



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**SVAŘOVÁNÍ OCELI 22MNB5 POMOCÍ HYBRIDNÍ
TECHNOLOGIE LASER-TIG**

WELDING OF 22MNB5 STEEL USING LASER-TIG HYBRID TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Krejčí

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Adam Krejčí
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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

Svařování oceli 22MnB5 pomocí hybridní technologie Laser–TIG

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ověřit svařování za tepla tvářené martenzitické oceli 22MnB5 pomocí hybridní technologie Laser–TIG, kdy metoda TIG je využita pro ovlivnění rychlosti chladnutí svaru. Optimalizovat procesní parametry s ohledem na mechanické vlastnosti svaru.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii hybridního laserového svařování Laser–TIG.

Osvojit si aplikaci této technologie pro svařování martenzitické oceli 22MnB5.

Optimalizovat procesní parametry s ohledem na mechanické vlastnosti svaru.

Osvojit si metalografické vyhodnocování svarového spoje, mechanické zkoušky svaru a vyhodnocení svarových vad.

Seznam doporučené literatury:

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

DULEY, W. W. Laser welding. New York, 1999. A.Wiley-Interscience publication. ISBN 0-471-246-9-4.

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

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

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

KREJČÍ Adam: Svařování oceli 22MnB5 pomocí hybridní technologie Laser-TIG.

Tato práce se zabývá využitím hybridní technologie Laser-TIG pro svařování vysokopevnostní bórem dopované oceli 22MnB5. Tato práce hodnotí vliv předehřevu pomocí technologie obloukového svařování TIG na kvalitu svaru v porovnání se svary vytvořenými pouze technologií laserového svařování. V rámci experimentu byly svařeny plechy oceli 22MnB5 o tloušťce 1,8 mm. Plechové vzorky byly svařeny s konstantními parametry laseru a pouze docházelo ke změně velikosti proudu u technologie TIG. Bylo vytvořeno 12 vzorků z toho 3 vzorky byly svařeny za pomoci technologie Laser a 9 vzorků bylo vytvořeno za pomoci hybridní technologie Laser-TIG s proměnnými hodnotami proudu ($I=20$ A, 40 A a 60 A). Svary zhotovené při těchto parametrech byly hodnoceny tahovou zkouškou z hlediska dosažené meze pevnosti. Dále bylo provedeno metalografické šetření s hodnocením makro a mikrostruktury, a to bylo konfrontováno s výsledky zkoušky mikrotvrdosti dle Vickerse.

Klíčová slova: Ocel 22MnB5, laserové svařování, hybridní technologie Laser-TIG, předehřev

ABSTRACT

KREJČÍ Adam: Welding of 22MnB5 steel using Laser-TIG hybrid technology.

This thesis deals with usage of hybrid technology Laser-TIG for welding of boron enhanced steel 22MnB5. This thesis evaluates the influence of preheating using technology of TIG arc welding to a weld quality in comparison with laser welds. In practical part of thesis there were 1,8 mm metal sheets of 22MnB5 welded. This metal sheet specimens were welded by using constant parameters of laser with varying parameters of TIG technology. There were 12 specimens of sheet metal created including 3 specimens using only laser and 9 specimens using Laser-TIG hybrid technology while varying magnitude of current ($I=20$ A, 40 A a 60 A). Welds created this way were evaluated by tensile test and strength limits compared. Then metalographic survey was carried out examining macro and microstructure. Results of metalographic survey were confronted with Vickers hardness test.

Keywords: steel 22MnB5, laser welding, hybrid technology Laser-TIG, preheating

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJČÍ, Adam. *Svařování oceli 22MnB5 pomocí hybridní technologie Laser-TIG* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124902>. 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.

Dne 26.6.2020

.....

Bc. Adam Krejčí

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu práce panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Děkuji také paní Ing. Mgr. Haně Šebestové, Ph.D., panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. a panu Ing. Pavlu Doležalovi, Ph.D. za věnování času a nemalého úsilí do uskutečnění experimentů a jejich vyhodnocení. Děkuji také své rodině a přátelům za podporu během studia.

OBSAH

ZADÁNÍ

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	10
1 ROZBOR PROBLÉMU	11
1.1 Varianty řešení	12
2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ.....	18
2.1 Laserové svařování	18
2.1.1 Princip laserového svařování	19
2.1.2 Interakce záření s materiálem	20
2.1.3 Rozdělení laserů vhodných pro průmysl.....	22
2.2 Svařování netavící se wolframovou elektrodou – TIG	25
2.2.1 Princip metody TIG	26
2.2.2 Druhy plynů ochranné atmosféry.....	27
2.2.3 Hořáky a netavící se elektrody metody TIG	28
2.3 Hybridní technologie svařování LASER-TIG	28
2.4 Předehřev a výpočet teploty předehřevu	29
2.5 Vady svarů laserového svařování	33
2.6 Zkoušky svarových spojů	36
2.6.1 Zkouška tahem	36
2.6.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse	39
2.6.3 Metalografické šetření.....	40
2.6.4 Nedestruktivní zkoušky	41
2.7 Vysokopevné manganobórové oceli	44
2.7.1 Chemické složení bórem dopovaných ocelí.....	44
2.7.2 Kalení při tváření	44
2.7.3 Povlakování.....	45
3 EXPERIMENT	46
3.1 Volba materiálu.....	46
3.2 Svařování zkušebních těles	47

3.3	Tahová zkouška	51
3.4	Metalografické šetření.....	57
3.4.1	Vyhodnocení makrostruktury	58
3.4.2	Vyhodnocení mikrostruktury	61
3.5	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse	65
4	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	68
5	ZÁVĚRY	70

Bibliografie

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

ÚVOD

Vzhledem k vývoji průmyslu roste poptávka po pokročilejších materiálech a také po vhodných technologiích pro zpracování těchto materiálů. Jinak tomu není v automobilovém průmyslu, kde dochází ke střetu často velmi obtížně splnitelných kritérií. Na jedné straně jsou to ekologické požadavky, které výrobce nutí snižovat hmotnost karoserie, a tak i emise CO₂. Na druhé straně jsou to narůstající požadavky na pasivní bezpečnost, které nutí zvyšovat pevnost skeletu karoserie vozů, a tak i jejich hmotnost. Zde je cesta použití pokročilého materiálu často jediným východiskem. Často používaný materiál splňující protichůdné vlastnosti jsou manganoborové oceli. Jsou to oceli, které mají v tepelné nezpracovaném stavu nižší hodnoty pevnosti. Po tepelné úpravě kalením při tváření získávají vysokou pevnost a zároveň tak umožňují úsporu hmotnosti. Je nutné spojení s ostatními díly karoserie automobilu odlišných vlastností, a to za pomoci svařování. Při výrobě karoserie automobilu je nejvíce zastoupena metoda bodového odporového svařování, které je zobrazeno na obr. 1. S novými modely a použitím pokročilých materiálů na jejich karoseriích je čím dál více využíváno laserové svařování. Každá technologie má však své nevýhody, které je zapotřebí eliminovat pro vytvoření spolehlivého spoje. Jednou z možností, jak eliminovat nevýhody laserového svařování, je kombinovat tuto technologii s předehřevem pomocí obloukového svařování. Tato kombinace je nazývána hybridní technologií svařování Laser-TIG [1, 2, 3, 4].



Obr. 1 Bodové svařování automobilové karoserie [5].

1 ROZBOR PROBLÉMU

PHS oceli jsou používány v mnoha odvětvích strojírenství a v poslední době jsou velmi často zastoupeny i při výrobě karoserie automobilu. Hlavním důvodem je unikátní kombinace vysoké pevnosti a nízké hmotnosti. Proto jsou tyto materiály často používány jako strukturní části karoserie, které jsou znázorněny na obr. 2. Mezi tyto patří například nárazníkové nosníky, výztuhy dveří, sloupky čelního skla, tzv. B-sloupky, výztuhy střechy a podlahy, střešní příčnický a příčnický palubní desky. Hlavním kritériem při volbě materiálu je jeho cena a hmotnost. Jednou z cest, jak ušetřit hmotnost je použití hliníkové karoserie, protože její hmotnost je stále až o 43% lehčí než karoserie ocelová. Avšak nevýhodou je vysoká cena a technologická náročnost při zpracování. Z toho důvodu je kladen důraz na vývoj moderních vysokopevnostních materiálů, které dokážou zachovat pevnost ocelové karoserie a zároveň ušetřit hmotnost použitím menší tloušťky materiálu [1, 6, 2].



Obr. 2 Strukturní části karoserie automobilu [7].

Mezi PHS oceli patří i 22MnB5, která bude podrobena experimentu. Před tepelným zpracováním se jedná o jemnozrnnou nízkouhlíkovou nízkolegovanou ocel s feriticko-perlitickou strukturou a malým obsahem boru. Chemické složení dané oceli je v tab. 1 [2].

Tab. 1. Chemické složení 22MnB5 dle materiálové normy [1].

Prvek	C	Mn	Si max.	S max	P max.	Al	Ti	B
Obsah (hm. %)	0,19-0,25	1,10-1,40	0,40	0,015	0,025	0,02-0,06	0,020-0,050	0,0008-0,005

Pevnostní charakteristiky v nezušlechtěném stavu jsou nedostačující vzhledem k aplikaci, a proto je tepelně mechanické zpracování nutností. K dosažení výše popsaných vlastností slouží proces Hot-stamping neboli kalení při tváření, kde dochází ke změně struktury na martenzitickou a tím zvýšení mechanických vlastností jako je mez pevnosti a mez kluzu. Parametry před a po tepelné úpravě zobrazuje tab. 2 [2].

Tab. 2 Mechanické vlastnosti 22MnB5 před a po tepelném zpracování [1].

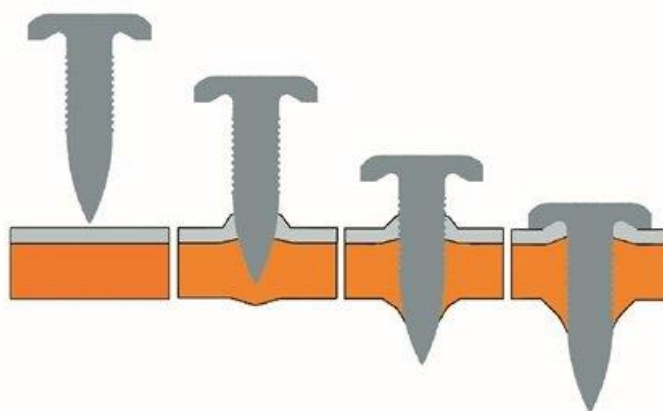
Mechanické parametry vyžehané oceli 22MnB5	Mechanické parametry zakalené oceli 22MnB5
Smluvní mez kluzu $R_{p0,2} = 350-550$ MPa	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2} = 950-1205$ MPa
Mez pevnosti $R_m = 500-700$ MPa	Mez pevnosti $R_m = 1300-1650$ MPa
Tažnost A80 mm min. = 10 %	Tažnost A80 mm min. = 4,5 %
	Tažnost A50 mm min. = 5 %

Díky výraznému zvýšení pevnosti daného dílce lze použít menší tloušťku plechu, zachovat tak pevnost, ale snížit hmotnost dílce o 30 % až 50 % oproti konvenčním ocelím tvářeným za studena [2].

1.1 Varianty řešení

Skelet automobilu se skládá z několika rozdílných ocelových plechů s rozdílnou tloušťkou, z nichž má každý odlišné vlastnosti vzhledem k funkci konkrétního dílu karoserie. Je proto důležité zvolit vhodnou technologii spojování na konkrétní aplikaci, aby byla zaručena pevnost, trvanlivost a opravitelnost spoje. Mezi varianty řešení patří: [2]

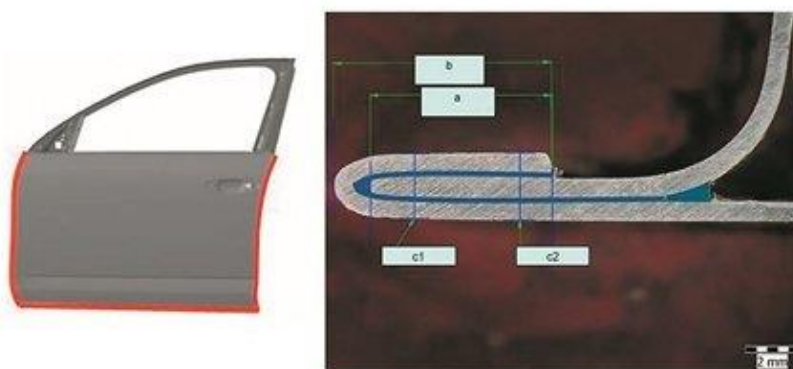
- mechanické spojování je jednou z variant a je hned několik druhů. Pokud použijeme spojení za pomoci nýtů, jedná se o spoj nerozebíratelný. Na karoserii automobilů se používá mnoho variant nýtování. Mezi tyto varianty patří například slepé nýtování, metoda Rivtac, která je na obr. 3, self-pierce riveting nebo pipe riveting. Slepé nýtování je osvědčená technologie, ale v souvislosti s vysokopevnými ocelmi je problém obtížné předděrování. Do budoucna se jeví jako výhodné použití technologie Rivtac, která je výhodná při spojování karoserií složených z rozdílných materiálů (vysokopevná ocel, hořčík, hliník, a zpevněné plasty). Tuto technologii lze kombinovat i s lepením. Rozebíratelný spoj je pak tvořen pomocí šroubů, ale vysoká pevnost dílů je zde také překážkou. Mezi mechanické spojování řadíme i metody klinčování a lemování. Klinčování je v některých případech využíváno jako náhrada za bodové svařování. Jedná se například o spojení vysokopevných materiálů, které se obtížně svařují. Lemování je technologie využitelná při spojování tenkých plechů, kde dojde spojením ke zvýšení pevnosti spoje [8, 9],



Obr. 3 Metoda Rivtac [8].

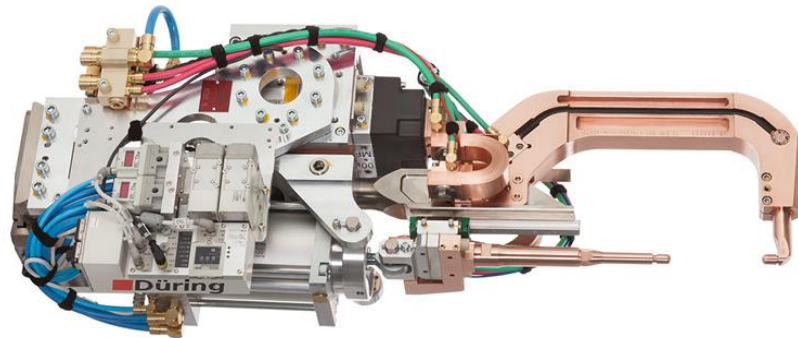
- lepení je dnes již velmi rozšířená nekonvenční technologie. Principem této technologie je spojení dvou ploch součástí pomocí vrstvy lepidla. Kvalitu spoje

určuje několik faktorů. Jsou to především smáčivost povrchu součástí lepidlem, přílnavost lepidla k lepenému povrchu (adheze), vnitřní soudržnost lepidla (koheze) a také pevnost spojovaného materiálu. Lepení tvoří nerozebíratelné spoje. Lepení poskytuje poměrně dost výhod. Spoj vytvořený lepením má velmi vysokou pevnost ve smyku, je těsný, utlumuje vibrace, lze spojovat materiály různé povahy a neovlivňuje spojovaný materiál tepelně. Ovšem lepení skýtá i řadu nevýhod. Je to vysoká citlivost na technologické podmínky a nepřesnosti spoje, malá odolnost vůči teplotnímu namáhání a v neposlední řadě velmi omezená schopnost odolávat namáhání jinému než smykovému. Nejhorší výsledky dosahuje tato technologie při namáhání v odlupování. Je proto zapotřebí při navrhování lepeného spoje zamezit namáhání na odlup. V případě, že tomu není možné zamezit, lze kombinovat lepení s bodovým svařováním nebo nýtováním. Tyto spoje jsou nazývány spoji hybridními a jedná se například o lem dveří automobilu (bodové svařování a lepení), který je zobrazen na obr. 4 [10, 11],



Obr. 4 Příklad konstrukčního řešení lepeného spoje v lemu bočních dveří [10].

- odporové bodové svařování využívá jako zdroj tepla elektrický odpor, který vzniká v místě kontaktu dvou spojovaných materiálů. Vysokým tokem proudu přes výše zmíněný odpor vznikne velké množství tepla. Oba spojované dílce se teplem nataví a ke spojení dojde silným stlačením v místě spoje. Odporové svářečky musí disponovat silnými rameny nebo jinými prvky, která dílce k sobě přitlačí. Ramena bodové svářečky můžeme vidět na obr. 5. Když porovnáme jiné metody svařování, tak odporové svařování potřebuje mnohem méně času k vytvoření spoje. Dále tepelná energie vyvinutá k ohřátí spoje na svařovací teplotu se beze zbytku využije k tomuto účelu a nedochází k jejich rozptýlení do okolí. Navíc v časech, kdy nedochází k vytváření sváru (naprázdno), ale stroje jsou v chodu je spotřeba strojů velmi nízká. Tato technologie je tedy poměrně ekonomicky výhodná a rychlá. Jak již byl zmíněno v úvodní kapitole tato technologie je hojně využívána v automobilním průmyslu. Při odporovém svařování vznikají velké krátkodobé odběry energie, proto je však nezbytné mít pro tuto situaci připravenou elektrickou rozvodnou síť v podniku [12, 13],



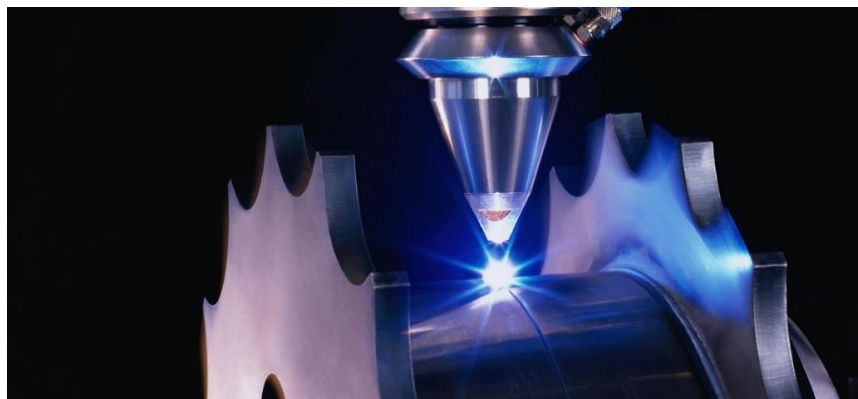
Obr. 5 Svařovací bodové kleště [14].

- svařování metodou MIG/MAG probíhá hořením oblouku mezi tavící se elektrodou ve formě drátu a základním materiálem. Tato metoda je zachycena na obr. 6. Děj probíhá v ochranné atmosféře buď inertního nebo aktivního plynu a lze využívat několik typů přenosu kovu obloukem v závislosti na ochranném plynu a parametrech svařování. Metoda MAG je vhodná na svařování nelegovaných a nízkouhlíkových ocelí. Naopak Metoda MIG přichází na řadu při svařování obecně hliníkových konstrukcí, kterých v poslední době přibývá. Svařování v ochranné atmosféře MIG/MAG má velký výběr přídavných materiálů, ochranných plynů a také množství svařovacích zařízení dostupných na trhu. Velkou výhodou technologie je snadnost mechanizace a robotizace. Všechny zmíněné aspekty a charakteristiky způsobují, že je tato metoda v průmyslu často používaná [15],



Obr. 6 Svařování metodou MIG/MAG [16].

- laserové svařování, které najdeme na obr. 7., využívá zaostření paprsku laseru neboli ohniska pomocí optiky.



Obr. 7 Laserové svařování [17].

V ohnisku nastává vysoká rychlost ohřevu, která je o několik řádů vyšší, než odvod tepla. To způsobuje místní ohřev materiálu a při správném nastavení svařovacích parametrů dochází k tzv. efektu „Key hole“. Laserové svařování se vyznačuje malou tepelně ovlivněná oblastí, která je navíc velmi přesně rozložena. Laserový paprsek dosahuje velmi vysoké hustoty energie a zároveň je soustředěn do velmi úzké oblasti, a tak dokáže vytvářet velmi štíhlé sváry. V tomto ohledu vytváří přesnější a kvalitnější sváry než metody obloukového svařování. Za zmínku stojí i možnost svařování od tloušťky v řádech několika mikrometrů. Svařování probíhá bez použití přídavného materiálu za vysokých svařovacích rychlostí. Výhodou je i snadnost automatizace a robotizace. Mezi nevýhody laserového svařování patří vysoké náklady na pořízení laserového systému, a to v znamená, že metoda laserového svařování je výhodná pro sériovou výrobu. Všechny výše zmíněné vlastnosti ukazují na tuto technologii jako vhodnou pro použití v automobilní průmyslu při svařování tenkých plechů. Jak již bylo v úvodní kapitole zmíněno laserové svařování se také stává v praxi automotive, čím dál častěji využívané. Kvůli malému množství vneseného tepla nebo jinak k velkému teplotnímu gradientu dochází k rychlému ochlazování sváru. Obecně se laserové svařování dá použít při svařování vysokolegovaných i nízkolegovaných ocelí, ale protože je rychlost ochlazování u této technologie poměrně vysoká, tak je nutné dodržet maximálně 0, 2 % uhlíku. Se zvyšující se rychlostí roste riziko vzniku nerovnoměrné struktury svaru a tím nebezpečí vzniku svarové vady. Je proto příhodné rychlost ochlazování snížit, a to lze docílit využitím jedné z metod předehřevu [18, 19, 20],

- předehřev plamenem, který vidíme na obr. 8. využívá zdroj ohřevu plamenem, tedy zdroj bodový, a to může působit vznik vnitřního napětí v materiálu. Mezi používané plyny pro ohřev patří zemní plyn, propan-butan nebo acetylen. Jedná se o poměrně často používanou metodu, která je jednoduchá na použití a nastavení. Je poměrně levná a pohotová, ale v porovnání s ostatními metodami předehřevu je neefektivní. Důvodem je množství tepla, které se ztrácí do okolí. Také dochází k nerovnoměrnému ohřevu součásti. Dále je také možné způsobit oxidaci svařence plamenem, a proto je kontakt plamene s povrchem svařované součásti dle norem zakázán. Další nevýhodou je problematické řízení teploty a doložení k jakým teplotním působením během předehřívání došlo. Doložení teplotního průběhu celého procesu je často požadováno pro technologickou dokumentaci a vzhledem k použití plamene k ohřevu to není možné [21, 22, 23],



Obr. 8 Předehřev plamenem [24].

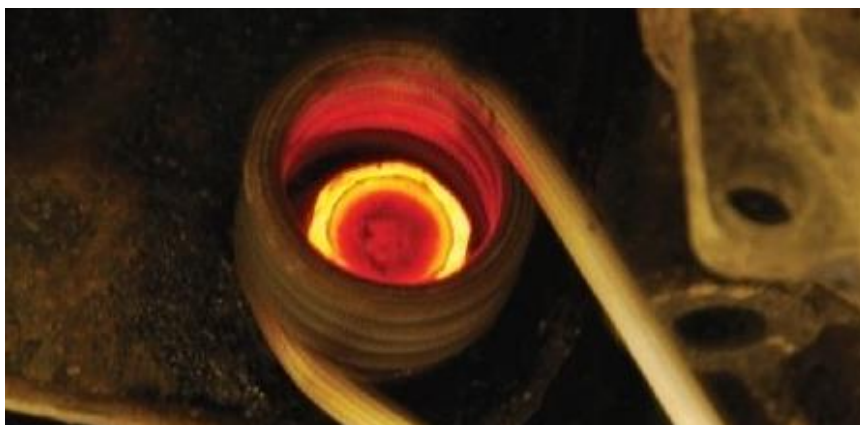
- odporový ohřev funguje na principu průtoku proudu vodičem o daném odporu a ten pak generuje teplo. Tento typ ohřevu je na obr. 9. Ohřev tímto způsobem je používán jednak pro ohřev v pecích, který se hodí spíše na menší a méně tvarově složité

součásti. U ohřevu v pecích lze nastavit jednu teplotu pouze pro celou pec a doložení parametrů pro ohřev je možné, ale jen pro prostor pece. Dále je v praxi odporový ohřev používán i při místním ohřevu. Místní ohřev je prováděn pomocí mobilních zařízení. Při místním ohřevu se využívá obložení svařovaného místa pomocí topných tvarových komponentů vyrobených z keramiky. Lze tedy pro každé místo nastavit individuální parametry ohřevu. Dále pak lze pro každý úsek součásti doložit doklady o předehřevu. Obecně je odporový ohřev velmi energeticky náročný a pomalý, především při ohřevu v odporových pecích. A jak bylo zmíněno v kapitole 1.1 výše laserové svařování dosahuje vysokých rychlostí svařování, a proto se odporový ohřev pro kombinaci s touto technologií příliš nehodí [22],



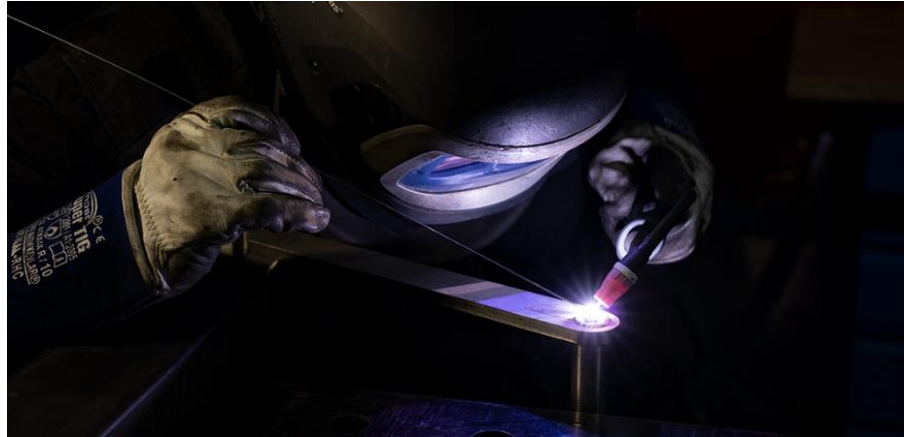
Obr. 9 Odporový ohřev [22].

- indukční předehřev, jehož princip spočívá ve vytváření vířivých proudů ve vodivé součásti. Vířivé proudy vznikají průchodem střídavého proudu cívkou, která je umístěna velmi blízko nebo okolo součásti svařence. Dochází ke vzniku střídavého elektromagnetického pole, které indukuje ve vodivé součásti již zmíněné vířivé proudy. Odpor materiálu k vířivým proudům způsobuje velmi rychlé zahřátí součásti, které můžeme vidět na obr. 10. Tepelné ztráty jsou minimální a požadované teploty je dosaženo v krátkém časovém intervalu. Lze také detailně dokumentovat průběh předehřevu ze záznamů zařízení. Nedochází k oxidaci na povrchu součásti jako u předehřevu plamenem. Běžně se používá například při svařování trubek. Mezi nevýhody je třeba zmínit vyšší pořizovací cena [23, 21],



Obr. 10 Indukční předehřev [25].

- předehřev elektrickým obloukem TIG spočívá v ohřevu materiálu za pomoci některé z obloukových metod svařování jako například metody TIG, která je na obr. 11. Parametry obloukové metody svařování jsou nastaveny tak, aby se předešlo natavení základního materiálu. Součást je elektrickým obloukem pouze ohřáta na teplotu pro předehřev. Předehřev elektrickým obloukem se často využívá u hybridních metod svařování. Výhodou této metody je její poměrně nízká cena, rychlost a možnost použití při svařování rozměrnějších součástí. V kapitole 1.1 výše je zmíněno, že laserové svařování má vysokou rychlost svařování a vzhledem k vlastnostem metody svařování TIG je vidět, že jejich kombinace může být výhodná [23].



Obr. 11 Svařování metodou TIG [26].

2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ

Jedná se o jednu ze základních strojírenských technologií vedle obrábění, tváření nebo odlévání a podobně. Zastoupení svařování jako technologie v porovnání s ostatními technologiemi není zdaleka většinové spíše naopak. Na druhou stranu se touto technologií zpracovává největší množství kovových materiálů, ať už jde o materiály odlévané nebo tvářené. Osvojení si technologie svařování je založeno na znalostech v mnoha oborech. Mezi tyto obory patří například nauka o materiálu, fyzika, chemie, fyzikální metalurgie, matematika apod. [15]

V minulosti po dlouhou dobu byla metoda kovářského svařování jediná známá a dostatečně vyvinutá. Teprve koncem 20. století došlo ke zdokonalení svařování elektrickým obloukem, plamenového svařování a odporového svařování. V první polovině 20. století došlo k rozvoji svařování v ochranné atmosféře netečných plynů. Jeho velkou výhodou byla možnost svařovat hořčíkové a hliníkové slitiny nebo nerezové oceli. Ve druhé polovině 20. století došlo k rozvoji nekonvenčních metod jako jsou plazmové svařování, svařování elektronovým paprskem, svařování výbuchem, difuzní svařování nebo laserového svařování. Laserové svařování a jeho vlastnosti jsou popsány v kap. 1.1. Význam svařování jako technologie se zvyšuje vzhledem k aplikaci nových technologií, které zlepšují výrobní podmínky této technologie. Ovšem s rostoucím významem této technologie rostou i požadavky na jakost výrobků, a to způsobuje nutnost kontinuálního rozvoje technologií svařování a také jejich inovace [20, 27, 28].

2.1 Laserové svařování

Technologie svařování laserem čerpá z objevů Einsteina, Bohra a Plancka, kteří v roce 1916 popsali fundamentální zákonitosti kvantové fyziky. To vedlo k objevům spontánní a stimulované emise záření. Stimulovaná emise záření je s výhodou použita u laseru. Polovina 20. století přinesla zařízení na principu laseru ovšem zesilující radiové mikrovlny. Trojice fyziků Basov, Prochorov a Townes zkonstruovala zařízení maser, které jim zajistilo Nobelovu cenu. Historicky první laserem se nakonec stal v roce 1960 laser využívající aktivní prostředí rubínového krystalu. Laser byl sestaven Američanem T. Maimanem. Laser se využívá nejen pro svařování laserem, ale i pro další technologické operace. Mezi takové dále řadíme například řezání, děrování, značení, mikrozpracování apod. Nejvíce zastoupený laser v průmyslu je při operaci řezání, poté následuje značení laserem, mikrozpracování a na čtvrtém místě je až technologie svařování. Typickou vlastností laseru je směrování energie paprsku na malou plochu. To znamená, že hustota energie je vysoká, a tak dochází k odvodu tepla do materiálu v menší míře. Tato skutečnost je důležitý předpoklad, ze kterého plynou další výhody technologie [20, 29].

Laserové svařování se dá identifikovat podle určitých základních znaků. Spojе vytvořené laserovým svařováním jsou charakterizovány vysokou pohledovou kvalitou a k jejich vzniku dochází bez jakéhokoliv přídavného materiálu. Laserové svary jsou obecně hodnoceny jako velmi spolehlivé. Kritérium kvality spoje lze hodnotit také pomocí tzv. štíhlosti svaru. Obecně to znamená, že čím je svar hlubší a zároveň užší, tím lépe. Laserovým svařováním jsme schopni spojovat materiály nejen ocel, ale i další. Dnes je už známé například svařování plastů, hliníku, mědi nebo mosazi. Svařování laserem se také používá v aplikacích, kdy jsou dva materiály běžnými technologiemi jinak nesvařitelné. Mezi pozitivní vlastnosti této technologie řadíme například štíhlost svaru, rychlost svařování, jednoduchou automatizaci nebo robotizaci, není potřeba přídavný materiál a možnost svařování rozdílných materiálů. V dnešní době je svařování touto technologií čím dál využívanější. Pro zaručení přesnosti a rychlosti je nezbytné automatizovat tuto technologii. Svařovací hlava je pak vedena v přesných drahách a při požadovaných rychlostech svařování. Zde ovšem vzhledem k rychlostem pohybu robotických ramen vzniká riziko posunutí nebo prohnutí například svařovaného plechu nebo

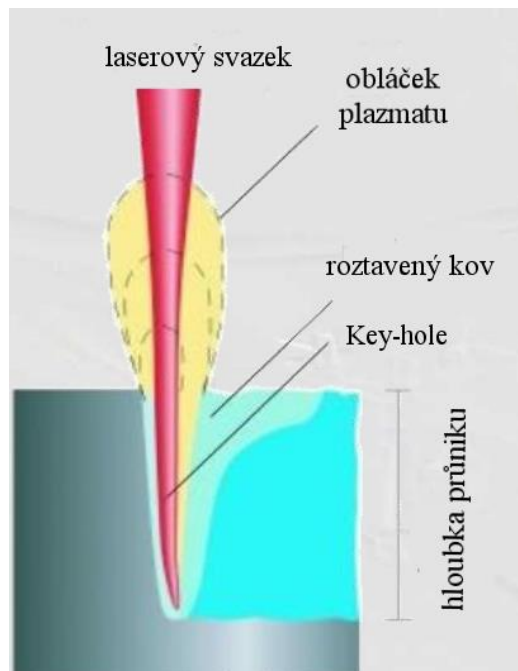
jiné svařované součásti. Řešením může být použití zpětnovazebních systémů ve spojení se svařovacími roboty [20].

Jako každá technologie má i svařování laserem své nežádoucí vlastnosti. Předem je vhodné říct, že se tato technologie hodí do sériové výroby a jak bylo již v úvodní kapitole zmíněno je často používána v automotive. To je zapříčiněno nutnými vysokými počátečními investicemi spojenými s touto technologií. Dále složitost vytváření přípravků je vysoká a, jak bylo zmíněno v kapitole 1.1, při vysokých svařovacích rychlostech dochází k rychlému ochlazování, a proto je výhodné kombinovat laserové svařování s předehřevem či dohřevem. Jedná se o tzv. technologie hybridního svařování, které tyto nevýhody mohou eliminovat [29, 30].

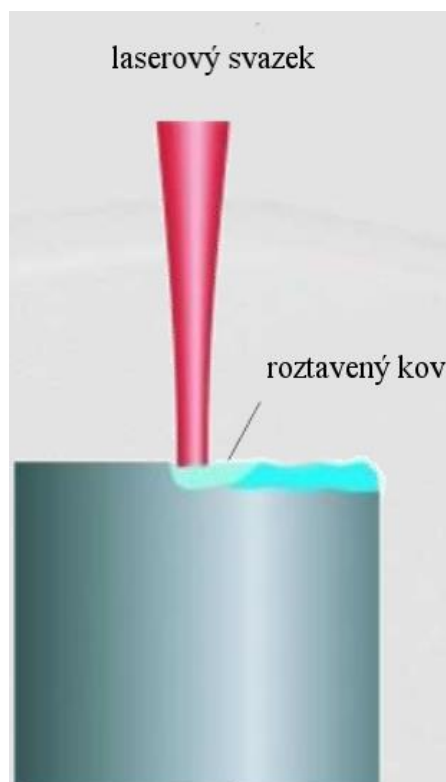
2.1.1 Princip laserového svařování

Při laserovém svařování dochází k zaostření paprsku laseru do velmi malé plošky a tím je ohnisko. Zaostření je realizované pomocí optiky. V ohnisku dojde působením velké koncentrace energie k zahřátí, které je řádově vyšší než úbytek tepla. Tímto mechanismem dojde ke vzniku kapiláry, která je naplněna kovem ve formě par. Tento mechanismus se také nazývá tzv. efekt Key-hole, neboli efekt klíčové díry. Jedná se o otvor kuželovitého tvaru přibližně o průměru laserového paprsku. Páry přítomné v kapiláře dosahují vysokého tlaku a působí proti povrchovému napětí a stabilizují tak tvar Key-hole. Dochází k ionizaci kovových par teplem a tím vzniká plazma. Plazma vystřikuje za vysoké rychlosti z místa svaru. Působení plazmy má několik dopadů na svařování laserem. Plazma vznikající působení laserového paprsku v oblasti nad svarovou lázní moderuje interakci svazku laseru s materiálem a zamezuje tepelným ztrátám na povrchu svaru. Avšak má i negativní dopady a tím je, že dochází kablokování fotonů proudících do svarové spáry v materiálu. Plazma tím absorbuje velkou část energie svazku a pak je hloubka průniku fotonů do materiálu menší. Je proto zapotřebí zaručit odvod plazmy z místa svaru. Přestože laserový paprsek by dosahoval ve vakuu lepších energetických parametrů, tak se běžně provozuje laserové svařování v atmosféře netečných neboli inertních plynů. Důvodů je hned několik. Ochranný plyn vháněný do místa svaru odkloňuje plazmu, která by se jinak hromadila v místě svaru. Současně však působí jako ochrana pro svarovou lázeň a následně tuhnoucí svar před oxidací kyslíkem okolního prostředí. Mezi ochranné plyny řadíme argon, Ar+CO₂, N₂ nebo He. Helium dosahuje nejlepších výsledků při jeho aplikaci při svařování CO₂ laserem, kdy dochází k intenzivní absorpci laserového svazku s vlnovou délkou 10,6 μm v plazmatu. Dle sdělení Libora Mrní ÚPT AV ČR u pevnolátkových laserů s vlnovou délkou okolo 1,0 μm jsou tyto efekty mnohonásobně nižší, a tak stačí použití Argonu. Tento plyn dobře kryje svarovou lázeň a je citelně levnější než Helium. Negativních efektů plazmy vznikající v oblasti svaru se lze vyvarovat použitím určitých parametrů svařování. Parametry musí zohledňovat nutnost prohřátí podpovrchové vrstvy dřívě, než dosáhne teplota povrchu teploty varu a dojde tak k odpařování materiálu. Při volbě nízké hustoty energie je prohřátí dle zmíněných parametrů, a tak vzniká svarová kapilára s rozložením taveniny vyhovujícím pro laserové svařování. K vytvoření samotného spoje dochází čistě natavením základního materiálu a, jak už bylo zmíněno v kapitole 2.1, proto není používán žádný přídavný materiál. Základní materiál navíc přetavením téměř nemění své chemické vlastnosti a složení. Jak už bylo řečeno v kapitole 2.1 změny teplot v průběhu celého procesu jsou velmi rychlé. Při ohřevu k dosažení teploty tavení se jedná o nárůst teploty až 3000 °C/s naopak při chladnutí svarové lázně v pásmu teplot 800 až 300 °C se pohybuje pokles teploty okolo 300 °C/s někdy i více. Důvodem tak rychlého ochlazení je malé množství vneseného tepla. Vzhledem k tak velké rychlosti ochlazování by neměly být touto technologií svařovány oceli s obsahem C nad 0,2 %. Jinak mohou v materiálu vznikat svarové vady. U laserového svařování rozeznáváme dva základní režimy. Jedná se o tzv. penetrační režim s hustotou výkonu 10⁸ W/cm², který je znázorněn na obr. 12. Za působení tohoto režimu vzniká

tzv. Key-hole a byl popsán výše v odstavci. Dále jde o tzv. kondukční režim, kde dochází k transferu tepla a utváření svarové lázně v největší míře vedením. Důsledkem je jiná velikost a tvar svarové lázně viditelná na obr. 13. Tento režim nalézá uplatnění například při spojování plechů o malé tloušťce [18, 15, 29, 30].



Obr. 12 Penetrační režim laserového svařování [18].

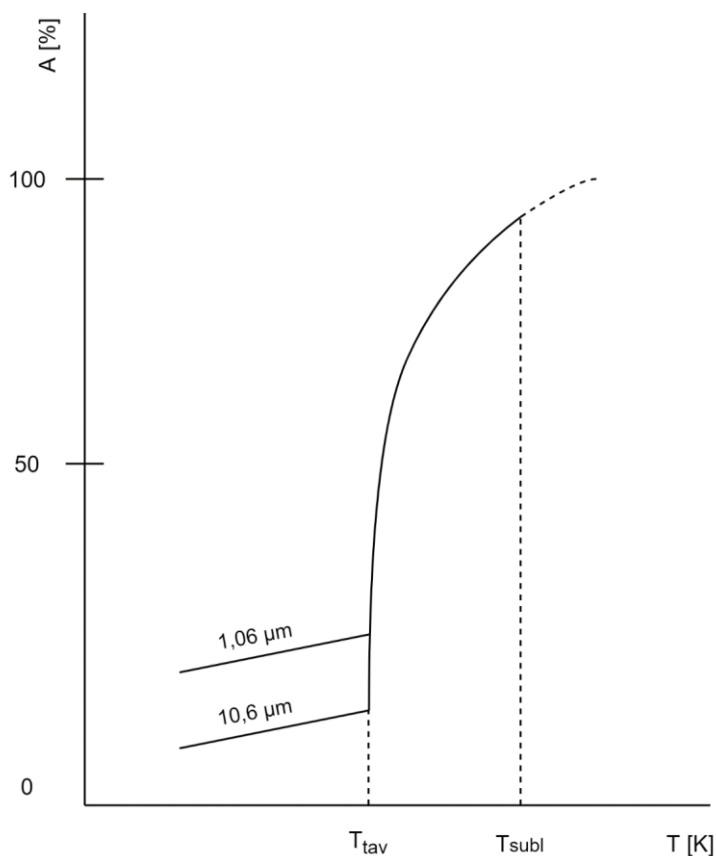


Obr. 13 Kondukční režim laserového svařování [18].

2.1.2 Interakce záření s materiálem

Při kontaktu záření s materiálem dochází k podobným dějům jako u svařování svazkem elektronů. Je tu ale rozdíl ve způsobu transformace energií. U svařování svazkem elektronů

se kinetická energie elektronu při dopadu přemění na tepelnou energii. U technologie laserového svařování k této změně nedochází a foton při dopadu přímo rozvibruje mřížku a tím se zvýší teplo materiálu. Důležitým faktorem při laserovém svařování je míra pohlcení paprsku materiálem. Paprsek je při kontaktu s povrchem buď odrazen mimo materiál nebo pohlcen. Paprsek pohlcený materiálem zprostředkovává ohřev materiálu. Míru pohlcení paprsku materiálem značně ovlivňuje teplota a vlnová délka paprsku. Tuto závislost znázorňuje obr. 14 [15].



Obr. 14 Závislost absorpce na teplotě [15].

Důležitým parametrem je i hloubka prostupu paprsku vrstvou materiálu, který je určen výkonem zdroje, vodivostí daného svařovaného materiálu a také frekvencí vyzařovaného paprsku laseru. Tab. 3 udává součinitele odrazivosti některých kovů [15].

Tab. 3 Součinitele odrazivosti kovů [15].

Materiál	Vlnová délka λ (μm)		
	0,7	1,06	10,6
Hliník	0,87	0,93	0,97
Chrom	0,56	0,58	0,93
Měď	0,82	0,91	0,98
Nikl	0,68	0,75	0,95
Stříbro	0,95	0,97	0,99
Ocel	0,58	0,63	0,93

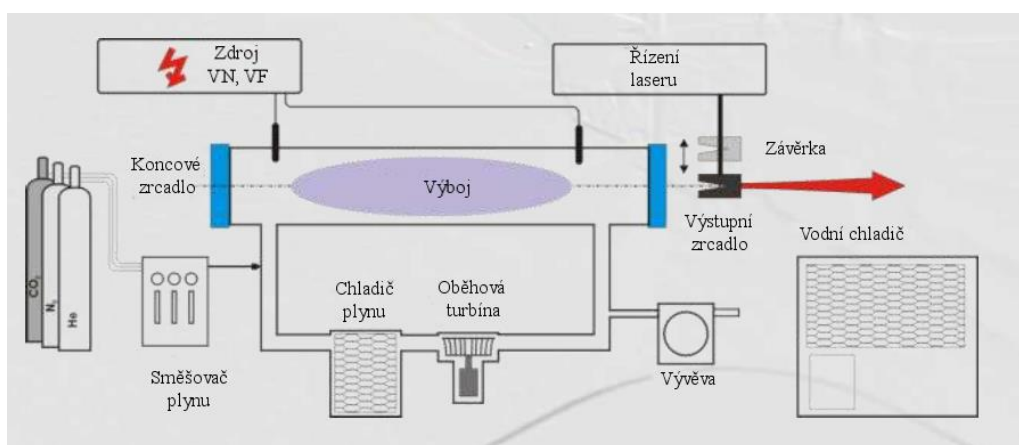
Mezi vlastnosti svazku fotonů dále patří vysoká hustota výkonu na ploše dopadu paprsku. Je možné dosáhnout hustoty až 10^{13} W/cm^2 , pro svařování je, ale vhodný rozsah 10^4 - 10^8 W/cm^2 .

Svazek fotonů neobsahuje elektrický náboj a na paprsek nepůsobí magnetické pole, z toho důvodu lze svařovat i velmi úzké mezery a spáry. Laser lze využít pro svařování magnetických materiálů. Výkon paprsku je velmi přesně dávkovatelný a znovu reprodukovatelný. Dále je svazek fotonů velmi málo rozbíhavý a lze soustředit velmi přesně na plochu. Jedná se až o průměr 10 μm . Průměr laserového svazku při svařování bývá typicky v intervalu 50-1000 μm . Dle sdělení Libora Mrňi je v případě laseru v laboratoři ÚPT AV ČR je to hodnota 420 μm . Záření je velmi koherentní, to znamená děj probíhající opakovaně a bez fázových posunů. Svazek fotonů se také vyznačuje tím, že je monochromatický. To znamená, že se jedná o záření o jedné vlnové délce. Výhodou svazku fotonů je i schopnost procházet průhledným prostředím [15].

2.1.3 Rozdělení laserů vhodných pro průmysl

V současné době je v oblasti průmyslu používáno 5 hlavních druhů laserů. Nd:YAG, CO₂, vláknové, diskové a diodové (polovodičové) lasery. U zmíněných laserů záleží na provozním režimu, typu buzení nebo dalších parametrech. Každý laser má přednosti a nedostatky a od toho se odvíjí jeho příhodné použití pro určité aplikace [31]:

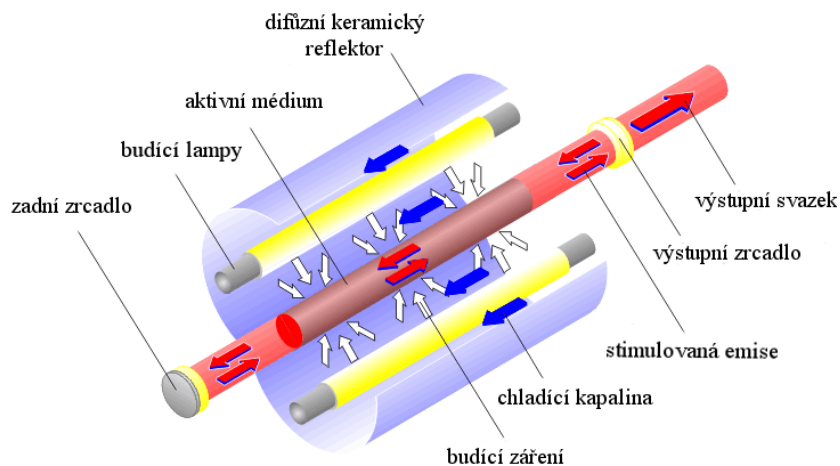
- plynové lasery mají obecně poměrně velké uplatnění. Pro vytvoření jejich aktivního prostředí je využíván plyn nebo směs plynů a par. Schéma plynových laserů je na obr. 15. Výkony těchto laserů jsou v řádech jednotek mW až po desítky kW v kontinuálním režimu svařování. Pro případ impulzního svařování se jedná o hodnoty ve stovkách wattů. Aktivní prostředí obecně u plynových laserů má velmi vysokou optickou homogenitu. Vlnové délky plynových laserů pokrývají velký rozsah spektra. V průmyslu jsou nejčastěji používány CO₂ lasery. CO₂ lasery se řadí k výkonnějším laserům. Například firma Trumo a Rofin-Sinar nabízí lasery do výkonu 20 kW. CO₂ lasery patří mezi nejstarší typ laserů, ale jsou používány hojně i dnes. Tyto lasery se vyznačují emitovaným světlem ve vlnové délce 10,6 μm a energetickou účinností 10-15 %. Plynová směs, která je pro CO₂ lasery využívána obsahuje hlavně He a N. Každý plyn zabezpečuje jinou funkční vlastnost CO₂ směsi. Helium zabezpečuje rozptyl tepla. Dusík pak umožňuje vzniku energie potřebné na excitaci. Výhody těchto laserů jsou poměrně velká účinnost a velký kontinuální výkon. Nevýhodami lze označit velkou vlnovou délku 10,6 μm , která způsobuje velký odraz paprsku a větší stopu zaostřeného paprsku. Podstatnou nevýhodou je snížená absorpce paprsku většinou konstrukčních materiálů a nutnost používat pro dopravu svazku složitou optickou sestavu zrcadel místo optického vlákna [32, 29, 33],



Obr. 15 Schéma CO₂ laseru [34].

- pevnolátkové lasery jsou také často užívaný typ laserů. Tento typ laserů využívá monokrystalické anebo krystalické látky jako aktivní prostředí. Dále jsou do těchto látek přidávány přísady aktivačních prvků. Změnou energetických stavů atomů přísad aktivačních prvků pak dochází k absorpci nebo naopak k vyzáření energie. Základní látka není součástí těchto pochodů, ale ovlivňuje vlastnosti celé látky. Aktivní látky musí mít některé vlastnosti, které zabezpečují jejich správné fungování a nejdůležitější jsou:
 - přísadové atomy musí disponovat systémem hladin, který umožňuje vytvořit početnou inverzní populaci.
 - absorpční pásmo aktivní látky musí být tak velké, aby efektivně pohlovalo energii zdroje,
 - při pracovní frekvenci musí být pravděpodobné, že vzniknou zářivé přechody,
 - optická homogenost aktivní látky tzn. malé množství přísad a defektů, které způsobují rozptýlení a absorpci záření.

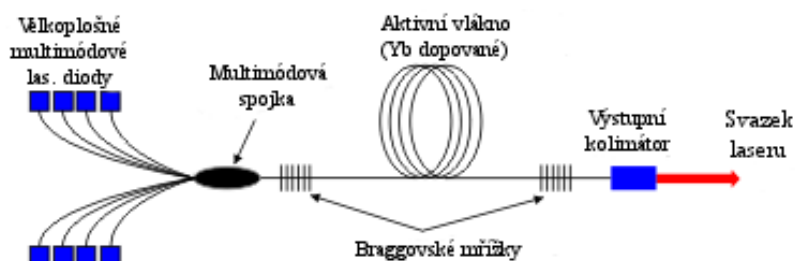
Jako aktivátory jsou nejčastěji používány Cr, Ni, Co nebo Nd, Sm, Gd, Yb. Základními látkami jsou například korund Al_2O_3 , Fluorit CaF_2 nebo také sklo. Svůj význam zde mají technologické vlastnosti aktivní látky. Důležitá je možnost mechanického opracování, leštění nebo fotochemická odolnost. Pevnolátkové lasery obvykle pracují v impulzním režimu a jako zdroj jsou využívány plynové výbojky. Mezi neznámější pevnolátkové lasery patří rubínový laser, Nd:sklo laser a Nd: YAG laser. Jak již bylo uvedeno v předchozím bodě pevnolátkové lasery mají značnou výhodu v možnosti vedení výstupního paprsku optickým vláknem, což ulehčuje nasazení těchto laserů na robotizovaných a automatizovaných pracovištích. Nejvíce využívaný laser je rozhodně laser na bázi křišťálu Nd:YAG, který vyzařuje vlnovou délku $1,064 \mu m$ a je viditelný na obr. 16. Dochází zde k dopování yttrito-hlinitého granátu (YAG) ionty neodymu (Nd). Účinnost výše zmíněného laseru se pohybuje okolo 5 %, je používán v impulzní a kontinuálním režimu. Tyto lasery se využívají na mnoho aplikací v průmyslu. Na svařování nebo řezání hrubých materiálů se používají lasery s kontinuálním výkonem 500 W a s impulzním výkonem 10 kW. Při bodovém svařování přesných dílů se pohybuje výkon okolo 50–100 W a v impulzech více jak 5 kW. Lasery nižších výkonů jsou vhodné pro práce v jemné mechanice a elektronice, dále pak například pro popisování dílců, kde je využito vysoké rychlosti. Hlavními výhodami monokrystalu Nd: YAG laseru v porovnání s jinými látkami aktivovaným Nd jsou dostatečná mechanická pevnost, nízké optické ztráty a tepelná stálost. Za nevýhodu lze považovat náročnost růstu kvalitního monokrystalu [20, 32].



Obr. 16 Schéma Nd:YAG laseru. [33]

Za další krok ve vývoji pevnolátkových laserů lze považovat diodami čerpaný laser Nd:YAG laser. Při použití kryptonových výbojek, které jsou běžné u Nd:YAG laseru, se účinnost pohybuje okolo 2-3 %. Příčinou je vlnových rozsah světla vyzařovaného z výbojek a absorpční rozsah laseru. Vlnový rozsah je poměrně široký, ale laser disponuje poměrně úzkým absorpčním pásmem. To v zásadě znamená, že jen velmi malá část energie je přeměněna na laserový paprsek. Z tohoto důvodu se přistoupilo k používání diod na buzení Nd:YAG laserů. Tím se spektrum vyzařovaného světla značně zúžilo, a tak se dosáhlo znatelného zvýšení účinnosti. Proto mají dnes tyto lasery účinnost okolo 30 %. Jako další variantu Nd:YAG považujeme diskový typ Nd:YAG. Tento typ zlepšuje vlastnosti Nd:YAG laserů v oblasti lepší stability módu a kompaktnější konstrukce [34, 15],

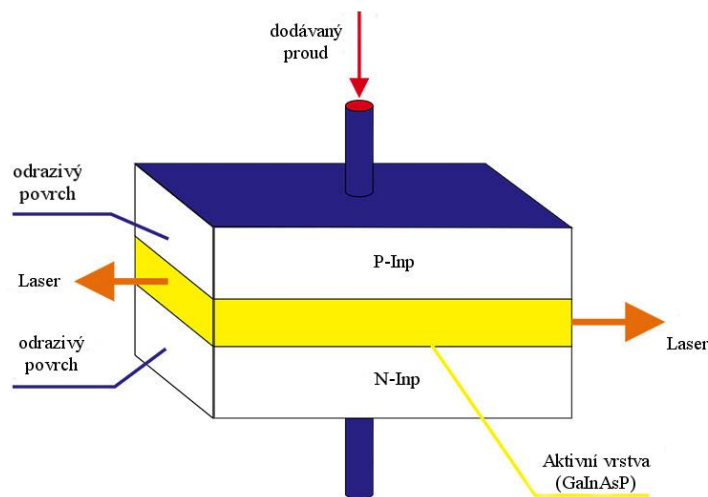
- vláknové lasery jsou dalším podtypem pevnolátkových laserů. Schéma těchto laserů je zobrazeno na obr. 17. Aktivní prostředí se skládá z optického vlákna s příměsí Erbium (Er) a Ytterbia (Yr). Buzení je prováděno pomocí LED diody. Vlnová délka dosahuje 1,07 μm . Vláknový laser je charakteristický vysoce stabilním a kvalitním módem. Mezi výhody patří jednoduchá mechanická konstrukce, vysoké výkony až přes 100 kW. Energetická účinnost dosahuje velmi vysokých 35 %. Je považován za jednu z nejmodernějších metod pro průmyslové řezání, svařování a také značení. Díky tomu také stoupá podíl vláknových laserů na trhu [34, 35, 32, 36],



Obr. 17 Schéma vláknového laseru [33].

- polovodičové lasery patří stále do kategorie pevnolátkových laserů. Polovodič nebo příměsové polovodiče jsou součástí aktivního prostředí laseru. Za pomoci elektrického proudu nebo elektronového svazku dochází k buzení a emisi laserového paprsku. Schéma polovodičového laseru je na obr. 18. Vlnová délka vyzařovaného

paprsku je přibližně (790-980 nm) tj. 1,0 μm . Polovodičové lasery mohou dosahovat výkonu až 10 kW při zachování poměrně menších rozměrů při porovnání s jinými soudobými technologiemi. Jejich doménou je hlavně vysoká účinnost až 40 %. Předností polovodičových laserů je také možnost přeladění v rámci velkého spektra vlnových délek. (0,3 μm – 30 μm). Další výhody jsou nízké pořizovací, provozní náklady a dobrá životnost. Naopak tyto lasery nevynikají kvalitou svazku laserového paprsku a vyznačují se rozbíhavostí vydávaného paprsku. Jedním ze zástupců polovodičových laserů je tzv. diodový laser. Jedná se o laser buzený svazkem elektronů. Aktivní prostředí je tvořeno prvky GaAs, CdS a CdSe. Výstupní paprsek těchto laserů jsou pak obdélníkové plochy. Dalším ze zástupců je tzv. injekční polovodičový laser s aktivním prostředí polovodiče typu P a N. Při provedení laserů s nízkým výkonem do cca 250 W si uchovávají tyto lasery značně malé rozměry. Naleznou upotřebení při svařování a řezání plastů a kovových fólií nebo také při pájení. Naopak vysokovýkonná provedení s výkonem v řádech kW jsou používána na vytvrzování, svařování, natavování nebo pájení natvrdo[32, 34, 35, 37].



Obr. 18 Schéma polovodičového laseru [37].

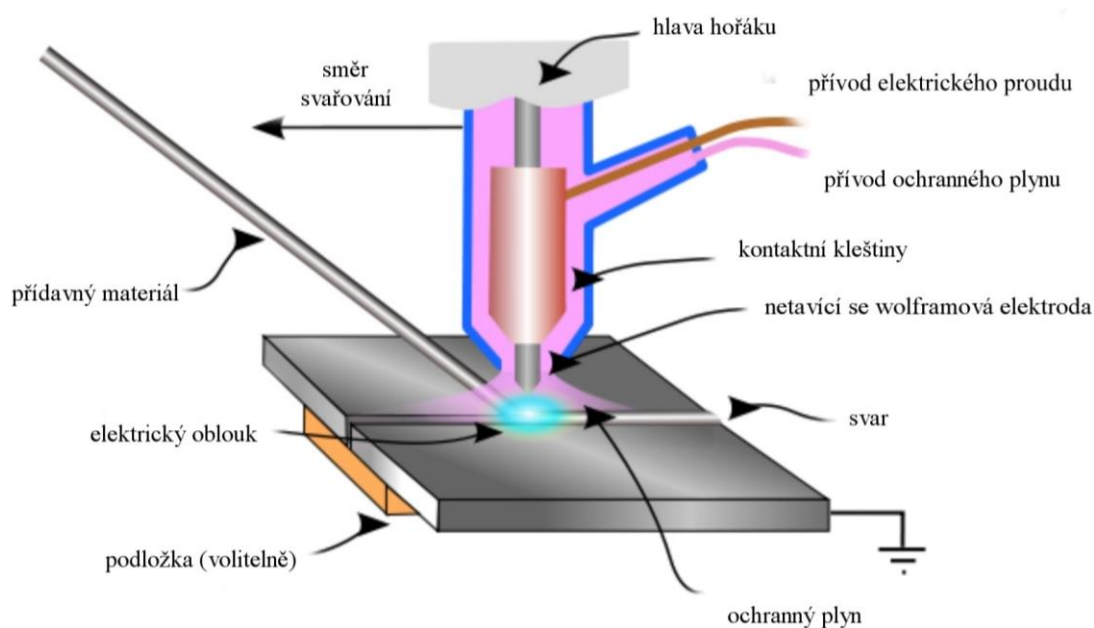
2.2 Svařování netavící se wolframovou elektrodou – TIG

Jedná se o metodu tavného svařování. Přesněji jde o obloukové svařování, kde dochází k zažehnutí elektrického oblouku. Elektrický oblouk vzniká mezi netavící se elektrodou z wolframu a svařovaným neboli základním materiálem. Proces probíhá v atmosféře netečného plynu, která brání vniknutí vzdušného kyslíku do tavné lázně. Existuje několik názvů pro tuto metodu. TIG je anglická zkratka pro tuto technologii a znamená „Tungsten Inert Gas“. Existuje však například WIG „Wolfram Inert Gas“. Jedná se o stejnou technologii, ale jedno označení je německé a druhá pochází z angličtiny. Dalším označením pro tuto technologii je GTAW neboli „Gas Tungsten Arc Welding“ se kterým se lze setkat v Americe. Existuje svařování bez přídavného materiálu, kdy dojde pouze k natavení svařovaných materiálů a vytvoření spoje. Ale také lze provádět svařování s přídavným materiálem ve formě drátů, který má příbuzné vlastnosti jako základní materiál. Dále dělíme technologii TIG na svařování ručním způsobem a na automatické. Svařování ručním způsobem znamená, že přídavný materiál je dodáván manuálně. Automatické pak znamená, že je dodávání přídavného materiálu řízeno podavačem s nastavitelnou rychlostí podávání. Materiály, které lze touto metodou svařovat, ovlivňuje druh proudu, který při technologii TIG použijeme. Svařování střídavým proudem použijeme

na hliník, hořčík také na slitiny těchto prvků. Stejnosměrný proud zvolíme v případě svařování vysokolegované až středně legované oceli, niklu, zirkonu, titanu, mědi atd. Naopak uhlíková ocel není vhodná pro technologii TIG vzhledem k možnému vzniku pórů ve svaru a mimo jiné i z hlediska ekonomičnosti. Metoda TIG se s výhodou uplatňuje při svařování špatně svařitelných materiálů se značnou afinitou ke kyslíku jako jsou třeba titan nebo zirkon. Dále své uplatnění tato metoda nachází při svařování nesterilních materiálů. Například ocel s mědí, slitinou niklu nebo bronzem. Možnost spojování rozličných materiálů předurčuje také tuto technologii k použití pro navařování materiálů při renovacích. Množství aplikací technologie roste, protože svary technologií TIG jsou velmi kvalitní, proces lze velmi dobře řídit a také jednoduše automatizovat. Technologie svařování TIG skýtá mnoho výhod. Inertní plyn dokáže efektivně chránit tavnou lázeň. Svarová housenka je vytvářena požadovaným způsobem. Není nezbytné použití přídavného materiálu. Tavidlo použít lze, ale vzhledem k ochranné atmosféře to není nutné. Elektrický oblouk je velmi stálý. Lze bez problémů regulovat parametry svařování. Tepelně ovlivněná oblast je malých rozměrů. Teplo vnesené do svaru je exaktně dávkovatelné [38, 39, 15, 23].

2.2.1 Princip metody TIG

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.2. u této technologie svařování vzniká elektrický oblouk mezi základním materiálem a wolframovou elektrodou. Wolframová elektroda se nesmí odtavovat, proto se musí vyznačovat odolností proti velmi vysokým teplotám. Svařovanému materiálu je dodáváno teplo elektrickým obloukem do té doby, než dojde ke změně skupenství na kapalné. Pokud se jedná o metodu s přídavným drátem, tak po natavení na kapalné skupenství je na řadě aplikace přídavného drátu do lázně svaru. Wolframová elektroda je upevněna do hořáku pomocí kleštiny a zároveň je pomocí kleštiny veden elektrický proud. Hořák je také osazen otvorem, který dopravuje inertní plyn do místa svařování, a tak dosahujeme ochranné atmosféry. Schéma této metody je na obr. 19. Jak už bylo řečeno v předchozí kapitole 2.2 netečná neboli inertní atmosféra slouží jako ochrana svarové lázně před vzduchem. Pokud se jedná o argon, tak prostřednictvím ochranné atmosféry dochází usnadnění zažehnutí elektrického oblouku. Naopak v případě použití helia je zažehnutí oblouku složitější a je potřeba využít vyšší napětí. K iniciaci elektrického oblouku obvykle dochází působením vysokého napětí na určitou vzdálenost mezi elektrodou a svařovaným materiálem [23, 39].



Obr. 19 Schéma principu metody TIG [40].

2.2.2 Druhy plynů ochranné atmosféry

Jak už víme z kapitoly 2.2.1 a 2.2 ochranná atmosféra chrání svarovou lázeň před působení vzduchu. Ochranná atmosféra při svařování TIG zabraňuje však také ovlivnění netavící se elektrody a okolí svaru. V největší míře se jedná o ochranu před oxidací a naplynění. V menší míře pak podporuje ustálení a zapálení oblouku, tvarování svaru a přenos tepla do svaru [15].

Nejčastějším druhem plynu, který je používán v praxi je argon. Tento plyn je vhodný pro ochranu při svařování všech materiálů, které mají dobrou svařitelnost. Důvodem pro jeho použití je například i příznivá cena. Argon řadíme mezi inertní plyny, nevytváří s žádným prvkem sloučeniny. Argon se vyznačuje poměrně nízkým ionizačním potenciálem a také nízkou tepelnou vodivostí. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.1 oblouk za přítomnosti tohoto plynu je jednoduché zapálit. Tento plyn je stabilní i za poměrně velké délky hoření, je možné ho značně proudově zatížit a má vysoké teploty. Vzhledem k vysoké hustotě argonu, která je přibližně 1,4násobně vyšší než vzduch, má argon vysokou necitlivost k proudění vzduchu, a tím dobrou efektivitu. Argon s běžnou čistotou však není vhodné používat pro materiály, které mají značnou afinitu ke kyslíku. To jsou materiály jako například titan, tantal nebo zirkon. Zmíněné materiály vyžadují vyšší čistotu než, která je běžně dostupná pro argon. Argon je běžně dodáván v čistotě 4.5 tj. 99, 995 %. Avšak u materiálů s vysokou afinitou je nutné užít čistoty 4.8-5.0 tj. 99, 998 % - 99, 999 % [15].

Jak najdeme již v kapitole 2.2.1 další zástupce inertních plynů je helium. Helium je vhodné pro svařování materiálů s větší tloušťkou. Jedná se převážně o hliník, měď a slitiny těchto prvků. Při svařování s ochrannou atmosférou helia je nezbytné použít zdroj s vysokým napětím naprázdno, a to až 100 V. Helium je plyn s naopak velmi nízkou hustotou. Proto klesá jeho efektivita plynové ochrany. Důsledkem je nutnost zvýšení průtoku plynu pro lepší ochranu oblasti svaru. Jak už je zmíněno v kapitole 2.2.1 oblouk se špatně zapaluje, je při delší době hoření nestabilní. Příčinou je mnohem vyšší tepelná vodivost a vyšší ionizační potenciál. Napětí v oblouku tedy musí být vyšší. Spolu se značnou tepelnou vodivostí dochází k vysokému přenosu tepla v oblouku. Jak je výše zmíněno vysoký přenos tepla je příhodný pro svařování materiálů s vysokou tloušťkou. Helium je dále vhodné pro mechanizované metody svařování [15].

Kombinací argonu a helia dostaneme další skupinu inertních plynů. Směsi argonu a helia jsou vhodné pro svařování mědi a hliníku. Dále je vhodné pro svařování ostatních kovů, avšak mechanizovaným svařováním větších tlouštěk. Směs argonu a helia kombinuje vlastnosti daných plynů. Čím více helia ve směsi je, tím vyšší napětí a tepelný výkon je v oblouku. Tato skutečnost ovlivňuje pozitivním způsobem tvar a rozměry svaru. Dále platí, že při použití směsi argonu a helia roste rychlost svařování, zvyšuje se hloubka závaru a je možné snížit teplotu předehřevu kovů s vysokou tepelnou vodivostí. Směsi argonu a helia jsou k dostání v tlakových lahvích v různých kombinacích. Jedná se o kombinace 70 % Ar + 30 % He, Ar-He 50-50 a 30 % Ar + 70 % He [15].

Pokud kombinujeme argon s vodíkem, tak dosáhneme podobných vlastností jako u argonu a helia. Vodík je však možné použít výhradně pro svařování vysocelegovaných austenitických a austeniticko-feritických Cr-Ni ocelí. Vodík má velmi vysokou teplotní vodivost, a proto i zlepšuje tepelnou bilanci oblouku. Pokud je přírůstek vodíku 5 % roste čistota povrchu. Při desetiprocentním přírůstku roste rychlost svařování, hloubka závaru a svar je výhodnějšího tvaru [15].

2.2.3 Hořáky a netavící se elektrody metody TIG

Jak již bylo nastíněné v kapitole 2.2.1 svařovací hořáky plní mnoho rozdílných funkcí a lze říct, že patří k velmi zatíženým součástem. Úkolem hořáku je přivést a nasměrovat ochranný plyn, upevnění elektrody z wolframu v požadované poloze, přívod a odvedení vody potřebné k chlazení a vedení elektrického proudu pro elektrodu. Hořáky lze dělit podle způsobu chlazení na hořáky do 150 A, kdy se se jedná o hořáky chlazené procházejícím plynem a do 350 A (až 500 A), kdy je využíváno vodou chlazených hořáků [15].

Hořáky se skládají z krytu wolframové elektrody, těla, plynové trysky a kleštiny. Pohled na hořák je na obr. 20. Kleštiny slouží k pevnému upnutí elektrod a také napájení elektrod proudem. Mezi kleštinou a přechodovou elektrodou vzniká přechodový odpor, a tak je nutné pevné upnutí elektrody, které přechodový odpor sníží. Další součástí je plynová tryska. Působením trysky je plyn usměrněn do svařovaného místa. Tryska je také jedna z tepelně namáhaných součástí. Trysky jsou vyrobeny z keramiky nebo z kovu. Keramické trysky najdeme v ručních hořácích chlazených procházejícím plynem a kovové pak ve strojních hořácích chlazených vodou. Průměr trysky je volen s ohledem na plochu, která má být plynem ochráněna. Pro optimalizaci ochrany plynem je možné prodloužit laminární proudění plynu aplikací sítěk neboli plynových čoček. Tím dojde k úspoře plynu až o polovinu a elektroda je vysunuta o 15 až 20 mm, a to navíc více zpřístupní místo svařování. Pro správné dávkování plynu se užívají průtokoměry. Optimální průtok určují následující parametry:

- svařovaný materiál,
- typ plynu ochranné atmosféry,
- svařovací proud,
- průměr plynové trysky,
- sklon hořáku,
- proudění okolního vzduchu,
- svařovací poloha,
- typ svaru [15].



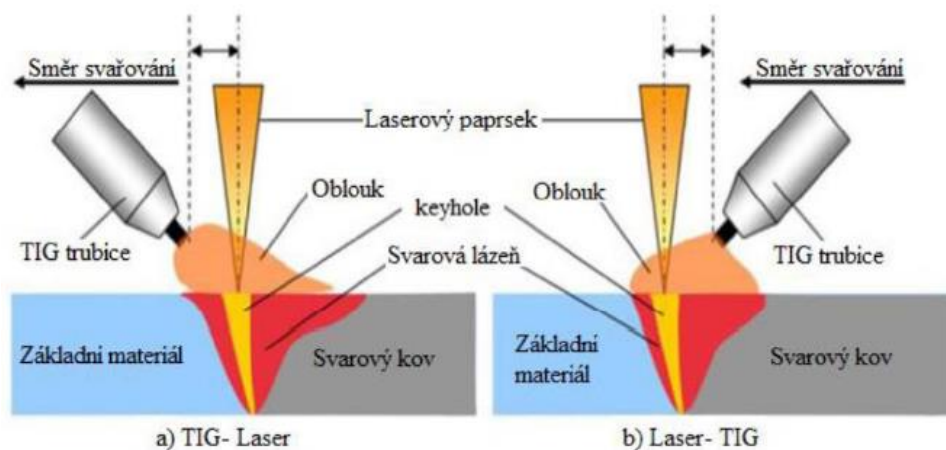
Obr. 20 Hořák TIG [41].

2.3 Hybridní technologie svařování LASER-TIG

Také dle předchozí kapitoly 2.1. má laserové svařování mnoho výhod. Mezi ně patří například vysoká svařovací rychlost, úzká tepelně ovlivněná oblast nebo velká hloubka svaru

v porovnání s šířkou svaru a další. Jak již bylo popsáno v kapitole 2.1. i tato technologie skrývá i některé negativní vlastnosti. Při laserovém svařování je zde například sklon svaru k tvorbě trhlin z důvodu příliš velké rychlosti svařování a tím i rychlého ochlazování. Existuje několik metod hybridního svařování. Cílem těchto metod je potlačit nedostatky a zužít či podpořit přednosti jednotlivých metod. Jedna z metod hybridního svařování využívá laseru v kombinaci s hořením elektrického oblouku tzv. Laser-TIG. Pomocí kombinace těchto technologií dojde k potlačení některých negativních vlastností [4].

Existují dvě základní konfigurace Laser-TIG. První konfigurací je, když laserový svazek předchází elektrodu technologie TIG a druhá, když elektroda technologie TIG předchází laser. V případě první konfigurace dochází k odstranění vrstvy oxidů před svařováním TIG. To zabezpečuje mnohem stabilnější proces. Vzhledem k výše zmíněnému je tato konfigurace často využívána pro svařování hliníku. Druhá konfigurace zase dosahuje vyšších průvarů. Důvodem je již přehřátá svarová lázeň, která se vyznačuje lepší absorpcí laserového paprsku než pevný materiál. Obě konfigurace technologie hybridního svařování Laser-TIG jsou na obr. 21 [42].



Obr. 21 Dvě konfigurace technologie Laser-TIG [42].

Jak bylo výše zmíněno aplikací jedné či druhé z konfigurací hybridní technologie Laser-TIG je možné značně pozitivně ovlivnit vlastnosti svaru. Dochází ke snížení rychlosti chladnutí svaru, a tím dochází ke zvýšení difuze vodíku pryč ze svarové lázně. To snižuje nebezpečí vzniku pórů a nežádoucího ovlivnění mechanických vlastností. Hybridní technologie Laser-TIG má mnoho výhod jako například stále vysoká svařovací rychlost, vysoká stabilita oblouku, vyšší účinnost tavení, snížení nákladů důsledkem rychlosti, menší problémy se svařováním reflektivních materiálů, užší tepelně ovlivněná oblast. Nevýhodou se stává vyšší pořizovací cena a také složitější nastavení parametrů pro svařování. Při laserovém svařování je nutno dbát například na nastavení výkonu laseru nebo polohu ohniska a další běžné parametry. U hybridní technologie Laser-TIG je navíc nutné zvolit průměr elektrody TIG, množství proudění ochranného plynu nebo vzdálenost mezi paprskem laseru a elektrodou TIG. Například při příliš malé vzdálenosti mohou vznikat vady ve svaru z důvodu narušené stability oblouku [20, 4].

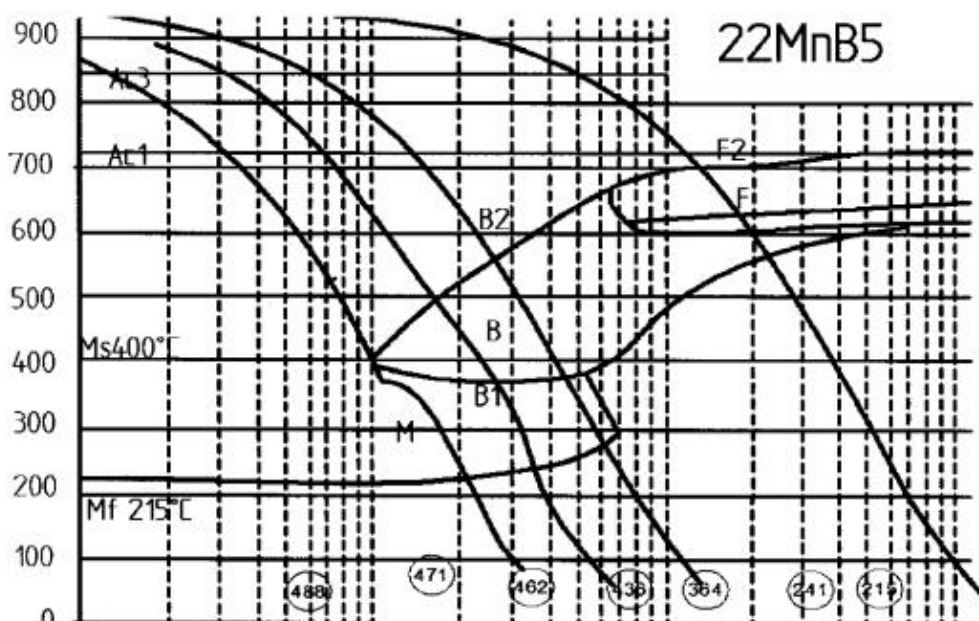
2.4 Předehřev a výpočet teploty předehřevu

Předehřev spočívá v ohřevu materiálu před svařováním na určitou teplotu. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1 tímto ohřevem je dosaženo nižšího rozdílu teplot mezi svarovým spojem a základním materiálem nebo jinými slovy snížení teplotního gradientu. V důsledku toho je snížena rychlost chladnutí svarového spoje po svařování. Předehřevem minimalizujeme riziko vzniku studených trhlin [43, 20, 44].

Pro znázornění přeměn fází využíváme diagram ARA, který zobrazuje přeměnu austenitu za různých rychlostí ochlazování. ARA diagram pro ocel 22MnB5 je na obr. 22. U manganoborové oceli 22MnB5 může dojít ke vzniku několika fází v závislosti na rychlosti ochlazování. V případě velmi pomalého chladnutí může dojít ke vzniku feritické struktury. Běžně v případě manganoborových ocelí je dosahována struktura obsahující martenzit a jedná se o část diagramu ARA pod kritickou rychlostí ochlazování. Dále je možné aby při určité rychlosti ochlazování vznikala struktura buď martenziticko-feritická nebo dokonce martenziticko-bainitická. Vznik obecně martenzitu však neovlivňuje pouze rychlost ochlazování po svařování, ale i množství uhlíku v oceli. Obecně platí, že čím je množství uhlíku v oceli vyšší, tím roste i pevnost a tvrdost oceli. Místem s nejvyšší tvrdostí je oblast svarového spoje v tepelně ovlivněné oblasti, což je způsobeno rychlostí ochlazování v tomto místě. Vysoká rychlost ochlazování způsobuje zvýšení obsahu martenzitu v daném místě [43, 20].

Vodík je v ocelích nežádoucím prvkem a působí na vznik zbytkového napětí potažmo studených trhlin. Jeho výskyt ovlivňuje negativně mez pevnosti a mez kluzu. Předehřevem tedy dochází ke snížení tempa ochlazování svaru v oblasti transformačních teplot 800-500 °C, a tím dochází k difuzi většího množství vodíku pryč z oblasti svarového spoje [20].

Předehřevem dojde ke vnesení většího množství tepla do materiálu. Dochází k rozšíření TOO a prodloužení času chladnutí svaru. S délkou chladnutí se zvyšuje velikost zrn ve struktuře. Vyšší hrubozrnnost struktury působí negativně na TOO tím, že zhoršuje její plasticitu [43].



Obr. 22 ARA diagram oceli 22MnB5 [1].

Výpočet teploty předehřevu závisí na chemickém složení oceli. Chemické složení oceli je charakterizováno pomocí uhlíkového ekvivalentu. Dále pak závisí na tuhosti spoje, tloušťce materiálu, příkonu zdroje při svařování nebo třeba na obsahu difuzního vodíku. Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu najdeme v literatuře mnoho vzorců, které se dělí podle chemického složení daného materiálu. Jedním z nich je vzorec (2.1) [43]:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024s \text{ [%]} \quad (2.1)$$

Kde s ... tloušťka plechu [mm]

Pro dobrou svařitelnost oceli je nutné udržet hodnotu C_e pod 0,5 %.

Tento vzorec je využíván pro materiály s obsahy prvků dle tab. 4.

Tab. 4 Maximální množství prvků v oceli pro použití výpočtu uhlíkového ekvivalentu dle (2.1) [43].

Prvek	C	Mn	Cr	Ni	V	Cu
Max. obsah [hm. %]	0,22	1,6	1	3	0,14	0,3

Pro oceli s obsahem $C > 0,18$ hm. % byl Mezinárodním svářečským institutem (IIW) definován vzorec (2.2):

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} [\%] \quad (2.2)$$

[43]

Pro oceli s parametry podle tab. 5 není nutné využívat zvláštních opatření [43].

Tab. 5 Parametry ocelí pro výpočet vzorcem (2.2) [43].

Nízkouhlíkové, nízkolegované C-Mn oceli R_m [MPa]	C [hm. %]	$C_{e(IIW)}$ [hm. %]	Tloušťka [mm]
370-520	$\leq 0,22$	$\leq 0,41$	≤ 25
500-700	$\leq 0,20$	$\leq 0,45$	≤ 25
	$\leq 0,20$	$\leq 0,41$	25-37

Pro vysokopevnostní a nízkolegované oceli je používán vzorec CET (2.3):

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} [\%] \quad (2.3)$$

[45]

Rovnice (2.3) je platná pro rozsah chemického složení dle tab. 6 [45].

Tab. 6 Maximální množství prvků v oceli pro použití výpočtu uhlíkového ekvivalentu dle (2.3) [45].

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	B
Max. obsah [hm. %]	0,25	0,8	1,9	1,5	0,7	0,75	0,06	2,5	0,12	0,18	0,005

Jak již bylo zmíněno výše v kapitole 2.4. uhlíkový ekvivalent je veličina, která zohledňuje chemické složení oceli a jeho vliv na náchylnost oceli k zakalení. S čímž souvisí vznik trhlin za studena. Uhlíkový ekvivalent je také dále používán ke stanovení teploty předehřevu [43].

Teplota předehřevu se určuje buď experimentálními zkouškami nebo pomocí empirického výpočtu. Mezi experimentální zkoušky patří například zkouška Tekken nebo CTS. Tyto zkoušky jsou ale poměrně finančně náročné a složité na přípravu, proto v praxi je spíše využíván přístup pomocí empirického výpočtu. Jedním z těchto výpočtů je výpočet předehřevu dle Séferiána (2.4) [20].

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.4)$$

Kde T_p ... teplota předehřevu [$^\circ\text{C}$]

$$C_p = C_c + C_s \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.5)$$

$$C_c = \frac{360C + 40(Mn + Cr) + 20Ni + 28Mo}{360} \quad (2.6)$$

$$C_s = 0,005 \cdot s \cdot C_c \quad (2.7)$$

Kde s ... tloušťka materiálu [mm] [43]

Norma ČSN EN 1011-2 stanovuje dvě metody výpočtu předehřevu pro nelegované, jemnozrnné a nízkolegované oceli a těmi jsou metoda A a B. Metoda A – ČSN EN 1011-2 čerpá ze znalostí, které jsou relevantní pro uhlíko-manganové oceli. Chemické složení a jeho působení je zohledněno pomocí uhlíkového ekvivalentu CE, dále bere tato metoda v potaz obsah vodíku, tloušťku materiálu a vnesené teplo do materiálu. Metoda B – ČSN EN 1011-2 je spíše vhodná pro nízkolegované vysokopevnostní oceli. Tento výpočet zohledňuje poměrně široké spektrum parametrů. Jedná se o působení chemického složení vyjádřené pomocí uhlíkového ekvivalentu CET, tloušťky plechu, množství vodíku ve svaru nebo tepelného příkonu [46].

Všechny zmíněné metody jsou určeny pro určení teploty předehřevu pro obloukové svařování. Proto je nutné brát v potaz, že svařování laserovým svazkem má mnohem vyšší rychlost ochlazování a tyto vztahy jsou potom spíše orientační. Empirické vztahy pro svařování laserem nejsou dostupné, tak je dočasně nutné využít těchto. Vliv na rychlost ochlazování má i množství vneseného tepla do materiálu. Výpočet vneseného tepla je dán vztahem (2.8) [20].

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} = k \cdot \frac{P \cdot 60}{v \cdot 1000} \quad [\text{kJ}/\text{mm}] \quad (2.8)$$

Kde	$Q...$	vnesené teplo [kJ/mm]
	$k...$	koeficient účinnosti [-]
	$U...$	svařovací napětí zdroje [V]
	$I...$	svařovací proud [A]
	$v...$	rychlost svařování [$mm/min.$]
	$P...$	výkon svařovacího zdroje [W] [20]

2.5 Vady svarů laserového svařování

Vada svaru snižuje hodnotu meze únavy a v některých případech může iniciovat i křehký lom. Vady ve svarech totiž vytváří koncentrátoři napětí a ty jsou příčinou snížení mechanických vlastností svaru. Obecnou definicí vady se rozumí každé odchýlení od parametrů určených technickými normami nebo smluvním vzorkem. Svarové vady je možné rozdělit na vady zjevné a skryté. Vady zjevné lze odhalit pouhým okem nebo za pomoci jednoduchých pomůcek. Vady skryté pak je nutné odhalit pomocí přístrojového vybavení nebo laboratorní zkouškou. Podle toho, jestli lze vadu tolerovat z hlediska technických norem dělíme vady na přípustné a nepřípustné. Vady přípustné pak nemusí být opraveny, protože splňují parametry určené normou. Naopak nepřípustné musejí být opraveny. Dalším dělením je na opravitelné a neopravitelné. O připuštění svaru do provozu rozhoduje známé dané provozní zatížení, které nesmí být pro danou svarovou vadu nebezpečné [47].

Vady, které při svařování vznikají lze dělit podle tvaru a polohy jsou na obr. 23. Pokud zohledňujeme tvar, tak vady dělíme do tří hlavních skupin. Jedná se o vady bodové, objemové a plošné [47].



Obr. 23 Dělení vad podle tvaru a polohy [47].

Bodové vady zahrnují mikropóry nebo vměstky malých rozměrů. Objemové vady obsahují plynové dutiny, vměstky, staženiny, zápaly, vruby, nedodržení rozměru a nepravidelný povrch svaru. Plošné defekty popisujeme jako neprůvary nebo studené spoje. Dělení podle polohy je na vady povrchové a vady vnitřní. Mezi povrchové vady patří například studené spoje na svarové ploše, zápaly, póry nebo nepovažené kořeny. Vnitřní vady zahrnují bubliny, póry, vměstky, plynové dutiny a staženiny. Na vady svarových spojů a důvod vzniku má vliv druh materiálu, který je svařován a také použitá metoda svařování. Norma ČSN ISO 6520 definuje 6 skupin vad, které se obecně mohou při svařování vyskytnout. V praxi však existují tyto vady [47]:

- horké trhliny vznikají hlavně kvůli chemickému složení základního materiálu a jsou na obr. 24. V případě, že se v materiálu vyskytuje velké procento uhlíku, manganu nebo také síry dochází ke vzniku trhlín za působení vysokých teplot. Jedná se o teploty v rozmezí 800-900 °C [47],



Obr. 24 Horká trhlina [47].

- studené trhliny jsou důsledkem působení vodíku, což již bylo rozebráno v kapitole 2.4. Typická studená trhlina je viditelná na obr. 25. Narazíme na ně i u ocelí legovaných nebo u ocelí s vysokým obsahem uhlíku. Trhlina se ve sváru objeví zpravidla při teplotách pod 300 °C po ukončení svařování. Jak již bylo poznamenáno v kapitole 2.4, lze vzniku těchto trhlin předejít použitím předehřevu [47],



Obr. 25 Studená trhlina [47].

- žíhací trhliny mohou vznikat v oblasti teplot do 300 °C, kdy mechanismem vzniku je velký teplotní gradient mezi povrchem a středem svaru. Další možností vzniku žíhací trhliny je působením na materiál především ocelí na bázi chromu a vanadu v oblastech dolních žíhacích teplot (500-600 °C) [47],
- lamelární trhliny se vyskytují nejen v základním materiálu, ale i v tepelně ovlivněné oblasti. Vyskytují se zejména za vysokých teplot, ale mohou být iniciovány i za studena. Rozválcované nečistoty, jako siřnkové a oxidické vměstky spolu s působením napjatosti v materiálu, zapříčiňují vznik lamelárních trhlin [47],
- kráterové trhliny pak vznikají při prudkém a okamžitým přerušení svařování a jsou zachyceny na obr. 26. Příčinou této vady je tedy smršťování při chladnutí svárového kovu. Kráterové trhliny najdeme v dutině kráteru viditelné na obr. 26 [47],



Obr. 26 Kráterová trhlina [47].

- studené spoje lze popsat jako nedokonalé spojení mezi svarovým kovem a housenkou nebo mezi svarovým kovem a základním materiálem. Studené spoje vznikají použitím nesprávných svařovacích parametrů. Použitím nízkých svařovacích proudů, vysokých rychlostí svařování, příliš malým průměrem elektrody nebo špatným vedením elektrody [47],
- neprůvary mohou vznikat, pokud nedojde k řádnému natavení základního materiálu nebo přilehlých svarových housenek. Neprůvary často vznikají při svařování technologií MIG/MAG při zkratovém procesu. Důvody proč tyto vady vznikají jsou například vysoká svařovací rychlost, nesprávně připravené úkosy pro svařování, příliš malý svařovací proud, průměr obalené elektrody je příliš vysoký, příliš vysoká housenka nebo předběhnutí svarové lázně [47],
- vměstky se nazývají také inkluze a existuje několik druhů. Rozlišujeme mezi struskovými, oxidickými a kovovými. Struskové vměstky jsou řazeny mezi tzv. exogenní a tyto vměstky jsou nebezpečné a mohou iniciovat trhlinu. Další kategorie vznikají chemickou reakcí v tavenině. Oxidické vměstky jsou tvořeny hlavně z důvodu špatného čištění povrchu a najdeme je u oxidů hliníku a hořčíku. Kovové vměstky jsou tvořeny v materiálu působením vysokých proudů svařování, porušením ochranné plynové atmosféry nebo dotykem elektrody s tavnou lázní [47, 20],
- bubliny jsou vady kulovitěho tvaru. Ke vzniku dojde působením plynů nahromaděných uvnitř taveniny. Plyn nedifunduje dostatečně rychle pryč z materiálu a následně dojde ke ztuhnutí, a tak vznikne dutinka naplněná plynem. Plyn, který je uvnitř bublin, je často vodík, dusík nebo kyslík. Každý z těchto plynů působí odlišně na materiál. Vodík jak již bylo naznačeno v kapitole 2.3 zvyšuje křehkost materiálu. Dusík zase zvyšuje náchylnost k deformačnímu stárnutí a snižuje tak plasticitu. Bubliny jako vady jsou typické pro svařování laserem. Důvodem je rychlé kmitání keyhole a následné uzavírání plynů v bublinách [20],
- zápaly jsou častou vadou u koutových svarů. Jedná se o natavená prohloubení, která mají ostrou hranu. Tato natavená prohloubení jsou na hranicích svarové housenky a základního materiálu. Mezi hlavní příčiny řadíme vysokou hodnotu svařovacího proudu, nevhodné vedení elektrody, dlouhý svařovací oblouk nebo špatně zvolený průměr elektrody [47],
- kořenové vady jsou spojeny s deformací kořenu svaru, a to například propadem kořenu svaru nebo nesprávně provařeným koncem svaru [20].

Skutečnost, zda je vada ve spoji přípustná záleží na druhu, četnosti a velikosti vady. Je nutné zohlednit i geometrii konstrukce, stav napjatosti, orientaci nebo velikost vady, pracovní

prostředí nebo mechanické vlastnosti spoje. Pokud hodnotíme provozní přípustnost, tak hlavním rozhodovacím parametrem je zkušenost, že vady mají největší vliv na porušování křehkým lomem a únavové porušení. Tento předpoklad platí hlavně u trhlin, které jsou považovány za nejvíce rizikové. Konstruktor spolu s technologem určí přípustnou mez vady. Norma ČSN EN ISO 5817 stanovuje meze přípustnosti vad pro tři stupně jakosti. Jedná se o stupně jakosti B, C a D a odpovídají jakosti ve výrobě. Dochází ještě ke kontrole pracovníkem nedestruktivní kontroly, aby výrobek splňoval kritéria jakosti a spolehlivosti [47].

2.6 Zkoušky svarových spojů

Při svařování dochází tepelnému ovlivňování materiálu. Materiál v místě spoje má strukturálně i mechanicky speciální vlastnosti. Abychom zaručili bezpečnost a spolehlivost je nutné sledovat vlastnosti použitých materiálů a svarů. Pro otestování a zajištění požadovaných vlastností se vyvinuly standardizované testy. Tyto testy garantují přesnost a opakovatelnost výsledků při dodržení podmínek zkoušení [20, 43].

Každý materiál, který je vyroben pomocí postupy běžně užívanými v průmyslu obsahuje nějaké vady. Jedná se o vady submikroskopické, tedy na úrovni atomů, krystalových mřížek apod. Tyto vady jsou ale hůře zjištělné a pokud zkoumáme svary, tak se spíše zaměřujeme na vady makroskopické. Makroskopické vady lze dobře odhalit vizuálně nebo ultrazvukem, což jsou poměrně běžné technické prostředky [48].

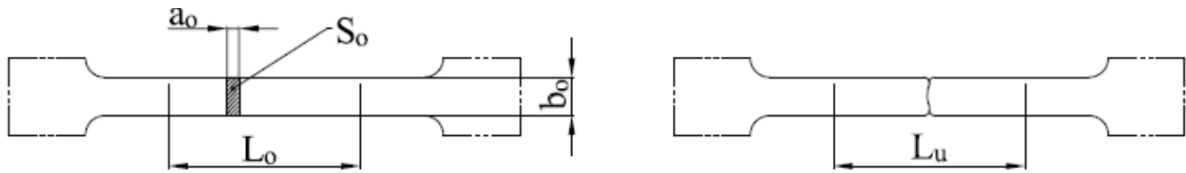
Rozlišujeme dva druhy zkoušek svarových spojů. Nedestruktivní zkoušky, kde nedochází k porušení materiálu zkoušeného vzorku. A zkoušky destruktivní, jak už název napovídá zde dochází k porušení materiálu u zkušebního tělesa. Rozdělení zkoušek obsahuje tab. 7. Nedestruktivní zkoušky se vyznačují vysokými náklady spojenými s provozem, kontinuálním školením obsluhy, seřazením daných zařízení a také samotným pořízením přístrojového vybavení. Destruktivní metody nacházejí své uplatnění zejména u velkosériových výrobků při definování, jaký bude postup svařování. Jedná se o mechanické a metalografické zkoušky, které jsou zásadní pro určení mezí pevnosti konstrukce [49].

Tab. 7 Rozdělení zkoušek svarových spojů [49].

Destruktivní	Nedestruktivní
zkouška tahem	vizuální kontrola
zkouška lámavosti	zkouška prozářením
zkouška rázem v ohybu	zkouška ultrazvukem
zkouška tvrdosti	zkouška magnetická prášková
zkouška makro a mikrostruktury	zkouška kapilární

2.6.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem patří mezi základní zkoušky k určení mechanických vlastností. Pro tuto zkoušku se využívá buď normalizované kruhové tyče nebo při zkoušení plechu se jedná o plochou tyč viditelnou na obr. 27. V obou případech je zkušební těleso osazeno hlavou pro dobré uchycení v trhacím zařízení. V trhacím zařízení následně dochází k zatěžování tělesa až do přetržení. Tento proces musí probíhat za předem daných podmínek. Jedná se o teplotu a rychlost deformace. Výsledkem této zkoušky je graf závislosti zatížení na prodloužení a jedná se o tzv. klasický tahový diagram. Z tohoto grafu lze vyčíst tyto veličiny [43]:



Obr. 27 Zkušební tyč plochá [50].

- a) Lineární závislost deformace na napětí neboli tzv. Hookův zákon (2.9):

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \text{ [MPa]} \quad (2.9)$$

Kde σ ...napětí [MPa]

ε ...deformace [%]

E ...modul pružnosti v tahu [MPa]

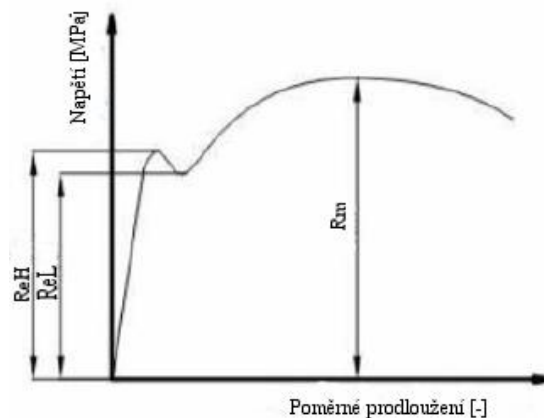
- b) Při zatížení na úrovni meze kluzu R_e dochází k prudkému růstu deformace bez dalšího přírůstku napětí. Její výpočet je dán vztahem (2.10):

$$R_e = \frac{L_e}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (2.10)$$

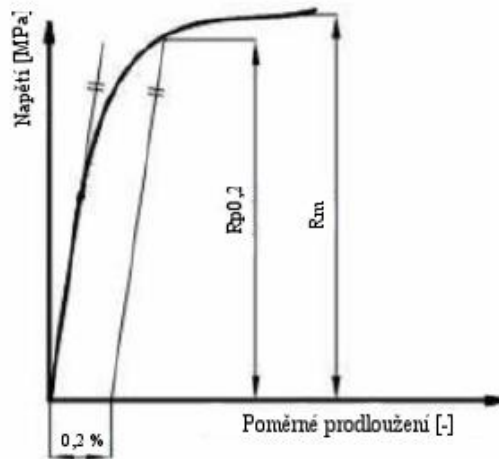
Kde L_e ...zatížení na mezi kluzu [N]

S_0 ... plocha průřezu [m²]

Ne všechny materiály vykazují tzv. horní a dolní mez kluzu, která je označená na obr. 28. Horní a dolní mez kluzu je rozlišitelná např. u měkkých ocelí. Naopak u materiálů s vysokou pevností se vyskytuje nevýrazná mez kluzu, která je zobrazena na obr. 29. Pro stanovení meze kluzu u těchto materiálů je používána tzv. smluvní mez kluzu $R_{0,2}$. Smluvní mez kluzu je určována jako průsečík rovnoběžky s lineárním průběhem zatížení-deformace při 0,2 % deformace. Smluvní mez kluzu je považována za ekvivalentní k reálné mezi kluzu R_e [43].



Obr. 28 Tahový diagram s výraznou mezi kluzu [20].



Obr. 29 Tahový diagram s nevýraznou mezí kluzu [20].

- c) Mez pevnosti materiálu (R_m) v rámci tahového diagramu označuje dosažení maximálního zatížení. Její výpočet je dán vztahem (2.11):

$$R_m = \frac{L_m}{S_o} [MPa] \quad (2.11)$$

Kde L_m ... max. zatížení [N]

S_o ... plocha průřezu [m^2]

- d) Tažnost (A), která patří k základním plastickým materiálovým vlastnostem. Výpočet dle vztahu (2.12):

$$A = \frac{l - l_o}{l_o} \cdot 100 [\%] \quad (2.12)$$

Kde l_o ... výchozí měřená délka tyče [m]

l ... měřená délka tyče po přetržení [m]

- e) Kontrakci (Z), jakožto další plastickou materiálovou vlastnost definovanou vztahem (2.13):

$$Z = \frac{S_o - S}{S_o} \cdot 100 [\%] \quad (2.13)$$

Kde S_o ... plocha průřezu [m^2]

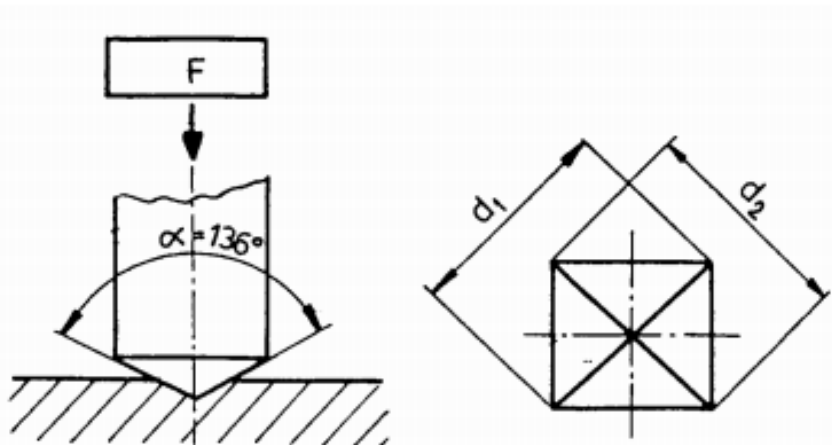
S ... plocha průřezu po přetržení [m^2]

Zkoušky svarových spojů mají jisté specifikum, protože existují dva druhy zkoušky. V jednom případě je zatížení kolmé k podélné ose svaru. Kvůli různorodosti svarového spoje je tato zkouška často jen informativního charakteru. Výsledkem této zkoušky často bývá pouze hodnota meze pevnosti a je nezbytné přesně definovat místo vzniku lomu na zkušební tělese. Druhým případem tahové zkoušky je případ, kdy orientace svarové housenky a zatížení je rovnoběžná. Tímto druhem lze zjistit kompletní výčet pevnostních a plastických charakteristik [43].

2.6.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Zkoušky tvrdosti jsou řazeny mezi základní zkoušky mechanických vlastností. K těmto zkouškám patří také tahová zkouška a zkouška vrubové houževnatosti. Zkoušky tvrdosti se dále dělí na statické a dynamické. Zkouška tvrdosti dle Vickerse se řadí mezi statické zkoušky. Principem zkoušek tvrdosti je obecně vnikání cizího tělesa do materiálu, který klade odpor a ten je zaznamenáván [43].

Principem zkoušky dle Vickerse je vnikání diamantového tělesa o daných rozměrech do materiálu zkušební vzorku. Princip zkoušky je naznačen na obr. 30. Jedná se o čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° . Po odlehčení dojde k změření uhlopříčky tvaru vzniklého ve zkušební vzorku. Hodnota tvrdosti dle Vickerse je poté vypočítána jako poměr zkušebního zatížení k ploše tvaru vtisku. Zatížení je voleno dle materiálu. Typické zatížení pro tuto zkoušku tvrdosti je však 294 N po dobu maximálně 15 s. Pro měření tvrdosti svarů je normou ČSN EN 1043-1 doporučována zkouška dle Vickerse HV 10 tj. zatížení 98 N. Značení zkoušky tvrdosti dle Vickerse používá písmena HV pro označení typu zkoušky. Poté následuje číslo, které odpovídá hodnotě zatížení. Případně při zvolení jiného zatížení než 10–15 s je zde přidáno druhé číslo značící dobu zatížení. Například HV 30 odpovídá zkušebnímu zatížení 294,2 N po dobu 10–15 s, HV30/20 odpovídá zatížení 294,2 ale po dobu 20 s [43, 51].



Obr. 30 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [51].

Výpočet Tvrdosti dle Vickerse je definován podle vzorce (2.14):

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} \quad (2.14)$$

Kde F ... zatěžující síla [N]

u ... střední uhlopříčka vtisku [mm]

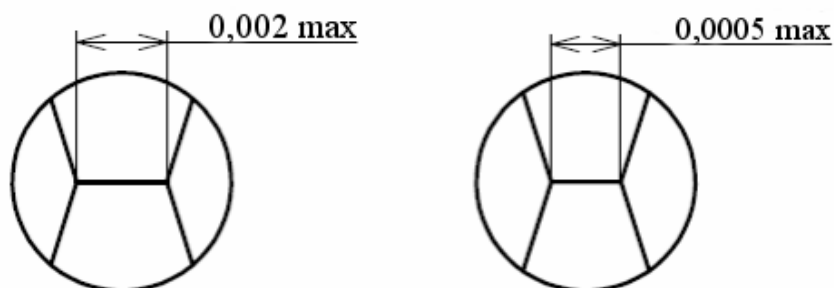
$$u = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.15)$$

Kde d_1 ... délka uhlopříčky č. 1 [mm]

d_2 ... délka uhlopříčky č. 2 [mm] [43]

Dalším podtypem zkoušky dle tvrdosti je měření mikrotvrdosti dle Vickerse. Tato zkouška je vhodná pro malé nebo tenké součásti, měření strukturních fází a složek, hodnocení křehkých materiálů nebo hodnocení svarů. Rozdíl oproti zkoušce tvrdosti je použití nižšího zkušebního zatížení a zároveň použití stejného tvaru indentoru, ale menších rozměrů. Indentor

pro makrotvrdot a mikrotvrdot je na obr. 31. Vzhledem k použití nižších sil je dosahováno menších vtisků [52].



Obr. 31 Rozměry indentoru pro zkoušku tvrdosti a mikrotvrdoti dle Vickerse [52].

2.6.3 Metalografické šetření

Metalografické šetření je doplňkovou metodou pro mechanické testování. Používá se hlavně při ověřování stavu materiálové struktury a také pro svarové spoje. Přibližné roztrídění této metody je možné vzhledem k použitému zvětšení. Metalografické šetření se tedy dělí na makrostrukturní a mikrostrukturní. Pro většinu metalografických šetření je klíčovým úkonem bezvadná příprava zkušební vzorku. Tato příprava zahrnuje několik kroků. Nejprve je nutné příhodně odebrat materiál a následně zbrousit metalografickým papíry se snižující se zrnitostí. Dále pak přichází na řadu leštění, a to buď elektrolyticky nebo mechanicky za použití diamantových past. Posledním krokem je naleptání chemicky nebo elektrolytickým způsobem. Poté následuje vyhodnocení [43].

Makrostrukturní rozbory jsou vizuální rozbor u kterého se využívá buď optický mikroskop do cca 30x zvětšení nebo pouze lidský zrak nebo v kombinaci s lupou. U svarových spojů je tento rozbor využíván na posuzování hranice natavení, velikosti, tvaru a povahy TOO, kladení svarových vrstev nebo hodnocení tvaru svaru. Mezi makrostrukturní rozbory řadíme Baumannův otisk a Makrolept [43]:

- baumannův otisk je zkouška založená na chemickém působení sulfidických vměstků vyloučených z oceli do roviny metalografického výbrusu a bromostříbrného fotografického papíru. Tato kvalitativní zkouška je užitečná ke zjištění charakteru vyloučení sulfidických vměstků [43],
- makrolept je zkouška, která využívá naleptání již dříve obroušeného vzorku za pomoci roztoku kyseliny dusičné anebo persíranu amonného. Tímto dojde k odhalení makrostruktury. Makrolept u oceli dokáže zkoumat příčiny porušení materiálu, nečistoty v oceli, nebo určit hloubku nauhličené nebo oduhličené vrstvy, u dílců vyrobených tvářením lze určovat průběh vláken nebo také vyhodnotit jakost svarových spojů [43].

Na kvalitativní rozbory mikrostruktury používají mikroskopy s přiblížením 30-2000x. Tento rozbor se skládá z přípravy metalografického vzorku, následného vyvolání struktury leptadlem a zkoumání mikrostruktury v mikroskopu s konečným vyhodnocením a případným vytvořením fotodokumentace. Mnoho informací lze mikroskopickým zkoumáním získat již když je vzorek jen vyleštěn, ale pokud je cílem odhalení mikrostruktury vzorku, tak je nezbytné leptat povrch. Pro leptání lze využít velké množství leptadel, avšak je nutné zohlednit jaký materiál zkoumáme a co je cílem našeho pozorování. Mezi dvě často používaná činidla patří Nital a speciální leptadla. Nital je 1-4 % roztok HNO_3 v etylalkoholu a lze jej využít při leptání nelegovaných, nízkolegovaných ocelí a také litin. Speciální leptadla jsou používání pro vysokolegované Cr a Cr-Ni oceli. Hlavním cílem studia mikrostruktury je zhodnocení množství a zastoupení jednotlivých základních strukturních fází a složek [43]:

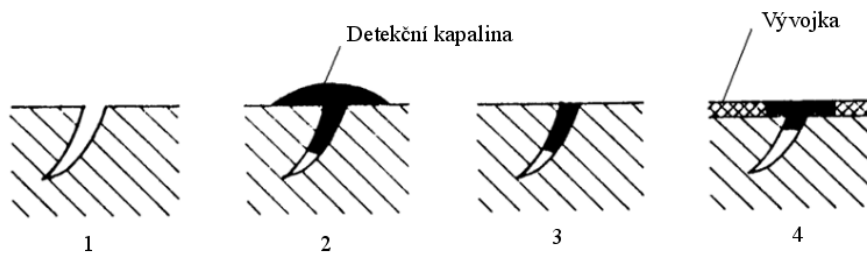
- pro určení podílu strukturních fází se využívá tzv. bodová metoda. Je použito světelného mikroskopu. Mikroskop je přiblížen tak, aby bylo možné rozpoznat hranice zkoumaných složek. Buď je vyhodnocení prováděno na matici mikroskopu s pomocí průhledné fólie s mřížkou anebo je statisticky vyhodnocena přítomnost jednotlivých složek [43],
- stanovení obsahu nekovových vměstků v ocelích je prováděno za pomoci norem, které udávají, jak má daná struktura s určitým povoleným obsahem vměstků vypadat [43],
- stanovení velikosti zrna je využíváno k posouzení, do jaké míry zhrubla austenitická struktura v materiálu při tepelném zpracování nebo svařování. Při svařování k tomuto jevu dojde v oblasti okolo svaru v TOO [43].

2.6.4 Nedestruktivní zkoušky

Nedestruktivní zkoušení se označuje jako defektoskopie. Cílem tohoto odvětví je zkoušení materiálu či výrobku, aniž by došlo k jeho poškození. Při nedestruktivním zkoušení tedy nedojde k narušení funkce produktu a zároveň zkouška odhalí přítomnost vad materiálu. Materiál či produkt, který byl otestován nedestruktivními zkouškami zaručuje spolehlivost. Tímto předchází nedestruktivní zkoušení selhání při provozu produktu. Zkoušenými výrobky mohou být například odlitky, výrobky nebo také sváry [53, 54].

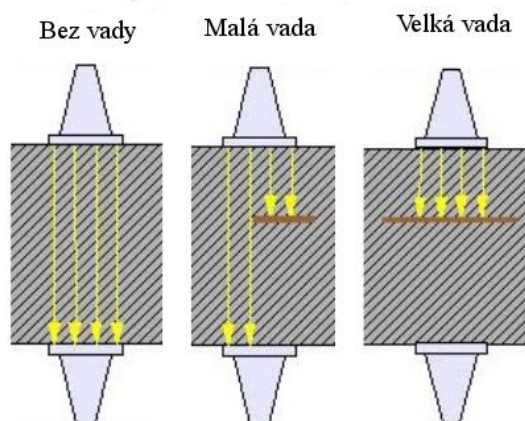
Nedestruktivní metody dělíme podle místa vady v materiálu na vnější a vnitřní. Pro zjištění vad, které jsou na povrchu materiálu jsou využívány metody penetrační, vizuální, magnetické, práškové nebo s využitím vířivých proudů. Naopak pro zjištění vad uvnitř materiálu lze využít metody ultrazvukové a rentgenové. Mezi nedestruktivní metody řadíme [20]:

- vizuální metoda spočívá v kontrole svarů za použití pouze lidského zraku nebo optických přístrojů. Vizuální zkouška se používá jako jakási první kontrola ke zjištění nutnosti dalšího nedestruktivního testování. Tímto způsobem jsou zjišťovány vady povrchu svaru. Vizuální zkouška se dělí na dva druhy. Pokud je povrch zkoušeného materiálu dobře přístupný jedná se o metodu vizuální přímočarou. V tomto případě posuzujeme testovaný povrch za pomoci lidského zraku nebo použitím lupy. V případě hůře přístupného povrchu se využívá zkouška vizuální nepřímá ta je použitelná na detailní zkoumání povrchu. Pro nepřímou zkoušku je používáno optických přístrojů např. endoskopů [48, 20],
- kapilární metoda má velkou citlivost určování povrchových vad. Princip této metody je založen na vzlínivosti a smáčivosti některých kapalin (uhlovodíků nebo třeba petroleje) do otevřených trhlin v materiálu. Metoda má tento průběh zkoušení: Nejprve je nutné povrch dokonale umýt a odmastit. Potom je nanášena zkoušená tekutina na zkoušený povrch. Tekutina je ponechána po 10-30 minut působit. Následně dojde k odstranění přebytku zkoušební tekutiny proudem vody. Poté přichází na řadu osušení povrchu a aplikace vývojky. Vývojka je bílý prášek (oxid zinečnatý rozpuštěný v acetonu). Vývojka je podklad pro vzlínající kapalinu, a tak dojde ke zviditelní vady materiálu. Postup metody je zobrazen na obr. 32 [48],



Obr. 32 Postup kapilární metody [55].

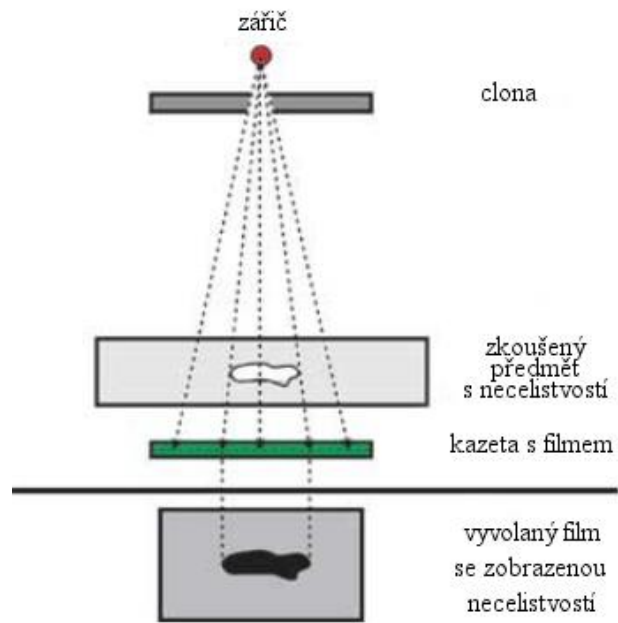
- zkouška magnetická prášková zjišťuje povrchové či lehce podpovrchové vady v hloubce maximálně 2-3 mm. Tato metoda je použitelná výhradně u materiálu z feromagnetického materiálu. Abychom zjistili případné vady, metoda sleduje tzv. rozptylové pole, které vzniká okolo vad v materiálu. Siločáry kopírují tvar vady v materiálu, kolem kterého je vytvořeno magnetické pole. Siločáry jsou zviditelňovány pomocí aplikace malých železných částecek namíchaných s kapalinou (petrolej). Prach ulpí tam, kde jsou vady. Někdy jsou využívány nátěry na bílo či železný prach je označen fluorescenční barvou. Všechny tyto kroky jsou pro zlepšení kontrastu a lepší rozpoznávání detailů [48],
- zkouška ultrazvuková využívá mechanické vlnění, které se šíří materiálem. Rychlost tohoto šíření se odvíjí od druhu a celistvosti prostředí a frekvenci vlnění. Pokud dojde na změnu prostředí, vlna se odrazí. Existují dvě metody ultrazvukové zkoušky, a to průchodová a odrazová metoda. Průchodová metoda je zobrazena na obr. 33. Zkouška ultrazvukem velmi dobře odhalí plošné vady, které jsou kolmé na směr vlnění. Naopak vady objemové jsou v touto metodou obtížně detekovatelné. Touto metodou určíme pouze velikost a přítomnost vady, ale neurčíme tvar vady. Proto se často používá v kombinaci s prozařováním [48],



Obr. 33 Ultrazvuková zkouška – průchodová metoda [56].

- zkouška rentgenová spočívá v prozáření materiálu ionizačním zářením. Pokud jsou vady přítomné v materiálu, tak dojde k odstínění části záření. Následně je záření detekováno pomocí detektoru. A tmavá místa na detektoru označují vady v materiálu. Schéma rentgenové zkoušky je viditelné na obr. 34. Metoda je vhodná pro vnitřní vady a povrchové vady v nepřístupných místech. Intenzita záření je často měřena pomocí fotografického filmu nebo dle sdělení Libora Mrňi ÚPT AV ČR také pomocí speciální kamery citlivé na rentgenové záření. Tato zkouška je vhodná pro rozpoznávání objemových vad. Jsou to například trhliny, póry, struskové a kovové vměstky.

Nevýhodou této zkoušky je nebezpečnost záření vůči lidskému organismu, a tak je nutné důkladné proškolení personálu a provádění zkoušky ve zvláštní bezpečnostní místnosti [48].



Obr. 34 Princip rentgenové zkoušky [57].

2.7 Vysokopevné manganobórové oceli

Pro výrobky, které mají splňovat vysokou pevnost, dobrou plasticitu a mimo jiné i svařitelnost není jednoduché v nabídce běžných nelegovaných ocelí najít odpovídající materiál. Přesto je v dnešní době po takovýchto aplikacích ve strojírenství značná poptávka. Zejména je tato poptávka viditelná v automobilním průmyslu [1].

S příchodem nových norem a regulací v automobilní průmyslu jsou inženýři nuceni hledat nová řešení v oblasti používaných materiálů. Nové materiály jako pokročilé vysokopevnostní oceli pomáhají splnit klíčové vlastnosti pro danou aplikaci. Mezi tyto vlastnosti patří snížení emisí, zachování bezpečnosti a životnosti při nízkých nákladech. Při použití vysokopevného plechu lze zvolit nižší tloušťku plechu, a tak snížit hmotnost, zároveň však dodržet požadovanou pevnost a následně i bezpečnost [58, 2].

Jedním z vhodných materiálů pro splnění výše popsaných požadavků jsou bórové oceli. Jedná se o oceli nízkouhlíkové s jemným zrnem. Po zušlechtní dosahují potřebných pevností [1].

Bórové oceli jsou obzvláště vhodné pro strukturální součásti karoserie, které vyžadují odolnost proti nárazu. Běžné aplikace jsou A-sloupky a B-sloupky karoserie, nosníky nárazníků, dveřní výztuhy, výztuhy podlahy a střechy [6].

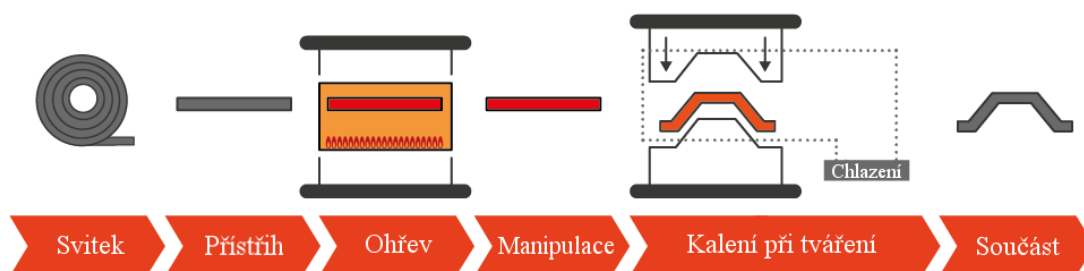
2.7.1 Chemické složení bórem dopovaných ocelí

Bórové oceli obsahují 0,1 - 0,3 % uhlíku, 1-2 % manganu a přísadu bóru, která je zastoupena v několika tisícinách procent. Vzhledem k množství uhlíku se jedná o nízkouhlíkové oceli, které zvláště při obsahích do 0,25 % uhlíku jsou dobře svařitelné. Už při velmi malých množstvích koncentrace boru v oceli dokáže tento prvek při zakalení nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí rapidně zvýšit pevnostní charakteristiky. Je možné dosáhnout hodnot až okolo 1800 MPa. Navíc bór je poměrně levný prvek, tak jeho použitím jako přísady není příliš finančně nákladné. Bór také působí i na zlepšení prokalitelnosti dané oceli. Prokalitelnost lze také zlepšit použitím prvků jako je Cr, Ni, Mo, Mn nebo V. V případě bóru je ale působení až 100krát vyšší při stejném množství přísady. Naopak přítomnost příliš velkého množství bóru zase snižuje prokalitelnost a tím následně i pevnost a houževnatost, protože je vylučován jako Fe₂₃(BC) a Fe₃(CB) na hranicích austenitických zrn. S množstvím uhlíku ve struktuře klesají účinky bóru. Nejlepších výsledků dosahuje bór u nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí s obsahem uhlíku od 0,1 % do 0,35 %. Dále účinky bóru klesají s rostoucím % C až do hodnoty 1,6 %. Při této hodnotě bór už strukturu nezpevňuje. Zakalitelnost závisí také na obsahu dalších látek v oceli. Jedná se o kyslík, dusík a uhlík. Z důvodu zachování bóru ve struktuře oceli je nutné, aby byla koncentrace dusíku a kyslíku ve struktuře vyšší. Potom nedojde ke sloučení s prvky jako je titan, křemík, zirkon nebo hliník s bórem, ale dusíkem a kyslíkem. Tímto se zabrání ochuzování oceli o bór. Nežádoucím chováním bórové oceli je ztráta účinku bóru při teplotách nad 1000 °C, proto se u bórových ocelí používá o 100 °C snížená austenitizační teplota [59, 1].

2.7.2 Kalení při tváření

Vzhledem k velikosti síly, které by bylo nutné vyvinout při tváření za studena při tvarování manganoborových ocelí, je nutné použít jinou technologii výroby. Touto technologií je tzv. Hot -stamping neboli Kalení při tváření. Existují dvě varianty této metody, a to metoda přímá a nepřímá. Metodou nepřímou je dílec tvářen za studena poté je ohříván na austenitizační teplotu a následně skokově chlazen ve formě. Přímá metoda využívá chlazené formy ke tváření a současnému zakalení. Její schéma je možné vidět na obr. 35. Manganoborová ocel 22MnB5, která se používá pro díly v autoprámyslu využívá metodu přímou. Z polotovaru feriticko-perlitické oceli o pevnosti cca 600 MPa se stane austenitizací, následným ochlazením

a přetvořením v lisu ocel martenzitická v požadovaném tvaru a pevnosti. Austenitizace trvá několik minut při teplotách nad 880 °C. Při austenitizaci ale dochází k nežádoucí oxidaci povrchu polotovaru a oduhličení materiálu [60].



Obr. 35 Přímá metoda kalení při tváření [6].

2.7.3 Povlakování

V kapitole 2.7.2 bylo zmíněno, že při kalení při tváření dochází k oduhličení materiálu, proto jsou často používány ochranné povlaky [60].

Často povlaky na bázi Al-Si aplikované pomocí žárového pokovování. Často má tento povlak složení 87 % hliníku, 10 % křemíku a 3 % železa. Povlak Al-Si taje při 600 °C. Při austenitizaci je tato teplota podstatně vyšší, ale za pomoci difuze dojde k přechodu prvků z polotovaru do povlakové vrstvy. Tímto způsobem vznikne povlak na bázi Al-Fe, který je více odolný při vysokých teplotách. Není možné ale zaručit homogenní složení povlaku vzhledem k difuzi. To je důležité kvůli tváritelnosti a svařitelnosti materiálu. Podle toho jak dlouho a za jaké teploty dojde k austenitizaci se mění struktura povlaku. Pásma s vysokým obsahem železa a křemíku se důsledkem toho zvětšují a hliník ve struktuře stabilizuje fázi delta feritu. Problémem je pak následné praskání povlaků. Někdy dochází i k zadření dílce ve formě při tváření. Navíc při změně složení chemických prvků v povlaku může dojít i k negativnímu ovlivnění svařitelnosti [60, 61].

Jednou z náhrad jistě jsou ochranné oleje. Původní určení bylo použití jako ochrana korozivzdorných a titanových slitin, ale po vykonání některých pokusů byly shledány jako výhodné taky pro ochranu proti oxidaci u austenitizace martenzitických vysokopevných ocelí. Postup aplikace se skládá z nanesení na povrch dílce před austenitizací, následného vysušení. Vysušení vytvoří na povrchu pevný film, který se stane překážkou oxidaci. Následně dojde k ohřátí v procesu austenitizace a olej přejde z pevného skupenství do kapalného. Kapalné skupenství oleji přesto nebrání v ochraně proti oxidaci. Obecně lze říct, že čím více vrstev tím lépe, ale při použití čtyřech a více vrstvách už dochází k exfoliaci. Po kalení při tváření je olej odstraněn kyselinou fosforečnou. Obvykle 2 až 3 vrstvy oleje stačí na povrch bez okují. Olej jako ochrana je výhodný kvůli jednoduché aplikaci, ale nevýhodou je drahé odstranění vrstev po procesu [60].

Dalším z povlaků, který je v automobilním průmyslu používán je povlaky na bázi Zn. Povlaky na bázi zinku řadíme mezi nejčastěji používané v sériové výrobě. Přesto pro kalení při tváření martenzitických ocelí se nehodí. Důvodem je nemožnost používat zinkové povlaky pro metodu přímého kalení kvůli nízké odolnosti proti teplotě. Zinek při vysokých teplotách při tepelném zpracování značně difunduje po hranicích zrn, a tak způsobuje oslabení materiálu a praská za tepla. Zinkové povlaky jsou použitelné jen u nepřímé metody anebo upravenou metodou přímou. Upravená metoda přímá spočívá v snížení teploty před kalením a změnou chemického složení 22MnB5 oceli, a to snížení obsahu uhlíku a zvýšení obsahu manganu. I u Zn povlaku dochází k difuzi, ale mikrostruktura se na rozdíl od Al-Si jeví jako jednolitá a bez mikrotrhlin [60].

3 EXPERIMENT

Obsahem praktické části bylo vytvoření několika svařovaných vzorků z materiálu 22MnB5, jehož chemické složení lze najít v atestu v příloze č. 1. Jednalo se o plechy z daného materiálu, které byly spojeny svařováním za pomoci hybridní technologie Laser-TIG, která byla popsána v kapitole 2.3. Každý ze vzorků byl svařován rozdílnými parametry technologie TIG, zatímco parametry laseru zůstávaly u všech vzorků stejné. Pro vyhodnocení mechanických vlastností svarů bylo využito tahové zkoušky, která byla popsána v kapitole 2.6.1. U každého vzorku bylo provedeno metalografické šetření, které najdeme vysvětlené v kapitole 2.6.3. Dále proběhla zkouška mikrotvrdomosti dle Vickerse, o které pojednává kapitola 2.6.2.

3.1 Volba materiálu

Jako materiál pro experiment byla zvolena nízkouhlíková jemnozrná manganoborová ocel 22MnB5, která je dodána jako polotovar v tepelně nezpracovaném stavu. V tomto stavu dosahuje dle atestu meze pevnosti 605 MPa, meze kluzu 445 MPa a tažnosti 19 %. Jeho struktura je feriticko-perlitická a jeho složení najdeme v tab. 8. Materiál je dle atestu také opatřen povlakem s označením AS150. Jedná se povlak na bázi Al-Si, který byl podrobně popsán v kapitole 2.7.3. Materiál je povlakován za účelem zabránění oduhlíčení materiálu za vysokých teplot a zároveň může zhoršovat tvářitelnost a svařitelnost, jak už bylo popsáno detailně v kapitole 2.7.3 [60].

Tab. 8 Chemické složení z atestu pro zvolený materiál 22MnB5.

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb	Cr
Obsah hm. %	0,233	0,249	0,006	0,002	0,002	0,048	0,028	0,005	0,179

Materiál pro pokus byl plech o tloušťce 1,8 mm. Protože cílem experimentu je prověřit vlastnosti svarových spojů metodou Laser-TIG na vysokopevnostním materiálu s martenzitickou strukturou, tak byl materiál před pokusem tepelně zpracován, aby těchto parametrů dosáhl. Manganoborové oceli s martenzitickou strukturou dosahují někdy pevnosti až 1800 MPa. Více o těchto ocelích informuje kapitola 2.7. Dle sdělení Libora Mrňi ÚPT AV ČR tepelné zpracování těchto vzorků zahrnovalo ohřev na teplotu 940-950 °C s následnou vydrží na dané teplotě po dobu 5 minut. Následovalo kalení při tváření metodou přímou, podrobně popsanou v kapitole 2.7.2, avšak za použití hlazených lisovacích matric. V praxi se využívá tvarových matric a dojde zároveň k natvarování dílů. To by však bylo nežádoucí u vzorků pro tento experiment. Po dodání tepelně zpracovaných polotovarů následoval samotný experiment, který byl nastíněn v kapitole 3. Pro zajištění bezpečné svařitelnosti manganoborových plechů byl určen uhlíkový ekvivalent. Uhlíkový ekvivalent a jeho výpočet byl proveden dle kapitoly 2.4. Pro aplikaci vzorců (2.2) a (2.3) mluví hodnota 0,25 hm. % uhlíku, kterou daná ocel nepřevyšuje [1].

$$CE = 0,223 + \frac{1,145}{6} + \frac{0,179}{5} = 0,4496 [\%]$$

$$CET = 0,223 + \frac{1,145}{10} + \frac{0,179}{20} = 0,3465 [\%]$$

Jak už bylo popsáno v kapitole 2.4 záleží na hodnotě uhlíkového ekvivalentu. Výše zmíněné vzorce jsou určeny pro metody obloukového svařování, kde rychlosti ochlazování dosahují výrazně nižších hodnot, než u laseru. Dle sdělení Libora Mrňi ÚPT AV ČR zatím ale neexistují

vztahy přímo určené pro laserové svařování, a tak jsou tyto vztahy používány i zde, ale je to potřeba brát v potaz. Zde dosahuje uhlíkový ekvivalent hodnoty nižší než 0,45 %, což by znamenalo, že není nutno použít předehřev pro svařování těchto vzorků. Avšak cílem práce je zjištění vlivu dohřevu na hybridní technologii Laser–TIG, a tak dohřev použijeme. Jeho teplotu vypočítáme pomocí Séferiánova vzorce, který byl zmíněn v kapitole 2.4 [43].

$$C_c = \frac{360 \cdot 0,223 + 40 \cdot (1,145 + 0,179)}{360} = 0,37$$

$$C_s = 0,005 \cdot 1,8 \cdot 0,37 = 0,003$$

$$C_p = 0,37 + 0,003 = 0,373$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{0,373 - 0,25} = 122,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výsledná teplota předehřevu má dle výpočtu výše hodnotu 122,75 °C. V praxi, pokud teplota nepřesáhne teplotu 150 °C, tak není použití předehřevu nutné. Vzhledem k tomu, že cílem této práce je zkoumání vlivu dohřevu na kvalitu svarového spoje martenzitické oceli, tak bude použito dohřevu i přesto použito a bude posuzován jeho vliv [20].

3.2 Svařování zkušebních těles

Vzorky dodané výrobcem byly svařeny za stanovených podmínek. Následně z nich byla vytvořena plochá zkušební tělesa pro tahovou zkoušku. Pro svařování bylo použito přístrojové vybavení laboratoře Ústavu přístrojové techniky v Brně. Přístrojové vybavení této laboratoře zahrnuje:

- ytterbium laser system YLS–2000 je označení pro pevnolátkový laser s optickým vláknem, které je dopované Ytterbiem a je zachycen na obr. 36. Pevnolátkové lasery a jejich vlastnosti nalezneme v kapitole 2.1.3. Tento laser od společnosti IPG Phototonics se vyznačuje přibližně 30 % účinností, vyzařovaným laserovým paprskem o vlnové délce 1070-1080 nm a průměru 420 μm dle sdělení Libora Mrní ÚPT AV ČR. Další technické parametry najdeme v tab. 9. Protože tento laser disponuje vyměnitelnou svařovací hlavou, tak jej lze používat i na jiné aplikace než na svařování. Jedná se například o řezání nebo gravírování. Laserový systém je vybaven vodním chlazením [20, 62],



Obr. 36 Pevnolátkový laser IPG YLS – 2000.

Tab. 9 Technické parametry YLS – 2000 [20].

Výkon [W]	2000
Režim	kontinuální / pulzní
Rozměry (d x v x š) [mm]	1106 x 856 x 806
Účinnost [%]	30
Vlnová délka [nm]	1070–1080

- Fronius magic wave 1700 je svařovací zdroj pro technologii TIG a je pro potřebu experimentu používán jako dohřev. Další informace o obloukovém svařování metodou TIG zmiňuje kapitola 2.2. Tento zdroj je digitálně řízený a je možné jeho prostřednictvím měnit a sledovat mnohé parametry technologie TIG. Například zařízení na displeji zobrazuje svařovací napětí a svařovací proud. Je možné na zařízení používat v režimu DC, ale také v kombinaci AC/DC. Zařízení je výrobcem doporučováno pro použití se základními materiály jako je Cr-Ni, Hliník, Ocel nebo speciální kovy. Mezi doporučené oblasti použití výrobce označuje například automobilní průmysl, letecký průmysl, kovové konstrukce, strojní průmysl nebo výrobu průmyslových zařízení a potrubních vedení. Svařovací zdroj je zobrazen na obr. 37. Parametry tohoto zařízení najdeme v tab. 10 [63],

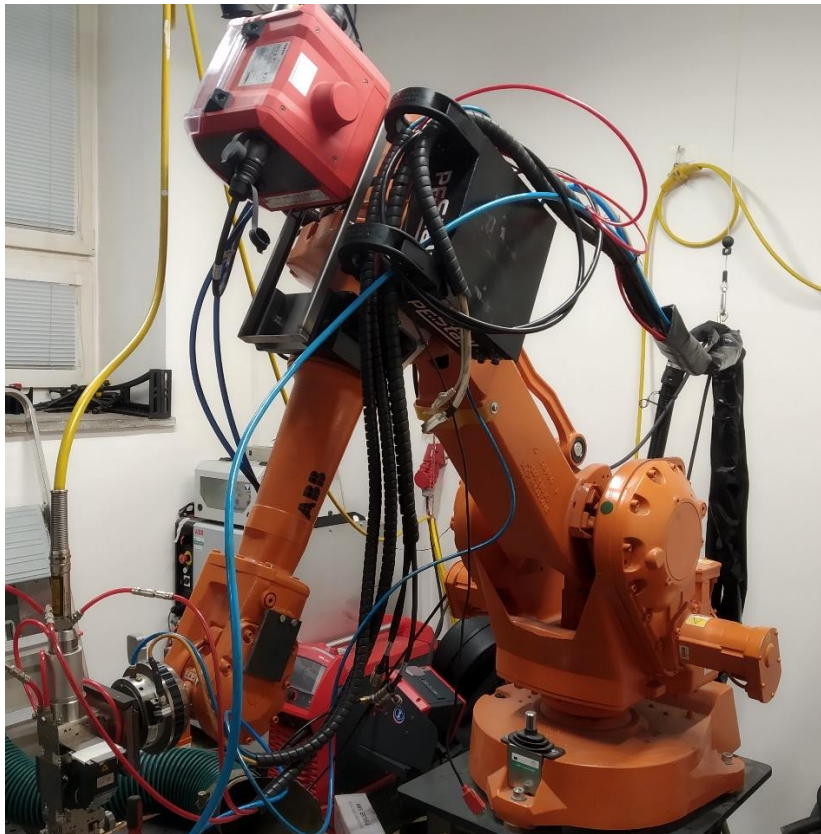


Obr. 37 Svařovací zdroj Fronius Magic Wave 1700 [63].

Tab. 10 Technické parametry Fronius Magic Wave 1700 [63].

Síťové napětí [V]	230
Síťový proud [A]	16
Rozsah svařovacího proudu [A]	3-170
Napětí naprázdno [V]	88
Hmotnost [kg]	15

- robot IRB 2400 od firmy ABB nese všechna zařízení, které jsou používána pro svařování a je na obr. 38. Jedná se o svařovací hlavu laseru a svařovací hořák pro technologii TIG, která dohřívá laserový svar. Hlava pevnolátkového laseru se prodává pod označením Precitec YW30 a hořák s wolfram-thoriovou elektrodou má průměr 2,4 mm. Pro správný průběh experimentu bylo také využito dodávání inertního plynu, aby byla vytvořena ochranná atmosféra pro svar. V tomto případě byl využit argon o čistotě 4.6 tzn. 99,996 %. Robot od firmy ABB je velice přesný, má dostatečnou nosnost vzhledem k danému experiment, je spolehlivý a v průmyslových aplikacích je velmi rozšířený. Má robustní provedení a nepotřebuje časté servisní zásahy. Parametry robotu obsahuje tab. 11 [64].

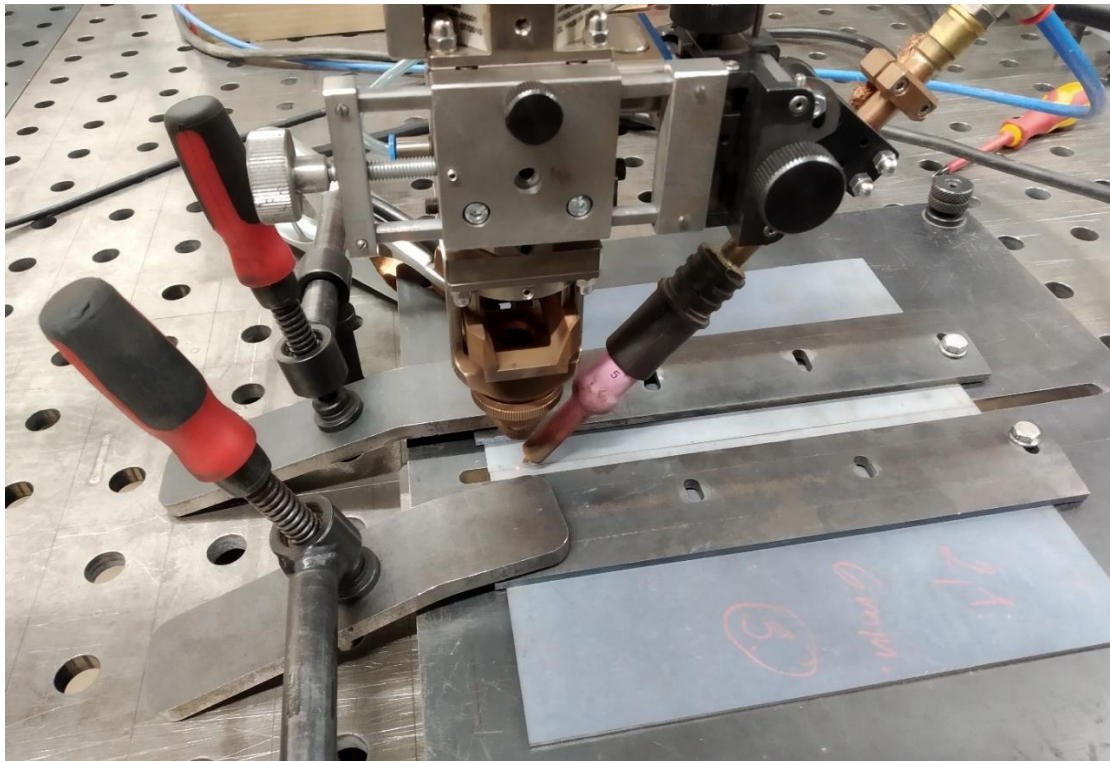


Obr. 38 Robot IRB 2400 od firmy ABB.

Tab. 11 Technické parametry Robotu IRB 2400 [20].

Dosah [mm]	1550
Hmotnost [kg]	380
Nosnost [kg]	10
Počet stupňů volnosti	6+2
Přesnost trajektorie pohybu [mm]	0,03
Přesnost polohování [mm]	0,11-0,15
Napájecí napětí [V]	200-600
Rozměry (d x v x š) [mm]	600 x 1564 x 723

Postup přípravy vzorků na svařování je následující. Plechové vzorky jsou obroušeny smirkovým papírem s cílem odstranění okují. Materiál je odmaštěn aplikací izopropylalkoholu. Pro každý vzorek dojde k pevnému upnutí pomocí upínek a vystředění plechů. Před samotným svařováním dojde ke kontrole trajektorie robotu se svařovací hlavou tak, aby byla spára dvou plechů přesně pod paprsky laseru a hořáku TIG. Dále dojde k simulaci průchodu svařovací hlavy. Konfiguraci laserové hlavy a hořáku TIG s plechovým vzorkem před svařováním vidíme na obr. 39. Vzdálenost od základního materiálu horizontálně byla 2 mm stejně tak vzdálenost od hrany materiálu.



Obr. 39 Konfigurace laserové hlavy a hořáku TIG spolu s plechovým vzorkem 22MnB5.

V první fázi dojde k vytvoření dvou bodových svarů na krajích plechů tak, aby se zamezilo rozevření plechů v důsledku teplotního působení svařování na materiál. Poté již dojde ke svaření 4 vzorků plechu při parametrech svařování dle tab. 12.

Tab. 12 Parametry pro svařování vzorků.

Pořadí vzorků	Použitá technologie	Výkon laseru [W]	Proud technologie TIG [A]	Proud technologie TIG [V]
1	Laser	1000	-	-
2	Laser + TIG	1000	20	15,50
3	Laser + TIG	1000	40	11,85
4	Laser + TIG	1000	60	11,20

Pro každou sadu vzorků byly nastavené jiné parametry technologie TIG. Rozdílný proud technologie TIG působil na množství vneseného tepla dohřevem. O ovlivnění struktury svaru množstvím vneseného tepla pojednává kapitola 2.4. Výpočet tepla vneseného laserem byl proveden s následujícími parametry: Rychlost svařování byla zvolena $v_s = 20$ mm/s. Koeficient účinnosti laseru dosahoval $k = 0,65$. Ochranná atmosféra technologie Laser-TIG je zajištěna argonem o čistotě 4.6 a průtoku 15 l/min z hořáku TIG. Dle sdělení Libora Mrní ÚPT AV ČR podle tzv. šlírové vizualizace bylo na ÚPT AV ČR vyzkoušeno, že proudění plynu při svařování Laser-TIG dostačuje pouze použití trysky hořáku TIG. Tím dojde k velké úspoře plynu. Pro výpočet vneseného tepla využijeme vzorec dle kapitoly 2.4.

$$Q_{LAS} = \frac{0,65 \cdot 1000}{20} = 32,50 \text{ J/mm}$$

Výpočet tepla vneseného technologií TIG s následujícími parametry. Rychlost svařování je shodná s laserem, protože hořák TIG je připevněn spolu s laserovou hlavou na robotu.

Koeficient účinnost technologie je $k=0,60$. Pro každý vzorek je použito rozdílných proudů a vzhledem k tomu se liší i hodnota napětí. Hodnotu napětí odečítáme ze zobrazovaných dat svářečky Fronius. Pro vzorky č. 2, 3 a 4 nastavujeme proudy 20, 40 a 60 A.

$$Q_{TIG} = \frac{0,60 \cdot 20 \cdot 15,5}{20} = 9,30 \text{ J/mm}$$

Výpočet tepla vneseného kombinací obou technologií. Parametry laser jsou pro všechny vzorky konstantní, takže se hodnota vneseného tepla nemění. Pro část vzorce technologie TIG se hodnota vneseného tepla mění s každým vzorkem v závislosti na použitém proudu a k němu odpovídajícímu napětí. Následuje výpočet pro vzorek č. 2:

$$Q_{HYB} = Q_{TIG} + Q_{LAS} = \frac{0,60 \cdot 20 \cdot 15,5}{20} + \frac{0,65 \cdot 1000}{20} = 41,80 \text{ J/mm}$$

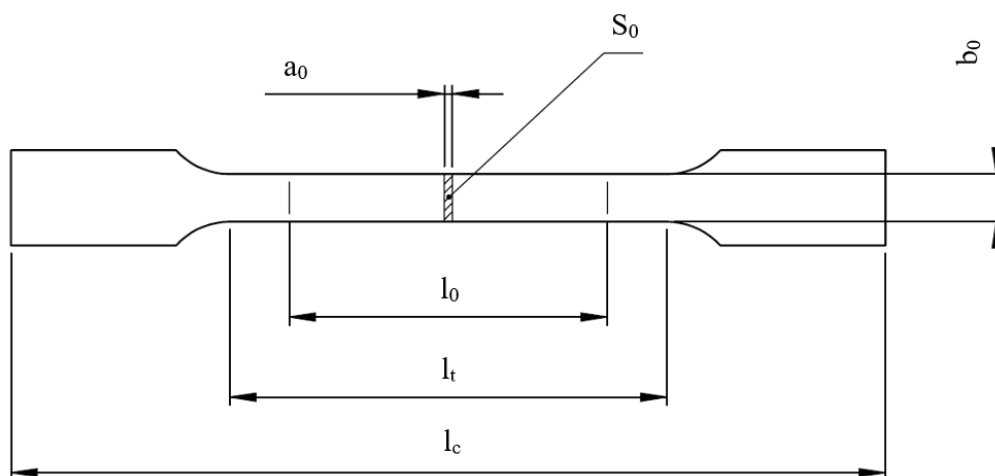
Výsledky pro všechny vzorky najdeme v tab. 13.

Tab. 13 Vnesené teplo při svařování.

Číslo vzorků	Vnesené teplo [J/mm]
1	32,50
2	41,80
3	46,72
4	52,66

3.3 Tahová zkouška

Tato zkouška patří mezi základní mechanické zkoušky. Existují dva druhy zkušebních těles. Jedná se o normalizované tyče kruhové, anebo normalizované tyče ploché. V případě zkoušení svařeného plechu využijeme druhou variantu zkušebního tělesa. Tahová zkouška a všechny její náležitosti jsou popsány v kapitole 2.6.1. Normalizovaná plochá tyč a její geometrie je na obr. 40 [43].



Obr. 40 Geometrie zkušebního vzorku pro tahovou zkoušku.

a_0 ... tloušťka vzorku

b_0 ... šířka vzorku

S_0 ... plocha průřezu

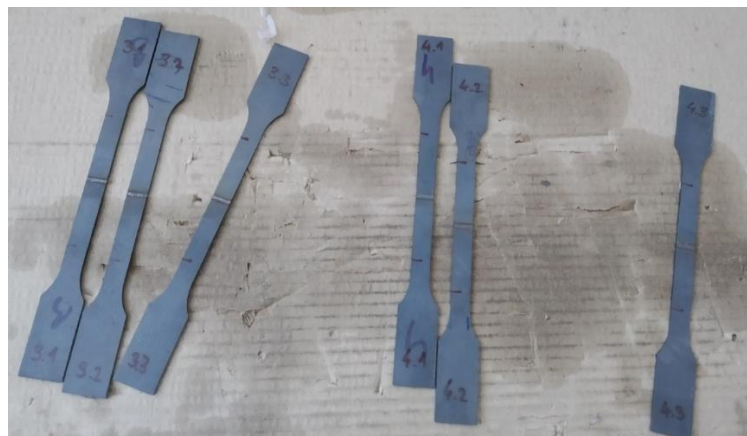
l_0 ... délka zkušební oblasti pro vyhodnocení tažnosti

l_t ... délka celkové zkušební oblasti

l_c ... délka vzorku

Tloušťka vzorků byla 1,8 mm a tato hodnota byla u všech vzorků shodná. Šířka vzorků se pohybovala od 11,2 do 11,65 mm a dle hodnot šířky a tloušťky byla spočtena hodnota plochy průřezu jednotlivých vzorků. Délka zkušební oblasti pro vyhodnocení tažnosti měla hodnotu 80 mm, délka zkušební oblasti pak byla u všech vzorků 110 mm a délka samotného vzorku měla 220 mm. Jak vidíme na obrázku, tak toto zkušební těleso je osazenou hlavou z důvodu dobrého uchycení do trhacího stroje. Další výhodou osazení tělesa hlavou je i skutečnost, že v místě hlavy dojde k zesílení vzorku, a tak zde není pravděpodobné, že by zde došlo k přetržení. Vzorky byly označeny tak, aby nedošlo k záměně a vidíme je na obr. 41. Navíc byly opatřeny ryskami tak, aby na tělesech bylo patrné prodloužení a šlo ohodnotit tažnost materiálu podle vztahů v kapitole 2.6.1. Rysky byly zaznačeny symetricky 40 mm na obě strany od místa svaru. Vzhledem k tomu, že materiál nesmí obsahovat žádné větší vruby, aby nedocházelo ke koncentraci napětí a vzniku oslabeného místa v materiálu, tak bylo zvoleno značení lihovým fixem, který materiál nijak neovlivní.

Samotná tahová zkouška byla provedena na Ústavu strojírenské technologie VUT FSI. Zkouška byla provedena na hydraulickém zkušebním stroji s označením ZD40 a ten je na obr. 42. Tento stroj je určen pro zkoušky materiálů se zatížením tahovým, tlakovým i ohybovým. Maximální zatížení stroje dosahuje až 400 kN a lze nastavit rychlost zatížení dle potřeb daného pokusu. Zkoušky jsou vyhodnocovány programovým vybavením tohoto stroje. Stroj disponuje zabudovaným délkovým snímačem polohy příčnicku s přesností měření 0,01 mm a také snímačem síly. Údaje z těchto snímačů jsou zpracovávány řídicí jednotkou EDC 60 a následně jsou data zpracována programem M-TEST, který je vhodný pro vyhodnocení výsledků tahových, tlakových a ohybových zkoušek splňující požadavky EN 10001-2 více v příloze č. 2.



Obr. 41 Vzorky před tahovou zkouškou.



Obr. 42 Trhací hydraulický stroj ZD400.

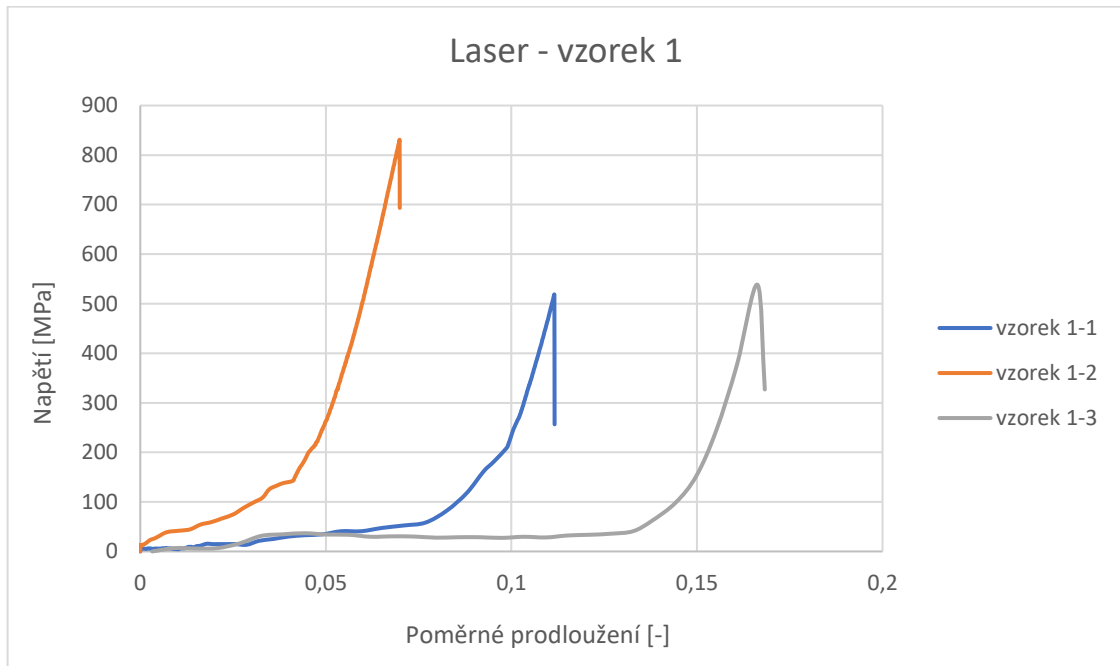


Obr. 43 Vzorek uchycený v čelistech trhacího stroje.

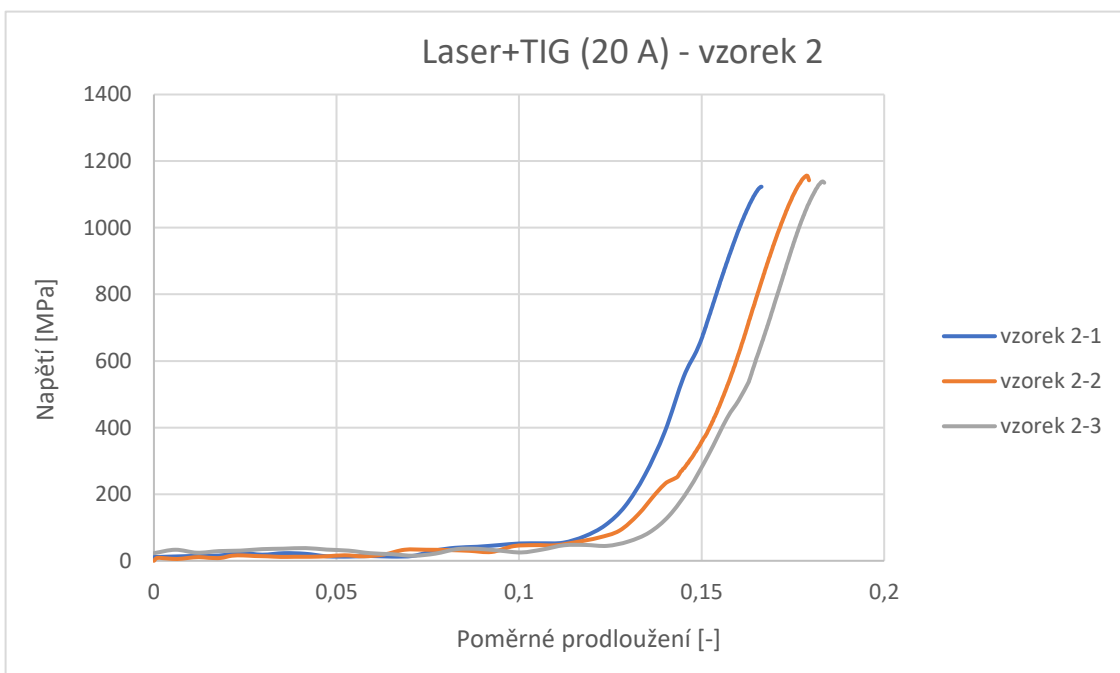
Před zahájením testování byl pro každý jednotlivý vzorek vypočítán průřez. Tento údaj byl zadán do systému M-TEST, aby mohl systém s tímto údajem dále pracovat. Poté následovalo postupné upnutí jednotlivých vzorků do čelistí trhacího stroje na obr. 43. a zahájena tahová zkouška. Spuštěním stroje dojde ke kontinuálnímu zvyšování zatěžující síly. Rychlost zatěžování byla zvolena 15 MPa/s. Zkouška pokračuje do té doby, než materiál překoná mez pevnosti R_m a dojde k vzniku krčku a následnému lomu. V reálném čase vykresluje program M-TEST průběh zatížení v závislosti na zdvihu příčnicku a dopočítává další mechanické charakteristiky. Po vzniku lomu zkoušeného vzorku vyjmeme dvě oddělené části a přeměříme zakreslené rysky pro vyhodnocení tažnosti materiálu. Hodnoty tažnosti najdeme v tab. 14.

Bylo otestováno 12 vzorků se čtyřmi rozdílnými parametry svařování. Jednalo se o materiál s velmi vysokou pevností a zároveň vysokou tvrdostí, proto docházelo k prokluzu mezi čelisti trhacího stroje a testovaným vzorkem. Důvodem mohlo být nedostatečné zaklesnutí čelistí do materiálu povlaku, který dle měření dosahuje tvrdosti až 1065 HV0,025. Tato skutečnost ovlivnila výsledný průběh hodnot napětí v tahovém diagram vykreslovaným

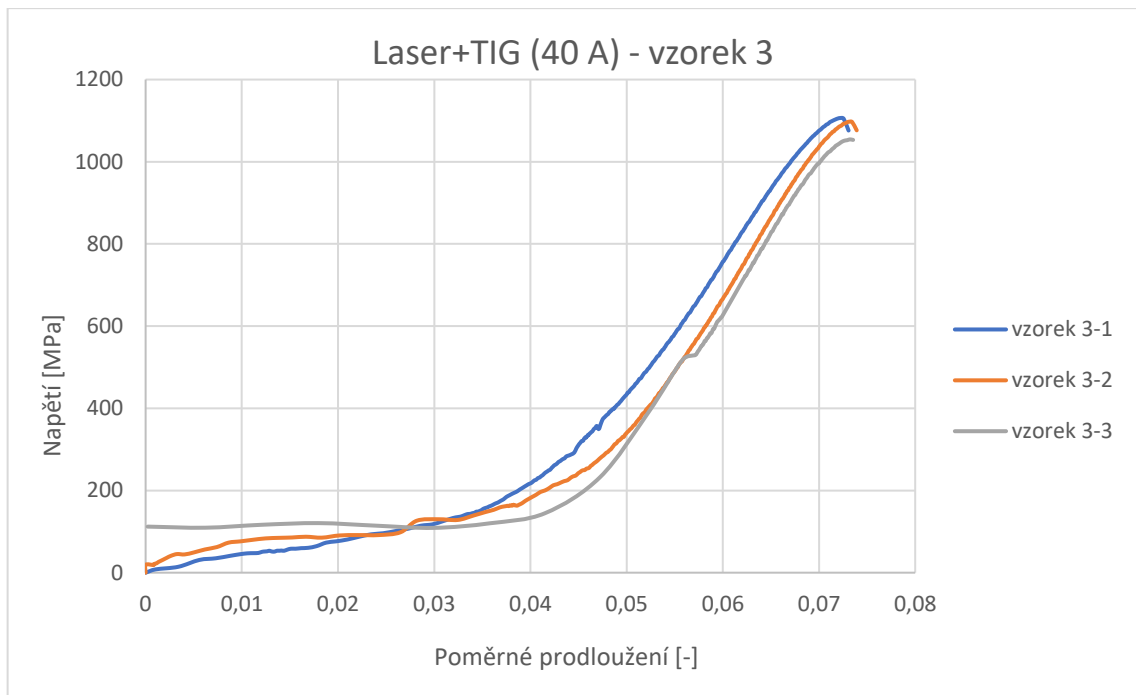
software M-TEST. Proto bylo nutné toto při zpracování dat zohlednit a části grafů kde docházelo k prokluzu dodatečně odstranit. Poměrné prodloužení z tahových diagramů vzorků, proto nelze považovat za hodnotu vypovídající o tažnosti materiálu.



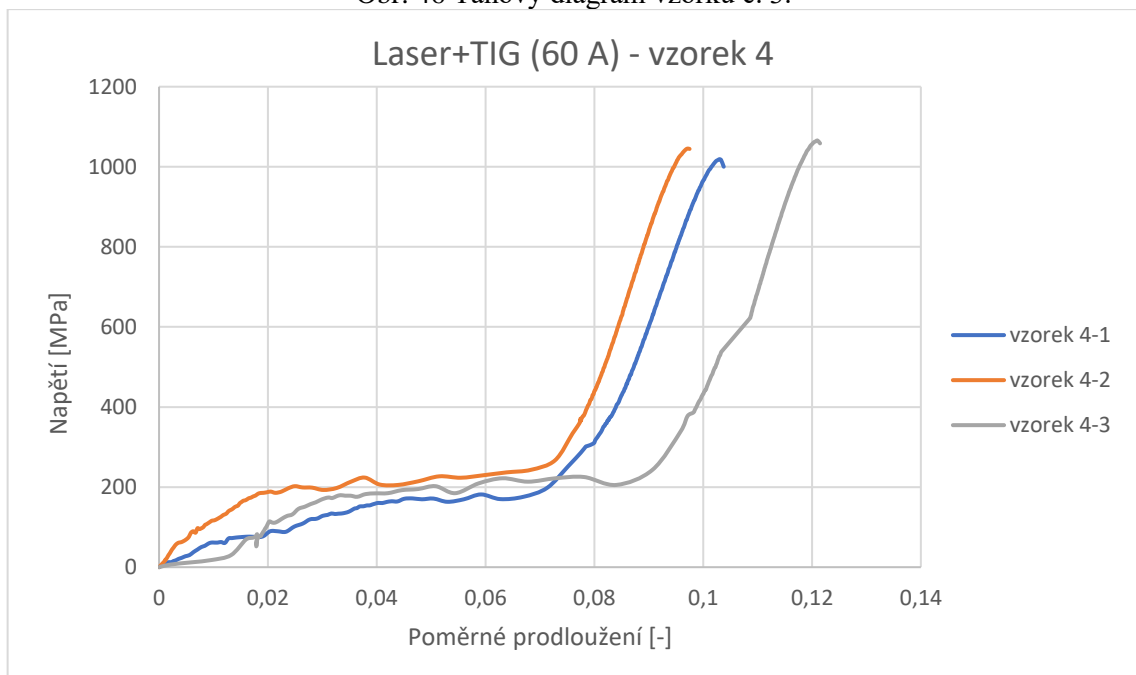
Obr. 44 Tahový diagram vzorku č. 1.



Obr. 45 Tahový diagram vzorku č. 2.



Obr. 46 Tahový diagram vzorku č. 3.



Obr. 47 Tahový diagram vzorku č. 4.

Všechny vzorky vykazovaly průběh tahového diagramu s nevýraznou mezí kluzu. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.6.1. je to vlastnost daného materiálu, který je zkoušen. Jedná se o vysokopevnou ocel a ta obvykle vykazuje nevýraznou mez kluzu. Pokud porovnáme jednotlivé skupiny vzorků a jejich dosaženou mez pevnosti, tak dojdeme k jasnému závěru, že všechny vzorky svařené hybridní technologií Laser-TIG, tedy vzorky č. 2, 3 a 4, jejichž průběhy tahového diagramu jsou na obr. 45, obr. 46 a obr. 47, vykazují značně vyšší mez pevnosti než skupina vzorků svařená pouze laserovou technologií, které najdeme na obr. 44. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben nedostatečnou homogenitou SK u vzorku č. 1. Nedostatečné promísení SK je zapříčiněno rychlým ochlazováním bez dodaného tepla dohřevem technologií TIG. Tato problematika byla zmíněna v kapitole 2.4. Dalším trendem, který je na výsledcích tahové zkoušky vidět je, že se zvyšujícím se proudem

technologie TIG, tedy se zvyšujícím se vneseným teplem do materiálu, postupně klesá mez pevnosti u skupin vzorků č. 2, 3, 4. Všechny naměřené hodnoty z tahové zkoušky obsahuje tab. 14. Dále budou dané mechanismy ovlivnění struktury rozepsány a vysvětleny v kapitole 3.4.2 [43].

Tab. 14 Hodnoty změřené při tahové zkoušce.

Vzorek	Rm [MPa]	A [%]	S ₀ [mm ²]
1-1	522,95	0,06	20,88
1-2	846,04	0,06	20,61
1-3	608,08	0,12	20,88
2-1	1128,77	0,06	20,88
2-2	1166,23	0,06	20,79
2-3	1159,53	0,06	20,61
3-1	1109,29	0,06	20,92
3-2	1099,80	0,06	20,93
3-3	1097,72	0,06	20,16
4-1	1060,40	0,12	20,16
4-2	1050,40	0,12	20,88
4-3	1066,08	0,12	20,97

Kromě prvního vzorku, který byl spojen za pomoci laserového svařování, došlo dle fraktografických snímků u všech vzorků svařovaných technologií Laser-TIG k lomu v TOO v blízkosti ZM. Tato skutečnost je viditelná na obr. 49. U vzorku č. 1, který je zobrazen na obr. 48 však došlo dle fraktografického snímku k lomu v oblasti svaru.



Obr. 48 Křehký lom zkušební vzorku č. 1 v oblasti svarového kovu.

Z fraktografie dále vyplývá i hodnocení povahy lomu vzorků. Na obr. 48. a stejně tak na obr. 49. tedy obrázcích vzorků reprezentujících jak technologii laserového svařování, tak i technologii hybridní je viditelný křehký lom materiálu.



Obr. 49 Křehký lom zkušební vzorku č. 2 v TOO.

3.4 Metalografické šetření

Šetření probíhalo na ÚPT AV ČR v Brně, kde disponují zařízeními nutnými k přípravě metalografických vzorků. Dle sdělení Libora Mrňi ÚPT AV ČR byl nejprve materiál oddělen na pile Struers Secotom - 60, kterou můžete vidět na obr. 50.



Obr. 50 Pila Struers Secotom - 60.

Dále následovalo zalisování vzorku plechu do pryskyřice pomocí zařízení Struers CitoPress - 1 viditelné na obr. 51.



Obr. 51 Příklad přístroje CitoPress – 1.

Až byl vzorek zalisován do pryskyřice, přišlo na řadu broušení a leštění na přístroji Struers Tegramin - 20 zachyceném na obr. 52.



Obr. 52 Příklad přístroje Struers Tegramin – 20.

Nastavení parametrů broušení a leštění bylo využíváno již předdefinovaných programů přístroje. Pro operace jsou využívány brusné diamantové kotouče a následně jemnější lešticí kotouče v kombinaci s diamantovou pastou. Postupuje se od kotoučů s vyšší drsností po nižší. Následuje použití diamantové suspenze s velikostmi zrn v pořadí 9,3,1 μm . Po důkladném obroušení a naleštění následuje leptání v laboratoři za použití 3 % Nitalu. Po naleptání je na řadě oplach vodou a izopropylalkoholem.

3.4.1 Vyhodnocení makrostruktury

Rozbor makrostruktury je, jak bylo popsáno již v kapitole 2.6.3, vizuální zkoumání za použití optického mikroskopu cca do 30násobku zvětšení. Je využíván pro hodnocení povahy, velikosti a tvaru tepelně ovlivněné oblasti, hodnocení tvaru svaru, kladení svarových vrstev apod. Hodnocení makrostruktury proběhlo na Ústavu přístrojové techniky AV ČR a bylo provedeno optickým mikroskopem Olympus SZ61. Při hodnocení vzorků jsme se zaměřili na svarové vady a rozměry SK a viditelné TOO. Svarové vady již byly podrobně rozebrány v kapitole 2.5. Všechny snímky makrostruktury ukazuje tab. 15.

Na obr. 53 je vzorek č. 1 a na něm pozorujeme značně propadlý svar v oblasti krycí vrstvy a to přibližně 0,16 mm. Svar má výrazně propadlý kořen svaru dosahující propadnutí

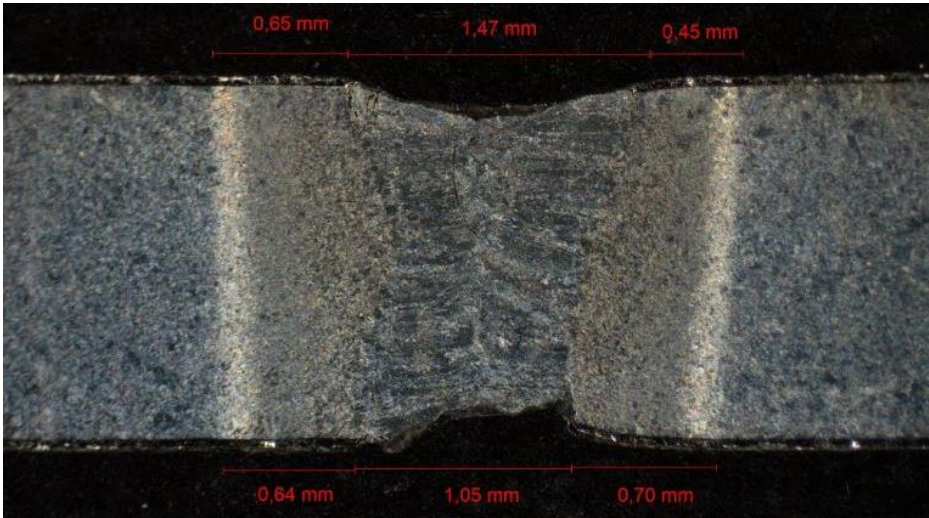
až 0,26 mm vůči úrovni základního materiálu. Tento vzorek byl zhotoven pouze technologií laserového svařování s nejmenším vneseným teplem. Tomu také odpovídá nejmenší šířka viditelné TOO. Dále pak ve svarovém kovu pozorujeme pravděpodobně fázi Al-Fe vzniklou roztavením ochranného povlaku Al-Si, což bylo již popsáno v kapitole 2.7.3 [60].

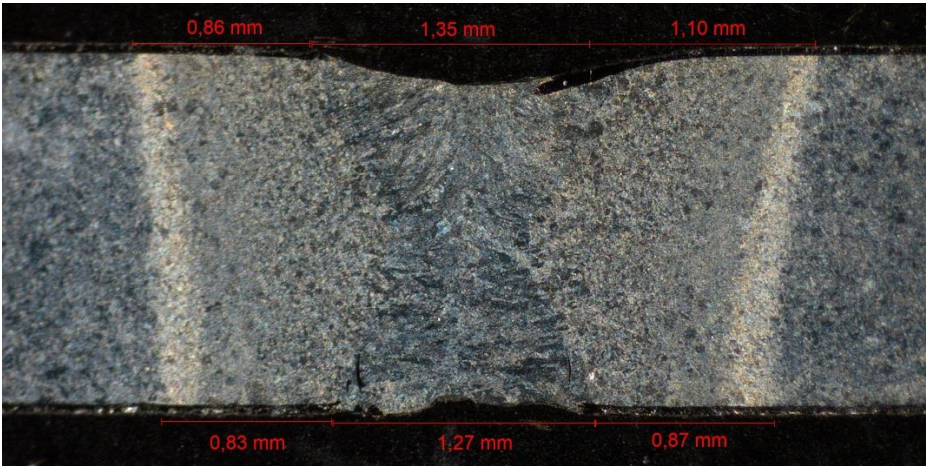
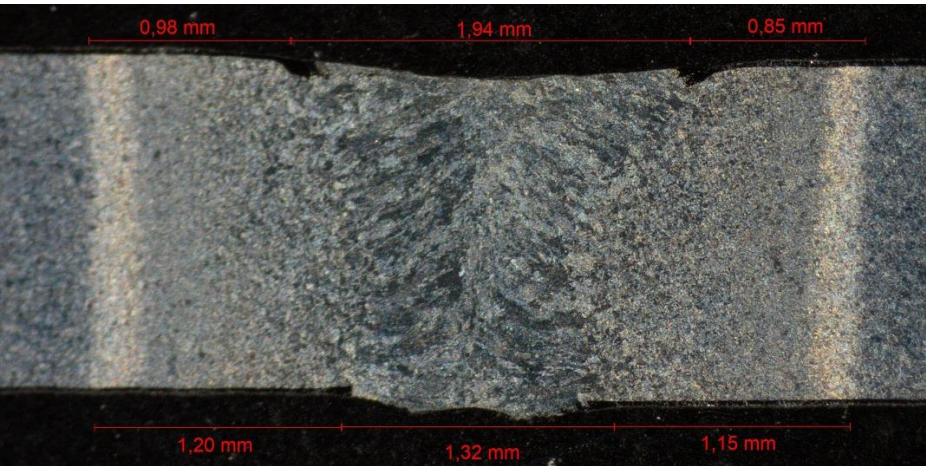
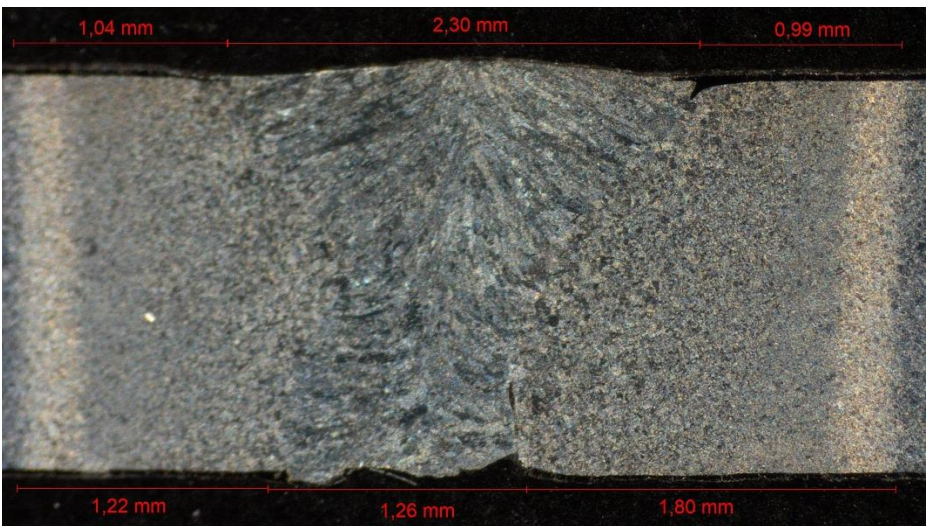
Na obr. 54 je vzorek č. 2, kde je propadlý kořen o velikosti přibližně 0,16 mm. Dále se zde vyskytují útvary připomínající studené trhliny, které byly popsány v kapitole 2.5 a bude nutné další zkoumání při hodnocení mikrostruktury. Viditelná část TOO dosahuje šířky 3,31 mm na straně krycí vrstvy a u kořene svaru má velikost 2,97 mm.

Vzorek č. 3 se vyznačuje poměrně výraznými zápaly na straně krycí vrstvy svarového kovu zobrazenými na obr. 55. Viditelná část TOO se rozšiřuje a na tomto vzorku již dosahuje šířky přibližně 3,65 mm. Jak bylo popsáno v kapitole 2.5 zápaly jsou mimo jiné důsledky zvoleného vysokého svařovacího proudu. U vzorku č. 3 je volen proud 40 A pro technologii TIG, a tak je důvodné se domnívat, že se již začíná projevovat působení tohoto parametru v podobě zápalů.

Na vzorku č. 4 zobrazeném na obr. 56 jsou odhaleny zápaly jak na krycí vrstvě, tak v oblasti kořene. Dále pak vidíme studený spoj v oblasti kořene, což je svarová vada a byla také rozebrána v kapitole 2.5. Šířka viditelně části tepelně ovlivněné oblasti je přibližně 4,3 mm.

Tab. 15 Makrostruktura svarů.

Rozměry SK a TOO	Makrostruktura jednotlivých vzorků v oblasti svaru
<p>SK=1,47 - 1,05 mm</p> <p>TOO=2,39 - 2,57 mm</p>	 <p>Obr. 53 Vzorek č. 1 – Laser</p>

<p>SK=1,27 - 1,35 mm</p> <p>TOO=2,97 - 3,31 mm</p>	 <p>Obr. 54 Vzorek č. 2 – Laser + TIG (20 A)</p>
<p>SK=1,32 - 1,94 mm</p> <p>TOO=3,67 - 3,77 mm</p>	 <p>Obr. 55 Vzorek č. 3 – Laser + TIG (40 A)</p>
<p>SK=2,30 - 1,26 mm</p> <p>TOO=4,28 - 4,33 mm</p>	 <p>Obr. 56 Vzorek č. 4 – Laser + TIG (60 A)</p>

Z vyhodnocení makrostruktury vyplývá jasný trend růstu šířky viditelné TOO s větším vneseným teplem technologií TIG.

3.4.2 Vyhodnocení mikrostruktury

Pokud se jedná o vyhodnocení mikrostruktury, tak je nutné použít mikroskop, který má přiblížení 30-2000x. Dále je nutné provést metalografickou přípravu vzorku a naleptat daný povrch například Nitalem nebo jiným leptadlem. Mikrostrukturní šetření lze najít podrobně zmíněné v kapitole 2.6.3.

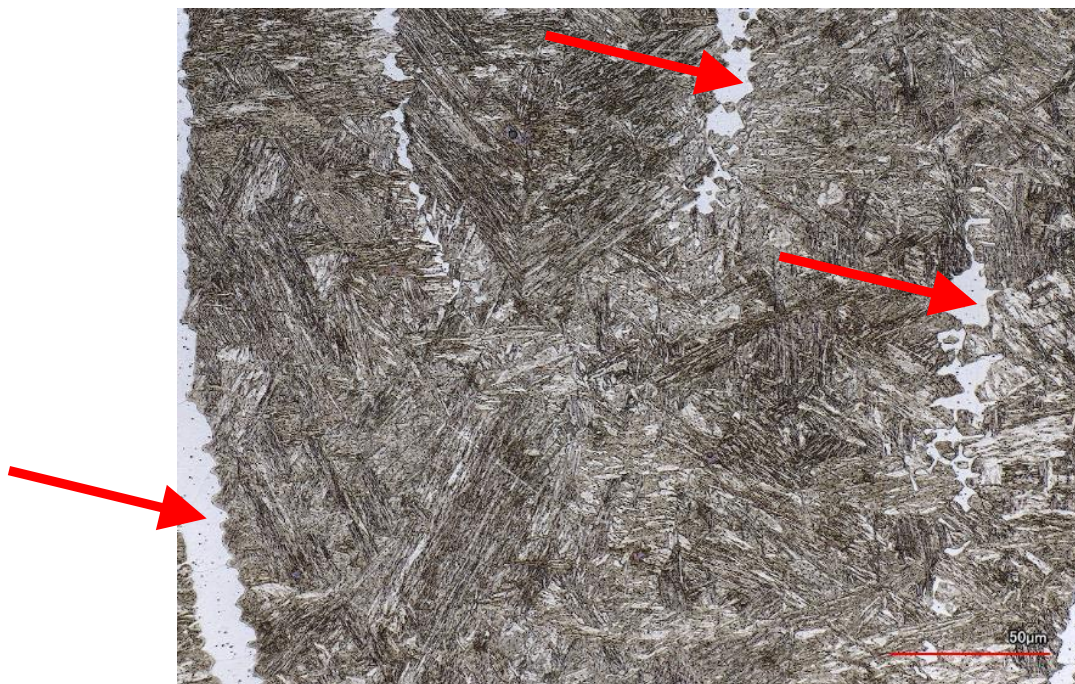
Mikrostrukturní šetření proběhlo na Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Bylo použito konfokálního laserového mikroskopu od firmy KEYENCE s označení VK-X. Při vytváření snímků jsme se zaměřili na tři hlavní podoblasti, a to oblast svarového kovu, tepelně ovlivněnou oblast a základní materiál. Výchozí materiál pro mikrostrukturní rozbor by měl být feriticko-perlitický, ale pro danou aplikaci předchází svařování tepelná úprava Kalení při tváření, kterou najdeme v kapitole 2.7. Z toho důvodu materiál před svařováním již vykazuje martenzitickou strukturu. Pokud svařujeme ocel, tak lze rozčlenit tepelně ovlivněnou oblast na charakteristicky tepelně ovlivněná pásma. Jedná se o přehřátou oblast, oblast normalizace, oblast částečné překrytalizace a vyžíhanou oblast [43].

Snímky všech vzorků jsou v příloze č. 3. Za pomoci konfokálního mikroskopu bylo zhodnocena mikrostruktura všech 4 vzorků a z daného zkoumání vyplývají následující zjištění:

- vzorek č. 1 svařovaný laserem v mikrostruktuře svarového kovu má bílé útvary, které svojí barvou a strukturou odpovídají povlaku Al-Si a jsou viditelné na obr. 57 a obr. 58. Tvrdost tohoto útvaru je průměrně 270 HV_{0,025}, což popírá předpoklad o tom, že se jedná o povlak Al-Si. Tato hodnota mikrotvrdosti naznačuje, že by se mohlo jednat spíše o ferit nebo austenit. Vzhledem ke zvýšenému obsahu feritotvorných prvků Al a Si je více pravděpodobné, že se jedná o ferit. Samotným výskytem tohoto útvaru je zhoršena homogenita SK. Výskyt tohoto útvaru ovlivňuje rychlost ochlazování a u dalších vzorků Laser-TIG již ve struktuře není. Je možné se tedy domnívat, že u vzorku č. 1 byla rychlost ochlazování taveniny příliš velká na to, aby došlo k difuzi v celém objemu SK a došlo k jeho homogenizaci. Tato skutečnost mohla mít vliv na pevnost daného svaru,

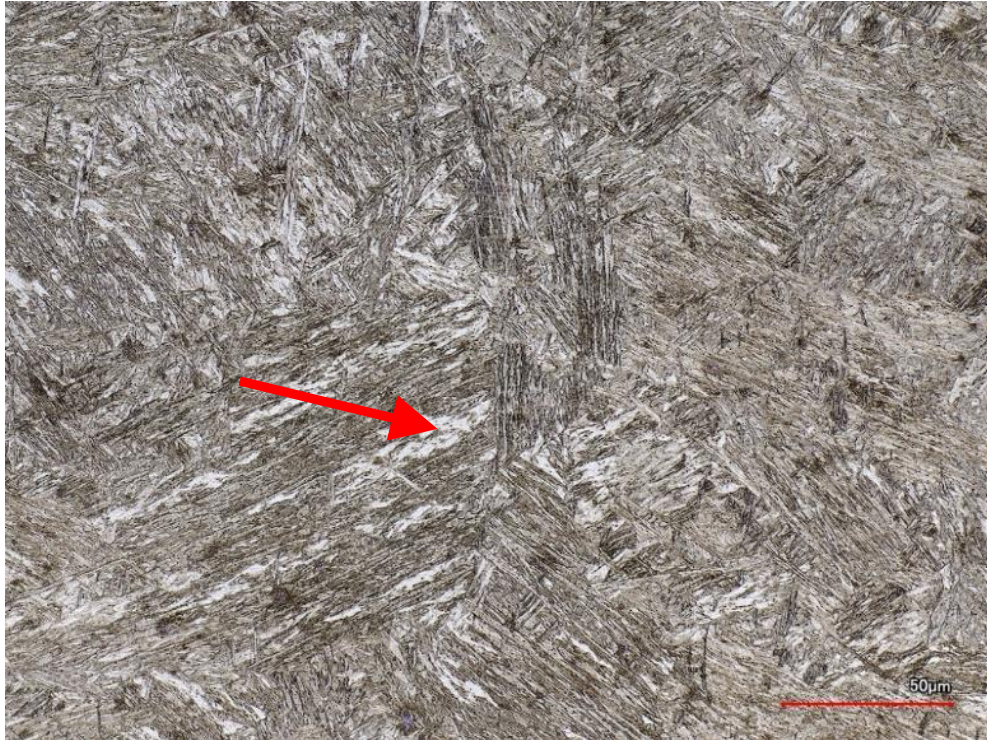


Obr. 57 vzorek č. 1 svařování dle tab. 12 – oblast SK 10x zvětšeno – bílé útvary podobné povlaku.

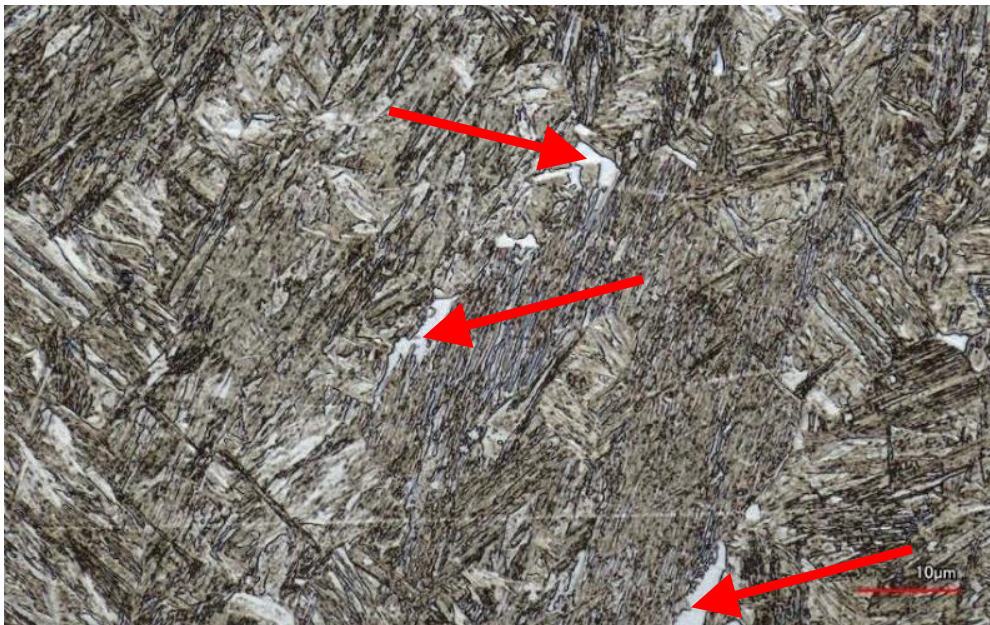


Obr. 58 vzorek č. 1 svařování dle tab. 12 – oblast SK 50x zvětšeno – bílé útvary podobné povlaku.

- na obr. 59 a obr. 60 je možné vidět pravděpodobně fázi delta feritu. Jak již bylo dříve zmíněno v kapitole 2.7.3 vznik této fáze podporuje zvýšená koncentrace hliníku z povlaku. Hliník tak stabilizuje fázi delta feritu, která by jinak ve struktuře nevznikla. V největší míře je tato struktura viditelná na obr. 59 se vzorkem č. 1 tedy vzorek svařen pouze laserovou technologií. Na vzorcích svařených technologií Laser-TIG je míra těchto útvarů obecně menší, ale je zde také patrná. Navíc lze říct, že se zvyšujícím se proudem technologie TIG klesá velikost těchto útvarů a svarový kov je více homogenní, což je možné pozorovat na obr. 60. a bylo zmíněno již v kapitole 2.4. Vzorek č. 1 při tahové zkoušce vykázal nejnižší mez pevnosti a k lomu došlo v oblasti svarového kovu na rozdíl od ostatních vzorků, kde došlo k lomu v TOO. Kvůli výše zmíněnému se domnívám, že tato nehomogenita svaru způsobená vznikem feritu spolu s tvorbou delta feritu v oblastech bohatých na hliník, může oslabit pevnost daného spoje [20, 61],



Obr. 59 vzorek č. 1 svařování dle tab. 12 – oblast svarového kovu – viditelné fáze delta feritu.



Obr. 60 vzorek č. 2 svařování dle tab. 12 – oblast svarového kovu – viditelné fáze delta feritu.

- při ohřevu dojde k austenitizaci části výchozí martenzitické struktury. Následně v závislosti na rychlosti ochlazování vzniká v oblasti částečné překrystalizace nová fáze, jak již bylo popsáno v kapitole 2.4. Toto zjištění dokumentuje obr. 61. Dle ARA diagramu oceli v kapitole 2.4 může v daném materiálu docházet ke vzniku bainitu nebo feritu, a to v závislosti na rychlosti ochlazování. Tuto skutečnost potvrzuje i naměření nižší tvrdosti v této oblasti průměrně 300 HV 0,1. Tato tvrdost by mohla být dosažena jak kombinací fáze martenzitu a feritu, tak také martenzitu a bainitu, které se v oblasti mohou za daných podmínek vyskytovat. Hodnocením snímků mikrostruktury navíc není možné s jistotou určit, která z fází v dané oblasti vznikla. Avšak vzhledem k tomu, že obě fáze způsobí snížení tvrdosti dané fáze, tak přesné

určení není nutné. Vznik těchto fází, ale může působit na snížení mechanických vlastností svaru snížením tvrdosti dané oblasti. Dle tahové zkoušky a následného ohledání lomu u vzorků č. 2, 3 a 4 lze konstatovat, že k lomu došlo vždy v TOO a je tedy možné, že oblast částečné překrystalizace byla vznikem fází s nižší tvrdostí (ferit nebo bainit) oslabena. Je možné předpokládat, že to mohlo být příčinou lomu [20],



Obr. 61 vzorek č. 3 svařování dle tab. 12 - oblast částečné překrystalizace v TOO – viditelná precipitace nové fáze.

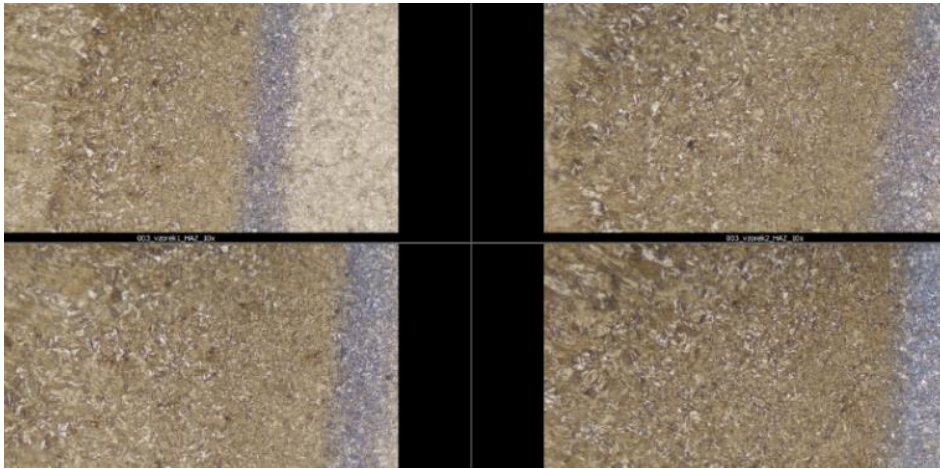
- na obr. 62 vidíme vyžihanou oblast TOO, ve které je možné pozorovat náznaky vzniku popuštěné martenzitické struktury, jsou zde viditelné pravděpodobně precipitáty ve formě karbidů nebo karbonitridů. Vzhledem k tomu, že popouštěcí teplota byla udržena jen krátce během ochlazování svaru, tak je popouštění velmi málo patrné a struktura je podobná základnímu materiálu. Přesto je zde pozorováno výrazné snížení tvrdosti struktury a také zde mohlo dojít k lomu u vzorků č. 2, 3 a 4,



Obr. 62 vzorek č. 4 svařování dle tab. 12 - vyžihaná oblast v TOO.

- pokud srovnáme martenzitickou strukturu v tepelně ovlivněné oblasti vzorků, tak lze říct, že u vzorků s větším vneseným teplem vlivem snižující se rychlosti ochlazování roste hrubozrnnost struktury. Tuto skutečnost dokumentuje obr. 63 a byla již komentována v kapitole 2.4. V případě jinak stejné struktury platí, že čím větší zrna ve struktuře jsou, tím je pevnost nižší a již to bylo řečeno v kapitole 2.4. Dle jemně zvyšující se hrubozrnnosti struktury se stoupajícím množstvím vneseného tepla

u vzorků je možné se domnívat, že hrubnoucí struktura TOO by mohla mít nějaký vliv na pevnost svaru. Daný trend naznačují i výsledky tahové zkoušky, které jsou v kapitole 3.3, kdy s každým navýšením proudu u technologie TIG o 20 A tudíž zvýšením vneseného tepla dochází postupně ke snížení meze pevnosti vzorku o přibližně 50 MPa.



Obr. 63 Porovnání hrubozrnnosti TOO u zkušebních vzorků.

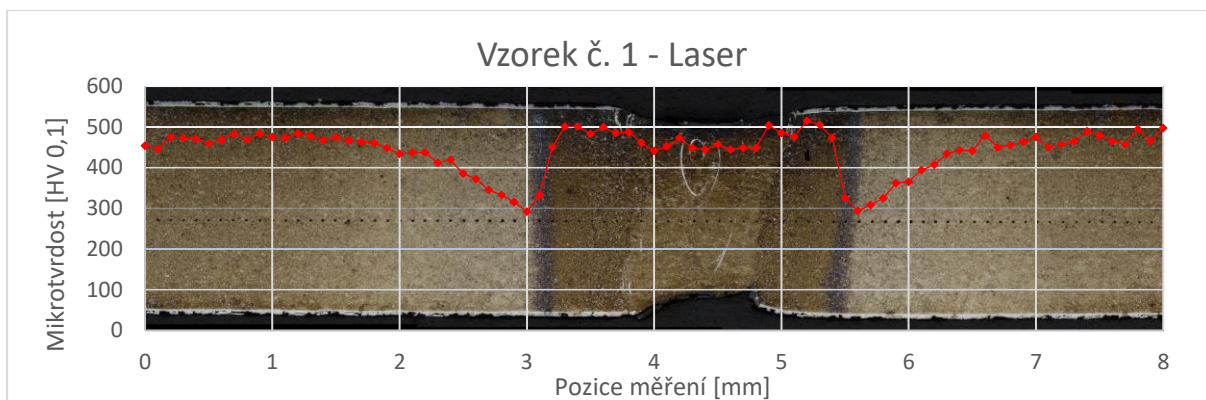
- dále jsou ve struktuře viditelné korozní důlky, které mohou být způsobeny např. leptadlem, které ve struktuře uvízlo po delší dobu nebo nějakou nečistotou základního materiálu.

3.5 Zkouška mikrotvrlosti dle Vickerse

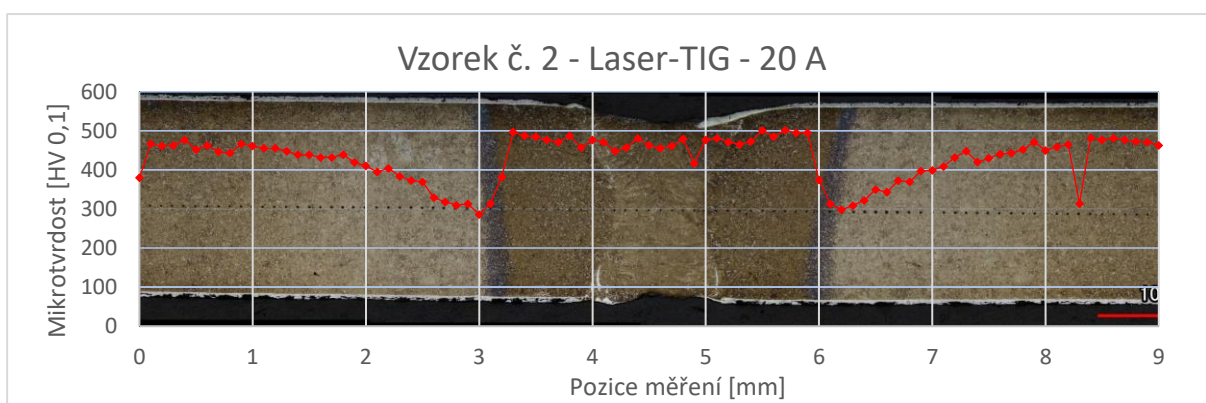
Pro vyhodnocení tvrdosti a výskytu některých materiálových fází v oblasti svaru a tepelně ovlivněné oblasti byla provedena zkouška mikrotvrlosti dle Vickerse. Zkouška byla provedena na půdě VUT panem doktorem Doležalem. Náležitosti zkoušky mikrotvrlosti dle Vickerse byly podrobně rozepsány v kapitole 2.6.2. Šlo o zkoušku mikrotvrlosti HV 0,1. Neboli šlo o hodnotu zatěžování $F = 1 \text{ N}$. Zatěžování probíhalo po dobu 10 s a jednotlivá vniknutí zkušebního tělesa byla umístována s krokem 0,1 mm se začátkem 3 mm od viditelné hranice tepelně ovlivněné oblasti. Na obr. 64 je viditelný svar s vtisky indentoru po zkoušce mikrotvrlosti dle Vickerse.



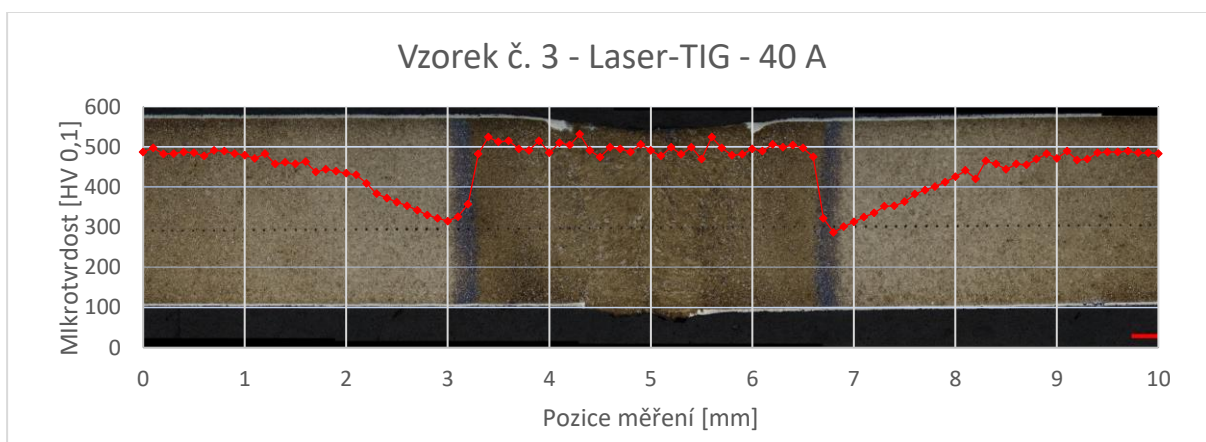
Obr. 64 Vtisky indentoru po zkoušce mikrotvrlosti dle Vickerse.



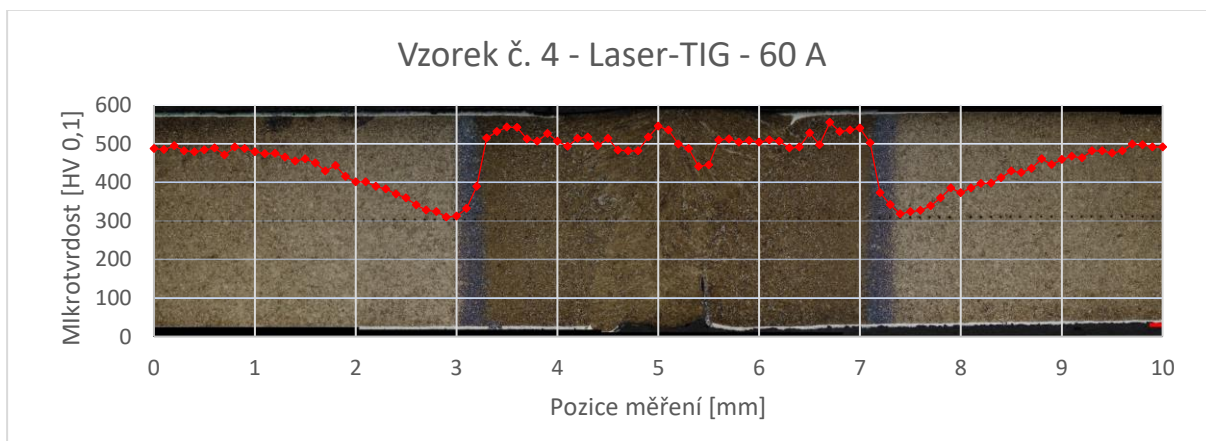
Obr. 65 Průběh mikrotvrdości HV 0,1 u vzorku č. 1.



Obr. 66 Průběh mikrotvrdości HV 0,1 u vzorku č. 2.



Obr. 67 Průběh mikrotvrdości HV 0,1 u vzorku č. 3.



Obr. 68 Průběh mikrotvrdości HV 0,1 u vzorku č. 4.

U všech vzorků svařovaných technologií Laser-TIG je jasně viditelná zvýšená tvrdost v oblasti SK a TOO. Vzorek č. 1 svařovaný pouze laserovým svařováním vykazuje také zvýšení tvrdosti ve viditelné TOO, ale je zde viditelný určitý propad tvrdosti v oblasti SK. Vzorek č. 1 je zachycen na obr. 65. Obecně však všechny vzorky vykazují zvýšení tvrdosti v TOO a SK a příčina byla již popsána v kapitole 2.4. Jedná se o vyšší rychlost ochlazování v této oblasti. Dále je třeba říct, že snížení tvrdosti v oblasti částečné krystalizace, které bylo popsáno v kapitole 3.4.2 je bez výjimky viditelné u všech vzorků a pohybuje se shodně u všech vzorků okolo hodnoty 300 HV. Vzorky číslo 2, 3 a 4 najdeme na obr. 66, obr. 67 a obr. 68. Z předešlého mikrostrukturního šetření v kap. 3.4.2 byl určen pravděpodobný výskyt fáze s nižší tvrdostí v oblasti částečné krystalizace a výsledky šetření mikrotvrdosti daný výskyt potvrzují. Dále křivky tvrdosti ve vyžíhané oblasti vykazují minimální tvrdost. Zde mohlo dojít k lomu u vzorků č. 2, 3 a 4. Tento průběh také odpovídá předešlým zjištěním z kapitoly 3.4.2. o možnosti výskytu částečně popuštěné martenzitické struktury materiálu. Proběhlo i dodatečné měření mikrotvrdosti povlaku Al-Si. Tento povlak dosáhl tvrdosti 1065 HV_{0,025}.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V diplomové práci je hodnocen vliv na kvalitu a pevnost svaru při použití dohřevu TIG v kombinaci s technologií laserového svařování. Cílem práce není výroba nějaké součásti nebo výrobku. Z toho důvodu nelze určit náklady spojené s výrobou jednoho kusu, a proto je volena kalkulace vztažená na délku svaru vytvořenou danou technologií svařování. V technicko-ekonomickém zhodnocení budou porovnány náklady technologie Laser a Laser-TIG.

Jak již je zmíněno v kapitole 2.1 nevýhodou laserového svařování je komplikované přípravkování. Přípravkování je komplikovanější kvůli nutnosti zaručit vyšší přesnost například v oblasti automotive, kde je tato technologie hojně využívána. Složitost přípravků se také promítá do ekonomiky této technologie. Pro zkrácení návratnosti investice a zrychlení svařovacího procesu využíváno tzv skenerové svařování. Jedná se o umístění skeneru na hlavu robota pro urychlení procesu svařování. Toto zařízení slouží k navádění paprsku laseru do místa svaru s větší rychlostí, než zvládá robot a dochází tak k zvýšení efektivity této technologie [23].

Dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje náklady na danou technologii je jakým způsobem je materiál přehříván či dohříván. Laserové svařování má poměrně vysokou rychlost svařování, a tak přidáním dohřevu či přehřevu jinou technologií se operační čas svařování prodlouží. Přesto se tato technologie vyplatí v porovnání s jinými konvenčními. V této práci je posuzováno působení dohřevu pomocí technologie obloukového svařování metody TIG a z hlediska ekonomičnosti je tato technologie nenáročná. Invertorový zdroj TIG není nijak nákladný, a navíc je v průmyslu poměrně běžně využíváný. Na druhou stranu je jasné, že vzhledem k většímu počtu proměnných, které je u technologie Laser-TIG nutné nastavovat dojde k zvýšení časové náročnosti na přípravu procesu, a to se také promítne do zvýšení nákladů této technologie [23].

Pro účely výpočtu bylo uvažována délka směny 8 h, dvousměnný provoz, 5denní pracovní týden a 50 pracovních týdnů za rok. To znamená, že počet pracovních hodin je 4000 h za rok. Doba odpisů je stanovena na 5 let [20, 65].

Tab. 16 Výpočet nákladů technologie Laser – TIG [66, 67, 65, 20].

LASER-TIG		Hodinové náklady na provoz
Pevnolátkový laser	10 000 000 Kč	500 Kč
Elektrická energie	4,91 kč/kWh pro příkon 8 kW	39 Kč
Mzda pracovníka	250 kč/hod + 32% odvody	330 Kč
Servis laseru	120 000 kč/rok	30 kč
Invertor obloukové metody TIG	40 000 Kč	2 kč
Elektrická energie	4,91 kč/kWh pro příkon 3,5 kW	17 Kč
Ochranný plyn-Argon 4.6	4 450 kč za láhev 15/min	400,5 Kč
Celkové hodinové náklady na technologii		1318,5 Kč
Náklady na 1 m svaru při rychlosti svařování 20 mm/s		18,3 Kč/m
Celkové hodinové náklady na technologii + režie (200 %) + předpokládaný zisk (10 %)		2900,7 Kč
Náklady na 1 m svaru při rychlosti svařování 20 mm/s + režie (200 %) + předpokládaný zisk (10 %)		40,26 Kč/m

Tab. 17 Výpočet nákladů technologie Laser [66, 67, 65, 20].

LASER		Hodinové náklady na provoz
Pevnolátkový laser	10 000 000	500 Kč
Elektrická energie	4,91 Kč/kWh pro příkon 8 kW	39 Kč
Ochranný plyn Argon 4.6	4450 Kč za láhev 15 l/min	400,5 Kč
Mzda pracovníka	250 Kč/hod + 32% odvody	330 Kč
Servis	120 000 Kč/rok	30 Kč
Celkové hodinové náklady na technologii		1299,5 Kč
Náklady na 1 m svaru při rychlosti svařování 20 mm/s		18,1 Kč/m
Celkové hodinové náklady na technologii + režie (200%) + předpokládaný zisk (10%)		2858,9 Kč
Náklady na 1 m svaru při rychlosti svařování 20 mm/s + režie (200%) + předpokládaný zisk (10%)		39,82 Kč/m

Ekonomické zhodnocení jednotlivých technologií je v tab. 16 a tab. 17. Kupní cena pevnolátkového laseru, kupní cena invertoru obloukové metody TIG, cena servisu pevnolátkového laseru a mzda pracovníka jsou pouze odhadem, zdroj ostatních položek je uveden v názvu tabulky. Při podrobném pohledu na jednotlivé položky vidíme, že mezi nejvyšší položky nákladů patří náklady na pořízení přístrojového vybavení pro technologii Laser v podobě odpisů ve výši 500 Kč/hod. Následně pak ochranný plyn s náklady 400,5 Kč/hod. Důvodem je poměrně vysoký průtok plynu, který spotřebuje za hodinu provozu velkou část tlakové láhve. A mezi vysoké položky patří i náklady spojené se mzdou pracovníka obsluhy stroje. Náklady spojené s implementací technologie TIG jsou v porovnání s náklady na Laser nižší a nezabírají proto velkou část z výsledné částky nákladů technologie Laser – TIG.

Hybridní technologie Laser – TIG má hodinové náklady 40,26 Kč/m, zatímco laserové svařování dosahuje nákladů 39,82 Kč/m. Jedná se o navýšení o přibližně 1,1 %. Z toho vyplývá, že kombinací laseru a obloukové metody TIG nedojde k velkému zvýšení nákladů. Vzhledem k technologickým výhodám popsaným v předchozí kapitole 2.3. lze tuto technologii označit za efektivní.

5 ZÁVĚRY

Cílem této diplomové práce bylo zhodnocení technologie Laser-TIG pro využití při svařování vysokopevné manganobórové oceli 22MnB5, najít optimální parametry této technologie vzhledem k mechanickým vlastnostem svaru a také získat praxi při vyhodnocování svarového spoje.

Teoretická část pojednává detailně o technologiích, které jsou zahrnuty v hybridní technologii Laser-TIG. Pojednává o vlastnostech, parametrech a jejich příslušenství. Jsou zde zmíněny klady a zápory jednotlivých řešení. Velká část teoretické části je věnována klasifikaci svarových vad, zkouškám svarů a přehřevu.

Dále již následuje experimentální část diplomové práce, kde je soustředěna pozornost na provedení a vyhodnocení tahové zkoušky svarových vzorků svařených dle stanovených parametrů metalografické šetření makro i mikrostruktury a zkoušku mikrotvrlosti dle Vickerse.

Tahová zkouška jasně ukázala, že vzorky svařené laserovou technologií vykazují nižší mez pevnosti než vzorky svařené hybridní technologií Laser-TIG. Tahová zkouška je uvedena v kapitole 3.3. Důvodem tohoto výsledku pravděpodobně mohla být vysoká rychlost ochlazování u vzorků svařených laserovou technologií a s ní spojený omezený čas na homogenizaci SK. Proto také u vzorku svařovaného laserovou technologií došlo k lomu ve SK. Jak již bylo již zhodnoceno v kapitole 3.3. Dále je zde jasný trend, kdy se zvyšujícím se proudem technologie TIG, klesá mírně mez pevnosti svarových spojů. Tento trend může být způsoben hrubnutím zrna v TOO při delší době ochlazování a bylo to detailně popsáno v kapitole 3.3. V rámci tahové zkoušky proběhlo i fraktografické hodnocení vzorků a najdeme ho v kapitole 3.3. Dle zkoumání lomu vzorků se vždy jedná o křehký lom.

Při metalografickém hodnocení makrostruktury byla zkoumána hlavně povaha, tvar, velikost viditelné TOO a možné svarové vady, jak bylo již řečeno v kapitole 3.4.1. Vzorky se vyznačovaly trendem postupného růstu šířky viditelné tepelně ovlivněné oblasti v návaznosti na zvyšující se vnesené teplo do svaru. Tento mechanismus byl popsán v kapitole 2.4.

Hodnocení mikrostruktury nastínilo možné fázové složení SK, TOO a ZM. Výchozí struktura je martenzitická. Na vzorku č. 1 v oblasti SK je vidět bílý útvar s tvrdostí 270 HV_{0,025}. Vzhledem k obsahu feritotvorných prvků Al a Si se pravděpodobně jedná o ferit. Rychlost ochlazování pak byla pravděpodobně příliš velká na to, aby došlo k promísení SK a homogenizaci svaru. Dále rozbor mikrostruktury naznačil, že by svarový kov u všech vzorků mohl obsahovat fáze delta feritu stabilizované působením hliníku, jehož obsah je zvýšen přítomností povlaku Al-Si, jak již bylo popsáno v kapitole 3.4.2. Daná struktura se vyskytuje u všech vzorků nejvíce však u vzorku č. 1. Nedostatečně homogenní SK a také více zastoupený delta ferit ve struktuře zřejmě narušil celistvost svaru a oslabil tak pevnost spoje u vzorku č. 1. Z toho důvodu pravděpodobně při tahové zkoušce u vzorku č. 1 došlo k lomu ve svarovém kovu, a ne v tepelně ovlivněné oblasti jako u vzorků č. 2, 3 a 4. V oblasti částečné překrystalizace v TOO je u všech vzorků pozorována precipitace nové fáze. Tato fáze by vzhledem k ARA diagramu oceli 22MnB5 mohla odpovídat feritu nebo bainitu a bylo to popsáno v kapitole 3.4.2. Hodnocení také odhalilo změnu struktury ve vyžíhané oblasti TOO. Došlo zde k částečnému popuštění martenzitické struktury a precipitaci karbidů a karbonitridů, jak již bylo to zmíněno v kapitole 3.4.2.

Dle měření mikrotvrlosti dle Vickerse bylo zjištěno zvýšení tvrdosti v oblasti svarového kovu a TOO. To může souviset se zvýšenou rychlostí ochlazování v SK a TOO a bylo to rozebráno již v kapitole 3.5. Dále také došlo k propadu hodnot tvrdosti v oblasti částečné překrystalizace a vyžíhané oblasti v TOO. Toto přímo potvrzuje zjištění z hodnocení mikrostruktury. A to je, že zde dochází k precipitaci feritické či bainitické fáze, která

se vyznačuje nižší tvrdostí. Minimum tvrdosti se vyskytuje vyžíhané oblasti TOO, kde pravděpodobně dochází k precipitaci karbidů a karbonitridů a mohlo být u vzorků č. 2, 3 a 4 příčinou lomu. Měřením mikrotrvdosti povlaku byla zjištěna vysoká hodnota tvrdosti 1065 HV0,025. Tato hodnota je možným důvodem, proč docházelo při tahové zkoušce k prokluzu.

Na základě provedených zkoušek doporučuji pro svařování plechů vysokopevné manganobórové oceli 22MnB5 tloušťky 1,8 mm technologii svařování Laser-TIG se svařovacím proudem 20 A u technologie TIG. Důvodem je velmi dobrá hodnota meze pevnosti v tahu vzorků, a to v průměru 1151,5 MPa. Je potřebné také uvést, že technologie Laser-TIG je výhodná i z hlediska ekonomického, protože dle kapitoly 4 se cena za metr svaru zvýší oproti svařování laserem jen o přibližně 1,1 %.

BIBLIOGRAFIE [68]

- [1] MACHEK, Václav a Libor BENEŠ. BÓROVÉ OCELI - OCELI BUDOUCNOSTI. *Engineering.sk* [online]. [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravy/5320-borove-oceli-oceli-budoucnosti>
- [2] KOLAŘÍK, Ladislav. Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. *MM spektrum* [online]. 2017, (3) [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>
- [3] ŠANOVEC, Jan a Tomáš PILVOUSEK. Trendy ve výrobě plochých polotovarů tvářených za tepla. *MM spektrum* [online]. 2017, (5) [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-ve-vyrobe-plochych-polotovaru-tvarenych-za-tepla.html>
- [4] ŠEBESTOVÁ, Hana. Hybridní metody svařování. *Portál moderní fyziky* [online]. 772 07 Olomouc [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_hybridni_svarovani.pdf
- [5] *Example of an automated factory* [online]. In: . [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/wp-content/uploads/2018/09/automated-factory.jpg>
- [6] Steels for hot stamping - Usibor® and Ductibor®. *Arcelor Mittal* [online]. [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/PHS/usibor_ductibor
- [7] In: *Arcelor Mittal Deutschland* [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://germany.arcelormittal.com/icc/arceloren/binarywriterservlet?size=2&imgUid=2b1424e5-8f34-c312-da79-77d7b2f25d3e&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111>
- [8] TATÍČEK, František. Metody spojování využívající principy plastické deformace. *MM spektrum* [online]. [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/metody-spojovani-vyuzivajici-principy-plasticke-deformace.html>
- [9] Moderní způsoby spojování dílů karoserií. *MM spektrum* [online]. [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-zpusoby-spojovani-dilu-karoserii.html>
- [10] PILVOUSEK, Tomáš. Lepení ve výrobě karoserie. *MM spektrum* [online]. [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lepeni-ve-vyrobe-karoserie.html>
- [11] DOUBEK, Pavel a Michaela KOLNEROVÁ. *Základy technologie lepení karosářských výlisků*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, 2014, 119 s. ISBN 978-80-7494-170-2.
- [12] Bodové svařování. *Rockweld* [online]. [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.rockweld.cz/bodove-svarovani/>
- [13] Bodovky a bodování. *SvarInfo.cz* [online]. [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <http://svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008033102>
- [14] *Svařovací bodové kleště* [online]. In: . [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: http://wordpress.p184444.webspaceconfig.de/wp-content/uploads/2018/03/Duering_Roboterschwei%C3%9Fzange_C_weld_steel.jpg
- [15] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.

- [16] MIG/MAG welding. In: *NS-welding* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.ns-newelding.com/wp-content/uploads/2019/05/welding-mig-mag.jpg>
- [17] Laserové svařování. *Laser automotive* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.laserautomotive.com/wp-content/uploads/2018/01/soldadura.jpg>
- [18] Studijní opory předmětu Speciální metody svařování - Svařování laserem. *Ústav Strojírenské Technologie - FSI* [online]. [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf
- [19] Laserové svařování. *Rockweld* [online]. [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://www.rockweld.cz/laserove/>
- [20] KACHLÍŘ, Jaromír. *Využití hybridní technologie Laser-TIG pro svařování bórem dopovaných vysokopevnostních ocelí*. Brno, 2019.. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.
- [21] Preheating can be critical to welding success. *The Fabricator* [online]. [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/arcwelding/preheating-can-be-critical-to-welding-success>
- [22] Řízené tepelné zpracování v procesu svařování. *Konstrukce - odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. [cit. 2019-11-11]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/rizene-tepelne-zpracovani-v-procesu-svarovani/>
- [23] MACH, Martin. *Využití předehřevu elektrickým obloukem při laserovém svařování ocelí s vyšším obsahem uhlíku* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147958. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Libor Mrňa.
- [24] *Předehřev plamenem* [online]. In: . [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: http://www.seilnacht.com/Lexikon/tn_autog.JPG
- [25] Dawell DHI-15. In: *Nebex* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.nebex.sk/resize/e/1200/1200/files/dawell/dhi15c.jpg>
- [26] Svařování metodou TIG. In: *RN kovo* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://rnkovo.cz/wp-content/uploads/2019/03/RN-kovo-privarovani-zdvihovym-zazehem.jpg>
- [27] Historie svařování. *SvarInfo.cz* [online]. 2006 [cit. 2020-01-23]. Dostupné z: https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2006061401&fbclid=IwAR0g12Tm2HnygZLIY4E8QriTXG2QgXXh7731iS4y1FY_15tlah0jPkk_ud4

- [28] LAPŠANSKÁ, Hana. Přehled metod svařování. *Portál moderní fyziky* [online]. Olomouc [cit. 2020-01-23]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/lapsanska_prehled_metod_svarovani.pdf?fbclid=IwAR3XSrVwLfrFBtRa70EyT4bqWtKMoDXE-qzHK-7ux4sw0sVz4nP2HMiuv8k
- [29] BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. 1. vydání. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
- [30] DULEY, W. *Laser welding*. New York: Wiley, 1999. ISBN 04-712-4679-4.
- [31] NOVÁK, Miroslav. Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM spektrum* [online]. 2012, **2012**(9) [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
- [32] ŠMÍD, Jiří. Lasery pro průmysl. *MM spektrum* [online]. 2008, **2008**(7) [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
- [33] KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY - HLAVNÍ TYPY LASERŮ PO UŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU. *Lao lasery a optika* [online]. 2013 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [34] MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky* [online]. Brno [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf
- [35] NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (1) – princip laseru. *MM spektrum* [online]. 2012, **2012** [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>
- [36] High Power CW Fiber Lasers. *IPG photonics* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/high-power-cw-fiber-lasers>
- [37] Možné dělení typů a druhů laserů. *Leonardo technology s.r.o - automatizace průmyslového značení* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
- [38] Svařovací metody. *Schinkmann* [online]. [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: schinkmann.cz/svarovaci-metody
- [39] TIG svařování I - základní principy. *SvarInfo.cz* [online]. 2009 [cit. 2020-01-25] Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008011702>
- [40] Schema TIG. In: *Svařečky-elektrody.cz* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: https://www.svarecky-elektrody.cz/images/gallery/W-elektrody/Schema_TIG_1.jpg
- [41] GTAW torch. In: *Tes* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://dryuc24b85zbr.cloudfront.net/tes/resources/12153155/image?width=500&height=500&version=1572980721999>

- [42] KESSE, Martin. *Laser-TIG hybrid welding process* [online]. Lappeenranta, Finsko, 2013 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/91432/Laser-TIG%20hybrid%20welding%20process.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Diplomová práce. Lappeenranta University of Technology. Vedoucí práce Jukka Martikainen.
- [43] FOLDYNA, Václav. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2. upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7185-3.
- [44] HRIVŇÁK, Ivan. *Zvaritelnost ocelí*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1979, 235 s.
- [45] *Svařování ocelového potrubí v plynárenství: odborný seminář : sborník přednášek*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 978-80-248-1325-7.
- [46] OCHODEK, Vladislav. *Stanovení teploty předehřevu* [online]. In: . Ostrava, 2012 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/stanoveni_teploty_predehrevu_2012.pdf
- [47] BARTÁK, Jiří. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. 2012 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384&fbclid=IwAR0Z_htk8x_080ozn4D5jmYCYwHH6rBHZWN4XfPNeSs3ASIDFI1ty6aH4CE
- [48] Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I: Hodnocení kvality svarového spoje. *Ústav Strojírenské Technologie - ČVUT v Praze* [online]. Praha [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/104/def-kontrola-sv.pdf>
- [49] ŠTORKÁN, Zdeněk. Problematika hodnocení svarových spojů. *Konstrukce - odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. 2014 [cit. 2020-03-21]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
- [50] *Tahová zkouška trubek* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=104795. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Eva Peterková.
- [51] DOLEŽAL, Pavel a Bohumil PACAL. Hodnocení mikrotvrdoti struktur materiálů. *Technická univerzita v Liberci* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/149104/Mikrotvrдост.pdf?sequence=11&isAllowed=y>
- [52] *Měření tvrdosti materiálů a zpracovávání zjištěných hodnot* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27306. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Milan Kalivoda.
- [53] Nedeštruktivní zkoušky. *Studijní svět - Skupina studijní stránek* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://studijni-svet.cz/nedeštruktivni-zkousky-strojirenstvi-fyzika/>
- [54] VONTOR, Jakub. *Metody nedeštruktivního zkoušení materiálů a výrobků*. Brno 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Tomáš Prokeš.
- [55] *ZKOUŠENÍ MATERIÁLU. Defektoskopie a technologické zkoušky* [online]. In: . [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://adoc.tips/zkoueni-materialu-defektoskopie-a-technologicke-zkouky.html>

- [56] *OVMT - Zkoušky bez porušení materiálu - ultrazvuk* [online]. In: . [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://adoc.tips/ovmt-zkouky-bez-porueni-materialu762caf7823555577f42e546cd943b5a424957.html>
- [57] *OVMT Zkoušky bez porušení materiálu-RTG, kapilární* [online]. In: . [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://adoc.tips/ovmt-zkouky-bez-porueni-materialu.html>
- [58] *AHSS 101: Evolving Use Of Advanced High-Strength Steels For Automotive Applications* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.prnewswire.com/news-releases/ahss-101-evolving-use-of-advanced-high-strength-steels-for-automotive-applications-151735075.html>
- [59] PTÁČKOVÁ, Eva. *Tepelné zpracování dutých tyčí z bórové oceli 22MnB5 na rámy automobilových sedaček*. Praha, 2017.. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Libor Beneš.
- [60] PILVOUSEK, Tomáš. Moderní způsoby ochrany vysokopevných ocelí. *MM spektrum* [online]. 2019, **2019** [cit. 2020-03-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-zpusoby-ochrany-vysokopevnyc-h-oceli.html>
- [61] LIN, Wenhui, Fang LI a Dongsheng WU. Effect of Al-Si Coating on Weld Microstructure and Properties of 22MnB5 Steel Joints for Hot Stamping. *J. of Materi Eng and Perform.* 2018, (27), 1825–1836. DOI: 10.1007/s11665-018-3259-0.
- [62] *Industrial fiber lasers for industrial processing* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: http://download.rockweld.cz/IPG-Laser/PROSPEKT/HP_Brochure.pdf
- [63] Svářecí zdroj FRONIUS-MagicWave 1700. *Weldtech* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.weldtech.cz/produkty/produkt/svareci-zdroj-fronius-magicwave-1700>
- [64] *IRB 2400* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-2400>
- [65] MRŇA, Libor. *Ekonomika technologií* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/cviceni/fet_ekonomika_tehnologii_mrna.pdf
- [66] Argon 4.6, tlaková láhev. *Linde Gas a.s.* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.linde-gas.cz/shop/cs/cz-ig/argon-46-tlakov%C3%A1-lahev-260-1>
- [67] *Aktuální(průměrná) cena 1 kWh elektřiny* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/#:~:text=srovn%C3%A1n%C3%ADm%20cen%20elekt%C5%99iny%20kalkula%C4%8Dkou.,4%2C91%20K%C4%8D%20%2F%20kWh.>
- [68] *Citace PRO* [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Bodové svařování automobilové karoserie [5]	10
Obr. 2 Strukturní části karoserie automobilu. [7].....	11
Obr. 3 Metoda Rivtac. [8]	12
Obr. 4 Příklad konstrukčního řešení lepeného spoje v lemu bočních dveří [10]	13
Obr. 5 Svařovací bodové kleště. [14]	14
Obr. 6. Svařování metodou MIG/MAG. [16].....	14
Obr. 7 Laserové svařování.[17].....	14
Obr. 8 Předehřev plamenem. [24]	15
Obr. 9 Odporový ohřev. [22].....	16
Obr. 10 Indukční předehřev.[25].....	16
Obr. 11 Svařování metodou TIG [26]	17
Obr. 12 Penetrační režim laserového svařování. [18]	20
Obr. 13 Kondukční režim laserového svařování.[18]	20
Obr. 14 Závislost absorpce na teplotě. [15]	21
Obr. 15 Schéma CO ₂ laseru. [34]	22
Obr. 16 Schéma Nd:YAG laseru. [33]	24
Obr. 17 Schéma vláknového laseru. [33]	24
Obr. 18 Schéma polovodičového laseru. [37]	25
Obr. 19 Schéma principu metody TIG. [40]	26
Obr. 20 Hořák TIG. [41]	28
Obr. 21 Dvě konfigurace technologie Laser-TIG. [42].....	29
Obr. 22 ARA diagram oceli 22MnB5.[1]	30
Obr. 23 Dělení vad podle tvaru a polohy. [47].....	33
Obr. 24 Horká trhlina. [47].....	34
Obr. 25 Studená trhlina.[47].....	34
Obr. 26 Kráterová trhlina. [47].....	35
Obr. 27 Zkušební tyč plochá. [50].....	37
Obr. 28 Tahový diagram s výraznou mezí kluzu. [20].....	37
Obr. 29 Tahový diagram s nevýraznou mezí kluzu. [20].....	38
Obr. 30 Zkouška tvrdosti dle Vickerse. [51]	39
Obr. 31 Rozměry indentoru pro zkoušku tvrdosti a mikrotvrdosti dle Vickerse. [52]	40
Obr. 32 Postup kapilární metody.[55]	42
Obr. 33 Ultrazvuková zkouška – průchodová metoda. [56]	42
Obr. 34 Princip rentgenové zkoušky. [57]	43
Obr. 35 Přímá metoda kalení při tváření.[6]	45
Obr. 36 Pevnolátkový laser IPG YLS – 2000.	47
Obr. 37 Svařovací zdroj Fronius Magic Wave 1700. [63]	48
Obr. 38 Robot IRB 2400 od firmy ABB.	49
Obr. 39 Konfigurace laserové hlavy a hořáku TIG spolu s plechovým vzorkem 22MnB5.	50
Obr. 40 Geometrie zkušební vzorku pro tahovou zkoušku.	51
Obr. 41 Vzorky před tahovou zkouškou.	52
Obr. 42 Trhací hydraulický stroj ZD400.....	53
Obr. 43 Vzorek uchycený v čelistech trhacího stroje.....	53
Obr. 44 Tahový diagram vzorku č. 1.	54

Obr. 45 Tahový diagram vzorku č. 2.	54
Obr. 46 Tahový diagram vzorku č. 3.	55
Obr. 47 Tahový diagram vzorku č. 4.	55
Obr. 48 Křehký lom zkušební vzorku č. 1 v oblasti svarového kovu.	56
Obr. 49 Křehký lom zkušební vzorku č. 2 v TOO.	57
Obr. 50 Pila Struers Secotom - 60.	57
Obr. 51 Přístroj CitoPress – 1.	58
Obr. 52 Přístroj Struers Tegramin – 20.	58
Obr. 53 Vzorek č. 1 – Laser	59
Obr. 54 Vzorek č. 2 – Laser + TIG (20 A).....	60
Obr. 55 Vzorek č. 3 – Laser + TIG (40 A).....	60
Obr. 56 Vzorek č. 4 – Laser + TIG (60 A).....	60
Obr. 57 vzorek č. 1 svařování dle tab. 12 – oblast SK 10x zvětšeno – bílé útvary podobné povlaku.	61
Obr. 58 vzorek č. 1 svařování dle tab. 12 – oblast SK 50x zvětšeno – bílé útvary podobné povlaku.	62
Obr. 59 vzorek č. 1 svařování dle tab. 12 – oblast svarového kovu – viditelné fáze delta feritu.	63
Obr. 60 vzorek č. 2 svařování dle tab. 12 – oblast svarového kovu – viditelné fáze delta feritu.	63
Obr. 61 vzorek č. 3 svařování dle tab. 12 - oblast částečné překrystalizace v TOO – viditelná precipitace nové fáze.	63
Obr. 62 vzorek č. 4 svařování dle tab. 12 - vyžíhaná oblast v TOO.	64
Obr. 63 Porovnání hrubozrnnosti TOO u zkušebních vzorků.	65
Obr. 64 Vtisky indentoru po zkoušce mikrotvrlosti dle Vickerse.	65
Obr. 65 Průběh mikrotvrlosti HV 0,1 u vzorku č. 1.	66
Obr. 66 Průběh mikrotvrlosti HV 0,1 u vzorku č. 2.	66
Obr. 67 Průběh mikrotvrlosti HV 0,1 u vzorku č. 3.	66
Obr. 68 Průběh mikrotvrlosti HV 0,1 u vzorku č. 4.	66

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení 22MnB5 dle materiálové normy.[1]	11
Tab. 2 Mechanické vlastnosti 22MnB5 před a po tepelném zpracování. [1].....	12
Tab. 3 Součinitele odrazivosti kovů. [15]	21
Tab. 4 Maximální množství prvků v oceli pro použití výpočtu uhlíkového ekvivalentu dle (2.1) [43].....	31
Tab. 5 Parametry ocelí pro výpočet vzorcem (2.2) [43]	31
Tab. 6 Maximální množství prvků v oceli pro použití výpočtu uhlíkového ekvivalentu dle (2.3) [45]	31
Tab. 7 Rozdělení zkoušek svarových spojů [49].....	36
Tab. 8 Chemické složení z atestu pro zvolený materiál 22MnB5.....	46
Tab. 9 Technické parametry YLS – 2000 [20].....	48
Tab. 10 Technické parametry Fronius Magic Wave 1700 [63]	48
Tab. 11 Technické parametry Robotu IRB 2400 [20].....	49
Tab. 12 Parametry pro svařování vzorků.	50
Tab. 13 Vnesené teplo při svařování.	51
Tab. 14 Hodnoty změřené při tahové zkoušce.	56
Tab. 15 Makrostruktura svarů.	59
Tab. 16 Výpočet nákladů technologie Laser – TIG. [66, 67, 65, 20].....	68
Tab. 17 Výpočet nákladů technologie Laser. [66, 67, 65, 20]	69

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Význam	Jednotka
A	Absorpce	[%]
A50	Tažnost A50	[%]
A80	Tažnost A80	[%]
C _e	Uhlíkový ekvivalent	[%]
CE	Uhlíkový ekvivalent dle Mezinárodním svářečským institutem (IIW)	[%]
CET	Uhlíkový ekvivalent pro vysokopevnostní a nízkolegované oceli	[%]
E	Modul pružnosti v tahu	MPa
F	Zatěžující síla	[N]
HV	Tvrdoost dle Vickerse	[-]
I	svařovací proud	[A]
L ₀	Délka zkušební oblasti pro vyhodnocení tažnosti před tahovou zkouškou	[mm]
L _e	Zatížení na mezi kluzu	[N]
L _m	Max. zatížení	[MPa]
L _u	Délka zkušební oblasti pro vyhodnocení tažnosti po tahové zkoušce	[mm]
P	výkon svařovacího zdroje	[W]
Q	Vnesené teplo	[kJ/mm]
Q _{HVB}	Vnesené teplo technologii hybridního svařování Laser-TIG	[kJ/mm]
Q _{LAS}	Vnesené teplo technologii laserového svařování	[kJ/mm]
Q _{TIG}	Vnesené teplo technologii obloukového svařování TIG	[kJ/mm]
R _e	Mez kluzu	[MPa]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
S	Plocha průřezu po přetržení	[mm ²]
S ₀	Plocha průřezu	[mm ²]
T	Teplota	[K]
T _p	Teplota předehřevu	[°C]
T _{subl}	Teplota sublimace	[K]
T _{tav}	Teplota tavení	[K]
U	Svařovací napětí zdroje	[V]
Z	Kontrakce	[%]
a ₀	Tloušťka vzorku	[mm]
b ₀	Šířka vzorku	[mm]
d ₁	Délka úhlopříčky č. 1	[mm]
d ₂	Délka úhlopříčky č. 2	[mm]
l	Měřená délka tyče po přetržení	[mm]
l ₀	Výchozí měřená délka tyče	[mm]
l _c	Délka celkové zkušební oblasti	[mm]
l _t	Délka vzorku	[mm]
s	Tloušťka plechu	[mm]
u	Střední uhlopříčka vtisku	[mm]

v	Rychlost svařování	[mm/min]
ε	Deformace	[%]
λ	Vlnová délka	[μm]
σ	Napětí	[MPa]

Zkratka	Význam
AC/DC	Alternating current/Direct current
ARA	Anizotermický rozklad austenitu
CTS	Controlled thermal severity
ČSN	Česká státní norma
DC	Direct current
EN	Evropská norma
GTAW	Gas tungsten arc welding
IIW	International institute of welding
ISO	International Organization for Standardization
Laser-TIG	Hybridní technologie laser-TIG
LED	Light emitting diode
MAG	Metal active gas
MIG	Metal inert gas
PHS	Press hardened steel
SK	Svarový kov
TIG	Tungsten inert gas
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
WIG	Wolfram inert gas
ZM	Základní materiál

SEZNAM PŘÍLOH

Atest oceli USIBOR – 22MnB5	Příloha č. 1
Hydraulický zkušební stroj ZD40.	Příloha č. 2
Snímky mikrostruktury jednotlivých vzorků	Příloha č. 3

ESB

European Steel Business Deutschland GmbH

Supplier of HR, CR, HDG coils, slitted coils and sheets

ESB - European Steel Business Deutschland GmbH - Lerchenfeldstr. 76 - 47877 Willich



Kovovýroba Hoffmann s.r.o.
Dedina 959
68722 Ostrozska Nova Ves
Czech Republic

Your Order (PO) No.:
162002

Auftrag-/ Lieferschein Nr.:
ESBD 1251901

Gedruckt auf
19/09/2016

CERTIFICATE OF ANALYSIS acc. DIN EN 10204/3.1

Description of material / Dimensions	Weight in kg.
Bleche, feuerverzinkt USIBOR1500P, AS150, uncoiled 2,10 x 1280 x 2000 mm	470

Chemical properties in %

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb	Cr	
0,223	0,249	1,145	0,006	0,002	0,048	0,028	0,005	0,179	0,000

Mechanical properties

Yield Point	Tensile Strength	Elongation	Sample direction	Parent trace Coil No
445 N/mm ²	605 N/mm ²	19 %	Q	1501/4238 C:21659011/P:227123

Trace	Coil No	Weight in kg.
1609/14049	C:21659011/P:22712325	470 KG

Page 1.

ESB Deutschland GmbH
Lerchenfeldstr. 76
D-47877 Willich
Tel.: +49(0)2156/49890-0
Fax: +49(0)2156/49890-69

ING Bank N.V. Frankfurt
BLZ: 50021000
Kto-Nr: 0010120293
IBAN: DE03 5002 1000 0010 1202 93
BIC: INGBDEFFXXX

Volksbank Krefeld eG
BLZ: 32060362
Kto-Nr: 1042 6090 10
IBAN: DE84 3206 0362 1042 6090 10
BIC: GENODED1HTK

USt Id-Nr. DE 26735198 7
Register: HRB 13691
Amtsgericht Krefeld
Geschäftsführer: Drs Alfred Smit
www.esb-group.com

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

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

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

Technické parametry:

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

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



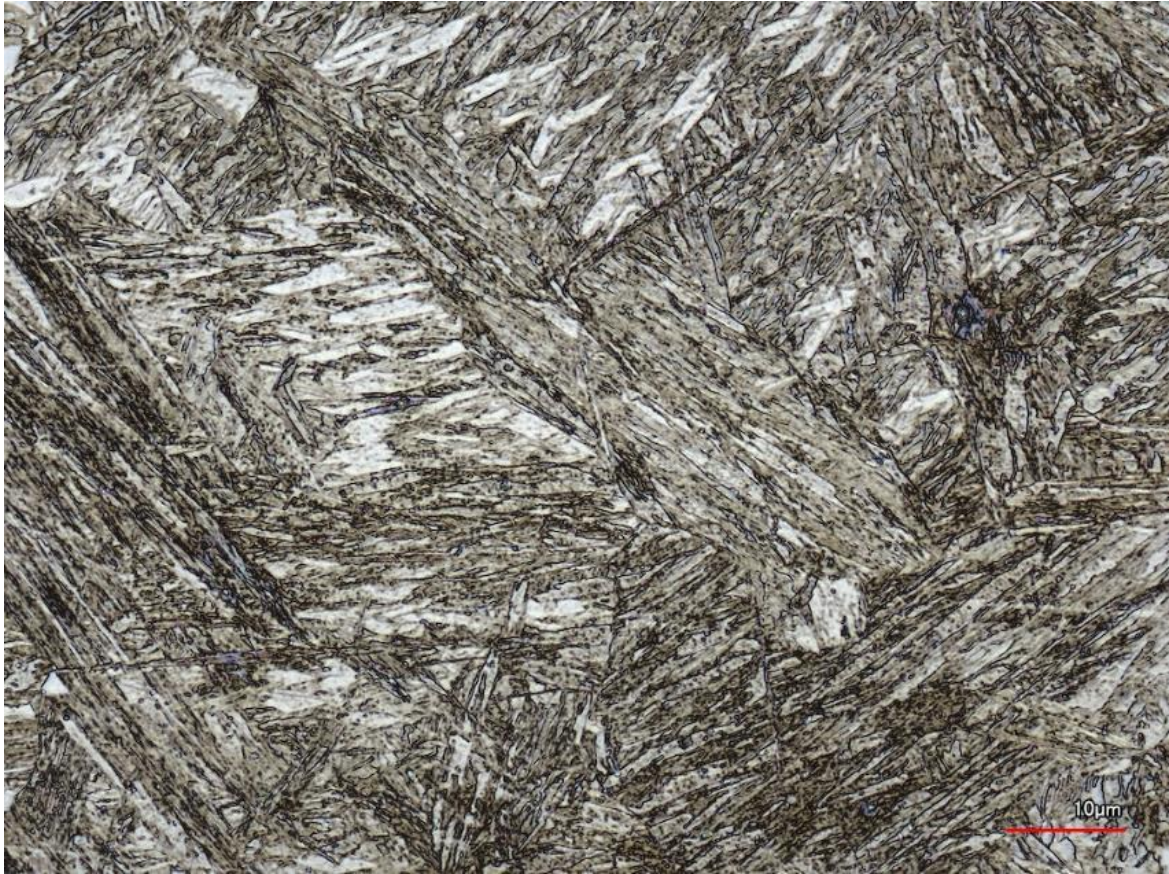
Řídicí jednotka EDC 60



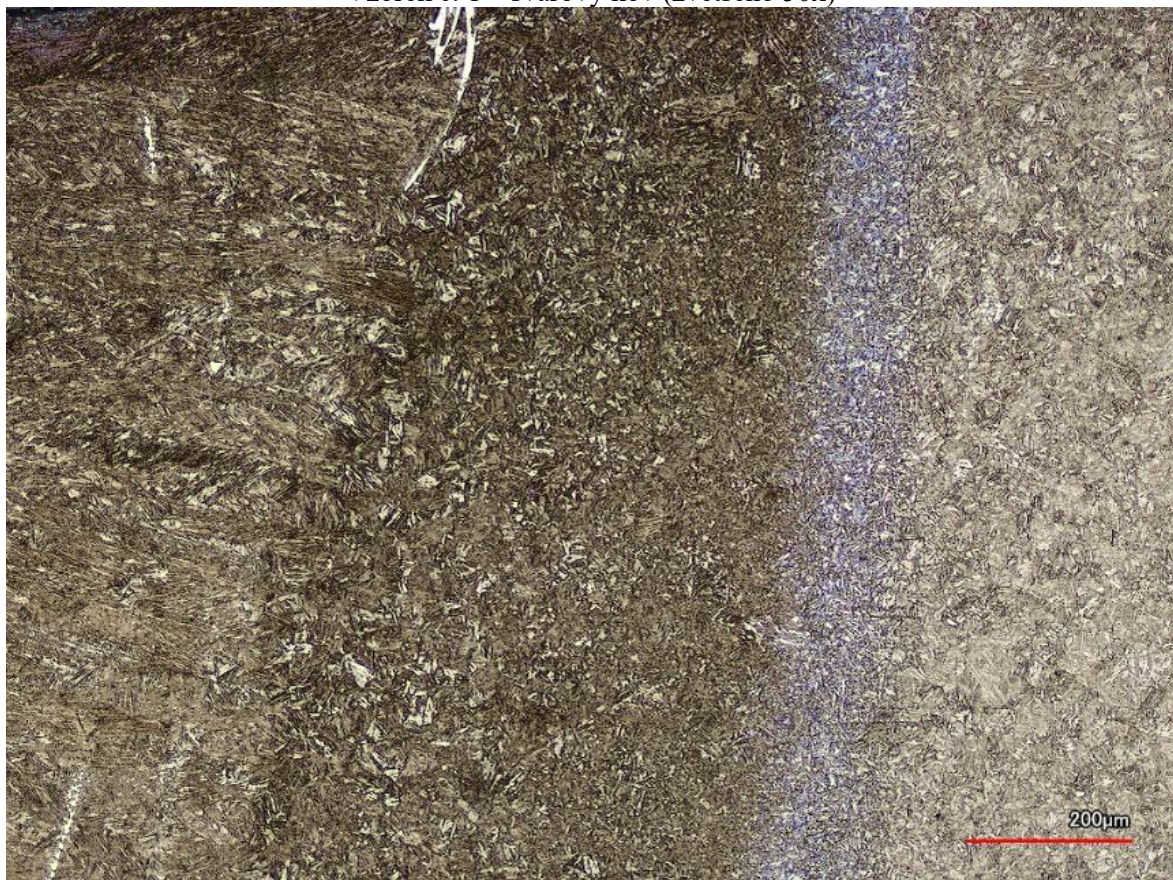
Vzorek č. 1 – základní materiál (zvětšeno 150x)



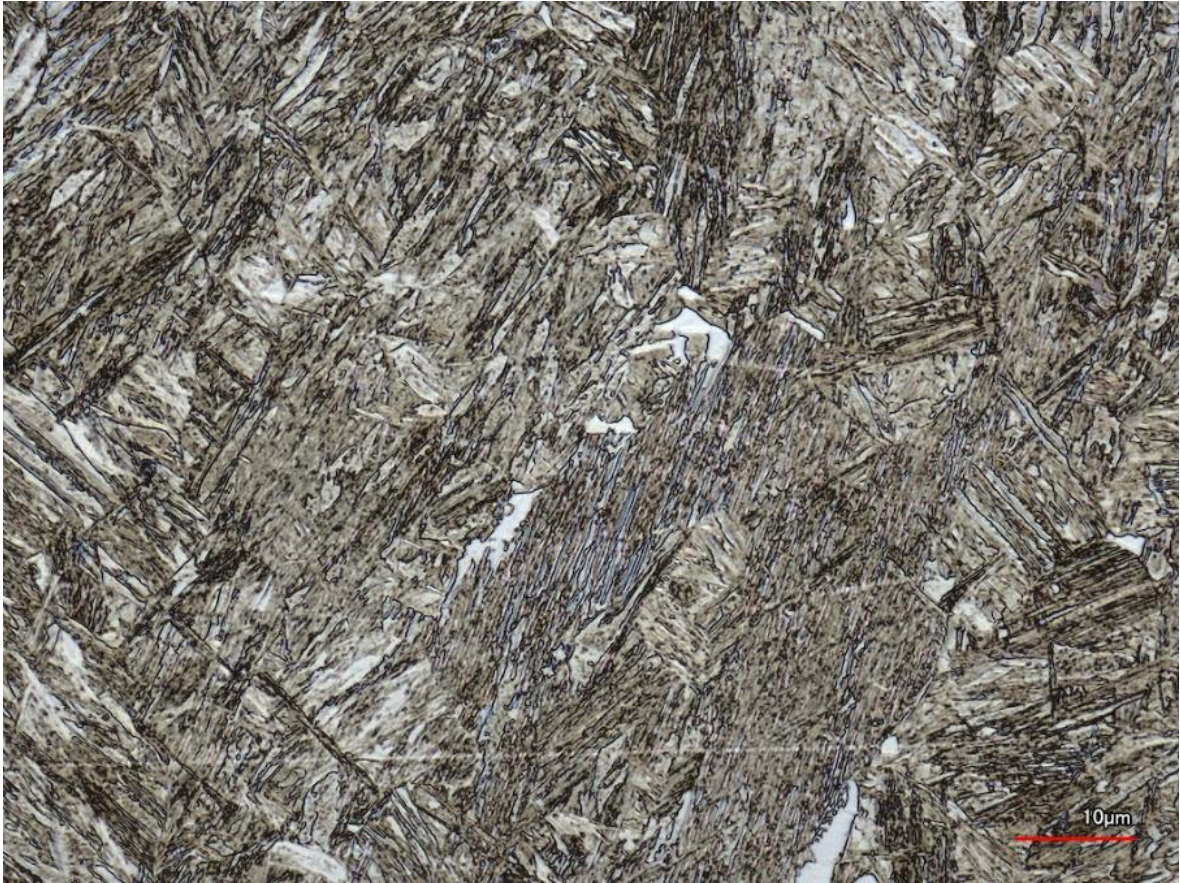
Povlak Al-Si (zvětšeno 50x)



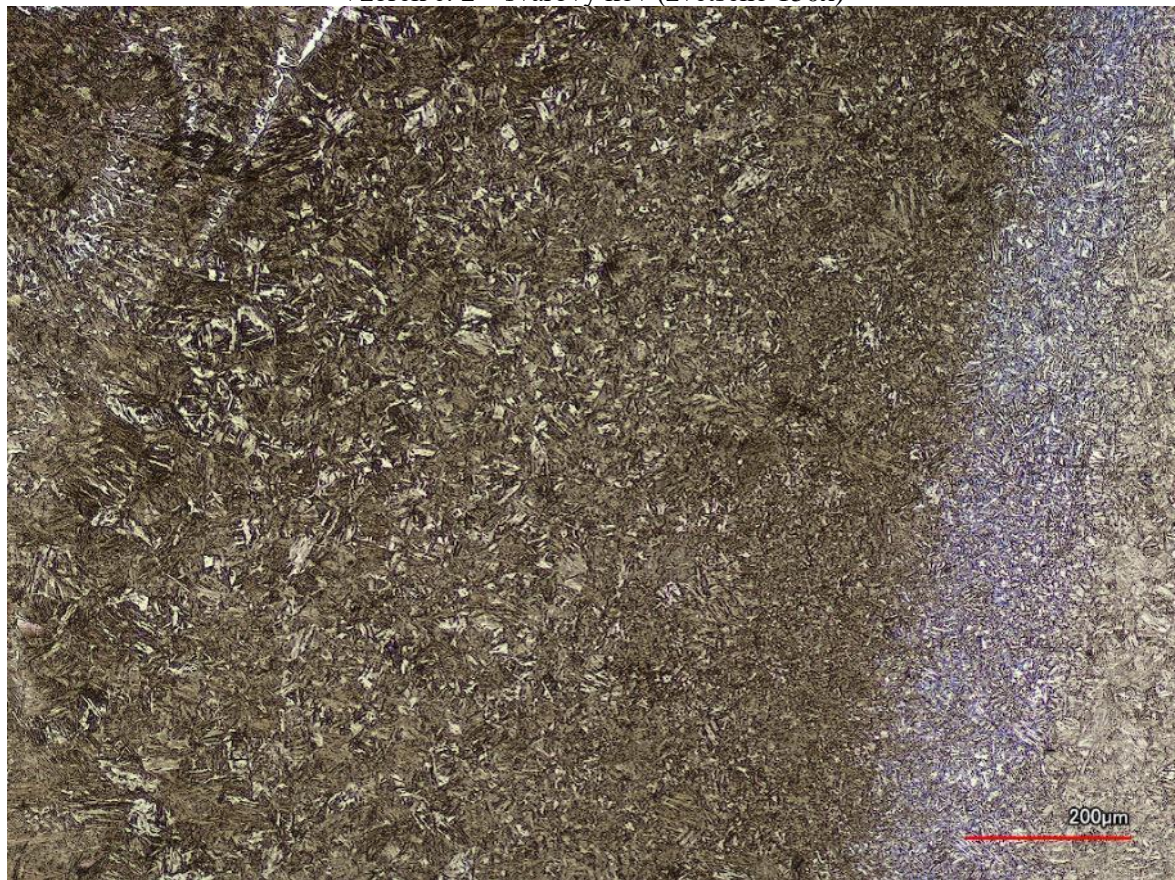
Vzorek č. 1 – svarový kov (zvětšeno 50x)



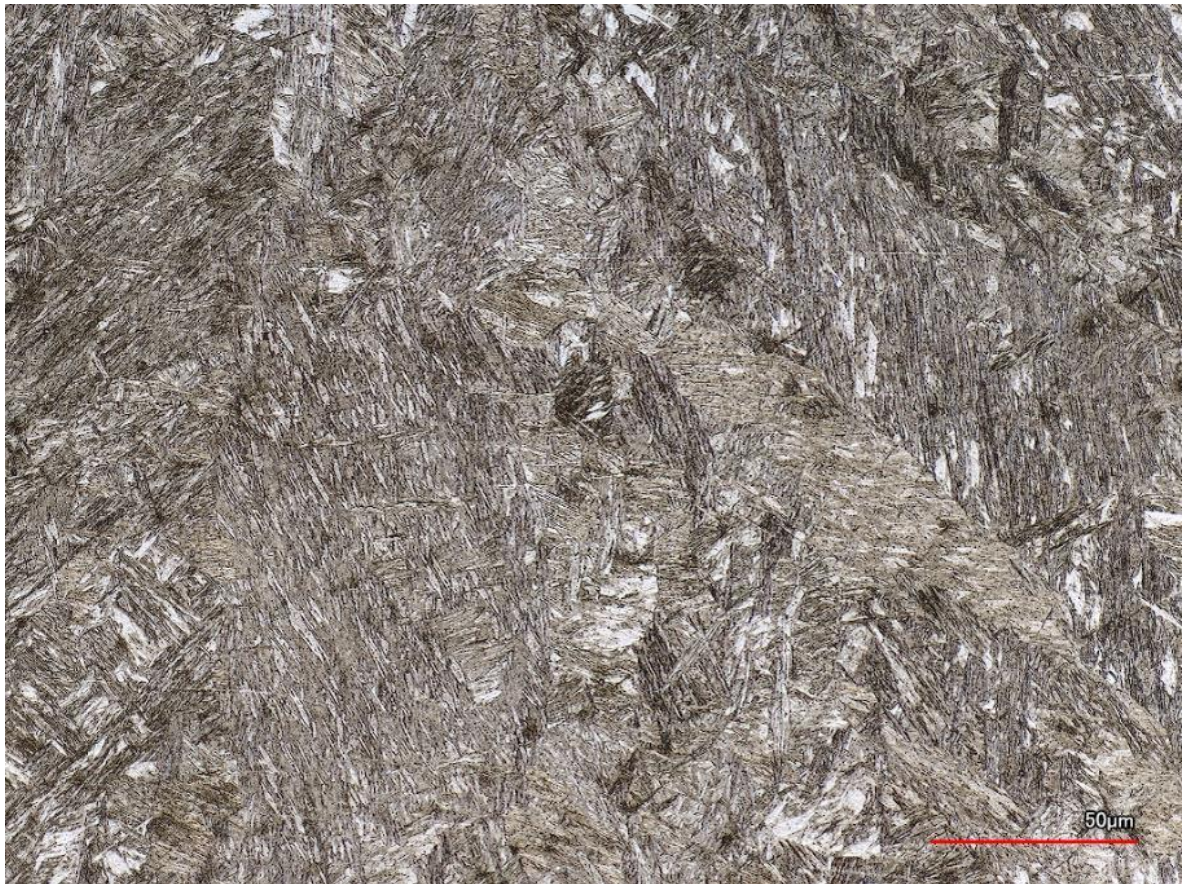
Vzorek č. 1 – TOO (zvětšeno 10x)



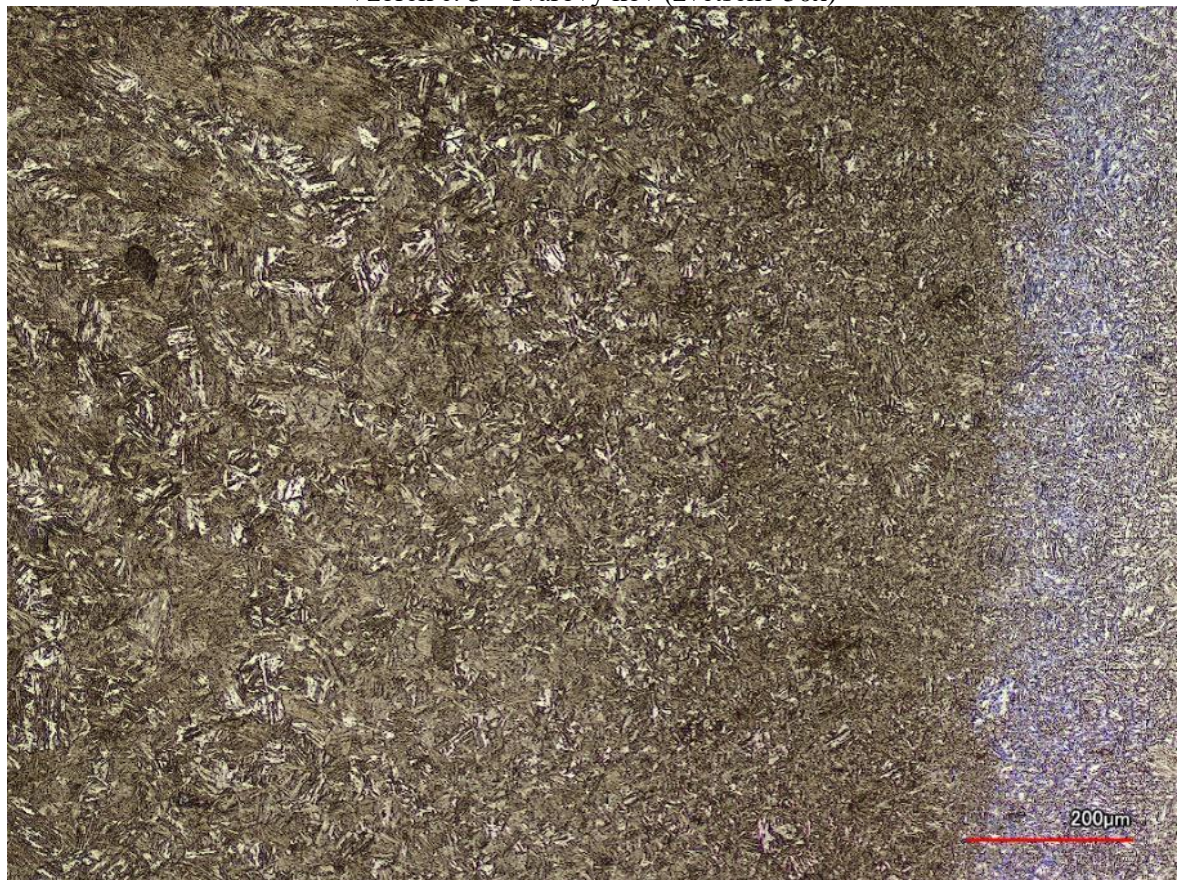
Vzorek č. 2 – svarový kov (zvětšeno 150x)



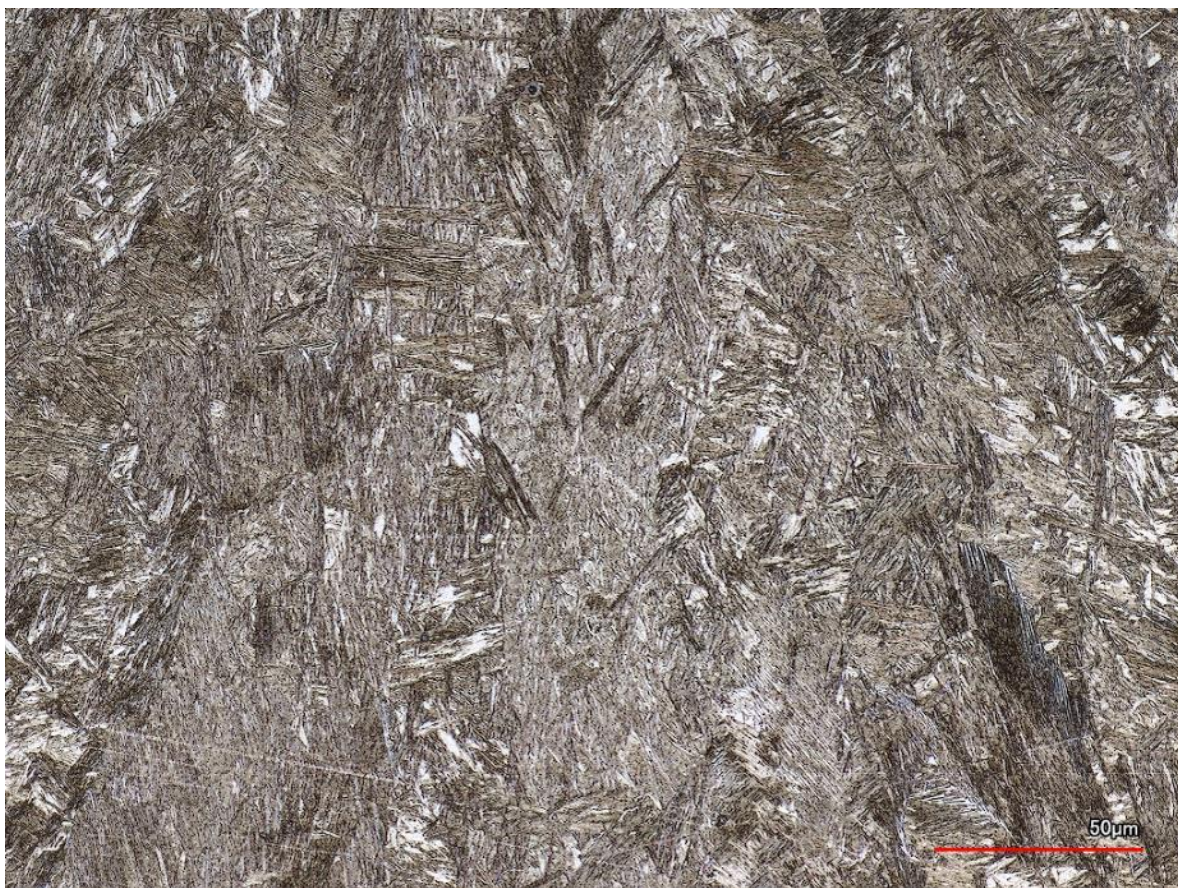
Vzorek č. 2 – TOO (zvětšeno 10x)



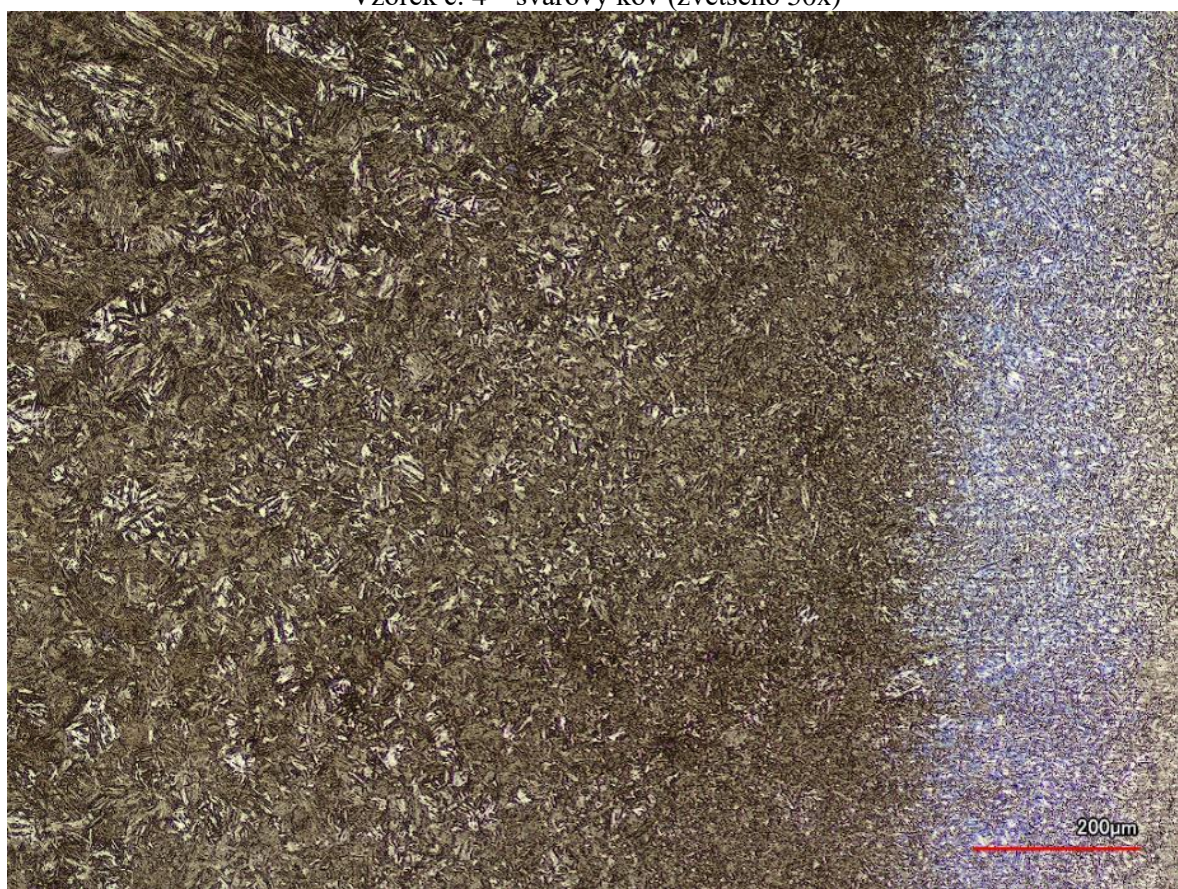
Vzorek č. 3 – svarový kov (zvětšeno 50x)



Vzorek č. 3 – TOO (zvětšeno 10x)



Vzorek č. 4 – svarový kov (zvětšeno 50x)



Vzorek č. 4 – TOO (zvětšeno 10x)