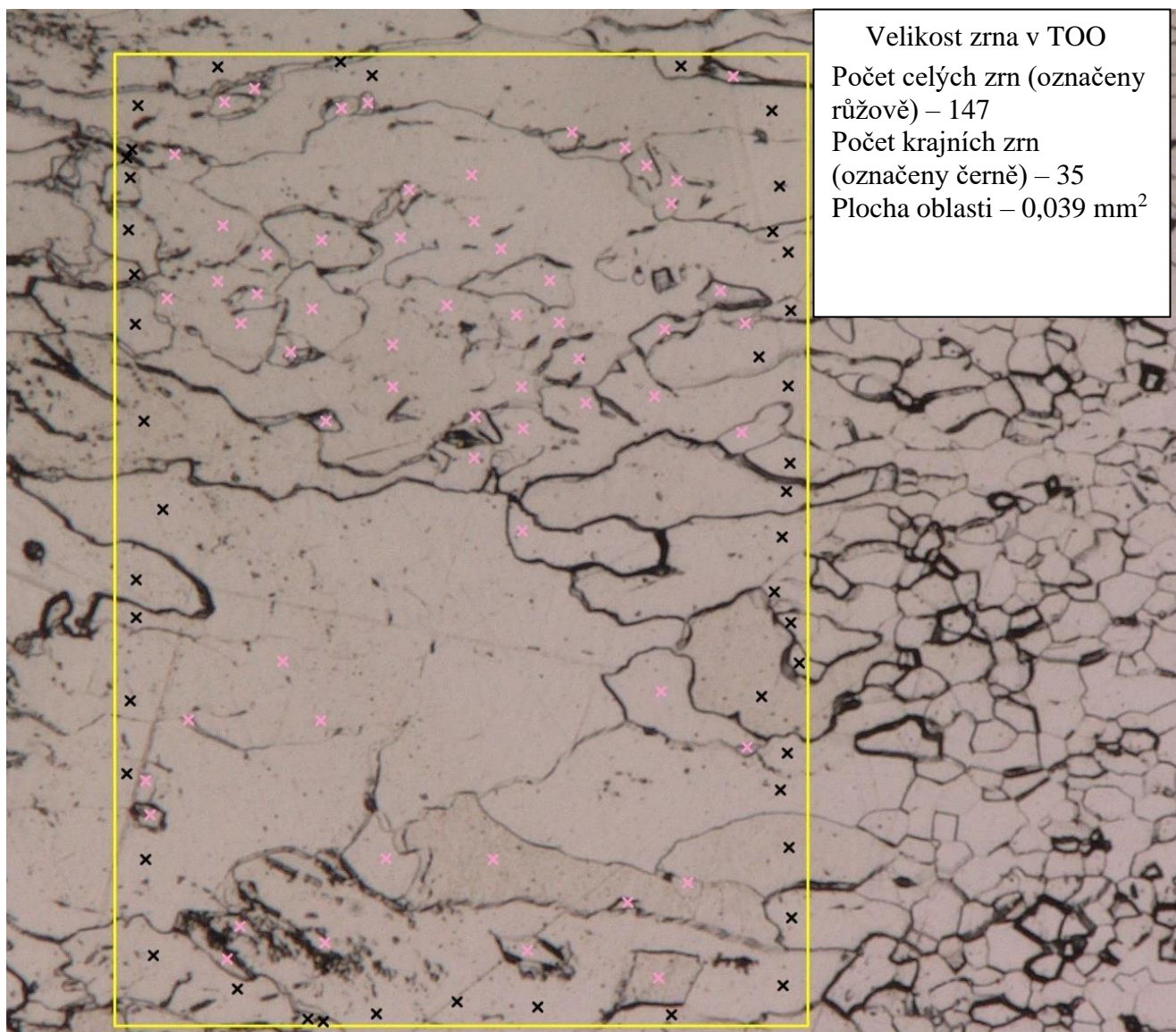
Obr. 25 Metalografické vzorky [62]	29
Obr. 26 Schéma metody měření dle Vickerse [63]	30
Obr. 27 Zkouška podle Erichsena [55]	31
Obr. 28 Svařovací sestava	32
Obr. 29 Použité typy spojů [51]	33
Obr. 30 Přípravek pro fixaci SP vzorků	33
Obr. 31 Bruska Tegramin [56]	37
Obr. 32 Makrosnímek SP1	38
Obr. 34 Makrosnímek SP3	39
Obr. 33 Makrosnímek SP2	39
Obr. 35 Makrosnímek SP4	40
Obr. 36 Makrosnímek SL2	41
Obr. 37 Makrosnímek SL1	41
Obr. 38 Makrosnímek SL3	42
Obr. 39 Makrosnímek SL4	43
Obr. 40 Trhací stroj Zwick Roell	43
Obr. 41 Schéma použitého tahového tělesa [65]	44
Obr. 42 Graf tahové zkoušky ZM	44
Obr. 43 Přetržený vzorek SP1 b	45
Obr. 44 Graf tahové zkoušky svaru SP1	45
Obr. 45 Přetržený vzorek SP2 c	46
Obr. 46 Graf tahové zkoušky svaru SP2	46
Obr. 47 Přetržený vzorek SP3 a	47
Obr. 48 Graf tahové zkoušky svaru SP3	47
Obr. 49 Přetržený vzorek SP4 b	48
Obr. 50 Graf tahové zkoušky SP4	48
Obr. 51 Přetržený vzorek SL1 b	49
Obr. 52 Graf tahové zkoušky SL1	49
Obr. 53 Přetržený vzorek SL2 b	50
Obr. 54 Graf tahové zkoušky SL2	50
Obr. 55 Přetržený vzorek SL3 c	51
Obr. 56 Graf tahové zkoušky SL3	51
Obr. 57 Přetržený vzorek SL4 b	52
Obr. 58 Graf tahové zkoušky SL4	52
Obr. 60 Graf závislosti R_m na I pro SL	53
Obr. 59 Graf závislosti R_m na I pro SP	53
Obr. 61 Mikrostruktura základního materiálu	54
Obr. 62 Přejít z hrubozrnné do jemnozrnné oblasti TOO	55
Obr. 63 Přejít mezi TOO a svarovým kovem	55

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Velikost zrna v ZM	67
Příloha 2 Velikost zrna v TOO	68



Příloha 1 Velikost zrna v ZM



Příloha 2 Velikost zrna v TOO