



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIUM PLASTICITY SVARU HLUBOKOTAŽNÝCH PLECHŮ SVAŘENÝCH TECHNOLOGIÍ LASER-TIG

STUDY OF WELD PLASTICITY OF DEEP-DRAWN SHEETS WELDED BY LASER-TIG TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Kutil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Petr Kutil
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:

Studium plasticity svaru hlubokotažných plechů svařených technologií Laser–TIG

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ověřit plasticity svaru hlubokotažných plechů svařených technologií laser–TIG pomocí Erichsenova testu. Provéřit vliv variace procesních parametrů na plasticitu.

Cíle diplomové práce:

Seznámit se z technologií laserového svařování.

Seznámit se s metodikou a technikami testování plasticity vytvořených svarů s důrazem na Erichsenovu zkoušku.

Prostudovat souvislosti mezi svařovacími parametry a plasticitou vzniklých svarů.

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.

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

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

KUTIL Petr: Studium plasticity svaru hlubokotažných plechů svařených technologií Laser-TIG.

Tato práce se zabývá svařováním laserem a hybridní technologií laserového svařování laser-TIG. První část obsahuje teoretický popis těchto svařovacích metod. Dále jsou zmíněny základní zkoušky kvality a plasticity svarových spojů. Druhá, experimentální část, je zaměřena na studium plasticity polotovarů tailored blanks, které jsou z různých materiálů typu HSLA, svařených čistě laserem a následně technologií laser-TIG. Dochází k posouzení vlivu variace procesních parametrů na vhodnost svarového spoje k následné operaci hlubokého tažení. Na základě naměřených a vypočtených hodnot získaných z experimentu byly určeny nejvhodnější svařovací parametry.

Klíčová slova: laserové svařování, laser-TIG, tailored blanks, plasticita svaru, HSLA oceli

ABSTRACT

KUTIL Petr: Study of weld plasticity of deep-drawn sheets welded by Laser-TIG technology.

This thesis is focused on laser welding and hybrid laser-TIG welding. The first part contains a brief theoretical description of these technologies. Standard quality and plasticity tests of welded joint are also mentioned. The second, experimental part, centres on the study of plasticity of tailored blanks (made of different types of HSLA steel), that are welded with laser and laser-TIG technology. The aim of the thesis is to assess process parameters effect on weld suitability for following deep drawing operation. Based on the calculated and measured figures obtained from the experiment, the most suitable welding parameters were chosen.

Keywords: laser welding, laser-TIG, tailored blanks, weld plasticity, HSLA steels

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUTIL, Petr. *Studium plasticity svaru hlubokotažných plechů svařených technologií Laser-TIG* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132379>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Častolovicích dne 17.05.2021

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval paní Ing. Mgr. Haně Šebestové, Ph.D., panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D., panu Ing. Petru Horníkovi a panu Ing. Liboru Křápkovi za odbornou pomoc při zpracování praktické části této práce. V neposlední řadě patří velké díky mé rodině, která mě během celého studia jak finančně, tak morálně podporovala.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
1.1 Varianty řešení	10
2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ TIG	13
2.1 Princip svařování metodou TIG	13
2.2 Elektrický oblouk a typy svařovacích proudů	14
2.3 Parametry svařování	15
2.4 Wolframové elektrody a ochranné plyny	16
2.5 Hořáky pro svařování TIG	17
3 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ LASEREM	18
3.1 Princip laserového zdroje	18
3.2 Typy laserových zdrojů	21
3.2.1 CO ₂ laser	22
3.2.2 Tyčový Nd YAG laser	23
3.2.3 Diskový a vláknový laser	24
3.2.4 Polovodičový laser	26
3.3 Princip laserového svařování	26
3.4 Hybridní technologie Laser-TIG	29
4 SVAŘOVANÝ MATERIÁL	31
4.1 Vady svarových spojů	32
4.2 Zkoušky svarových spojů	34
4.2.1 Destruktivní metody	34
4.2.2 Nedestruktivní metody	36
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	37
5.1 Materiálový rozbor	37
5.2 Návrh a provedení svařovacího procesu	39
5.3 Příčná zkouška tahem	43
5.4 Zkouška hloubením dle Erichsena	49
5.5 Metalografický rozbor	53
5.5.1 Hodnocení makrostruktury	53
5.5.2 Hodnocení mikrotvrdosti a mikrostruktury	58
5.6 Technicko-ekonomické zhodnocení	65
6 ZÁVĚRY	68

Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratek
Seznam obrázků a tabulek
Seznam příloh

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5]

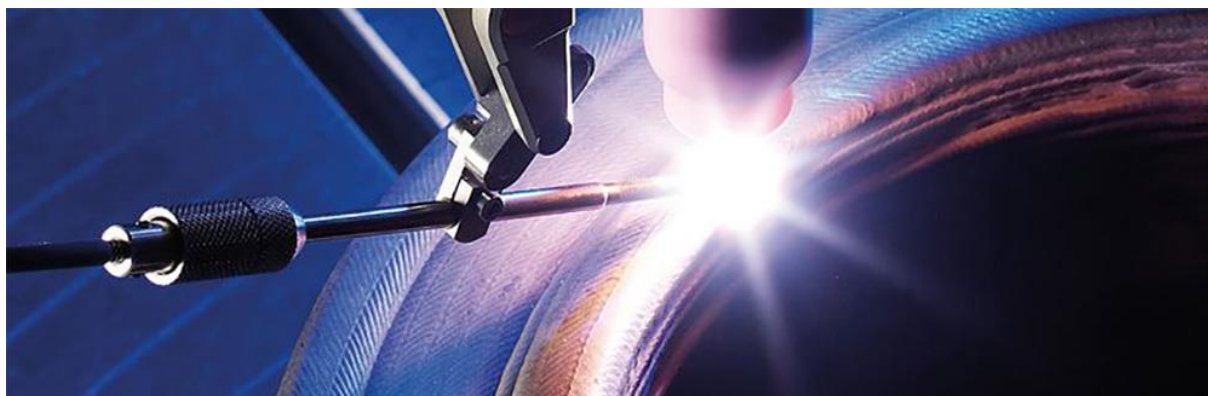
Svařování patří spolu s obráběním, slévárenstvím, tvářením a povrchovými úpravami materiálu do rozsáhlé skupiny strojírenských technologií. Jedná se o stěžejní metodu nerozebíratelného spojování nejen kovových, ale i nekovových (zejména plastových) materiálů. K úplnému porozumění svařování je nutné se orientovat v celé řadě vědních disciplín, jako jsou matematika, fyzika, struktura a vlastnosti materiálů, chemie nebo mechanika. Díky svařování je možné vytvářet tvarově velmi variabilní součásti, polotovary a konstrukce, jejichž výroba by byla jinak velmi složitá, v některých případech dokonce nemožná.

V dnešní zrychlené době je kladen čím dál větší důraz na efektivitu svařovacího procesu. Tento novodobý trend vede ke snaze o neustálé zrychlování a zlevňování výrobního cyklu, aniž by došlo k ovlivnění kvality výsledného produktu. Proto se staly velmi populárními speciální technologie svařování v čele se svařováním laserovým paprskem (obr. 1).

Vývoj prvních průmyslových laserů začal již v 70. letech minulého století, ovšem teprve v posledních desetiletích se stalo laserové svařování hojně používané i v automobilovém průmyslu. Samozřejmě i tato metoda má určitá omezení a nevýhody, které je zapotřebí eliminovat. Z toho důvodu se často využívají tzv. hybridní laserové technologie, které kombinují příznivé vlastnosti laserového paprsku a některé z konvenčních obloukových technologií (obr. 2). Svařování Laser-TIG je poměrně nová, velmi progresivní metoda, jejíž aplikace v automotive by mohla vést ke zkvalitnění výroby svařované karoserie.



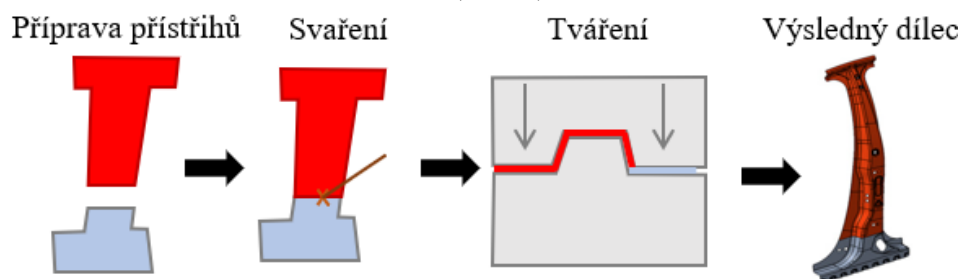
Obr. 1 Technologie svařování laserovým paprskem [5].



Obr. 2 Obloukové svařování technologií TIG [4].

1 ROZBOR ZADÁNÍ [6], [7], [8]

S rozvojem moderních svařovacích i tvářecích technologií se v posledních letech čím dál více využívají tzv. tailored blanks, volně přeloženo jako polotovary „šité na míru“. Tailored blanks jsou spojeny ze dvou, nebo více plechových přístřihů, které disponují rozdílnými rozměry i vlastnostmi. Každý z nich může být z jiného materiálu s různou strukturou a mechanickými vlastnostmi. Plně se tak využijí výhodné atributy několika typů materiálů. Dále se může lišit jejich tvar, tloušťka či povrchová nebo tepelná úprava. Připravené přístřihy se následně svaří (přesné označení je tedy tailor welded blanks, zkratka TWB). Svařený polotovar se poté tváří do finálního tvaru daného dílce (obr. 3).



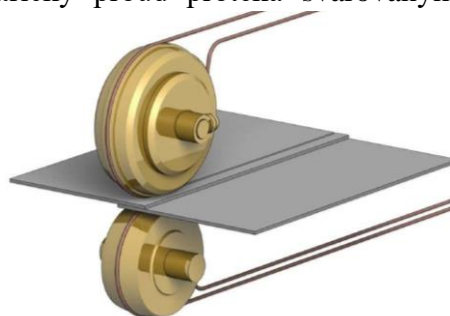
Obr. 3 Postup výroby segmentu karoserie [8].

Tento postup výroby se uplatňuje zejména v automobilovém průmyslu při výrobě téměř všech dílů svařované karoserie. V případě tailored blanks může jít například o kombinaci konstrukční a vysokopevnostní oceli, což vede ke zvýšení bezpečnosti vozidla. Další možností je spojení hlubokotažných materiálů se stejnými vlastnostmi, ale s rozdílnou tloušťkou pro snížení celkové hmotnosti automobilu. Zároveň dochází k redukci počtu montážních a tvářecích operací (kratší výrobní proces dílů), tudíž i nákladů na výrobu karoserie. Na druhou stranu je tento postup výroby investičně nákladný. Vysoká je pořizovací cena speciálních tvářecích nástrojů i provozní náklady svařovacího zařízení. Proces je také technologicky náročný, vyžaduje značné teoretické i praktické znalosti z oblasti svařování a tváření materiálu. Z těchto důvodů se použití polotovarů tailored blanks vyplatí hlavně ve velkosériové výrobě.

1.1 Varianty řešení [1], [2], [6], [7], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15]

Svar, kterým jsou spojeny plechové přístřihy v tailored blanks, musí být velmi kvalitní, jelikož odolává značným napětím. Ta jsou na něj vyvíjena během následného tvářecího procesu (v automotive má majoritní zastoupení proces lisování). Zároveň je kladen důraz na rychlost svařování, jelikož časová úspora ve velkosériovém výrobním procesu, byť jen pár sekund, znamená pro společnost velké finanční úspory. Běžné (konvenční) metody svařování jsou z těchto důvodů nevhodné pro výrobu tailored blanks. Mezi svařovací technologie, které by mohly být využity ke svařování tailored blanks patří:

- Švové odporové svařování (obr. 4) – je produktivní metoda, jejímž základním principem je působení mechanického tlaku. Elektrický proud protéká svařovaným místem a materiál svařovaných plechů se zde vlivem vývinu odporového tepla ohřívá a taví. Poté se materiály stlačí a tím vzniká spoj. Přenos elektrického proudu do svařovaného materiálu je uskutečňován pomocí dvou rotujících kotoučů, mezi kterými se svařovaný materiál pohybuje. Proud je dávkován ve velmi krátkých a intenzivních pulzech. Tvoří se tak řada částečně se překrývajících bodů, které tvoří výsledný svar.



Obr. 4 Švové svařování [9].

Rychlost svařování je u této metody značná. Zároveň jsou relativně malé pořizovací a provozní náklady a proces se snadno automatizuje. Nevýhodou této metody je, že svařované materiály musí být částečně překryty. Dále je třeba zajistit zdroj, který je schopen generovat extrémní hodnoty elektrického proudu (až 10^5 A), čímž je do materiálu vnášeno značné množství tepla.

- Plazmové svařování – je založeno na působení tepelných a dynamických účinků paprsku plazmatu. Plazma vzniká průchodem plazmového plynu stabilizovaným elektrickým obloukem uvnitř hořáku. Úzký svazek plazmatu vnáší do materiálu obrovské množství tepla, vzniká tak svarová lázeň, při určitém nastavení svařovacích parametrů i keyhole. Pro malé tloušťky plechu se používá tzv. mikroplazma (obr. 5). Plazmové svařování je stabilní proces s vyššími svařovacími rychlostmi než u běžných konvenčních metod svařování. Svar je velmi kvalitní (s tzv. rentgenovou čistotou) s malou TOO a bez nutnosti následného opracování. Zároveň má dobrý vzhled při snadné reprodukovatelnosti. Mezi nevýhody patří například vyšší pořizovací cena zařízení i provozní náklady.



Obr. 5 Svařování plazmou [11].

- Svařování svazkem elektronů (obr. 6) – je metoda tavného svařování, při které svazek urychlených a fokusovaných elektronů dopadá na základní materiál, čímž dojde k velkému množství interakcí. Elektrony předávají při srážkách svoji kinetickou energii svařovanému materiálu a ten se tak ohřívá, taví, dokonce i vypařuje. Svar je vyhotoven za extrémně krátkou dobu a je velmi štíhlý (poměr šířky ku hloubce je až 1:50) s malou TOO. Lze takto spojovat i materiály, které jsou běžnými způsoby nesvařitelné. Proces probíhá ve vakuu a svařuje se bez přídavných materiálů. Na druhou stranu kvůli nutnosti vakua během svařovacího procesu jsou při svařování svazkem elektronů značné prodlevy spojené s dobou čerpání a zavzdušnění komory. To zároveň omezuje maximální rozměry svařovaných dílců. Problematické je i polohování a manipulace s dílci ve vakuu. V neposlední řadě se musí počítat s vysokou pořizovací cenou zařízení.



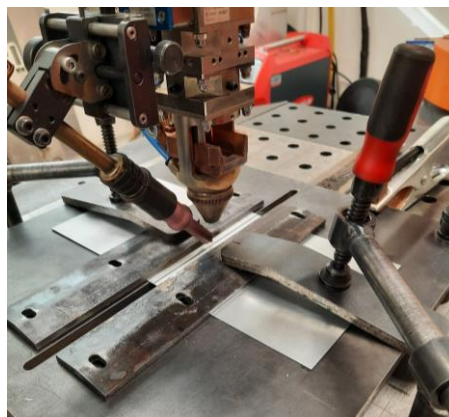
Obr. 6 Svazek elektronů [12].

- Laserové svařování (obr. 7) – patří do skupiny tavných metod. V drtivé většině laserových aplikací se nepoužívá přídavných materiálů. Tento způsob svařování je aktuálně nejvýhodnější pro svařování tailored blanks, jelikož svarová housenka nepřesahuje základní materiál, a proto nedochází při lisování k takovým problémům jako při využití například švového odporového svařování. Jedná se o velmi produktivní metodu se snadnou opakovatelností, díky níž je možné vysokorychlostně tvořit i heterogenní svary, které mají minimální tepelně ovlivněnou oblast.



Obr. 7 Svařování laserem [13].

- Technologie Laser-TIG (obr. 8) – je poměrně nová hybridní technologie, která by v budoucnu mohla být aplikována v automobilovém průmyslu pro svařování tailored blanks. Vznikla kombinací svařování laserem s obloukovou metodou TIG. Spojením těchto dvou technologií dochází ke snížení rychlosti ochlazování a tím i ke snížení rizika vzniku křehkých fází, což je značná nevýhoda svařování laserem. Tato technologie částečně řeší problematiku svařování povrchově upravených plechů, kdy například u hlubokotažných pozinkovaných plechů TIG přispívá k odpaření zinku v oblasti svaru, čímž se předchází nežádoucím vlivům tohoto povlaku na svařovací proces. Zároveň by měl TIG pomáhat s natavením hran svařovaných plechů.



Obr. 8 Technologie Laser-TIG.

Tato diplomová práce se z uvedených svařovacích technologií zaměřuje právě na laserové svařování a hybridní technologii Laser-TIG. Hlavním cílem je studie plasticity přístřihů tailored blanks, které jsou svařeny těmito metodami variací procesních parametrů. Svařované přístřihy jsou z odlišných materiálů i tlouštěk, čehož se v automotive často využívá. Svařované materiály patří do skupiny HSLA ocelí. Jedná se o vysoce pevné mikrolegované oceli, které se používají například pro pantové díly karoserie.

2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ TIG [1], [2], [16], [17]

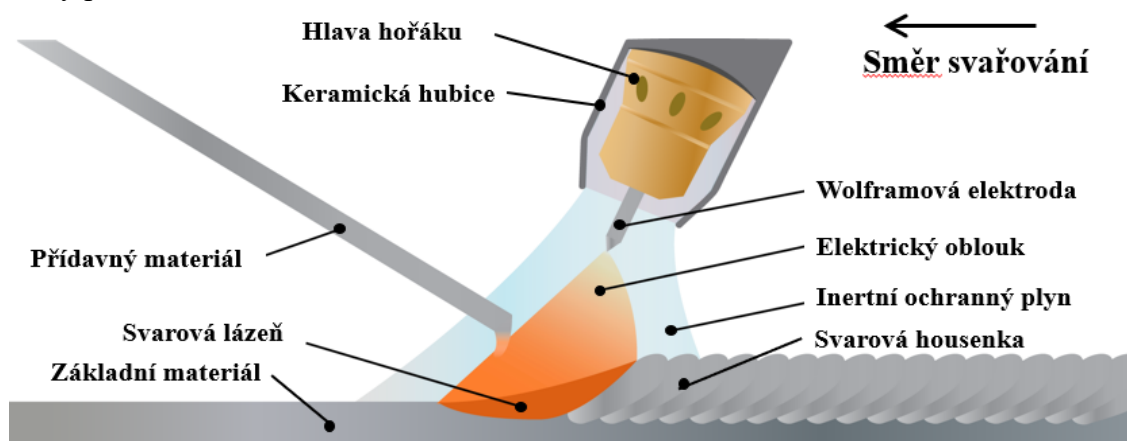
Technologie obloukového svařování TIG (z anglického Tungsten Inert Gas) je jedna z celosvětově nejrozšířenějších metod svařování. Obecně je charakterizována jako metoda obloukového svařování netavící se wolframovou elektrodou v ochraně inertního plynu (dle ČSN EN ISO 4063 metoda 141). V praxi je možné se setkat s řadou dalších mezinárodně uznávaných zkratk jako jsou WIG (z německého Wolfram Inert Gas) a GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), která se používá výhradně v americké literatuře.

Původně byla metoda TIG vyvinuta v období 2. světové války pro svařování hliníku v leteckém průmyslu, ovšem postupně se začala využívat i pro svařování slitin železa, zejména vysokolegovaných ocelí. Dále je často aplikována při svařování mědi, niklu, hořčíku (i jejich slitin), a dokonce ji lze použít pro tvorbu heterogenních spojení. Vlivem ochrany inertního plynu lze takto spojovat i těžko svařitelné materiály s vysokou afinitou ke kyslíku, jako jsou titan a zirkonium. Na druhou stranu se tato metoda nedoporučuje pro svařování běžných konstrukčních ocelí. Tyto oceli lze svařovat běžnými obloukovými metodami (např. MAG nebo MMA), tudíž není nutné svařování v ochraně finančně velmi nákladného inertního plynu.

Technologie TIG se používá v průmyslových odvětvích, kde je kladen důraz zejména na vysokou kvalitu a čistotu svaru s minimálním rozstříkáním svarového kovu současně s dobrými výslednými mechanickými vlastnostmi spoje. Velké zastoupení má např. v jaderném, energetickém, potravinářském a chemickém průmyslu nebo v letecké a kosmické technice. V neposlední řadě se lze s metodou TIG setkat při reparačním navařování materiálu. Tento proces slouží k opravám mechanicky opotřebovaných součástí za účelem prodloužení jejich provozní životnosti.

2.1 Princip svařování metodou TIG [1], [2], [16], [17], [18], [19], [20]

Metoda TIG (obr. 9) spadá do kategorie tavného svařování elektrickým obloukem. Elektrický oblouk, který bývá velmi stabilní, hoří mezi netavící se elektrodou a základním materiálem. Vlivem hořícího elektrického oblouku probíhá svařovací proces za vysokých teplot, při kterých se základní materiál taví a vzniká svarová lázeň. Netavící se elektroda musí ovšem tepelnému působení oblouku odolat (nesmí se tavit), z toho důvodu se nejčastěji vyrábí na bázi wolframu, který disponuje vysokou hodnotou teploty tavení. Elektroda je upnuta v hlavici hořáku pomocí speciální kontaktní kleštiny, která na ni přenáší elektrický proud potřebný pro hoření oblouku.



Obr. 9 Princip technologie svařování TIG [19].

Celý proces probíhá v ochranné atmosféře inertního plynu, který zabraňuje účinkům vzdušné atmosféry během celé doby svařování. Nedochozí k propalu prvků, tudíž na povrchu svaru nevzniká struska. Plyn je do místa svařování usměřován pomocí keramické

hubice. Jako ochranný plyn se nejčastěji používá argon o vysoké čistotě s označením 4.5 (99,995 %), případně se používají směsné plyny na bázi argonu, helia, vodíku nebo dusíku.

Touto technologií lze svařovat bez přídavného materiálu. Svarový spoj se vytvoří pouze natavením svařovaných základních materiálů a následným ztuhnutím svarové lázně. Tento způsob je z metalurgického hlediska nejlepší, jelikož má svarový kov naprosto stejné chemické složení jako základní materiál. Je možné ovšem svařovat i s použitím přídavného materiálu ve formě svařovací tyčky nebo drátu, který je odtavován do svarové lázně působením tepla z elektrického oblouku. Poté dochází k promísení materiálů v tavné lázni a zchladnutím vzniká svarová housenka.

Z hlediska způsobu je možné svařování metodou TIG rozdělit na ruční a mechanizované. Ruční se používá při svařování složitých konstrukcí a v kusové a malosériové výrobě. V porovnání s ručním svařováním představuje strojní svařování výrazné zvýšení efektivity. Zajišťuje rovnoměrný pohyb po délce svaru a udržuje konstantní podmínky svařování (rychlost posuvu, rychlost podávání drátu a délku oblouku). Velmi často se proto využívá pro orbitální svařování trubek.

Při svařování technologií TIG je zajištěna výborná kontrola nad svarovou lázní jak na povrchu housenky, tak i v kořeni (svarová lázeň je viditelná). Přídavný materiál je do místa svaru dávkován dle potřeby svářeče, tudíž může snadno ovlivňovat svarovou lázeň a tím i výsledné vlastnosti svaru. Lze takto svařovat ve všech polohách a zpravidla se svařuje dopředně. Pro tyto svary je charakteristická malá tepelně ovlivněná oblast a minimální deformace.

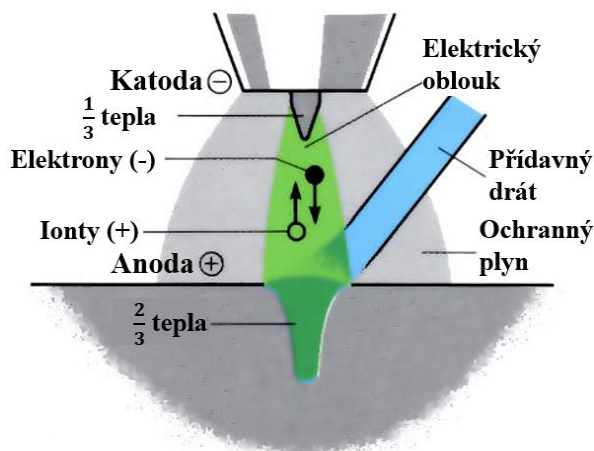
2.2 Elektrický oblouk a typy svařovacích proudů [1], [16], [17], [18], [21], [22]

Elektrický oblouk, který se tvoří při svařování metodou TIG, je jedna forem elektrického výboje v plynech. Jedná se o dlouhodobý, tzv. trvalý elektrický výboj v plynu a dochází k němu mezi základním materiálem a netavicí se elektrodou v prostředí interního plynu. Trvalý výboj nastane, jakmile vznikající teplo ohřeje plyn na takovou teplotu, která je nutná pro zajištění tepelné ionizace okolní atmosféry. Tento jev je typický pro případy, kdy je značná intenzita elektrického proudu a současně relativně nízké napětí. Elektrický oblouk se všeobecně skládá ze tří částí, které se navzájem liší rozdílnými úbytky elektrického napětí:

- Katodová oblast – její hlavní část je tvořena žhavou katodovou skvrnou. Její primární funkcí je emitovat elektrony, které následně směřují k anodě skrz sloupec oblouku. Na povrch katodové oblasti zároveň dopadají ionty. Tyto pozitivně nabitě částice se zde neutralizují, čímž předávají katodě svoji ionizační energii a dochází k jejímu ohřevu. Orientačně se katodový úbytek pohybuje mezi 10 až 16 V.
- Sloupec oblouku – jedná se o nejrozměnější část elektrického oblouku. Tvarově tato oblast připomíná komolý kužel, který je vyplněn plazmou (ionizovaným plynem o vysoké teplotě). Primární elektrody emitované katodovou oblastí, které proletují přes sloupec oblouku, naráží do atomů ochranného plynu. Srážkami dochází k rozkladu ochranného plynu na ionty a sekundární elektrody. Úbytek napětí závisí na délce této oblasti a uvádí se přibližně 2 V na 1 mm délky sloupce.
- Anodová oblast – je tvořena anodovou skvrnou, která pohlcuje a následně neutralizuje elektrony. Během tohoto děje se přeměňuje kinetická energie elektronů na teplo, což vede opět k ohřevu. Anodový úbytek se pohybuje mezi 4 až 8 V.

Pozice anodové a katodové oblasti úzce souvisí s typem svařovacího proudu. V případě použití zdroje stejnosměrného proudu se rozlišují 2 základní typy jeho zapojení. Pro svařování metodou TIG se většinou využívá tzv. přímého zapojení (TIG DC-), při kterém je záporný pól připojen k netavicí se elektrodě a kladný pól k základnímu materiálu (obr. 10).

Rozdělení tepla, které vlivem hoření oblouku vzniká, je nerovnoměrné. Asi $\frac{2}{3}$ tepla je vnášeno do materiálu, zatímco zbylá $\frac{1}{3}$ tepelně zatěžuje wolframovou elektrodu. Toto rozdělení je velmi příznivé, jelikož nedochází k přetěžování elektrody, materiál se snadno natavuje a výsledná svarová lázeň má velkou hloubku závaru. Při svařování metodou TIG s využitím stejnosměrného proudu se uplatňuje výhradně přímé zapojení. Takto lze svařovat oceli a materiály na bázi mědi, niklu nebo titanu. Problematické je ovšem svařování materiálů, které vytváří odolnou oxidickou vrstvu (materiály na bázi hliníku a hořčíku), jelikož přímá polarita neumožňuje čistící efekt oblouku.



Obr. 10 Přímé zapojení při metodě TIG [21].

Nepřímá polarita (TIG DC+), kdy je záporný pól připojen k základnímu materiálu a kladný pól k netavící se elektrodě, není vhodná. Převažuje při ní tepelná energie, která nežádoucím způsobem zatěžuje wolframovou elektrodu. Nepřímá polarita se využívá při svařování metodou MIG/MAG, kde je naopak tepelné zatížení tavící se elektrody žádoucí.

Problematickou tvorbu odolné vrstvy oxidů řeší aplikace zdroje střídavého proudu (TIG AC). Během procesu svařování dochází k periodickému střídání polarity. Z důvodu možného čistícího účinku se tento způsob zapojení využívá pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. K tomuto jevu dochází v případě, kdy je plus pól na wolframové elektrodě (nepřímé zapojení). Katodová skvrna tedy vzniká dle předpokladů na základním materiálu. Tato skvrna je však nestabilní (pohybuje se) a vyhledává místo s nejnižší emisní energií, ve kterém je zároveň i nejsilnější vrstva oxidů, a svou energií následně oxid odpaří. Druhotným čistícím procesem je dynamický účinek oblouku. Dochází k němu opět při nepřímém zapojení, kdy je proud iontů urychlován směrem ke svarové lázni a působí na oxid mechanickým účinkem.

Moderním způsobem, který se využívá při technologii TIG, je svařování impulsním proudem. Proces je elektronicky řízen a dochází k cyklické změně mezi základní proudovou hladinou I_z , jejíž hodnota bývá velmi nízká, a impulsní proudovou hladinou I_p . Díky střídavým změnám proudu nedochází k tak velkému vnášení tepla do oblasti svaru, tudíž je znatelně menší tepelně ovlivněná oblast i výsledné deformace a pnutí. Zároveň má svar lepší mechanické vlastnosti. Těchto výhod lze využít při svařování plechů o malých tloušťkách a materiálů, které jsou citlivé na přehřátí. Lze takto svařovat plechy již od tloušťky 0,2 mm.

2.3 Parametry svařování [1], [16], [17], [23], [24]

Základní činitele při svařování metodou TIG jsou ty, které regulují tepelný výkon při svařování. Je důležité tyto charakteristiky vhodně zvolit, jelikož ovlivňují výslednou kvalitu a efektivitu svařovacího procesu. Mezi základní parametry patří:

- Svařovací proud – je parametr, který ovlivňuje hloubku nataveného materiálu. Čím vyšší je hodnota svařovacího proudu, tím větší bude průvar výsledného svaru. Velikost proudu volí dle tloušťky a tepelné vodivosti základního materiálu (standardně se pohybují mezi 20 až 500 A).
- Napětí na oblouku – je dáno rozdílem potenciálu mezi elektrodou a povrchem svarové lázně. Pokud se zvyšuje svařovací proud, zatímco je délka elektrického oblouku konstantní, dochází ke zvyšování hodnoty svařovacího napětí. Zároveň čím delší je oblouk, tím vyšší je napětí na oblouku. Vyšší hodnoty svařovacího napětí znamenají širší svarovou lázeň. Orientačně se svařovací napětí pohybuje mezi 10 až 30 V.

- Rychlost svařování – liší se v závislosti na typu svařování. Při ručním svařování dosahuje svářeč daleko menších rychlostí než při automatizovaných metodách. Obecně je rychlost svařování u technologie TIG nižší než např. u metody MIG/MAG.

Pomocí těchto veličin lze určit tepelný příkon Q_s . Ten udává, kolik tepla bylo během procesu vneseno do jednoho milimetru délky svaru. Pokud by tato hodnota byla příliš nízká, reálně by hrozilo nedostačující provaření materiálu, v krajním případě vznik studeného spoje. Na druhou stranu teplo vnášené do oblasti svaru je částečně odváděno do okolního materiálu za vzniku tepelně ovlivněné oblasti. Čím je tedy vyšší tepelný příkon, tím je TOO větší a roste velikost vysoce přehřáté hrubozrnné oblasti, která zhoršuje mechanické vlastnosti svaru. Tepelný příkon je možné vypočítat podle následujícího vzorce:

$$Q_{sTIG} = k \cdot \frac{U \cdot I}{v_s}, \quad (2.1)$$

kde: Q_{sTIG} – tepelný příkon technologie TIG [$J \cdot mm^{-1}$]

I – svařovací proud [A]

U – svařovací napětí [V]

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

k – koeficient tepelné účinnosti procesu [-]; (pro TIG je $k = 0,6$)

2.4 Wolframové elektrody a ochranné plyny [1], [2], [16], [17], [18], [20], [25]

Wolframové elektrody (zkráceně W-elektrody) pro svařování TIG jsou tyčky kruhového průřezu. Jejich hlavní složku tvoří wolfram, který se během svařování neodtavuje díky své vysoké teplotě tání (uvádí se $3380 \text{ }^\circ\text{C}$). Pro zlepšení jejich vlastností bývají často legovány oxidy kovů – lanthanu, ceru, thoria, zirkonu nebo yttria, ale vyrábí se i čisté (obsah W je 99,9 %). Přísady mají za úkol zvýšit životnost elektrody a stabilizovat hoření oblouku.

Volba správné elektrody závisí na svařovacích parametrech a typu svařovaného materiálu. Podle těchto charakteristik se volí i průměr elektrody. Aby nedošlo k přetížení wolframové elektrody, měla by být její vzdálenost od materiálu orientačně rovna jejímu průměru. Vyráběné průměry jsou uváděny v rozmezí od 0,5 do 10 mm o délce 50, 75, 150 a 175 mm. Každá elektroda musí být na svém konci označena barevným páskem, který udává typ elektrody dle charakteristického odstínu. Důraz je kladen také na broušení funkčního konce elektrody. Rýhy vzniklé broušením musí být orientovány ve směru délky elektrody, aby bylo zajištěno hoření oblouku z konce elektrody.

Proces svařování metodou TIG probíhá v ochranné atmosféře inertního (netečného) plynu, který se neúčastní chemických reakcí probíhajících během svařování. Tato plynná atmosféra má především chránit netavící se wolframovou elektrodu, svarovou lázeň a okolní oblast základního materiálu před nežádoucími účinky vzdušné atmosféry, zejména před oxidačními reakcemi a naplyněním svarového kovu. Zároveň netečný plyn pomáhá s formováním svarové housenky, usnadňuje zapalování elektrického oblouku a podporuje jeho stabilní hoření během celé doby svařování.

Nejčastěji využívaným plynem je argon, který patří mezi inertní plyny. V malé míře se vyskytuje i ve vzdušné atmosféře. Mezi jeho typické znaky patří malá tepelná vodivost a poměrně nízký ionizační potenciál. Díky tomu je zapalování elektrického oblouku snadné a hořící oblouk je stabilní. U TIG svařování je kladen velký důraz na čistotu tohoto inertního plynu. Standardně se dodává v čistotě s označením 4.5 (tzn. 99,995 % obsahu argonu), ovšem pro reaktivnější materiály jako je titan nebo zirkon je nutné použít vyšší čistoty (označení 4.8 s čistotou 99,998 % nebo 5.0 s čistotou 99,999 %).

V praxi se nejčastěji využívá čistého argonu, jelikož se jedná o ekonomicky poměrně přijatelnou variantu. Případně lze svařovat v ochraně směsných plynů na bázi argonu a helia, které kombinují přínosy obou plynů. Další variantou jsou směsi argonu a vodíku (pro redukci vznikajících oxidů) nebo argonu a dusíku.

2.5 Hořáky pro svařování TIG [1], [16], [17], [18], [25], [26]

Svařovací hořák je velmi důležitou a zároveň nejvíce tepelně namáhanou součástí svařovací aparatury (obr. 11). Jeho hlavní funkcí je přívod svařovacího proudu na wolframovou elektrodu, což je zajištěno pomocí kleštiny, která elektrodu zároveň upíná v těle hořáku. Upínací síla je značná, aby se redukoval přechodový odpor mezi součástmi.



Obr. 11 Hořák pro svařování technologií TIG [26].

Dále je nutné zajistit přívod a usměrnění ochranného plynu do místa svařování. K tomuto účelu slouží hubice (dýza). Ta musí mít vhodný tvar a průměr, který závisí na požadované šířce ochranné zóny. Při běžném svařovacím procesu se využívají hubice o průměru od 8 do 25 mm. Orientačně lze průměr dýzy určit podle velikosti svařovacího proudu. Ochranu svarové lázně zefektivňuje tzv. plynová čočka, která se umístí místo domečku kleštiny. Ta prodlužuje laminární proudění plynu a umožňuje snadnější přístup do oblasti svaru vysunutím elektrody. Výsledkem je menší spotřeba inertního plynu.

Keramické dýzy jsou určeny pro ruční svařování. Jsou lehké a jsou schopny elektrické izolace. Na druhou stranu se nárazem snadno poškodí a špatně snáší teplotní šoky. Kovové dýzy, které se vyrábí z mědi a jejích slitin, se využívají spíše pro strojní svařování (značná hmotnost). Jsou snadno vyrobitelné, mají větší životnost, ale jsou velmi dobře tepelně vodivé, což komplikuje samotnou konstrukci hořáků. K zamezení přestupu tepla mezi hlavou hořáku a hubicí slouží izolační kroužek.

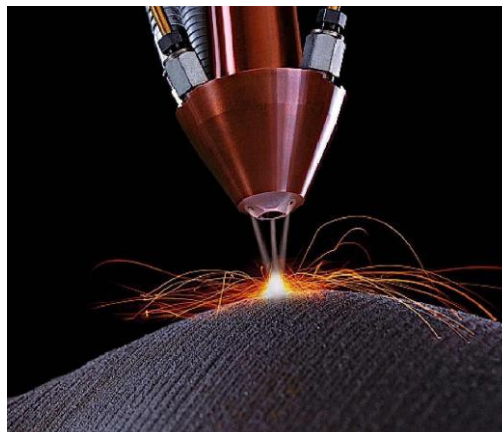
V neposlední řadě je pro správné fungování hořáku důležité zajistit jeho vhodné chlazení. Hořáky s nízkým proudovým zatížením (do 150 A) stačí většinou chladit procházejícím inertním plynem, ovšem při vyšších svařovacích proudech je nutný přívod chladicí kapaliny (vody).

3 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ LASEREM [27], [28], [29], [30], [31]

Technologie svařování laserem je vysoce progresivní metoda tavného svařování (dle ČSN EN ISO 4063 metoda 52). Patří mezi speciální technologie svařování a lze jí svařovat širokou škálu kovových i nekovových materiálů (plastů) bez použití materiálů přídavných.

Teoretický základ laserových zařízení byl položen Albertem Einsteinem, který se na počátku 20. století zabýval mimo jiné kvantovou fyzikou. Dokázal objasnit problematiku stimulované emise, jenž je základním principem laseru. Předběhl však svoji dobu a k první realizaci průmyslového laseru došlo až v 70. letech minulého století. Jednalo se o rubínový laser sestavený T. Maimanem. Tento vynález odstartoval celosvětový průmyslový boom ve vývoji nových laserových zařízení i technologií (obr. 12).

V dnešní době laserové metody pomalu vytlačují konvenční způsoby svařování, a to zejména v sériové výrobě hlavně díky vysoké svařovací rychlosti, přesnosti a výsledné kvalitě svarového spoje. Primárně se využívá strojního vedení laseru, jelikož jsou kladeny poměrně přísné požadavky na svařovací proces. Průmyslový laser ovšem může být využitý i pro řadu dalších strojírenských aplikací jako je dělení materiálů, navařování, povrchové kalení, gravírování apod.



Obr. 12 Laserové technologie [31].

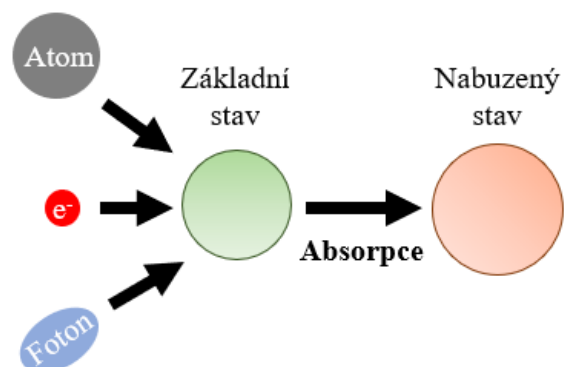
3.1 Princip laserového zdroje [27], [28], [29], [30], [31], [33], [34]

Zkratka laser (z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) charakterizuje specifický zdroj elektromagnetického záření, které je zároveň zesilováno na základě principu stimulované (vynucené) emise záření. Z toho důvodu se laser označuje také jako optický zesilovač. Výstupem z laseru je velmi úzký světelný paprsek, který je:

- Monochromatický – paprsek má jednu charakteristickou barvu (jednu vlnovou délku),
- koherentní – záření vychází jako jedna synchronizovaná vlna (stejná amplituda i fáze),
- s malou divergencí – laserový svazek se téměř nerozbíhá,
- pomocí optiky fokusovatelný do bodu, ohniska (ve skutečnosti do velmi malé plošky).

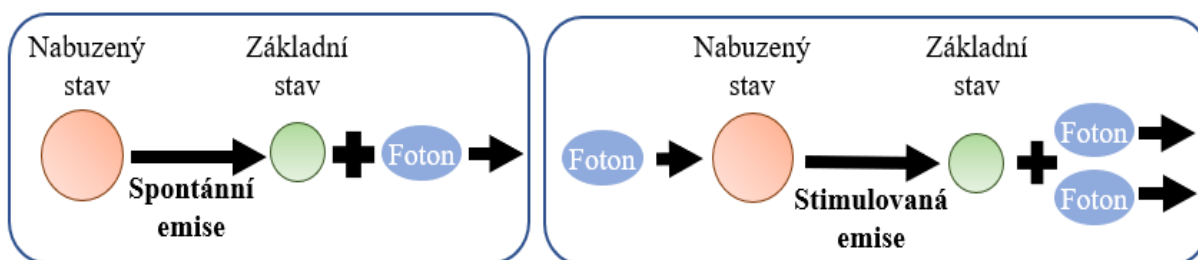
Tyto vlastnosti jsou pro vystupující laserový svazek typické, na rozdíl od záření z klasických světelných zdrojů. Běžné zdroje (žárovky nebo LED zářivky) vyzařují chaoticky do celého prostoru, záření je nesynchronní a skládá se z mnoha vlnových délek. Je rozbíhavé, tudíž se špatně zaostřuje, a to vždy jen do plochy. Z těchto důvodů je pro laserové technologie užití běžného zdroje naprosto nevhodné.

Pro fungování laserů jsou zcela stěžejní principy absorpce a stimulované emise. Při interakci budících částic (elektronů, fotonů i jiných atomů) s částicemi určitého hmotného prostředí v základním energetickém stavu dochází k tzv. absorpci (obr. 13). Částice hmotného prostředí tedy pohltí budící energii a dojde k jejich nabuzení do energeticky bohatšího stavu. Jelikož se tyto částice snaží zaujmout energeticky nižší, základní stav, ve většině případů následuje okamžitě tzv. spontánní emise (obr. 14, vlevo).



Obr. 13 Princip absorpce [30].

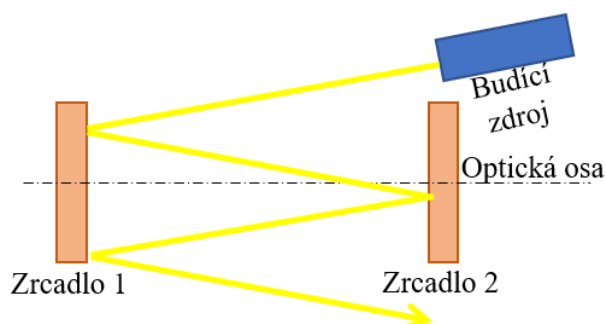
Během ní je přebytečná energie vyzářena v podobě fotonu (částicový charakter elektromagnetického záření). Ve speciálních případech nabuzeného stavu může dojít k tzv. emisi stimulované. Během určité doby, kdy je daná hmotná částice nabuzena (je ve vyšší energetické hladině), může dojít ke srážce s dalším tzv. stimulujícím fotonem (obr. 14, vpravo). Při interakci opět dochází k návratu částice do základního stavu a současně se uvolní několik fotonů, které mají stejné vlastnosti jako foton stimulující (směr šíření, fáze nebo energii).



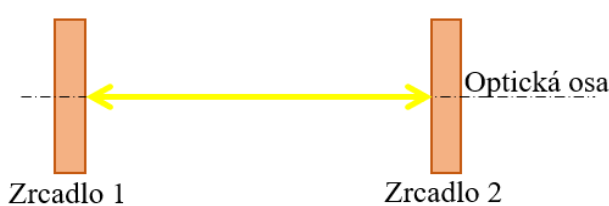
Obr. 14 Princip spontánní a stimulované emise [30].

Laserový zdroj funguje na praktickém využití principu stimulované emise. Pro vznik požadovaného výchozího paprsku, je nutné, aby každý průmyslový laserový zdroj obsahoval tyto základní části:

- Optický rezonátor – zjednodušeně se jedná o 2 zrcadla na jedné optické ose. Pokud dojde k dopadu světelného paprsku na jedno ze zrcadel pod libovolným úhlem, po určitém počtu odrazů svazek vyběhne ven (obr. 15). Ovšem v případě, kdy se paprsek šíří rovnoběžně s danou optickou osou zrcadel, světlo mezi nimi rezonuje nekonečně dlouhou dobu po vypnutí budícího svazku (obr. 16). Rezonátor tedy slouží pro usměrnění do jednoho výsledného paprsku. Jelikož ale každé zrcadlo odráží s určitými ztrátami, intenzita kmitajícího záření exponenciálně klesá a rezonátor se ohřívá. Z toho vyplývá, že pro vývin laserového záření samotný optický rezonátor nestačí.



Obr. 15 Odraz paprsku pod úhlem [30].

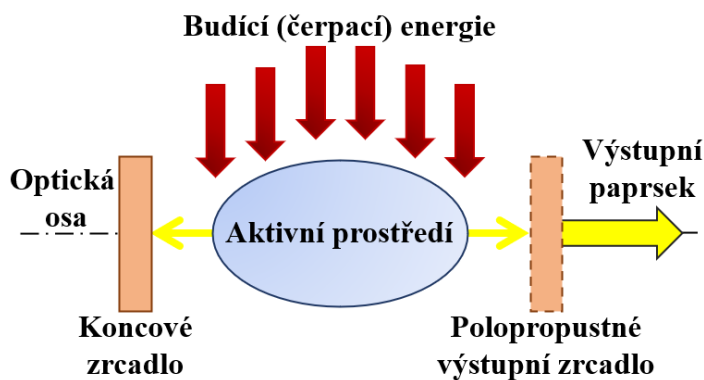


Obr. 16 Šíření paprsku rovnoběžně s optickou osou [30].

- Budící zdroj – je zařízení, které slouží k tvorbě budící (čerpací) energie. Ta je následně dodávána aktivnímu prostředí. K buzení (čerpání) může docházet elektrickým výbojem, opticky nebo chemickou reakcí.
- Aktivní prostředí – obsahuje hmotné částice, které jsou vlivem buzení vnějšího zdroje přiváděny do energeticky vhodného, nabuzeného (excitovaného) stavu. Částice jsou tak připraveny k procesu stimulované emise. Aktivní prostředí se dělí dle jeho skupenství na plynové, kapalinové i pevnolátkové.

Aktivní prostředí je vloženo mezi zrcadla optického rezonátoru a je do něho přiváděna čerpací energie z budícího zdroje (obr. 17). Jakmile se vyskytne foton, který se šíří aktivním prostředím ve směru rovnoběžném s optickou osou, dojde k celé řadě interakcí s náhodnými excitovanými částicemi. Tato událost vede k již zmiňovanému jevu stimulované emise.

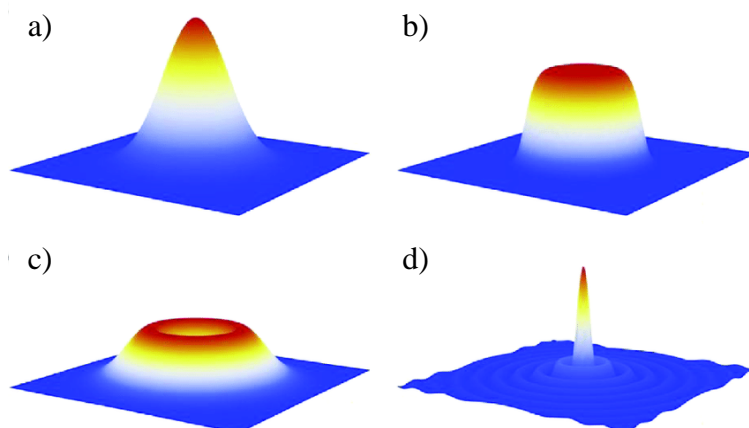
Vyzářené fotony se pohybují stejným směrem jako foton stimulující, tudíž se počet fotonů směřujících ve směru optické osy neustále zvyšuje. Ekvivalentní, vyzářené fotony se stávají okamžitě stimulujícími a dochází ke vzniku řetězové reakce. S každým odrazem od zrcadel rezonátoru se proces opakuje a počet těchto fotonů exponenciálně roste. Následkem je prudký nárůst intenzity záření a vznikající laserový paprsek se rychle zesiluje. Samozřejmě s částicemi aktivního prostředí interagují i fotony, které dopadají na reflektory rezonátoru pod určitým úhlem. Ty jsou ovšem po určitém počtu odrazů vyzářeny mimo optický rezonátor.



Obr. 17 Princip laserového zdroje [30].

Při přílišné intenzitě záření ve směru optické osy by mohlo dojít k propálení jednoho ze zrcadel. Z toho důvodu je výstupní zrcadlo polopropustné, tudíž má řízenou odrazivost a propouští určité procento energie ven v podobě výstupního laserového paprsku, který slouží právě k požadovaným průmyslovým aplikacím.

Rozložení intenzity záření v průřezu laserového paprsku není konstantní a je popsáno pomocí tzv. módu. Existuje vícero stupňů módu s různým rozložením intenzity (obr. 18, kde červená barva značí oblast s největší intenzitou). Základní tvar módu je určen geometrickou konstrukcí rezonátoru (zachovává tvar zrcadel). Pro kvalitní provedení daných technologických aplikací je velmi důležitá dokonalá symetrie módu, která se odvíjí od nastavení zrcadel rezonátoru.



Obr. 18 Základní typy módu: a) Gaussův, b) top hat, c) prstencový, d) kombinovaný [34].

Dalším důležitým parametrem je tzv. BPP (beam parameter product). BPP charakterizuje schopnost laserového paprsku být fokusován. Zjednodušeně řečeno čím menší je hodnota tohoto parametru, tím lépe se paprsek zaostřuje. Pro technologickou aplikaci jsou tedy výhodnější lasery s co nejmenším BPP. U zařízení s velkým BPP je ohnisko ostře ohraničené a při jeho špatném nastavení může dojít ke znehodnocení daného procesu (svařování nebo řezání).

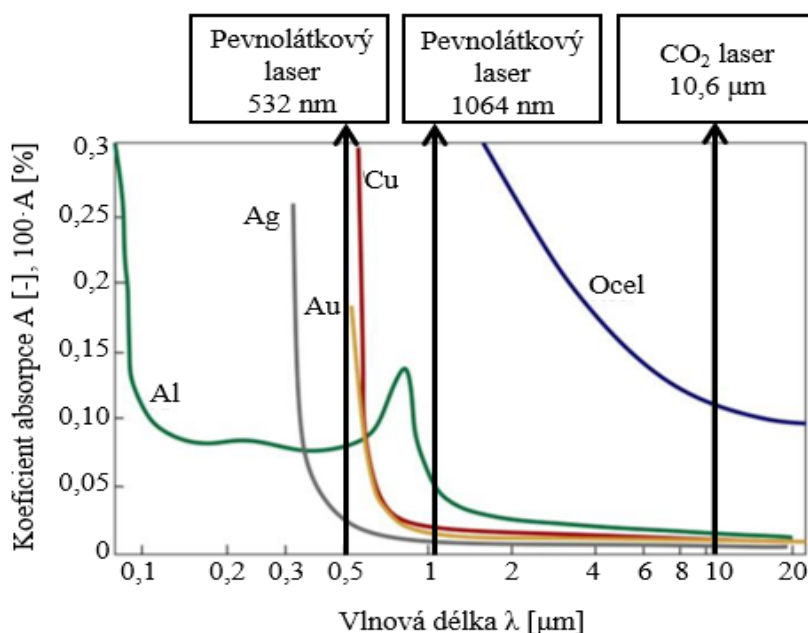
3.2 Typy laserových zdrojů [1], [16], [27], [28], [29], [30], [33], [35], [36]

V průmyslové praxi se využívá celá řada laserových zařízení, které fungují na stejném principu, ovšem konstrukčně i vlastnostmi se mohou od sebe velmi lišit. Díky technickému rozvoji dochází k neustálému vývoji výkonnějších laserů, naopak od některých starších typů se již upouští. Laserové zdroje lze dělit podle různých kritérií. Mezi ty základní patří:

- Typ aktivního prostředí – ovlivňuje, v jakém prostředí dojde k zesílení světelného paprsku. K tomuto ději může dojít v plynu (případně v plazmatu), v kapalinách (v průmyslu se používají minimálně), nebo v pevných látkách (označují se jako lasery pevnolátkové). Toto rozdělení je z praktického hlediska nejpoužívanější.
- Tvar aktivního prostředí – vypovídá o geometrii aktivního prostředí. Může nabývat válcového (tyčového), deskového, diskového nebo vláknového (fiber) tvaru.
- Druh čerpání (buzení) – charakterizuje, jakým způsobem dochází k buzení aktivního prostředí. Čerpání může být optické (např. pomocí výbojky nebo laserové diody) nebo elektrickým proudem (často u plynových laserů), kdy dojde k buzení pomocí výboje. Minoritním způsobem je buzení chemické a buzení tepelnými změnami.
- Režim provozu – může být kontinuální (CW) pro spojitý provoz nebo pulzní (PW). Pulsy mohou být dlouhé, krátké nebo velmi krátké (pro pikosekundové lasery).

Porovnání jednotlivých průmyslových laserů se provádí na základě určitých parametrů. Důležitý je zejména maximální výkon laseru (kW), vlnová délka laserového paprsku (μm , nm), elektrický příkon (kW), hodnota BPP (mm·mrad) a v neposlední řadě spotřeba provozních médií (laserové plyny, média pro chlazení, stlačený vzduch, apod).

Pro správné použití laserů je mimo jiné velmi důležitá vlnová délka laserového paprsku, jelikož zásadním způsobem ovlivňuje absorpci (pohlcení) záření kovových materiálů (obr. 19). Obecně platí (nejen tedy u laserů), že se zkracující se vlnovou délkou elektromagnetického záření, které dopadá na kovový materiál, se schopnost absorpce zvyšuje. Pro laserové technologie to znamená, že čím menší má vyvinutý laserový paprsek vlnovou délku (je charakteristická pro daný typ laserového zdroje), tím více energie přejde do daného zpracovávaného kovového materiálu. Zároveň je možné absorpci zlepšit například zvýšením teploty nebo zdrsněním povrchu materiálu. Pokud kov není schopen absorpce, dopadající fotony se pouze odrazí od jeho povrchu a materiál se nezačne ohřívat, natož pak tavit.



Obr. 19 Závislost vlnové délky na koeficientu absorpce [36].

Historicky prvním průmyslově využívaným laserem byl pevnolátkový, rubínový laser, který sloužil pro vrtání, následovaný vývojem dalších pevnolátkových laserů s Nd YAG aktivním prostředím. Opravdový boom technologických aplikací nastal s objevem plynových CO₂ laserů, které v té době byly používány hlavně pro dělení materiálu. V dnešní době se nejvíce používá pět hlavních typů laserů. Patří mezi ně lasery CO₂, Nd YAG, diskové, vláknové a polovodičové (diodové). Každý typ má své konstrukční charakteristiky, výhody, nevýhody a typické aplikace. Souhrn nejpoužívanějších laserů i jejich charakteristik je v tabulce 1.

Tab. 1 Charakteristiky používaných průmyslových laserových zdrojů [30], [33].

Typ laserového zdroje	Pracovní vlnová délka λ [μm]	Způsob buzení	Účinnost η [%]	Max výkon P [kW]	BPP [mm·mrad]	Údržba	Režim
CO ₂ (plynový)	10,6	elektrický výboj	5-10	20	6	častá	CW, PW
Nd YAG (pevnolátkový)	1,06	výbojky (optické)	2-3	6	25	častá	CW, PW
		laserové diody	~20	6	25	častá	CW
Diskový (pevnolátkový)	1,07	laserové diody	~32	16	8	občas	CW
Vláknový (pevnolátkový)	1,07	LED diody	48-60	100	<2,5	není	CW, PW
Polovodičový (pevnolátkový)	0,8-1,0	elektrický proud	<47	10	obecně vysoké	není	CW

(Vysvětlivky: Režim – CW = kontinuální, PW = pulzní)

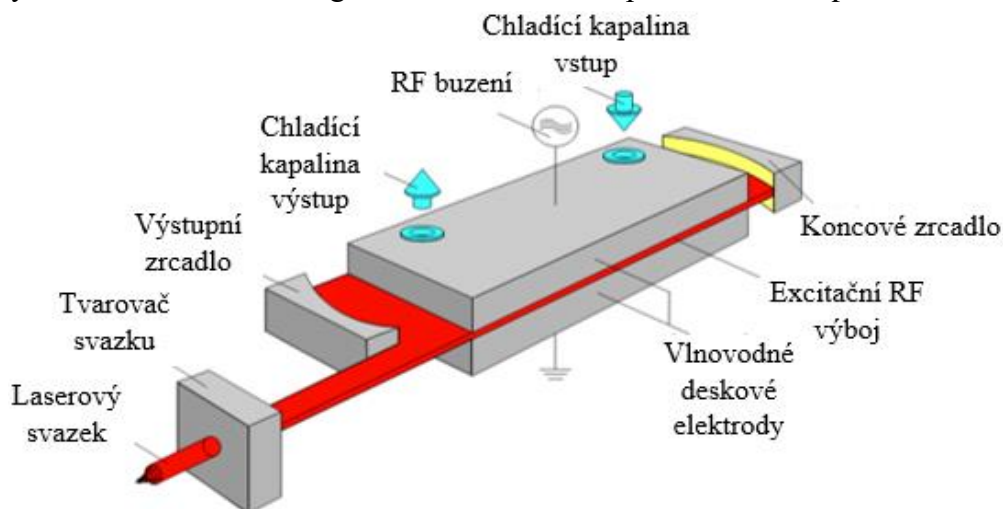
3.2.1 CO₂ laser [1], [27], [30], [33], [37]

Jedná se o jeden z nejdéle používaných průmyslových laserů. Patří do skupiny plynových laserů, aktivní prostředí je tedy tvořeno plynem na bázi helia, dusíku a oxidu uhličitého (s vysokou čistotou). K buzení obvykle dochází pomocí doutnavého elektrického výboje (existuje i čerpání radio-frekvenční). Jelikož je koncentrace aktivních částic v plynu menší než v pevné látce, je přírůstek výkonu CO₂ laserů na jednotku délky trubice s aktivním prostředím menší. Vyšších výkonů lze dosáhnout prodloužením dráhy vznikajícího paprsku (používají se tzv. pomocná úhlová zrcadla).

Pracovní vlnová délka se pohybuje okolo 10,6 μm , tudíž pro optickou soustavu laseru nelze použít skleněnou optiku, jelikož by nepropustila danou vlnovou délku. Místo toho se používá optika na bázi ZnSe, Ge nebo GaAs pro fokusaci výstupního paprsku a materiály Si a Cu (s Au vrstvou na povrchu pro zvýšení odrazivosti) pro reflexní optiku, což je výrazná nevýhoda, protože jsou tyto materiály znatelně dražší. Navíc v případě poškození může dojít k uvolnění zinek-selenidu, který je toxický, tudíž nebezpečný pro obsluhu zařízení.

Od použití CO₂ laserů se v posledních letech pozvolna upouští hlavně z důvodu nízké účinnosti (5–10 %) a špatné fokusovatelnosti výstupního paprsku (vysoká hodnota BPP). Zbylá energie procesu (90–95 %) se přeměňuje na teplo. Z toho důvodu tyto lasery musí obsahovat poměrně složité chladicí zařízení s oběhovou turbínou a vakuovou vývěvou pro odsávání sloučenin vzniklých reakcí N₂ a CO₂. Rezonátor se skládá mimo jiné z několika pomocných úhlových zrcadel a zesílení paprsku probíhá ve větším počtu různě uspořádaných výbojových oblastí. Celkově jsou tyto lasery velmi konstrukčně komplikované a jejich provoz

je finančně nákladný s nutností časté údržby. Pro výkony do 5 kW byly vyvinuty lasery difúzně chlazené (nemají turbínu, nedochází k nucenému proudění plynu), které tyto nevýhody částečně stírají. Jedná se o poslední vývojový stupeň CO₂ laserů (tzv. SLAB, obr. 20), kdy k odvodu tepla z provozního plynu dochází difúzí do deskových měděných elektrod, které jsou následně chlazeny vodou. Obecně se CO₂ lasery používají pro řezání nekovových materiálů, značení a gravírování, minoritně pro svařování a povrchové kalení.

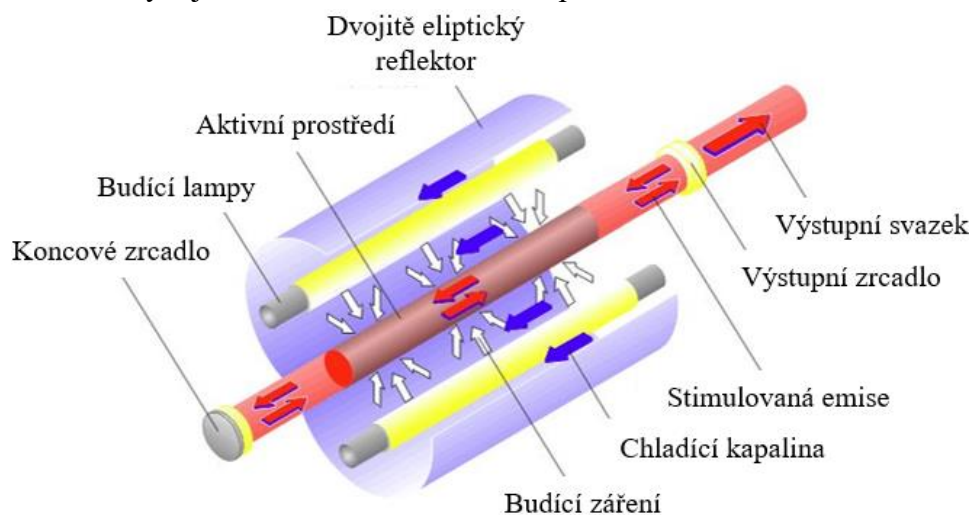


Obr. 20 Schéma SLAB laserového zdroje [37].

3.2.2 Tyčový Nd YAG laser [27], [28], [30], [32], [33], [35], [37], [38]

Tyčový Nd YAG laser je spolu s CO₂ laserem nejdéle průmyslově využívaným laserovým zdrojem. Aktivní prostředí je tvořeno pevnolátkovým krystalem yttrium hlinitého granátu, který je dopovaný ionty neodymu (vzácná zemina). Pracovní vlnová délka se pohybuje okolo 1,06 μm . Tyto zdroje dosahují výkonů do 6 kW. Tyčové Nd YAG lasery, které jsou buzené opticky xenonovými nebo kryptonovými výbojkami (označení LPSS – lamp pumped solid state) se dnes již příliš nepoužívají. Důvodem je jejich velmi nízká účinnost, která se udává od 2 do 3 % (ještě nižší než u CO₂ laseru). To znamená, že většina energie z výbojek je přeměněna na teplo, které musí být neustále odváděno.

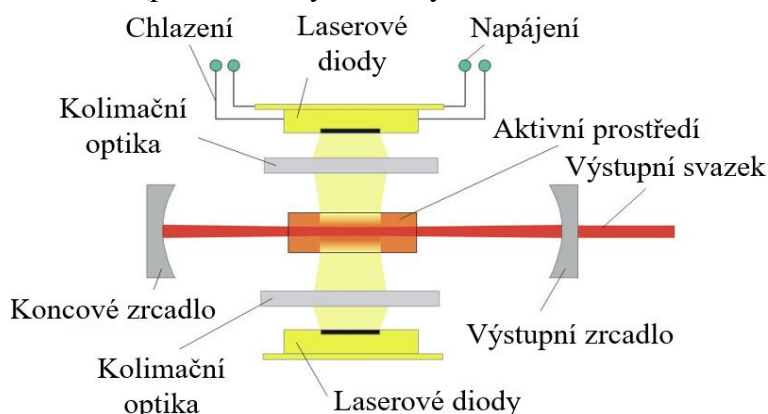
Konstrukce LPSS laseru je zobrazena na obrázku 21. Reflektor může být buď eliptický, nebo dvojitě eliptický. Budící lampy a tyčové aktivní prostředí jsou umístěny uvnitř reflektoru a to tak, že se nachází v libovolném průřezu v jeho ohniscích. Díky takto zvolené konstrukci je veškeré záření z výbojek směřováno do aktivního prostředí.



Obr. 21 Konstrukce LPSS laseru s dvojitě eliptickým reflektorem [35].

Aktivní prostředí ve tvaru tyčky je velmi problematické z hlediska chlazení. Teplu vzniká absorpcí uvnitř krystalu, ovšem odvod tepla lze realizovat pouze na povrchu (chladičí kapalinou). Tato skutečnost vede k nestejnomyému teplotnímu profilu, vlivem toho se mění optické vlastnosti aktivního prostředí, což ovlivňuje průběh stimulované emise a zhoršuje kvalitu výsledného módu. Navíc výbojky měly zejména u kontinuálních laserů velmi nízkou životnost, tudíž se od jejich používání velmi rychle upustilo. Využívají se tedy spíše pro pulzní provoz, a to zejména pro mikronavařování, gravírování nebo vrtání.

Nahrazením výbojek laserovými diodami (polovodičovými lasery, označení DPSS – diode pumped solid state, obr. 22) došlo k částečné zvýšení účinnosti (až 20 %), prodloužení životnosti a snížení nároků na chlazení (potlačení termálního efektu). Tyto lasery se používají pro tzv. Q-spínaný pulzní režim, kdy dochází ke generování velmi krátkých pulzů (řádově ns) s velmi nízkým výkonem (do 100 W). Svého využití nalézají pro značení a gravírování kovů i plastů.

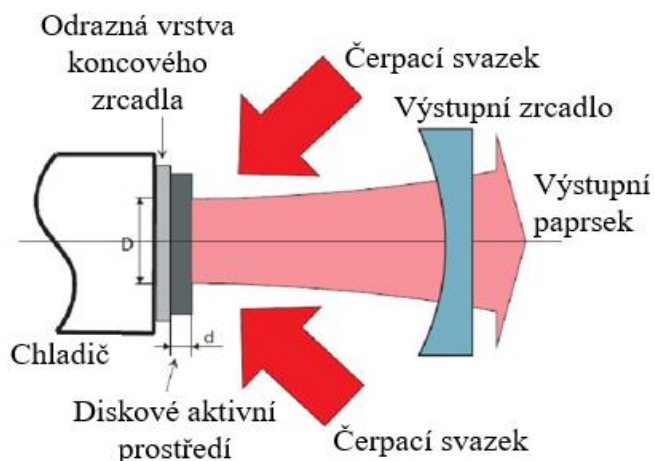


Obr. 22 Konstrukce DPSS laseru [35].

3.2.3 Diskový a vláknový laser [27], [30], [32], [33], [37], [39], [40], [41]

Tato skupina laserových zdrojů se postupně vyvinula ze skupiny tyčových Nd YAG laserů. Určitými konstrukčními úpravami bylo zajištěno menších tepelných ztrát (snadnější chladičí proces) a celkově vyšší účinnosti a výkonnosti laserového zdroje. Princip vzniku laserového paprsku je stejný jako v případě DPSS laseru, aktivní prostředí (tvořené Nd nebo Yb YAG) však není v tomto případě ve formě tyčky, ale tenkého disku (řádově desetiny milimetru), který má znatelně menší tloušťku oproti jeho průměru (obr. 23).

Disk je připevněn ke chladičímu zařízení, které dokáže rovnoměrně odvádět přebytečné teplo. Teplotní profil je tedy v disku stejnoměrný, což umožňuje dosáhnout vyšších výkonů s dobrou kvalitou výstupního svazku. Čerpání probíhá pomocí laserových diod. Maximální výkon dosahuje hodnoty 16 kW s účinností až 32 %. Přesto jsou tyto lasery poměrně složité a musí probíhat jejich údržba. Průkopníkem tohoto typu laseru je firma TRUMPF, která je vyrábí zejména pro řezání, strukturování či svařování.



Obr. 23 Konstrukce diskového laseru [39].

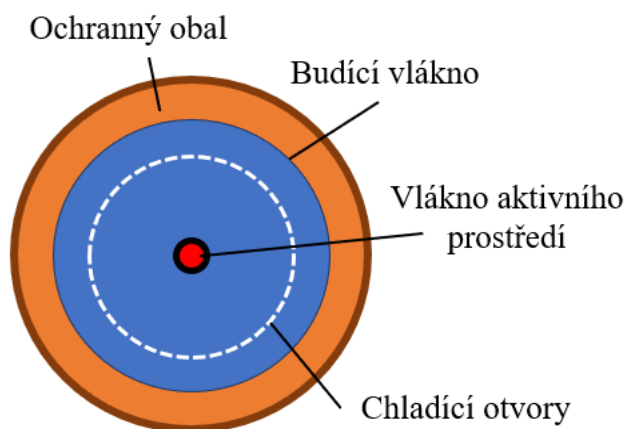
Vláknový laser (také označován jako fiber laser) je nejpoužívanější, nejmodernější a nejperspektivnější typ laserového zdroje. Patří do skupiny pevnolátkových laserů a jeho aktivní prostředí je tvořeno krystalem Yb YAG (Ytterbium YAG, v některých aplikacích se využívá Neodymu). Tato skupina zdrojů (podobně jako zdroje diskové) vznikla modernizací tyčových laserů. Tyčka z aktivního prostředí je v tomto případě ve formě dlouhého, velmi štíhlého vlákna. Základem konstrukce je optické vlákno, které je dvojité (obr. 24). V jeho středu se nachází vlákno z aktivního prostředí Yb YAG o průměru od 0,05 do 0,3 mm. To je

koaxiálně vnořeno do vnějšího budicího vlákna, do kterého je přiváděno čerpací optické záření (např. z laserových diod). Ke koaxiálnímu vláknu jsou budicí lasery připojeny pomocí optických spojek. Celé uskupení může být v délce i několika desítek metrů a po povrchu je pokryto plastovou ochrannou vrstvou. Na koncích vlákna jsou oblasti s měnícím se indexem lomu, tzv. Braggovské mřížky, které v principu fungují jako koncová zrcadla.

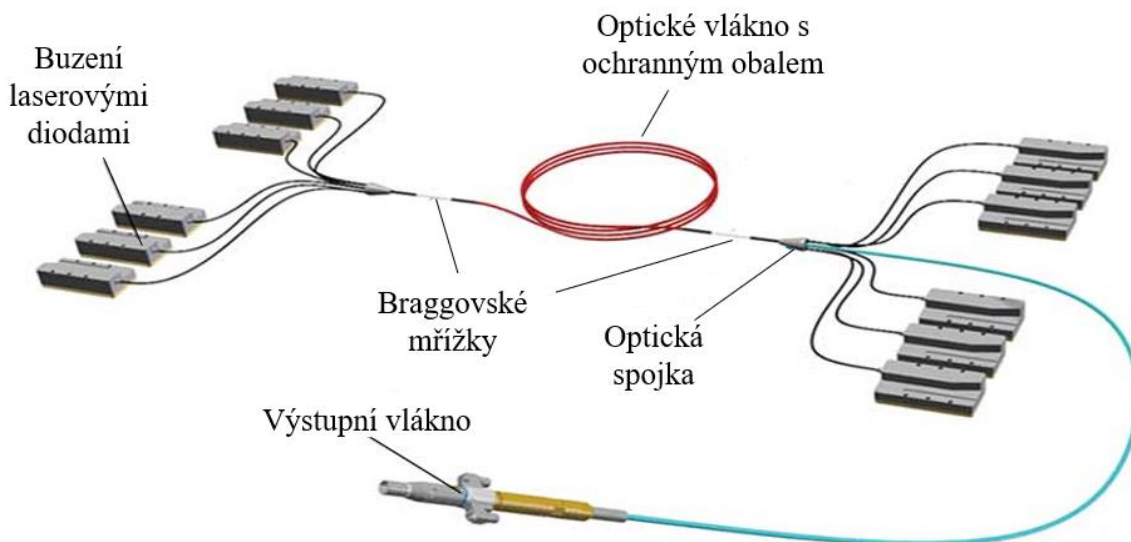
Díky této konstrukci působí na aktivní prostředí intenzivní pole budicího záření, z čehož plyne značná účinnost procesu, která se běžně pohybuje okolo 45 %, ale v některých speciálních případech až 60 %. Vlnová délka se u těchto laserů uvádí 1,07 μm . Výstupní paprsek je velmi kvalitní, s nízkou hodnotou BPP (téměř se nerozbíhá) a kvalitním Gaussovským módem. Chlazení je díky velké ploše pláště velmi snadné, u nižších výkonů stačí ochlazovat vzduchem (výkonnější bývají chlazeny vodou).

Výkon samostatného vlákna je okolo 1 kW, ale jednoduchým propojením vláken (spojují se do tzv. modulů) lze výkon několikanásobně zvýšit. Běžně tyto lasery dosahují hodnot okolo 20 kW (existují i speciální případy s výkonem až 500 kW), a je možné je provozovat v kontinuálním, pulzním i kvazipulzním režimu. Díky modularitě tohoto laserového zdroje lze přizpůsobit jeho výkon přímo dané aplikaci.

Vláknový laser (obr. 25) má malé provozní náklady, je téměř bezúdržbový a disponuje obrovskou životností (v řádu desítek tisíc hodin provozu). V dnešní době se vláknový typ laserového zdroje využívá téměř pro všechny průmyslové aplikace.



Obr. 24 Průřez optickým vláknem [40].



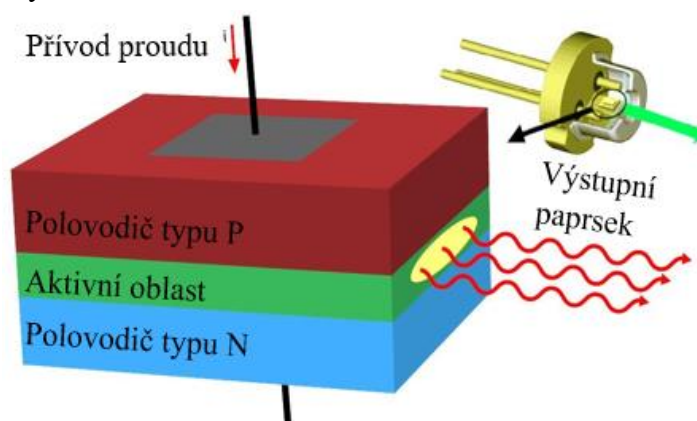
Obr. 25 Schéma vláknového laseru [41].

3.2.4 Polovodičový laser [27], [30], [32], [33], [37], [42]

Polovodičový neboli diodový laser je dalším zdrojem ze skupiny pevnolátkových, buzení je ovšem v tomto případě realizováno průchodem elektrického proudu. Aktivní prostředí tvoří polovodičový materiál a ke stimulované emisi dochází přechodem elektronů z vodivostního pádu do valenční sféry elektronového obalu na rozhraní polovodičů typu N a P vlivem buzení el. proudem. Rezonátor je tvořen seříznutými konci polovodičového bloku, tudíž jsou jeho zrcadla hranatá a výstupní paprsek má obdélníkový tvar.

Vlnová délka se mírně liší podle druhu materiálu, ze kterého je tvořeno aktivní prostředí (využívá se arsenid hlinitý nebo arsenid gallito-hlinitý). Může tedy nabývat hodnot z oblasti celého viditelného spektra a infračerveného pásma. V průmyslu se však využívají zejména ty, které mají vlnovou délku okolo 1 μm .

Diodové lasery (obr. 26) disponují vysokou účinností, která může dosahovat téměř 50 %. Jedna dioda má poměrně malý výkon (méně než 1 W), a proto se jednotlivé diody sdružují do tzv. stacků s jednotným chlazením a vstupem proudu. Díky této skutečnosti mohou tyto lasery dosahovat výkonů až 10 kW. Jejich konstrukce je velmi jednoduchá, jsou tudíž téměř bezúdržbové a mají dlouhou životnost. Vlivem nekvalitního rezonátoru disponuje vysokým parametrem BPP (paprsek se špatně fokusuje).



Obr. 26 Schéma diodového laseru [42].

Výstupní svazek má tedy špatnou kvalitu a je rozbíhavý (lze částečně řešit optickou soustavou). Polovodičové lasery se zejména díky své účinnosti používají jako optické budičí zdroje u pevnolátkových laserových zdrojů, dále jsou použitelné pro navařování, povrchové kalení, čištění a jiné úpravy. Pro dělení materiálu není vlivem nekvalitního výstupního svazku příliš vhodný.

Speciálním typem je modrý polovodičový laser, který odpovídá vlnovou délkou modrému záření. Tyto lasery mají výkon až 1,6 kW a používají se pro svařování mědi. Modrý polovodičový laser má krátkou vlnovou délku (okolo 0,45 μm), a proto je absorptivita mědi značně vyšší než v případě ostatních laserových zdrojů (využití v oblasti výroby elektromotorů, akumulátorů apod.).

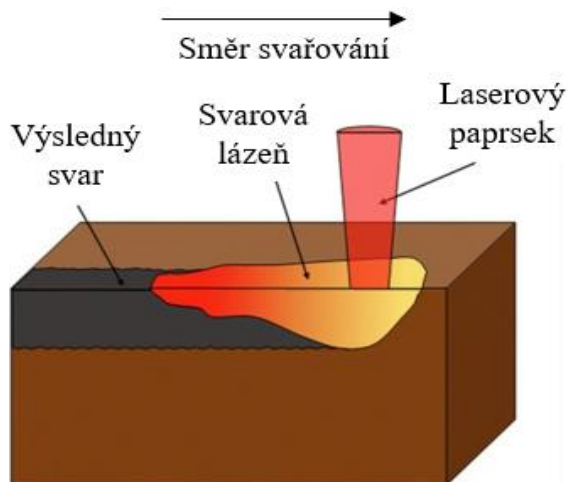
3.3 Princip laserového svařování [27], [28], [32], [43], [44], [45], [46], [47], [48]

Při svařování se prvotně rovnoběžný laserový paprsek zaostří pomocí speciální optiky do ohniska. Při dopadu paprsku na povrch mohou být fotony záření materiálem absorbovány, odraženy a velmi malá část může skrze materiál projít. Pohlcené fotony jako kvanta energie zvyšují frekvenci vibrací krystalové mřížky a tím se materiál ohřívá.

Jedná se o velmi dynamický proces, při němž v místě dopadu laserového paprsku dochází k velmi rychlému roztavení materiálu, část se dokonce i odpařuje. Tento fakt je způsoben obrovskou plošnou hustotou energie v paprsku, která dosahuje hodnot až 10^9 W/cm^2 , což je o několik řádů více než u běžných obloukových technologií. Takové hustoty energie je možné dosáhnout díky fokusaci laserového svazku do velmi malé plošky, čímž je zajištěn lokální ohřev a vznikající tepelně ovlivněná oblast je minimální. Výsledný svar je velmi štíhlý a svařovací rychlost je několiknásobně vyšší oproti konvenčním metodám svařování (při svařování laserem se dosahuje běžně rychlostí okolo 10 m/min).

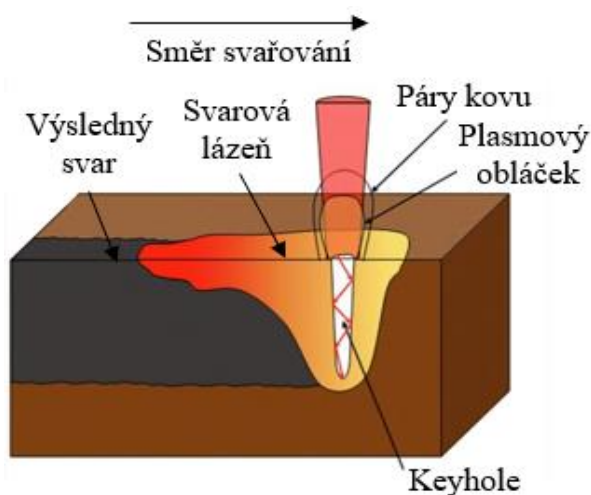
Při svařování laserem se rozlišují 2 režimy svařování podle účinku laserového svazku na svařovaný materiál:

- **Kondukční režim** – je charakteristický spíše nižší hustotou energie, která se řádově pohybuje okolo 10^6 W/cm². Tepelná energie se šíří hlavně vedením (kondukcí) a materiál se téměř neodpařuje. Materiál se taví pouze na povrchu, tudíž je výsledný svar relativně mělký, má široký závar a poměrně velkou tepelně ovlivněnou oblast (obr. 27). Tento režim se využívá např. pro svařování tenkých fólií nebo při aplikacích, kde je kladený důraz na pohledovou kvalitu svaru a kde není potřeba přílišné hloubky svaru.



Obr. 27 Kondukční režim [46].

- **Penetrační režim** – je při svařování laserem více rozšířený. Hustota energie je řádově vyšší než u kondukčního režimu a dosahuje hodnot až 10^9 W/cm². Vlivem extrémní intenzity energie a pomalého odvodu tepla dochází k rychlému ohřevu a následnému vypařování kovu ze svarové lázně. Tím vzniká uvnitř materiálu štíhlá, úzká dutina (tzv. keyhole), která je obklopena roztaveným kovem. Za laserovým paprskem (ve směru proti rychlosti svařování) vzniká svarová lázeň, která následně tuhne ve výsledný svar. Laserový paprsek může díky keyhole proniknout hlouběji do materiálu (obr. 28). Zároveň se zvětšuje absorpční plocha, paprsek se vícenásobně odráží od stěn keyhole a pohlcení energie ze záření je efektivnější. Dochází tedy k předání energie až v objemu materiálu (na rozdíl od obloukových metod, při kterých hoří oblouk mezi elektrodou a pouze povrchem materiálu). Výsledkem tohoto režimu svařování je velmi úzký svar s hlubokým závarem (vysoký štíhlostní poměr svaru). Pro stabilitu keyhole musí nastat energetická rovnováha, přívod energie tedy musí být v rovnováze s odvodem do svařovaného materiálu (pro daný materiál se jí dosáhne správnou volbou svařovacích parametrů). Zároveň musí nastat rovnováha tlaková. Tlak povrchového napětí na rozhraní taveniny a par kovu se snaží keyhole uzavřít. Proti tomu působí tlak par odpařovaných kovů. Část záření se také může absorbovat v parách kovu za vzniku plazmatu. Tento jev je z hlediska stability procesu nežádoucí (v případě vzniku hustého plazmatu dochází ke kolapsu keyhole), u dnešních moderních laserů je již ale eliminován. U starších typů jako je např. CO₂ laser existují určité funkce pro odstraňování nebo alespoň ředění vznikajícího plazmatu.



Obr. 28 Penetrační režim [46].

Důležitým faktorem při svařování laserem je velikost tepla vneseného do svařovaného materiálu (tepelný příkon). Tuto hodnotu lze orientačně snadno spočítat dle přiloženého vzorce:

$$Q_{sLAS} = k \cdot \frac{P_{las}}{v_s}, \quad (3.1)$$

kde: Q_{sLAS} – tepelný příkon laserového zdroje [$J \cdot mm^{-1}$]

P_{las} – výkon laseru [W]

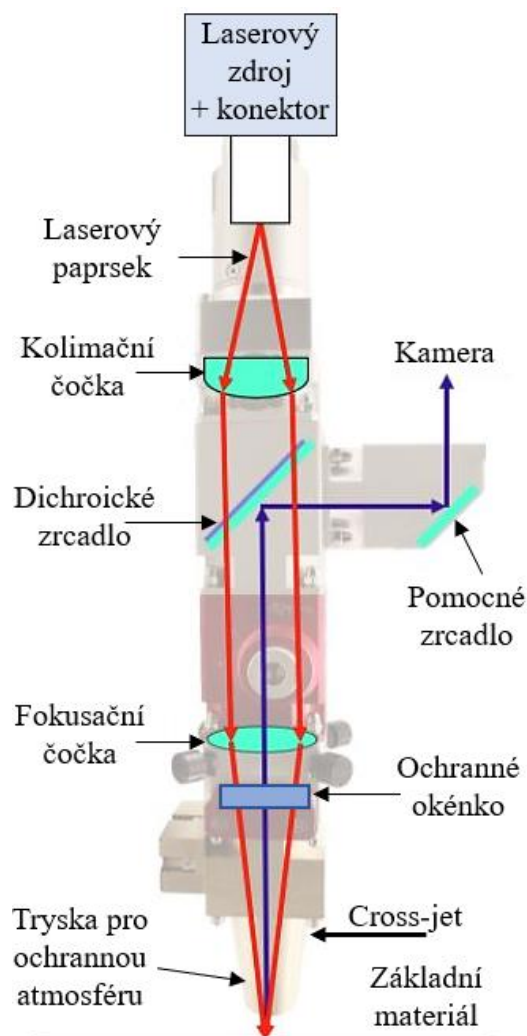
v_s – rychlost svařování [$mm \cdot s^{-1}$]

k – koeficient tepelné účinnosti procesu [-]; (pro plnou penetraci $k = 0,65$; pro částečnou penetraci $k = 0,80$)

Vlivem vysoké intenzity záření laserového paprsku a vysoké rychlosti svařování bývá vnesené teplo do svařovaného materiálu řádově menší než u konvenčních obloukových technologií. Tato skutečnost je pro kvalitu svaru velmi příznivá, jelikož nedochází k takovým deformacím a zbytkovým napětím ve svařenci. Na druhou stranu je výsledný svár velice štíhlý a malý, tudíž chladne velmi rychle a je zde značné riziko vzniku křehkých fází.

Na proces svařování laserem jsou kladeny poměrně přísné požadavky. Paprsek by měl být veden ideálně kolmo na povrch materiálu ($\pm 15^\circ$ odchylka). Dále je nutné dodržet konstantní odstup (konstantní ohniskovou vzdálenost) a rychlost svařování. V neposlední řadě je velmi důležité správně chránit optické zařízení laseru před dynamickými účinky svarové lázně. Aby mohlo být těchto požadavků dosaženo, musí být laserové svařování vedeno zpravidla strojově (například robotem). Základem průmyslového pracoviště se svařovacím laserem je tedy laserový zdroj spojený s vhodnou svařovací hlavou, která může být připevněna například na víceosém průmyslovém robotu. Pohyb hlavy však může být zajištěn kartézským polohovacím systémem, nebo lze vytvořit jednoúčelové zařízení, které je uzpůsobeno přímo dané aplikaci.

Již zmiňovaná svařovací hlava (obr. 29) je pro laserové aplikace velmi důležitým prvkem. Konektor hlavu spojuje s laserovým zdrojem, ze kterého vychází rozbíhavý laserový paprsek. Ten je nejprve pomocí kolimační čočky zrovnoběžněn a poté fokusační čočkou zaostřen do nastavitelného ohniska. Dichroické zrcadlo propouští laserový paprsek a zároveň na principu periskopu umožňuje náhled kamerou do místa svařování. Díky tomu lze například zajistit přesné polohování laserového paprsku. Cross-jet (plynový nůž) působí kolmo na osu hlavy a stejně jako ochranné okénko chrání zařízení před rozstříkáním a kondenzací par kovu. Do místa svaru je přiváděna také ochranná atmosféra (nejčastěji se jedná o inertní plyn na bázi argonu nebo helia), která zabraňuje oxidaci svaru a částečně i chrání optickou soustavu.



Obr. 29 Schéma svařovací hlavy [48].

Touto technologií lze zhotovovat svary natupo stejných i rozdílných tloušťek. Další možností je zhotovení koutových, lemových či průvarových svarů, jimiž je možné svařit několik přeplátovaných plechů najednou (lze vytvořit i tzv. T spoj). Jelikož svařování probíhá v základní podobě bez přídavných materiálů, je pro výslednou kvalitu zásadní příprava a upnutí jednotlivých dílců. Ty musí být k sobě co nejvíce přitlačeny (pomocí vhodných přípravků), jinak by mohlo dojít k vadám svaru kvůli nedostatku nataveného materiálu. Svařované dílce mohou být ze stejného materiálu (homogenní spoj) i z materiálů různých (heterogenní spoj), musí být ovšem posouzena jejich vhodnost ke svaření (teplota tání kovů, mísitelnost materiálů, mechanické vlastnosti výsledné slitiny apod.). Lze svařovat materiály s velkou tepelnou vodivostí (měď nebo hliník) i s vysokou teplotou tavení (wolfram, molybden, zirkon nebo titan). Výborně se také svařují vysokolegované oceli nebo nikl. Uhlíkové oceli s obsahem uhlíku vyšším než 0,2 hm. % se vlivem značné ochlazovací rychlosti svaru svařovat nedoporučují.

Svařování laserem má i další nevýhody, se kterými se musí počítat. Při pořizování laserového zařízení musí být brány v úvahu vysoké náklady na nákup zařízení. Zároveň je nutné zabezpečení laserového pracoviště speciálními bezpečnostními prvky, aby nedošlo k poranění obsluhy například při odrazu laserového záření.

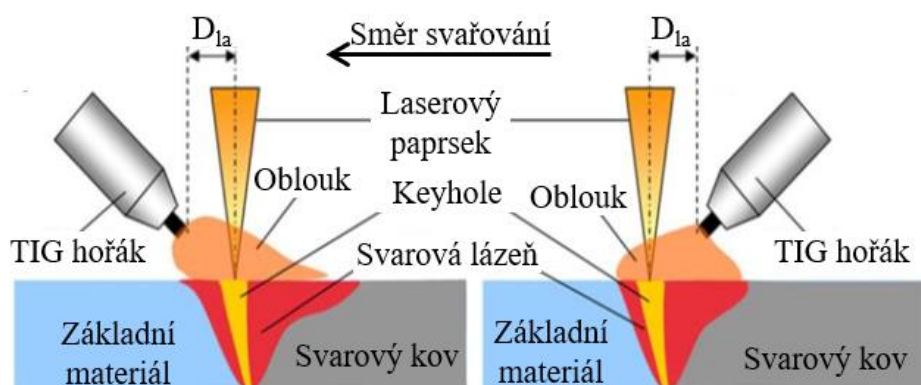
3.4 Hybridní technologie Laser-TIG [29], [44], [49], [50], [51]

Hybridní technologie svařování charakterizuje proces, při kterém dochází ke spojení účinků dvou svařovacích metod do jedné svarové lázně. V průmyslových aplikacích je nejčastěji k vidění hybridní technologie Laser-MIG/MAG. V tomto případě jde však o kombinaci laserového svařování s obloukovou metodou TIG. Tato technologie je poměrně nová, postupně se vyvíjí a odhalují se její hlavní přednosti. Značí se jako metoda Laser-TIG, ovšem v literatuře je možné se setkat i se zkratkami LATIG či LAGTAW.

Hlavním cílem hybridních technologií je kombinovat žádoucí účinky dvou odlišných svařovacích technologií s cílem vytvořit co nejefektivněji a nejkvalitněji svarový spoj. Primárním zdrojem tepla při LATIG technologii je laser, elektrický oblouk hořící mezi svařovaným materiálem a netavící se wolframovou elektrodou slouží pouze jako pomocný (sekundární) zdroj tepla. Teplo z elektrického oblouku je možné využít pro předehřev či dohřev materiálu, což vede ke snížení rychlosti ochlazování laserového spoje a tím ke snížení pravděpodobnosti vzniku křehkých fází. Oblouk zároveň prodlužuje dobu tekutosti svarové lázně, čímž potlačuje tvorbu některých svarových vad (usnadňuje difúzi vodíku, tudíž se snižuje riziko vzniku pórů).

Elektrický oblouk při svařování LATIG hoří stabilně i při malých hodnotách svařovacího proudu a vysokých svařovacích rychlostech, které jsou dány použitím laseru. Při svařování totiž dochází ke vzájemnému působení laseru a elektrického oblouku, který se upoutá k laserovému svazku. Páry kovu vznikající vlivem působení laseru snižují potřebnou ionizační energii, čímž dochází k poklesu napětí na oblouku a jeho stabilizaci. Oblouk zároveň příznivě ovlivňuje absorpci laserového záření uvnitř vznikající keyhole.

Při technologii LATIG se uspořádání liší dle metody, která je v čele v daném směru svařování. Pokud je první v daném směru elektrický oblouk, jedná se o metodu s řídicí obloukovou technologií TIG (obr. 30, vlevo). Nejprve tedy dojde k nahřátí základního materiálu obloukem a paprsek laseru poté svařuje již předehřátý materiál. Jakmile materiál interaguje nejprve s laserovým paprskem, je řídicí technologií laser. V tomto případě slouží elektrický oblouk jako dohřev již svařeného materiálu (obr. 30, vpravo).



Obr. 30 Způsoby svařování LATIG dle uspořádání [51].

Při kombinaci metod laserového svařování a TIG ovlivňuje proces poměrně velké množství svařovacích parametrů. Pro metodu TIG jsou zásadní svařovací proud I a svařovací napětí U . Dále záleží na způsobu zapojení (polaritě) a typu použitého elektrického proudu (blíže popsáno v podkapitole 2.2 a 2.3). Z laserových parametrů ovlivňuje svařovací proces hlavně zvolený výkon laseru a jeho režim. Dále je důležitá pozice ohniska paprsku (volí se na povrchu nebo mírně pod povrchem materiálu), parametr BPP nebo typ módu paprsku (vysvětleno v podkapitole 3.1).

Mezi společné charakteristiky této hybridní technologie patří vzdálenost D_{1a} , která je vyznačena na obrázku 30. Ta říká, jaká je vzdálenost mezi TIG wolframovou elektrodou a laserovým paprskem. Dále může být nastavena vzdálenost elektrody od základního materiálu nebo úhel, který svírá hořák a výstupní paprsek. Svařovací rychlost je pro obě technologie společná (laserová hlava i TIG hořák jsou připevněny k jednomu polohovacímu zařízení) a velmi ovlivňuje výsledné vnesené teplo do svaru. Celkový tepelný příkon (teplo vnesené do svaru) technologie LATIG je dán součtem příkonů dílčích metod a lze jej teoreticky určit dle tohoto vzorce:

$$Q_{sC} = Q_{sLAS} + Q_{sTIG}, \quad (3.2)$$

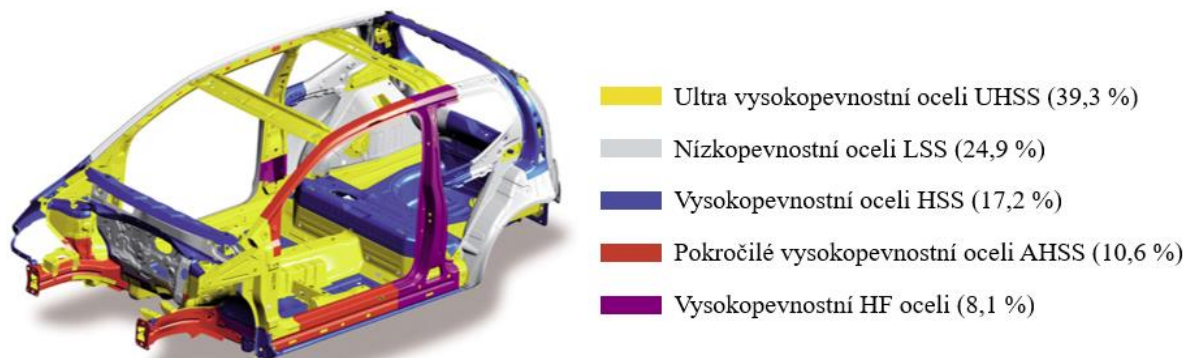
kde: Q_{sC} – Celkový tepelný příkon technologie Laser-TIG [$J \cdot mm^{-1}$]

Q_{sLAS} – tepelný příkon laserového zdroje [$J \cdot mm^{-1}$]; (viz vzorec 3.1)

Q_{sTIG} – tepelný příkon technologie TIG [$J \cdot mm^{-1}$]; (viz vzorec 2.1)

4 SVAŘOVANÝ MATERIÁL [52], [53], [54], [55], [56]

Karoserie automobilu je svařována z mnoha druhů ocelových plechů. Každý z nich disponuje specifickými vlastnostmi, které úzce souvisí s typem použité oceli. V konstrukci svařované karoserie mají velké zastoupení nízkouhlíkové vysokopevnostní oceli (HSS, high strength steels). Tyto materiály jsou vhodné pro výrobu například panelových dílů (bočních dveří, 5. dveří a kapoty), ale i některých konstrukčních, výztužných dílů karoserie (obr. 31).



Obr. 31 Využití HSS ocelí u modelu Volkswagen UP, 2012 [56].

Podskupinou HSS materiálů jsou oceli typu HSLA (high strength low alloy steels). Jedná se o vysoce pevné mikrolegované oceli, které jsou zpracovávány řízeným válcováním za studena nebo za tepla. Základ tvoří C-Mn oceli (obsah Mn od 2 %), které obsahují ve struktuře jeden nebo více legujících prvků (niob, titan nebo vanad, ale i chrom, nikl nebo molybden). Tyto mikrolegující prvky (obsah legujícího prvku od 0,01 do 0,15 %) vytváří nitridy, karbidy a karbonitridy, které přispívají ke zjemnění zrna a zpevnění matrice ve struktuře materiálu. Jemné zrna a nízký obsah uhlíku (od 0,05 do 0,5 % C) výrazně podporují jejich tvařitelnost a svařitelnost. Vlivem mikrolegur a speciálního technologického zpracování HSLA ocelí je zajištěna vysoká mez kluzu, která dosahuje hodnot až 600 MPa, a značná tažnost v rozsahu od 15 do 35 %. Jsou charakteristické vysokou plasticitou, vyšší odolností proti atmosférické korozi a zároveň je jejich cena vlivem nízkého obsahu legur velmi příznivá.

Při výrobě automobilu je kladen velký důraz na protikorozní odolnost, například firma Škoda Auto a.s. poskytuje na nové vozy 12letou záruku na prokorodování svařované karoserie. Pro napodobení nepříznivých provozních podmínek vozu slouží tzv. korozní PK5 test, který v případě Škoda Auto probíhá v Arizoně. Během půl roku trvání testu dojde ke zrychlené simulaci 12 let provozu automobilu. Poté se vyhodnocují jednotlivé části vozu z hlediska náchylnosti ke vzniku koroze a firma tak může na kritické vady reagovat technologickými či konstrukčními úpravami.

Stěžejní prvek ochrany proti atmosférické korozi tvoří zinkový povlak. Zinek má sice nižší korozní odolnost než oceli, ovšem vznikající oxidy zinku jsou stabilní, neodlupují se, a tudíž nedochází ani k porušení ocelového materiálu. Existuje několik způsobů, jak ocelové plechy pozinkovat. Pro dlouhodobou protikorozní ochranu se používá žárového zinkování. Součástí se v tomto případě očistí od mastnoty a nečistot a noří se do zinkové lázně. Na povrchu se následně tvoří povlak s různým podílem slitinových fází zinek-železo a vnější povrchovou vrstvou čistého zinku. Pro zinkování ocelových pásů se velmi často využívá kontinuálního žárového zinkování. Při elektrolytickém (galvanickém) zinkování dochází k nanesení vrstvy Zn ve vodném roztoku zinečnaté soli (elektrolytu). Součástí se do něj vnoří, zapojí se jako katoda ke zdroji stejnosměrného proudu a deska čistého zinku jako anoda. Průchodem proudu se rozpouští zinek z anody a ve formě iontů putuje ke katodě, kde se vyloučí na povrchu součásti a postupně se tvoří povlak.

4.1 Vady svarových spojů [17], [52], [57], [58], [59], [60]

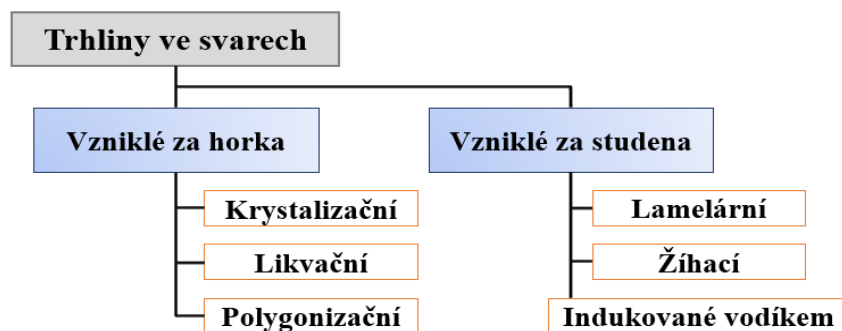
S vadami svarových spojů se musí počítat při všech svářecích procesech. Jedná se o nebezpečné koncentrátoři napětí. Obecně mají nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti svaru, tudíž i jeho spolehlivost. Ovlivňují například mez únavy a mohou vést k iniciaci křehkého lomu. Podle daných předpisů lze vady svarových spojů dělit na přípustné a nepřípustné, či na opravitelné nebo neopravitelné. Schválen může být pouze takový svar, který při stanoveném provozním zatížení neohrozí bezpečnost svařovaného výrobku.

Vady svarů, ke kterým dochází při hybridním laserovém svařování jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 12932. Tato norma vychází ze základního systému normy ČSN EN ISO 6520-1, která je zaměřena na svařování tavné. Dle normy ČSN EN ISO 12932 jsou svary děleny podle tří stupňů kvality, které se označují písmeny B, C a D. Každý typ svarové vady je dle určeného stupně kvality posuzován, zda je přípustný, či nikoli. Pokud je přípustný, jsou přesně specifikovány mezní hodnoty dané vady. Zároveň norma třídí poruchy svarů do čtyř kategorií (označují se skupinovým číslem) podle místa vzniku:

- Povrchové vady (1) – trhliny, povrchové póry, studený spoj, neprovařený kořen, zápaly, nadměrné převýšení, přetečení, rozstřík apod.,
- vnitřní vady (2) – různé typy vnitřních trhlin a pórů, staženiny, vměstky, studené spoje, neprůvody apod.,
- vady v geometrii spoje (3) – úhlová a lineární přesazení nebo špatné sestavení svarů,
- vícenásobné vady (4) – jedná se o kombinace vad z předešlých kategorií.

Každá kategorie obsahuje pro ni typické vady, které se dle ČSN EN ISO 6520-1 označují referenčním číslem. Dále je možné dělení vad dle rozměru na bodové, plošné a objemové nebo dle původu vzniku na metalurgické a vznikající při svařovacím procesu.

Nejnebezpečnější jsou pro výsledný svar trhliny, jelikož zeslabují jeho průřez a zároveň působí jako vruby. Navíc se při cyklickém namáhání mohou šířit a vyvolat únavový lom. Z hlediska kvality je jejich přítomnost ve svaru zcela nepřijatelná a při jejich výskytu musí dojít k opravě nebo k vyřazení svaru jakožto nevyhovujícího kusu. Trhliny se dělí podle okamžiku svého vzniku (obr. 32).



Obr. 32 Typy trhlin ve svarových spojích [59].

Horké trhliny vznikají při teplotách nad 800 °C a úzce souvisí s metalurgickou čistotou základního materiálu. Pravděpodobnost jejich iniciace roste se zvyšujícím se obsahem určitých prvků (například fosforu nebo síry). Vznik těchto trhlin je také ovlivněn metodou a rychlostí svařování. Obecnou prevencí před trhlínami vznikajícími za horka může být snížení vneseného tepla do svaru nebo použitím přídavných materiálů o vysoké čistotě.

Krystalizační trhliny (obr. 33) se tvoří ve svarovém kovu nebo v částečně natavené oblasti během tuhnutí svarové lázně. Nejčastější metalurgickou příčinou iniciace krystalizačních trhlin je přítomnost nečistot ve svaru, zejména síry. Vlivem síry dochází v poslední fázi tuhnutí k tvorbě nízkotavitelných sulfidů, což vede k poklesu kohezní pevnosti krystalů. Tyto trhliny bývají poměrně rozevřené a tvarově složité.

Vyskytují se zpravidla ve středu svarové housenky (v místě ukončení tuhnutí svaru) a mohou vystupovat i na povrch. Především jim lze snížením obsahu fosforu a síry ve svaru nebo zvýšením obsahu obsahu manganu, který dokáže síru vázat do eutektika s vyšší teplotou tavení.

Likvační trhliny se tvoří ve vysoce přehřátém podhousenkovém pásmu tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu, ale i v základním materiálu například při více vrstevném svařování, vlivem vyloučení intermetalických fází na hranici zrn. Vytváří se tak křehké oblasti, ve kterých dochází při zatížení k lomu. Plygonizační neboli trhliny vzniklé z poklesu tažnosti mohou vznikat v tepelně ovlivněné oblasti nebo i ve svarovém kovu. Objevují se výhradně při svařování austenitických ocelí a slitin niklu.



Obr. 33 Krystalizační trhlina [60].

Ze studených trhlín jsou nejčastější a nejnebezpečnější trhliny indukované vodíkem. Ty vznikají při teplotách pod 150 °C během ochlazování svaru, ale může k němu dojít i po několika hodinách, dokonce dnech od zhotovení svarového spoje. Hlavní příčinou jejich iniciace je působení vodíku ve svarovém spoji, zůstatek vysokých vnitřních napětí a přítomnost tvrdých fází a křehkých struktur (martenzit). Bývají časté u ocelí s vyšší pevností a u vícevrstevných svarů s větší tloušťkou základního materiálu. Nejčastěji se vyskytují v podhousenkové oblasti, ale v menší míře je lze nalézt prakticky v libovolném místě svaru. Mohou být podélné i příčné přes všechny oblasti svarového spoje (jsou transkrystalické). Narozdíl od horkých je povrch studených trhlín lesklý a nezoxidovaný. K zamezení vzniku trhlín indukovaných vodíkem je třeba minimalizovat obsah vodíku v procesu svařování. Při hybridním svařování Laser-TIG je to zajištěno pomocí předehřevu nebo dohřevu pomocí metody TIG, čímž je umožněna difúze vodíku ze svarového kovu a zároveň je snížena zbytková napjatost.

Velmi běžnou vadou, která se vyskytuje při laserovém svařování, je pórovitost. Ta je v případě svařování pozinkovaných materiálů ještě umocněna, jelikož část par odpařovaného zinku vstupuje během svařovacího procesu do taveniny (zinek disponuje velmi nízkou teplotou vypařování, která se v závislosti na jeho čistotě pohybuje mírně nad 900 °C). Póry se tvoří v případě, že nedojde k odplynění svarové lázně před jejím ztuhnutím. Pokud materiál obsahuje po svaření větší množství těchto dutin, má sklon k pórovitosti neboli porozitě. Tato vada ale není tak nebezpečná jako trhliny a dle normy jsou většinou v určité míře tolerovány.

Zbylé páry zinku se mísí nad svarovou lázní s inertní ochrannou atmosférou svarového kovu, což ji značně znehodnocuje. Důsledkem toho je nestabilní hoření elektrického oblouku. Současně s tím páry zinku ovlivňují povrchové napětí svarové lázně a dochází k výraznému zvýšení rozstříku roztaveného kovu, který při ulpění na povrchu materiálu zneklitňuje jeho vzhled. Navíc se rozstřík může usazovat v hubici hořáku a tím narušit proudění ochranného plynu. Pro obsluhu svařovacího zařízení je také nebezpečná exhalace zinkových výparů, jelikož při vyšších koncentracích mohou způsobovat zinkovou horečku.

K částečné eliminaci porozity by mohlo dojít v případě využití hybridní technologie LATIG s řídicí obloukovou technologií TIG. V tomto případě působení elektrického oblouku předchází laserovému paprsku, zinek je tedy odpařován ještě před samotným účinkem laseru a množství zinkových výparů, které se uloží do svarové lázně je značně omezeno.

4.2 Zkoušky svarových spojů [17], [61], [62]

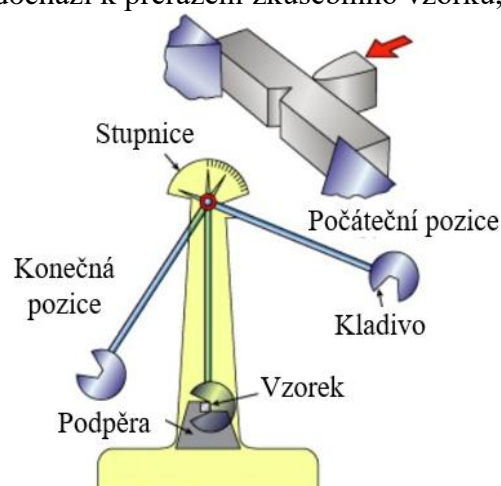
K odhalení závažných vad, které by mohly při svařovacím procesu vzniknout a následně ohrozit bezpečnost, slouží zkoušky svarových spojů. Díky nim lze ověřit, jestli daný svarový spoj vyhovuje předepsaným požadavkům a daný výrobek může být uveden do provozu. Tyto zkoušky lze rozdělit na dvě rozsáhlé skupiny podle toho, zda při jejich provedení dochází k nevratnému poškození svařence. V případě, že je pro zhotovení zkoušek nutné nevratně porušit celistvost výrobku, se hovoří o tzv. destruktivních metodách (DT). Naopak pokud lze test svarového spoje provést bez porušení, jedná se o tzv. nedestruktivní metody (NDT). Každá z těchto dvou kategorií obsahuje velké množství metod pro testování svaru, jejichž náležitosti jsou popsány dle příslušné normy.

4.2.1 Destruktivní metody [17], [61], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70]

Tyto metody jsou zaměřeny zejména na kontrolu pevnostních vlastností, plasticity, houževnatosti, tvrdosti nebo celistvosti svarového spoje. Základní destruktivní metodou pro ověření pevnostních a plastických charakteristik je zkouška tahem. Během této zkoušky dochází k deformaci (natahování) zkušební tyče tahovým zatížením většinou až do jejího přetržení. Jako vzorek se používá normalizovaná tyč kruhového nebo obdélníkového průřezu s hlavou pro uchycení v čelistech trhacího stroje. Během zkoušky je pořízen záznam, tzv. tahový diagram, který zobrazuje závislost zatížení na prodloužení daného vzorku (modernější stroje ji automaticky přepočítávají na závislost napětí na poměrné deformaci). Pomocí této zkoušky se stanovují charakteristické mechanické vlastnosti jako jsou mez pevnosti v tahu R_m (MPa), mez kluzu R_e (MPa), smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (MPa), tažnost A_{80} (%) nebo kontrakce Z (%). Tyto údaje se stanovují při zkoušce tahem vzorků ze základního materiálu, čistého svarového kovu, případně u podélné tahové zkoušky.

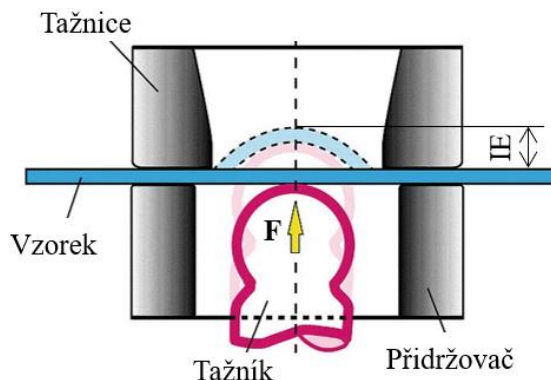
V případě ověření pevnostních a plastických vlastností napříč svarovým kovem se garantuje pouze mez pevnosti R_m , zbylé údaje slouží pouze jako informativní. Pevnost v tahu R_m charakterizuje napětí, které odpovídá největšímu zatížení vzorku při tahové zkoušce. Hodnotí se také místo tvorby lomu případně další vady (mimo jiné vznik tzv. „rybího oka“). Specifické požadavky pro příčnou zkoušku tahem jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 4136, která přesně stanovuje přípravu zkušební vzorku, postup a vyhodnocení testu. Vzorky se odebírají ze svařence tak, aby osa svarového kovu byla zároveň ve středu délky zkušební tyče. Základní metodika je pro příčnou tahovou zkoušku svarů stejná jako pro výchozí zkoušku tahem kovových materiálů, která je popsána v normě ČSN EN ISO 6892-1.

Dalšími často využívanými metodami pro testování plasticity svarového spoje jsou zkoušky rázem v ohybu a lámavosti. U první uvedené dochází k přerážení zkušební vzorku, který je opatřen vrubem, jedním nárazem Charpyho kyvadlového kladiva (obr. 34). Následně lze snadno určit energii, která byla potřebná pro přerážení vzorku. Výstupem ze zkoušky rázem v ohybu je mimo jiné hodnota vrubové houževnatosti, které slouží jako ukazatel chování svaru při rázovém zatěžování. Podrobněji je popsána v normě ČSN EN ISO 148-1. Zkouška lámavosti, také označovaná jako zkouška ohybem, je další z metod pro posouzení plasticity. Zkušební tyč je ohýbána pomocí trnu nebo kladky až do dosažení předepsaného úhlu ohybu nebo do objevení trhliny, která je delší než 3 mm. Nejčastěji se využívá varianta tříbodového ohybu.



Obr. 34 Charpyho kladivo [65].

Pro posouzení vhodnosti plechového přístřihu pro určitou tvářecí operaci slouží mimo jiné napodobovací zkouška hloubením dle Erichsena. Jedná se o základní metodu testování hlubokotažnosti tenkých plechů. Při této zkoušce je plechový vzorek kruhového nebo čtvercového tvaru upnut mezi přidržovač a tažnici. Tažník, který má kulové zakončení, se kontinuálně posouvá rychlostí od 5 do 20 mm/min do středu zkušební vzorku a dochází tak k jeho prohloubení (obr. 35). Kritériem tvařitelnosti je u testu dle Erichsena velikost dosaženého prohloubení IE (mm) v momentě vzniku průchozí praskliny v prohloubení. V tomto okamžiku dochází také k prudkému poklesu síly, která je nutná pro další prohlubování. Výsledek zkoušky je také velmi závislý na typu použitého plastického maziva, kterým jsou vzorky před testem potřeny.



Obr. 35 Erichsenova zkouška [69].

Tato zkouška je v praxi velmi běžná pro svoji jednoduchost, rychlost a nenáročnost na přípravu zkušebních vzorků. Na druhou stranu ale nepodává žádné informace o anizotropii mechanických vlastností zkoušeného plechu. Dále disponuje značným rozptylem výsledků v rámci zkoušení jedné jakosti plechů. Erichsenova zkouška je charakterizována zejména tahovým namáháním, tudíž je směrodatná zejména pro výtažky tahově zatěžované. Odběr a tvar vzorků nebo průběh a vyhodnocení zkoušky jsou přesně stanoveny v normě ČSN EN ISO 20482. Z té vychází norma ČSN EN 10359 zabývající se správným vyhodnocením Erichsenovy zkoušky pro laserem svařované tailored blanks a jejich nejběžnějšími vadami. Dle této normy není svar vyhovující, pokud se trhlinka vytvoří pouze ve svarovém spoji. Mezi další napodobovací zkoušky pro zjištění tvařitelnosti plechů patří například zkouška kalíškovací, zkouška rozšiřováním otvoru dle Siebla a Pompa, či Fukuiho zkouška tažením v kuželové tažnici.

Mezi další základní destruktivní zkoušky svarového spoje patří zkoušky tvrdosti. Tvrdost je mechanická vlastnost, která je popsána jako odpor materiálu proti statickému či dynamickému vnikání indentoru do povrchu zkoušeného materiálu. Nejvíce používanými statickými zkouškami jsou zkouška tvrdosti podle Brinella, Vickerse a Rockwella. U dynamických zkoušek je nejčastěji používáno Poldi kladívko nebo Shoreho skleroskop. Zkoušení tvrdosti svarových spojů je popsáno v normách ČSN EN ISO 9015-1 a 9015-2.

Obvyklým doplňkem předchozích destruktivních zkoušek svarů, které byly zaměřeny na jejich mechanické vlastnosti, jsou metalografické kontroly jakosti. Ty slouží k ověření stavu makro a mikrostruktury svarového kovu, tepelně ovlivněné oblasti i základního svařovaného materiálu. Vzorky jsou pro obě pozorování odebrány příčným řezem k ose svaru, který zahrnuje svarový kov, TOO i základní materiál. Po nařezání, které nesmí tepelně ovlivnit materiál, následuje zalití vzorku do pryskyřice, broušení a leštění. Vzorek může být pro obě zkoušky buď v naleptaném, nebo nenaleptaném stavu. I při metalografické kontrole svaru je nutné dodržovat předepsanou normu, v tomto případě ČSN EN ISO 17639.

Účelem makroskopické kontroly je zkoumání jakosti svaru. Pozorování probíhá prostým okem nebo při malém zvětšení (menší než 50x). Tímto způsobem lze zhodnotit kvalitu svarového spoje a odhalit případné vady jako jsou trhliny, póry, vměstky, studené spoje, zápaly apod. Mikroskopická kontrola se provádí při zvětšení větším než 50x prostřednictvím optického (zvětšení max. 1000x), laserového (řádově 10^4 x) nebo elektronového mikroskopu (řádově 10^5 x). Při této zkoušce lze pozorovat jednotlivá zrna materiálu, hranice zrn, hodnotit kvalitativně i kvantitativně strukturní složky svarového kovu i tepelně ovlivněné oblasti.

4.2.2 Nedestruktivní metody [62], [71], [72], [73]

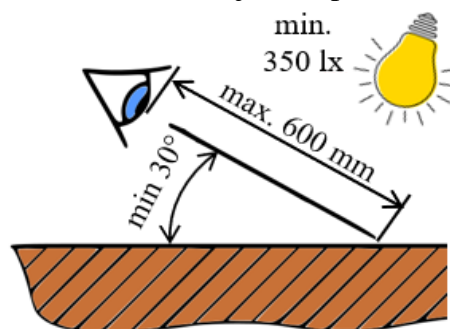
Nedestruktivní metody jsou nezastupitelnou skupinou při kontrolách jakosti ve všech etapách výroby nebo finální provozní spolehlivosti. Pomáhají k dosažení žádané kvality výrobku, jeho funkčnosti a bezpečnosti. Na rozdíl od metod destruktivních nedochází v tomto případě k porušení celistvosti daného výrobku. Obecná pravidla týkající se nedestruktivních kontrol svaru jsou uvedeny v normě ČSN EN 17365. Výběr základních nedestruktivních metod využívaných při hodnocení svarových spojů je zobrazen v tabulce 2, dále jsou zde uvedeny normy pro jednotlivé zkoušky, které definují jejich správné provedení a zhodnocení.

Tab. 2 Základní nedestruktivní metody svarových spojů [71].

Zkušební metody	Zkratka	Citovaná norma
Vířivými proudy	ET	ČSN EN ISO 17643
Magnetickým práškem	MT	ČSN EN ISO 17638
Kapilární	PT	ČSN EN ISO 3452-1
Radiografická	RT	ČSN EN ISO 17636
Ultrazvuková	UT	ČSN EN ISO 17604 a ČSN EN ISO 10863
Vizuální	VT	ČSN EN ISO 17637

Nejjednodušší, nejdostupnější a nejlevnější nedestruktivní kontrolou svaru je vizuální zkouška. Prohlídkou prostým zrakem nebo pod lupou je možné snadno zjistit povrchové defekty, případně se ověřuje splnění podmínek pro další NDT kontrolu. V případě prohlídky prostým zrakem nebo pod lupou se jedná o vizuální kontrolu přímou, kdy není přerušena optická dráha mezi okem hodnotitele a pozorovaným povrchem. Pokud je při zkoušce využito speciálních optických přístrojů (endoskopů) je vizuální kontrola označována jako nepřímá.

Předpoklady pro správné vyhodnocení této zkoušky jsou kvalitně očištěný povrch svaru (například od strusky, rozstříku apod.), dobré osvětlení hodnoceného místa, přístupnost povrchu svaru a dobrý zrak zkoušejícího. Zkouška musí být provedena kvalifikovaným a způsobilým personálem, který je pro ni dostatečně proškolen. Vzdálenost očí od kontrolovaného povrchu by měla být do 600 mm a pozorování by mělo být provedeno pod úhlem ne menším než 30° (obr. 36). Pokud nelze tyto podmínky zajistit, je nutné použít nepřímé vizuální kontroly.



Obr. 36 Vizuální kontrola [71].

Mezi další NDT metody pro zjišťování povrchových vad patří zkouška penetrační a magnetická prášková. Penetrační (kapilární) kontrola s velkou citlivostí odhaluje otevřené povrchové vady pomocí vnikání detekční tekutiny do těchto vad. Je tedy založena na vztlínivosti určitých typů kapalin. Zkouška magnetická prášková dokáže indikovat nejen povrchové, ale i těsně podpovrchové vady. Vychází z principu zviditelnění magnetických siločar vystupujících na povrch feromagnetických materiálů.

Druhá skupina NDT zkoušek slouží k odhalení vnitřních vad. Ultrazvuková zkouška pracuje s odrazy mechanického vlnění na rozhraní dvou prostředí. Vada se z pohledu šíření ultrazvuku projevuje jako akustické rozhraní. Po dopadu vlny na toto rozhraní se část vlnění odráží. Odražený signál lze zachytit a tím indikovat závadu. Radiografická (RT) zkouška využívá rentgenového záření, které při průchodu zkoušeným materiálem ztrácí intenzitu v závislosti na tloušťce a hustotě materiálu. Vady materiálu zeslabují tloušťku stěny a na kazetě s filmem, která je umístěna za vzorek, se projevují jako zčernání.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST [74]

Experimentální část je zaměřena na zhodnocení plasticity a kvality svarových spojů, které byly zhotoveny různými procesními parametry charakterizující technologii svařování LATIG. Cílem studie je zhodnotit vliv metody TIG, která v tomto případě působí jako sekundární zdroj tepla, na svařovací proces pozinkovaných plechů z ocelí typu HSLA a na jejich následné chování při operaci hlubokého tažení. Výzkum je zaměřen na svařování tenkých plechových polotovarů, které jsou odlišných materiálů i tloušťek, což je charakteristický znak polotovarů TWB. Část tohoto experimentu byla řešena ve spolupráci s firmou EBZ Hoffmann s. r. o. Jedná se o společnost z Ostrožské Nové Vsi, která se specializuje například na výrobu karosářských dílů až o velikosti celé postranice karoserie nebo na vývoj, konstrukci i výrobu lisovacích nástrojů (prototypy i malosérie) pro automobilový průmysl.

5.1 Materiálový rozbor [75], [76], [77], [78]

Pro samotný experiment byly firmou EBZ Hoffmann dodány plechy základního svařovaného materiálu pro následné praktické zpracování. Jednalo se o dvě odlišné mikrolegované oceli typu HSLA s označením CR210LA-GI40/40 o tloušťkách 0,7 a 1,2 mm a CR240LA-GI50/50-U o tloušťkách 0,8 a 1,25 mm. Toto označení vychází z německé normy VDA 239-100, která specifikuje chemické složení, mechanické vlastnosti i povrchovou úpravu těchto materiálů. Písmena CR definují zpracování plechů válcováním za studena (z anglického výrazu Cold Rolled). Následující trojčíslí označuje minimální smluvní mez kluzu pro daný ocelový plech (například ocel CR210LA má tedy $R_{p0,2} = \text{min. } 210 \text{ MPa}$). Závěrečná zkratka LA značí mikrolegovaný ocelový materiál. Normované chemické složení a zaručené mechanické vlastnosti těchto ocelí jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3 Chemické složení a mechanické vlastnosti svařovaných ocelí [75].

Chemické složení dle normy VDA 239-100		% C max.	% Si max.	% Mn max.	% P max.	% S max.	% Al min.	% Nb max.	% Ti max.	% Cu max.
CR210LA-GI40/40		0,10	0,50	1,00	0,080	0,030	0,015	0,10	0,15	0,20
CR240LA-GI50/50-U		0,10	0,50	1,00	0,030	0,025	0,015	0,09	0,15	0,20
Chemické složení Změřené	Tloušťka plechu	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Al	% Nb	% Ti	% Cu
CR210LA-GI40/40	0,7	0,001	0,00	0,44	0,035	0,003	0,05	0,00	0,00	0,02
	1,2	0,002	0,11	0,42	0,050	0,004	0,024	0,00	0,04	0,01
CR240LA-GI50/50-U	0,8	0,04	0,00	0,31	0,010	0,002	0,047	0,00	0,00	0,01
	1,25	0,01	0,00	0,34	0,011	0,00	0,034	0,00	0,00	0,02
Mechanické vlastnosti dle normy VDA 239-100		$R_{p0,2}$ [MPa]			R_m [MPa]		min. A_{80} [%]			
CR210LA-GI40/40		210–300			310–410		29			
CR240LA-GI50/50-U		240–320			320–420		27			
Mechanické vlastnosti Změřené	Tloušťka plechu	$R_{p0,2}$ [MPa]			R_m [MPa]		A_{80} [%]			
CR210LA-GI40/40	0,7	258			370		37			
	1,2	252			394		34			
CR240LA-GI50/50-U	0,8	297			404		30			
	1,25	304			413		30			

Z hlediska chemického složení splňují obě oceli teoretické předpoklady pro začlenění do skupiny mikrolegovaných HSLA materiálů. Zároveň se od sebe chemickým složením téměř neliší, pouze u oceli CR240LA je kladen větší důraz na minimalizaci nežádoucích prvků jako je fosfor nebo síra. Skutečné chemické složení zadaných materiálů bylo změřeno na zkušební stroji Spectrumat GDS 750 (protokoly jsou uvedeny v příloze 7). Mechanické vlastnosti vycházející z normy jsou pouze orientační. Skutečné mechanické vlastnosti daných plechových polotovarů byly určeny ze zkoušky tahem (viz. podkapitola 5.3). Chemické složení a mechanické vlastnosti byly určeny těmito způsoby, jelikož pro tuto práci nebyly poskytnuty materiálové listy, ze kterých by bylo možné tyto informace čerpat.

Druhá část označení materiálů, která opět vychází z normy VDA 239-100 charakterizuje jejich povrchovou úpravu. Zkratka GI označuje technologii žárového povlakování zinkem, který je aplikován během kontinuálního procesu, při kterém dochází k průchodu pásu plechu lázní roztaveného zinku s minimální čistotou 99 %. Číselné hodnoty uvedené za zkratkou GI definují parametry zinkového povlaku (tab. 4). Písmeno U na konci označení materiálu CR240LA-GI50/50-U říká, že daný polotovar je vhodný pouze pro tvorbu interiérových dílců (povrch plechu není vystaven vnějším povětrnostním vlivům). Vhodným ekvivalentem by pro ocel CR240LA-GI50/50-U mohl být materiál HX260LAD+Z100 dle ČSN EN 10346 a pro ocel CR210LA-GI40/40 materiál HX220BD+Z100.

Tab. 4 Vlastnosti zinkového žárového povlaku ocelí [76], [77].

Zinkové žárové povlakování dle normy VDA 239-100	Hmotnost Zn povlaku na 1 straně plechu [g/m ²]	Typický rozsah tloušťek Zn povlaku [μm]	Označení ekvivalentu dle ČSN EN 10346	Hustota Zn povlaku [g/cm ³]
CR210LA-GI40/40	40–60	5,6–8,5	Z100	7,1
CR240LA-GI50/50-U	50–70	7,0–9,9	Z100	7,1

Při posuzování vhodnosti uvedených materiálů ke svařování se nejprve vychází z normy ČSN EN 1011-2, která uvádí výpočet uhlíkového ekvivalentu pro základní posouzení svařitelnosti mimo jiné i mikrolegovaných ocelí. Nejčastěji se uvádí vzorec podle IIW:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\%], \quad (5.1)$$

kde: C_E – uhlíkový ekvivalent [%]

C, Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu – hmotnostní obsah daného prvku [%]

$$\text{Příklad: } C_E = 0,10 + \frac{1,00}{6} + \frac{0 + 0 + 0}{5} + \frac{0 + 0,20}{15} = 0,28 \%$$

Uvedený příklad výpočtu hodnoty C_E je shodný pro ocel CR210LA i CR240LA. Obecně platí, že oceli s hodnotou $C_E < 0,35 \%$ jsou zaručeně svařitelné v běžně používaných tloušťkách. Pro ověření náchylnosti oceli ke studenému praskání, a tedy i nutnosti přehřevu základního materiálu slouží vztah pro výpočet uhlíkového ekvivalentu CET:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\%], \quad (5.2)$$

kde: CET – uhlíkový ekvivalent náchylnosti k praskání za studena [%]

C, Mn, Cr, Mo, Ni, Cu – hmotnostní obsah daného prvku [%]

$$\text{Příklad: } CET = 0,10 + \frac{1,00 + 0}{10} + \frac{0 + 0,20}{20} + \frac{0}{40} = 0,21 \%$$

Uvedený příklad výpočtu hodnoty CET je opět shodný pro oba zkoumané ocelové materiály. Z vypočtené hodnoty (dle uvedené normy) vyplývá, že dané materiály nejsou náchylné ke studenému praskání po svaření. Z normy ČSN EN 1011-2 v závislosti na vypočtené hodnotě CET také plyne, že oba materiály lze bezpečně svařovat bez přehřevu (stanoveno dle grafu C.3 na straně 33 v normě ČSN EN 1011-2).

Dále je nutné postupovat dle ČSN EN 1011-6, která charakterizuje doporučení pro svařování kovových materiálů laserovými technologiemi. U ocelí svařovaných laserovým paprskem by množství uhlíku nemělo přesáhnout hranici 0,17 hm. %. Také je kladen důraz na nízký obsah nečistot (fosfor, síra), aby nedošlo ke vzniku krystalizačních vad a byla minimalizována porozita. Z toho důvodu je doporučen minimální poměr mangan/síra, který pro obsah uhlíku od 0,06 až 0,11 hm. % musí být větší než 22. V případě oceli CR210LA je tento poměr roven 33,3 a u oceli CR240LA se rovná 40.

Po zhodnocení parametrů C_E a CET a specifických podmínek svařitelnosti laserovými technologiemi, lze konstatovat, že ocelové materiály CR210LA i CR240LA o daných tloušťkách splňují daná kritéria svařitelnosti. Jelikož jsou materiály zaručeně svařitelné, mají velmi podobné chemické složení, mechanické vlastnosti i povrchovou úpravu, neměl by být problém s vytvořením jejich vzájemného heterogenního svarového spojení.

5.2 Návrh a provedení svařovacího procesu

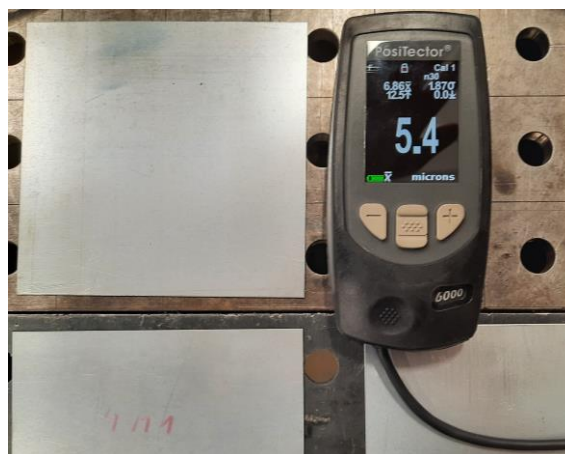
K přípravě plechů i k následnému svaření došlo v laboratoři výkonových laserů v prostorách Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně. Pro samotný svařovací proces bylo nutné nejprve vytvořit vhodné přístřihy. Plechy, které poskytla pro experiment firma EBZ Hoffmann, byly naděleny pomocí padacích nůžek. Pro snadnou orientaci byly typy plechů označeny dle tabulky 5.

Tab. 5 Vlastní značení zpracovávaných plechů.

Označení materiálu	Tloušťka plechu [mm]	Vlastní značení typu plechu
CR210LA-GI40/40	0,7	Materiál A 0,7
	1,2	Materiál A 1,2
CR240LA-GI50/50-U	0,8	Materiál B 0,8
	1,25	Materiál B 1,25

Z každého typu plechu bylo vytvořeno 9 vzorků s rozměry 135x130 a 9 vzorků o velikosti 55x310. Rozměry přístřihů byly zvoleny tak, aby z nich po svaření mohly být vytvořeny normované zkušební vzorky pro jednotlivé destruktivní zkoušky svaru. Materiál zbylý z plechových přístřihů byl následně využit pro zjištění homogenních vlastností svařovaných materiálů.

Dále bylo nutné z nařezaných plechů mechanicky odstranit ořepy pro bezpečnou manipulaci a přesnější fixování ve svařovacím přípravku. Pro kontrolu předepsaných hodnot tloušťky zinkového povlaku (viz tab. 4) bylo provedeno měření zařízením PosiTector 6000 (obr. 37), který byl opatřen standardní vyměnitelnou sondou. Jedná se o digitální tloušťkoměr pro měření například povlaků,



Obr. 37 Tloušťkoměr PosiTector 6000.

nátěrů nebo práškových barev na všech kovech, který díky vestavěné teplotní kompenzaci zajišťuje vysokou přesnost. Měření Zn vrstvy probíhalo vždy na třech náhodně vybraných přístrizích v závislosti na typu materiálu a tvaru, kdy na každém došlo k 10 měřením na náhodných místech. Naměřené hodnoty Zn vrstvy jsou shrnuty v tabulce 6. Změřené střední hodnoty ve všech případech spadají do rozsahu typických tloušťek vrstvy Zn.

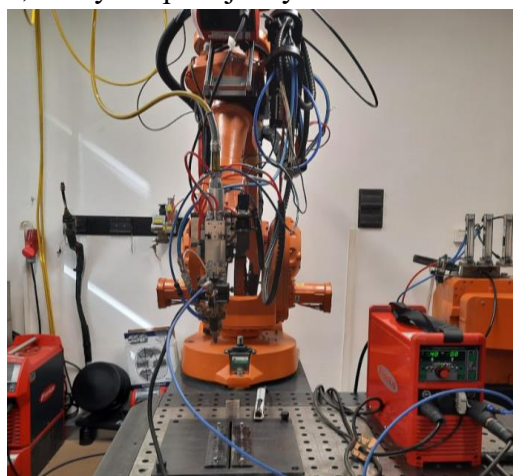
Tab. 6 Měření vrstvy povlaku zinku.

Vlastní značení typu plechu	Typický rozsah tloušťek Zn povlaku [μm]	Rozměry přístrihu [mm]	Změřená střední hodnota Zn vč. směrodatné odchylky [μm]
A 0,7	5,6–8,5	135x130	6,8 ± 1,9
		55x310	6,6 ± 1,2
A 1,2		135x130	6,5 ± 1,5
		55x310	8,0 ± 1,9
B 0,8	7,0–9,9	135x130	7,3 ± 1,1
		55x310	8,2 ± 1,5
B 1,25		135x130	8,9 ± 0,8
		55x310	7,6 ± 0,8

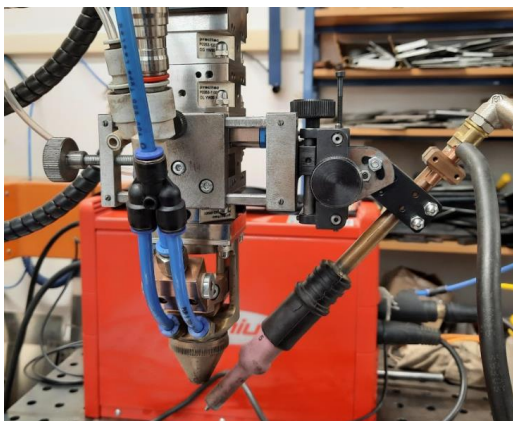
K samotnému procesu svařování byl využit laserový zdroj IPG YLS-2000. Jedná se o vláknový ytterbiový laser od firmy IPG Photonics, který disponuje výkonem až 2 kW (skládá se ze čtyř modulů o jmenovitém výkonu 500 W). Výstupní laserový paprsek má vlnovou délku 1,07 μm s kontinuálním i pulzním režimem. Jako sekundární zdroj tepla byl použit plně digitalizovaný svařovací TIG zdroj MagicWave 1700 Job vyvinutý firmou Fronius, který disponuje hodnotami svařovacího proudu až do 170 A.

Pro polohování laserové svařovací hlavy s připevněným TIG hořákem sloužil průmyslový 6osý robot IRB 2400/16 od firmy ABB (obr. 38). Dosah tohoto robotického ramene je orientačně 1500 mm s užitečným zatížením 16 kg a s průměrnou přesností polohy 0,3 mm. Pro upnutí svařovaného materiálu byly použity upínky fixované na pracovním stole s upínacími otvory. Proces probíhal v poloze svařování PA. Vždy před zhotovením svaru byla naprogramována přesná trajektorie pohybu svařovacího zařízení nastavením počátečního a koncového bodu dráhy.

TIG hořák byl nastaven jako řídicí (obr. 39), ve směru svařování tedy docházelo nejprve k účinku elektrického oblouku. Byla použita W-elektroda WT 20 o průměru 2,4 mm, která byla nastavena ve výšce 2 mm nad materiálem s větší tloušťkou a 2 mm před osou laserového paprsku. TIG hořák byl veden před laserovým paprskem, aby došlo nejprve k odpaření Zn vrstvy před samotným



Obr. 38 Svařovací robot.



Obr. 39 Hlava pro svařování LATIG.

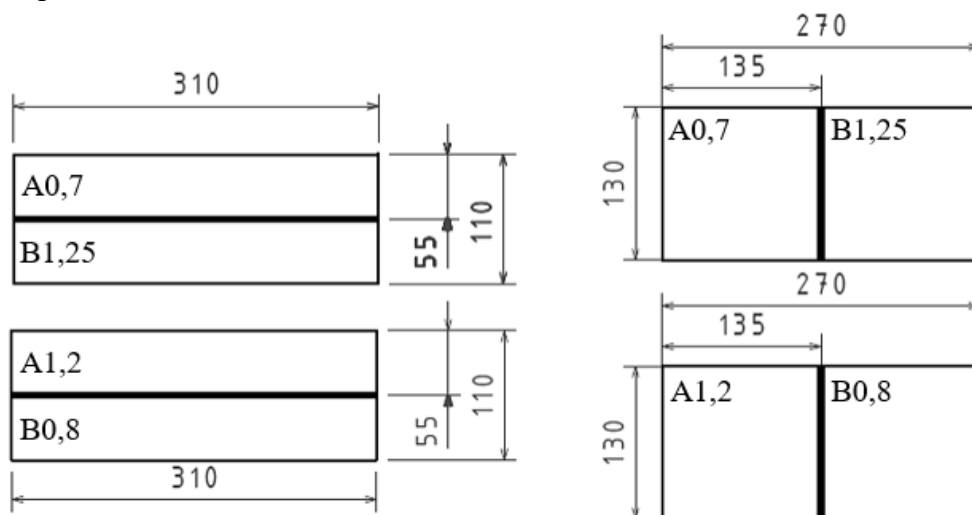
svařením laserem. Mezi technologiemi musela být určitá mezera, aby páry Zn mohly v co největším množství opustit oblast svaru ještě před účinkem laseru. Ovšem na druhou stranu nesměla být tato mezera příliš velká, jelikož by nedocházelo k přimykání oblouku k laserovému paprsku (viz kapitola 3.4) a oblouk by za daných svařovacích parametrů hořel nestabilně. Osa laserové hlavy svírala s osou hořáku úhel 45° (obr. 40) a poloha ohniska laserového svazku byla nastavena vždy na horní povrch materiálu s větší tloušťkou. Jako ochranného plynu bylo použito argonu s čistotou 4.6. V případě svařování laserovou technologií byl argon dodáván do místa svaru o průtoku 16 l/min shora skrze laserovou svařovací hlavu. V případě svařování LATIG proudil argon s průtokem 12 l/min z boku přes hubici TIG hořáku.



Obr. 40 Upnutí plechů a příprava trajektorie.

Cílem bylo svařit přístřihy v tailor welded blank různými procesními parametry. Zkoumán byl zejména vliv variace svařovacích proudů I_{TIG} na výslednou kvalitu a plasticitu svaru. Během experimentu došlo ke svaření plechů A0,7 s B1,25 a A1,2 s B0,8. Vždy tedy vznikly tailored welded blanks (TWB) ze dvou základních materiálů s různou tloušťkou. Návrh jednotlivých svařenců je zobrazen na obrázku 41 (svar je značen silnou čarou).

Svařence s rozměry 310 x 110 posléze sloužily pro vyřezání vzorků pro zkoušku hloubením dle Erichsena. Naproti tomu ze svařenců o rozměrech 130 x 270 byly zhotoveny vzorky pro příčnou zkoušku tahem.



Obr. 41 Návrh TWB pro svařování Laser-TIG.

Každý z výše uvedených typů TWB byl svařen nejprve laserovou technologií ($I_{TIG} = 0$ A) a následně technologií LATIG s nastavenými hodnotami svařovacího proudu I_{TIG} na 20 A a 40 A. Pro zajištění minimální statistické přesnosti byly zhotoveny vždy 3 svary danými procesními parametry od každého typu TWB. Bylo tedy zhotoveno 3 x 4 svařů jednotlivými svařovacími proudy, celkově tedy 36 svařových spojů.

Rychlost svařování v_s byla ve všech případech nastavena na $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a hodnota výkonu laseru P_{las} se rovnala 700 W. V případě technologie LATIG byly hodnoty svařovacího napětí U_{TIG} určeny jako aritmetický průměr hodnot zobrazovaných svařovacím zdrojem během

svařovacího procesu (každé zhotovování svaru bylo nahráváno, aby mohlo dojít k přesnému určení U_{TIG}). Svařovací napětí bylo vypočteno tímto způsobem, jelikož zejména na začátku svařování (než došlo ke stabilizaci elektrického oblouku) bylo v čase značně proměnné.

Souhrn procesních parametrů včetně vypočteného vneseného tepla technologií LATIG Q_{sC} (dle vzorců 3.2, 3.1 a 2.1) jsou uvedeny v tabulce 7. Jedná se o souhrnné hodnoty vždy pro skupinu 3 TWB s charakteristickými rozměry i tloušťkami, které byly svařené se stejnými hodnotami svařovacího proudu. Pro výpočet vneseného tepla laserem Q_{sLAS} byl zvolen koeficient tepelné účinnosti procesu $k_{LAS} = 0,65$ a pro vnesené teplo metodou TIG Q_{sTIG} byl určen koeficient $k_{TIG} = 0,60$.

Tab. 7 Parametry a charakteristiky svařovacího procesu.

Typy svařovaných plechu	Výsledné rozměry TWB [mm]	Pořadí svaru [-]	Svařovací proud I_{TIG} [A]	Svařovací napětí U_{TIG} [V]	Q_{sLAS} [$J \cdot mm^{-1}$]	Q_{sTIG} [$J \cdot mm^{-1}$]	Q_{sC} [$J \cdot mm^{-1}$]
A 0,7 a B 1,25	130 x 270	č. 1–3	0	0	22,8	0	22,8
		č. 4–6	20	19,0	22,8	11,4	34,2
		č. 7–9	40	19,5	22,8	23,4	46,2
	310 x 110	č. 10–12	0	0	22,8	0	22,8
		č. 13–15	20	18,0	22,8	10,8	33,6
		č. 16–18	40	14,2	22,8	17,0	39,8
A 1,20 a B 0,8	130 x 270	č. 19–21	0	0	22,8	0	22,8
		č. 22–24	20	19,1	22,8	11,5	34,3
		č. 25–27	40	17,9	22,8	21,5	44,3
	310 x 110	č. 28–30	0	0	22,8	0	22,8
		č. 31–33	20	17,6	22,8	10,6	33,4
		č. 34–36	40	14,4	22,8	17,3	40,1

$P_{las} = konst. = 700 \text{ W}$, $v_s = konst. = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, Q_{sLAS} – tepelný příkon laseru,
 Q_{sTIG} – tepelný příkon TIGu, Q_{sC} – celkový tepelný příkon.

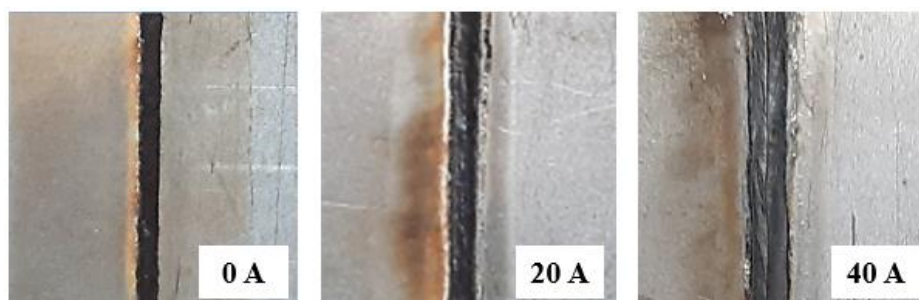
Tepelný příkon laserového zdroje byl vlivem konstantního výkonu laseru i svařovací rychlosti ve všech svařovacích procesech stejný. Z příložené tabulky je dále patrné, že vzorky 130x270 disponují vyššími hodnotami svařovacího napětí U_{TIG} než vzorky 310 x 110 při nastavení stejných parametrů P_{las} , v_s a I_{TIG} . Nejzřetelnější rozdíl je při porovnání těchto vzorků při svařování s $I_{TIG} = 40 \text{ A}$. Důvodem je pravděpodobně rozdílná doba zhotovování svarového spoje. Ke stabilizaci elektrického oblouku (tedy k ustálení U_{TIG} na nižších hodnotách) docházelo ve všech případech v podobnou dobu od zahájení svařování, ovšem vzorky 310 x 110 se svařovaly 2,4x delší dobu než polotovary 130x270, tudíž vzorky 310 x 110 disponují nižšími průměrnými hodnotami U_{TIG} .

Při porovnání celkového tepelného příkonu Q_{sC} lze pozorovat jeho výrazný nárůst při zapojení TIGu do svařovacího procesu. V případě technologie LATIG s $I_{TIG} = 20 \text{ A}$ byl nárůst tepelného příkonu ve všech případech okolo 50 % a v případě $I_{TIG} = 40 \text{ A}$ se nárůst vneseného tepla do svarového spoje pohyboval v závislosti na typu a rozměru svařovaných přístřihů od 76 do 103 %.

Po svaření každého ze 36 svarů došlo ke zběžné vizuální kontrole pro prvotní zhodnocení případně zjištění fatálních vad nebo nedostatků svarového spoje (např. neprovařený kořen, znatelné trhliny, zjevná porozita, rozstřík, zápal apod.). Všechny svary po svaření metodou

LATIG byly při vizuální kontrole vyhovující, došlo u nich k úplnému provaření v celé délce svaru pouze s mírným rozstříkáním svarového kovu.

Při vizuální kontrole byl znatelný vliv technologie TIG. Svarové housenky zhotovené technologií LATIG byly obecně širší (obr. 42), což plyne z většího množství roztaveného základního materiálu vlivem zvýšení vneseného tepla. Šířka svaru je zejména ovlivněna hořícím elektrickým obloukem, který sice nemá takovou intenzitu energie jako laserový paprsek, zato ale působí na daleko větší ploše. Pouze při vizuální kontrole bylo patrné, že hořící oblouk přispěl také k natavení náběžných hran svařovaných plechů, tudíž je přechod mezi plechy plynulejší a bez ostrých přechodů, které by mohly působit při následné tvářecí operaci jako vruby. Kořen svaru byl u technologie LATIG vždy dokonale provařen.

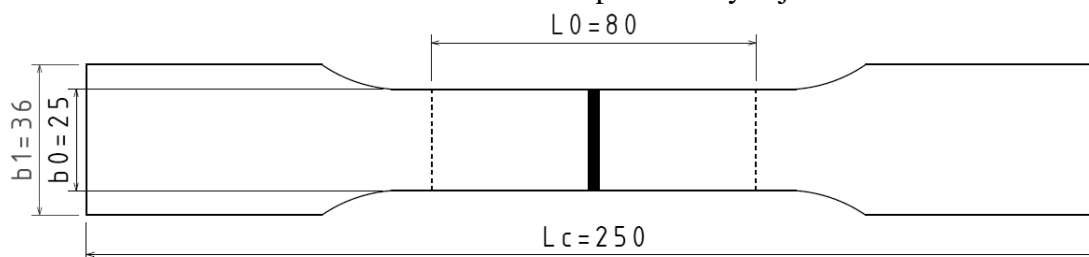


Obr. 42 Šířky svarů materiálů A07 a B1,25 při proměnných parametrech, zvětšeno 2x.

Šířka svarů zhotovených pouze laserem byla menší. U svařenců tvaru 310 x 110 svařovaných čistě laserovým paprskem docházelo v konečné fázi svařování ke značnému znehodnocení svarového spoje. V poslední jedné třetině dráhy byl tento svar velmi křehký, téměř neprovařený a ihned po vytažení z upínacího zařízení došlo k jeho porušení. Aby se této skutečnosti u dalších svarů předešlo, nejprve došlo před samotnou svařovací operací k nabodování přístřihů 15 mm před koncem naprogramované trajektorie. Z toho vyplývá, že již během procesu svařování docházelo při použití čistě laserové technologie k určitým problémům, na které bylo nutné reagovat, aby vůbec došlo ke spojení daných materiálů.

5.3 Příčná zkouška tahem [63], [64]

Pro provedení destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – příčné zkoušky tahem – bylo nejprve nutné vhodně připravit zkušební vzorky z TWB o rozměrech 130 x 270. Ty byly zhotoveny podle požadavků vycházejících z normy ČSN EN ISO 4136. Základní materiál byl zkoušen dle ČSN EN ISO 6892-1. Tvar zkušební plechové tyče je na obr. 43.



Obr. 43 Tvar a základní rozměry plechové tyče pro příčnou zkoušku tahem.

Z každého polotovaru o rozměrech 130 x 270 byly vyřezány 3 zkušební vzorky pro zajištění dostatečné statistické přesnosti. Bylo tedy vytvořeno 27 vzorků (9 vzorků pro daný svařovací proud I_{TIG}) pro zkoušku svařenců A0,7B1,25 a stejný počet i pro svařence A1,2B0,8. Dále byly zhotoveny 3 vzorky z každého plechu základního materiálu dle jeho tloušťky a materiálového složení, tedy dalších 12 vzorků pro určení jejich výchozích mechanických vlastností před samotným svařováním. Celkem bylo při statické zkoušce tahem

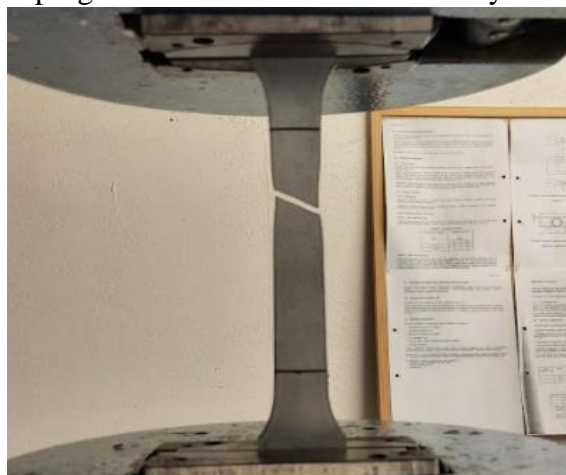
prověřeno 64 vzorků (2 vzorky typu A1,2B0,8 svařované s $I_{TIG} = 20$ A byly znehodnoceny během řezání).

Tahová zkouška byla provedena v prostorách laboratoře mechanických vlastností materiálů Ústavu strojírenské technologie FSI VUT. Před zahájením samotného testování bylo nutné ze všech vzorků manuálně odstranit otřepy, které vznikly při jejich řezání, aby vzorek mohl být kvalitně upnut do trhacího stroje a nedocházelo k prokluzu plechu v čelistech. Dále došlo ke změření přesné počáteční šířky zkušební tyče b_0 v oblasti svaru pro následný výpočet plochy průřezu (tloušťka zkušební tyče vycházela z tloušťky plechu). Poté bylo nutné fixem narýsovat na každý vzorek počáteční měřenou délku L_0 , která měla vždy 80 mm a její střed byl shodný se středem svarového spoje (obr. 44). Délka L_0 sloužila pro stanovení hodnot tažnosti A_{80} . Na závěr byl každý konec zkušební tyče označen charakteristickým číslem pro následné zhodnocení.



Obr. 44 Příprava vzorků pro zkoušku tahem.

Pro zhotovení zkoušky byl použit hydraulický zkušební stroj ZD40 (400 kN) vybavený řídicí jednotkou EDC 60, která byla propojena s programem M-TEST nainstalovaným na stolním PC, který sloužil k zaznamenávání měřených údajů, jejich vyhodnocení a grafické zpracování. Podrobné údaje o měřicím zařízení jsou uvedeny v příloze 1. Při samotném testu byl vzorek nejprve upnut do trhacího zařízení a byly nastaveny rozměry jeho výchozího průřezu do výpočetního programu. Poté došlo k zahájení tahové zkoušky, kdy pro všechny vzorky byla zkušební rychlost nastavena na $10 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ a doba zatěžování byla ve všech případech více než 40 s. Po přetržení zkušební tyče (obr. 45) došlo k jejímu vyjmutí ze stroje, byl vizuálně zhodnocen charakter jejího porušení a byla ručně změřena konečná délka po lomu L_u , díky níž mohl program vypočítat požadovanou hodnotu tažnosti A_{80} dle vztahu:



Obr. 45 Porušení tyče při zkoušce tahem.

$$A_{80} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100, \quad (5.3)$$

kde: A_{80} – tažnost vzorku při výchozí délce $L_0 = 80$ mm [%]

L_0 – počáteční měřená délka (pro A_{80} je $L_0 = 80$ mm) [mm]

L_u – konečná měřená délka po lomu zkušební vzorku [mm]

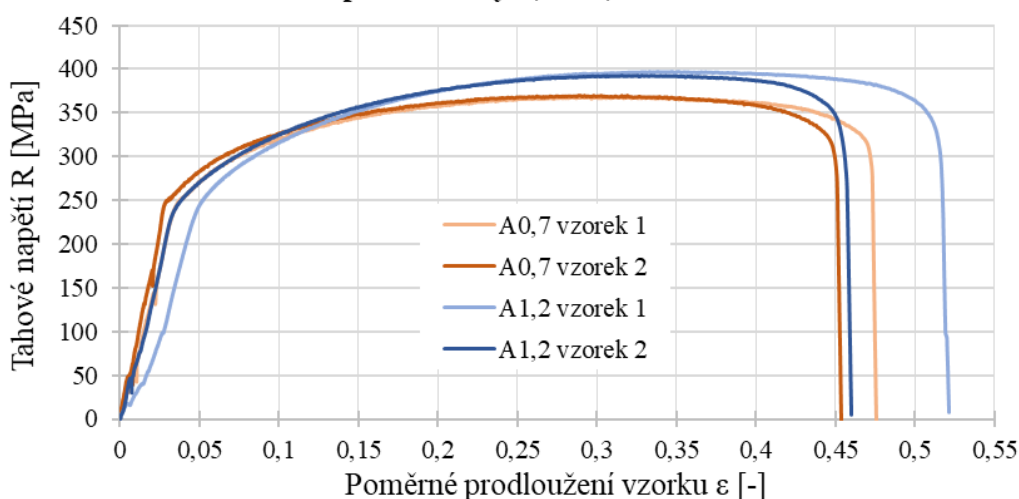
Nejprve byly takto vyhodnoceny mechanické vlastnosti základních materiálů (vzorky na obrázku 44 bez svaru). Tento test sloužil pro ověření charakteristik předepsaných normou. Střední hodnoty z jednotlivých tahových zkoušek svařovaných plechů jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8 Mechanické vlastnosti svařovaných plechů.

Mechanické vlastnosti	Tloušťka plechu	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Maximální zatěžovací síla F_m [N]	Smluvní mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]	Součinitel plastičnosti $R_{p0,2}/R_m$ [%]
CR210LA-GI40/40	0,7	258	6354	370	37	69,7
	1,2	252	11536	394	34	64,0
CR240LA-GI50/50-U	0,8	297	7950	404	30	73,5
	1,25	304	12624	413	30	73,6

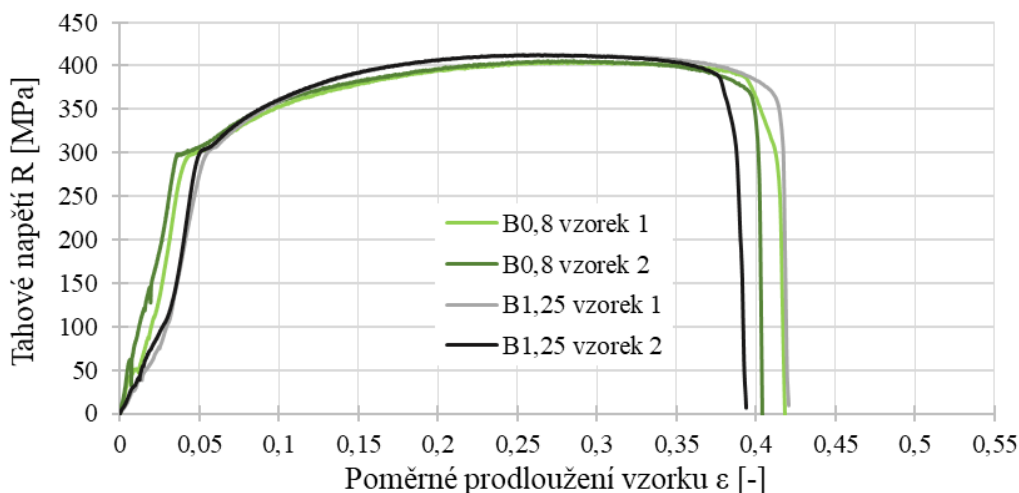
Na obrázcích 46 a 47 jsou zobrazeny průběhy napětí v závislosti na poměrném prodloužení vzorku. Pro přehlednost jsou uvedeny pouze dvě ze tří charakteristických křivek pro daný typ a tloušťku materiálu. U obou ocelí lze pozorovat podobný průběh napětí bez ohledu na jeho tloušťku. Oba materiály mají nevýraznou mez kluzu, která byla určena smluvně (numerickými výpočty systému M-TEST).

Smluvní tahový diagram materiálu A (CR210LA-GI40/40) pro tloušťky 0,7 a 1,2 mm



Obr. 46 Tahový diagram pro materiál A (CR210LA-GI40/40).

Smluvní tahový diagram materiálu B (CR240LA-GI50/50-U) pro tloušťky 0,8 a 1,25 mm



Obr. 47 Tahový diagram pro materiál B (CR210LA-GI40/40).

Při pohledu na uvedené grafy lze říci, že oba materiály mají z hlediska tahové zkoušky výbornou plasticitu. Je patrné, že ocel A disponuje lepší plasticitou než je tomu u oceli B bez ohledu na tloušťku plechu. Obecně totiž platí, že čím nižší je hodnota součinitele plasticity $R_{p0,2}/R_m$, tím je daný materiál vhodnější pro tvářecí proces (viz. tabulka 7). Zároveň ocel A charakterizují vyšší hodnoty tažnosti A_{80} , což také značí lepší tvařitelnost této oceli. Z hlediska pevnostních charakteristik došlo k potvrzení předpokladů vycházejících z normy, tedy že materiál B má vyšší smluvní mez kluzu i mez pevnosti (přesné hodnoty jsou uvedeny v tab. 7). Oba materiály splňují předepsané požadavky na minimální hodnoty mechanických vlastností, které jsou dané normou VDA 239-100.

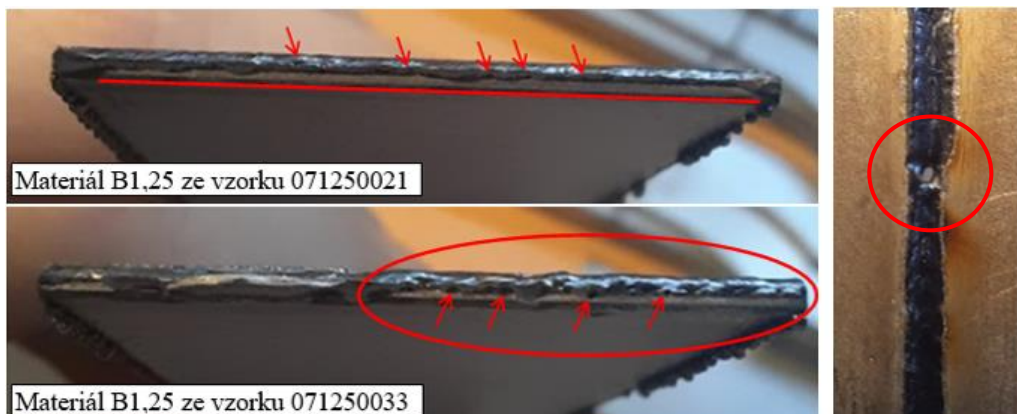
Při porovnání průběhů napětí u oceli A lze vidět, že materiál o tloušťce 1,2 mm má mírně větší hodnotu meze pevnosti a v průměru menší tažnost než materiál A 0,7 mm. Oproti tomu u materiálu B jsou průběhy téměř identické bez ohledu na tloušťku zkoušeného plechu. U materiálu A i B se v první fázi zatěžování (ještě v elastické oblasti) objevuje náhlý prudký pokles napětí. Ten je pravděpodobně způsoben pokluzy uvnitř struktury materiálu.

Po zhodnocení vlastností základních materiálů následoval test samotných svarových spojů. Z pohledu plasticity i celkové bezpečnosti svarového spoje je naprosto nežádoucí, aby k porušení vzorku došlo ve svarovém kovu nebo v TOO. Vždy tedy musí dojít ke vzniku trhliny v základním neovlivněném materiálu. Při testování vzorků, které byly svařené ze 2 materiálů s různými tloušťkami, byl předpoklad, že k porušení při tahové zkoušce dojde v tenčím z nich. Pokud by došlo k porušení v silnějším z materiálů, muselo by dojít k přepočtu zatěžovacího napětí na jeho příčný průřez.



Obr. 48 Vzorky porušené ve svaru i v ZM.

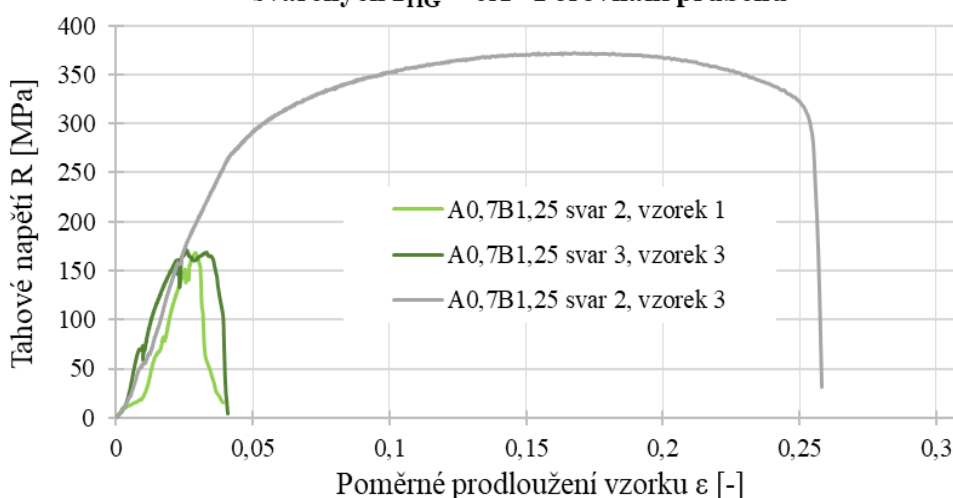
Příčnou zkouškou svarového spoje tahem prošlo celkem 52 různých vzorků. V 50 případech došlo k přetržení zkušební plechové tyče v základním materiálu (vždy více než 2 cm od svaru), který byl zároveň ve všech případech tím tenčím, tudíž vstupní předpoklad byl správný. Jednalo se vždy o tvárný lom. K porušení ve svarovém spoji (obr. 48) došlo pouze v případě 2 vzorků, které byly odebrány ze svařence A0,7B1,25 zhotoveného čistě laserovou technologií (přesněji vzorek 1 ze svaru č. 2 a vzorek 3 ze svaru č. 3, křehký lom). Při bližším zkoumání lomu svarového spoje bylo zjištěno, že důvodem k jeho vytvoření bylo nedostatečné provaření plechu o tloušťce 1,25 mm, což je patrné na obrázku 49 vlevo.



Obr. 49 Nedostatečné provaření plechu B1,25.

Zároveň je na lomové ploše k vidění poměrně velké množství menších i větších dutinek. Pravděpodobně se jedná o vnitřní póry vzniklé naplyněním svarové lázně, které přispěly k iniciaci trhlin uvnitř svarového spoje během tahové zkoušky. V důsledku těchto vad bylo provedeno bližší zkoumání i ostatních vzorků svařených čistě laserovou technologií. V případě zkušebních tyčí ze svařenců A0,7B1,25 byl následně objeven další vzorek, který sice nebyl přetržen ve svarovém spoji, ale během zkoušky u něj došlo k otevření vnitřní dutiny a vzniku oka uprostřed svaru (obr. 49, vpravo). U ostatních vzorků (A0,7B1,25 i A1,2B0,8) ke znehodnocení svaru během tahové zkoušky nedošlo. Porovnání průběhů tahových křivek referenčních s průběhy, při kterých došlo k porušení ve svarovém spoji je zobrazeno na obrázku 50.

Smluvní tahový diagram TWB A0,7B1,25 svařených $I_{TIG} = 0A$ - Porovnání průběhů



Obr. 50 Porovnání vzorků porušených ve svaru s referenčním vzorkem.

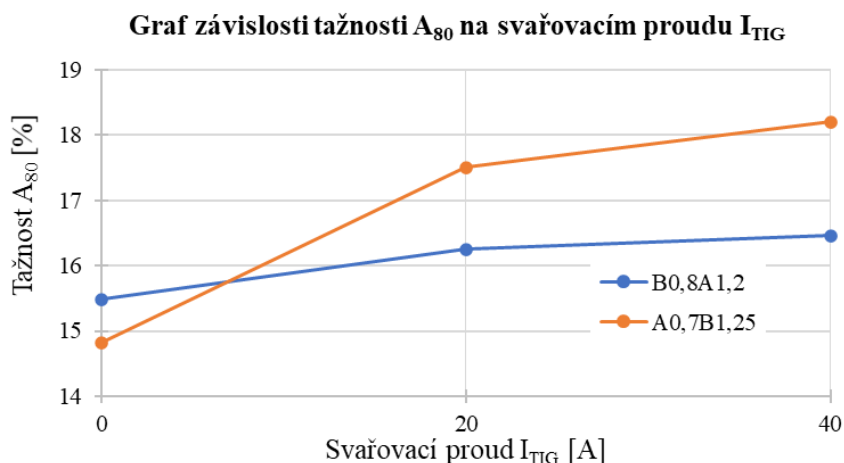
Veškeré hodnoty naměřené během tahové zkoušky včetně tahových diagramů jednotlivých zkušebních tyčí jsou uvedeny v přílohách 2 a 3. Průměrné hodnoty mechanických vlastností všech vzorků TWB, které se přetrhly v základním materiálu, jsou uvedeny v tabulce 9.

Tab. 9 Mechanické vlastnosti vzorků TWB v porovnání se základním materiálem.

Typy svařovaných plechu	Svařovací proud I_{TIG} [A]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Smluvní mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]	Součinitel plastičnosti $R_{p0,2}/R_m$ [%]
A0,7B1,25	0	266	372	14,8	72,3
	20	264	372	17,5	70,8
	40	270	373	18,2	72,1
A0,7	-	258	370	37	69,7
B1,25	-	304	413	30	73,6
A1,2B0,8	0	290	401	15,5	72,2
	20	286	403	16,3	71,1
	40	290	403	16,5	72,0
B0,8	-	297	404	30	73,5
A1,2	-	252	394	34	64,0

Do průměrů nebyly zahrnuty vzorky, u kterých došlo k porušení ve svarovém kovu. Lom u nich nastal v okamžiku ještě před mezí kluzu a průměrné hodnoty u typu A0,7B1,25 pro $I_{TIG} = 0$ A by tím byly velmi ovlivněny. Je ovšem nutné tyto vzorky vzít v potaz při celkovém zhodnocení. Pevnostní charakteristiky svařenců se dle očekávání odvíjí od základního materiálu, ve kterém došlo k porušení, jak lze vidět v tabulce 8, bez ohledu na proměnné svařovací parametry. Zejména hodnoty smluvní meze pevnosti pro svařence A0,7B1,25 korespondují se základním materiálem A0,7 a pro svařence B0,8A1,20 se shodují se základním materiálem B0,8. Hodnoty smluvní meze kluzu se mírně rozcházejí, což může být způsobeno odlišným nastavením numerického výpočtu $R_{p0,2}$ při testování základních materiálů a svařenců (tím se mírně liší i hodnoty součinitele plastičnosti).

Kvůli svarovému spoji došlo k výraznému poklesu tažnosti oproti hodnotám, kterými disponují základní materiály. Tažnost plechových vzorků zhotovených ze svařenců se pohybuje okolo 50 % z průměrných hodnot svařovaných základních materiálů. Velikost tažnosti A_{80} se mírně liší v závislosti na svařovacím proudu I_{TIG} (obr. 51).



Obr. 51 Závislost tažnosti A_{80} na svařovacím proudu I_{TIG} .

Z uvedeného grafu je patrné, že s rostoucími hodnotami svařovacího proudu I_{TIG} narůstá výsledná tažnost vzorku A_{80} . To platí pro oba typy svařenců. Ovšem v případě typu B0,8A1,2 není nárůst tak značný jako v případě A0,7B1,25. Při svařování čistě laserovou technologií je výsledná tažnost v obou případech nejnižší. Tento fakt může být zapříčiněn nepřítomností přehřevu v podobě TIG elektrického oblouku. Vlivem toho je svarový spoj je ochlazován znatelně rychleji a roste riziko vzniku křehkých struktur (martenzitu), který plasticitu velmi snižuje. Na druhou stranu nesmí být vneseného tepla od oblouku Q_{TIG} příliš velké množství, jelikož by hrozilo zhrubnutí zrna ve svaru i TOO a následný pokles mechanických vlastností, což se ovšem při této zkoušce neprokázalo.

Při příčné zkoušce svaru tahem došlo k určení základních mechanických vlastností plechových svařenců TWB a k prvotnímu ověření jejich vhodnosti pro následnou tvářecí operaci. Z výsledků testu lze konstatovat, že svary u svařenců TWB A1,2B0,8 byly vyhovující ve všech případech bez ohledu svařovací parametry. Jediný rozdíl byl v hodnotách tažnosti, která je v případě vzorků svařených technologií LATIG mírně vyšší.

Při zkoušení svarů TWB A0,7B1,25 svařených $I_{TIG} = 0$ A došlo u 2 vzorků k nežádoucímu porušení přímo ve svarovém spoji. Tyto vzorky navíc disponují nejnižšími hodnotami tažnosti A_{80} , tudíž se na základě tahové zkoušky jeví použití čistě laserové technologie jako nejméně vhodné pro následný proces tažení. Souhrn všech dat z této zkoušky (včetně krabicových grafů, ve kterých je znázorněno statistické porovnání) je uveden v příloze 2 a 3.

5.4 Zkouška hloubením dle Erichsena [61], [67], [68]

Vzorky pro zkoušku hloubením dle Erichsena byly vytvořeny ze svařenců o výchozích rozměrech 310 x 110. Z každého svařence byly laserem vypáleny 3 zkušební tělesa kruhového tvaru s průměrem 90 mm (tyto rozměry vychází z normy ČSN EN ISO 20482). Zároveň byl kladen důraz na to, aby svarový spoj procházel středem kruhového výpalku. Bylo vytvořeno 27 vzorků (9 vzorků pro daný svařovací proud I_{TIG}) pro zkoušku svařenců A0,7B1,25 a stejný počet i pro svařence A1,2B0,8. Dále byly zhotoveny 3 vzorky od každého typu základního materiálu. Celkem bylo tedy provedeno 66 testů.

Zkouška hloubením dle Erichsena probíhala v prostorách firmy EBZ Hoffmann s. r. o. K samotnému hloubení byl využit stroj ZD10/90, což je modernizovaný stroj pro tahovou, tlakovou i ohybovou zkoušku s měřicím rozsahem až 100 kN. Pomocí speciálního přípravku (obr. 52) je možné toto zařízení použít i pro Erichsenův test TWB s různou tloušťkou základních materiálů. Díky jeho konstrukci lze snadno vyrovnat dosedací plochy přídržovače přípravku podložkami půlměsícového tvaru, a proto nevznikne mezi přídržovačem a raznicí vůle a nedochází k nežádoucímu pohybu TWB během zkoušky. Přítlačná síla od přídržovače je vyvozována utažením šestice šroubů.



Obr. 52 Schéma přípravku pro zkoušku hloubením dle Erichsena.

Před zahájením zkoušky byly z každého vzorku odstraněny otřepy (pro kvalitnější upnutí) a následně byly natřeny univerzálním plastickým mazivem Total multis EP2. Pro zajištění plynulosti prohlubování byla rychlost pohybu razníku nastavena na konstantní hodnotu 8 mm/min, jak uvádí norma. Zkouška byla řízena počítačem, tudíž nebylo nutné ke konci testu rychlost snižovat. K ukončení Erichsenova testu (k zastavení razníku) došlo tehdy, když systém zaznamenal pokles tvářecí síly o více než 3 %, což jistě značí vznik trhliny v celé tloušťce materiálu. Toto zvolené ukončovací kritérium je ve výsledku velmi přesné, jelikož indikuje i takovou trhlinu, která by na první pohled byla snadno přehlédnutelná, a také eliminuje prodlevu mezi postřehnutím vzniklé trhliny a zastavením zkušebního zařízení. Zároveň software znázorňuje závislost zatěžující (tvářecí) síly na posuvu razníku, tudíž lze velmi snadno zjistit maximální hodnotu této síly i velikost dosaženého prohloubení IE (mm) v momentě vzniku průchozí praskliny. Po ukončení zkoušky byl vzorek vyjmut ze zařízení a dle normy ČSN EN 10359 bylo zkoumáno umístění a charakter vzniklého defektu.

Ke stanovení výchozích hodnot pro následné porovnání byly testovány nejprve vzorky základního materiálu. U všech došlo ke vzniku trhliny po obvodu prohloubení (nikdy ne přes vršek výtažku), což značí vhodnost těchto materiálů pro použití při technologii hlubokého tažení. Typický tvar iniciované trhliny je zobrazen na obrázku 53 (veškerá zkušební tělesa ZM jsou zobrazena v příloze 4).

Hodnoty zjištěných technologických charakteristik ZM včetně jejich směrodatné odchylky jsou zapsány v tabulce 10. Při porovnání součinitele plastičnosti základních materiálů vyplynulo, že materiál A1,2 má z hlediska plasticity nejlepší vlastnosti pro hluboký tah (viz podkapitola 5.3). Tento předpoklad byl potvrzen, jelikož daný plech disponuje nejvyšší hodnotou maximální tvářecí síly F_m i změřeného prohloubení IE, přestože se nejedná o materiál s největší výchozí tloušťkou.



Obr. 53 Typická trhlina v ZM.

Tab. 10 Charakteristiky základních materiálů zjištěné z Erichsenovy zkoušky.

Typ základního materiálu	A0,7	A1,2	B0,8	B1,25
Maximální tvářecí síla F_m [kN]	12,21 ± 0,25	22,24 ± 0,02	13,24 ± 0,02	20,83 ± 0,13
Prohloubení IE [mm]	9,60 ± 0,01	10,98 ± 0,15	10,06 ± 0,05	10,25 ± 0,03

Materiály typu B mají vzájemně velmi podobné predispozice k hloubení (dle jejich IE), což také koresponduje s údaji, které byly zjištěny z tahové zkoušky. Dle součinitele plastičnosti měl mít materiál A0,7 celkově lepší předpoklady pro hluboký tah než materiály typu B. To ovšem nebylo při Erichsenově zkoušce potvrzeno, jelikož ke vzniku trhliny v tomto materiálu docházelo při nejnižších hodnotách prohloubení IE.

Po určení charakteristik ZM následovalo testování svařenců TWB a jejich hodnocení dle normy ČSN EN 10539. Obecně lze Erichsenův test brát jako akceptovatelný, pokud dojde ke vzniku trhliny v ZM. Nejprve proběhlo zkoušení vzorků typu A0,7B1,25. Během této zkoušky se svary zhotovené $I_{TIG} = 0$ A ukázaly jako velmi nekvalitní, protože se 5 z 9 vzorků rozpadlo ještě před zahájením zkoušky. Při bližším zkoumání lomových ploch bylo zjištěno, že k rozpadu těchto TWB došlo vlivem nedostatečného provaření silnějšího z materiálů (B1,25). Samotný laserový paprsek nebyl pravděpodobně schopný při daných svařovacích parametrech natavit dostatečné množství materiálu, aby došlo k vytvoření kvalitního svarového spoje, který by překlenul rozdíl v tloušťce svařovaných plechů. Tento problém se vyskytl u svařenců č. 10, 11 i 12. U jednoho ze zbylých čtyř vzorků (obr. 54) došlo



Obr. 54 Nepřípustná trhlina ve svaru.

během testu ke vzniku, trhliny, která byla iniciována a následně procházela čistě svarovým spojem, což je dle normy naprosto nepřípustné. Z toho vyplývá, že pouze u 3 vzorků byl svar tak pevný, aby byl eventuálně schopen vydržet tvářecí operaci (trhlina pouze v ZM A0,7, jejich fotografie jsou uvedeny v příloze 4).

Znatelně lepších výsledků dosahovaly vzorky ze svařenců A0,7B1,25 svařených technologií LATIG s $I_{TIG} = 20$ A. Tato zkušební tělesa byla odebrána ze svařenců č. 13, 14 a 15. Celkem bylo tedy zkoušeno 8 vzorků (1 byl znehodnocen před samotným testem) a u všech došlo během testu ke vzniku trhliny pouze v základním materiálu (ve všech případech v materiálu A0,7, příloha 4). Tyto výsledky lze přisuzovat vlivu metody TIG (elektrického oblouku) na proces svařování a jsou tak potvrzeny teoretické předpoklady. Díky TIGu došlo ke zvýšení vneseného tepla do svaru, a tudíž k natavení většího množství materiálu, což vedlo k plynulé návaznosti svařovaných plechů.

Jako poslední z této skupiny byly testovány vzorky ze svařenců č. 16, 17 a 18. Ty byly svařeny technologií LATIG s $I_{TIG} = 40$ A. Opět bylo zkoušeno 8 výpalků (1 byl znehodnocen) a ke vzniku trhliny došlo u většiny v TOO (obr. 55) nebo přímo ve svarovém kovu. Pouze v případě 2 vzorků procházela prasklina základním materiálem (přesněji materiálem A0,7, příloha 4). Vznik trhliny v tepelně ovlivněné oblasti mohl být způsoben přílišným vneseným teplem vlivem technologie TIG, které vedlo k rozšíření svaru i jeho TOO.



Obr. 55 Trhlina v TOO svaru.

Celkové shrnutí naměřených hodnot charakteristických pro svařence typu A0,7B1,25 vycházejících z testu hloubením dle Erichsena je uvedeno v tabulce 11. Jsou do ní zahrnuty veškeré vzorky, které prošly zkouškou (i ty, které byly vyhodnoceny jako neakceptovatelné z hlediska polohy vzniklé trhliny).

Tab. 11 Charakteristiky svařenců typu A0,7B1,25 zjištěné z Erichsenovy zkoušky.

Typ svařenců	A0,7B1,25 / 0 A	A0,7B1,25 / 20 A	A0,7B1,25 / 40 A
Maximální tvářecí síla F_m [kN]	9,20 ± 3,76	10,48 ± 0,37	8,53 ± 1,43
Prohloubení IE [mm]	6,11 ± 1,57	6,87 ± 0,21	5,93 ± 0,66

Z naměřených hodnot vyplývá, že nejlepší předpoklady pro operaci hlubokého tažení mají svařence zhotovené technologií LATIG s $I_{TIG} = 20$ A. Vzorky, které byly vypáleny z těchto TWB, vyhovovaly ve všech případech (ke vzniku trhliny došlo v ZM), a navíc disponují nejvyššími hodnotami prohloubení IE i maximální tvářecí síly F_m . Při porovnání prohloubení IE je možné konstatovat, že svařence A0,7B1,25 / 0 A disponují hodnotami v průměru o 11 % menšími než v případě typu A0,7B1,25 / 20 A. U svařenců A0,7B1,25 / 40 A je v porovnání s typem A0,7B1,25 / 20 A pokles dokonce o téměř 14 %. Zároveň bylo velké množství vzorků svařených $I_{TIG} = 0$ A a $I_{TIG} = 40$ A nepřijatelných z hlediska polohy vzniklé trhliny, u některých dokonce došlo k rozpadu svaru ještě před zkouškou. Dále lze při uvážení směrodatných odchylek přiložených výsledků říci, že svařence A0,7B1,25 / 20 A podávají nejstabilnější výsledky, tedy že nedochází k výrazným odchylkám mezi jednotlivými testovanými vzorky (krabicové grafy pro porovnání jsou uvedeny v příloze 4, strana 5).

Na závěr byly hloubeny vzorky, které byly zhotoveny z TWB typu A1,2B0,8. Opět bylo vytvořeno 9 zkušebních těles z každého typu svařenců svařených danými procesními parametry. Všechny tyto vzorky dosahovaly výborných výsledků. Při posuzování dle normy ČSN EN 10539 bylo zjištěno, že u drtivé většiny hodnocených výtažků (26 z 27) došlo ke vzniku trhliny v základním materiálu B0,8, což se dá považovat za nejlepší možný výsledek. Pouze v případě jednoho vzorku ze svařence A1,2B0,8 / 40 A byla trhlina iniciována přes ZM i svarový spoj (obr. 56). Při porovnání s příklady uvedenými ve zmiňované normě lze však říci, že i tento vzorek je přijatelný a svar může být považován za vyhovující. Výborné výsledky Erichsenova testu těchto TWB byly pravděpodobně způsobeny menším rozdílem v tloušťce svařovaných plechů. K vytvoření kvalitního svarového spoje tedy stačilo menší množství nataveného materiálu, které snadněji zajistilo překlenutí tohoto rozdílu.



Obr. 56 Trhlina přes ZM i svar.

K posouzení vlivu svařovacích parametrů na hlubokotažnost TWB typu A1,2B0,8 tedy posloužily pouze charakteristiky zjištěné během hloubení dle Erichsenova, zejména parametr prohloubení IE. Získaná data pro svařence typu A1,2B0,8 jsou uvedena v tabulce 12 (příklady jednotlivých vzorků jsou uvedeny v příloze 4).

Tab. 12 Charakteristiky svařenců typu A1,2B0,8 zjištěné z Erichsenovy zkoušky.

Typ svařenců	A1,2B0,8 / 0 A	A1,2B0,8 / 20 A	A1,2B0,8 / 40 A
Maximální tvářecí síla F_m [kN]	12,52 ± 0,52	13,55 ± 1,27	12,88 ± 1,87
Prohloubení IE [mm]	7,42 ± 0,33	7,87 ± 0,48	7,31 ± 0,61

Z uvedených výsledků plyne, že nejlepší předpoklady pro operaci hlubokého tažení mají opět svařence zhotovené technologií LATIG s nastaveným svařovacím proudem $I_{TIG} = 20$ A. V porovnání se vzorky typu A1,2B0,8 / 0 A dosahují TWB typu A1,2B0,8 / 20 A téměř o 6 % vyšších průměrných hodnot prohloubení IE a oproti TWB typu A1,2B0,8 / 40 A je rozdíl o více než 7 %. Při srovnání zjištěných údajů z Erichsenovy zkoušky základních materiálů, svařenců typu A0,7B1,25 a A1,2B0,8 vyplývá, že svařence TWB mají obecně nižší průměrné hodnoty jak maximálních tvářecích sil F_m , tak i celkového změřeného prohloubení IE než vzorky ze základního materiálu. Tento fakt se ovšem dal očekávat, jelikož se jedná o heterogenní spojení a svarový spoj způsobuje určité zpevnění a pokles tažnosti. Zároveň platí, že svařence A1,2B0,8 dosahovaly lepších výsledků při tomto testu hlubokotažnosti než svařence A0,7B1,25 a to bez ohledu na nastavené svařovací parametry. To se ovšem dalo také predikovat, jelikož u svařenců A1,2B0,8 má základní materiál B0,8 (což je slabší ze svařovaných plechů) lepší předpoklady k hloubení než materiál A0,7 (což je tenčí ze svařovaných plechů u TWB typu A0,7B1,25).

V souhrnu lze říci, že u obou typů svařenců měla nejlepší výsledky hloubení technologie LATIG s $I_{TIG} = 20$ A, z čehož lze opět vyvodit pozitivní vliv el. oblouku v kombinaci s laserovým paprskem na výslednou plasticitu svarového spoje během tažení. Při nastavení $I_{TIG} = 40$ A bylo ovšem vnesené teplo příliš velké a tím byl efekt oblouku spíše nežádoucí, jelikož vedl k praskání v TOO a celkovému snížení plasticity svařenců TWB.

5.5 Metalografický rozbor [68]

Vzorky pro metalografický rozbor byly připraveny v metalografické laboratoři Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Pro kontrolu byl zhotoven vždy jeden vzorek pro určitý typ svařence, který byl svařen danými parametry. Každý vzorek byl odebrán ze středu svarové housenky, aby nedošlo k ovlivnění výsledků například počátečním zapalováním oblouku. Nejprve bylo nutné odříznout testovací kus svaru kolmo ke směru svařování. K tomu byla využita metalografická pila Struers Secotom-60 s intenzivním chlazením, aby nedošlo vlivem tepla, vznikajícího při řezání, k teplemu ovlivnění v oblasti svaru.

Takto vyřezané vzorky byly zalisovány do fenolové pryskyřice Struers MultiFast na lisu Struers CitoPress-1. Zalisované puky byly poté broušeny a leštěny na automatickém broušicím a lešticím zařízení Struers Tegramin-20. K broušení došlo pomocí kotoučů MD-Piano, které byly chlazené vodou. K leštění byly použity diamantové pasty s konečnou jemností 1 μm . Po oplachu vodou a methanolem následovalo naleptání 4% nitalem po dobu 8 sekund a další oplach. Takto připravené vzorky bylo možné posléze zhodnotit.

5.5.1 Hodnocení makrostruktury [57], [68], [70]

Pozorování makrostruktury vzorků bylo provedeno pomocí mikroskopu Olympus SZ 61, který je součástí vybavení ÚPT AV ČR. Makrostruktura byla hodnocena u šesti vzorků (3 vzorky typu A0,7B1,25 a 3 vzorky typu A1,2B0,8, které byly zhotoveny $I_{\text{TIG}} = 0 \text{ A}$, 20 A a 40 A). Výbrusy byly hodnoceny dle norem ČSN EN ISO 12932 a ČSN EN 10359, které charakterizují nejčastější vady při svařování tailored blanks laserovými technologiemi. Pro měření rozměrů svarů, TOO nebo geometrických vad byl použit software LAS EZ. Měřené veličiny všech vzorků jsou zobrazeny na obrázcích v příloze 4. Měřítka je uvedeno na každém snímku struktury.

Jako první byla hodnocena struktura ze svařence A0,7B1,25 (ze svaru č. 1), který byl svařený čistě laserovou technologií, tedy $I_{\text{TIG}} = 0 \text{ A}$. Jak je vidět na obrázku 57, svar je kvalitní, disponuje dobrým průvarem a je bez zápalů, pórů, trhlin, studených spojů nebo jiných vnitřních vad.



Obr. 57 Makrostruktura svařence A0,7B1,25 / 0 A.

Z hlediska geometrie TWB došlo ke kontrole pozitivního nesprávného spojení (příloha 5, strana 1), které bylo v tomto případě 0,058 mm. Norma však povoluje hodnotu až do 0,2 mm dané tloušťky plechů, tudíž svar vyhovuje. Dále je možné vidět mírnou vydutost v oblasti přechodu svarového kovu do tenčího z plechů na vrchní ploše svaru, která je ovšem také akceptovatelná.

Makrostruktura vzorku odebraného ze svařence A7B1,25 (ze svaru č. 6), který byl svařený technologií LATIG s $I_{TIG} = 20$ A, je na obrázku 58. V tomto případě lze tvrdit, že svar je velmi kvalitní. Při bližším pozorování nejsou patrné žádné vady, ať už vnitřní nebo geometrické, a svar je velmi dobře provařen.

Díky hoření elektrického oblouku došlo k natavení hran obou plechů, což je velmi žádoucí efekt. Hrany jsou po natavení oblé, což snižuje riziko vzniku trhlin při tvářecí operaci, neboť ostré hrany by mohly působit jako vruby. Při porovnání s výbrusem, který byl odebrán ze svařence zhotoveného pouze laserem, je patrné, že v tomto případě je přechod mezi nestejně širokými plechy daleko pozvolnější (bez vrubů nebo zápalů). Na druhou stranu je tento svar oproti vzorku A0,7B1,25/0 A mírně širší a vlivem vyšších hodnot vneseného tepla je také zvětšena jeho TOO (příloha 5, strana 2).



Obr. 58 Makrostruktura svaru A0,7B1,25 / 20 A.

Ze svařenců typu A0,7B1,25 (ze svaru č. 9) byl jako poslední posuzován ten, který byl svařen technologií LATIG s $I_{TIG} = 40$ A (obr. 59). Ani u tohoto vzorku nebyly objeveny žádné vnitřní vady. Svar disponuje dobrým průvarem a je opět patrný vliv technologie TIG, jelikož jsou hrany plechů oblé a přechod mezi svařovaným materiálem je plynulý bez vrubů či zápalů.

Při posuzování jeho geometrie byl však zjištěn nepřipustný krápníček (příloha 5, strana 3). Pro dané rozměry svařovaných TWB by měl být maximální rozměr krápníčku do 0,1 mm, u tohoto svaru však nabývá hodnot 0,16 mm. Dle normy se jedná o nesplnění požadavků, a tedy o nepřipustnou vadu, která by mohla mít nežádoucí vliv na následnou tvářecí operaci. Dále lze pozorovat značné rozšíření svarového spoje i TOO oproti předchozím vzorkům, což je způsobeno dalším navýšením vneseného tepla do svarového spoje. V porovnání s předchozími hodnocenými vzorky došlo tedy k natavení daleko většího množství základního materiálu.



Obr. 59 Makrostruktura svaru A0,7B1,25 / 40 A.

Souhrn naměřených šířek svarových spojů a maximálních velikostí TOO je zobrazen v tabulce 13. Je patrné, že s rostoucím vneseným teplem dochází k rozšiřování svarového spoje i tepelně ovlivněné oblasti, což se dalo předpokládat.

Tab. 13 Charakteristiky makrostruktury svarového spoje A0,7B1,25 [příloha 5].

Typ svařenců	Svařovací proud I_{TIG} [A]	Číslo svaru [-]	Šířka hlavy svaru [mm]	Šířka paty svaru [mm]	Šířka TOO pro A0,7 [mm]	Šířka TOO pro B1,25 [mm]	Vnesené teplo Q_{sc} [$J \cdot mm^{-1}$]
A0,7B1,25	0	1	1,5	1,1	0,2	0,4	22,8
	20	6	1,7	1,2	0,4	0,6	35,1
	40	9	2,0	1,8	0,7	0,7	44,6

V celkovém souhrnu byl z hlediska makrostruktury svařenců A0,7B1,25 nejkvalitnější vzorek ze svaru č. 6, který byl svařený $I_{TIG} = 20$ A. Tento výbrus je naprosto vyhovující, bez nejmenších vnitřních nebo geometrických vad a s velmi plynulým přechodem mezi plechy. Malou nevýhodou jsou větší rozměry svaru i TOO oproti použití čistě laserové technologie.

Dále lze tedy tvrdit, že vzorek ze svaru A0,7B1,25 č. 1 svařený čistě laserovou technologií ($I_{TIG} = 0$ A) je také vyhovující. Disponuje nejužším svarem s nejmenší TOO ze všech vzorků. Na druhou stranu laserový paprsek sám o sobě nedokáže zajistit tak plynulý přechod mezi plechy a nenataví jejich hrany jako je tomu u vzorků svařených technologií LATIG.

Poslední vzorek svařený $I_{TIG} = 40$ A byl vlivem nepřijatelného krápníčku v oblasti kořene svaru vyhodnocen jako nevyhovující. Sice je zde také patrný plynulý přechod mezi plechy s oblými hranami, ale vlivem téměř dvojnásobného vneseného tepla do svaru došlo ke značnému rozšíření spoje (zejména v oblasti kořene) i jeho TOO. Z hlediska makrostruktury svařenců typu A0,7B1,25 se tato varianta návrhu svařovacích parametrů jeví jako nejméně vhodná.

Následně byly posuzovány vzorky ze svařenců typu A1,2B0,8. Jako první byl hodnocena struktura výbrusu, který byl odebrán ze svaru č. 20 svařeného čistě laserovou technologií, tedy $I_{TIG} = 0$ A (obr. 60). Tento svar disponuje přijatelným průvarem a je bez zápalů, pórů, trhlin, nebo jiných vnitřních vad, ovšem z hlediska jeho geometrie je zcela nevyhovující.



Obr. 60 Makrostruktura svaru A1,2B0,8 / 0 A.

Nejprve bylo prověřeno podezření na nedostatečný příčný průřez svarů. Dle normy nesmí být vlivem defektů hodnota zbylého příčného průřezu svaru menší než 0,56 mm (stanoveno dle tloušťky tenčího z plechů). V tomto případě byla změřená tloušťka zbylého průřezu rovna 0,63 mm (příloha 5, strana 4), což je hodnota ještě vyhovující. Dále byla hodnocena velikost vydutosti vrchního svaru. Ta může dosahovat v krajních případech až 0,1 mm, ovšem u tohoto vzorku byla změřená vydutost rovna 0,135 mm. Na závěr proběhla kontrola pozitivního nesprávného spojení v oblasti kořene svaru, která také nevyhovovala. Norma předepisuje maximální velikost 0,2 mm, u tohoto vzorku však byla 0,213 mm.

Zároveň je při pohledu na makrostrukturu tohoto svaru patrné, že čistě laserový paprsek opět není schopný natavit hrany svařovaných plechů, které jsou tak velmi ostré. Přechod mezi plechy s různou tloušťkou není vlivem vad pozvolně návazný.

Makrostruktura vzorku odebraného ze svařence A1,2B0,8 (ze svaru č. 22), který byl svařený technologií LATIG s $I_{TIG} = 20$ A je na obrázku 61. Jedná se o svar s velmi kvalitní makrostrukturou a dobrým průvarem. I v tomto případě nejsou znatelné žádné vnitřní vady.

Z hlediska vad geometrie svaru došlo k posouzení pozitivního nesprávného spojení v oblasti kořene svaru. V tomto případě je ovšem jeho hodnota pouze 0,099 mm, tudíž je daná vada bezpečně v toleranci (max. velikost je 0,2 mm) a svar je naprosto vyhovující.

Stejně jako u vzorku A0,7B1,25 / 20 A je i u tohoto vzorku patrný vliv elektrického oblouku. Hrany obou plechů jsou oblé a přechod mezi plechy je plynulý bez vrubů nebo zápalů. Vlivem většího tepla vneseného do svarového spoje je tento svar oproti vzorku A0,7B1,25 / 0 A mírně širší a je také zvětšena jeho TOO (příloha 5, strana 5).



Obr. 61 Makrostruktura svaru A1,2B0,8 / 20 A.

Posledním hodnoceným byl vzorek A1,2B0,8 svařený technologií LATIG s $I_{TIG} = 40$ A (ze svaru č. 25, obr. 62). Ve struktuře opět nejsou žádné viditelné vnitřní vady a svar je dostatečně provařen. Z hlediska geometrie svaru došlo ke kontrole negativního nesprávného spojení. Jeho maximální hodnota by měla být dle normy do 0,1 mm. Jelikož byla změřena velikost negativního nesprávného spojení 0,079 mm (příloha 5, strana 6), může být vzorek brán jako vyhovující. V oblasti kořene svaru je také znatelná malá proláklina, která ovšem na kvalitu spoje nemá vliv. Přechod mezi plechy je velmi pozvolný (téměř přímkového charakteru) bez vrubů či zápalů.



Obr. 62 Makrostruktura svaru A1,2B0,8 / 40 A.

Vlivem velkého vneseného tepla do svaru je šířka svaru vzorku A1,2B0,8 / 40 A v porovnání s předchozími vzorky typu A1,2B0,8 výrazně širší, zároveň došlo i ke značnému zvětšení TOO. Souhrn měřených hodnot šířek svarových spojů a maximálních velikostí TOO je zobrazen v tabulce 14. Je opět patrné, že s rostoucím vneseným teplem dochází k rozšiřování svarového spoje i tepelně ovlivněné oblasti.

Tab. 14 Charakteristiky makrostruktury svarového spoje A1,2B0,8 [příloha 5].

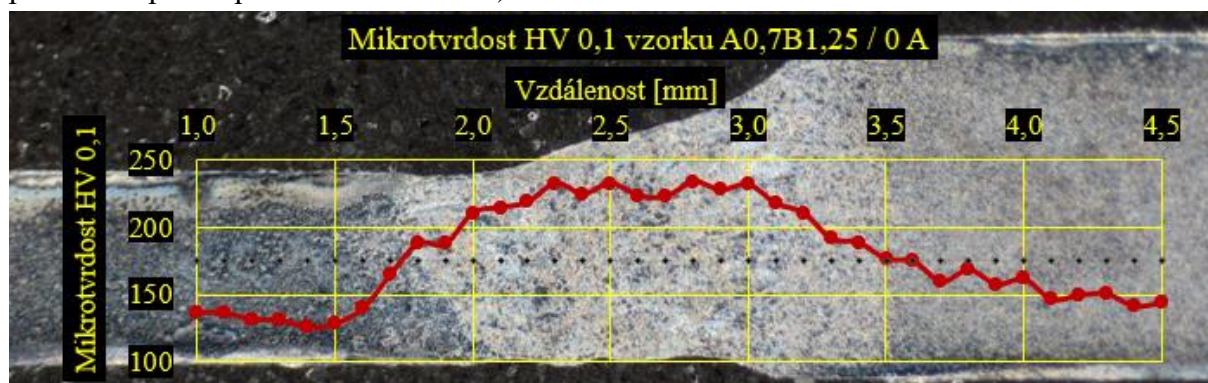
Typ svařenců	Svařovací proud I_{TIG} [A]	Číslo svaru [-]	Šířka hlavy svaru [mm]	Šířka paty svaru [mm]	Šířka TOO pro A1,2 [mm]	Šířka TOO pro B0,8 [mm]	Vnesené teplo Q_{Sc} [$J \cdot mm^{-1}$]
A1,2B0,8	0	20	1,0	1,0	0,3	0,3	22,8
	20	22	1,2	1,2	0,5	0,5	32,1
	40	25	2,1	1,5	0,7	0,6	43,3

Při porovnání jednotlivých vzorků ze svařenců typu A1,2B0,8 se jeví jako kvalitnější svary zhotovené technologií LATIG. Tyto výbrusy jsou bez závažných geometrických či strukturních vad a disponují dobrým průvarem. Svar zhotovený $I_{TIG} = 20$ A je znatelně užší a menší je i jeho tepelně ovlivněná oblast než v případě svařence, který byl zhotoven svařovacím proudem $I_{TIG} = 40$ A. Na druhou stranu je přechod mezi plechy v případě vzorku A1,2B0,8 / 40 A pozvolnější a jeho hrany jsou oblejší. Makrostruktura svaru, který byl svařen čistě laserovou technologií, byla shledána jako nevyhovující. Sice u tohoto vzorku nebyly objeveny žádné vnitřní vady a svar je nejužší s nejmenší TOO, vyskytlo se zde ovšem několik neakceptovatelných geometrických vad (pozitivní nesprávné spojení a vydutost svaru), jejichž naměřené hodnoty jsou dle normy ČSN EN 10359 nepřijatelné.

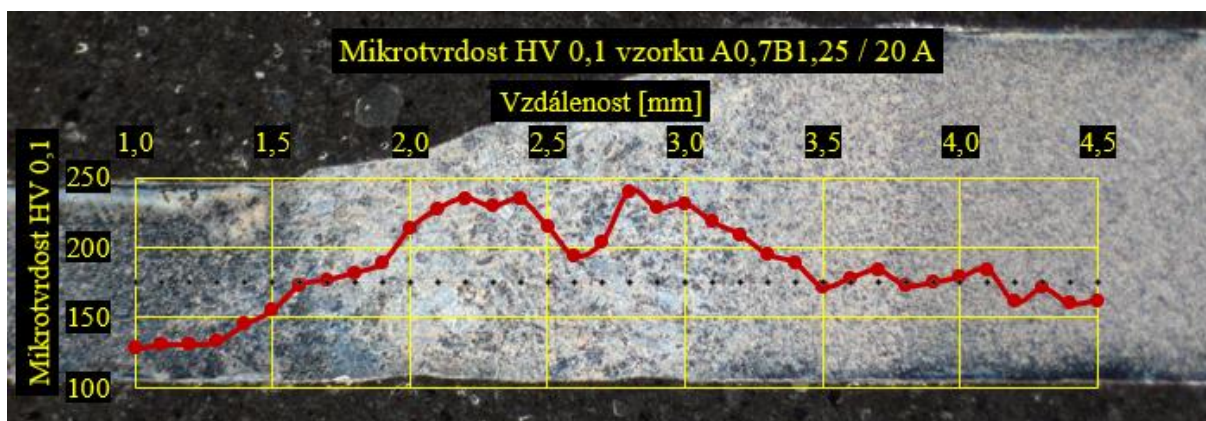
5.5.2 Hodnocení mikrotvrdomosti a mikrostruktury [79]

Pro posouzení mikrotvrdomosti a mikrostruktury posloužily stejné vzorky, které byly použity pro zhodnocení makrostruktury svarového spoje. Nejprve byla tedy zkoumána mikrotvrdomost daných výbrusů. K provedení experimentu byl využit automatický přístroj LECO LM 247AT, který patří mezi vybavení Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT v Brně. Vzhledem k rozměrům zkoušeného svaru bylo zvoleno měření dle Vickerse při zatížení 100 g, tedy HV0,1 a zatlačování indentoru trvalo vždy 10 s. U každého vzorku bylo provedeno 60 měření se vzdáleností mezi jednotlivými kroky o velikosti 0,1 mm. Díky tomu byla velmi detailně změřena mikrotvrdomost v oblasti základního materiálu, TOO i svarového kovu, aniž by došlo ke vzájemnému ovlivnění jednotlivých vtisků. Linie měření byla umístěna přibližně ve středu tloušťky tenčího z plechů.

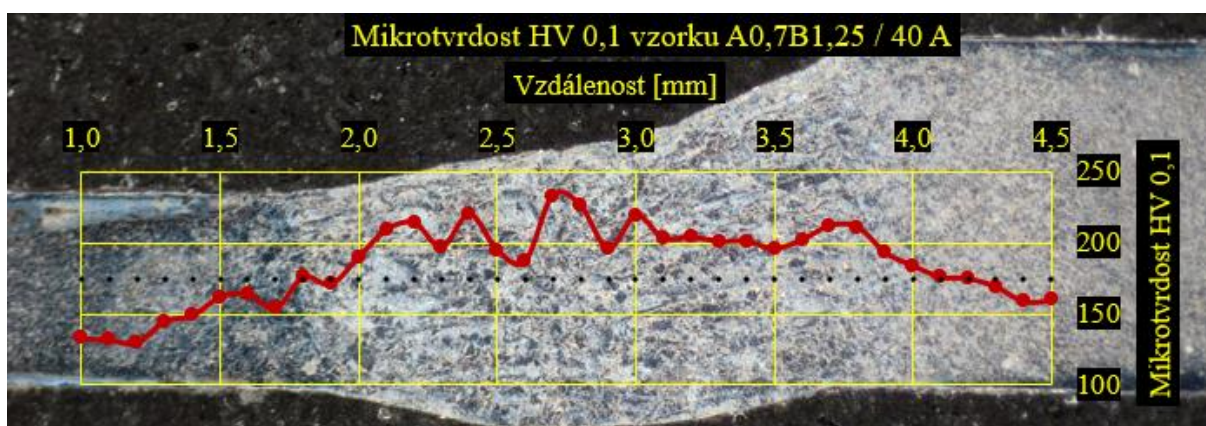
Nejprve byly hodnoceny vzorky ze svařenců typu A0,7B1,25. Výsledky měření mikrotvrdomosti jsou zobrazeny na obrázcích 63 až 65 (černé kosočtverečky znázorňují přibližnou pozici provedeného měření).



Obr. 63 Průběh mikrotvrdomosti svaru A0,7B1,25 / 0 A.



Obr. 64 Průběh mikrotrvdosti svaru A0,7B1,25 / 20 A.



Obr. 65 Průběh mikrotrvdosti svaru A0,7B1,25 / 40 A.

Z naměřených hodnot byla nejprve určena tvrdost tepelně neovlivněných základních materiálů A0,7 a B1,25, která činila 132 ± 4 HV_{0,1} pro A0,7 a 151 ± 6 HV_{0,1} pro B1,25. Poté došlo ke stanovení střední hodnoty tvrdosti ve svarovém kovu. Naměřené údaje jsou uvedeny v tabulce 15.

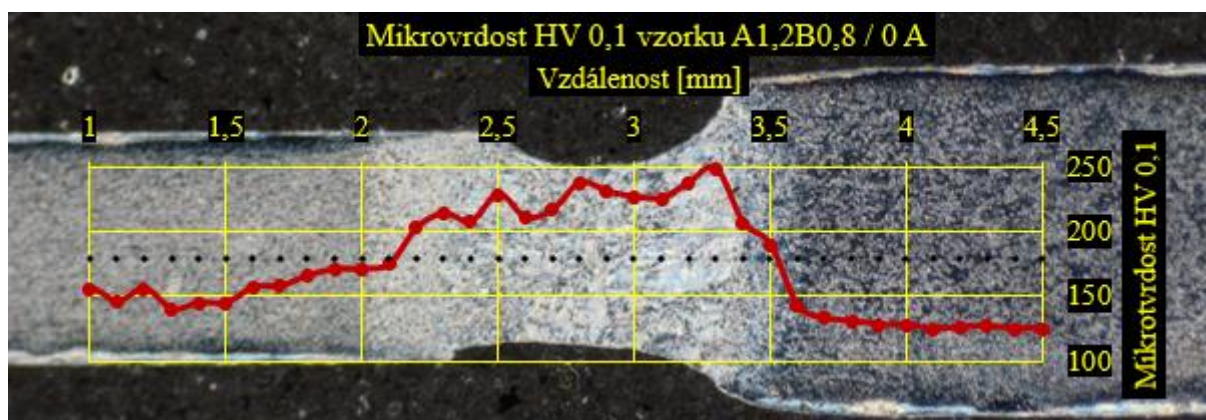
Tab. 15 Mikrotrvdost ve svarovém kovu vzorků A0,7B1,25.

Typ svařenců	A0,7B1,25 / 0 A	A0,7B1,25 / 20 A	A0,7B1,25 / 40 A
Mikrotrvdost HV 0,1	217 ± 14	214 ± 18	206 ± 12

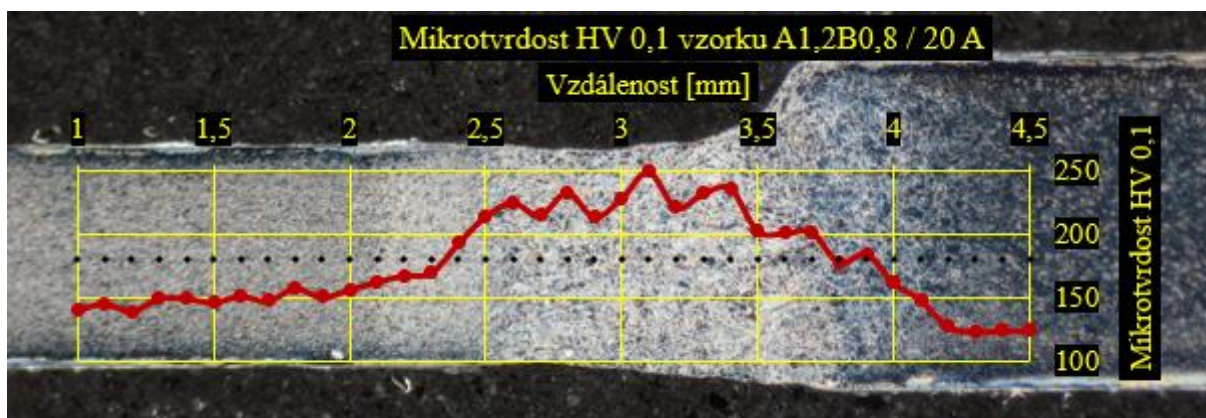
Z přiložené tabulky je patrné, že střední hodnoty naměřené mikrotrvdosti jsou u jednotlivých vzorků téměř totožné. Mírný pokles hodnot mikrotrvdosti vzorků zhotovených technologií LATIG mohl být způsoben pomalejším ochlazením (díky předeřevu v podobě elektrického oblouku), čímž se zvýšila pravděpodobnost vzniku feritu.

Dále lze z experimentu usoudit, že se ve svarovém kovu ani v TOO nevyskytují martenzitické struktury, jelikož by v tom případě byly hodnoty tvrdosti znatelně vyšší. U vzorku A0,7B1,25 / 0 A je možné pozorovat prudší nárůst tvrdosti mezi základním materiálem a svarovým kovem oproti vzorkům zhotovených technologií LATIG, což je ovšem způsobeno užší tepelně ovlivněnou oblastí. Dále je možné vidět, že u výbrusů svařených technologií LATIG dochází ve svarovém kovu k náhlým skokovým změnám mikrotrvdosti (například u vzorku A0,7B1,25 / 20 A v oblasti 2,4 až 2,8 mm). Tento fakt může být způsoben tím, že měření bylo provedeno v oblasti, kde ve struktuře lokálně převládá ferit. Naopak v místech s nejvyšší tvrdostí svarového kovu mohl být zvýšený obsah jehlicovitého bainitu.

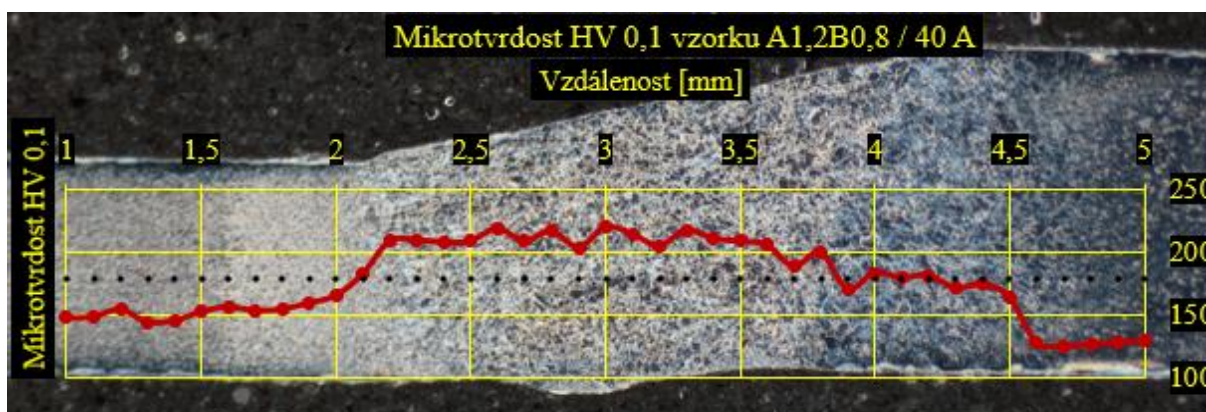
Při posuzování mikrotvrdości vzorků typu A1,2B0,8 byly zjištěny velmi podobné výsledky jako v případě předchozí sady. Jednotlivé průběhy mikrotvrdości těchto výbrusů jsou uvedeny na obrázcích 66 až 68.



Obr. 66 Průběh mikrotvrdości svaru A1,2B0,8 / 0 A.



Obr. 67 Průběh mikrotvrdości svaru A1,2B0,8 / 20 A.



Obr. 68 Průběh mikrotvrdości svaru A1,2B0,8 / 40 A.

Z naměřených hodnot byla opět nejprve určena tvrdość v tepelně neovlivněných základních materiálech, v tomto případě A1,2 a B0,8, která činila 125 ± 4 HV0,1 pro A1,2 a 145 ± 8 HV0,1 pro B0,8. Tyto hodnoty korespondují se základními materiály předešlé sady vzorků. Poté došlo ke stanovení střední hodnoty tvrdosti ve svarovém kovu. Naměřené údaje jsou uvedeny v tabulce 16.

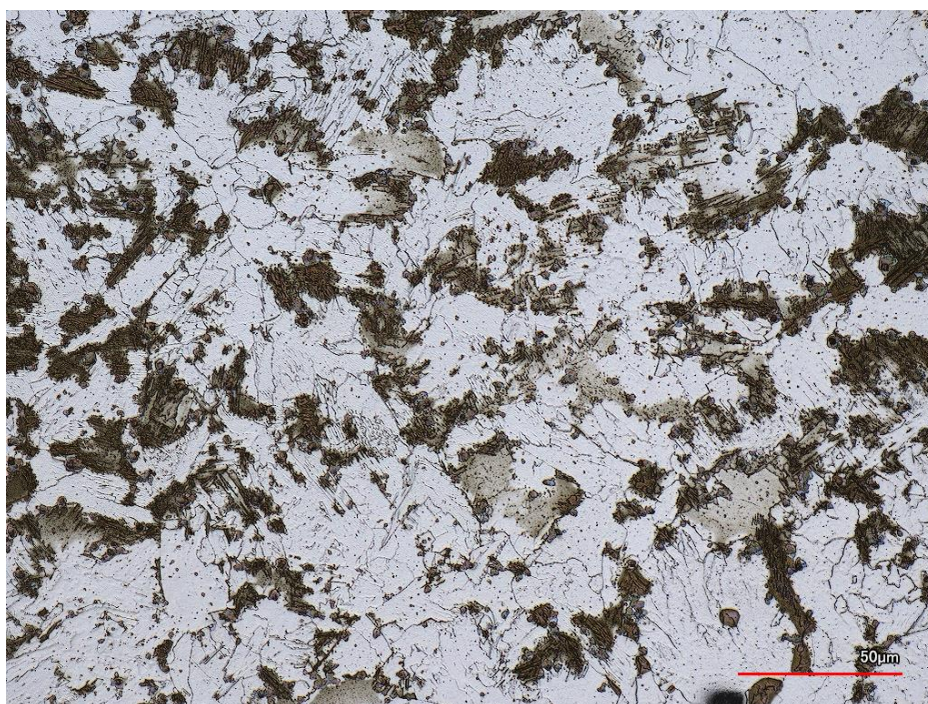
Tab. 16 Mikrotvrdoost ve svarovém kovu vzorků A1,2B0,8.

Typ svařenců	A1,2B0,8 / 0 A	A1,2B0,8 / 20 A	A1,2B0,8 / 40 A
Mikrotvrdoost HV 0,1	220±16	219±15	210±8

Při porovnání hodnot z tabulek 15 a 16 je patrné, že vzorky typu A1,2B0,8 disponují mírně vyššími středními hodnotami mikrotvrdoosti než výbrusy typu A0,7B1,25, což je ovšem zanedbatelné. Dále lze pozorovat podobný trend v chování mikrotvrdoosti v závislosti na svařovacím proudu. I u této sady vzorků platí, že se zvyšující se hodnou I_{TRG} dochází k mírnému poklesu mikrotvrdoosti ve svarovém kovu. Dle získaných dat je možné opět tvrdit, že ve svarovém kovu nebo TOO vzorků typu A1,2B0,8 se nepředpokládá výskyt martenzitu. U vzorku A1,2B0,8 / 40 A je zřejmý poměrně konstantní průběh hodnot mikrotvrdoosti v oblasti svarového kovu, které jsou v porovnání s dalšími vzorky obecně nižší, což by mohlo být opět přisouzeno pozitivnímu vlivu elektrického oblouku jakožto přehřevu.

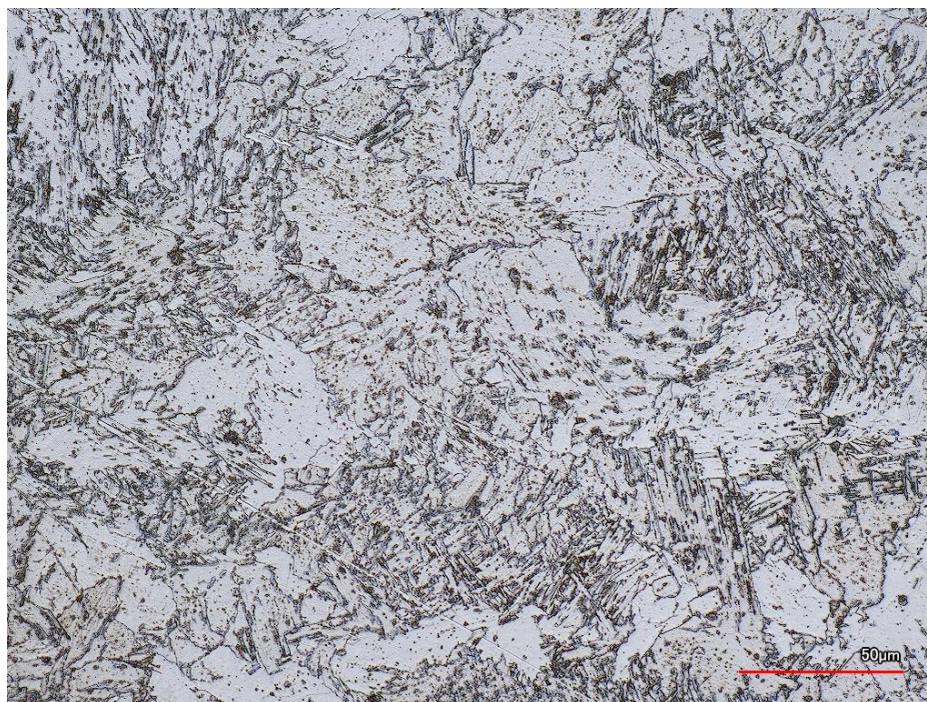
V souhrnu lze konstatovat, že u vzorků typu A0,7B1,25 i A1,2B0,8 nejsou shledány žádné výrazné výkyvy mikrotvrdoosti v závislosti na svařovacím proudu. Samozřejmě se zvyšujícím se vneseným teplem se oblast svaru (svarový kov i TOO) rozšiřuje, tudíž se zvětšuje i interval, ve kterém dochází k naměření vyšších hodnot tvrdosti, což se ovšem dalo předpokládat. Zároveň je dle tohoto měření pravděpodobné, že se ve svarovém kovu nebo TOO neobjevují žádné extrémně křehké a tvrdé strukturní složky.

Pro ověření uvedených domněnek bylo provedeno pozorování mikrostruktury jednotlivých vzorků. To proběhlo v prostorách ÚPT AV ČR v Brně. Struktury jednotlivých vzorků i základních materiálů byly po naleptání nitalem (doba leptání 8 s) následně snímány laserovým skenovacím konfokálním mikroskopem Keyence CK-X 1000. Směrodatné měřítko je vždy uvedeno na dané fotografii mikrostruktury. V příloze 6 jsou uvedeny charakteristické snímky mikrostruktury obou základních svařovaných materiálů. Tyto obrázky ukazují, že se jedná o materiály s převážně feritickou strukturou (minimální obsah perlitu), velmi jemným zrnem a s rovnoměrně rozmístěnými mikrolegujícími prvky, což jsou typické charakteristiky ocelí typu HSLA.

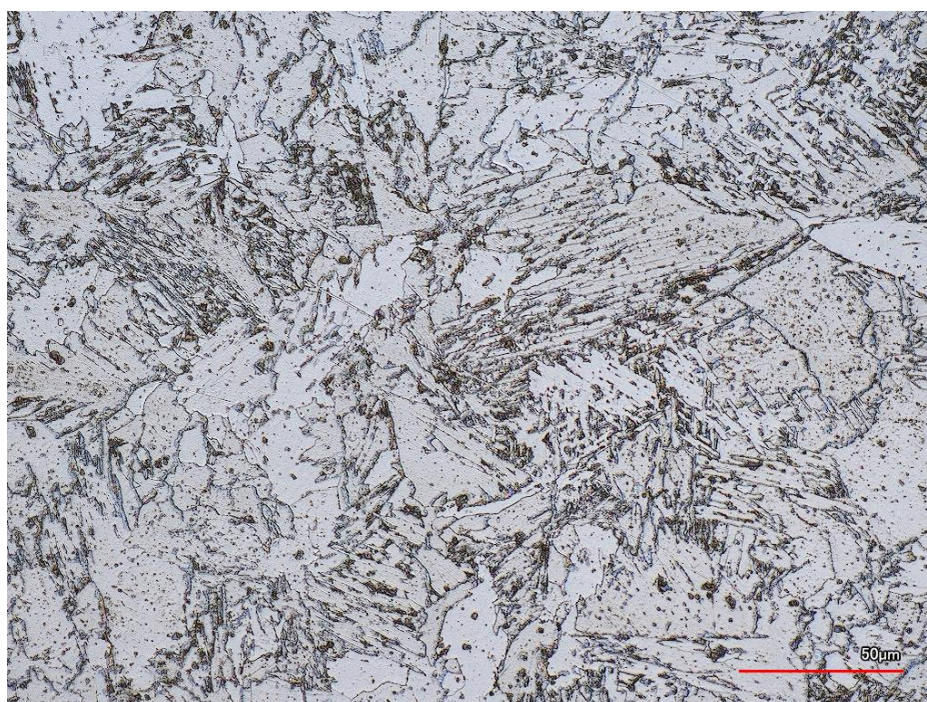


Obr. 69 Mikrostruktura svarového kovu vzorku A0,7B1,25 / 0 A.

Na obrázcích 69 až 71 je zobrazena mikrostruktura vzorků typu A0,7B1,25. Je patrné, že hlavní strukturní složkou je dle předpokladů ferit. Dále je poměrně hojně zastoupený jehlicovitý bainit a místy se vyskytují malé ostrůvky perlitu. Lze pozorovat, že u vzorků svařených technologií LATIG je větší zastoupení jehlicovitého bainitu ve struktuře než u technologie čistě laserové. Bohužel vzorek A0,7B1,25 / 0 A se nepodařilo dokonale zhotovit, černé skvrny představují pravděpodobně zbytky leptadla, ovšem i tak je možné pozorovat převládající feritickou strukturu.

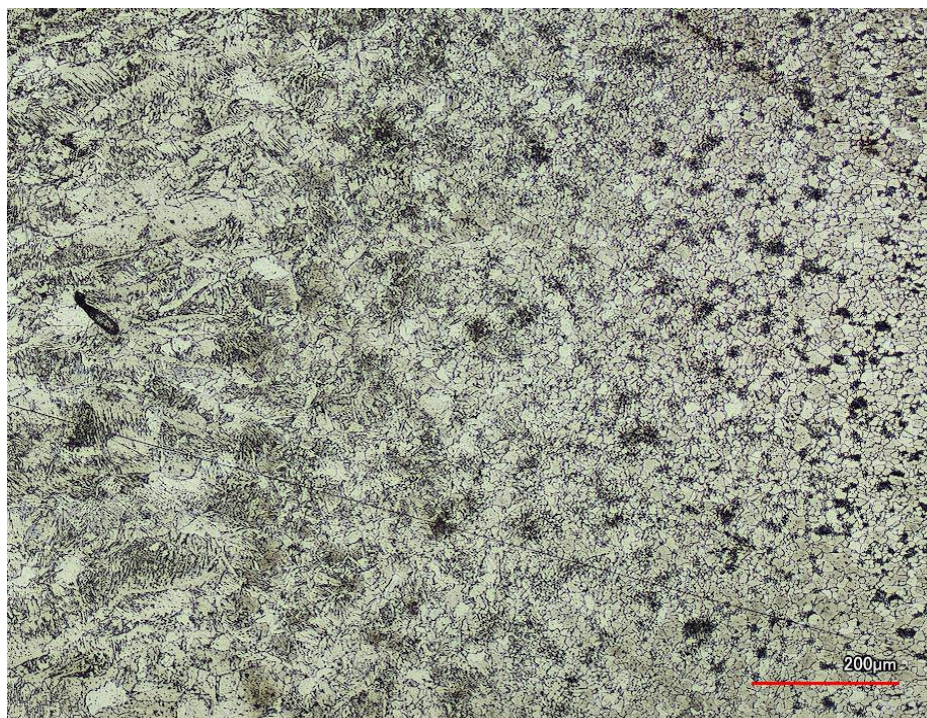


Obr. 70 Mikrostruktura svarového kovu vzorku A0,7B1,25 / 20 A.

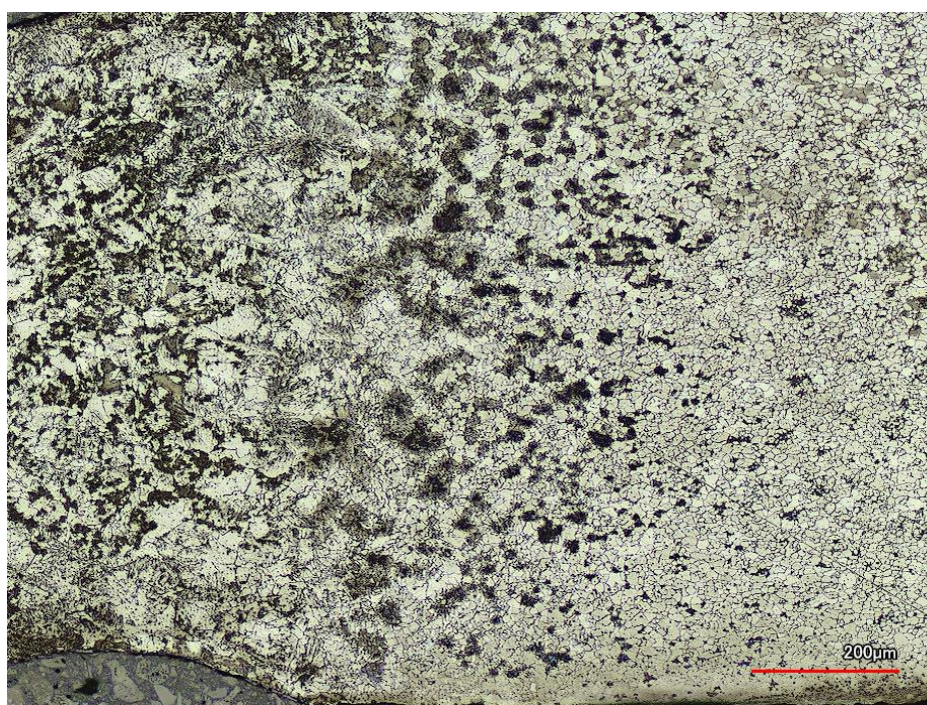


Obr. 71 Mikrostruktura svarového kovu vzorku A0,7B1,25 / 40 A.

Jelikož při Erichsenově testu docházelo u vzorků typu A0,7B1,25 / 40 A k velmi častému praskání v TOO svaru, byla tato oblast detailněji prozkoumána. Z uvedeného snímku (obr. 72) je znatelné značné zhrubnutí zrna ve zmiňované TOO oproti základnímu materiálu (tj. jemnozrná struktura v pravé části snímku). Dále lze na hranici mezi SK a TOO, tedy v oblasti částečného natavení kovu a přehřáté oblasti, vidět poměrně velké množství jehlicovitých struktur, což pravděpodobně přispělo k praskání právě v této oblasti. Pro porovnání je uveden podobný snímek i pro vzorek A0,7B1,25 / 0 A (obr. 73), na kterém právě ve zmiňované přechodové oblasti mezi SK a TOO výraznější podíl jehlicovité struktury není. Zároveň je zrno svarového kovu u tohoto výbrusu výrazně menší.

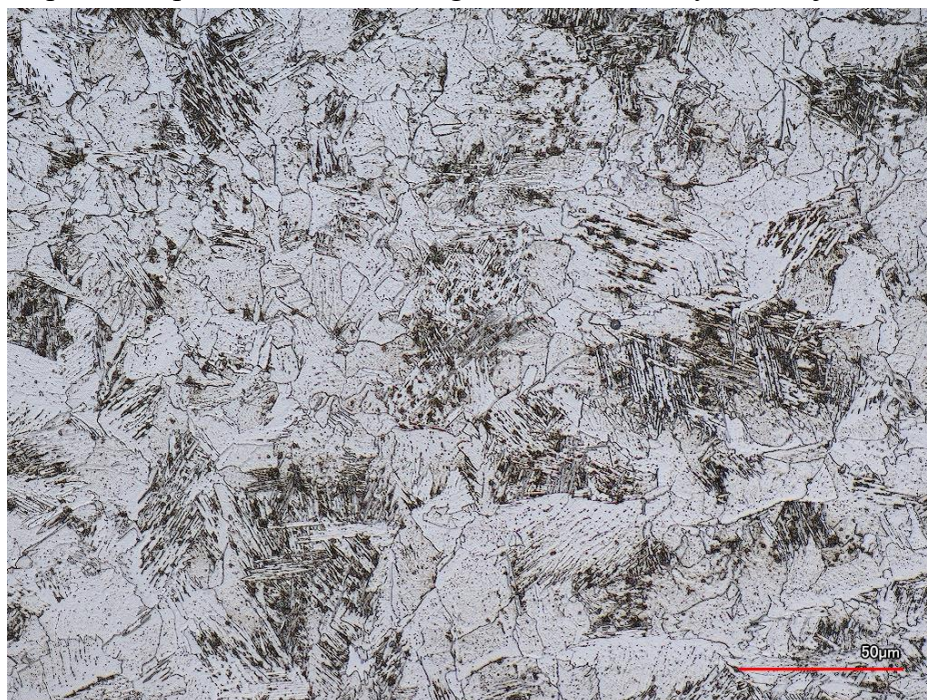


Obr. 72 Mikrostruktura svarového kovu, TOO i ZM vzorku A0,7B1,25 / 40 A.

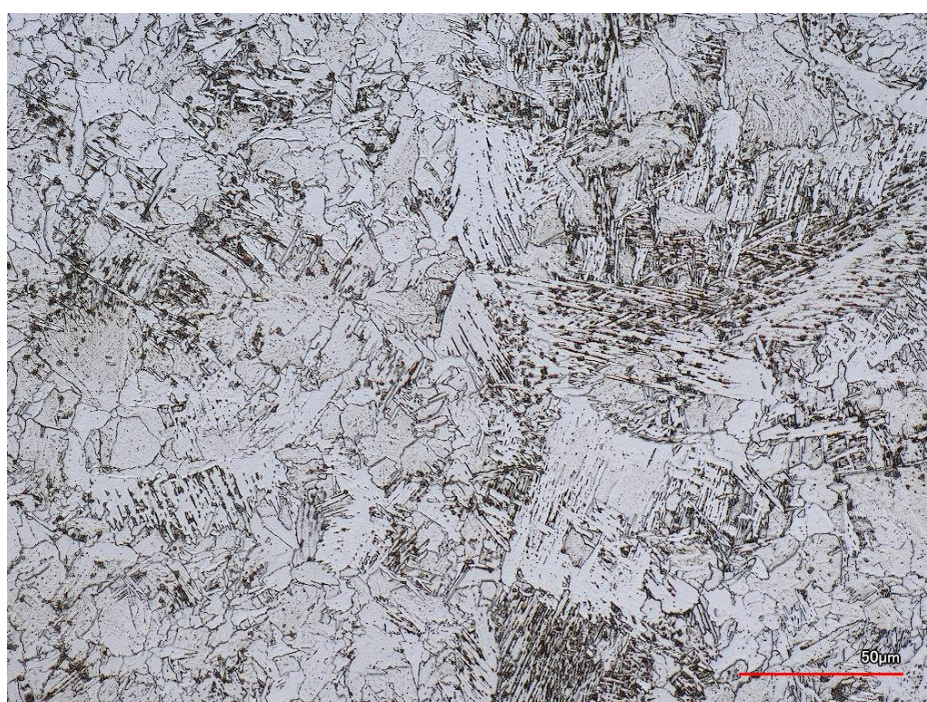


Obr. 73 Mikrostruktura svarového kovu, TOO i ZM vzorku A0,7B1,25 / 0 A.

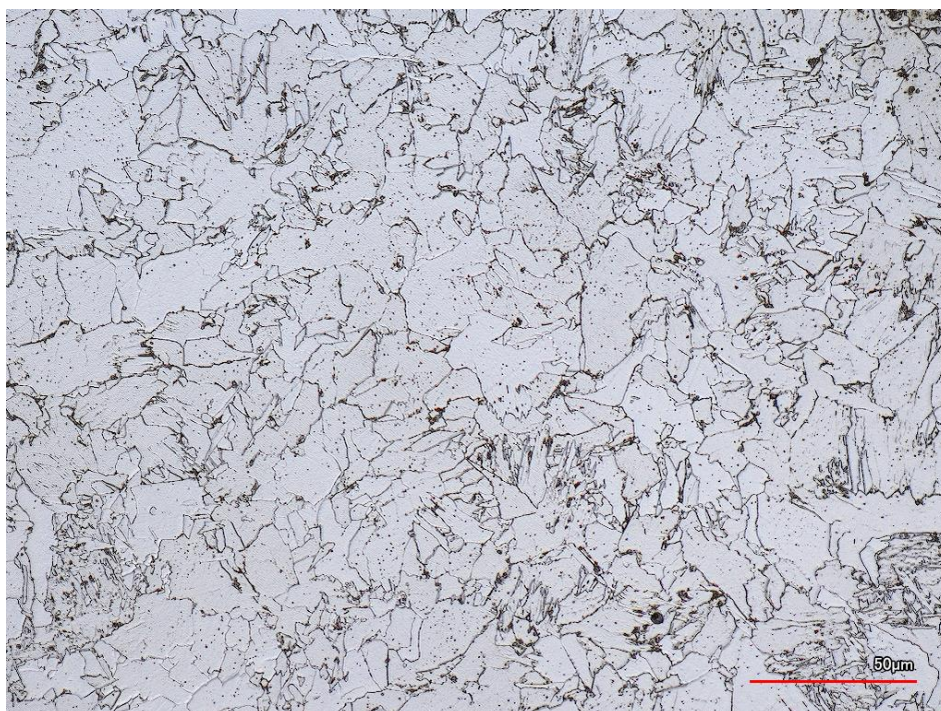
Na obrázcích 74 až 76 jsou zobrazeny mikrostruktury svarových kovů vzorků typu A1,2B0,8. Struktura je opět tvořena převážně feritem, určitý podíl má i jehlicovitý bainit a minimálně se vyskytují ostrůvky perlitu. Zajímavostí je, že u této sady vzorků má množství bainitu ve struktuře zcela opačný trend v závislosti na svařovacím proudu. U vzorků typu A0,7B1,25 docházelo s růstem I_{TIG} (tedy s růstem vneseného tepla) k většímu výskytu jehlicovité struktury ve svarovém kovu. Naopak u sady vzorků typu A1,2B0,8 se u vzorku A1,2B0,8 / 40 A bainit téměř nevyskytuje. Tento fakt koresponduje i s hodnotami naměřené tvrdosti, přičemž u výbrusu A1,2B0,8 / 40 A byl pokles mikrotvrdosti poměrně patrný. Pro potvrzení této domněnky by však bylo nutné zhotovit a prozkoumat větší oblasti svarového spoje, jelikož přiložené poměrně detailní fotografie SK mohou být zavádějící.



Obr. 74 Mikrostruktura svarového kovu vzorku A1,2B0,8 / 0 A.



Obr. 75 Mikrostruktura svarového kovu vzorku A1,2B0,8 / 20 A.



Obr. 76 Mikrostruktura svarového kovu vzorku A1,2B0,8 / 40 A.

5.6 Technicko-ekonomické zhodnocení [80], [81]

Z předchozích zhodnocení vyplynuly jako nejkvalitnější svary zhotovené technologií LATIG s nastaveným svařovacím proudem $I_{TIG} = 20$ A. Bylo ovšem také důležité posoudit, jaké jsou pořizovací náklady na zařízení pro svařování čistě laserovou technologií a zařízení pro hybridní metodu LATIG. Dále bylo nutné vypočítat a porovnat provozní náklady na svařování. Tyto výpočty sloužily pouze jako orientační, jelikož například pořizovací náklady na zařízení se mohou lišit v závislosti na objemu zakázky (při objednání většího počtu zařízení může firma získat množstevní slevu). Kalkulace se odvíjela od nákladů, které posloužily k nákupu zmiňované techniky pro Ústav přístrojové techniky AV v Brně. Jelikož v této práci nebyla řešena určitá svařovaná součást, jevila se jako nejoptimálnější kalkulace ceny vztažená k délce svarového spoje.

Nejprve bylo nezbytné stanovit předpokládaný počet odpracovaných hodin za jeden kalendářní rok. V kalendářním roce je přibližně 250 pracovních dní (pětidenní pracovní týden), musí se ovšem uvažovat i nárok obsluhy zařízení na řádnou dovolenou. Průměrný provoz zařízení se tedy stanovil na 230 dní v roce za předpokladu 4 týdnů dovolené. Bylo bráno v úvahu využití svařovací techniky ve 2 směnném provozu po 8 pracovních hodinách. Bylo ovšem nutné zohlednit nárok pracovníka na přestávku, a proto se v ideálním případě dalo počítat maximálně se 7,5 hodinami plného využití zařízení za jednu směnu. Celkem bylo tedy počítáno s 3450 pracovními hodinami za jeden kalendářní rok. Samozřejmě je možné ve dvousměnném provozu využít přesčasů, to ovšem v tomto případě není bráno v potaz.

Doba odpisů byla stanovena na 5 let. Do ceny zařízení buňky pro laserové svařování byly započteny náklady na laserový zdroj IPG YLS-2000, laserovou svařovací hlavu, polohovacího robota IRB 2400/16, bezpečnostní prvky, montáž, demontáž apod. Cena zařízení laserového pracoviště byla orientačně vyčíslena na 8 mil. Kč. Hodnota svařovacího zdroje MagicWave 1700 Job s příslušenstvím byla stanovena na 40 000 Kč.

Dále bylo potřeba vypočítat náklady na spotřebu elektrické energie, ochranných plynů a náklady na mzdu operátora svařovací buňky. Uvažovaný příkon laserového zdroje byl 6 kW a příkon TIG zdroje byl určen jako 1,2 x výkon při svařovacích parametrech $I_{TIG} = 20$ A

a $U_{TIG} = 19 \text{ V}$ (tyto údaje vychází z předchozí části experimentu viz podkapitola 5.2). Náklady jsou uváděny v jednotkách Kč/hod pro snadnější přepočet na výslednou cenu vztaženou k délce svaru. Vypočtené údaje jsou uvedeny v tabulce 17.

Tab. 17 Nákladovost energií, ochranných plynů a operátora [79].

Cena elektrické energie	5 Kč/kWh	
Náklady na el. energii laseru (příkon 6 kW)	30 Kč/hod	
Náklady na el. energii TIG zdroje (příkon 0,5 kW)	2,5 Kč/hod	
Spotřeba plynu (Ar 4.6, cena 2000 Kč/11,3 m³)	Laser	LATIG
	16 l/min	12 l/min
Náklady na ochranný plyn	169,9 Kč/hod	127,4 Kč/hod
Hrubá mzda operátora	250 Kč/hod	
Náklady na hrubou mzdu operátora + 34 % odvody	335 Kč/hod	

Následně mohlo dojít k určení celkových orientačních nákladů jak pro technologii laserového svařování, tak pro svařování metodou LATIG. Do tohoto výpočtu byly dále zahrnuty náklady na údržbu a náhradní díly (stanoveny dle ÚPT AV ČR), režijní náklady a samozřejmě určitá procenta zisku. Postupný výpočet celkových nákladů za metr svaru je zobrazen v tabulce 18.

Tab. 18 Výpočet celkových nákladů za metru svaru [79].

NÁKLADY	Laser	LATIG
Svařovací zdroj	IPG YLS 2000	IPG YLS 2000 + MagicWave 1700 Job
Polohovací robot	ABB IRB 2400/16	ABB IRB 2400/16
Pořizovací náklady [Kč]	8 000 000	8 040 000
Odpisy (na 5 let) [Kč/hod]	463,8	466,1
Náklady na el. energii [Kč/hod]	30,0	32,5
Náklady na ochran. plyn [Kč/hod]	169,9	127,4
Náklady na operátora [Kč/hod]	335	335
Údržba a náhradní díly [Kč/rok]	170 000	180 000
Údržba a náhradní díly [Kč/hod]	49,3	52,2
Celkové hodinové náklady [Kč/hod]	1048,0	1013,2
Celkové hodinové náklady + 100 % režie + 10 % zisk [Kč/hod]	2305,6	2229
Celkové náklady na 1 m svaru při $v_s = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ [Kč/m]	14,6	14,1
Celkové náklady na 1 m svaru při $v_s = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ + 100 % režie + 10 % zisk [Kč/m]	32,0	31,0

Z uvedené tabulky vyplývá, že nejvyššími hodinovými položkami jsou odpisy, mzda operátora a spotřeba ochranného plynu. Dále je patrné, že zařízení pro technologii LATIG je z hlediska nákladů na pořízení pouze o 0,5 % dražší než zařízení laseru. Určitý nárůst lze sledovat i v případě nákladů na elektrickou energii a na údržbu a náhradní díly. Při porovnání celkových nákladů na 1 m svaru při dané rychlosti svařování ovšem vychází technologie LATIG dokonce o více než 3 % levněji než čistý laser. Tento fakt je způsobem zejména úsporou ochranného plynu, který tvoří značnou část z celkových nákladů. Nižší objem použitého ochranného plynu nemá nežádoucí efekt na kvalitu svařovacího procesu, což lze usoudit z předchozí části výzkumu. Úspora je tedy obhajitelná.

Zároveň by technologie LATIG mohla zajistit další úspory při svařování součástí, které je nutné předehřívat nebo dohřívat. Tyto operace by byly provedeny TIG elektrickým obloukem a ušetřila by se značná suma vyřazením speciálních operací tepelného zpracování. Tím by současně došlo i ke zkrácení výrobního času.

6 ZÁVĚRY

V dnešní době je kladen značný důraz na zkvalitňování a zefektivňování procesu svařování. V této diplomové práci byla nejprve podrobně rozebrána problematika laserového svařování a svařování hybridní laserovou technologií laser-TIG. Dále byly blíže specifikovány metody testování plasticity svarových spojů s důrazem na zkoušku hloubením dle Erichsena a zkoušky určující kvalitu výsledného svaru. Na základě těchto teoretických předpokladů došlo k vypracování navazující experimentální části. Ta byla zaměřena na posouzení vlivu procesních parametrů již zmíněných svařovacích technologií na výslednou plasticitu svarových spojů polotovarů tailor welded blanks (TWB) z materiálů CR210LA-GI40/40 (materiál A, o tloušťce 0,7 a 1,2 mm) a CR240LA-GI50/50-U (materiál B, o tloušťce 0,8 a 1,25 mm). Tyto materiály byly navzájem svařeny v poloze PA v kombinaci A0,7B1,25 a A1,2B0,8.

Uvedené polotovary byly zhotoveny variací procesních parametrů. Nejprve došlo k jejich svaření čistě laserovou technologií (svařovací proud $I_{TIG} = 0$ A) a následně technologií laser-TIG s hodnotami svařovacího proudu I_{TIG} (20 A a 40 A). Ostatní procesní parametry jako svařovací rychlost v_S nebo výkon laseru P_{las} byly během svařovacího procesu konstantní.

Z výsledků experimentu bylo zjištěno, že pro svařování kombinace HSLA ocelí CR210LA-GI40/40 a CR240LA-GI50/50-U je nejvhodnější použití hybridní technologie laser-TIG s nastaveným svařovacím proudem $I_{TIG} = 20$ A. Takto vytvořené svarové spoje jsou kvalitnější a vhodnější pro následnou tvářecí operaci. Toto tvrzení vyplývá zejména z provedené zkoušky hloubením dle Erichsena. Rozdíl byl patrnější u svařenců typu A0,7B1,25. Vzorky A0,7B1,25 / 0 A disponovaly hodnotami prohloubení IE o téměř 11 % nižšími než typu A0,7B1,25 / 20 A. U svařenců A0,7B1,25 / 40 A byl v porovnání s typem A0,7B1,25 / 20 A pokles dokonce o téměř 14 %. U TWB typu A1,2B0,8 nebyl rozdíl v parametru prohloubení IE tak značný jako u předchozí sady, ovšem nejlepších výsledků bylo opět dosaženo při svařování technologií laser-TIG s $I_{TIG} = 20$ A. V porovnání se vzorky typu A1,2B0,8 / 0 A dosahovaly svařence typu A1,2B0,8 / 20 A téměř o 6 % vyšších průměrných hodnot prohloubení IE a oproti A1,2B0,8 / 40 A byl rozdíl o více než 7 %. Zároveň byly všechny vzorky svařené technologií laser-TIG s $I_{TIG} = 20$ A vyhovující z hlediska polohy vzniklé trhliny, podávaly velmi stabilní výsledky a nedocházelo u nich k nežádoucímu znehodnocení jako u ostatních typů vzorků.

Při následném makrografickém šetření bylo zjištěno, že jednou z hlavních příčin zvýšení plasticity svarového spoje bylo působení elektrického oblouku během svařovacího procesu. Ten napomáhal k natavení náběžných hran svařovaných plechů a k jejich zaoblení. Zároveň přispěl k formování plynulého přechodu mezi plechy, což vedlo ke snížení rizika vrubového praskání při následném tvářecím procesu. Při svařovacím proudu $I_{TIG} = 40$ A byl tento jev nejvíce znatelný, ale vlivem téměř dvojnásobného vneseného tepla byly tyto svary velmi široké a docházelo i ke značnému rozšíření TOO, což plasticitu naopak snížilo.

Na závěr bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení. Došlo k porovnání nákladů na zhotovení metru svaru čistě laserovou technologií a hybridní metodou Laser-TIG s $I_{TIG} = 20$ A. Z výpočtů vyplývá, že v tomto ohledu vychází technologie laser-TIG dokonce o více než 3 % levněji než svařování čistým laserem. Tento fakt je způsobem zejména úsporou ochranného plynu, který tvoří značnou část z celkových nákladů. Nižší objem použitého ochranného plynu nemá nežádoucí efekt na kvalitu svařovacího procesu, což lze usoudit z předchozí části výzkumu. Úspora je tedy obhajitelná. Bylo tedy prokázáno, že metoda TIG přiřazená k laserovému paprsku poskytuje velmi levný zdroj energie, který může svařovací proces značně zkvalitnit, aniž by došlo k nárůstu provozních nákladů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [82]

1. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s: il. ISBN 80-85771-81-0.
2. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
3. KRUTINA, Jiří. Laserové aplikace a mechanické značení v oblasti automotive průmyslu. In: *Infocube* [online]. © 2019 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://infocube.cz/cs/laserove-aplikace-a-mechanicke-znacen-v-oblasti-automotive-prumyslu/>
4. 50 years of state of the art welding. In: *Polysoude* [online]. [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.polysoude.com/about-polysoude/>
5. Svařování laserovým paprskem. In: *Trumpf* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/
6. Technologie tailored blanks. In: *MM průmyslové spektrum* [online]. ©2001-2021 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-tailored-blanks>
7. BABIĆ, Zivko a Milan SLJIVIĆ. *Application of tailored blanks in the automotive industry* [online]. 2002 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/268814549_Application_of_tailored_blanks_in_the_automotive_industry
8. Laser welded blanks. In: *ArcelorMittal* [online]. [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: https://automotive.arcelormittal.com/tailored_blanks_home/LWB_home/laser_welded_blanks
9. Resistance seam welding. In: *SCRIBD* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/presentation/307102367/Resistance-seam-welding>
10. MRŇA, Libor. Speciální technologie svařování: Dělení a svařování plazmou, svařování svazkem elektronů. 2021 [přednáška], [cit. 2021-02-14].
11. FLESCHEM, David. EWM presents microplasma plasma welding for materials down to 0.1 millimetres. In: *Market STEEL* [online]. 3. 4. 2019 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://www.market-steel.com/news-details/ewm-presents-microplasma-plasma-welding-for-materials-down-to-0-1-millimetres.html>
12. Electron Beam Welding. *Westermans International Ltd* [online]. 7. 12. 2018 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://www.westermans.com/blog/electron-beam-welding/>
13. The advantages of laser welding: automation, quality, no tool wear. In: *EDI weekly* [online]. © 2021, 1. 10. 2019 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://www.ediweekly.com/the-advantages-of-laser-welding-automation-quality-no-tool-wear/>

14. Technologie GMA a svařování povrchově upravených plechů. In: *MM průmyslové spektrum* [online]. ©2001-2021, 11. 10. 2006 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-gma-a-svarovani-povrchove-upravenych-plechu>
15. Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. In: *MM průmyslové spektrum* [online]. ©2001-2021, 8. 3. 2017 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie>
16. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3167-6.
17. ORSZÁGH, Viktor a Peter ORSZÁGH. *Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, 1998. ISBN 80-88780-21-7.
18. ONDREJČEK, Peter. *Zváranie ocelí v ochrane plynov*. 1. Bratislava: ETERNA PRESS s.r.o, 2003, 203 s. ISBN 80-968359-5-5.
19. ANDERSON, Kenton. Stick vs. MIG vs. TIG: Which Process is Right For You? *Welding supplies from iOC* [online]. © 2020, 25. 2. 2015 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.weldingsuppliesfromioc.com/blog/stick-vs-mig-vs-tig-which-process-is-right-for-you/>
20. Svařování TIG: Seznámení. In: *Svářečky-elektrody.cz* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120>
21. Gas shielded arc welding processes (TIG/MIG/MAG). In: *The Open University* [online]. © 2021, 8. 3. 2018 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/gas-shielded-arc-welding-processes-tig/mig/mag>
22. Svařování TIG: AC nebo DC? In: *Svářečky-elektrody.cz* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-ac-nebo-dc/t-68/t-122>
23. SIGMUND, Marián. Teorie a technologie svařování: Šíření tepla ve svarovém spoji. 2021 [přednáška], [cit. 2021-02-17].
24. OLSON, David a kolektiv autorů. *ASM Handbook. Welding, brazing, and soldering Volume 6*, vyd. Materials Park, Ohio, 2011. ISBN-13978-1-61503-133-7.
25. Svařování TIG: Čisté svary, stabilní spoje. In: *Fronius Perfect Welding* [online]. © 2021 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/svet-svarovani/svaovn-tig>
26. How to assemble TIG torch. In: *Weld-Tech* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <http://weld-tech.co.za/assemble-tig-torch.html>
27. MORAVEC, Jaromír. Teorie svařování a pájení II: Speciální metody svařování. Liberec: TUL, 2008. ISBN 978-80-7372.
28. KANNATEY-ASIBU, Elijah: *Principles of Materials Processing*, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.

29. OLSEN, Flemming Ove. *Hybrid laser-arc welding*. Woodhead Publishing, 2009, 323 s. ISBN 978-1-84569-370-1.
30. MRŇA, Libor. Speciální technologie svařování: Základy laserové technicky. 2021 [přednáška], [cit. 2021-02-26].
31. The advantages of laser welding: automation, quality, no tool wear. In: *EDI weekly* [online]. © 2021, 1. 10. 2019 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://www.ediweekly.com/the-advantages-of-laser-welding-automation-quality-no-tool-wear/>
32. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK: Laserové technológie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.
33. KOŘÁN, Pavel. Základní princip laseru a jejich dělení. *Lasery a Optika* [online]. 19. 2. 2013 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-127>
34. GAMALY, Eugene. Femtosecond laser-matter interaction: Theory, experiments and applications. *ResearchGate* [online]. 2011 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/286168681_Femtosecond_laser-matter_interaction_Theory_experiments_and_applications
35. KOŘÁN, Pavel. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Lasery a Optika* [online]. 19. 2. 2013 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
36. BRUECKNER, Frank, Mirko RIEDE, Michael MÜLLER a Franz MARQUARDT. *Enhanced manufacturing possibilities using multi-materials in Laser Metal Deposition*. *ResearchGate* [online]. 2018 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/325976083_Enhanced_manufacturing_possibilities_using_multi-materials_in_Laser_Metal_Deposition
37. Rozdělení laserů. In: *LASCAM systems* [online]. © 2020, 2. 8. 2015 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
38. Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů. In: *Leonardo technology* [online]. © 2002-2020 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
39. ASHOORI, Vahid, Mahdi SHAYGANMANESH a Saeid RADMARD. Heat Generation and Removal in Solid State Lasers. In: *IntechOpen* [online]. © 2020, 31. 10. 2012 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/an-overview-of-heat-transfer-phenomena/heat-generation-and-removal-in-solid-state-lasers#article-front>
40. STEEN, William. *Laser Material Processing*. 2 ed. London: Springer, 1998, 346 s. ISBN 3-540-76174-8.
41. RATH, Wolfram. Fiber Laser Welding Cuts Costs and Improves Results. *Photonics Media* [online]. © 2021, 2017, [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.photonics.com/a61928>

42. What is a Laser Diode. In: *Electronics Hub* [online]. © 2021, 20. 1. 2018 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/laser-diode-working-structure-types-uses/>
43. DULEY Walter: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4.
44. MRŇA, Libor. Speciální technologie svařování: Technologie využívající laser. 2021 [přednáška], [cit. 2021-03-05].
45. KOŘÁN, Pavel. *Laserové svařování (Laser welding)* [online]. In: . 18. 02. 2013 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
46. SCHULZ, Adrian, Alexander OLOWINSKY, Andreas DOHRN a Reinhart POPRAWE. Laser welding of laser-structured copper connectors for battery applications and power electronics. In: *SpringerLink* [online]. [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-020-00849-8>
47. MRŇA, Libor. Laserové technologie v průmyslové praxi. In: *MM průmyslové spektrum* [online]. © 2001-2021, 11. 02. 2015 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-technologie-v-prumyslove-praxi>
48. XUAN, Ng Ci. A Glimpse of Laser Welding in Additive Manufacturing. In: *Wavelength Opto-eletronic* [online]. © 2021, 26. 08. 2020 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://wavelength-oe.com/blog/laser-welding-in-additive-manufacturing/>
49. Aktuální možnosti v laserovém svařování. In: *MM průmyslové spektrum* [online]. © 2001-2021, 07. 02. 2018 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-moznosti-v-laserovem-svarovani>
50. NOVOTNÝ, Jan. Svařování martenzitické korozivzdorné oceli pomocí hybridní technologie Laser-TIG [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124899>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.
51. KESSE, Martin Appiah. Laser-TIG hybrid welding process. In: *Semantic Scholar* [online]. 2013 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Laser-TIG-hybrid-welding-process-Kesse/e0647839feb71d79f4ba9cfdcd0b07320c6037f>
52. HAVRÁNKOVÁ, Zdeňka. Příručka žárového zinkování. In: Zinkoza a.s. Krompachy [online]. Praha: Asociace českých zinkoven, Asociácia slovenských zinkovní (AČSZ), 2007 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <http://zarova-zinkovna.me.a.cz/upload/ck/files/prirucka-zaroveho-zinkovani.pdf>
53. JULIŠ, Martin. Nízkouhlíkové vysokopevné oceli typu HSLA a AHSS. 2021 [přednáška], [cit. 2021-03-28].
54. Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. *MM průmyslové spektrum* [online]. ©2001-2021, 8. 3. 2017 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie>

55. An Introduction to Mild and High Strength Low Alloy HSLA Steel. *AZO Materials* [online]. © 2000-2021, 28. 11. 2018 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=17290>
56. Volkswagen UP! *CARICOS* [online]. © 2019, 21. 8. 2011 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: https://www.caricos.com/cars/v/vw/2012_volkswagen_up/images/72.html
57. ČSN EN ISO 12932 (050112) A Svařování – Hybridní laserové svařování ocelí, niklu a niklových slitin – Určování stupňů kvality. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
58. Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení. *Česká svářečská společnost* [online]. © 2006-2021, 1. 3. 2012 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
59. SIGMUND, Marián. Teorie a technologie svařování: Zkoušky svařitelnosti, posouzení k náchylnosti k tvorbě trhlin. 2021 [přednáška], [cit. 2021-03-28].
60. Svařitelnost hliníkových slitin. *Česká svářečská společnost* [online]. © 2006-2021, 23. 10. 2015 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=502>
61. PODHORA, Jiří. Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů. Brno: TDS Brno-SMS, 2005, 97 s. ISBN 80-903-3864-X. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:d2183370-0a46-11e8-a0cf005056827e52>
62. KOPEC, Bernard. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV). Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:426bef80-f2e5-11e4-88cd005056827e52>
63. ČSN EN ISO 6892-1 (420310). Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
64. ČSN EN ISO 4136 (051121). Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
65. Charpy Impact Steel Testing: Part One. Total Materia [online]. © 2019, březen 2019 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=ES&NM=534>
66. ČADA, Radek. Tvářitelnost ocelových plechů [online]. Ostrava: Repronis, 2001 [cit. 2021-03-28]. ISBN 978-80-86122-77-9. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:6502cf60-403a-11e2-b246-005056827e52?page=uuid:933bf9f2-62b5-239c-92b9-713be43c82cf>
67. ČSN EN ISO 20482 (42 0406). Kovové materiály – Plechy a pásy – Zkouška hloubením podle Erichsena. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

68. ČSN EN 10359 (42 1002). Laserem svařované předlisky z tenkých ocelových plechů – Technické dodací podmínky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
69. Cupping test to Erichsen (ISO 20482) and Olsen (ASTM E643-84) [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/industries/materials-testing/sheet-metal-forming/cupping-test/erichsen-iso-20482-olsen-astm-e-643-84/>
70. ČSN EN ISO 17639 (051128). Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
71. ČSN EN ISO 17635 (051170) A Nedestruktivní zkoušení svarů – Obecná pravidla pro kovové materiály. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
72. ČSN EN ISO 17637 (051180) A Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
73. Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I: Hodnocení kvality svarového spoje [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/104/def-kontrola-sv.pdf>
74. EBZ Hoffmann s.r.o. [online]. Ostrožská Nová Ves, © 2021 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.kvhoffmann.cz>
75. Micro-alloyed steels: High-strength steels with yield strengths up to 550 MPa. Voestalpine [online]. © 2021, listopad 2020 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.voestalpine.com/stahl/en/Products/Steel-strips/Cold-rolled-steel-strip>
76. Coatings and Surface Quality according VDA 239-100. ESB [online]. © 2021 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.esb-group.com/en/products-vda-239-100-2/coating-surfaces-according-vda239-100/>
77. ČSN EN 10346 (420110). Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky pro tváření za studena – Technické dodací podmínky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
78. ČSN EN 1011-6 (052210) A Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 6: Laserové svařování. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
79. ČSN EN 9015-2 (051134) Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti – Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví, 2018.
80. Argon 4.6, tlaková láhev. Linde Gas a.s. [online]. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.linde-gas.cz/shop/cs/cz-ig/argon-46-tlakov%C3%A1-lahev-260-1>
81. MRŇA, Libor. Ekonomika technologií [online]. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/cviceni/fet_ekonomika_technologii_mrna.pdf
82. CITACE PRO. Generátor citací [online]. 2019 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	koeficient absorpce	[-, ·100 %]
A0,7	materiál CR210LA-GI40/40 o tloušťce 0,7 mm	[-]
A1,2	materiál CR210LA-GI40/40 o tloušťce 1,2 mm	[-]
A0,7B1,25	svařenec z materiálů A0,7 a B1,25	[-]
A1,2B0,8	svařenec z materiálů A1,2 a B0,8	[-]
A ₈₀	tažnost vzorku při výchozí délce L ₀ = 80 mm	[%]
BPP	beam parameter product	[mm·mrad]
B0,8	materiál CR240LA-GI50/50-U o tloušťce 0,8 mm	[-]
B1,25	materiál CR240LA-GI50/50-U o tloušťce 1,25 mm	[-]
CE	uhlíkový ekvivalent dle IIW	[%]
CET	uhlíkový ekvivalent náchylnosti k praskání za studena	[%]
CW	kontinuální režim provozu	[-]
DPSS	tyčové Nd YAG lasery buzené laserovými diodami	[-]
DT	destruktivní metody zkoušek svarových spojů	[-]
D _{1a}	vzdálenost mezi TIG W-elektrodou a laserovým paprskem	[mm]
ET	nedestruktivní zkouška vířivými proudy	[-]
F _m	maximální zatěžovací síla	[N]
FSI VUT	Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně	[-]
GTAW	Gas tungsten arc welding	[-]
HSLA	high-strength low-alloy steel, vysoce pevné mikrolegované oceli	[-]
HSS	high strength steels (vysokopevnostní oceli)	[-]
I	svařovací proud	[A]
I _p	impulsní proudová hladina	[A]
I _{TIG}	svařovací proud technologie TIG	[A]
I _z	základní proudová hladina	[A]
IE	velikost dosaženého prohloubení u Erichsenovy zkoušky	[mm]
IIW	International Institute of Welding (Mezinárodní svařečský institut)	[-]
k	koeficient tepelné účinnosti procesu	[-]
L _u	konečná měřená délka po lomu zkušební vzorku	[mm]
L ₀	počáteční měřená délka vzorku pro tahovou zkoušku	[mm]
LAGTAW	hybridní technologie laserového svařování a technologie TIG	[-]
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation	[-]
Laser-MIG/MAG	hybridní technologie laserového svařování a technologie MIG/MAG	[-]
Laser-TIG	hybridní technologie laserového svařování a technologie TIG	[-]
LATIG	hybridní technologie laserového svařování a technologie TIG	[-]
LED	Light-Emitting Diode	[-]
LPSS	tyčové Nd YAG lasery buzené opticky výbojkami	[-]
MAG	Metal Active Gas	[-]
Materiál A	materiál CR210LA-GI40/40	[-]
Materiál B	materiál CR240LA-GI50/50-U	[-]
MIG	Metal Inert Gas	[-]
MMA	Manual Metal Arc Welding	[-]
MT	nedestruktivní zkouška magnetickým práškem	[-]
Nd YAG	yttrium hlinitý granát dopovaný ionty neodymu	[-]
NDT	nedestruktivní metody zkoušek svarových spojů	[-]
P _{las}	výkon laseru	[W]

Označení	Legenda	Jednotka
PA	poloha svařování vodorovná shora	[-]
PT	nedestruktivní zkouška kapilární	[-]
PW	pulsní režim provozu	[-]
Q_{sC}	celkový tepelný příkon	$[J \cdot mm^{-1}]$
Q_{sLAS}	tepelný příkon laserového zdroje	$[J \cdot mm^{-1}]$
Q_{sTIG}	tepelný příkon technologie TIG	$[J \cdot mm^{-1}]$
R	tahové napětí	[MPa]
RT	nedestruktivní zkouška radiografická	[-]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	smluvní mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
$R_{p0,2}/R_m$	součinitel plastičnosti	[-, ·100 %]
SK	svarový kov	[-]
SLAB	difúzně chlazené CO2 lasery	[-]
TIG	Tungsten Inert Gas	[-]
TIG AC	svařování střídavým proudem technologií TIG	[-]
TIG DC-	přímé zapojení elektrického proudu technologie TIG	[-]
TIG DC +	nepřímé zapojení elektrického proudu technologie TIG	[-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	[-]
TWB	tailor welded blanks	[-]
U	svařovací napětí	[V]
U_{TIG}	svařovací napětí technologie TIG	[V]
UT	nedestruktivní zkouška ultrazvuková	[-]
ÚPT AV ČR	Ústav přístrojové techniky Akademie věd České republiky	[-]
VT	nedestruktivní zkouška vizuální	[-]
v_s	rychlost svařování	$[mm \cdot s^{-1}]$
WIG	Wolfram Inert Gas	[-]
Z	kontrakce	[%]
ZM	základní materiál	[-]
ε	poměrné prodloužení vzorku	[-]
λ	pracovní vlnová délka laseru	$[\mu m, nm]$
η	účinnost laserového zdroje	[%]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Technologie svařování laserovým paprskem [5]	9
Obr. 2 Obloukové svařování technologií TIG [4]	9
Obr. 3 Postup výroby segmentu karoserie [8]	10
Obr. 4 Švové svařování [9]	10
Obr. 5 Svařování plazmou [11]	11
Obr. 6 Svazek elektronů [12]	11
Obr. 7 Svařování laserem [13]	11
Obr. 8 Technologie Laser-TIG	12
Obr. 9 Princip technologie svařování TIG [19]	13
Obr. 10 Přímé zapojení při metodě TIG [21]	15
Obr. 11 Hořák pro svařování technologií TIG [26]	17
Obr. 12 Laserové technologie [31]	18
Obr. 13 Princip absorpce [30]	18
Obr. 14 Princip spontánní a stimulované emise [30]	19
Obr. 15 Odraz paprsku pod úhlem [30]	19
Obr. 16 Šíření paprsku rovnoběžně s optickou osou [30]	19
Obr. 17 Princip laserového zdroje [30]	20
Obr. 18 Základní typy módů [34]	20
Obr. 19 Závislost vlnové délky na koeficientu absorpce [36]	21
Obr. 20 Schéma SLAB laserového zdroje [37]	23
Obr. 21 Konstrukce LPSS laseru s dvojitým eliptickým reflektorem [35]	23
Obr. 22 Konstrukce DPSS laseru [35]	24
Obr. 23 Konstrukce diskového laseru [39]	24
Obr. 24 Průřez optickým vláknem [40]	25
Obr. 25 Schéma vláknového laseru [41]	25
Obr. 26 Schéma diodového laseru [42]	26
Obr. 27 Kondukční režim [46]	27
Obr. 28 Penetrační režim [46]	27
Obr. 29 Schéma svařovací hlavy [48]	28
Obr. 30 Způsoby svařování LATIG dle uspořádání [51]	30
Obr. 31 Využití HSS ocelí u modelu Volkswagen UP, 2012 [56]	31
Obr. 32 Typy trhlin ve svarových spojích [59]	32
Obr. 33 Krystalizační trhliny [60]	33
Obr. 34 Charpyho kladivo [65]	34
Obr. 35 Erichsenova zkouška [69]	35
Obr. 36 Vizuální kontrola [71]	36
Obr. 37 Tloušťkoměr PosiTector 6000	39
Obr. 38 Svařovací robot	40
Obr. 39 Hlava pro svařování LATIG	40
Obr. 40 Upnutí plechů a příprava trajektorie	41
Obr. 41 Návrh TWB pro svařování Laser-TIG	41
Obr. 42 Šířky svarů materiálů A07 a B1,25 při proměnných parametrech, zvětšeno 2x	43
Obr. 43 Tvar a základní rozměry plechové tyče pro příčnou zkoušku tahem	43
Obr. 44 Příprava vzorků pro zkoušku tahem	44
Obr. 45 Porušení tyče při zkoušce tahem	44
Obr. 46 Tahový diagram pro materiál A (CR210LA-GI40/40)	45
Obr. 47 Tahový diagram pro materiál B (CR210LA-GI40/40)	45

Obr. 48 Vzorky porušené ve svaru i v ZM.....	46
Obr. 49 Nedostatečné provaření plechu B1,25	46
Obr. 50 Porovnání vzorků porušených ve svaru s referenčním vzorkem	47
Obr. 51 Závislost tažnosti A80 na svařovacím proudu ITIG	48
Obr. 52 Schéma přípravku pro zkoušku hloubením dle Erichsena	49
Obr. 53 Typická trhlina v ZM	50
Obr. 54 Nepřípustná trhlina ve svaru	50
Obr. 55 Trhlina v TOO svaru	51
Obr. 56 Trhlina přes ZM i svar	52
Obr. 57 Makrostruktura svařence A0,7B1,25 / 0 A	53
Obr. 58 Makrostruktura svaru A0,7B1,25 / 20 A.....	54
Obr. 59 Makrostruktura svaru A0,7B1,25 / 40 A.....	55
Obr. 60 Makrostruktura svaru A1,2B0,8 / 0 A.....	56
Obr. 61 Makrostruktura svaru A1,2B0,8 / 20 A.....	57
Obr. 62 Makrostruktura svaru A1,2B0,8 / 40 A.....	57
Obr. 63 Průběh mikrotvrdosti svaru A0,7B1,25 / 0 A	58
Obr. 64 Průběh mikrotvrdosti svaru A0,7B1,25 / 20 A	59
Obr. 65 Průběh mikrotvrdosti svaru A0,7B1,25 / 40 A	59
Obr. 66 Průběh mikrotvrdosti svaru A1,2B0,8 / 0 A	60
Obr. 67 Průběh mikrotvrdosti svaru A1,2B0,8 / 20 A	60
Obr. 68 Průběh mikrotvrdosti svaru A1,2B0,8 / 40 A	60
Obr. 69 Mikrostruktura svarového kovu vzorku A0,7B1,25 / 0 A	61
Obr. 70 Mikrostruktura svarového kovu vzorku A0,7B1,25 / 20 A	62
Obr. 71 Mikrostruktura svarového kovu vzorku A0,7B1,25 / 40 A	62
Obr. 72 Mikrostruktura svarového kovu, TOO i ZM vzorku A0,7B1,25 / 40 A.....	63
Obr. 73 Mikrostruktura svarového kovu, TOO i ZM vzorku A0,7B1,25 / 0 A.....	63
Obr. 74 Mikrostruktura svarového kovu vzorku A1,2B0,8 / 0 A	64
Obr. 75 Mikrostruktura svarového kovu vzorku A1,2B0,8 / 20 A	64
Obr. 76 Mikrostruktura svarového kovu vzorku A1,2B0,8 / 40 A	65

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Charakteristiky používaných průmyslových laserových zdrojů [30], [33].....	22
Tab. 2	Základní nedestruktivní metody svarových spojů [71].....	36
Tab. 3	Chemické složení a mechanické vlastnosti svařovaných ocelí [75]	37
Tab. 4	Vlastnosti zinkového žárového povlaku ocelí [76], [77]	38
Tab. 5	Vlastní značení zpracovávaných plechů	39
Tab. 6	Měření vrstvy povlaku zinku	40
Tab. 7	Parametry a charakteristiky svařovacího procesu.....	42
Tab. 8	Mechanické vlastnosti svařovaných plechů.....	45
Tab. 9	Mechanické vlastnosti vzorků TWB v porovnání se základním materiálem.....	47
Tab. 10	Charakteristiky základních materiálů zjištěné z Erichsenovy zkoušky	50
Tab. 11	Charakteristiky svařenců typu A0,7B1,25 zjištěné z Erichsenovy zkoušky.....	51
Tab. 12	Charakteristiky svařenců typu A1,2B0,8 zjištěné z Erichsenovy zkoušky.....	52
Tab. 13	Charakteristiky makrostruktury svarového spoje A0,7B1,25 [příloha 5].....	55
Tab. 14	Charakteristiky makrostruktury svarového spoje A1,2B0,8 [příloha 5].....	58
Tab. 15	Mikrotvrdost ve svarovém kovu vzorků A0,7B1,25.....	59
Tab. 16	Mikrotvrdost ve svarovém kovu vzorků A1,2B0,8.....	61
Tab. 17	Nákladovost energií, ochranných plynů a operátora [79]	66
Tab. 18	Výpočet celkových nákladů za metru svaru [79].....	66

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400 kN/
Příloha 2	Záznamy z tahových zkoušek
Příloha 3	Souhrn hodnot z tahové zkoušky
Příloha 4	Erichsenův test
Příloha 5	Hodnocení makrostruktury
Příloha 6	Hodnocení mikrostruktury
Příloha 7	Rozbor chemického složení ZM

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

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

Technické parametry:

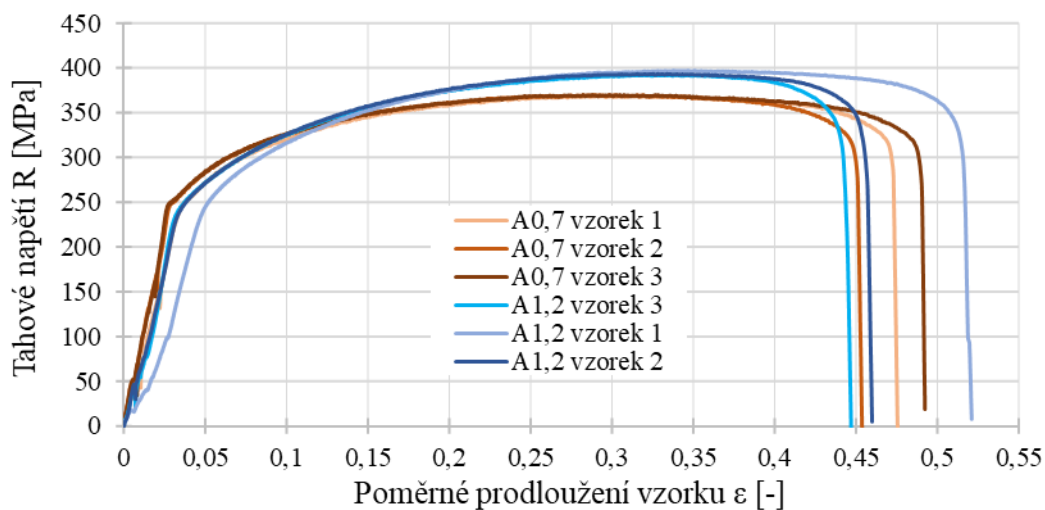
- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC COM1 pro PC s FIFO s maximální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

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

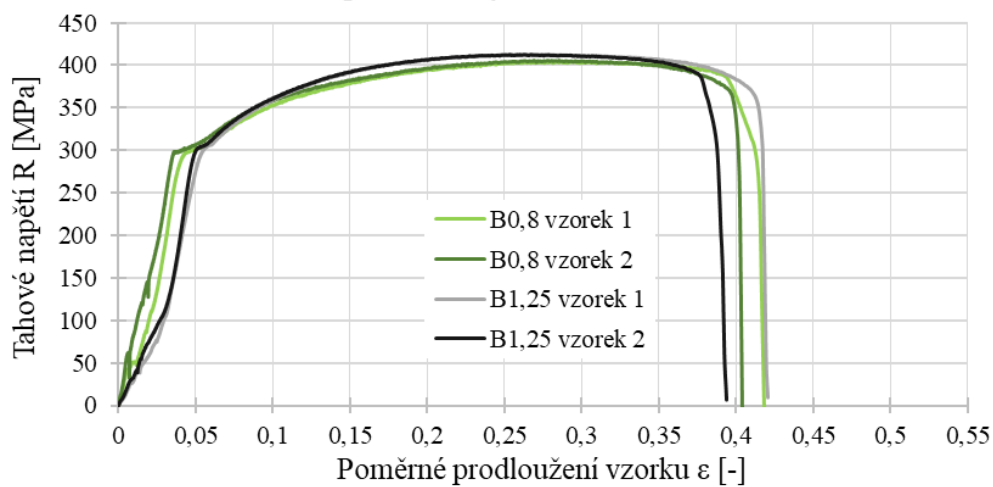


Řídicí jednotka EDC 60

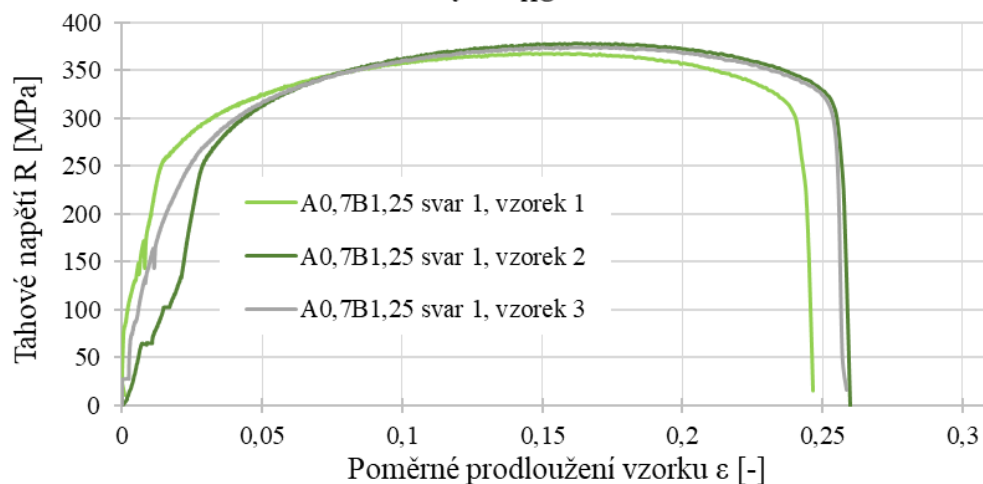
**Smluvní tahový diagram materiálu A (CR210LA-GI40/40)
pro tloušťky 0,7 a 1,2 mm**



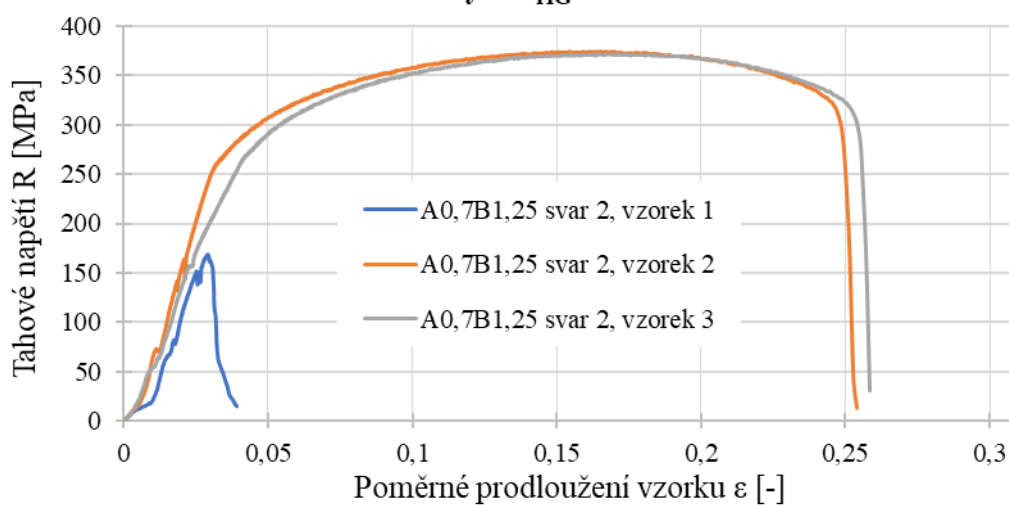
**Smluvní tahový diagram materiálu B (CR240LA-GI50/50-U)
pro tloušťky 0,8 a 1,25 mm**



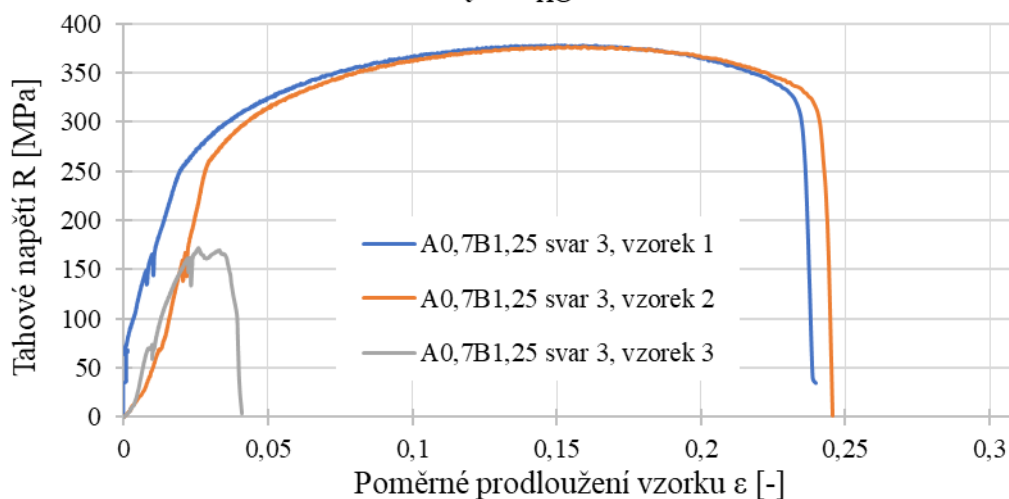
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A0,7 a B1,25
svařených $I_{TIG} = 0$ A**



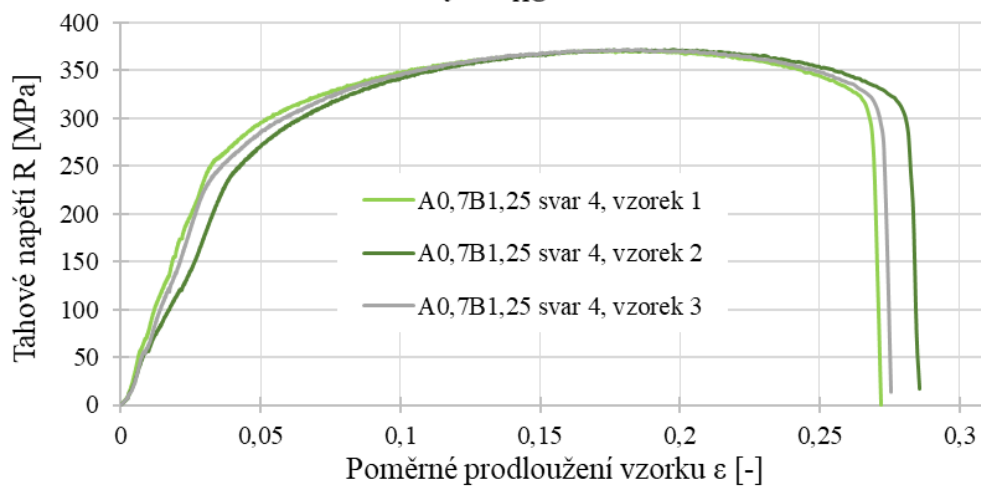
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A0,7 a B1,25
svařených $I_{TIG} = 0$ A**



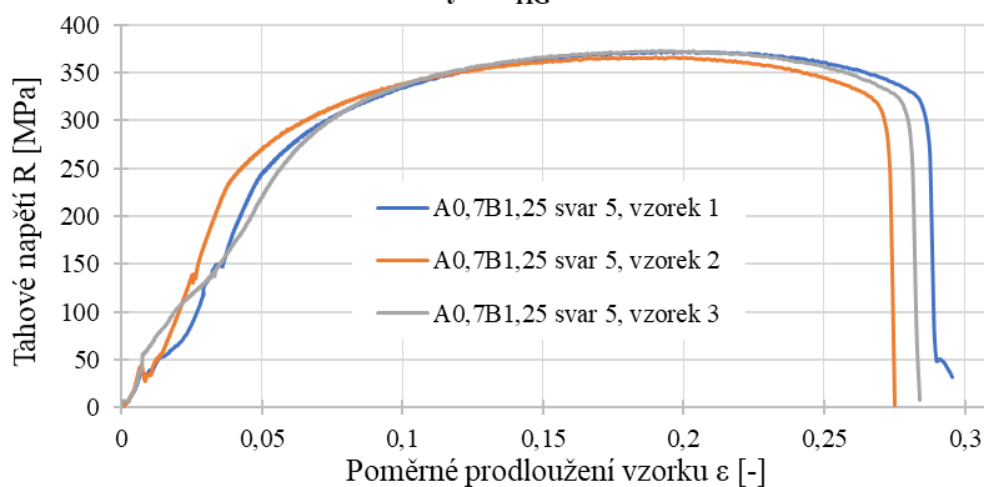
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A0,7 a B1,25
svařených $I_{TIG} = 0$ A**



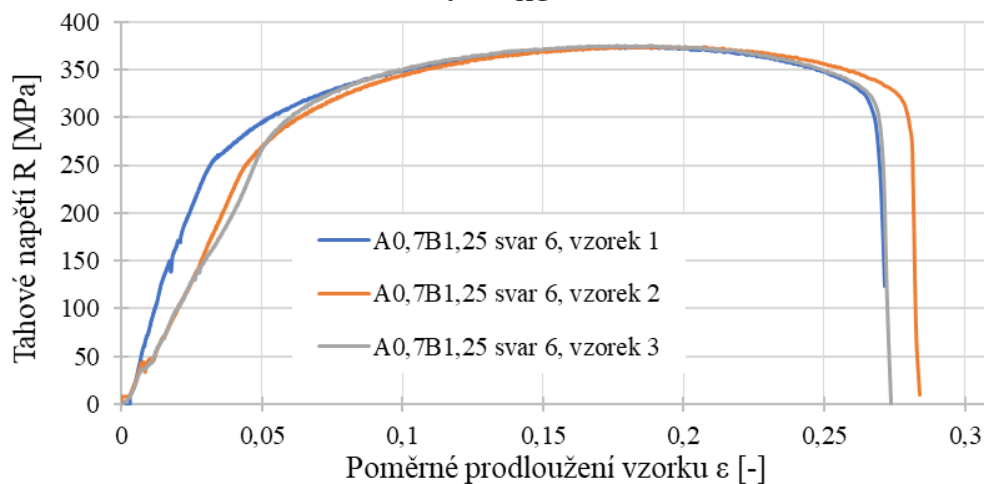
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A0,7 a B1,25
svařených $I_{TIG} = 20\text{ A}$**



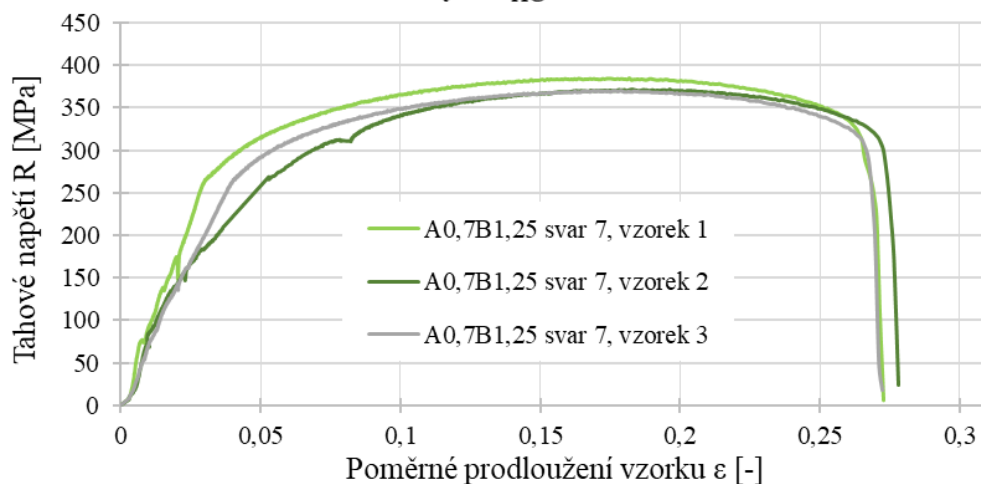
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A0,7 a B1,25
svařených $I_{TIG} = 20\text{ A}$**



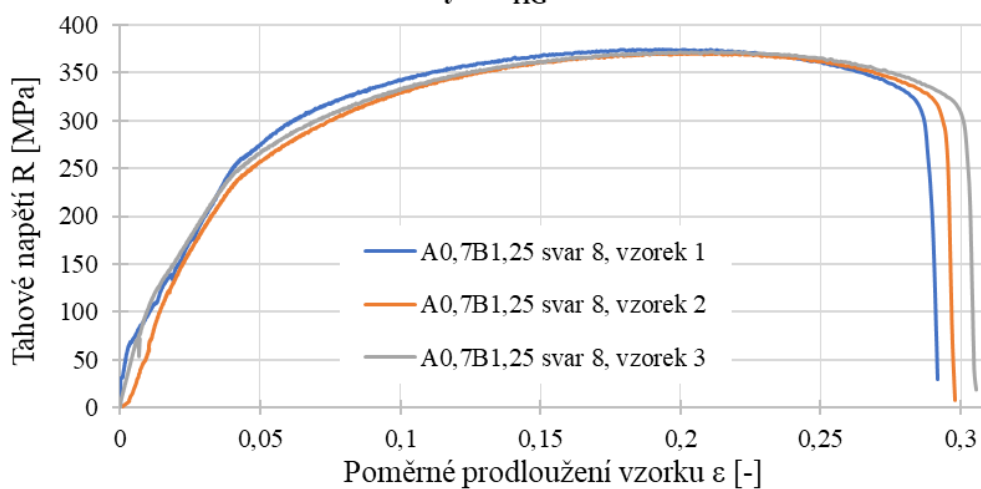
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A0,7 a B1,25
svařených $I_{TIG} = 20\text{ A}$**



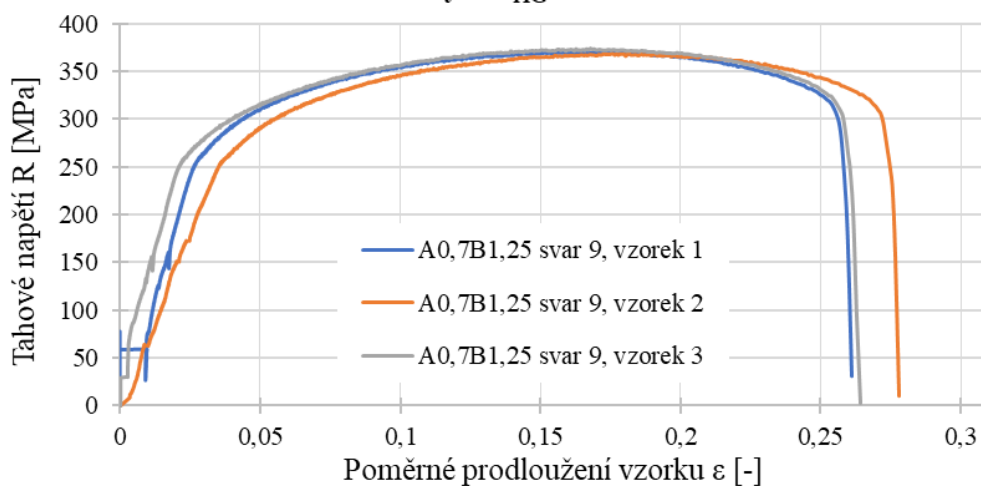
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A0,7 a B1,25
svařených $I_{TIG} = 40\text{ A}$**



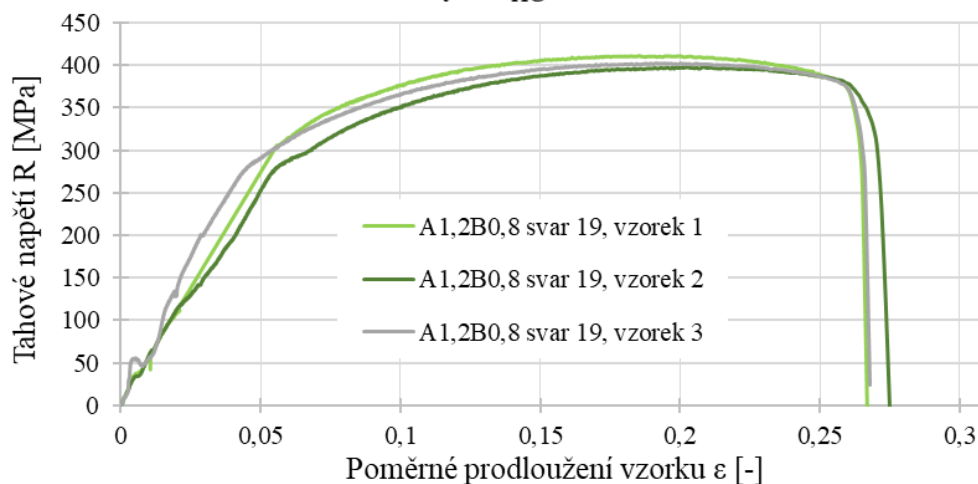
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A0,7 a B1,25
svařených $I_{TIG} = 40\text{ A}$**



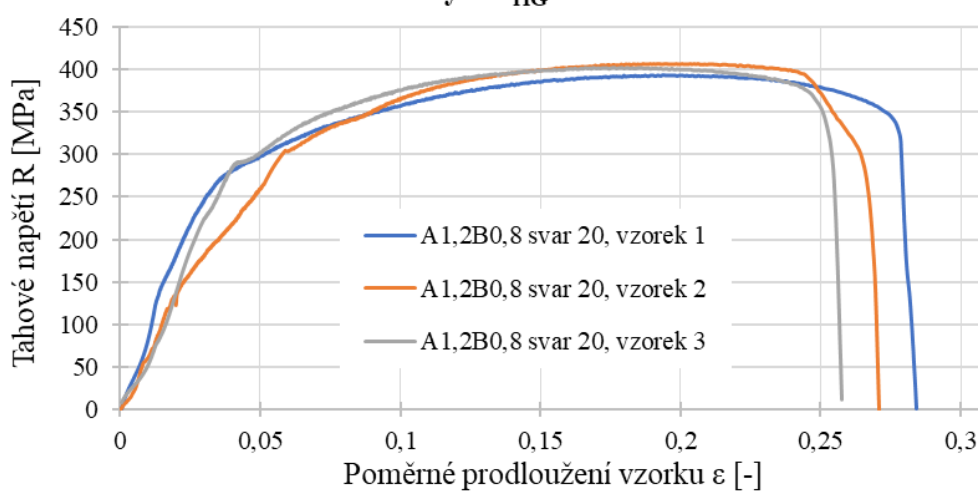
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A0,7 a B1,25
svařených $I_{TIG} = 40\text{ A}$**



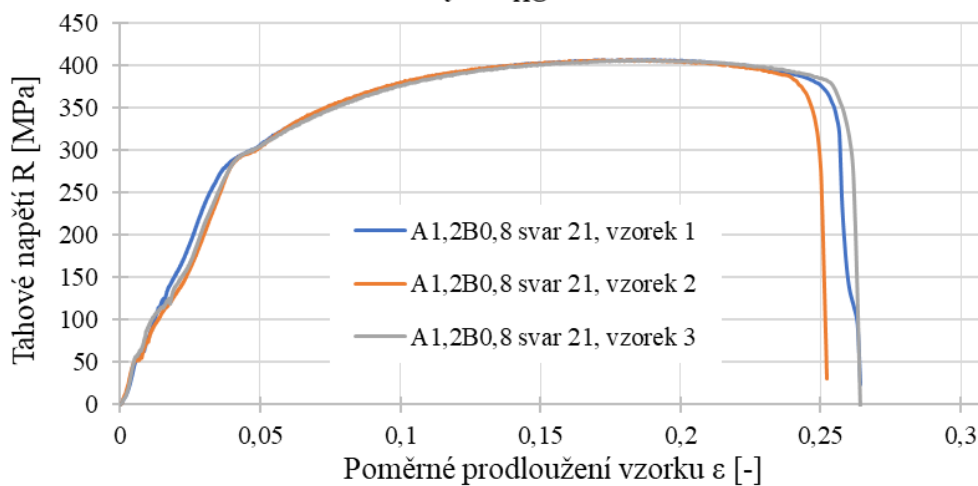
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A1,2 a B0,8
svařených $I_{TIG} = 0$ A**



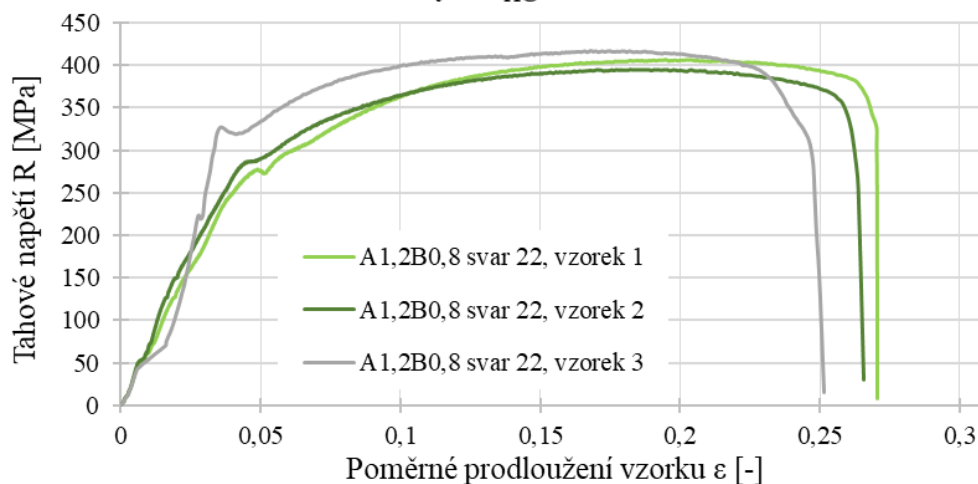
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A1,2 a B0,8
svařených $I_{TIG} = 0$ A**



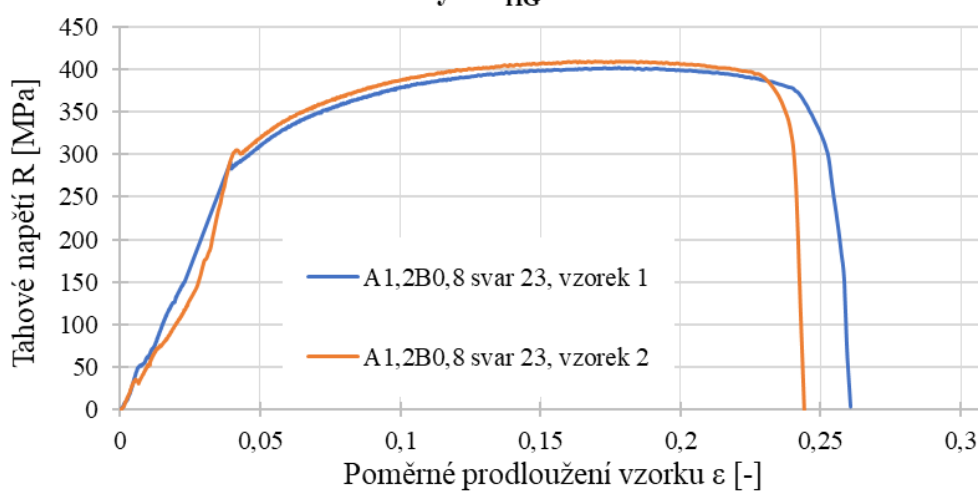
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A1,2 a B0,8
svařených $I_{TIG} = 0$ A**



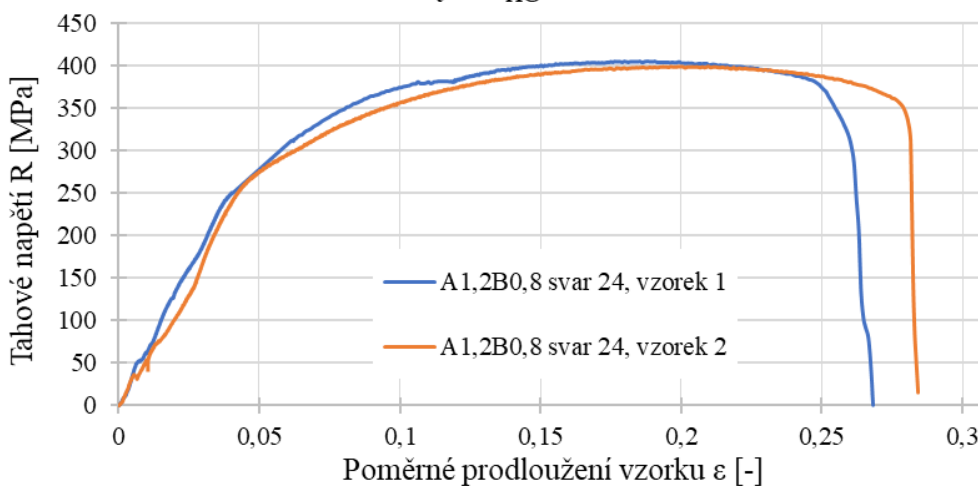
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A1,2 a B0,8
svařených $I_{TIG} = 20\text{ A}$**



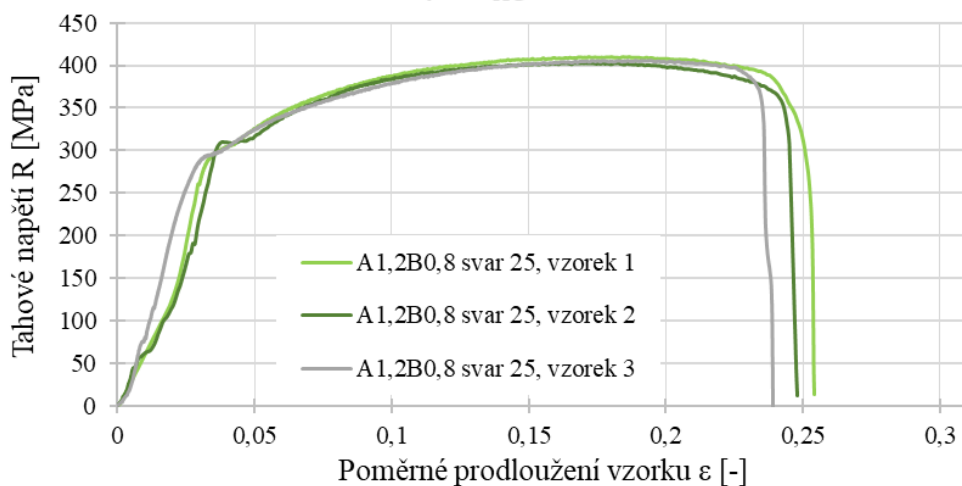
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A1,2 a B0,8
svařených $I_{TIG} = 20\text{ A}$**



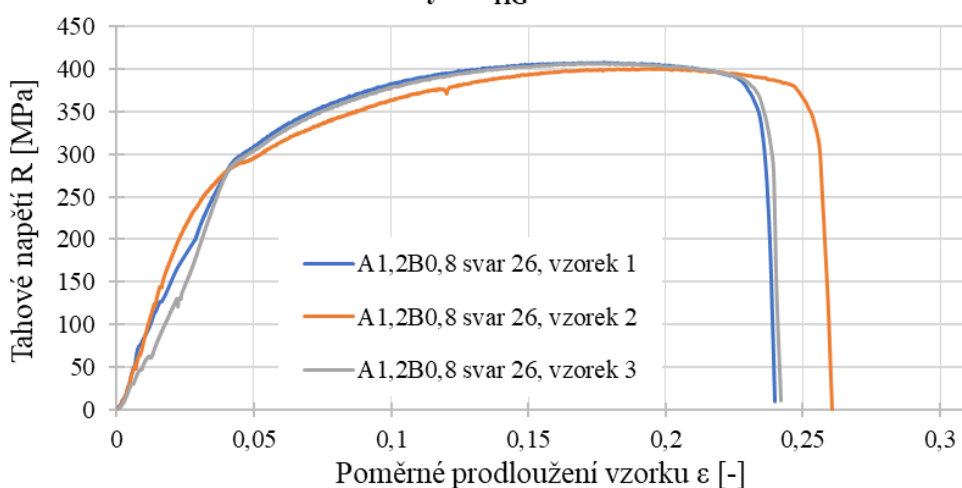
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A1,2 a B0,8
svařených $I_{TIG} = 20\text{ A}$**



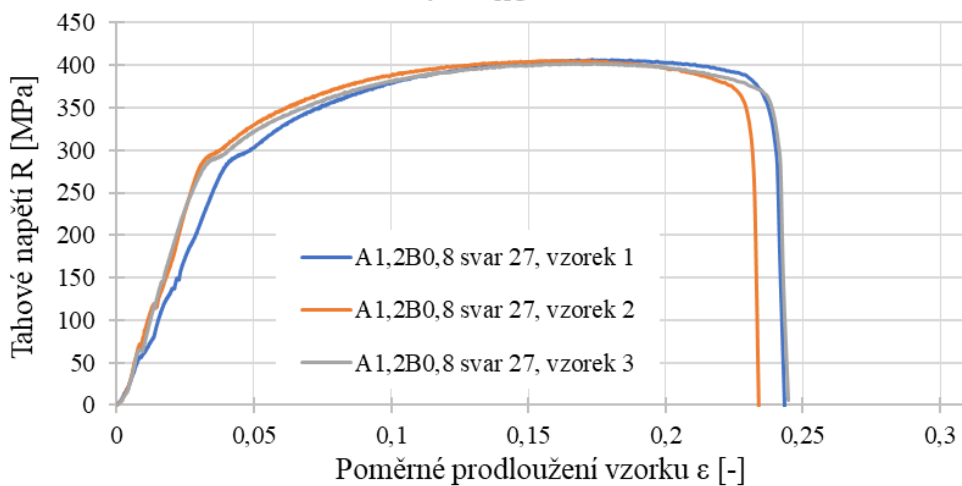
**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A1,2 a B0,8
svařených $I_{TIG} = 40 A$**



**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A1,2 a B0,8
svařených $I_{TIG} = 40 A$**



**Smluvní tahový diagram TWB z materiálů A1,2 a B0,8
svařených $I_{TIG} = 40 A$**



Příloha 3 Souhrn hodnot z tahové zkoušky

1/3

Vzorek	a[mm]	b[mm]	S0[mm ²]	Fm[N]	Rp2[MPa]	Rm[MPa]	A[%]	T[s]
40701	0,7	24,65	17,255	6366,8	255	368,9829	36,25	43,4
40702	0,7	24,6	17,22	6366,8	261	369,7329	36,25	43,2
40703	0,7	24,45	17,115	6329,2	258	369,8043	37,5	44,14
41201	1,2	24,35	29,22	11464	248	392,334	32,5	71,5
41202	1,2	24,45	29,34	11642,8	256	396,8234	36,25	46,08
41203	1,2	24,37	29,244	11501,6	252	393,2978	32,5	44,58
50801	0,8	24,46	19,568	7918,4	299	404,6606	30	45,74
50802	0,8	24,69	19,752	7965,6	300	403,2807	28,75	45,36
50803	0,8	24,64	19,712	7965,6	294	404,099	30	45,78
51251	1,25	24,54	30,675	12668	305	412,9747	30	46,9
51252	1,25	24,42	30,525	12602	305	412,8419	28,75	46,26
51253	1,25	24,46	30,575	12602	302	412,1668	30	46,8
81200191	0,8	24,89	19,912	8050	306	404,2788	16,25	43,78
81200192	0,8	24,65	19,72	7796,4	282	395,355	15	42,64
81200193	0,8	24,67	19,736	7880,8	279	399,3109	15	43,02
81200201	0,8	24,45	19,56	7720,8	281	394,7239	15,625	42,84
81200202	0,8	24,8	19,84	7974,8	295	401,9556	15,625	43,36
81200203	0,8	24,62	19,696	7880,8	311	400,1219	15,625	43,36
81200211	0,8	24,8	19,84	7974,8	275	401,9556	16,25	43,54
81200212	0,8	24,63	19,704	7956	285	403,7759	15	43,48
81200213	0,8	24,6	19,68	7965,6	292	404,7561	15	43,64
81220221	0,8	24,65	19,72	7965,6	323	403,9351	15	43,48
81220222	0,8	24,35	19,48	7749,2	287	397,8029	16,25	43,16
81220223	0,8	24,87	19,896	8182	286	411,2384	17,5	45,4
81220231	0,8	24,46	19,568	7890,4	280	403,2297	16,25	43,74
81220232	0,8	24,85	19,88	8040,8	304,55	404,4668	15	43,54
81220241	0,8	24,74	19,792	7937,2	253,9	401,0307	17,5	44,18
81220242	0,8	24,65	19,72	7815,2	268,5	396,3083	16,25	42,96
81240251	0,8	24,73	19,784	8031,2	295	405,9442	17	43,9
81240252	0,8	24,63	19,704	7890,4	300	400,4466	16,25	43,4
81240253	0,8	24,62	19,696	7965,6	290	404,4273	17,5	43,94
81240261	0,8	24,65	19,72	8003,2	285	405,8418	17	43,48
81240262	0,8	24,6	19,68	7871,6	280	399,9797	16,25	42,82
81240263	0,8	24,74	19,792	7965,6	280	402,4657	16,25	43,1
81240271	0,8	24,65	19,72	7974,8	295	404,4016	16,25	43,3
81240272	0,8	24,65	19,72	7937,2	290	402,495	15,625	43,38
81240273	0,8	24,51	19,608	7880,8	295	401,9176	16	43,28
71250011	0,7	24,5	17,15	6366,8	265	371,242	17,5	40,78
71250012	0,7	24,75	17,325	6536	272	371,2583	16,25	41,4
71250013	0,7	24,72	17,304	6470	275	370,902	16,25	41,06

71250021	0,7	24,85	17,395	2906	156	167,0595	0,012503	16,76
71250022	0,7	24,67	17,269	6470	267	370,6598	17,5	40,94
71250023	0,7	24,62	17,234	6423,2	275	372,7051	17,5	40,78
71250031	0,7	24,85	17,395	6536	265	373,7401	18,75	41,02
71250032	0,7	24,74	17,318	6498,4	265	373,2396	17,5	41,02
71250033	0,7	24,75	17,325	2962,4	165	170,9899	0,012503	18,08
71252041	0,7	24,45	17,115	6394,8	252	369,6372	17,5	40,96
71252042	0,7	24,69	17,283	6413,6	260	371,093	18,75	40,84
71252043	0,7	24,75	17,325	6413,6	257	370,1934	16,25	40,56
71252051	0,7	24,68	17,276	6442	260	372,8873	18,125	41,02
71252052	0,7	24,62	17,234	6329,2	258	371,2508	16,25	40,2
71252053	0,7	24,75	17,325	6432,4	270	371,2785	17,5	40,78
71252061	0,7	24,74	17,318	6451,2	265	372,5141	18,125	40,72
71252062	0,7	24,54	17,178	6470	270	376,6446	17,5	41,32
71252063	0,7	24,7	17,29	6479,6	277	374,76	17,5	41,1
71254071	0,7	25,1	17,57	6639,6	272	377,8941	17,5	41,58
71254072	0,7	24,6	17,22	6413,6	275	372,4507	16,875	40,76
71254073	0,7	24,44	17,108	6385,6	275	373,2523	18,75	40,96
71254081	0,7	24,64	17,248	6470	260	375,116	18,75	41,2
71254082	0,7	24,7	17,29	6394,8	265	369,8554	16,875	40,68
71254083	0,7	24,68	17,276	6423,2	268	371,7991	18,75	40,98
71254091	0,7	24,72	17,304	6394,8	265	369,5561	18,75	40,64
71254092	0,7	24,67	17,269	6376	269	369,2165	18,75	40,66
71254093	0,7	24,68	17,276	6470	270	374,508	18,75	41,04

- u červeně označených došlo k přetržení ve svarovém kovu

- 4070x – materiál CR210LA – GI40/40 0,7 mm (mat. A)

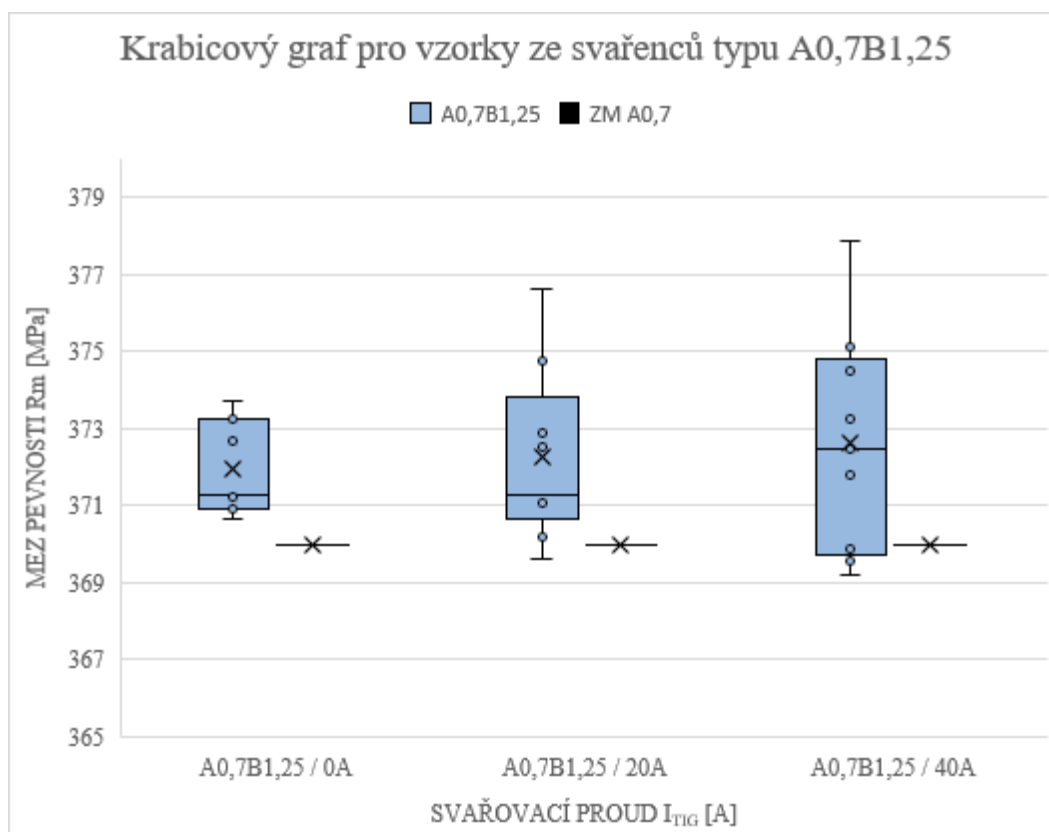
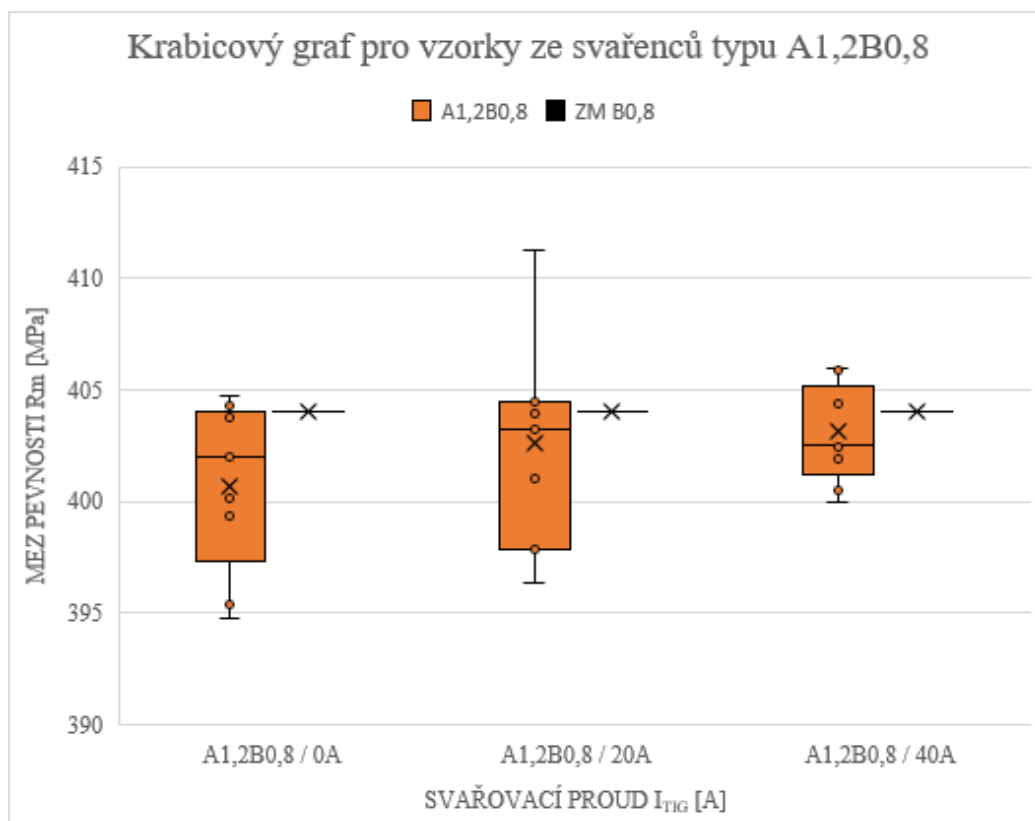
- 4120x – materiál CR210LA – GI40/40 0,1,2 mm (mat. A)

- 5080x – materiál CR240LA – GI50/50-U 0,8 mm (mat. B)

- 5125x – materiál CR240LA – GI50/50-U 1,25 mm (mat. B)

- vzorky 7125xxxx = A0,7B1,2, následuje hodnota I_{TIG} , číslo svaru a číslo vzorku

- vzorky 812xxxx = A1,2B0,8, následuje hodnota I_{TIG} , číslo svaru a číslo vzorku



Příloha 4 Erichsenův test

1/5

Základní materiál (4M3 = A0,7, 4V4 = A1,2, 5M3 = B0,8, 5V2 = B1,25)



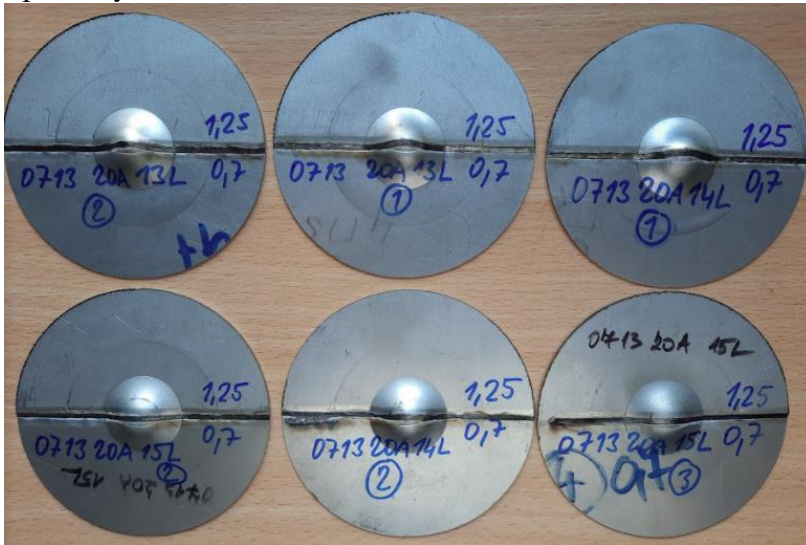
TWB A0,7B1,25 / 0 A

- horní řada – příklad vadných vzorků
- dolní řada – přípustné vzorky

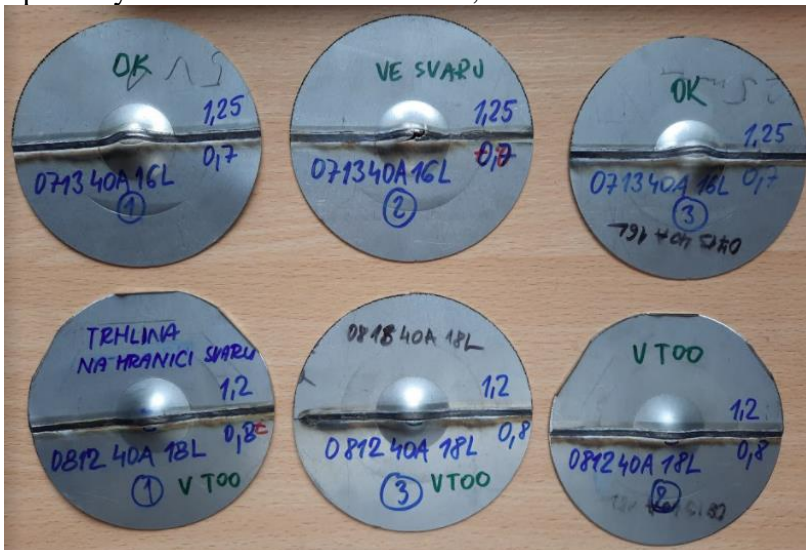


TWB A0,7B1,25 / 20 A

- příklady vzorků s trhlinou v ZM

**TWB A0,7B1,25 / 40 A**

- příklady vzorků s trhlinou ve svaru, TOO i v ZM

**TWB A1,2B0,8 / 0 A**

TWB A1,2B0,8 / 20 A

3/5



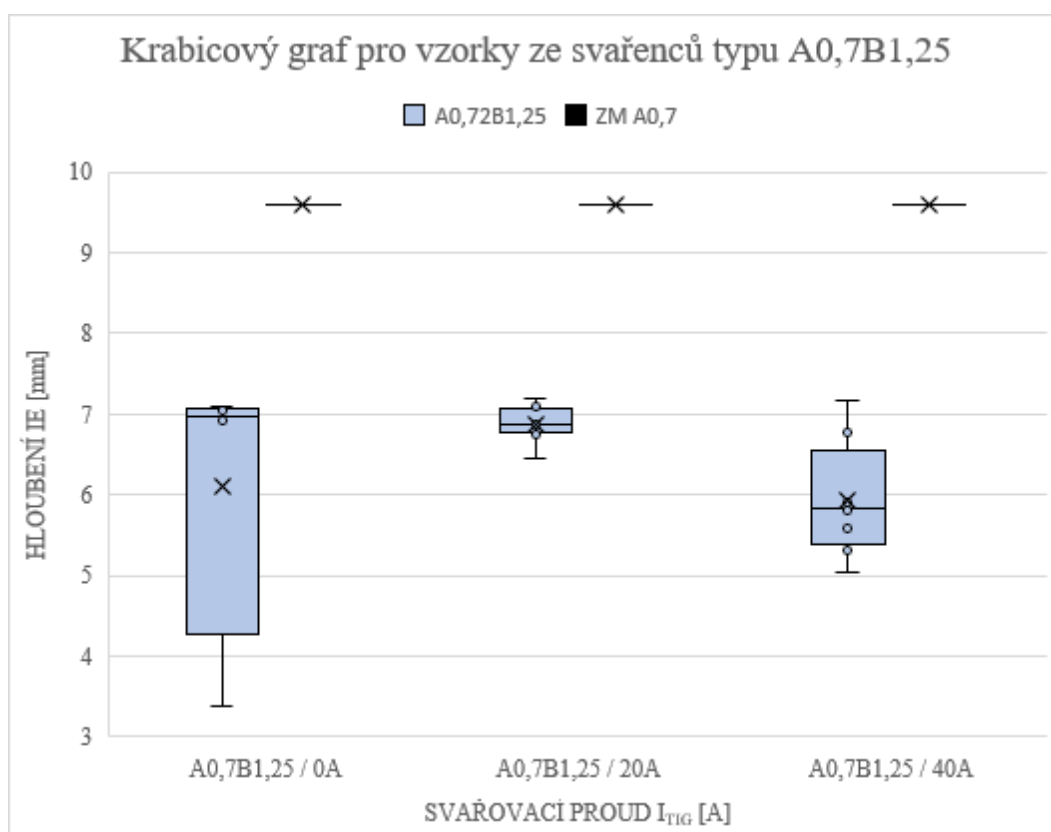
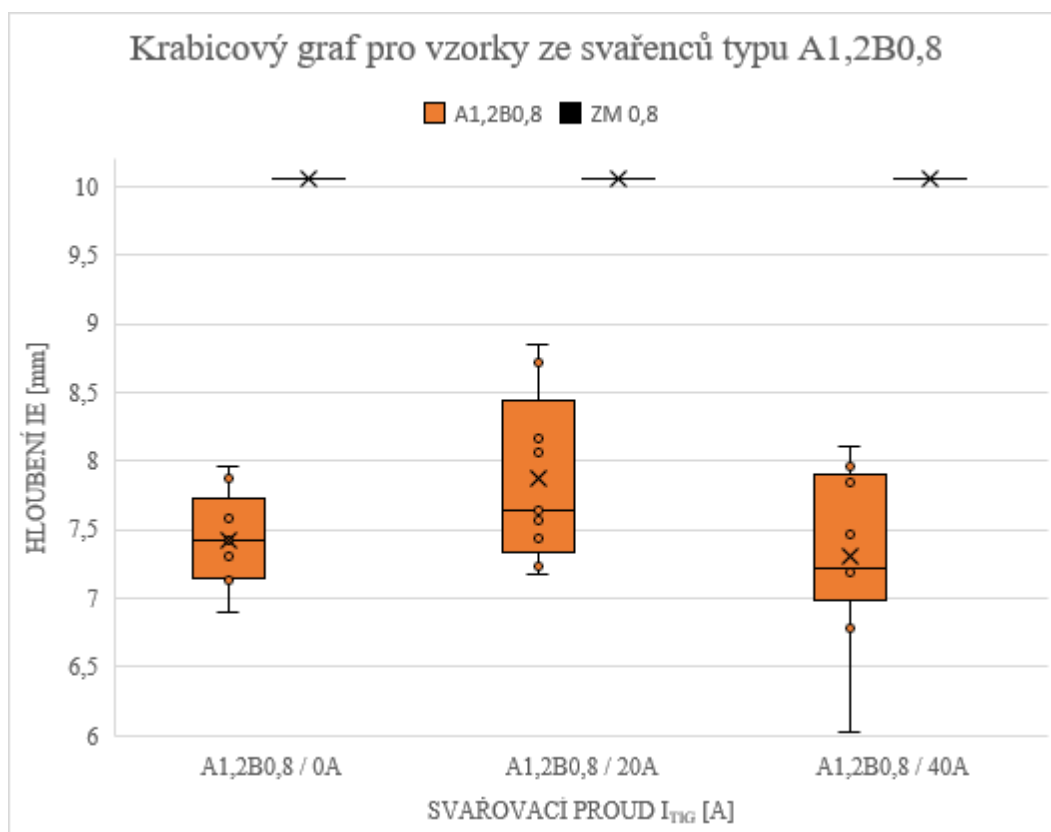
TWB A1,2B0,8 / 40 A



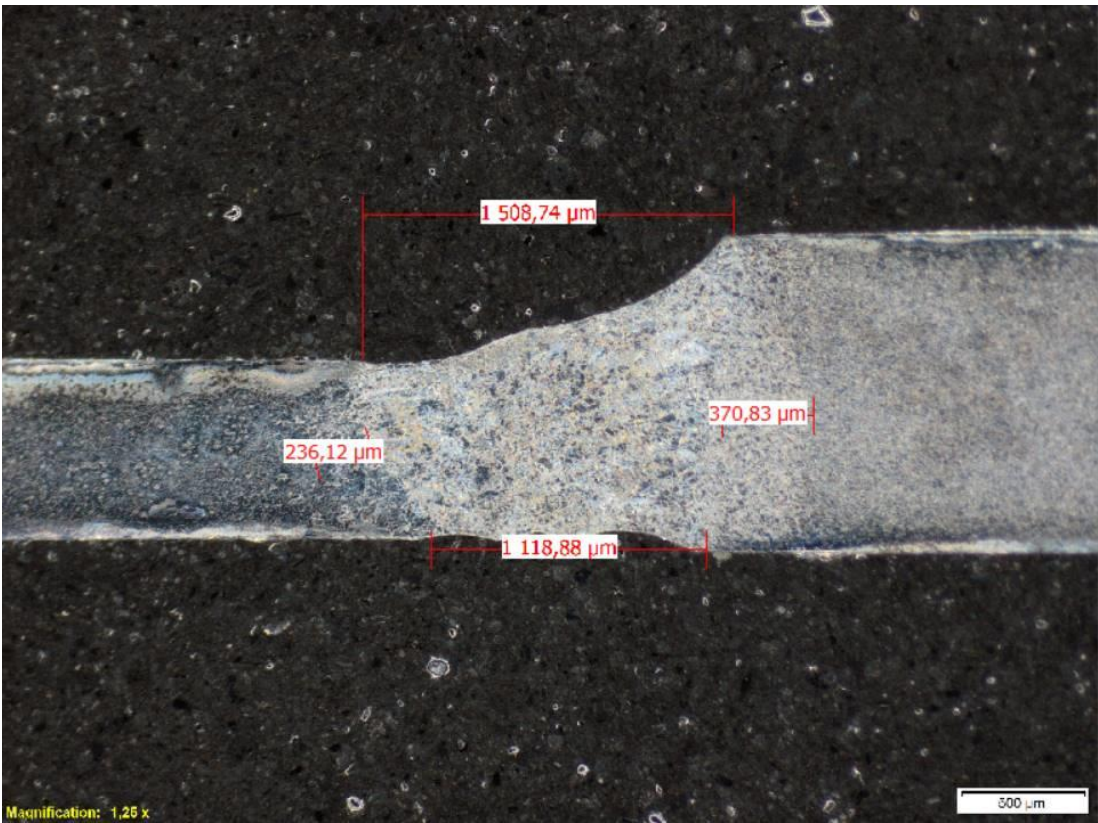
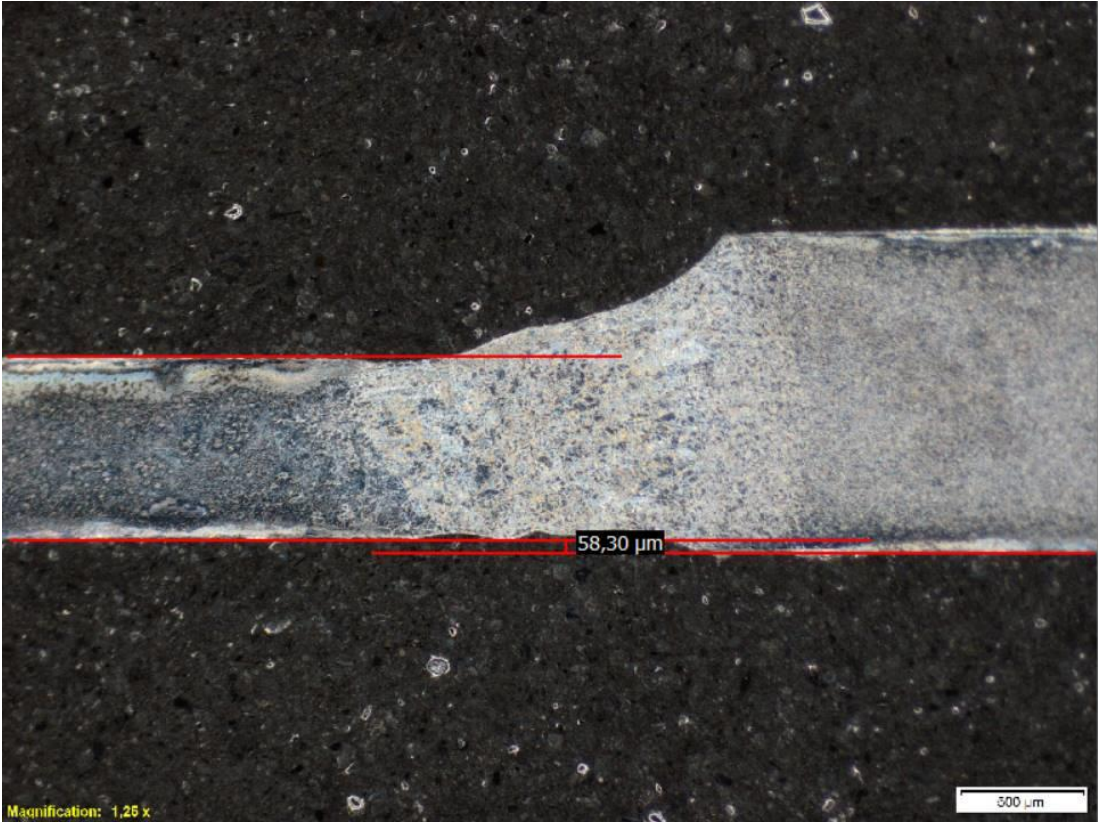
Souhrn naměřených hodnot z Erichsenovy zkoušky
4/5

SVAŘENCE TYPU A1,2B0,8				SVAŘENCE TYPU A0,7B1,25			
označení vzorku	IE [mm]	Fm [N]	pozice trhliny	označení vzorku	IE [mm]	Fm [N]	pozice trhliny
A1,2B0,800A281	6,9	11771,2	v 0,8 ZM	A0,7B1,2500A101	3,39	2734,2	ve svaru
A1,2B0,800A282	7,31	12430,9	v 0,8 ZM	A0,7B1,2500A102	7,05	10718,2	v 0,7 ZM
A1,2B0,800A283	7,15	12218,8	v 0,8 ZM	A0,7B1,2500A103	/	/	rozpad svaru
A1,2B0,800A291	7,88	13449,9	v 0,8 ZM	A0,7B1,2500A111	7,08	11848,8	v 0,7 ZM
A1,2B0,800A292	7,42	11973,3	v 0,8 ZM	A0,7B1,2500A112	6,91	11496,2	v 0,7 ZM
A1,2B0,800A293	7,44	12360,9	v 0,8 ZM	A0,7B1,2500A113	/	/	rozpad svaru
A1,2B0,800A301	7,58	12418,1	v 0,8 ZM	A0,7B1,2500A121	/	/	rozpad svaru
A1,2B0,800A302	7,96	13194,4	v 0,8 ZM	A0,7B1,2500A122	/	/	rozpad svaru
A1,2B0,800A303	7,13	12819	v 0,8 ZM	A0,7B1,2500A123	/	/	rozpad svaru
A1,2B0,820A311	8,85	15917,2	v 0,8 ZM	A0,7B1,2520A131	/	/	znehodnocen
A1,2B0,820A312	8,17	14140,1	v 0,8 ZM	A0,7B1,2520A132	6,8	10572,8	v 0,7 ZM
A1,2B0,820A313	8,71	15275,8	v 0,8 ZM	A0,7B1,2520A133	6,88	10769,9	v 0,7 ZM
A1,2B0,820A321	7,18	12822,9	v 0,8 ZM	A0,7B1,2520A141	7,1	10749,3	v 0,7 ZM
A1,2B0,820A322	7,57	12888,4	v 0,8 ZM	A0,7B1,2520A142	7,18	10982,5	v 0,7 ZM
A1,2B0,820A323	7,64	13516,5	v 0,8 ZM	A0,7B1,2520A143	6,75	10106,8	v 0,7 ZM
A1,2B0,820A331	8,06	13277,2	v 0,8 ZM	A0,7B1,2520A151	6,94	10422,8	v 0,7 ZM
A1,2B0,820A332	7,23	11778,9	v 0,8 ZM	A0,7B1,2520A152	6,44	9734,2	v 0,7 ZM
A1,2B0,820A333	7,44	12344,2	v 0,8 ZM	A0,7B1,2520A153	6,86	10489,4	v 0,7 ZM
A1,2B0,840A341	7,96	14141,3	v 0,8 ZM	A0,7B1,2540A161	7,16	10441,7	v 0,7 ZM
A1,2B0,840A342	7,46	13942,5	v 0,8 ZM	A0,7B1,2540A162	5,86	5779,5	ve svaru
A1,2B0,840A343	8,11	14245,1	v 0,8 ZM	A0,7B1,2540A163	6,76	10181,8	v 0,7 ZM
A1,2B0,840A351	6	8378	přes SK i ZM	A0,7B1,2540A171	5,9	9195,6	v TOO
A1,2B0,840A352	7,21	14270,5	v 0,8 ZM	A0,7B1,2540A172	5,32	8165,5	v TOO
A1,2B0,840A353	6,78	12138,7	v 0,8 ZM	A0,7B1,2540A173	/	/	rozpad svaru
A1,2B0,840A361	7,84	14584,9	v 0,8 ZM	A0,7B1,2540A181	5,59	8595,8	v TOO
A1,2B0,840A362	7,19	12271,5	v 0,8 ZM	A0,7B1,2540A182	5,04	7218,6	v TOO
A1,2B0,840A363	7,22	11962,4	v 0,8 ZM	A0,7B1,2520A183	5,8	8683	v TOO

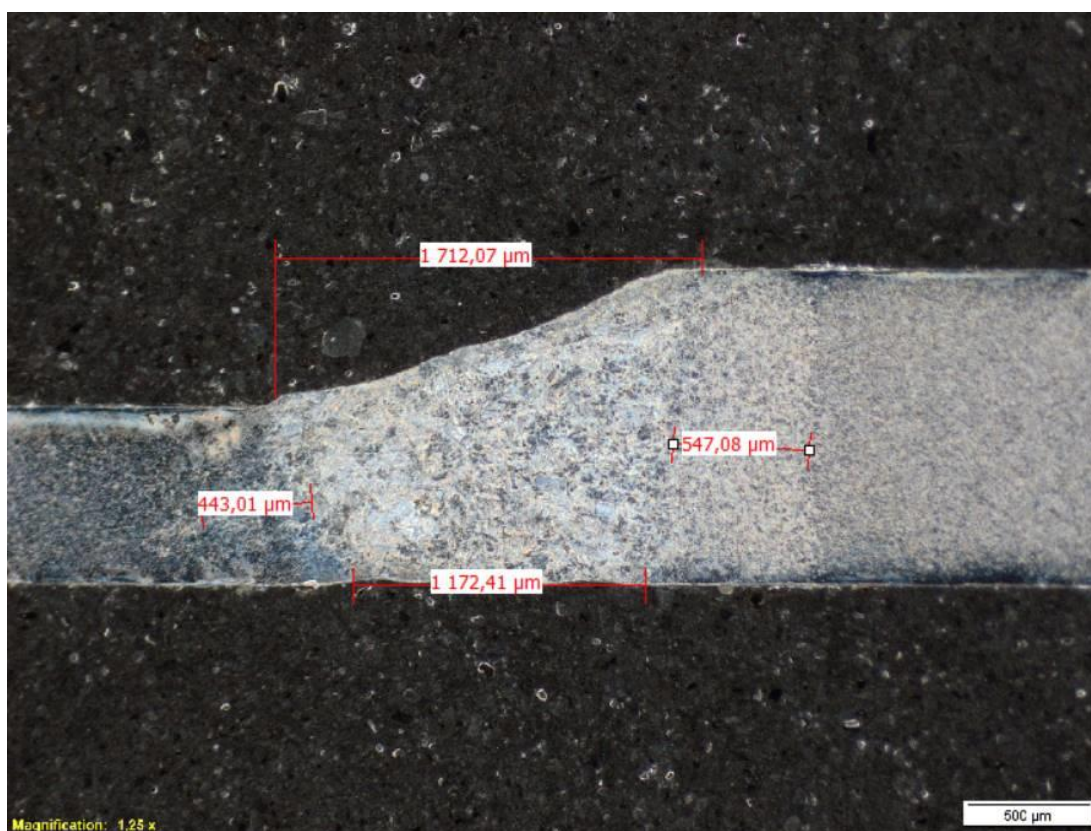
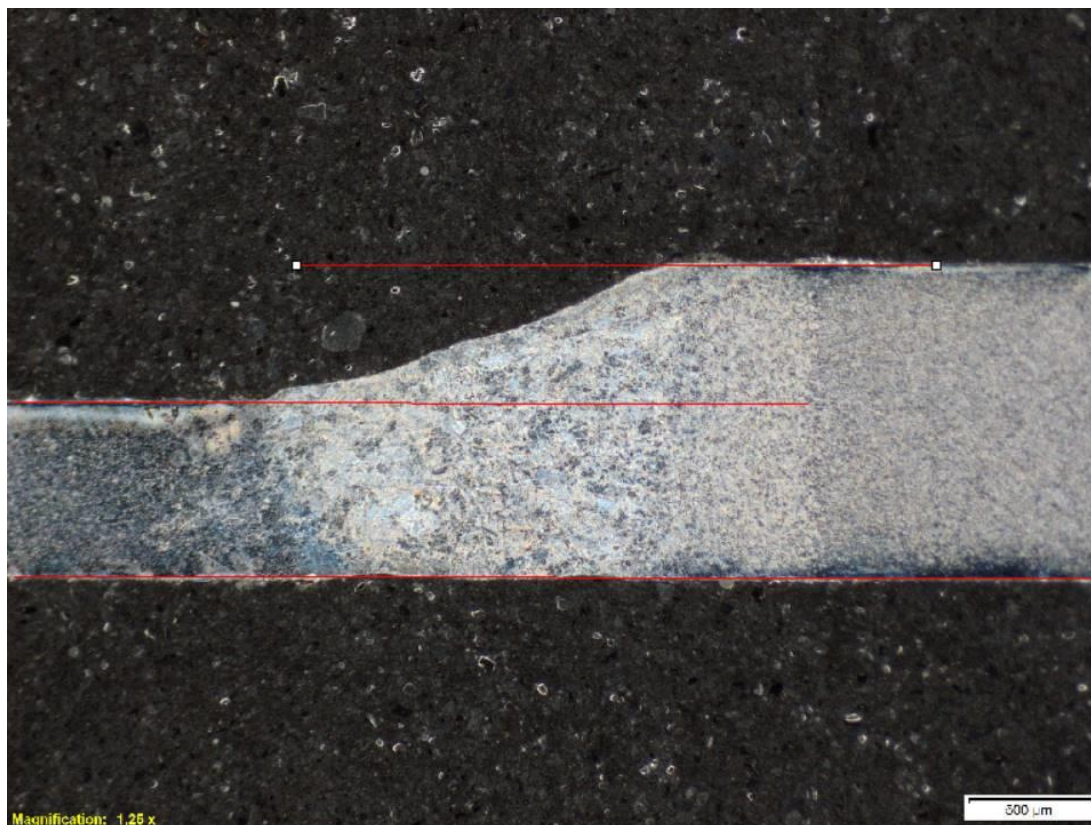
CR210LA – GI40/40				CR240 – GI 50/50-U			
0,7		1,2		0,8		1,25	
IE	Fm	IE	Fm	IE	Fm	IE	Fm
9,59	12434,6	10,86	22246,5	9,99	13226	10,38	21014,3
9,61	12345,8	10,88	22206,5	10,06	13231,6	10,35	20732,2
9,59	11863,8	11,19	22254,3	10,12	13262,7	10,32	20753,3



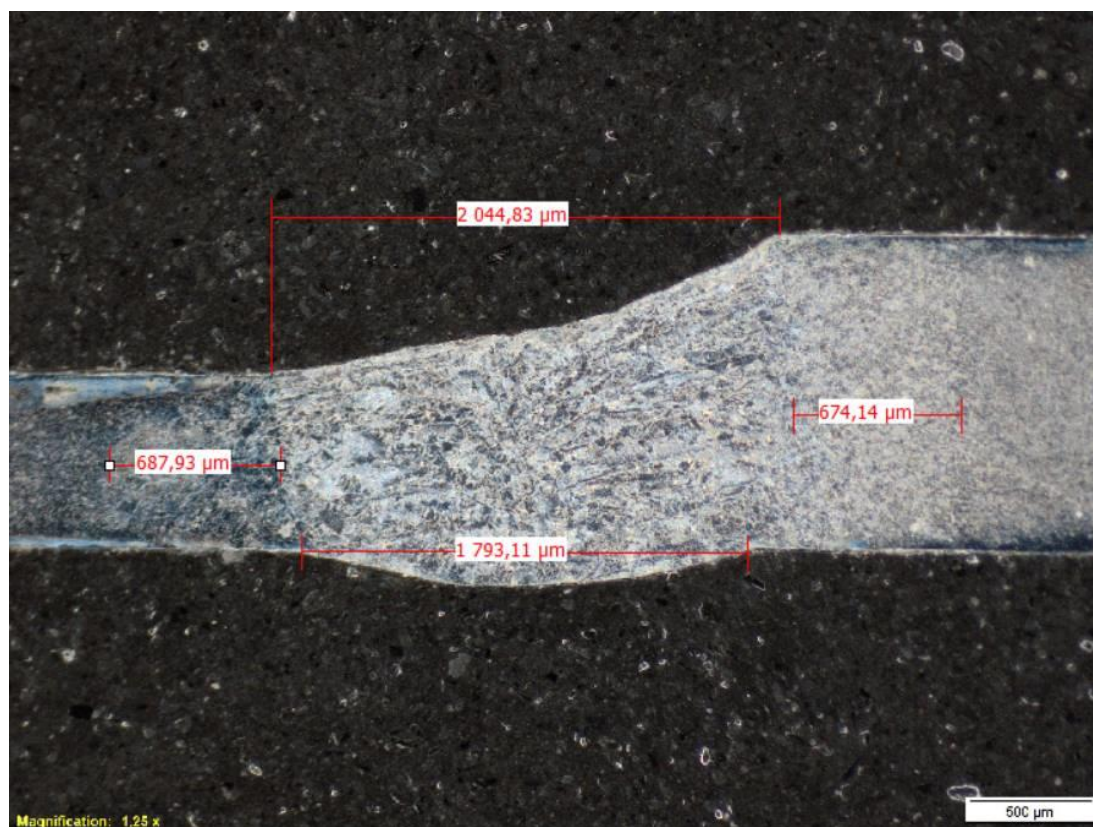
A0,7B1,25 / 0 A



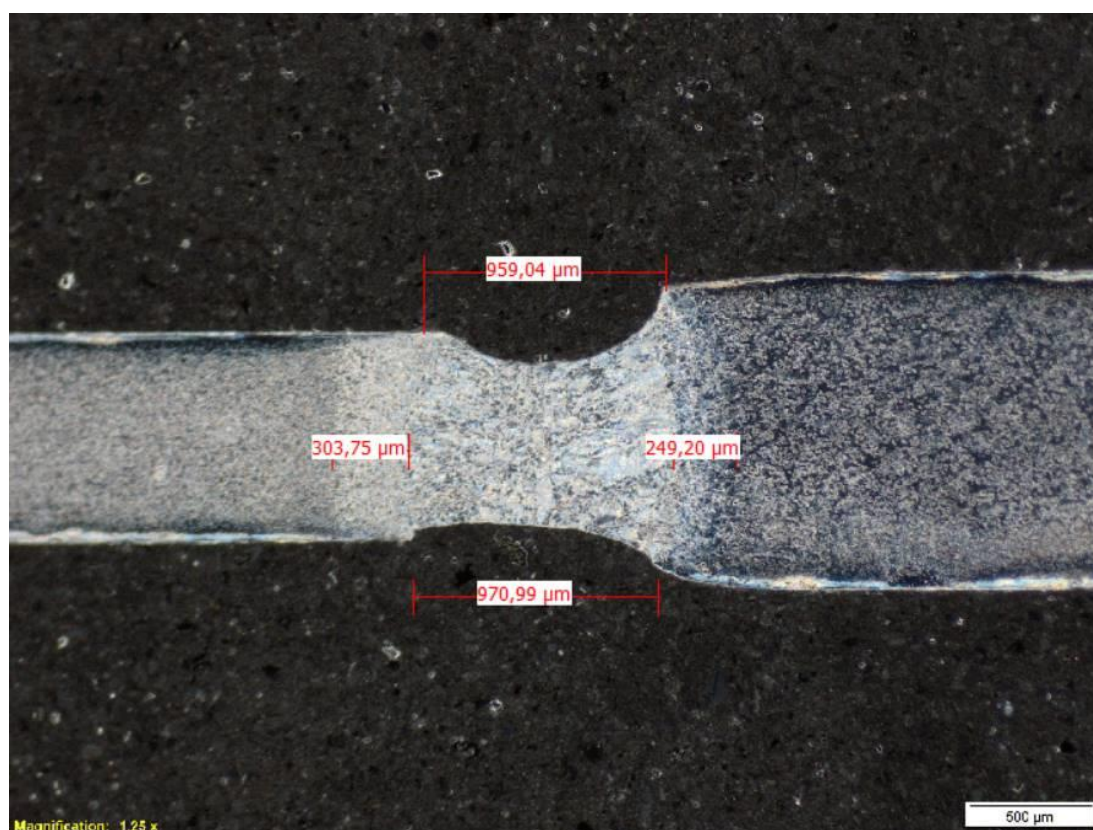
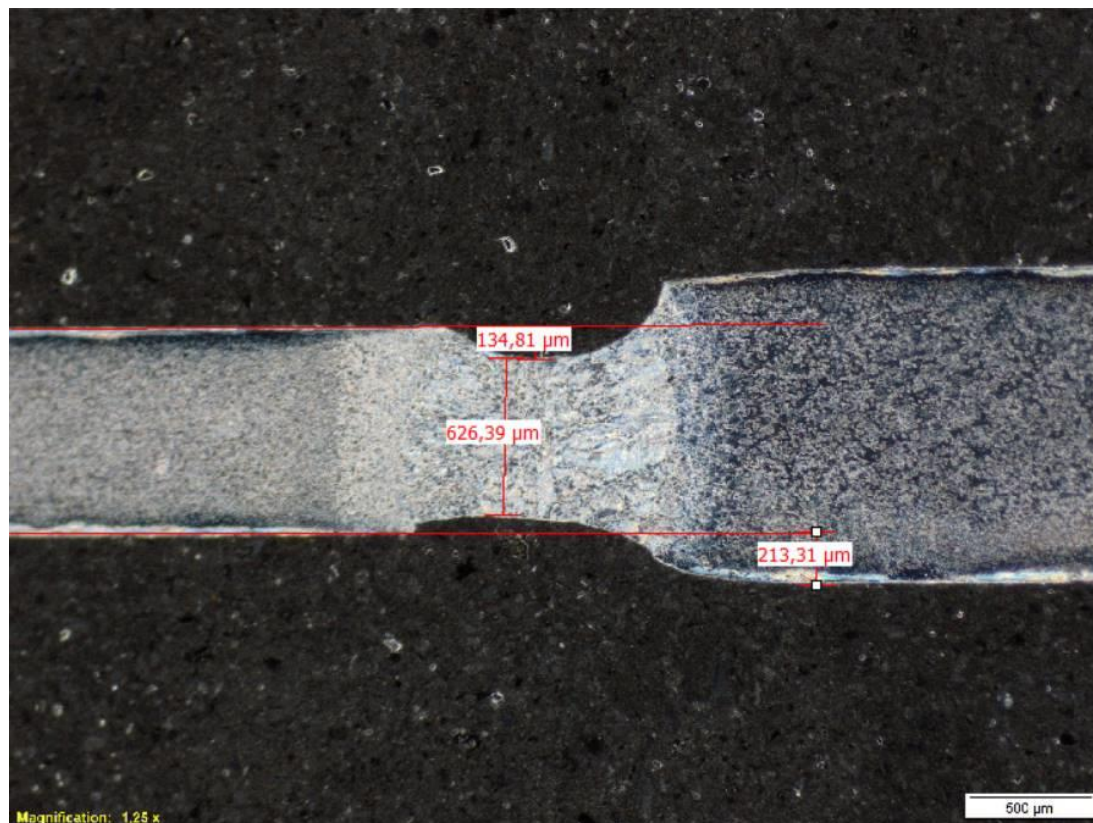
A0,7B1,25 / 20 A



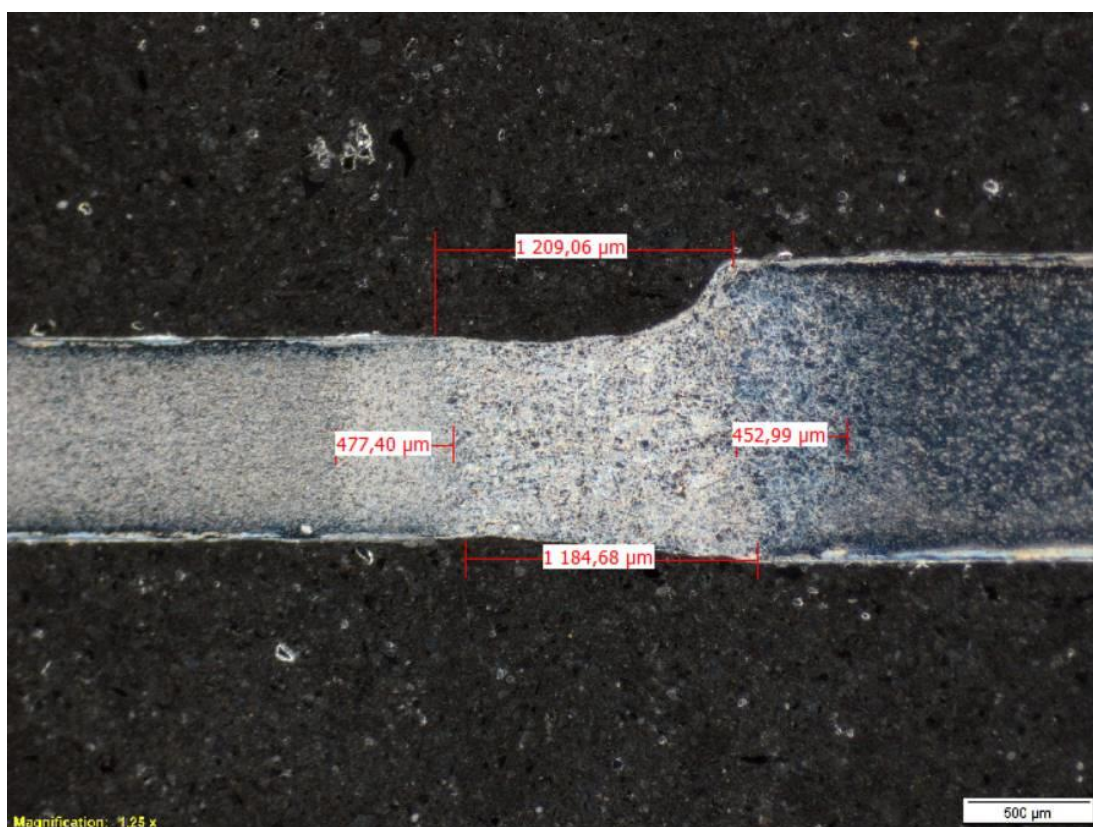
A0,7B1,25 / 40 A



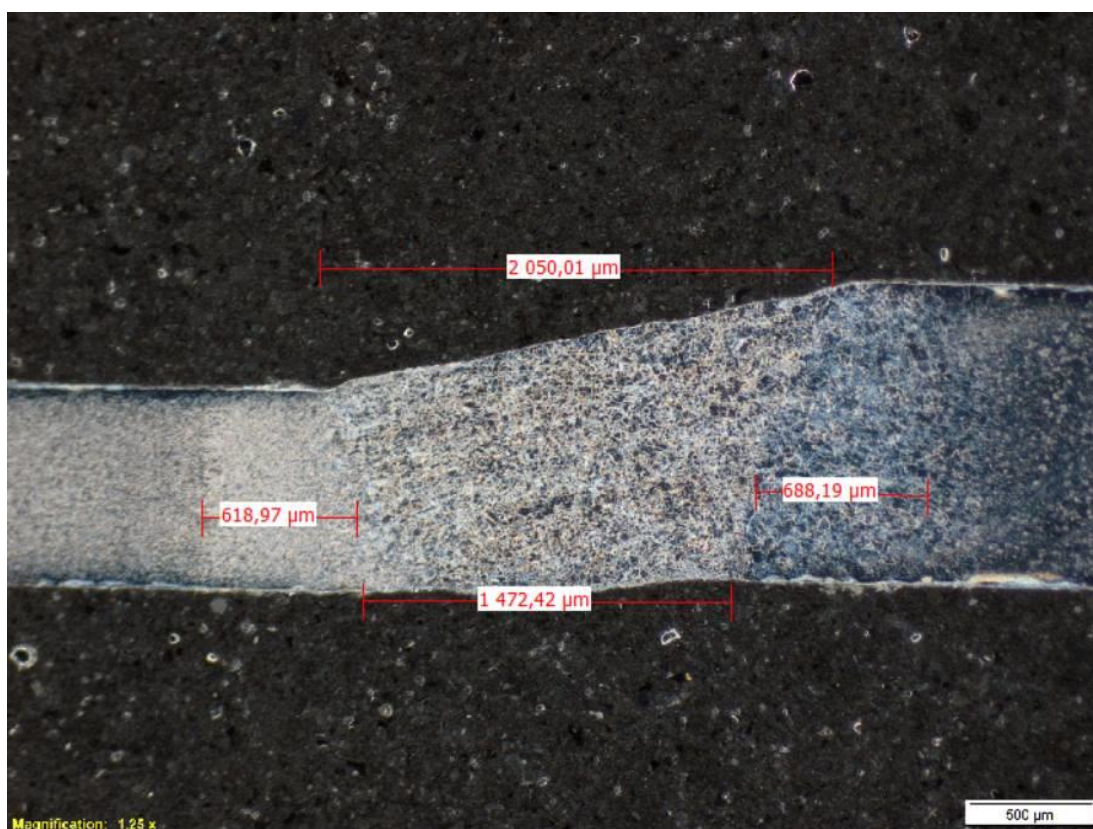
A1,2B0,8 / 0 A



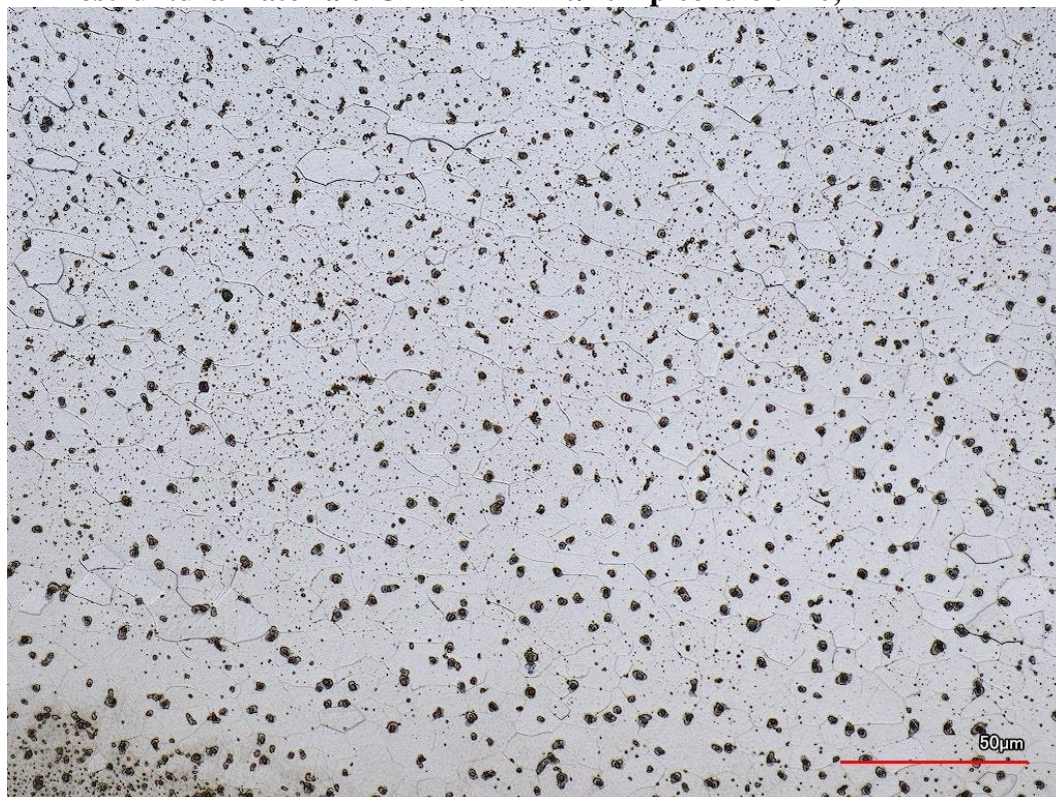
A1,2B0,8 / 20 A



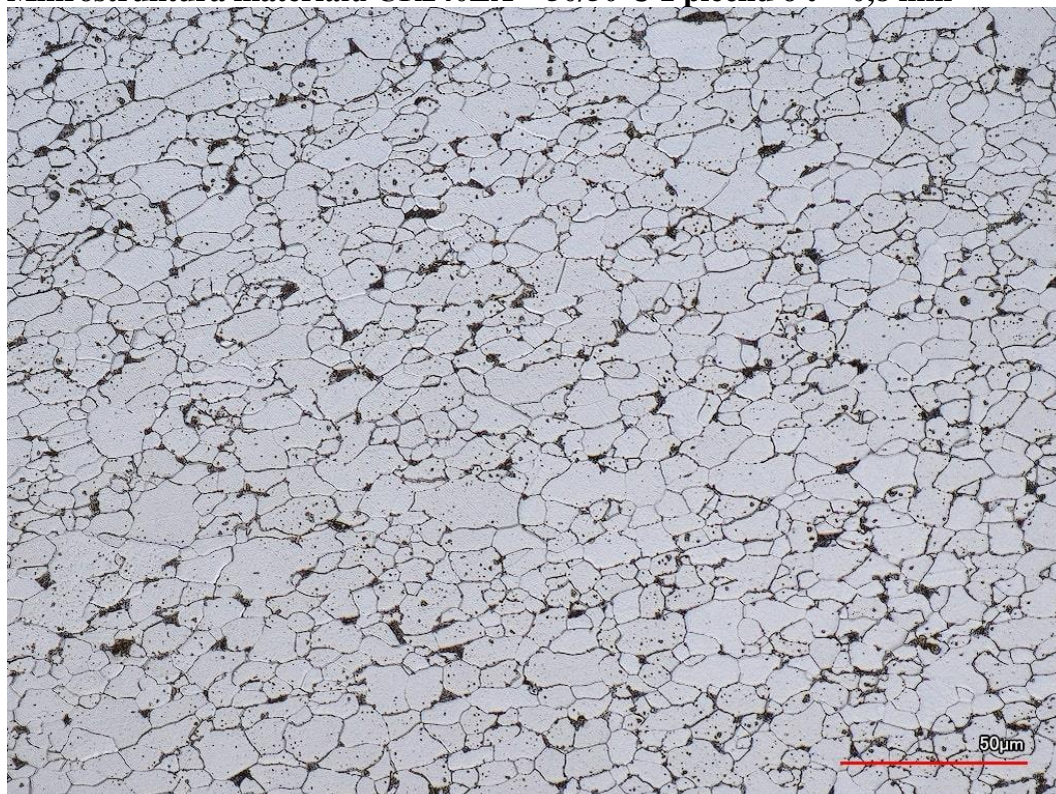
A1,2B0,8 / 40 A



Mikrostruktura materiálu CR210LA – 40/40 z plechu o t = 0,7 mm



Mikrostruktura materiálu CR240LA – 50/50-U z plechu o t = 0,8 mm



Příloha 7 Rozbor chemického složení ZM

1/2

Materiál CR210LA tloušťka 0,7 mm



Protokol o chemickém složení

Materiál: -
Zadavatel: doc. Ing. Libor Mrňa, Ph.D.
Označ. vzorku: č.4 0,7mm

Protokol č.: 012/2021
Poř. číslo knihy: 012/2021
Zkušební stroj: Spectramat GDS 750

Výsledné chemické složení:

Ozn. vzorku	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W	Cu	Al
č.4 0,7mm	0,001	0,44	0,00	0,035	0,003	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,02	0,050

Ozn. vzorku	Ti	Co	B	Sn	Sb	Nb						
č.4 0,7mm	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00						

V Brně dne 13. května 2021

Ing. Pavel Doležal, Ph.D.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojího inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství, Technická 2896/2, Brno 616 69 • <http://mse.fme.vutbr.cz>
Ing. Pavel DOLEŽAL, Ph.D., tel.: 5 4114 3189, e-mail: dolezal@fme.vutbr.cz

Materiál CR210LA tloušťka 1,2 mm



Protokol o chemickém složení

Materiál: -
Zadavatel: doc. Ing. Libor Mrňa, Ph.D.
Označ. vzorku: č.4 1,2mm

Protokol č.: 013/2021
Poř. číslo knihy: 013/2021
Zkušební stroj: Spectramat GDS 750

Výsledné chemické složení:

Ozn. vzorku	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W	Cu	Al
č.4 1,2mm	0,002	0,42	0,11	0,050	0,004	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,024

Ozn. vzorku	Ti	Co	B	Sn	Sb	Nb						
č.4 1,2mm	0,04	0,00	0,000	0,01	0,00	0,00						

V Brně dne 13. května 2021

Ing. Pavel Doležal, Ph.D.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojího inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství, Technická 2896/2, Brno 616 69 • <http://mse.fme.vutbr.cz>
Ing. Pavel DOLEŽAL, Ph.D., tel.: 5 4114 3189, e-mail: dolezal@fme.vutbr.cz

Materiál CR240LA tloušťka 0,8 mm



Protokol o chemickém složení

Materiál: -
Zadavatel: doc. Ing. Libor Mrňa, Ph.D.
Označ. vzorku: č.5 0,8mm

Protokol č.: 014/2021
Poř. číslo knihy: 014/2021
Zkušební stroj: Spectromat GDS 750

Výsledné chemické složení:

Ozn. vzorku	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W	Cu	Al
č.5 0,8mm	0,04	0,31	0,00	0,010	0,002	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,047

Ozn. vzorku	Ti	Co	B	Sn	Sb	Nb						
č.5 0,8mm	0,00	0,00	0,000	0,01	0,00	0,00						

V Brně dne 13. května 2021

Ing. Pavel Doležal, Ph.D.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství, Technická 2896/2, Brno 616 69 • <http://imse.fme.vutbr.cz>
Ing. Pavel DOLEŽAL, Ph.D., tel.: 5 4114 3189, e-mail: dolezal@fme.vutbr.cz

Materiál CR240LA tloušťka 0,8 mm



Protokol o chemickém složení

Materiál: -
Zadavatel: doc. Ing. Libor Mrňa, Ph.D.
Označ. vzorku: č.5 1,25mm

Protokol č.: 015/2021
Poř. číslo knihy: 015/2021
Zkušební stroj: Spectromat GDS 750

Výsledné chemické složení:

Ozn. vzorku	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W	Cu	Al
č.5 1,25mm	0,01	0,34	0,00	0,011	0,000	0,02	0,05	0,00	0,00	0,00	0,02	0,034

Ozn. vzorku	Ti	Co	B	Sn	Sb	Nb						
č.5 1,25mm	0,00	0,00	0,000	0,01	0,00	0,00						

V Brně dne 13. května 2021

Ing. Pavel Doležal, Ph.D.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství, Technická 2896/2, Brno 616 69 • <http://imse.fme.vutbr.cz>
Ing. Pavel DOLEŽAL, Ph.D., tel.: 5 4114 3189, e-mail: dolezal@fme.vutbr.cz