



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**STUDIUM VLASTNOSTÍ LASEROVÝCH SVARŮ
MATERIÁLU HARDOX 450 PŘI VYUŽITÍ
OBLOUKOVÉHO PŘEDEHŘEVU**

STUDY OF PROPERTIES OF LASER WELDS OF HARDOX 450 MATERIAL USING ARC PREHEATING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Debs

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Martin Debs**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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

Studium vlastností laserových svarů materiálu Hardox 450 při využití obloukového přehřevu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést analýzu vlivu obloukového přehřevu při laserovém svařování otěruvzdorné Hardox 450. Vzniklé tupé svary testovat z hlediska mechanických vlastností, svarových vad. Provést technicko-ekonomické zhodnocení této technologie.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii laserového svařování.

Osvojit si problematiku svařování ocelí s vyšším uhlíkovým ekvivalentem, včetně možných technik přehřevu.

Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu.

Osvojit si základy metalografického vyhodnocování svaru.

Osvojit si metody mechanických zkoušek svarového spoje.

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 0-471-24679-4.

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

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

.....
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

DEBS Martin: Studium vlastností laserových svarů materiálu Hardox 450 při využití obloukového předehřevu

V této diplomové práci je zkoumán vliv využití obloukového předehřevu metodou TIG při laserovém svařování 2 mm plechů materiálu Hardox 450. Jedná se o materiál, který svými dobrými mechanickými vlastnostmi dosahuje tepelným zpracováním, což při svařování způsobuje jeho tepelnou degradaci. V experimentu byly svařeny plechy s různým nastavením parametrů a pozic TIG hořáku. Z vyhotovených vzorků byly vytvořeny zkušební tělesa pro tahovou zkoušku, zkoušku tvrdosti podle Vickerse a pro metalografické zkoušky makrostruktury a mikrostruktury. Výsledkem použití dalšího zdroje tepla je rozšiřující se tepelně ovlivněná zóna, vyhlazují se přechody mezi jejími pásmy, snižuje se v ní pevnost a tvrdost, zjemňuje se struktura a začínají se vyskytovat feritické struktury ve svarovém kovu. Hybridní technologie kombinující laser s obloukovou metodou TIG je velmi produktivním způsobem svařování vytvářející kvalitní svarová spojení. Pro srovnání je v práci porovnána s konvenční metodou MAG.

Klíčová slova: Hardox 450, laserové svařování, obloukové svařování, TIG, předehřev

ABSTRACT

DEBS Martin: Study of properties of laser welds of Hardox 450 material using arc preheating

In this thesis is studied the influence of arc TIG preheating during laser welding of 2 mm Hardox 450 material sheets. This material achieves its good mechanical properties by processes of heat treatment. That causes problems during welding because of heat degradation. Experimental sheets were welded within various configurations of welding parameters and positions of TIG nozzle. Testing specimens were cut out by laser and were used for tension testing, Vickers hardness testing and metallographical testing (macro and microstructure). The results of using the second heat source are: wider heat affected zone, smoother transitions among its zones, reduction of toughness and hardness, finer grain structure and occurring ferritic microstructure. This hybrid technology, combination of laser welding and TIG preheating, is very productive creating joints with greatly good quality. The thesis also contains a comparison with common MAG welding method.

Key words: Hardox 450, laser welding, arc welding, TIG, preheating

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DEBS, Martin. Studium vlastností laserových svarů materiálu Hardox 450 při využití obloukového přehřevu. Brno, 2018. 76 s, 6 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou prací na téma Studium vlastností laserových svarů materiálu Hardox 450 při využití obloukového předehřevu vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s využitím uvedené odborné literatury a pramenů.

Místo a datum

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především mému vedoucímu diplomové práce doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, PhD. za vedení mé práce a také Ing. Jaroslavu Kubíčkoví a Ing. Mgr. Haně Šebestové, Ph.D. za odborné konzultace a rady. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům Ústavu přístrojové techniky a Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně za pomoc při zkouškách a experimentech. A nakonec určitě mé rodině a nejbližším, kteří mi byli po celou dobu studia oporou.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

ÚVOD	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ	11
1.1 Varianty řešení	11
2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ	13
2.1 LASER	13
2.1.1 Konstrukce laseru.....	14
2.1.2 Dělení laserů.....	15
2.2 Interakce laseru s povrchem materiálu	22
2.3 Aplikace laseru	22
2.3.1 Svařování laserem.....	23
2.3.2 Konstrukce laserové svařovací hlavy.....	25
2.4 Svařování metodou TIG	26
2.5 Svařování metodou MAG	27
2.6 Hardox 450	29
2.7 Svařitelnost ocelí	31
2.7.1 Uhlíkový ekvivalent.....	32
2.7.2 Výpočet teploty předehřevu.....	33
2.7.3 Způsoby předehřevu.....	36
2.7.4 Snímání teploty.....	39
2.8 Vady svarů	40
2.9 Zkoušky svarových spojů, materiálu a procesu svařování	41
2.9.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	41
2.9.2 Tahová zkouška.....	43
2.9.3 Metalografické zkoušky.....	45
2.9.4 Schlierová metoda zviditelnění proudění plynu.....	46

3	EXPERIMENT	47
3.1	Použitá zařízení.....	47
3.2	Materiál a volba procesních parametrů.....	49
3.3	Příprava vzorků.....	53
3.4	Proudění ochranného plynu při použití Schlierové metody.....	55
3.5	Metalografie.....	57
3.5.1	Makrostruktura.....	59
3.5.2	Mikrostruktura.....	62
3.6	Tahová zkouška.....	65
3.7	Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	72
4	TECHNICKO–EKONOMICKÉ HODNOCENÍ	75
5	ZÁVĚRY	76

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a značek

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

ÚVOD [2], [3], [4], [5], [6]

Práce vznikla v rámci projektu TAČR Gama, který se snaží o komercializaci a efektivní uplatňování aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje v praxi. Takto je možné řešit i neustále rostoucí požadavky na zvyšování produktivity při reálné výrobě. Řešení je velice komplexní a zahrnuje mimo jiné i výrobu stále složitějších součástí při zachování kvalitativních vlastností výrobků. Další oblastí možného vývoje je slučování a vývoj nových technologických postupů z důvodu snižování celkových nákladů a dále také zavádění nově vyvinutých materiálů do průmyslové výroby. Konvenční technologie a materiály už často nemohou v tomto směru poskytnout výraznější zlepšení, a proto se v určitých aplikacích uchyluje k rozsáhlé automatizaci procesů při použití nových a modernějších řešení. Příklady jsou v celém strojírenském průmyslu zahrnující oblasti obrábění, tváření, povrchových úprav a svařování.

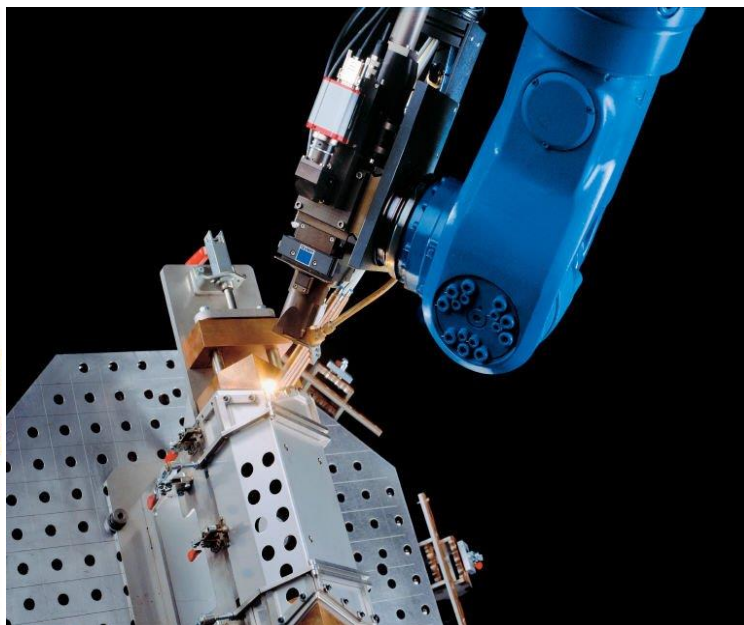
V posledním jmenovaném odvětví se poslední dobou rozšiřují nekonvenční metody svařování, jako jsou například svařování elektronovým paprskem, třecí svařování FSW, laserové a plasmové svařování. Případně se používají hybridní kombinace dvou svařovacích metod, využívající jejich dílčích výhod.

Jejich masovějšímu užívání je zamezeno z důvodů nedůvěry zákazníků v průmyslové sféře. Dále tomu tak je i kvůli stále probíhajícímu vývoji a především z důvodu vysokých investičních nákladů. Zmíněná vysoká investiční náročnost, způsobená jejich nízkým odbytem, bude postupným zaváděním těchto technologií do výroby snižována. Navíc bude tento jev ještě více podpořen a urychlen s nastupující iniciativou nazývanou Průmysl 4.0.

Úkolem výzkumu tak zůstává vyvíjet a inovovat výrobní způsoby tak, aby výhody plynoucí z jejich aplikace byly průkazné a přesvědčivé pro potenciální uživatele.



Obr. 1 Svařování MAG [5]



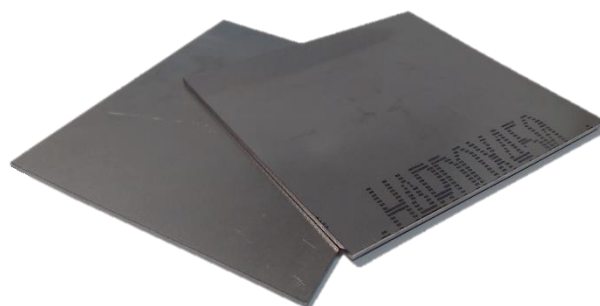
Obr. 2 Svařování laserem [6]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [3], [7], [8], [9]

Svařování má být podroben materiál Hardox 450 využívaný v náročném abrazivním prostředí těžebního a těžkého zpracovatelského průmyslu. Jeho výborných mechanických vlastností je dosahováno především díky zušlechťovacím postupům tepelného zpracování. Z tohoto důvodu je volba svařovací technologie a parametrů procesu velmi důležitým a klíčovým tématem pro tvorbu kvalitních svarových spojů, u kterých je minimalizována teplotní degradace zmíněných vlastností.

Běžně se v dnešní době používají konvenční a dostupné metody, jako jsou například metody MIG/MAG a TIG, které jsou schopny vytvořit kvalitní svarový spoj u tohoto dobře svařitelného materiálu, a to v ručním nebo automatizovaném režimu provozu. To je však podmíněno dodržением správných svařovacích postupů, které doporučuje výrobce a přesně specifikuje svařecí personál. Hlavní problematikou je umístění svarů v rámci celé konstrukce, volba jejich typu a geometrie, určení teplot předehřevů, teplot interpass a dalších vstupních parametrů celý proces ovlivňujících. Například pro určení předehřevu je zásadní především chemické složení svařovaného materiálu, jeho tloušťka a tepelný příkon použitého svařovacího zdroje.

V experimentální části této práce bude popsáno a vyhodnoceno svařování plechů materiálu Hardox 450 o tloušťce 2 mm a rozměrech 130 x 150 mm (Obr. 3). Chemické složení a další informace k materiálu jsou v příloze č. 5. Pro svařování je podle zadání vybrána laserová technologie s využitím přídavného tepla dodaného pomocí obloukové metody TIG a pro určení vhodných parametrů bude vyzkoušeno více variant nastavení svařovacích parametrů a poloh TIG hořáku. Vhodnost této kombinace (hybridní technologie) bude rozebrána v následující kapitole.



Obr. 3 Vzorky z plechu Hardox 450

V první části této práce bude vytvořen teoretický základ celé problematiky a v druhé části bude následovat samotný experiment. V něm bude vyhodnocována makrostruktura a mikrostruktura z vytvořených metalografických výbrusů. Dále budou vzorky podrobeny mechanickým zkouškám pro určení pevnostních a deformačních charakteristik a na základě jejich výsledků a poznatků z experimentu bude vyvozen vliv zmíněné technologie a její parametrů na kvalitu svarových spojů. Na závěr celé analýzy bude provedeno technicko-ekonomické zhodnocení, porovnávající finanční nákladnost u různých zkoušených variant.

1.1 Varianty řešení [3], [7], [10], [11], [12], [13], [14], [15]

Pro spojení zmíněného materiálu je možné použít větší množství současně používaných technologií a jejich různých kombinací. Jednotlivé metody tavného svařování a způsobů předehřevu mají své přednosti a jisté nevýhody plynoucí z jejich aplikace. Vhodnost je posuzována pro konkrétní materiál Hardox 450 s ohledem na kvalitu a rychlost tvorby svarového spojení, což přímo ovlivňuje ekonomiku provozu a spolehlivost vyrobených produktů. Zvažovanými jsou tyto technologie:

a) Pro svařování:

- ROE – svařováním pomocí ruční obalované elektrody je v průmyslu nahrazováno jinými modernějšími metodami. Při použití této jednoduché a investičně nenáročné

technologie se nepoužívá automatizace a je málo produktivní v důsledku časté výměny elektrod a následného odstraňování vzniklé strusky. Celkově není vhodnou metodou pro tento materiál i v důsledku vysokého vnášeného tepla.

- MIG/MAG – je běžně používanou a produktivní technologií často využívající automatizace. V případě experimentálního materiálu by byla použita varianta s aktivním ochranným plynem.
- TIG – tato technologie je schopna vytvářet kvalitativně vhodné svary, avšak při nepříliš výrazné rychlosti svařování. Využívána je především v ručním režimu provozu, případně i automatizovaně. Použití je zde možné například pro stehování před vlastním svařovacím procesem nebo jako možný způsob předehřevu.
- LASER – jedná se o moderní, automatizovaný a vysoce produktivní způsob svařování, který díky intenzivnímu energetickému paprsku vnáší do svařovaného materiálu malé množství tepla a vytváří kvalitní a štíhlé svarové spoje.
- Plasma – jde o technologii s mírně nižší hustotou výkonu ve srovnání s laserem, avšak výsledné svary by si byly jejich geometriemi velmi podobné. Ekonomika provozu by v porovnání s laserem byla u plasmy výhodnější.

b) Předehřev

- Indukční ohřev – ohřev elektrickou indukcí
- Odporový ohřev – zahřívání keramických tvarovek v důsledku elektrického odporu
- Ohřev plamenem – teplo vzniklé exotermickou chemickou reakcí
- Ohřev obloukovou metodou TIG nebo MIG/MAG – díky intenzivnímu ohřevu elektrickým obloukem je možné jeho přímé umístění před nebo za vlastní svařovací proces (například laser nebo plasmu). Hlavní předností oproti třem předchozím metodám ohřevu je rychlost, flexibilita a možnost omezení jednoho úkonu v technologickém postupu. S tím jsou dále spojeny výhody ohledně vynechání manipulace s ohřátými dílci a v konečném důsledku i nižší ekonomická zátěž.

Nejvhodnější metodou svařování pro materiál Hardox 450 je vzhledem k nízkému vnesenému teplu a vysoké rychlosti svařování možná laserová nebo plazmová technologie. Volba laserového svařování, umožněného na Ústavu přístrojové techniky v Brně je odůvodněná. Tato metoda způsobí výraznou degradaci mechanických vlastností pouze v úzké oblasti kolem svaru, avšak z důvodu tohoto velmi nízkého tepelného příkonu je nutné použití předehřevu či dohřevu pro omezení křehkosti a praskavosti svarového spojení. V případě takto choulostivého materiálu je výběr způsobu ohřevu omezen na aplikaci obloukové metody, protože ostatní ohřevy nejsou schopny tak výrazné fokusace tepla do požadovaného místa. Volba metody TIG je vůči metodě MAG vhodnější, protože je možné svařování bez přídavného materiálu. Výhody pak představuje omezení jednoho technologického úkonu, automatizace a snadnější manipulace se svařovaným materiálem.

Jako ideální kombinace se tedy nabízí spolupráce laserového svařování s využitím obloukového předehřevu či dohřevu metodou TIG. Tato zařízení budou součinně pracovat v automatickém režimu v jednom kroku technologického postupu. Budou umístěny na rameni průmyslového robota, čímž bude zajištěna reprodukovatelná kvalita a rychlost svařování.

Pro porovnání budou stejné vzorky svařeny běžně používanou metodou MAG a dále budou podrobeny stejnému zkoumání a hodnocení jako v případě svarů vzniklých uvedenou hybridní technologií.

2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ [1], [12], [16], [17], [18]

Spojování materiálů pomocí svařování je procesem vytvářející nerozebíratelné spojení bez využití spojovacích prvků, které vyžadují tvorbu otvorů ve spojovaných dílech. U svařování, pájení nebo lepení je vytvořené spojení výsledkem vzniklých chemických meziatomárních vazeb vytvořených na základě interakce dvou atomů, přesněji jejich valenčních elektronů.

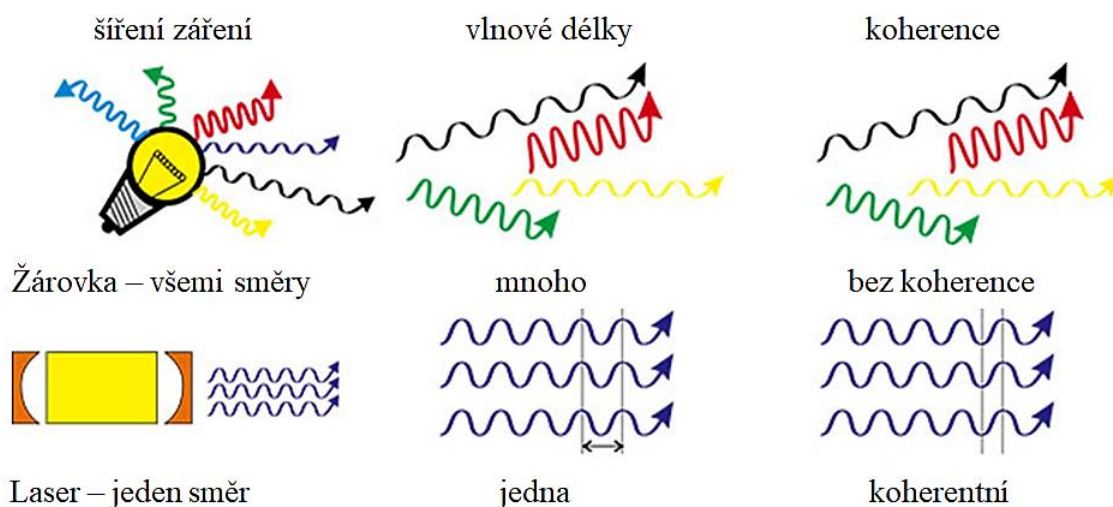
Technologie svařování, jako jedna z hlavních strojírenských technologií, se dělí na svařování tlakové a tavné. Již zmíněné metalurgické spojení dvou či více součástí je možné při dodání aktivační energie formou zvýšené teploty nebo tlaku, případně jejich spolupůsobením. Velké množství svařovacích technologií umožňuje spojovat široké spektrum materiálů a jejich kombinací s využitím přídavných materiálů nebo bez nich. Ty jsou jejich vlastnostmi a chemickým složením co nejvíce podobné materiálům svařovaným.

Mezi tlakové způsoby se řadí svařování třením, tlakem za studena, případně ultrazvukové svařování a další. U těchto metod dochází k aktivaci povrchů pomocí vysokého tlaku v místě styku dvou dílců. Druhou obecně používanější skupinu tvoří tavné technologie, jako jsou například: ruční obalová elektroda, metody MIG/MAG a TIG, svařování plamenem, plasmou, elektronovým paprskem, laserem a dalšími způsoby. Zde spojení nastává především natavením spojovaných povrchů za vzniku svarové lázně, která následně tuhne v jeden celek. Výsledný kvalitní svar je schopný přenášet velká zatížení, a to ze svařování dělá jeden z hlavních způsobů spojování materiálů dnešní doby.

2.1 LASER [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25]

Slovo LASER vzniklo jako akronym anglického názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, v českém překladu znamenající „Zesilování světla pomocí stimulované emise záření“. Název laser se používá pro označení zdroje produkující (Obr. 4):

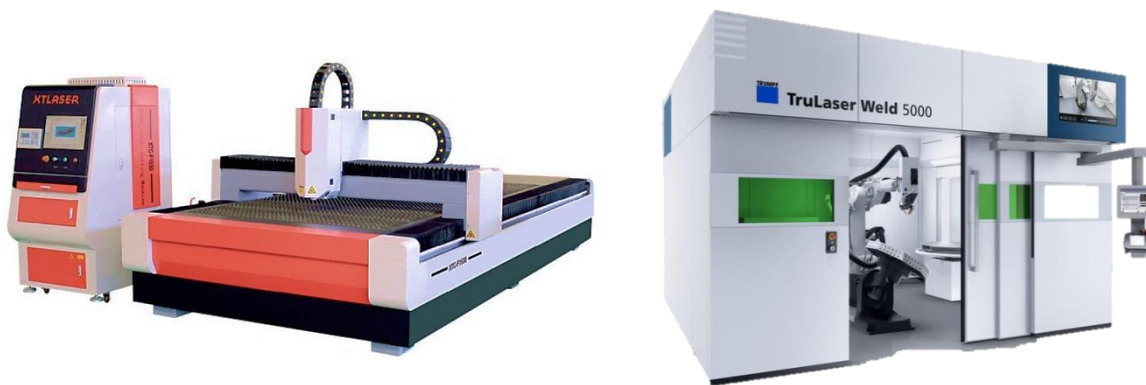
- Koherentní (uspořádané) světelné záření synchronizované a sfázované do jedné vlny
- Monochromatické světlo jedné barvy (jedné vlnové délky)
- Záření, které se šíří ve svazku malého průměru
- Paprsek možný fokusovat do velmi mále plochy (ideálně do jednoho bodu)



Obr. 4 Rozdíl mezi laserovým a klasickým zdrojem záření [21]

Tento zdroj specifického elektromagnetického záření principiálně popsal Albert Einstein již v roce 1916. Jedná se v podstatě o jakýsi typ transformátoru energie o nižší kvalitě na energii kvalitativně vyšší. Jeho vývoji předcházela MASER pracující s mikrovlnným zářením namísto záření světelného. Roku 1960 byl s pomocí poznatků z kvantové mechaniky zkonstruován první LASER, a tím započal velký vývoj této nové vědní disciplíny použitelné v širokém spektru možných aplikací. V dnešní době je mnoho výrobců průmyslových laserových zařízení, například: Trumpf, Bystronic, Fanuc, Mazak nebo Rofin-Sinar (Obr. 5).

Princip fungování tohoto zařízení spočívá na základě spontánní (samovolné) a stimulované (vynucené) emise fotonů v aktivním prostředí laseru. Látky tohoto prostředí mohou mít různé množství a různou stabilitu jednotlivých energetických hladin a při energetických přesunech mezi nimi je vyzařována určitá energie ve formě usměrněného proudu fotonů neboli laserového paprsku. Celý fyzikálně složitý princip je dobře popsán v literatuře Laserové technologie [19].



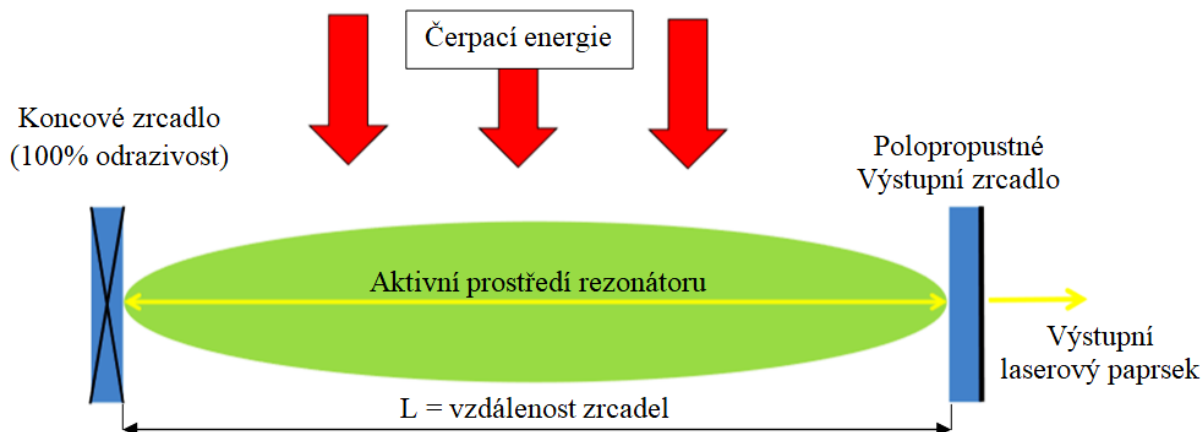
a) řezací laser Bystronic b) svařovací laser TRUMPF

Obr. 5 Aplikace průmyslových laserů [23, 24]

2.1.1 Konstrukce laseru [11], [19], [22], [26]

Zařízení umožňuje přeměňovat dodanou energii čerpání na usměrněnou energii ve formě kvalitního laserového paprsku. Celý proces je nastartován různými druhy buzení v závislosti na typu aktivního prostředí (plynné, kapalné, pevnolátkové). Buzení bývá nejčastěji založeno na elektrickém výboji, případně na optickém čerpání a ojedinelé i na chemické nebo tepelné reakci. Energie získávaná v optickém rezonátoru je ve formě stojaté vlny postupně zesilována mezi dvěma rovnoběžnými zrcadly o vzájemné vzdálenosti L . Opakovaným průchodem vyzařovaných fotonů přes aktivní prostředí a jejich interakcí s dalšími nabuzenými atomy se počet těchto fotonů (energie) navyšuje. Postupně je určitá naakumulovaná kritická energie záření propouštěna přes polopropustné zrcadlo s $80 \div 90\%$ propustností. Základní schematické zobrazení konstrukce je na (Obr. 6).

Výstupní paprsek má formu vysokoenergetického pulzu ($1 \div 200$ J/pulz) a frekvence těchto pulzů se pohybuje od 1 do 500Hz. Případně je možnost kontinuálního režimu provozu, například u plynových CO_2 laserů nebo některých pevnolátkových Nd:YAG laserů.



Obr. 6 Funkční schéma konstrukce rovinného rezonátoru laseru [26]

2.1.2 Dělení laserů [11], [13], [19], [20], [22], [25], [27], [28], [29], [30]

Konstrukčně lze rezonátory laserů dělit na rovinné s paralelními zrcadly, konfokální, polokoncentrické nebo prstencové. Případně je lze řetězit za sebe do různých konstrukčních uspořádání. Avšak dělení průmyslových laserů je možné z dalších hledisek, kde každá aplikace vyžaduje odlišné specifické vlastnosti. Hlavním charakterizujícím kritériem je rozdělení podle skupenství aktivního prostředí, avšak jsou i jiné možnosti:

Tab. 1 Způsoby dělení laserů [19]

Dělení podle typu aktivního prostředí	Dělení podle typu čerpání
<ul style="list-style-type: none"> plynové pevnolátkové kapalinové 	<ul style="list-style-type: none"> elektrickým výbojem opticky chemickou reakcí tepelnou reakcí
Dělení podle typu konstrukce	Dělení podle vyzářované vlnové délky
<ul style="list-style-type: none"> tyčové polovodičové diskové vláknové 	<ul style="list-style-type: none"> infračervené v oblasti viditelného světla ultrafialové (excimery) rentgenové
Dělení podle režimu provozu	Dělení podle oblasti použití
<ul style="list-style-type: none"> kontinuální pulzní 	<ul style="list-style-type: none"> průmyslové metrologické lékařské vojenské pro spotřebitelský průmysl

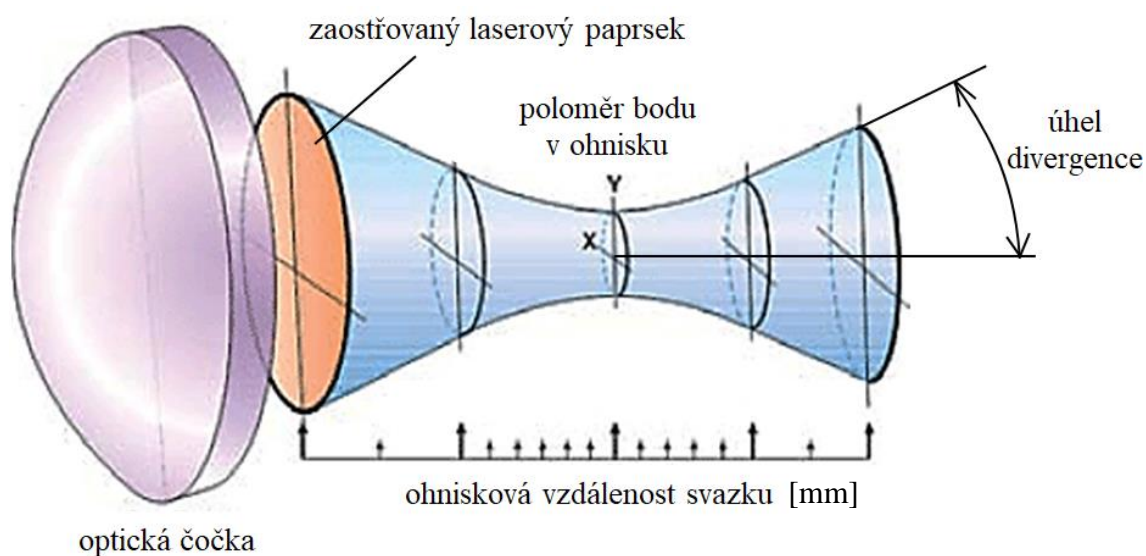
a) Aktivní prostředí v plynném skupenství

Pro tento typ laseru je charakteristické aktivní prostředí tvořené plynem nebo směsí různých plynů, plnící různé funkce v procesu stimulované emise. Mohou pracovat jak v kontinuálním tak v pulzním režimu v širokém výkonovém spektru (mW až desítky kW). Postupně jsou však tyto typy laserů z průmyslu vytlačovány lasery pevnolátkovými.

• Příklad – CO₂ laser

Jedná se o nejdéle používaný a jeden z nejčastějších typických typů laserů v průmyslu. Využívá stimulovanou emisi plynu CO₂ ve směsi s He a N₂ nejčastěji s buzením pomocí elektrického doutnavého výboje. Pro nastartování celého procesu je nutné nejprve excitovat molekuly dusíku, což dále iniciuje excitaci oxidu uhličitého. Helium je použito z důvodu odebrání zbytkové excitační energie z atomů CO₂ a dále k příčnému nebo podélnému chlazení celého systému za pomoci cirkulačního okruhu s oběhovou turbínou a chladičem. Konstrukčně se z důvodu několikametrové délky aktivního prostředí používá pomocných zrcadel, které zalamují optickou osu rezonátoru, a tím zlepšují kompaktnost celého zařízení. Hlavní údaje specifikující tento laser jsou:

- Homogenní aktivní prostředí: He + N₂ + CO₂ běžně v poměrech 82 : 13,5 : 4,5
- čerpání elektrickým výbojem
- pracovní vlnová délka $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ (infračervené záření)
- kontinuální nebo pulzní režim
- výkon běžně do 20 kW (max. 200 kW), u SLAB laseru do 3 kW
- účinnost $\eta = 10 \div 20 \%$ (tepelné ztráty)
- použití podle výkonů: od méně výkonných vhodných pro gravírování, značení a řezání nekovových materiálů až po výkonnější pro svařování a řezání kovů
- vysoké BPP, Beam Parameter Product je parametrem značícím určitou schopnost fokusace laserového paprsku a je udáván v jednotkách [mm·rad]. Vysvětlující schéma je na obrázku 7. Čím vyšší je jeho hodnota, tím vyšší je divergence výstupního paprsku a nutnost přesnějšího nastavení optiky. Tato vlastnost je charakterizující vlastností typu laseru.



Obr. 7 Geometrie fokusovaného svazku, Beam parametr product [27, 28]

Vlivem velké vlnové délky (10,6 μm), velmi odlišné od viditelného světla (0,4 \div 0,7 μm), je pro přenos paprsku nutné použít speciální optiky (nelze použít optických vláken). Pro refrakční optiku se používá soustava zrcadel z materiálů na bázi ZnSe, Ge, GaAs a pro reflexní optiku Si/Cu s Au. Tyto méně obvyklé materiály zvyšují částečně cenu celého zařízení. Vlnová délka působí problémy i v oblasti fokusace, kde není fyzikálně možné zaostření pod její hodnotu.

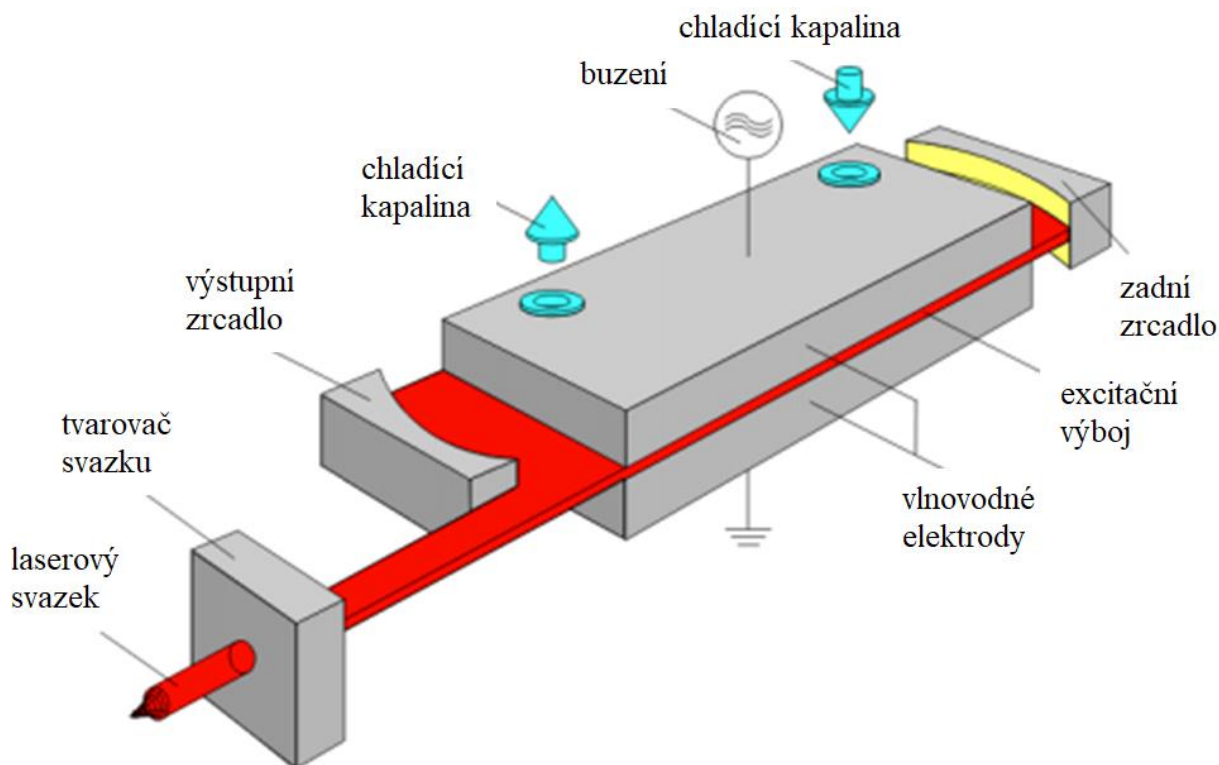
Výhody:

- velmi rozšířený typ laseru
- nízké provozní náklady
- kvalitní výstupní paprsek
- vysoký výkon a spolehlivost

Nevýhody:

- nutnost chlazení
- vysoká hodnota BPP
- vyžaduje speciální optiku (zrcadla a čočky) pro vedení paprsku, což zvyšuje pořizovací cenu
- Údržba a nastavování optiky

Vývoj firmy Rofin-Sinar přinesl modifikaci stávajícího CO₂ laseru. Ta se liší od konvenčních typů způsobem ochlazování. Jde o přímé difúzní chlazení aktivního plynného prostředí pomocí deskových elektrod chlazených samostatným vodním okruhem. Toto řešení se nazývá SLAB laser (Obr. 8). Měděné elektrody o relativně velké ploše slouží mimo chlazení hlavně k vysokofrekvenčnímu buzení. Díky tomuto řešení není nutné proudění drahého a čistého He přes chladič, což snižuje jeho spotřebu, a tedy náklady na provoz a údržbu. Kromě nižších produkovaných výkonů přináší mnoho výhod oproti konvenčním CO₂ laserům, a to především malé rozměry, jednoduchost a vyšší spolehlivost celého systému, kvalitnější výstupní paprsek a kompaktnost zdroje.



Obr. 8 Konstrukce plynového SLAB laseru [20]

b) Pevnolátkové aktivní prostředí laseru

Vynucená emise se uskutečňuje v pevném, opticky propustném prostředí nosného dielektrického materiálu. Ten je tvořen maticí a aktivačním prvkem, přičemž oba materiály mají různé vlastnosti a jsou na ně kladeny vysoké kvalitativní nároky. Materiál matrice se procesů nucené emise přímo nezúčastňuje, avšak musí být opticky čistý, homogenní a nejlépe uměle vyrobitelný. Pro fungování laseru jsou hlavní ionty aktivačních prvků, které mají vhodný systém energetických hladin, plní funkci absorbátoru energie čerpání v co nejširším pásmu vlnových délek a následně vyzařují energii ve formě světla. Stechiometricky jsou v malém množství rozmístěny v matici a jako celek se musí snadno mechanicky opracovávat a být dostatečně fotochemicky odolné.

Jako matriční materiál se používají monokrystalické nebo amorfni látky (sklo, korund, fluorit, aj.). Aktivační prvky mohou být některé železné prvky (Cr^{3+} , Co, aj.) nebo lanthanoidy (Nd^{3+} , Yb, aj.)

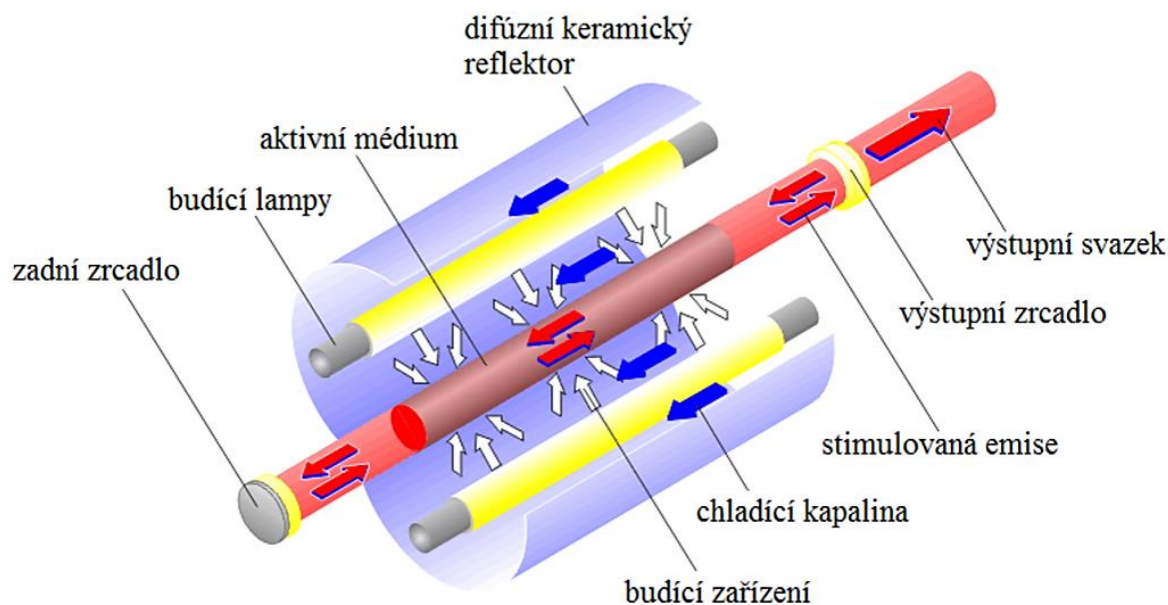
• Příklad – Nd:YAG laser

U tohoto nejpoužívanějšího zástupce je matrice tvořena molekulami $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (yttrium aluminium granát). Ty jsou dopované aktivními ionty lanthanoidu neodymu Nd^{3+} , který absorbuje vlnové délky v rozsahu $0,790 \div 0,830 \mu\text{m}$. Buzení je prováděno opticky v reflexní dutině kryptonovými výbojkami s bílým světlem ($0,450 \div 0,850 \mu\text{m}$). Z důvodu úzkého rozmezí překrývaných pásem vlnových délek je účinnost u tohoto laseru relativně nízká, a právě proto jsou vyvíjeny nové generace pevnolátkových laserů lišící se čerpáním a konstrukcí. Vlnová délka je u Nd:YAG aktivního prostředí v infračervené oblasti spektra, avšak blíže oblasti viditelného světla, což umožňuje výhodné vedení paprsku pomocí optiky ze skla a světlovodných optických vláken.

Postupné dělení podle jednotlivých generací či konstrukce pevnolátkových laserů je následující:

I. Tyčový pevnolátkový laser – I. generace (Obr. 9)

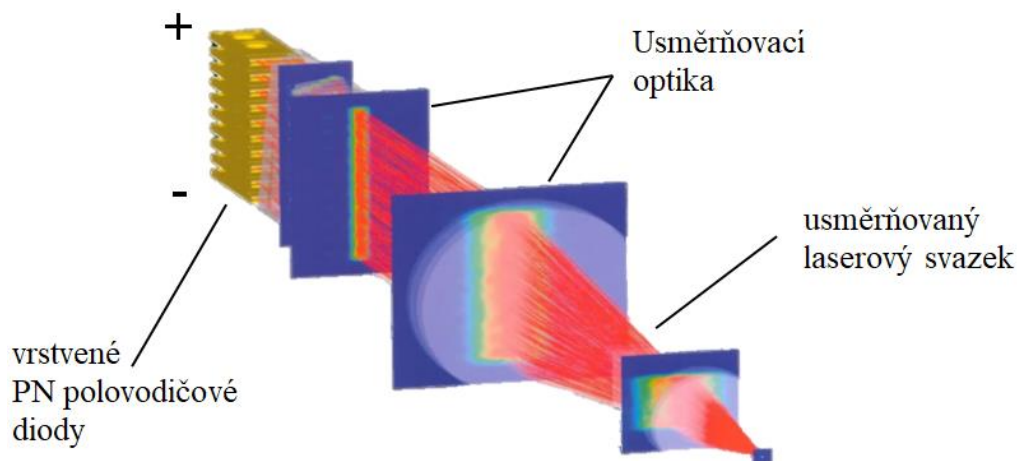
- aktivní prostředí: Nd:YAG
- optické čerpání výbojkami
- pracovní vlnová délka $\lambda = 1064 \text{ nm}$
- kontinuální nebo pulzní režim
- výkon běžně do 6 kW
- nízká účinnost $\eta = 2 \div 3 \%$
- **použití:** vrtání, svařování a značení elektronických komponentů
- **výhody:** nízká počáteční investice, vysoká energie pulzu, vedení paprsku optickým vláknem
- **nevýhody:** velmi nízká účinnost a v důsledku nutnosti chlazení a časté údržby, především výbojek, je provoz relativně nákladný



Obr. 9 Konstrukce tyčového Nd:YAG laseru [20]

II. Polovodičový pevnolátkový laser – II. Generace (Obr. 10)

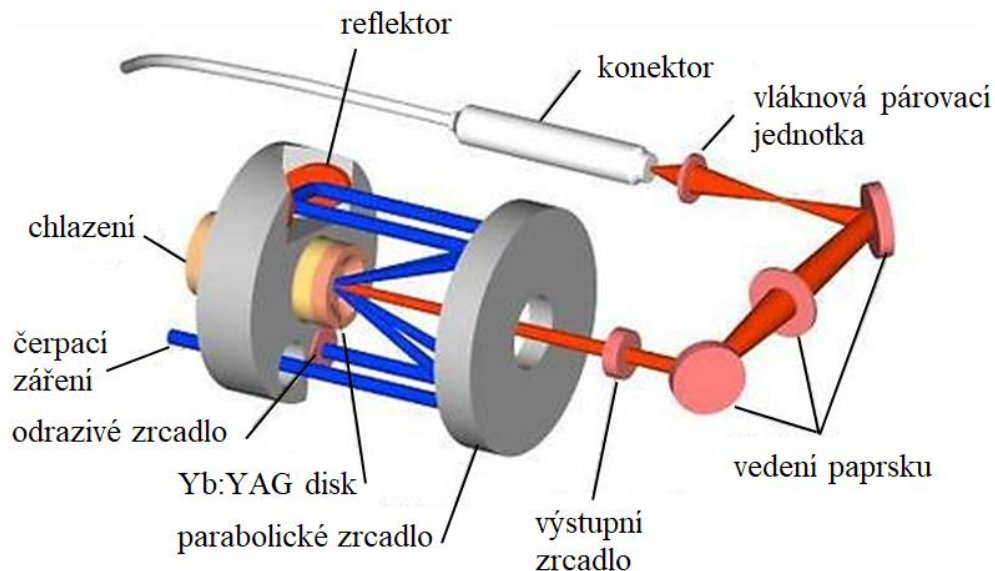
- aktivní prostředí: polovodičové laserové diody z materiálu GaAs, aj.
- čerpání průchodem elektrického proudu
- nastavitelná pracovní vlnová délka $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$
- pouze kontinuální režim provozu (hlavně v kondukčním režimu)
- výkon běžně do 10 kW
- vysoká účinnost $\eta =$ až 60 %
- **použití:** u méně výkonných laserů pro značení a gravírování, výkonné lasery se používají hlavně pro povrchové kalení, dále pro řezání a svařování plastů a fólií
- **Výhody:** vysoká účinnost bez nutnosti chlazení, všeobecně nízké náklady, dobrá životnost kompaktního zařízení, vedení paprsku optickým vláknem
- **Nevýhody:** málo kvalitní paprsek s vysokým BPP, špatná fokusace z důvodu plochého, čárkovitého výstupního paprsku, který je nutné dále usměrňovat



Obr. 10 Fokusace laserové svazku u polovodičového laseru [20,25]

III. Diskový pevnolátkový laser – III. Generace (Obr. 11)

- aktivní prostředí diskovitého tvaru: Nd nebo Yb:YAG
- buzení laserovými diodami
- pracovní vlnová délka u Nd, $\lambda = 1064 \text{ nm}$
- kontinuální nebo pulzní režim
- vysoký výkon do 16 kW
- účinnost $\eta =$ až 30 ÷ 40 %
- **použití:** řezání, svařování pomocí skenovací hlavy a strukturování (tvorba pórovitého povrchu pro tribologické aplikace)
- **výhody:** stabilní mód a kvalitní výstupní paprsek o vysokém výkonu vedený optickým vláknem, kompaktní konstrukce, velmi účinné chlazení díky ideálnímu diskovému tvaru aktivního prostředí umožňuje dlouhodobé zatěžování při vysokém poskytovaném výkonu
- **nevýhody:** nižší účinnost, vysoká počáteční investice a menší životnost



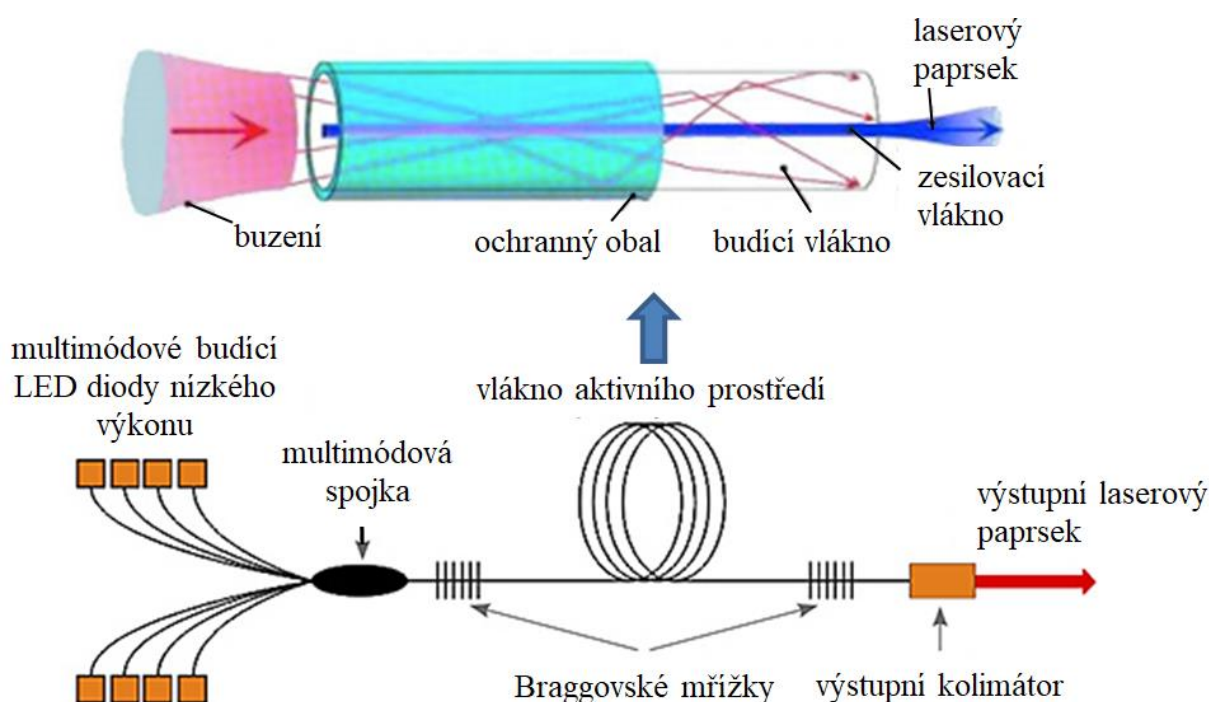
Obr. 11 Konstrukce diskového Yb:YAG laseru [29]

IV. Vláknový pevnolátkový laser (Obr. 12)

- aktivní prostředí: Nd nebo Yb:YAG
- optické čerpání pomocí LED diod
- pracovní vlnová délka u Yb, $\lambda = 1,07 \mu\text{m} \rightarrow$ optika ze skla + optická vlákna
- kontinuální nebo pulzní režim
- výkon je díky modulárnímu uspořádání 1 ÷ 100 kW
- vysoká účinnost $\eta = 48 \%$
- **použití:** široké uplatnění v průmyslu při svařování, řezání, mikroobrábění, gravírování a značení v kondukčním nebo penetračním režimu

- **výhody:** konstrukční jednoduchost a z toho plynoucí robustnost a dlouhá životnost až 150 000 hodin provozu u tohoto zařízení, velmi nízké provozní náklady v porovnání s ostatními průmyslovými lasery, bez nutnosti chlazení, modularita umožňující velké výkonové rozpětí, vysoká účinnost při produkci kvalitního a stabilního laserového paprsku, který je dobře fokusovatelný (malé BPP)
- **nevýhody:** vysoké pořizovací náklady

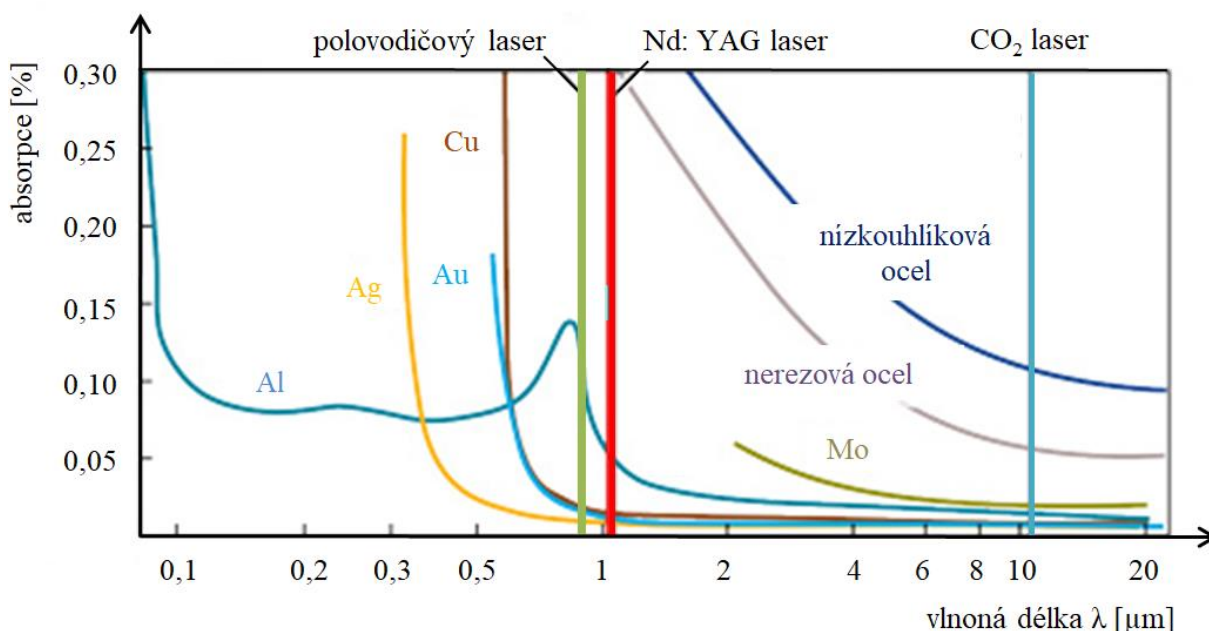
Toto zařízení je vývojově nejvyspělejším a nejmodernějším pevnolátkovým zdrojem laserového záření. Výše zmíněné přednosti z něj dělají velice perspektivní a schopný přístroj. Základem je optické vlákno o průměru stovek mikrometrů ($200\ \mu\text{m}$) dlouhé až několik metrů, které slouží k vedení paprsku do místa aplikace a hlavně slouží k vlastnímu generování laserového záření. Klasický optický rezonátor je přetvořený do podélného uspořádání podél délky celého vlákna, čímž odpadá jeho seřizování a nutnost výrazného chlazení. O buzení se starají laserové diody dodávající čerpací záření přes optickou spojku do aktivního vlákna. Z něj přes výstupní kolimátor vystupuje velice kvalitní laserový paprsek. Celé schéma je na následujícím obrázku 12.



Obr. 12 Konstrukce Yb:YAG vláknového laseru [20, 25, 30]

2.2 Interakce laseru s povrchem materiálu [19], [31], [32], [33]

Pro vznik požadovaného spoje je nutné, aby paprsek fotonů laseru předal svou energii povrchu svařovaného materiálu. Tato interakce je možná pouze za předpokladu určité absorpce záření. Nejedná se totiž o předávání kinetické energie elektronů, ale jde o pohlcování kvant energie fotonů z laserového zdroje. To zapříčiní rozkmitávání mřížky povrchu svařence, což přímo určuje nárůst teploty až na teplotu tavení. Absorpce záření však není zcela dokonalá a malá část záření prochází skrze svařovaný materiál a část je odražena od povrchu zpět. Schopnost pohlcovat energii laseru je závislá na několika faktorech. Hlavními činiteli jsou vlnová délka laserového paprsku, teplota a stav povrchu zpracovávaného materiálu. Určité materiály pohlcují lépe či hůře určité vlnové délky, ale obecně platí, že s rostoucí vlnovou délkou roste i koeficient odrazivosti pozorovaného materiálu (Obr. 13). Pro žádoucí snížení tohoto součinitele, tedy zvýšení absorpce, je možné zvýšit teplotu svařence předehřevem, nanést černý matný nátěr, případně povrch svařence zdrsnit. Například při vysoké intenzitě paprsku přesahující $10^7 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ lze dosáhnout výrazného zahřátí materiálu a tím docílit absorpce až 100 %.



Obr. 13 Absorpce záření v kovech v závislosti na vlnové délce laseru [31]

2.3 Aplikace laseru [13], [19], [20], [31], [32]

Ve strojírenských odvětvích průmyslu je laser díky jeho přednostem využíván stále více, tím klesá jeho výrobní cena a stává se stále dostupnějším. V určitých aplikacích už je nenahraditelnou součástí výrobního procesu. Používá se při zpracovávání kovových i nekovových materiálů (kovy, dřevo, keramika, plasty, aj.) s dobrou absorpcí laserového záření a ideálně s nízkou tepelnou vodivostí. Různé laserové technologie zmíněné v předchozí kapitole mají široké uplatnění při řezání, vrtání, svařování a navařování povlaků, lokálním tepelném zpracování, povrchových úpravách (např. čištění povrchů), značení, gravírování a i při výrobě prototypů (rapid prototyping). Jeho přednosti a nevýhody jsou:

Výhody:

- Vysoká hustota výkonu v dopadové ploše ($10^4 \div 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)
- Schopnost přesného soustředění energie na velmi malou plochu až $10 \mu\text{m}^2$
- Možnost velmi přesného dávkování energie, případně dělení paprsků pomocí speciální optiky → rychlost a dobrá reprodukovatelnost procesů
- Svazek fotonů je elektricky neutrální a není ovlivňován elektrickým nebo magnetickým polem
- Přeměna energie záření na teplo se uskutečňuje ve velmi krátkém čase přímo ve zpracovávaném materiálu bez nutnosti vzájemného mechanického doteku
- Nízké vnesené teplo, a tím i malá TOO způsobují malé rozměrové a úhlové deformace například u svařovaných dílců
- Možnost zpracovávat velmi široké množství materiálů
- Robotizace a automatizace procesů
- Tichý provoz s minimem toxických látek

Nevýhody:

- Vysoké počáteční investice na pořízení (vhodné pro velké série)
- Vysoké požadavky na kvalifikaci obsluhy
- Nutnost bezpečnostních opatření (krytování) v závislosti na třídě škodlivosti (dělení do 7 skupin)
- Relativně nízká účinnost a velké energetická náročnost

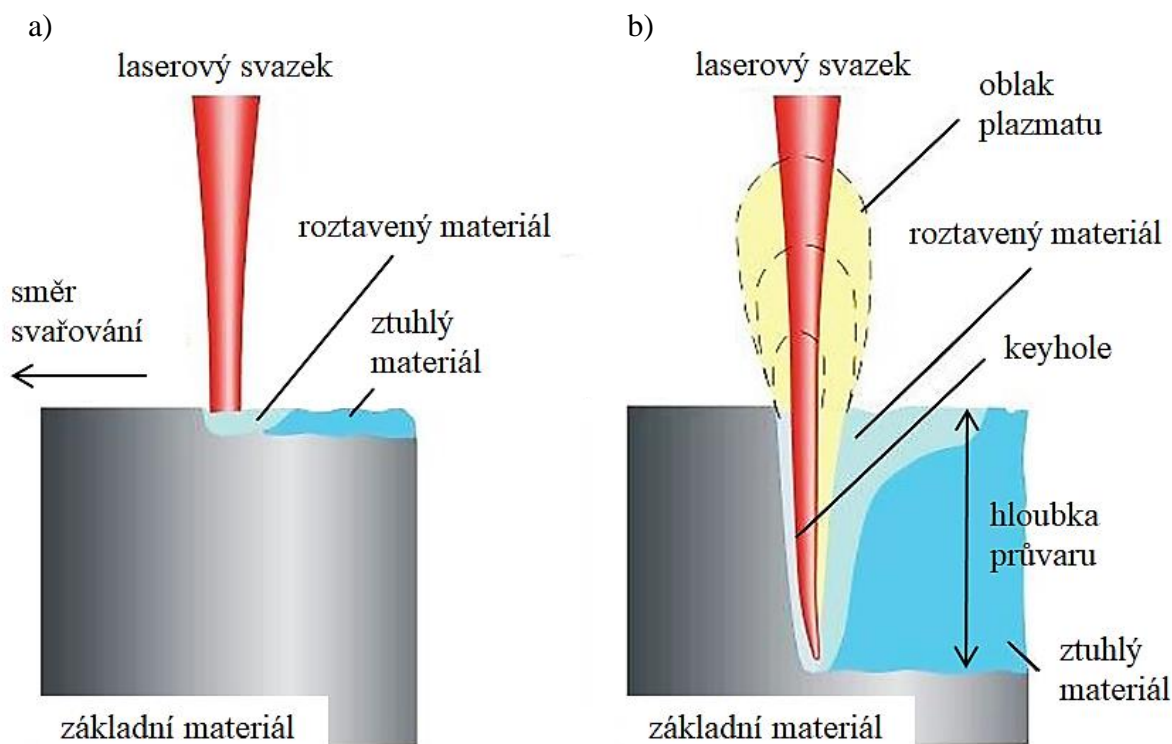
2.3.1 Svařování laserem [13], [18], [19], [25], [28], [32], [33], [34], [35]

Používáním této svařovací technologie se zabývají normy ČSN EN 1011-6 a 9956-11. Podle ČSN EN ISO 4063 nese číselné označení 52. Technologie využívá dříve zmíněných laserových zdrojů, které přes svařovací hlavu taví a spojují zpracovávaný materiál působením intenzivního laserového záření. Výhody při svařování korespondují s obecnými výhodami laserových technologií a dále tento způsob, kromě vysoké rychlosti a přesnosti, vyniká možností svařovat bez přídavného materiálu za vzniku kvalitních, čistých a štíhlých průvarových nebo tupých spojů (sesazení s téměř nulovou mezerou). Dále velkou výhodou představuje omezení předúprav povrchu zpracovávaných dílců, protože vysoká intenzita laserového záření většinu mastnot a tuků zcela odpaří ještě před vlastním svařováním. Nutnost a jistou nevýhodu tvoří přípravkování automatizovaných procesů při svařování širokého spektra možných materiálů a tloušťek (plasty, oceli, hliník, měď a různé další kovy a jejich slitiny při tloušťce fólií o $50 \mu\text{m}$ až plechů o 70 mm). Zařízení může pracovat v režimu pulzním nebo kontinuálním při kondukčním nebo penetračním účinku laserové svazku na svařovaný materiál.

V pulzním režimu laserového zdroje je energie paprsků vydávána v krátkých pulzech, čímž je potřebná naakumulovaná energie v rezonátoru intervalově uvolňována. Zatímco při kontinuálním režimu je laserové záření spojitě vyzařováno s konstantním výkonem. Paprsek průběžně prochází přes výstupní polopropustné zrcadlo po dobu celého svařování s výjimkou počátku a konce procesu.

Kontaktem laserového paprsku se spojovaným materiálem nastává za předpokladu absorpce záření jistý ohřev exponovaného místa až do teploty tavení a vlivem tepelné vodivosti dochází ke kondukčnímu vedení tepla do okolního materiálu. Při nižší plošné hustotě výkonu o přibližné velikosti $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ nastává tzv. kondukční režim účinku na spojovaný materiál (Obr. 14a), kdy je energie paprsku do materiálu předávána pouze kondukcí. Vlivem vnášení menšího množství tepla materiál relativně dobře zvládá odvádět dodané teplo, čímž je zamezeno hlubšímu průvaru bez výrazného vzniku plynů odpařováním. Výsledkem je široký a mělký svar (do 1 mm) s širší tepelně ovlivněnou oblastí (dále jen TOO). Tohoto režimu je úspěšně využíváno při tepelném zpracování nebo při svařování tenkých plechů či fólií velkou rychlostí.

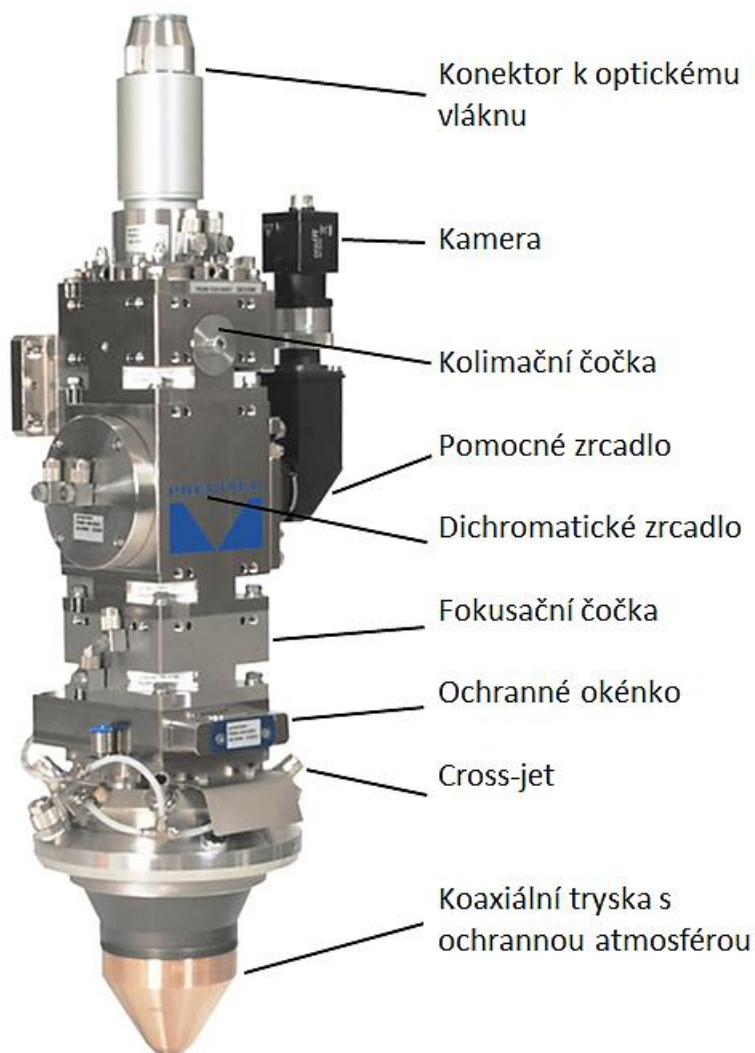
Při zvýšení plošné hustoty výkonu až na hodnoty kolem $10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ začne docházet k přivedu mnohem většího množství tepla, než je materiál schopen odvádět. Dochází k tavení a následnému lokálnímu přehřátí způsobující intenzivní odpařování kovů. Vzniklé páry v interakci s vysokou intenzitou paprsku vytváří plazma umožňující výraznou penetraci do hloubky materiálu, proto se jedná o režim penetrační (Obr. 14b). Na povrchu se děj projevuje vznikem viditelného plazmového obláčku vystupujícího nad svařenec, kde určitou měrou brání průchodu dalších laserových paprsků. Z tohoto důvodu je použito ochranných plynů o čistotě 4.6 a vyšší. Vzniklý penetrační paroplynový kanál, označovaný jako keyhole (v překladu „klíčová dírka“) je velmi úzký plynový útvar šavlovitého tvaru, který je obklopen taveninou kovu (svarovou lázní). Ta je nucena několikanásobným odrazem záření absorbovat většinu energie a dále se prohlubovat až do dosažení určité energetické rovnováhy, přičemž jejímu uzavření je zabráněno vystupujícími plyny o vysokém tlaku. Výsledkem tohoto rychlého svařování (pohybu keyhole) je velmi kvalitní a štíhlý svar o veliké hloubce s úzkou tepelně ovlivněnou oblastí.



Obr. 14 Režimy svařování laserem a) kondukční b) penetrační [25, 34]

2.3.2 Konstrukce laserové svařovací hlavy [19], [22], [25], [32], [36], [37]

Procesní parametry této technologie jsou dány laserovým zdrojem a jeho nastavením, volbou a průtokem ochranných plynů, svařovaným základním materiálem, kinematikou manipulačního robota a z velké části také vlastní svařovací hlavou (Obr. 15). Ta má především vliv na fokusaci a vedení paprsku. Její geometrie a optika určuje ohniskovou vzdálenost (např. 200 mm), velikost bodu zaostřeného paprsku (desetiny milimetru) a úhel jeho dopadu vůči základnímu materiálu (ideálně 90°). Paprsek vstupuje do svařovací hlavy konektorem napojeným na optický kabel vedoucí ze zdroje. Vstupující divergentní paprsek je usměrněn kolimační ostřicí čočkou a prochází přes dichromatické polopropustné zrcadlo, které odráží část zpětného záření přes pomocná zrcadla do kamerového systému monitorujícího svařovací proces (na základě informací z kamery je možné korigovat trajektorii laseru). Svazek záření následně



Obr. 15 Hlava Precitec YC52 [37]

projde přes fokusační čočku zaostřující jej do ohniska umístěného na povrchu svařovaných plechů. Při cestě fokusovaného svazku jsou dále už jen optiku chránící komponenty, jako je ochranné okénko a cross-jet. Jejich úkolem je zamezit vstupu částic do nitra svařovací hlavy plné choulostivé optiky. Jedná se o mechanickou, průhlednou a paprsek neovlivňující bariéru a příčný odfuk nežádoucích částic stlačeným vzduchem. Ochrana tavné lázně a odchylení vzniklého plazmatu je zabezpečeno ofukem ochranného plynu (He, Ar, N₂ nebo směs Ar + CO₂) vystupujícího z prstencové koaxiální trysky umístěné ve spodní části celé hlavy. Nutností je udržovat konstantní vzdálenost od povrchu při konstantní rychlosti posuvu.

Další možností je použití skenovací hlavy (remote welding), kdy je paprsek usměřován přes výstupní širokoúhlou čočku s velkou ohniskovou vzdáleností (více než 400 mm) pomocí natáčejících se zrcadel. Při této velmi rychlé metodě není použito ochranných plynů jako v případě svařovací hlavy a hlavním omezujícím parametrem svařovací rychlosti je rychlost zaostřování. Používá se pouze u tenkých plechů při tvorbě průvarových svarů.

2.4 Svařování metodou TIG [3], [11], [14], [18], [36], [38], [39]

Název TIG je zkratkou anglického sousloví Tungsten Inert Gas, což v překladu značí, že se jedná o svařovací wolframovou elektrodu chráněnou inertní atmosférou. Německou alternativou k názvu TIG je zkratka WIG (Wolfram Inert Gas) znamenající v překladu totéž. Označuje se číslem 141 podle ČSN EN ISO 4063.

Tato metoda se řadí mezi tavné a obloukové metody svařování, kdy je materiál ohříván za pomoci elektrického oblouku vznikajícího mezi svařencem a netavící se elektrodou z wolframu (Obr. 16). Pro zapálení oblouku je vysokonapěťovým vysokofrekvenčním ionizátorem vybudena elektrická jiskra, která výbojem ionizuje prostor mezi základním materiálem a elektrodou. Oblast svaru a elektrody je chráněna průtokem ochranného plynu zamezující reakci ohřátých a reaktivních materiálů s vnějšími okolím, zejména s kyslíkem a dusíkem obsažených v běžné atmosféře. Přídavný materiál (PM) je do svarové lázně dodáván ve formě drátu ručně nebo pomocí podavače, anebo je zcela vynechán a svařuje se pouze tavením základního svařovaného materiálu.

Zdroj elektrické energie poskytuje proud až do přibližně 500 A. Pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin se využívá střídavého proudu. Čistícího účinku je dosaženo při amplitudě nepřímého zapojení (elektroda na kladném pólu zdroje) a dosažení většího závaru při druhé části periody při přímém zapojení (elektroda na záporném pólu zdroje). Svařování pomocí stejnosměrného proudu při přímém zapojení je vhodné pro všechny typy ocelí, mědi, titanu, niklu a jejich slitin. Případně je možné svařovat impulzním proudem, kdy se proud periodicky mění mezi dvěma hladinami základního a impulzního proudu. Toto řešení přináší velké výhody v řízení a regulaci svařovacího procesu a omezuje vnesené teplo.

Výhody metody TIG:

- Vysoká stabilita elektrického oblouku
- Dobrá ovladatelnost svarové lázně a formování svarové housenky (vhodné pro pohledové svary)
- Dobrá regulace a řízení svařovacích parametrů
- Malé vnesené teplo a tím i malá tepelně ovlivněná oblast
- Možnost svařování dvou tenkých a materiálově rozdílných plechů
- Možnost svařovat bez přídavného materiálu
- Vhodné i pro navařování při renovacích

Nevýhody metody TIG:

- Malá produktivita při ručním svařování
- Méně častá a obtížnější automatizace

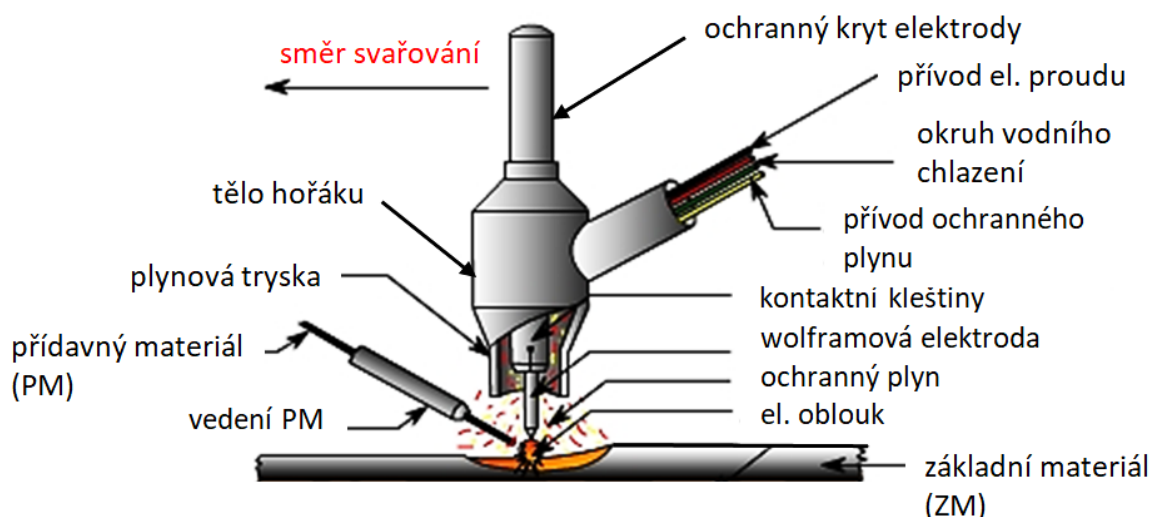
Pro vznik oblouku jsou zásadní netavící se wolframové elektrody vyrobené spékáním wolframu. Teplotní odolnost je u bezpříměsových elektrod dána teplotou tavení wolframu při 3380 °C, případně jsou přidávány různé příměsi pro zlepšení provozních vlastností. Legováním oxidy kovů (thorium, lanthan, zirkon, cer, hafnium nebo itrium) je omezena teplota ohřevu elektrody a tím zvyšována její životnost, zlepšuje se zapalování oblouku a narůstá emise elektronů, čímž je stabilizován oblouk. Jednotlivé elektrody s danou příměsí jsou vhodné pro různé aplikace a materiály, jsou barevně označeny a klasifikuje je norma ČSN EN ISO 6848.

Ochrannou atmosférou jsou již zmíněné inertní plyny argon nebo helium o vysoké čistotě běžně 4.6 ale až 5.0 (to značí 99,999 % obsah požadovaného plynu a zbytek 10 ppm tvoří

nečistoty). Jejich volbou a nastavením proudění je nejen chráněn svarový spoj před oxidací, ale dále je také ovlivněn celý svařovací proces. Používají se čisté nebo často i ve směsích Ar, He, v určitých aplikacích s dusíkem a až 10 % vodíku (redukční čistící vlastnosti).

Nejpoužívanější argon má díky svému nízkému ionizačnímu potenciálu dobrý vliv na vlastní oblouk. Zlepšuje jeho zapálení, stabilitu i při větší délce oblouku, umožňuje dosažení vysokých teplot a proudové hustoty. V porovnání s héliem se jedná o levný plyn s téměř polovičnými pořizovacími náklady.

Přednosti helia spočívají v jeho dobré tepelné vodivosti, čímž zvyšuje průvar při zachování původních svařovacích parametrů. To umožňuje svařování materiálu s vysokou tepelnou vodivostí, například i hliníku bez použití střídavého proudu, kdy jsou vlivem vysokého přeneseného tepla roztaveny i oxidy Al_2O_3 . V porovnání s argonem je nevýhodou vyšší ionizační energie a z toho plynoucí důsledky (horší zapalování, menší stabilita a vyšší napětí na oblouku). Dále je potřeba dodávat větší množství tohoto drahého ochranného plynu vlivem jeho nízké atomové hmotnosti, tak aby byla zaručena ekvivalentní ochrana jako u argonu. Tím se jeho cenový odstup od argonu ještě zvyšuje.



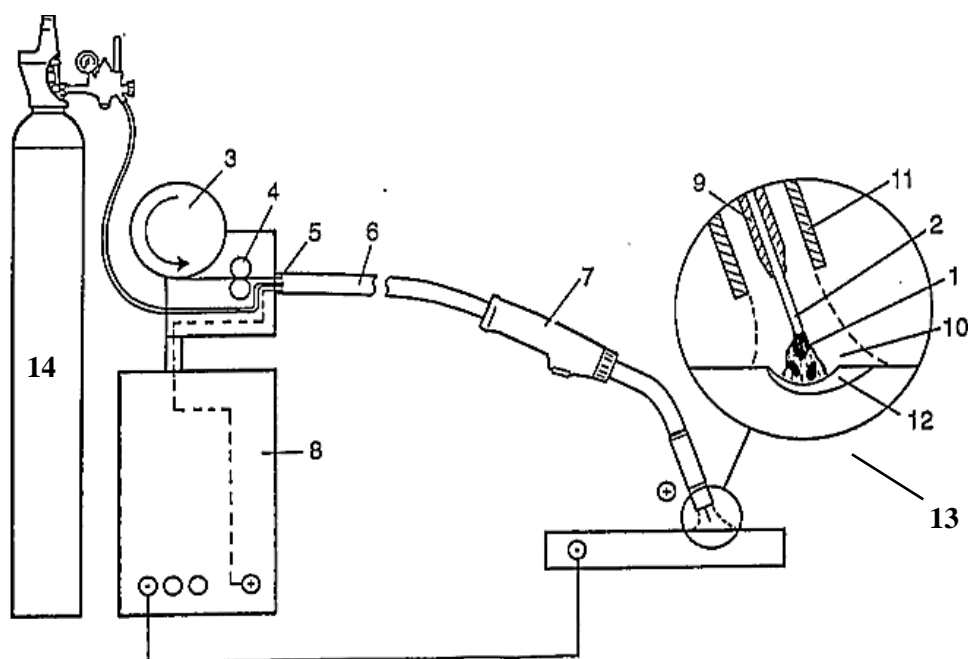
Obr. 16 Schéma svařování metodou TIG [38]

2.5 Svařování metodou MAG [3], [5], [11], [18], [36], [40]

Tento způsob svařování se stejně jako předešlá metoda řadí do obloukových a tavných metod. Překladem názvu Metal Activ Gas (MAG) rozumíme, že se jedná o svařování kovovou elektrodou v aktivním ochranném plynu. Tato svařovací technologie se podle ČSN EN ISO 4063 značí jako 135.

Oproti metodě Metal Inert Gas (MIG ozn. 131), která používá především inertní plyny helium, argon nebo případně jejich směsi, jsou zde použity reaktivní oxidační plyny. Až na výjimky se používají směsi oxidu uhličitého nebo kyslíku výhradně s argonem, případně héliem nebo vodíkem. Běžnou nejpoužívanější směsí je směs 82 % Ar a 18 % CO_2 označovaná podle ČSN EN ISO 14175 jako M21. Aplikace těchto plynů způsobí částečnou povrchovou oxidaci svaru, avšak z užití těchto plynů plynou i jisté výhody. Důsledkem silně exotermické oxidační reakce a dobré tepelné vodivosti je při svařování zvětšen průvar, kdy jsou vzniklé vhodně tekuté oxidy vyplaveny na povrch svaru. Výsledkem jsou malé

povrchové ostrůvky strusky (hlavně oxidy manganu, křemíku a částečně i železa). Hlavním rozdílem oproti metodě TIG je kromě rozdílné plynové ochrany také způsob podávání PM. Ten je do svarové lázně dodáván jako vlastní tavící se elektroda ve formě plného nebo trubičkového plněného drátu. Provaření základního materiálu je dosaženo použitím svařovacího zdroje dávajícího stejnosměrný proud v přibližném rozmezí 50 až 600 A. Dále bývají moderní zdroje vybaveny celou řadou funkcí pro zlepšení svařovacího procesu. Příkladem může být synergické řízení svařovacích parametrů, ukončování svařovacího cyklu proudovým impulsem, funkce držení konstantní délky oblouku, horký start a další vylepšení. Zapojením záporného pólu na základní materiál se jedná o používanější nepřímou polaritu při svařování. Schéma popisující svařování metodou MAG je na obrázku 17.



- | | |
|----------------------------|--|
| 1 – elektrický oblouk | 8 – zdroj svařovacího proudu |
| 2 – drátová elektroda (PM) | 9 – kontaktní svařovací průvlek (špička) |
| 3 – zásobník drátu | 10 – ochranný plyn |
| 4 – podávací kladky | 11 – plynová tryska (hubice) |
| 5 – rychloupínací spojka | 12 – svarová lázeň |
| 6 – kabel hořáku | 13 – základní materiál |
| 7 – svařovací hořák | 14 – tlaková lahev s ochranným plynem a redukčním ventilem |

Obr. 17 Schéma svařování metodou MIG/MAG [11]

Přenos kovu z tavící se elektrody do svaru je důležitou a charakterizující vlastností procesu. Je ovlivněn hlavně nastavením svařovacích parametrů, jako jsou proud a napětí. Výrazný vliv má i použití ochranných plynů, přídavného materiálu nebo technika svařování. S rostoucími parametry se dělí na zkratový oblouk, sprchový oblouk, impulzní oblouk, rotující přenos kovu a přechodové přenosy mezi nimi.

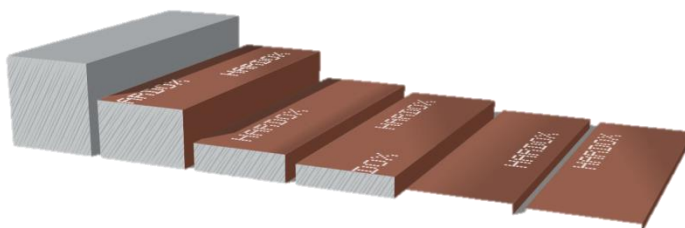
Mezi hlavní výhody metody MIG/MAG patří především její rozšíření v průmyslu a z toho plynoucí zkušenosti se svařovacím procesem, snadná obsluha, vysoká produktivita a častá automatizace svařování při dosažení kvalitních svarů. Do svaru se však vnáší větší množství tepla v porovnání s laserem nebo metodou TIG a PM je zde nutností.

2.6 Hardox 450 [7], [8], [9], [41], [42], [43]

Jedná se o nízkolegovanou, vysokopevnostní a tepelně zpracovanou ocel odolnou proti abrazi, jenž má vysokou tvrdost a pevnost při zachování dobré vrubové houževnatosti. Oceli Hardox jsou jedním z výrobků přední švédské huti SSAB Oxelösund vyrábějící od roku 1974 ve výrobních závodech po celém světě, ale hlavně v USA a ve Švédsku. V jejich výrobním portfoliu jsou k nalezení produkty určené pro nejrůznější strojírenská odvětví. Mimo Hardox nabízejí, také:

- Docol – oceli pro automobilový průmysl
- Toolox – materiály určené pro výrobu namáhaných strojních součástí, obráběcích a tvářecích nástrojů
- Greencoat – konstrukční materiál pro stavební průmysl
- ArmoX – ocel používaná v armádní technice
- Strenx – vyspělá konstrukční ocel, nově nahrazující určité materiály z řady Docol, Optim, Domex a Weldox

S rostoucí tvrdostí a pevností materiálu, klesá jeho houževnatost, s tím je také spojena úspora materiálu a hmotnosti z důvodu aplikace menších tloušťek plechů (Obr. 18). Oceli Hardox se vyrábějí v širokém spektru jakostí, tak aby dokázali pokrýt rozdílné požadavky zákazníků:



Obr. 18 Úspora materiálu [8]

- Hardox HiTuf – ocel s relativně vysokou tvrdostí 340 HBW při udržení vynikajících hodnot nárazové práce, KV = 95J
- Hardox 400 až 600 – jedná se o materiály s vysokou tvrdostí povrchu, kde číselné označení za názvem Hardox značí průměrnou hodnotu tvrdosti dle Brinella
- Hardox Extreme – jde o velmi tvrdý materiál s povrchovou tvrdostí až 650 - 700 HBW určený do nejnáročnějších podmínek

Konkrétně Hardox 450 vznikl z důvodů zvýšení požadavků výrobců nákladních koreb na životnost a stal se novým standardem místo Hardox 400. Produkty jsou dodávány v různých tloušťkách ve formě plechů, svitků a u různých jakostí i jako tyčový a trubkový materiál. Tyto polotovary se dále zpracovávají dělením, ohýbaním, zakružováním, obráběním a svařováním. Chemicky se jednotlivé polotovary a tloušťky liší chemickým složením v množství použitých přísadových prvků. Hardox 450 je vyráběn jako:

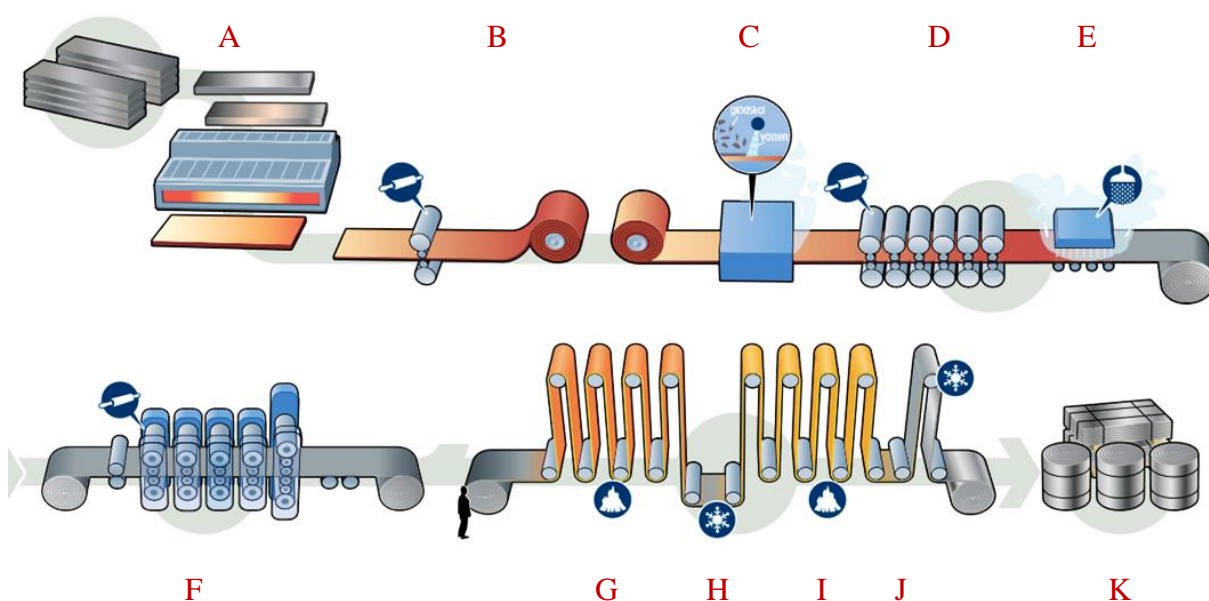


Obr. 19 Aplikace plechů Hardox 450 [43]

- plech v tloušťkách od 3,2 mm do 130 mm, značeno jako „Plate“
- ve formě tabulí plechu v rozmezí 2,5 mm až 8,0 mm, označení „Sheet“

- plech válcovaný za studena „cold rolled sheet“ pro nejtenčí tloušťky od 0,7 mm do 2,10 mm (tento typ plechu o tloušťce 2 mm bude použitý při experimentu, chemické složení a mechanické vlastnosti jsou v kapitole 3.2)

Proces výroby plechů (Obr. 20) začíná v hutích, kdy jsou vytvořeny plošné polotovary pro další zpracování. Tento deskový materiál o tloušťce 220 mm je ohřát na teplotu kolem 1250 °C vhodnou pro válcování za tepla (A). Po válcování jsou plechy prodlouženy, navinuty na cívku a jejich tloušťka je redukována na 30 mm (B). Následuje proces čištění od vzniklých okují (C) a poté je plech dále za tepla válcován na tloušťky podle požadavků zákazníka v rozmezí 1,8 mm až 16 mm (D). Nakonec je materiál ochlazen (E) a v případě, že finálním produktem je plech válcovaný za tepla „Hot rolled sheet“, tak může být prodáván. Pokud jde o plechy válcované za studena, tak proces výroby pokračuje dalším válcováním již bez ohřevu (F), případně je možné vyrábět plechy s povrchovou úpravou zinkování. Ztenčení probíhá z tlouštěk 6 mm až na 0,3 mm při zpevňování a vyhlazování povrchu materiálu. Výsledkem je tenký, velmi tvrdý a křehký materiál, který je nutné rekrystalizovat pro obnovení jeho tvárných vlastností (G). Žihání probíhá kontinuálně až do teplot 850 °C, kdy následuje prudké zakalení s ochlazovací rychlostí přibližně 1000 °C·s⁻¹ (H). Aby zakalený materiál byl nejen tvrdý a pevný, ale i houževnatý, tak je nutné provést popouštěcí žihání při nižších teplotách 200 ÷ 500 °C (I). Posledním krokem je finální dochlazení (J) a navinutí na cívku nebo nastříhání na rozměrově přesné tabule plechu (K).



Obr. 20 Výroba plechů Hardox [9]

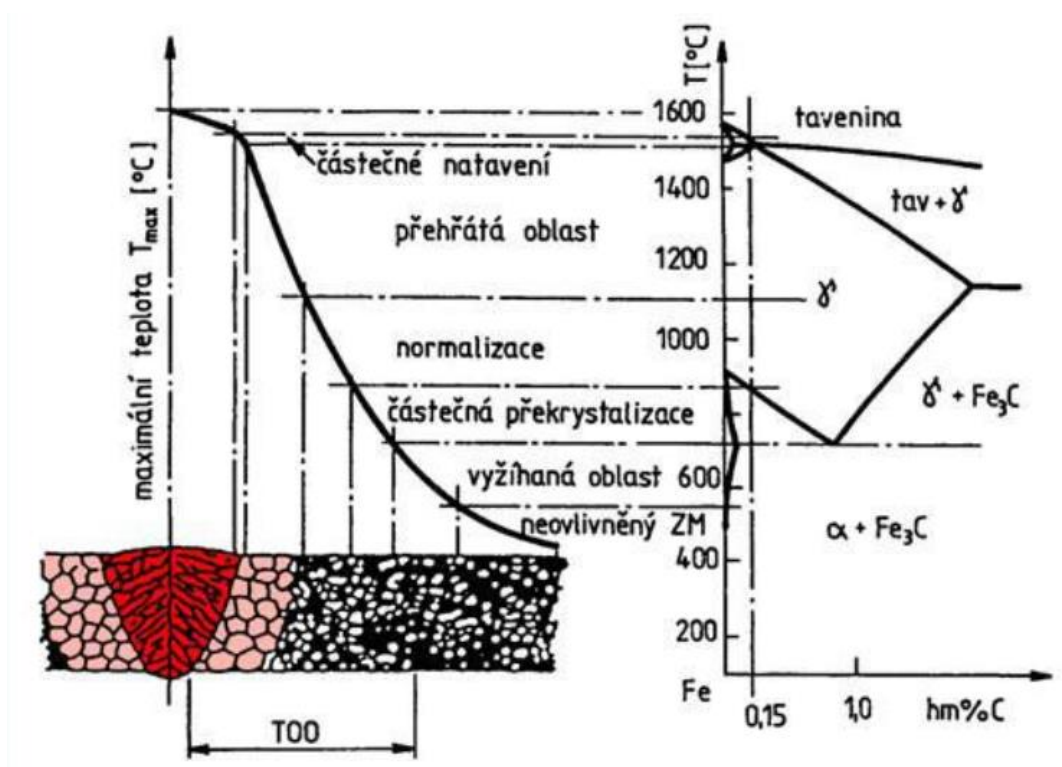
Takto vyrobený materiál je používán především v těžebním a těžkém zpracovatelském průmyslu, kde jsou na výrobky kladeny velmi vysoké nároky. Konkrétně jde o bezvýztuhové korby stavebních a důlních vozidel, drtičky odpadů, lopaty a rypadla bagrů (Obr. 19), hydraulické nůžky a další aplikace vyžadující výborné mechanické vlastnosti, které materiály Hardox poskytují.

Cenově vychází Hardox 450 téměř 3x draž než obyčejný hlubokotažný plech DC01 (ČSN 11 321). Například podle e-shopu Feromat je cena včetně DPH u Hardox 450 pro plech 3x1500x2000 = 5929 Kč. Pro stejný plech zmíněné hlubokotažné oceli je cena vč. DPH 2138 Kč.

2.7 Svařitelnost ocelí [1], [12], [17], [39], [44], [45], [46]

Při tavném svařování je zapotřebí dosáhnout teploty převyšující teplotu tavení svařovaného a přídavného materiálu během velmi krátké doby. Toho je dosaženo sice v malém objemu materiálu, ale je nutné použití vysoce koncentrovaného zdroje tepla. Vlivem toho dochází ke vzniku teplotního pole a následně tepelně ovlivněných struktur, označované jako tepelně ovlivněná oblast, TOO. Velikost této oblasti je ovlivněna mnoha faktory, jako jsou intenzita působícího tepla, tepelná vodivost materiálu, rychlost svařování a rychlost odvodu tepla od svaru. Velikost TOO vzniklá při teplotním cyklu je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících výsledné mechanické vlastnosti svarového spoje. TOO lze rozdělit na několik rozlišitelných strukturálních pásem (Obr. 21), postupně od svaru:

- Svarový kov – litá struktura vzniklá při ochlazování z teploty vyšší než teplota likvidu
- Přechodové pásmo – zde nastalo částečné natavení dosažením teplot mezi teplotami solidu a likvidu
- Pásmo přehřátí – vlivem působení intenzivního tepla zde došlo ke zhrubnutí zrna, jedná se o nejslabší místo svaru
- Pásmo normalizace – ideální jemnozrná struktura vzniklá při ochlazování z okolí teploty A_{c3} . Jde o normalizační žíhání s překrytím.
- Pásmo částečné překrytím (interkritická oblast) – ochlazování z teplot mezi A_{c1} a A_{c3}
- Dále je vyžeháný materiál (subkritická oblast), případně neovlivněný základní materiál



Obr. 21 Pásma tepelně ovlivněné zóny [44]

V případě laserového svařování, kdy je vysoký tepelný výkon (až $1 \cdot 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) fokusován na velmi malou plochu, dochází k velmi rychlému zahřátí a dosažení termické aktivace svařovaných povrchů. Rychlé zahřívání nestačí dodávat teplo do okolního objemu materiálu mimo svar a tak po přesunu zdroje tepla mimo sledované místo nastává rychle ochlazování a tvorba nerovnovážných zakalených struktur. Odvod tepla je tím rychlejší, čím větší je objem obklopujícího chladnějšího materiálu. Dále důležitou roli hraje velikost teplotního gradientu, tepelná vodivost svařovaného materiálu a okolního prostředí. Rychlost ochlazování je udávána nejčastěji parametrem $t_{8/5}$, což představuje dobu potřebnou k ochlazení z 800°C na 500°C . V tomto rozmezí teplot nastávají nejdůležitější překryštalizační procesy u ocelí. Dalšími parametry jsou $t_{12/8}$ a $t_{\text{max}/10}$. Hodnoty těchto ochlazovacích rychlostí slouží také ke konstrukci diagramu anizotermického rozpadu austenitu (dále jen ARA diagram) na obrázku 23. Pro omezení rychlého odvodu tepla ze svaru a TOO, a to nejen u laserového svařování, je nutné dodávat přídavné teplo spolu s teplem ze svařovacího zdroje. Teplo pro zmenšení teplotního gradientu může být dodáno před nebo po vlastním svařování. Jedná se o přehřev či dohřev. Celou touto problematikou se zabývá norma ČSN EN 1011. Aplikaci přehřevu nebo dohřevu je nutné velmi zvážit, protože jejich použití obnáší určitá úskalí. V řadě případů jsou nutností a při jejich vynechání by vyhovující svarové spojení nebylo možné. Potřebu a intenzitu tohoto přídavného tepelného procesu specifikují rovnice v následující kapitole.

Výhody při správném určení:

- Řízený teplotní cyklus, především chladnutí svaru a TOO
- Dosažení požadované struktury ve svaru a v TOO
- Zlepšení mechanických vlastností svarového spoje
- Omezení obsahu difuzního vodíku ve svaru a tedy i trhlin za studena
- Snižuje teplotní gradienty, a tím i velikost a rozložení zbytkových napětí

Nevýhody při aplikaci přehřevu/dohřevu:

- Rozšíření TOO
- Delší výrobní proces
- Prvotní investice na technologii
- Provozní náklady
- Zhoršení manipulace pro svářeče
- Degradace mechanických vlastností u určitých materiálů

2.7.1 Uhlíkový ekvivalent [12], [47], [48]

Největší vliv na svařitelnost ocelí a na nutnost použití přehřevu či dohřevu má tloušťka svařovaného materiálu, obsah uhlíku, legujících prvků a tvar svarového spoje. Uhlík jako legura ovlivňuje materiál tak, že posouvá křivky v ARA diagramu doprava, a tím prodlužuje dobu potřebnou pro ochlazování pro dosažení houževnatějších struktur. Dochází k zakalení materiálu za vzniku křehkých struktur, jako je martenzit a dolní bainit. Na uhlík je tedy brán největší zřetel při výpočtu uhlíkových ekvivalentů, avšak vliv ostatních prvků je také zohledněn. Čím vyšší je jeho hodnota, tím obtížnější je svaření tohoto materiálu a větší je i náchylnost ke vzniku studených trhlin. Níže jsou popsány výpočty uhlíkových ekvivalentů.

a) Uhlíkový ekvivalent C_e

Jedná se o výpočet uhlíkového ekvivalentu podle normy ČSN EN 1011. Platí pro materiály s obsahy prvků pod mezními hranicemi: C = 0,22 hm. %, Mn = 1,6 hm. %, Cr = 1 hm. %, Ni = 3 hm. %, V = 0,14 hm. %, Cu = 0,3 hm. %. V případě splnění uvedených mezních hodnot je materiál svařitelný bez předehřevu, je-li $C_e < 0,50$ hm. %.

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

kde t – tloušťka svařovaného materiálu [mm]

b) Uhlíkový ekvivalent C_e (IIW) neboli CEV

Používá se pro výpočet uhlíkového ekvivalentu u nelegovaných, jemnozrnných a nízkolegovaných ocelí s mezními hmotnostními procenty legujících prvků: C = 0,05 ÷ 0,25 hm. %, Si < 0,80 hm. %, Mn < 1,70 hm. %, Cr < 0,90 hm. %, Cu < 1,00 hm. %, Ni < 2,50 hm. %, Mo < 0,75 hm. %, V < 0,20 hm. %, V < 0,20 hm. %.

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

c) Uhlíkový ekvivalent CET

Používá se pro nízkolegované vysokopevnostní oceli a je v dnešní době nejčastěji používaným výpočtem. Mezní hodnoty legujících prvků jsou:

C = 0,05 ÷ 0,25 hm. %, Si < 0,80 hm. %, Mn = 0,50 ÷ 1,90 hm. %, Cr < 1,50 hm. %, Cu < 0,70 hm. %, Ni < 2,50 hm. %, Mo < 0,75 hm. %, V < 0,18 hm. %, Ti < 0,12 hm. %, B < 0,005 hm. %, Nb < 0,06 hm. %.

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

2.7.2 Výpočet teploty předehřevu [12], [39], [40], [47], [48], [49]

Je možné ji určit experimentálně nebo výpočtem. Mezi experimentální způsoby určení se řadí zkouška praskavosti Tekken Y, U-drážka, CTS test a další. Náročnost experimentu, cena a výsledek omezený na jedinou testovanou konfiguraci zvyhodňují teoretické výpočtové určení této teploty. Jedná se především o empirické vzorce a diagramy, které se liší vhodností použití v závislosti na chemickém složení a použité svařovací technologii. Níže je několik způsobů pro výpočet teploty předehřevu.

- a) Obecně platí, že nelegovaný materiál s obsahem uhlíku nad 0,22 hm. %, legovaný s uhlíkovým ekvivalentem větším než 0,45 hm. % nebo s tloušťkou svařovaných součástí větší než 25 mm vyžaduje předehřev.

b) Výpočet teploty předehřevu podle Sefariána

Je vhodný pro uhlíkové a nízkolegované oceli s obsahem uhlíku větším než 0,1 hm. %.

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \quad [\text{hm. \%}] \quad (2.4)$$

$$C_s = 0,005 \cdot t \cdot C_c, \text{ kde } t - \text{tloušťka svařovaného materiálu} \quad [\text{mm}] \quad (2.5)$$

$$C_p = C_c + C_s \quad (2.6)$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25}, \text{ kde } T_p - \text{Teplota předehřevu} \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.7)$$

c) Výpočet předehřevu podle ČSN EN 1011-2 B (algoritmus Uwer – Hohn – Tekken)

Tento výpočet je určený také pro obloukové metody svařování u nízkolegovaných vysokopevnostních ocelí.

- Dílčí hodnota teploty předehřevu v závislosti na uhlíkovém ekvivalentu CET

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.8)$$

- Dílčí hodnota teploty předehřevu v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{t}{35}\right) - 110 \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.9)$$

- Dílčí hodnota teploty předehřevu v závislosti na obsahu difuzního vodíku

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.10)$$

- Dílčí hodnota teploty předehřevu v závislosti na tepelném příkonu Q [$\text{KJ} \cdot \text{mm}^{-1}$]

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.11)$$

- Celková hodnota předehřevu T_p podle CET je součtem dílčích teplot

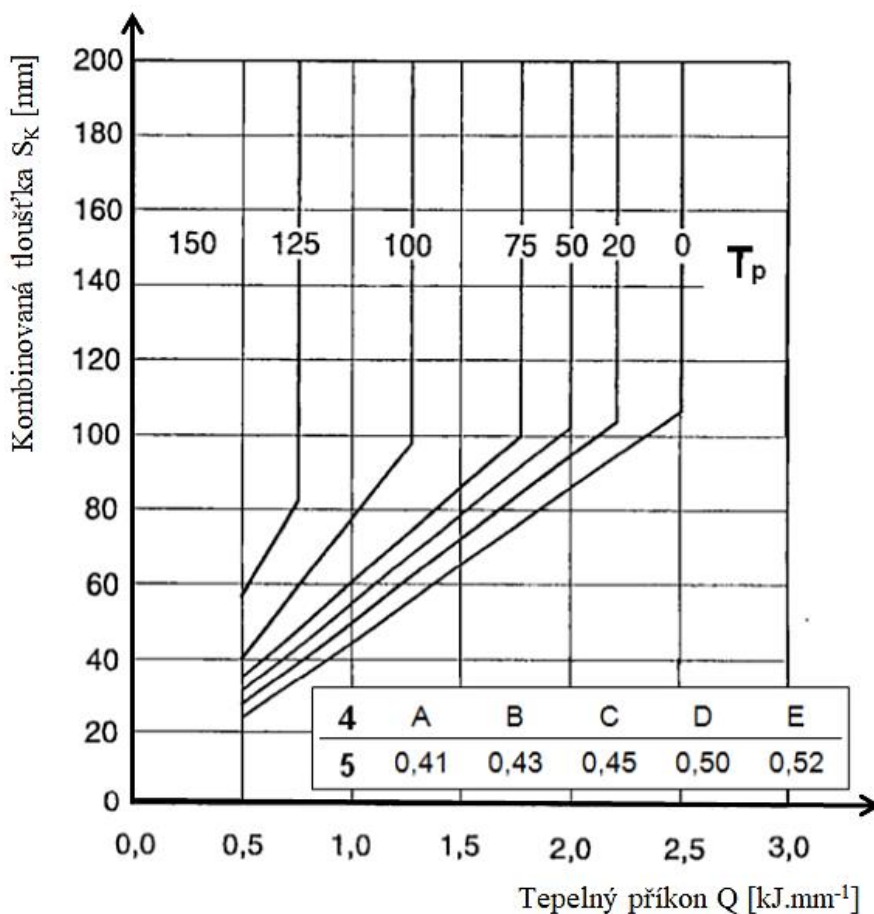
$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.12)$$

Tento výpočtový algoritmus platí pro následující podmínky:

- Mez kluzu svařovaného materiálu $R_e < 1000$ MPa
- $CET = 0,2 \div 0,5$ hm. %
- $t = 10 \div 90$ mm
- $Q = 0,5 \div 4,0$ $\text{KJ} \cdot \text{mm}^{-1}$
- $HD = 1 \div 20$ ml/100 g

d) Výpočet předehřevu podle ČSN EN 1011-2 A

Je to způsob určení teploty předehřevu pro uhlíko-manganové oceli svařované obloukovými metodami, který je založen na odečítání z 13 experimentálně vytvořených grafů. Jeden z nich je na obrázku 22. V nich je brána v úvahu kombinovaná šířka S_k materiálu svar obklopující, tepelný příkon svařování Q a obsah difuzního vodíku v pěti úrovních A až E. Ve výpočtu je tedy určitým způsobem zohledněno množství okolního materiálu odvádějící teplo ze svaru a tím i rychlost ochlazování. Platí pro materiály s uhlíkovým ekvivalentem C_e (IIW) = 0,30 ÷ 0,70 hm. %.

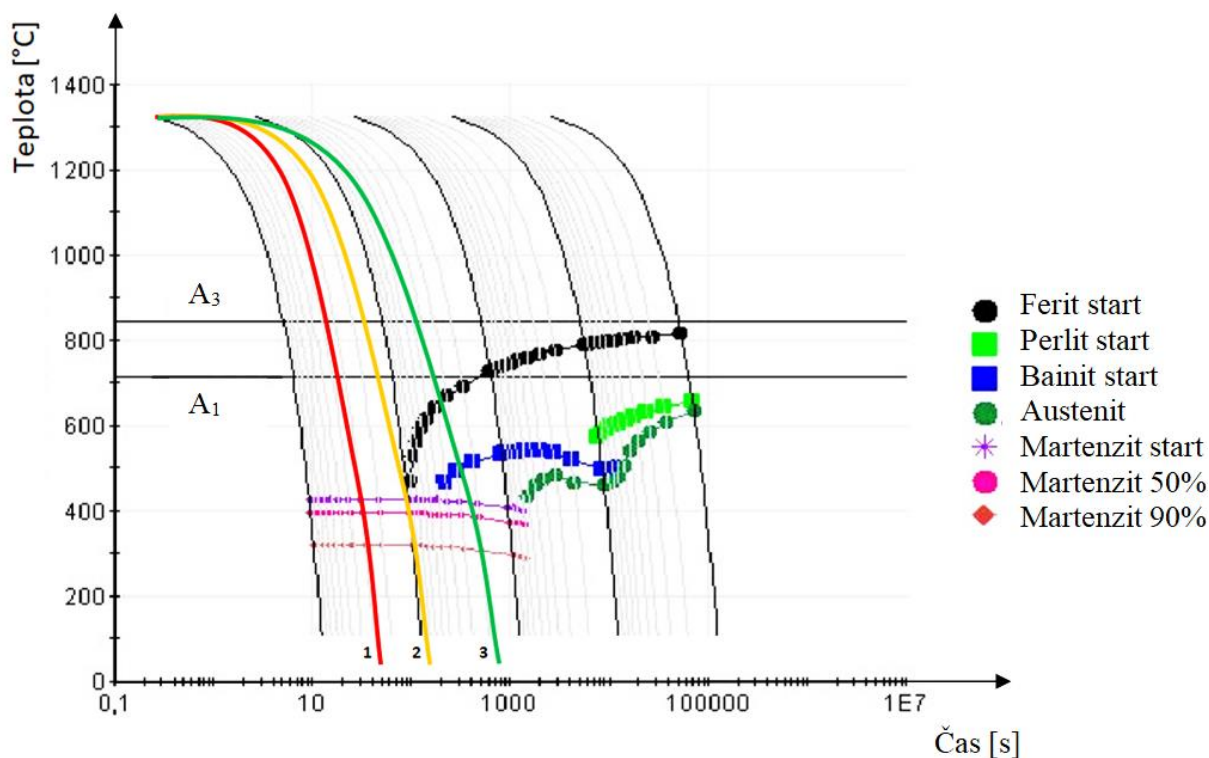


Obr. 22 Graf pro stanovení teploty předehřevu podle ČSN EN 1011-2 A-d [39]

- e) Tabulka předehřevů v příručce firmy SSAB (příloha č. 4) - tabulka platí pro různé tloušťky plechů při svařování tepelným příkonem $1,7 \text{ kJ.mm}^{-1}$. Předehřev je zde uvažován až od tloušťky 20 mm při teplotě 125°C .
- f) Obecně lze však použít ARA diagramu a při znalosti rychlostí ochlazování při teplotních cyklech (parametr $t_{8/5}$) je možné předpokládat výslednou mikrostrukturu, a tím i odhadovat mechanické vlastnosti v pozorovaných místech svaru nebo TOO. Pro potřeby svařování jsou však vhodnější diagramy ARA „in situ“, které mají na vodorovné ose namísto času přímo parametr $t_{8/5}$. Z nich je možné odhadnout nutnost a případně i výši teploty předehřevu. Podobného postupu využívají simulační softwary pro svařovací procesy, jako jsou například programy SYSWELD, Gleeble atd.

Na obrázku 23 je ARA diagram, který byl dodán výrobcem materiálu Hardox 450, firmou SSAB. Z blíže nespecifikovaných důvodů se nejedná o ARA diagram přímo pro testovaný materiál, avšak pro obecné znázornění problematiky bude postačovat.

- Křivka 1 představuje nadkritickou rychlost ochlazování při, které dochází k tvorbě martenzické struktury
- Křivka 2 značí kritickou rychlost ochlazování
- Křivka 3 je znázorňuje podkritickou rychlostí ochlazování za vzniku houževnatějších bainitických nebo případně feriticko - perlitických struktur.



Obr. 23 ARA diagram firmy SSAB [49]

2.7.3 Způsoby přehřevu [11], [12], [14], [15], [50], [51], [52], [53]

Při svařování vzniká teplo od svařovacího zdroje, které natavuje svařovaný materiál a vlivem tepelné vodivosti se šíří do okolí svaru. Je označováno jako vnesené teplo, neboli tepelný příkon a je definováno jako množství tepla dodaného do svaru vztažené na jednotku délky (vztah 2.13). Podobně se dá definovat i teplo při přehřevu či dohřevu, avšak bez dosažení T_{tav} . Je možné jej ovlivnit nastavením určitých parametrů:

$$Q = \frac{k \cdot U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} = \frac{k \cdot P \cdot 60}{v \cdot 1000} \quad [kJ \cdot mm^{-1}] \quad (2.13)$$

kde: k – tepelná účinnost přenosu tepla [-]
 U – svařovací napětí zdroje [V]
 I – svařovací proud zdroje [A]
 v – rychlost svařování [mm·min⁻¹]
 P – výkon svařovacího zdroje [W]

Působením tohoto tepla je ovlivněno ochlazování vzniklého svarového spoje, a tím i jeho velikost a výsledné mechanické vlastnosti. Pro vytvoření přídavného tepla je možné použít různé zdroje, kdy každý má své přednosti a nevýhody. Dále mají tyto zdroje uplatnění při pájení, vlastním svařování a tepelném zpracování.

a) Indukční ohřev

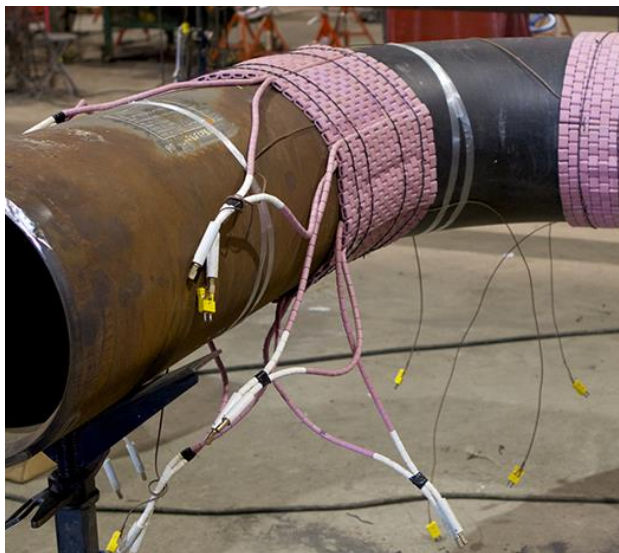
Zvyšování teploty svařence je dosaženo bezkontaktně pomocí jevu elektromagnetické indukce a principu vířivých proudů. Aplikace tohoto typu ohřevu je buď ve formě indukčních pecí, nebo jako lokální ohřev pomocí indukčních cívek a smyček (Obr. 24). Do induktoru (cívka kolem ohřivané součásti) je přiveden střídavý proud. Vzniká elektromagnetické pole, které uvnitř vodivého svařence indukuje vířivé proudy, které svými ztrátami generují teplo ohřívající součást od jádra k povrchu. To sebou nese jisté výhody, především ve vyšší účinnosti, rychlosti ohřevu, možnosti lokalizace tepla a v omezení oxidace povrchu. Hlavní nevýhodou představuje vyšší cena této technologie.



Obr. 24 Indukční ohřev [50]

b) Odporový ohřev

Teplo při této metodě vzniká průchodem elektrického proudu přes odporový drát. Množství vyprodukovaného tepla je dáno Joulovým zákonem v závislosti na elektrickém odporu materiálu, dodaného elektrického proudu a době trvání. Konkrétní aplikace jsou stacionární elektrické odporové pece anebo mobilní zdroje elektrického proudu s keramickými tvarovkami, do kterých jsou vloženy již zmíněné odporové dráty (Obr. 25). Keramika je zahřívána a sáláním předává teplo na povrch temperovaného dílce. Výhodami tohoto ohřevu je velmi přesné řízení ohřívacího a ochlazovacího cyklu podle technologického postupu, dostatečná flexibilita v případě mobilních pracovišť tepelného zpracování a možnost navazování různých topných těles za sebe (dečky, lamely, tvarovky, atd.), což umožňuje současně zpracovávat i rozdílné tvary a tloušťky materiálu. Nevýhodou představuje časová náročnost celého procesu při rovnoměrném ohřevu a také to, že při pomalém ohřevu a vlivem vedení tepla v materiálu je zamezeno čistě lokálnímu ohřevu v oblasti svaru.



Obr. 25 Ohřev odporovými dečkami [51]

c) Ohřev plamenem

Jedná se o jeden z nejjednodušších a často používaných bodových zdrojů tepla, kdy je zahřívání materiálu prováděno teplem vzniklým při redoxní exotermické reakci hořlavé a oxidační komponenty. Konkrétně se jako hořlavina používá acetylen, propan-butan nebo zemní plyn ve směsi s kyslíkem. Takto vzniklým plamenem je pohybováno po povrchu ohřívané součásti (Obr. 26). Velkou výhodou je operativní použití bez nutnosti zdroje elektrické energie, postupné a pomalé ohřívání při použití zemního plynu a propan-butan a dále relativně nízká cena. Při použití kyslíko-acetylenového plamene je nutné dbát na správné nastavení plamene a vzhledem k vysoké intenzitě tepla se také vyvarovat spálení povrchu ohřívajícího materiálu. Nevýhodou je obtížná korekce průběhu teploty, velmi široká ohřívající oblast znemožňující fokusované zahřívání pouze ve svařované oblasti, oxidace povrchu působením plamene a zvýšené bezpečnostní riziko při práci s hořlavinami v tlakových nádobách.



Obr. 26 Ohřev plamenem [52]

d) Ohřev obloukovou metodou

Obloukovou metodou se rozumí technologie využívající elektrického proudu, přesněji energie elektronů, která je při dopadu na povrch součásti přeměněna na teplo. Jedná se především o metody MIG/MAG a TIG. Používají se spárované s jinou svařovací technologií, bývají umístěny v její těsné blízkosti a jako celek vytvářejí kombinovanou hybridní metodu svařování, která využívá jejich dílčích předností. Jsou to například kombinace laseru a obloukové metody TIG nebo MIG/MAG (Obr. 27), plazmového svařování a elektrického oblouku nebo laseru a plazmy. Při ohřívání elektrickým obloukem jsou parametry technologie nastaveny tak, aby nedocházelo k tavení ohřívajícího materiálu, ale pouze k jeho ohřevu. Avšak vlivem současného dodávání energie oběma zdroji do tavné lázně dochází k vnesení většího množství tepla, a tím se výsledná svařovací lázeň rozšiřuje. Tento velmi fokusovaný způsob předehřevu je velice rychlý, účinný, relativně levný a výhodný z důvodu předehřívání a svařování v jednom technologickém kroku.



Obr. 27 Hybridní technologie s MAG předehřevem [53]

2.7.4 Snímání teploty [12], [47], [54], [55], [56]

Velmi důležitou problematikou při měření teploty interpass, určování nebo ověřování teploty přehřevů je přesné zjištění teplotních cyklů ve vyšetřovaných bodech svaru a TOO. Toho je docíleno měřením průběhu teploty v čase. Některé metody jsou uvedeny zde:

a) Termokřídý a termolaky (Obr. 28a)

Tento způsob určování povrchové teploty je založen principu změny skupenství při dosažení určité teploty. Ve zkoumané oblasti se nanese barva o přesně definované teplotě, přibližně od 100 °C do 1000°C, pro kterou je křída určena. Při jejím dosažení ($\pm 1\%$ z udávané hodnoty) dojde ke zkapalnění a tím ke změně barvy.

b) Termočlánek (Obr. 28b)

Měření teploty pomocí tohoto teplotního senzoru pracuje na principu termoelektrického (Seebeckova) jevu. Termočlánkem jsou dva materiálově rozdílné, na jednom konci spojené dráty, které mezi sebou vlivem ohřívání a termoelektrického jevu generují malé měřitelné elektrické napětí v řádu mikrovoltů. Toto napětí (rozdíl elektrických potenciálů) je měřeno na svorkách volných konců drátů voltmetrem s vhodným rozlišením a zjištěná hodnota je podle známé závislosti přepočtena na teplotu v místě spojení drátů. Podmínkou je nutnost rozdílu teplot na opačných koncích drátů a znalost teploty zařízení (svorky volných konců). Rozsah měřitelných teplot je od -268°C až po 2316°C při přesnosti měření $\pm 1 \div 2^\circ\text{C}$ v závislosti na použitých materiálech (železo, nikl, platina, konstantan, wolfram, aj.). Při svařování je dvojice drátů, obvykle o průměru 0,5 mm, přivařena nebo připájena ke zkoumanému místu TOO (i svarového kovu) a zaznamenává se celý teplotní cyklus.

c) Termokamery (Obr. 28c)

Tento způsob měření teploty funguje na principu emisivity vyzařovaného záření z povrchu pozorovaného objektu až do teplot kolem 1800°C při dobré přesnosti měření přibližně 0,05 °C. Zjednodušeně je elektromagnetické infračervené záření snímáno detektorem zařízení, následně je digitalizováno a převedeno na snímek ukazující rozložení a intenzitu vyzařovaného tepla. Problémem u svařování je však zjištění a zadání emisivity, s kterou má zařízení počítat, protože při svařování vznikají na povrchu různé oxidy a další sloučeniny, které se v jejich emisivitě velmi liší. Z tohoto důvodu je nutné brát výsledky termokamery ze svařovacího procesu pouze jako orientační.



a) termokřídý



b) termočlánek



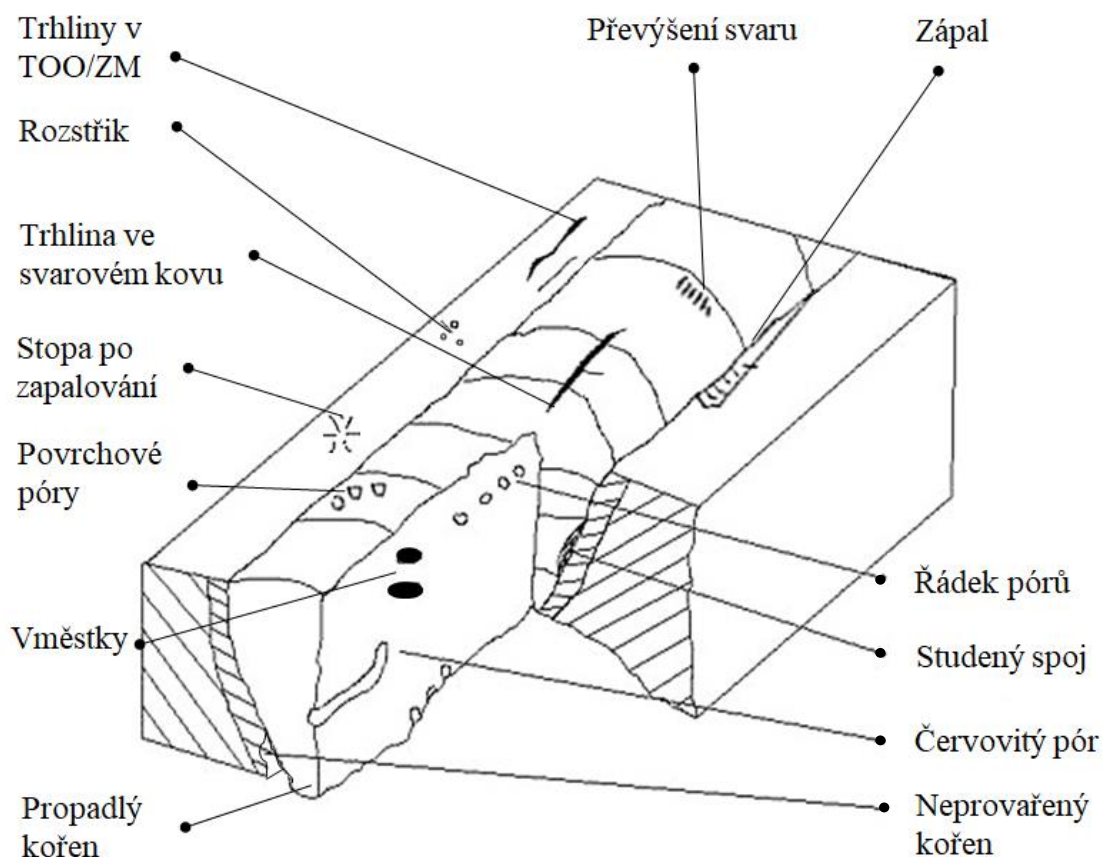
c) termokamera

Obr. 28 Způsoby měření teploty [47]

2.8 Vady svarů [12], [57], [58]

Při spojování materiálů všemi svařovacími metodami je možný vznik určitých defektů, které mohou ovlivnit výsledné mechanické a estetické vlastnosti svarového spoje. Obecně se jedná o kritická místa, kde je vlivem těchto nedokonalostí zvýšená koncentrace napětí při zatěžování, což může vyvolat snížení únosnosti, únavové selhání nebo křehký lom svařovaného dílce. Vadou jsou myšleny nespojitosti svarů a jejich okolí nebo odchylky jejich geometrie od normálního požadovaného stavu. Touto problematikou se zabývají především normy ČSN EN ISO 6520, ČSN EN 5817 a ISO/TS 17845, které na základě velikosti, tvaru, četnosti a umístění vad specifikují do jaké míry je jaká vada přípustná či nikoliv. Vady se mohou vyskytovat viditelně na povrchu součásti nebo pod jejím povrchem, což je zjistitelné jednou nebo více NDT/DT zkouškami (kapitola 2.9). Takto nalezený a vyhodnocený nedostatek je podle určitých kritérií nutno opravit nebo vyřadit celý dílec v případě nerealizovatelnosti opravy.

Mezi povrchové vady se řadí různé typy trhlin, pórů a zápalů. Dále mezi ně patří různé geometrické nedostatky vnějšího ohledání svaru, jako jsou propadlý nebo neprovařený kořen, převýšení, přesazení a nepravidelnost svaru, rozstřík tekutého kovu a jiné. Vnitřní vady mohou být například staženiny, studené spoje, vměstky (kovové, oxidické nebo struskové) nebo vnitřní dutiny, bubliny anebo póry. Dalším kritériem je hodnocení z hlediska prostorového rozložení vad, kdy se jedná o dělení na bodové, plošné nebo objemové defekty. Některé svarové vady a jejich lokalizace ve svarovém spoji je na obrázku 29.



Obr. 29 Svarové vady [57]

2.9 Zkoušky svarových spojů, materiálu a procesu svařování [10], [17], [45]

Při vývoji a provozu výrobků je zapotřebí zajistit jejich určitou míru bezpečnosti a spolehlivosti. Proto jsou nutností určité kontroly a zkoušky, zejména v kritických místech a slabinách výrobků. Jedná se především o svarové spoje, na které se vztahují určité kontroly a zkoušky specifikované v řadě mezinárodních norem. Pro vyhodnocení výsledných svarových spojů je používáno dvou hlavních přístupů. Jde o nedestruktivní (NDT – Non-destructive testing) a destruktivní (DT – Destructive testing) zkoušení svarů. V prvním případě jde o způsob zjišťování vad ve zkoušeném materiálu bez poškození celistvosti a funkčnosti zkoumané součásti a to na základě měřitelných fyzikálních změn vznikajících za přítomnosti určité vady. Zde je zapotřebí proškoleného personálu a speciálních kalibrovaných měřicích zařízení. V druhém případě se jedná o preparaci materiálových vzorků přímo ze zkušebních součástí. Tyto vzorky jsou dále podrobeny určitým laboratorním zkouškám pro určení nebo ověření požadovaných mechanických vlastností svarového spoje. Mezi základní NDT zkoušky se řadí:

- Vizuální metoda – určená pro povrchové vady
- Kapilární metoda – pro vady otevřené k povrchu
- Magnetická prášková metoda – detekuje povrchové a některé podpovrchové vady
- Metoda vířivých proudů – zjišťování povrchových vad
- Prozařovací metoda – pomocí RTG záření proniká materiálem a detekuje vnitřní vady
- Ultrazvuková metoda – pro vnitřní vady

Mezi zkoušky destruktivní patří:

- Tahová zkouška podélná a příčná
- Zkouška tvrdosti podle Vickerse, Rockwella, Brinella aj.
- Zkouška makro a mikrostruktury
- Zkouška rázem v ohybu pomocí Charpyho kladiva
- Zkouška ohybem
- Další zkoušky jako korozní zkoušky, zkoušky tečení atd.

2.9.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [17], [59], [60]

Vyhodnocení tvrdosti materiálu je možné různými metodami. Nejpoužívanějšími staticko-plastickými zkouškami jsou zkoušky podle Brinella, Rockwella a Vickerse. Poslední jmenované zkoušení tvrdosti podle Vickerse je předmětem normy ČSN EN ISO 6507-1. Jedná se o vtlačování přesně definovaného indentoru do čistého a vyleštěného povrchu zkoušeného materiálu. Vnikajícím tělesem je v tomto případě pravidelný čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou a s vrcholovým úhlem 136° vyrobený z diamantu (Obr. 30). Vtlačování probíhá kolmo k povrchu zkušební tělesa s předem definovanou silou a rychlostí zatěžování po danou dobu. Zatížení je voleno v závislosti na zkoumaném materiálu a předmětu zkoumání od 0,1 N při měření mikrotvrdosti až po zatížení 1000 N. Velikost zatížení definující zkoušku je obsažena v označení výsledné tvrdosti, jako například běžně používané HV 30 značí zatížení 30 kg. Doba zatěžování je od 2 do 10 sekund s následnou výdrží 10 až 15 sekund, případně je nutné uvést, zdali je doba delší.

Po odtížení je výsledkem čtyřhranný vtisk o úhlopříčce v intervalu 0,020 mm až 1,400 mm. Délka úhlopříček je změřena a je spočtena jejich střední hodnota neboli aritmetický průměr. Výsledná hodnota tvrdosti je bezrozměrné číslo, které je úměrné podílu zatížení a velikosti měřené plochy vtisku. Má tedy napěťový charakter a určí se podle následující rovnice:

$$HV = \frac{1}{9,80665} \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad [-] \quad (2.14)$$

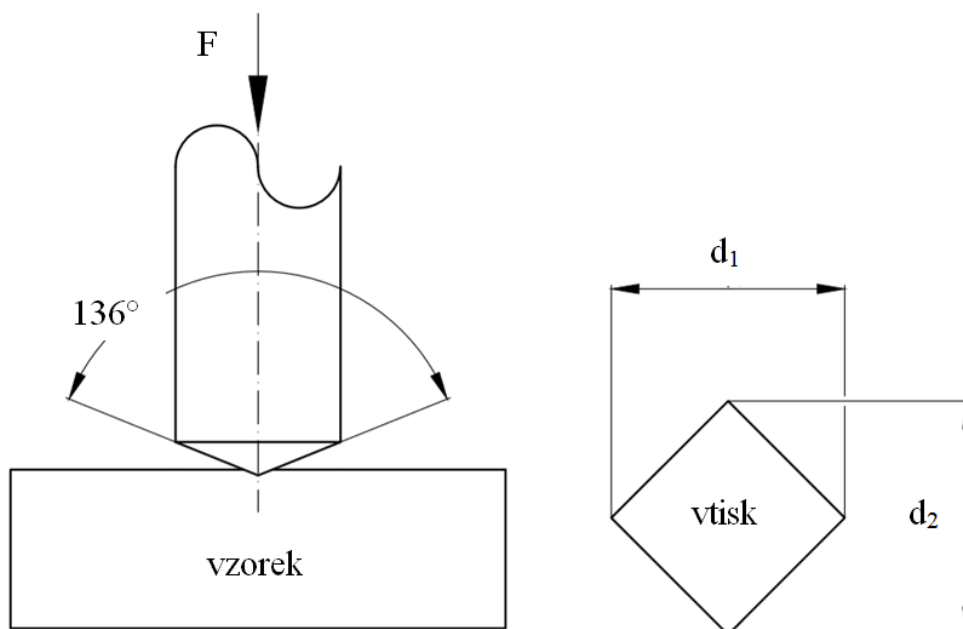
kde: F – zatěžující síla [N]
 d – aritmetický průměr délky úhlopříčky vtisku [mm]

Uspádněním je použití výpočetních tabulek ve čtvrté části této normy, které na základě zatížení a průměrné délky uhlopříčky určují hodnotu tvrdosti.

Pro korektnost zkoušky je nutné dodržet určité podmínky:

- Zkouška probíhá při pokojové teplotě $10 \div 35 \text{ }^\circ\text{C}$
- Vzorek musí být pevně umístěn na tuhé podložce
- Je nutné mít tloušťku vzorku alespoň 1,5x větší než výslednou délku uhlopříčky vtisku a nesmí dojít k deformacím na protilehlé straně vtisku

S klesajícím zatížením klesá velikost vtisku a roste chyba při odečítání délky uhlopříček, ale i přesto se jedná o velmi přesnou metodu s malým zátěžovým ovlivněním, která je vhodná pro měření širokého spektra materiálů. Výhodou je především malá plocha vtisku umožňující při malém zatížení měřit i tvrdosti povrchových vrstev či odlišných struktur, například v TOO.



Obr. 30 Schéma zkoušky tvrdosti podle Vickerse [60]

2.9.2 Tahová zkouška [16], [60], [61], [62], [63]

Zkouška slouží pro určení pevnostních a deformačních charakteristik materiálu a je specifikována normou ČSN EN ISO 6892 – 1. Spočívá v tahovém namáhání vzorku od nulové hodnoty až do mezního stavu lomu, při snímání prodloužení a působící síly. Může být posuzována ze dvou hledisek. Prvním je posuzování deformační rychlosti způsobenou působícím napětím a druhým způsobem je sledování rychlosti napětí. V úvahu je brán vliv okolního prostředí, proto zkouška probíhá při pokojové teplotě 10°C až 35°C při dané rychlosti a typu zatěžování, na předem specifikovaných tahových vzorcích. Zkušební tělesa mohou být různých tvarů a rozměrů v závislosti na zkoumaném kovovém výrobku. Přednostně se vyrábějí tahová tělesa s určitým přímým vztahem mezi délkou na začátku zkoušky L_0 a počátečním průřezem materiálu S_0 . Ty se pak označují jako poměrná zkušební tělesa s koeficienty $k = 5,65$ nebo $11,3$ použitými v rovnici 2.17. Při porovnávání výsledků, zejména tažnosti, se musí brát ohled na tyto poměrové odlišnosti. Upínací konce vzorků jsou většinou širší než zkoušená délka a jsou rozměrově určeny způsobem upnutí v trhacím stroji (Obr. 32). Musejí však plynule přecházet do zkoušené délky. Takto upravená tělesa jsou vložena do trhacího zařízení mezi dva příčníky, které ideálně vyvíjejí jednoosý stav napjatosti. Výsledkem je tahový diagram (Obr. 31) určující závislost mezi tahovou silou a prodloužením mezi ryskami L_u . Z toho diagramu je možné zjistit základní materiálové charakteristiky:

- Výpočet délky poměrného zkušební tělesa

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \quad [\text{mm}] \quad (2.17)$$

- Poměrné prodloužení ε

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [-], \text{ kde: } \quad \Delta L - \text{prodloužení zkušební tyče} \quad [\text{mm}] \quad (2.18)$$

- Youngův modul pružnosti v tahu E v lineární oblasti tahového diagramu (Hookův zákon)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [\text{GPa}], \text{ kde: } \quad \sigma - \text{působící napětí} \quad [\text{MPa}] \quad (2.19)$$

- Mez kluzu R_e se dělí na horní a dolní mez kluzu R_{eh} a R_{el} . V případě nevýrazné meze kluzu se určuje tzv. Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. Získáme ji jako průsečík tahového diagramu s rovnoběžkou, která vychází ze smluvní hodnoty poměrné deformace 0,2 % ε a je rovnoběžná s lineární oblastí podle Hookova zákona. Do meze kluzu se jedná o oblast elastických deformací, při překročení dojde k trvalým deformacím plastickým.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}], \text{ kde: } \quad F_e - \text{síla působící na mezi kluzu} \quad [\text{N}] \quad (2.20)$$

$$S_0 - \text{počáteční průřez tělesa} \quad [\text{mm}^2]$$

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [\text{MPa}], \text{ kde: } \quad F_{p0,2} - \text{smluvní síla} \quad [\text{N}] \quad (2.21)$$

- Mez pevnosti R_m

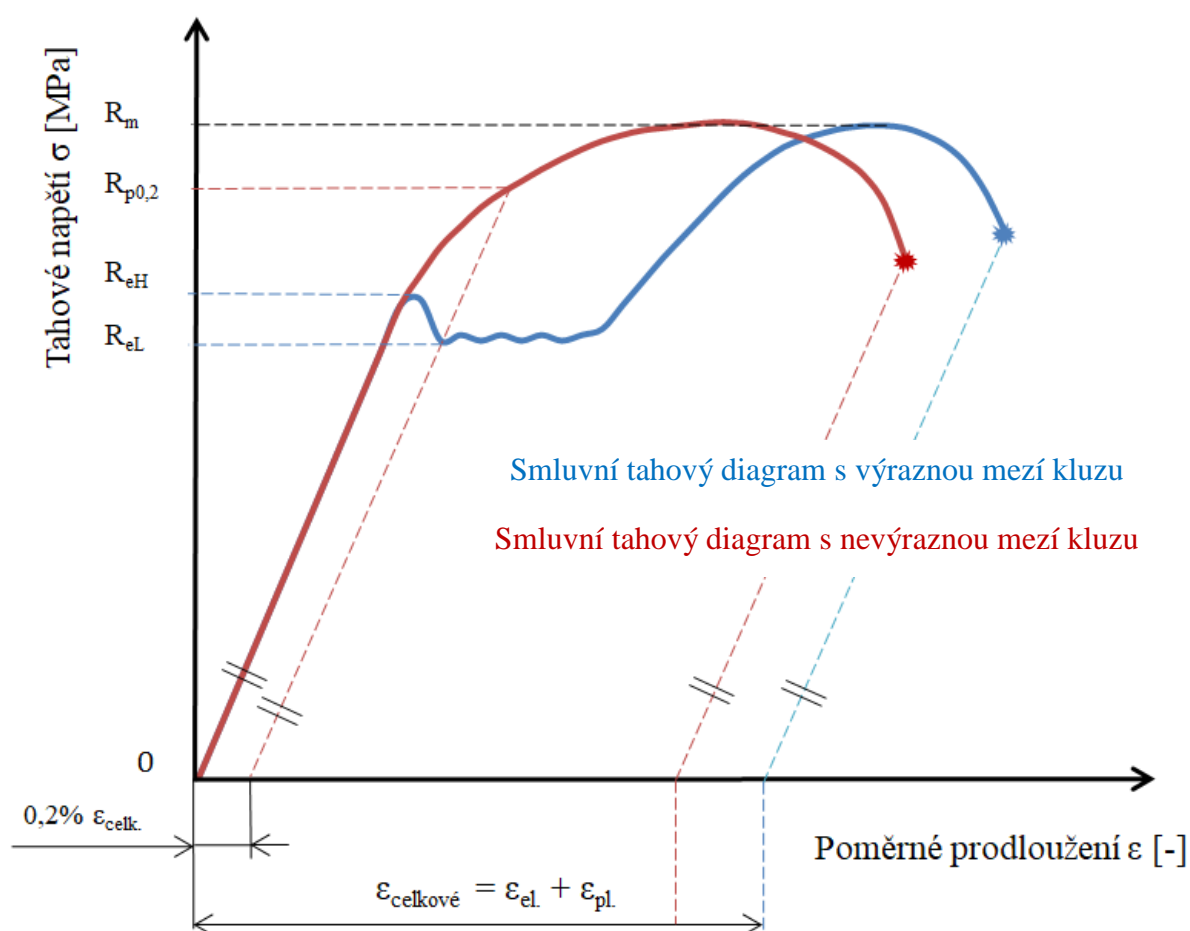
$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]}, \text{ kde: } F_m - \text{síla působící na mezi pevnosti [N]} \quad (2.22)$$

- Tažnost A

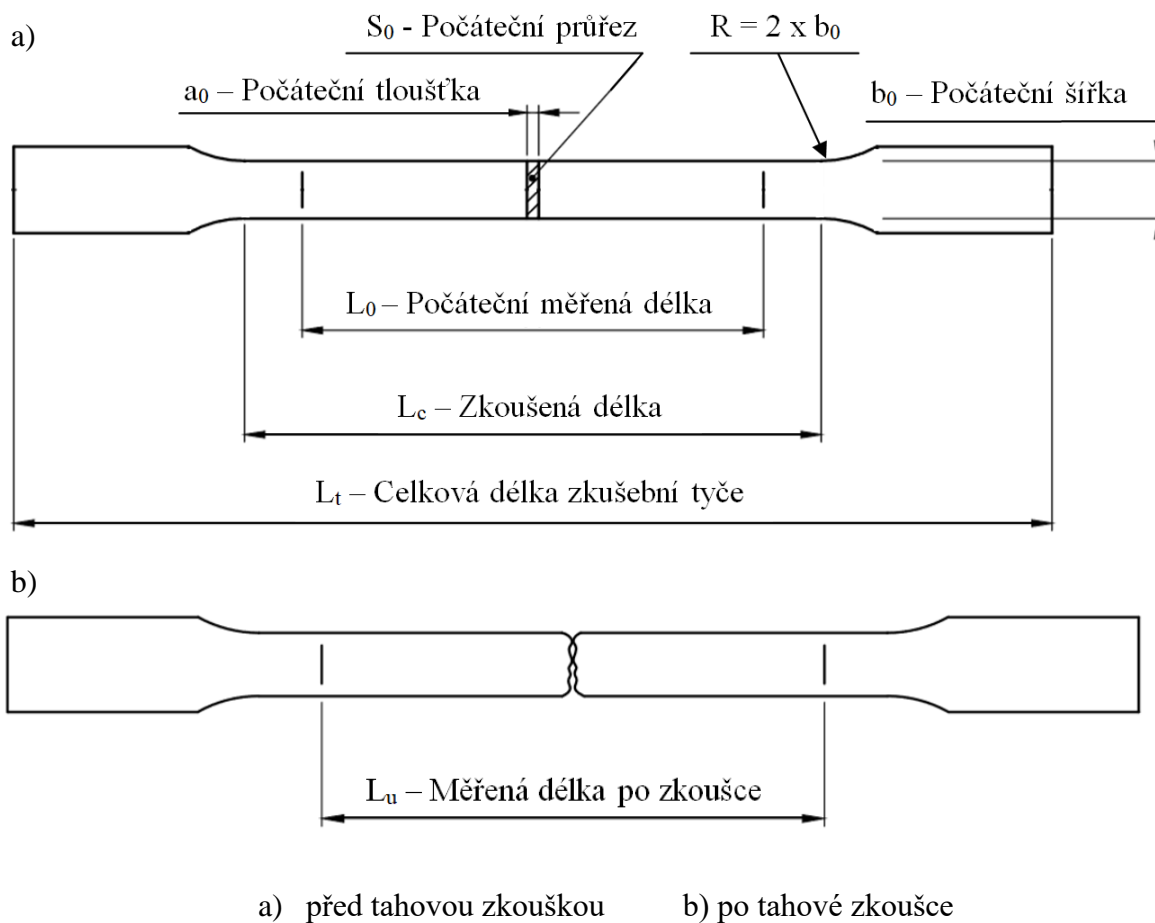
$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.23)$$

- Zúžení (Kontrakce) Z

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]}, \text{ kde: } S_u - \text{konečný průřez zkušebního tělesa [mm}^2\text{]} \quad (2.24)$$



Obr. 31 Smluvní tahový diagram [60]



Obr. 32 Ploché zkušební těleso [62]

2.9.3 Metalografické zkoušky [12], [17], [60]

Pro hlubší pochopení výsledků mechanických zkoušek je nutné nahlédnutí přímo do samotných vzorků. Tyto zkoušky jsou tedy zaměřeny na zobrazení vnitřních struktur materiálů a k nahlédnutí do jejich nitra je nutná příprava metalografických vzorků. Ta probíhá následovně. Vybrané reprezentativní místo je vypreparováno s ohledem na minimální mechanickou nebo teplotní degradaci zkoumaného materiálu. Tento kousek je pro lepší manipulaci často ustaven do vhodného nosiče a spolu s ním je na pozorované ploše broušen a leštěn až do zrcadlového lesku. Následuje naleptání povrchu pomocí leptacího činidla, které chemickými procesy vyvolá povrchový reliéf struktury, který je již možné hodnotit a dále zkoumat.

Podle velikosti přiblížení můžeme u vzorků pozorovat makrostrukturu nebo při větším zvětšení mikrostrukturu. Pohled na makrostrukturu je možný při malém zvětšení do 30x za použití lupy, stereomikroskopu nebo pouze vizuálním pozorováním pouhým okem. Lze hodnotit například určité vady, makrogeometrii svarových spojů a velikosti pásem TOO. Větším zvětšením na optických či jiných mikroskopech (30x ÷ 2000x) je pozorovatelná mikrostruktura materiálu. Zde jsou viditelné základní fáze a struktury, z kterých je materiál tvořen, jejich množství podíl v pozorované oblasti a případné množství vměstků. Dále je hodnotitelná i velikost samotných zrn.

2.9.4 Schlierová metoda zviditelnění proudění plynu [64], [65]

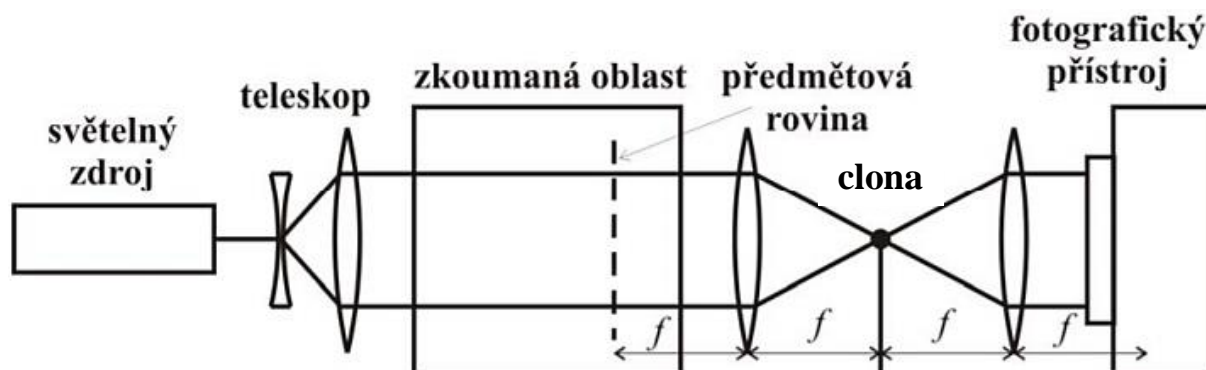
Při svařování hrají ochranné plyny a jejich dynamické chování významnou roli na výsledný svarový spoj. Volba plynu, nastavení jeho průtoku, volba velikosti hubice či difuzoru a další jiné vstupní parametry musí brát svářečí inženýr v potaz. Pro usnadnění a pochopení problematiky proudění plynů a jejich interakce s žhavým materiálem při svařování se nabízí různé metody jejich zviditelňování. Patří mezi ně například: stínová metoda, Mach-Zehnderův interferometr a Schlierová metoda.

Poslední zmíněná metoda je, stejně jako ostatní, založena na rozdílném indexu lomu světla v různých plynných prostředí při jejich velmi malých rozdílech v řádu 10^{-4} a menších. Dále je pro teoretický výpočet za potřebí hodnota refraktivity daného plynu a výsledkem je první derivace hustoty. Obecná rovnice výpočtu je ve tvaru:

$$n - 1 = K \cdot \rho \quad (2.25)$$

kde: n – index lomu světla [-]
 K – měrná refraktivita prostředí (konstanta Gladstone-Dale) [cm^3/g]
 ρ – hustota prostředí [g/cm^3]

Po praktické stránce jde při této metodě o to, že se do pozorované oblasti vyše přes teleskop rovnoběžný paprsek světla vytvořený zářičem a dvěma optickými čočkami, rozptylkou a spojkou. Ten je při průchodu přes zkoumané prostředí plynů s rozdílným indexem lomu mírně rozptýlen a dále je fokusován do ohniska pomocí druhé optické čočky, spojky o určité ohniskové vzdálenosti. Další spojka umístěná za ohniskem se stejnou ohniskovou vzdáleností pošle světelný signál do koncové kamery nebo objektivu fotoaparátu. Při umístění clony do ohniska před poslední čočkou nastane odstínění určité části rozptýleného světla. Toto zobrazení je možné nastavit a ovlivnit tvarem použité clony, kruhová clona nebo optický nůž. Prošlý paprsek je pak zobrazen přes kameru nebo fotoaparát jako snímek se světlými a tmavými místy, neboli stíny v pozorované oblasti, což vytváří pozorovatelný prostorový efekt proudícího plynu. Provedení tohoto experimentu je možné i při jiných konfiguracích sestavení než jsou na obrázku 33. Pro všechna však platí, že je relativně obtížné přesné nastavení všech součástí schématu.



Obr. 33 Schéma Schlierové metody zviditelnění proudění plynu [64]

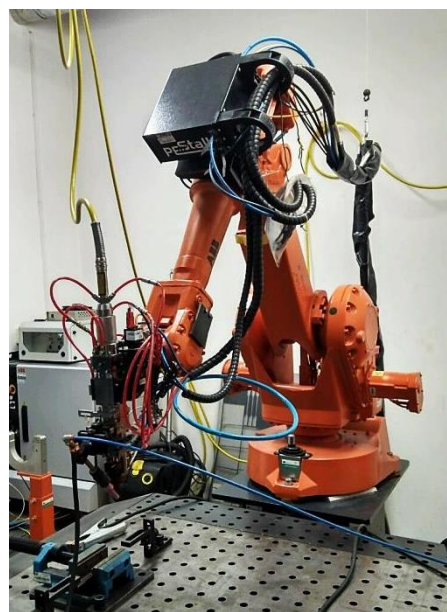
3 EXPERIMENT

Tato část je zaměřena na praktickou stránku celé práce. Jsou v ní popsána pracoviště a zařízení, výpočty a postupy provedení experimentu a následně jsou vyhodnoceny vzorky a výsledky zkoušek. Experimenty se uskutečnily na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd v Brně v laboratoři laserového svařování, respektive i ve svařovně Ústavu strojirenské technologie. Zkoušky tvrdosti podle Vickerse byly provedeny ve spolupráci s Ústavem materiálových věd a inženýrství.

3.1 Použitá zařízení [40], [66], [67], [68]

Pro provedení tohoto experimentu bylo využito velkého množství různých zařízení sloužících pro obrazový záznam, vyhodnocování materiálových charakteristik, pro preparaci vzorků a dalších úkonů. Přístroje přímo účastníci se na experimentu můžeme však shrnout pouze na laserový zdroj, manipulační robot s laserovou svařovací hlavou a předehřevem, zdroj obloukového předehřevu a zdroj oblouku metody MAG.

- **Manipulačního robot IRB 2400/16 firmy ABB [66]**
Tento šestiosý manipulační robot od firmy ABB je velmi rozšířen ve velkém počtu průmyslových odvětví (Obr. 34). Vyniká především svou přesností, spolehlivostí a univerzálností. Dosahuje přesnosti, respektive polohové opakovatelnosti 0,05 mm (0,35 mm je opakovatelnost trajektorie) a je použitelný pro různé aplikace, jako jsou svařování, řezání, broušení, leštění a manipulace. Při manipulaci je i při své 380 kg hmotnosti omezen nosností ramene 20 kg při prostorovém dosahu až 1,55 m. V tomto experimentu je na jeho rameni upevněna laserová svařovací hlava napojená na zdroj záření a spolu s ní také hořák obloukového zařízení TIG určený pro předehřev/dohřev.
- **Laserový zdroj Yb:YAG Laser - IPG YLS 2000 [67]**
Jedná se o zdroj laserového záření od firmy IPG použitý pro svařování v experimentu. Tento vláknový pevnolátkový laser umožňuje modulární uspořádání, což dává konkrétně výkon až 2000 W (Obr. 35). Jeho vlnová délka je dána použitým aktivním prostředím Yb:YAG dopovaného ytterbiem, které generuje vlnovou délku o $1070 \div 1080$ nm (infračervené záření). Účinnost tohoto vodou chlazeného zdroje je přibližně



Obr. 34 Robot IRB 2400/16



Obr. 35 Laserový zdroj YLS 2000

30 % při kontinuálním nebo pulzním režimu. Schopnost fokusace udávaná parametrem BPP je 0,34 mm·mrad. Spolu s manipulačním robotem IRB 2400/16 mohou být osazeni svařovací nebo řezací hlavou. V tomto experimentu byla použita laserová svařovací hlava Precitec YW30 s ohniskovou vzdáleností 200 mm a průměrem spotu 0,42 mm.

- **Svařovací zdroj TIG – Fronius MagicWave 1700 [68]**

V tomto experimentu nebylo použito jako zdroj pro tvorbu svarových spojů, ale sloužilo pro vznik oblouku, jakožto zdroje tepla pro předehřev či dohřev. Jde o inverterový digitálně řízený zdroj elektrického proudu, který vyniká svou nízkou hmotností a malými rozměry (Obr. 36). Elektrický proud je nastavitelný jako stejnosměrný nebo střídavý v rozmezí 3 až 170 A. Dále umožňuje velké množství přídatných funkcí pro zapalování a hoření oblouku. Hořák tohoto zařízení byl pevně umístěn na rameni svařovacího robota spolu s laserovou hlavou. Spouštění oblouku bylo možné pomocí dálkového manuálního ovládání.



Obr. 36 Fronius MagicWave 1700

- **Svařovací zdroj MAG – Fronius TransPulsSynergic 4000 [40]**

Toto zařízení bylo použito jako alternativa k hybridní technologii, laserovému svařování s předehřevem či dohřevem metodou TIG. Jedná se o digitalizovaný synergický inverterový svařovací zdroj řízený mikroprocesorem umožňující svařování ve zkratovém, sprchovém a pulzním režimu přenosu kovu. Umožňuje svařování téměř všemi běžnými obloukovými metodami MIG/MAG, TIG, MMA, ale z důvodu větších rozměrů a hmotnosti je určen spíše pro stacionární použití než pro práci v terénu. Výkonové rozpětí 3 ÷ 400 A / 14,2 ÷ 34 V umožňuje svařování různých kovových materiálů téměř v každém průmyslovém odvětví. V konfiguraci spolu s podavačem drátu Fronius VR 4000 (Obr. 37) a automatickým posuvovým zařízením Fronius Automation FRC-4 tvoří automatizovaný svařovací celek, schopný zaručit určitou reprodukovatelnost a vysokou preciznost svarových spojů.



Obr. 37 Fronius TransPulsSynergic 4000

3.2 Materiál a volba procesních parametrů [8], [73]

Materiálem je ořezávací ocel Hardox 450 od výrobce SSAB dodaná v plechu o tloušťce 2 mm. K dosažení této tloušťky bylo docíleno válcováním za studena. Chemické složení bylo prokázáno inspekčním certifikátem EN 10 204 – 3.1 od firmy SSAB, v příloze č. 5. Výrobce garantuje určité chemické složení a v jeho prospektech specifikuje maximální obsahy jednotlivých prvků v oceli. Tavba použitá pro experiment chemicky vyhovuje specifikaci výrobce, jak je vidno v tabulce 2. Vyhovuje i v případě mechanických vlastností v tabulce 3, přesněji v hodnotě meze pevnosti, která podle atestu dosahuje hodnoty 1455 MPa u vzorků 250 x 20 mm. Toto bude ověřeno tahovou zkouškou v kapitole 3.6. V tabulce 2 byly pro výpočet uhlíkových ekvivalentů zvoleny vzorce 2.2 (C_e IIW neboli CEV) a 2.3 (CET).

$$CET = 0,171 + \frac{1,20}{10} + \frac{(0,03 + 0,15)}{20} + \frac{0,03}{40} = 30 \text{ hm. \%}$$

$$CEV = 0,171 + \frac{1,20}{6} + \frac{(0,03 + 0,01)}{5} + \frac{(0,03 + 0,15)}{15} = 39 \text{ hm. \%}$$

Tab. 2 Chemické složení materiálu Hardox 450 podle inspekčního certifikátu 3.1[8]

Materiál	Chemické složení (komponenty v hm. %)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Hardox 450 (max. množství)	0,180	0,25	1,30	0,015	0,004	0,10	0,10	0,04	0,0030
Tavba použitá v experimentu	0,171	0,20	1,20	0,009	0,002	0,03	0,03	0,00	0,0016
Materiál	Chemické složení (komponenty v hm. %)						Cekv. [hm. %]		
	V	Ti	Cu	Al	Nb	N	∑ [%]	CET	CEV
Hardox 450 (max. množství)	–	–	–	–	–	–	1,99	0,33	0,44
Tavba použitá v experimentu	0,01	0,04	0,15	0,038	0,000	0,003	1,88	0,30	0,39

Jak je vidět v tabulce 2, tak dobré kalitelnosti a prokalitelnosti materiálu není docíleno výrazným legováním, ale pouze určitým obsahem manganu a relativně nízkým obsahem uhlíku, malou tloušťkou plechů a intenzivním ochlazováním. Mangan jako levný austenitotvorný prvek je použit z důvodů zvýšení pevnosti a tvrdosti při zachování dobré houževnatosti.

Dále zlepšuje prokalitelnost materiálu a díky tvorbě stabilnějších sloučenin s kyslíkem a sírou, zamezuje vzniku nízkotavitelných eutektik. Nevýhodami je náchylnost ke zhrubnutí zrna a snížení teploty M_S , což vede k většímu obsahu zbytkového austenitu po kalení.

Tab. 3 Mechanické vlastnosti materiálu Hardox 450 [8]

Materiál	Nominální tvrdost [HBW]	Vrubová Houževnatost KV [J]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [Mpa]	Mez pevnosti R_m [Mpa]	Tloušťka t [mm]
Hardox 450	425-475	50 J při -40°C *	1200 **	1400	0,7 – 2,1

*hodnota nárazové práce pro plechy a tabule neválcované za studena

** hodnota není výrobcem garantována

Procesní parametry a hodnoty vneseného tepla pro jednotlivé varianty jsou popsány níže, zbylé hodnoty jsou v tabulce 4:

a) Procesní parametry laseru byly nastaveny u všech svařovaných vzorků stejně. Hodnoty výkonu a posuvu byly určeny z předchozích zkušeností a byly ověřeny na menších zkušebních vzorcích. Výpočet tepelného příkonu Q_1 (vztah 2.13) je pro **svařování laserem bez přídavného tepla**.

- Výkon laseru $P = 1200\text{W}$
- Režim laseru – kontinuální
- Rychlost posuvu $v_1 = 1200\text{ mm/min}$
- Průtok ochranného plynu (100% Argon 4.6) $Q_{v1} = 17 - 18\text{ l/min}$
- Tepelná účinnost přenosu tepla technologie, $k_1 = 0,61 \div 0,65$, za předpokladu penetračního režimu svařování a v případě, že laserový paprsek prochází skrze materiál

$$Q_1 = \frac{k \cdot P \cdot 60}{v \cdot 1000} = \frac{0,625 \cdot 1200 \cdot 60}{1200 \cdot 1000} = 37,5\text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

b) Výpočet vneseného tepla Q_2 platí pro **svařování laserem s obloukovým přídavným teplem**. Výpočet je analogicky podobný pro všechny ostatní varianty s různým nastavením umístění a proudu. Procesní parametry obloukového předehřevu / dohřevu metodou TIG jsou v tabulce 4 a pro všechny platí následující:

- Rychlost posuvu je stejná jako v bodě a), $v_2 = 1200\text{ mm/min}$
- Průtok ochranného plynu pro TIG a laser (dvojitý ofuk 100% Argon 4.6), $Q_{v2} = 14 + 17,5\text{ l/min}$ (31,5 l/min)
- TIG elektroda WT 20, ϕ 2,4 mm – obsahující 2% oxidu thoria (červené značení)
- Tepelná účinnost přenosu tepla technologie, $k_2 = 0,6$
- Stejnoseměrný proud (DC) – přímá polarita (záporná elektroda na elektrodě)

$$Q_2 = Q_1 + \frac{k \cdot U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} = 37,5 + \frac{0,6 \cdot 20,5 \cdot 20 \cdot 60}{1200 \cdot 1000} = 49,8\text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

c) Procesní parametry obloukového **svařování metodou MAG** jsou uvedeny zde včetně výpočtu tepelného příkonu Q_9 .

- Rychlost posuvu, $v_9 = 550$ mm/min
- Průtok ochranného plynu (82% Argon + 18% CO₂) $Q_{V9} = 14$ l/min
- Přídavný materiál ESAB OK Autrod 12.51 (MAG elektroda), ϕ 1,0 mm
Jedná se o běžný přídavný materiál, avšak chemickým složením je velmi podobný experimentálnímu materiálu Hardox 450, příloha č. 3
- Tepelná účinnost přenosu tepla technologie, $k_9 = 0,8$
- Zkratový způsob přenosu kovu
- Stejnoseměrný proud (DC) – nepřímá polarita (záporná elektroda na ZM)

$$Q_9 = \frac{k \cdot U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} = \frac{0,8 \cdot 17,8 \cdot 105 \cdot 60}{550 \cdot 1000} = 163,1 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Tab. 4 Svařovací parametry a hodnoty vneseného tepla

Vzorek č.	Metoda	Nastavený (skutečný) proud I [A]	Nastavené (skutečné) napětí U [V]	Vnesené Teplo Q [J·mm ⁻¹] (procentuální rozdíl oproti vz. č. 1)	Poznámka
1	LASER	–	–	37,5	–
2	LASER + TIG	– / 20	– / 20,5	49,8 (+ 33 %)	předehřev
3	LASER + TIG	– / 40	– / 14,6	55,0 (+ 47 %)	předehřev
4	LASER + TIG	– / 60	– / 13,7	62,2 (+ 66 %)	předehřev
5	LASER + TIG	– / 20	– / 11,5	44,4 (+ 18 %)	dohřev
6	LASER + TIG	– / 40	– / 12,7	52,7 (+ 41 %)	dohřev
7	LASER + TIG	– / 60	– / 11,9	58,9 (+ 57 %)	dohřev
8	–	–	–	–	základní materiál
9	MAG	110 (105)	17,4 (17,8)	163,1 (+ 335 %)	–

I při kombinaci 60 A přehřevu metodou TIG s laserem je dosaženo více než 2,5 krát menší hodnoty vneseného tepla než u metody MAG. Pro vzorek 9 svařovaný obloukovou metodou MAG tedy nepoužijeme žádný přehřev na základě výpočtu uhlíkového ekvivalentu 0,30 hm. % (0,39 hm. %) < 0,45 hm. % a podle doporučení výrobce SSAB v tabulce přílohy č. 4.

Pro vzorky 1 až 7 je výpočet teploty přehřevu podle tabulek a vzorců 2.8 až 2.12 z normy ČSN EN 1011-2 A/B neadekvátní, protože jsou určeny pouze pro obloukové metody a ne pro laserové technologie. Navíc nejsou splněny podmínky týkající se rozmezí vneseného tepla, tloušťky plechů ani pevnosti svařovaného materiálu. V normě zabývající se laserovým svařováním ČSN EN 1011-6 neexistuje také žádná přímá teoretická a empirická metoda výpočtu teploty přehřevu.

Ačkoliv podle výše uhlíkového ekvivalentu i svařované tloušťky plechů není podle obecně známých pravidel požadován žádný přehřev či dohřev, musíme brát v úvahu výrazně nízký tepelný příkon u laserových technologií, který způsobuje odlišné chování svařenců a to především v problematice ochlazování. Pro představu je v rámci jiného výzkumu na ÚPT zjišťována přibližná rychlost ochlazování pro laserové a obloukové svařování. Rychlost chladnutí z 800 °C na 500 °C byla u laseru přibližně 500 °C/s a u TIG byla 10x menší na hodnotě 50 °C/s. Pro metodu MAG bude tato rychlost odhadově ještě menší.

Pro vzorky laseru a laseru + TIG je podle vstupních podmínek možná aplikace výpočtu teploty přehřevu podle Séfariána, vzorce 2.4 až 2.7. Je splněna podmínka chemického složení svařovaného materiálu, $C > 0,1$ hm. %. Avšak tento výpočet nezohledňuje tepelný příkon, ale pouze chemické složení a tloušťku materiálu. Výsledkem je spočtený přehřev téměř 88°C, který je nutné brát pouze jako minimální orientační hodnotu.

$$C_c = \frac{360 \cdot 0,171 + 40 \cdot (1,20 + 0,03) + 20 \cdot 0,03}{360} = 0,31 \text{ hm. \%}$$

$$C_s = 0,005 \cdot 2 \cdot 0,31 = 3,1 \cdot 10^{-3}$$

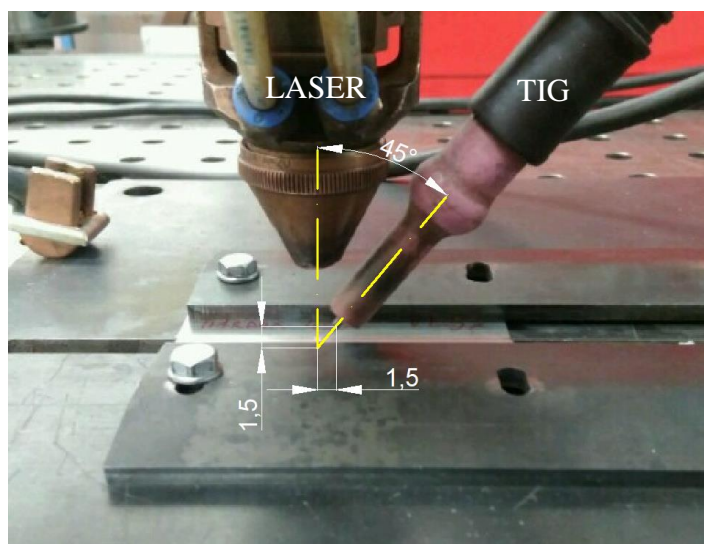
$$C_p = 0,31 + 3,1 \cdot 10^{-3} = 0,3131$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{0,3131 - 0,25} = 87,92 \text{ °C} \doteq 88 \text{ °C}$$

3.3 Příprava vzorků

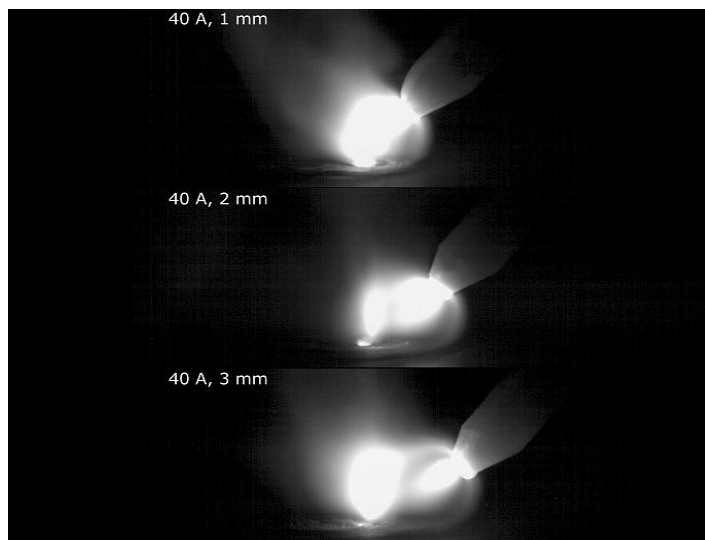
- **LASER + TIG**

Vstupní materiál byl plech o tloušťce 2 mm materiálu Hardox 450 v tabuli o rozměrech 1000 x 800 mm. Z něj byly laserem vyřezány zkušební vzorky 90 x 18 mm a 150 x 130 mm s ohledem na orientaci válcování plechu, aby byl omezen vliv možné anizotropie vlastností. Menší vzorky sloužily pro nastavení vhodných provozních parametrů při svařování a pro nastavení pozice MAG a TIG hořáku ve 3 osách. Při přibližování TIG hořáku k laserovému paprsku docházelo ke stabilizaci oblouku vznikající plazmou, která je elektricky velmi vodivá. Při zkracování vzdálenosti je pak pro oblouk výhodnější přejít přes tuto oblast než přes vrstvu ochranného plynu. Výsledkem je chování vyobrazené na obrázku 39. Nevýhodou přibližování je výrazné tepelné zatěžování wolframové elektrody. Nakonec se jako nejvhodnější ukázala pozice na obrázku 38. Větší vzorky sloužící pro samotný experiment byly na svařovaných hranách obroušeny brusným kotoučem o zrnitosti 120 od okují, oxidů FeO, vzniklých při laserovém řezání. Před vlastním svařováním neproběhly žádné další úpravy svarových ploch a povrchů plechů, avšak plechy nevykazovaly žádné výraznější znečištění.



Obr. 38 Nastavení pozice TIG hořáku

Vzorky byly upnuty pomocí upínek čtyřmi šrouby ke svařovacímu stolu. Trajektorie pohybu zařízení byla zkontrolována průjezdem bez svařovacího procesu, aby byla zajištěna totožnost dráhy hořáku s osou spáry mezi plechy. Na konci dráhy se vytvořil se bodový svar zajišťující konstantní nulovou velikost mezery. Poté byl proveden přejezd do startovací pozice a ručně přes dálkové ovládání byl spuštěn zdroj TIG oblouku. Následovalo spuštění programu řídicího pohyb průmyslového robota s upnutou svařovací technikou a zahájilo se svařování tupého svaru v pozici PA. Postupně se proces opakoval u všech sedmi vzorků s odlišnými parametry, jak je uvedeno v tabulce 4.



Obr. 39 Vliv vzdálenosti TIG oblouku od laserové svařovací hlavy na svařovací proces

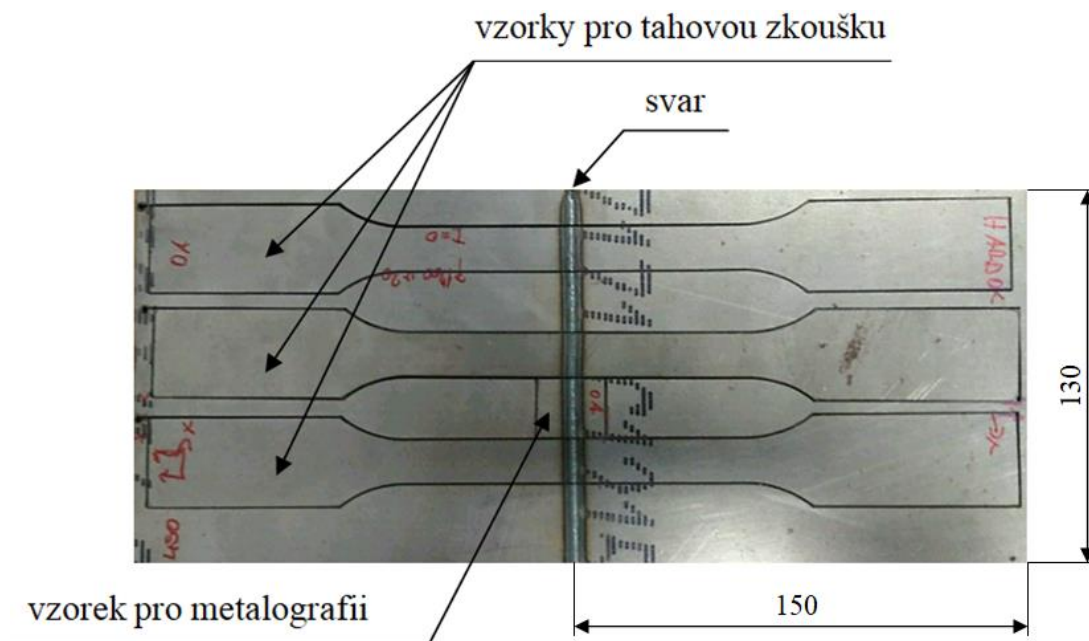
- **MAG**

Experimentální svařování metodou MAG bylo provedeno ve svařovně Ústavu strojírenské technologie. Stejně jako u svařování metodou Laser + TIG se provedla příprava vzorků, tak že byly očištěny svařové plochy obou plechů, které měli stejnou orientaci válcování. Následné spojení bodovými svary pomocí acetyl-kyslíkového plamene zajistilo konstantní svařovou mezeru o velikosti 0,8 mm a takto nachystané plechy byly uloženy do pracovního prostoru automatického posuvového zařízení Fronius Automation FRC-4. Pomocí tříosého seřízení se nastavila pozice hořáku, jak je zobrazeno na obrázku 40 a zkontrolovala se trajektorie drátu při posuvu hořáku. Hořák byl přesunut do krajní pozice a nastavily se parametry svařování (Tab. 4) vycházející z předchozích experimentů. Svařování proběhlo ve zkratovém režimu, s výletem drátu 15 mm na svářečce Fronius TransPulsSynergic 4000 s podavačem drátu Fronius VR 4000.



Obr. 40 Nastavení pozice MAG hořáku

Výsledné svarové spoje nevykazovaly žádné vizuální vady a následně z nich byly laserem vyřezány vzorky pro tahovou zkoušku a vzorek pro metalografii, sloužící i pro zkoušky tvrdosti (Obr. 41). Rozdíly mezi jednotlivými variantami nebyly nijak výrazné. Lišily se pouze šířkou svaru.



Obr. 41 Sdružené vzorky pro experimentální část

3.4 Proudění ochranného plynu při použití Schlierové metody [65]

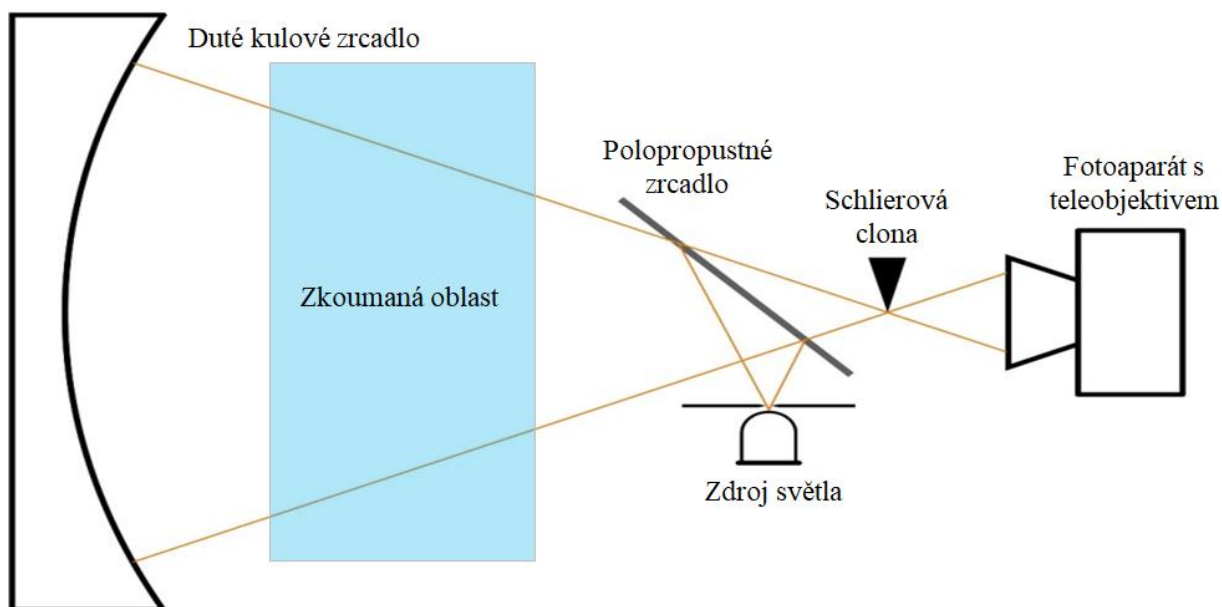
Pro zviditelnění tohoto velmi rychlého děje jsme použili optickou Schlierovou metodu založenou na rozdílném indexu lomu světla v různých plynných prostředí při snímání vysokorychlostní kamerou. Ochranným plynem při hybridním svařování byl proudící čistý argon s velmi podobným indexem lomu světla jako běžná atmosféra, což ubírá na výsledném kontrastu při pozorování. Použitá jednoosá konfigurace sestavení zobrazená na obrázku 42 a 43 se přímo neshoduje se schématem v kapitole 2.9.4 teoretické části. Rozdíly jsou především v cestě samotného paprsku.

Světelný svazek vytvořený bodovým zdrojem světla (vzduchem chlazená bílá LED 10W) je poslán přes polopropustné zrcadlo odrážející paprsek do zkoumaného místa. Dále mírně rozptýlený paprsek směřuje na povrch dutého kulového zrcadla s velkou ohniskovou vzdáleností (cca 4 metry) umístěného za svařovací hlavou. Od něj je odražen zpět přes oblast proudícího plynu až za polopropustné zrcadlo, které tento světelný svazek propouští. Zde, v ohnisku dutého zrcadla, je umístěna



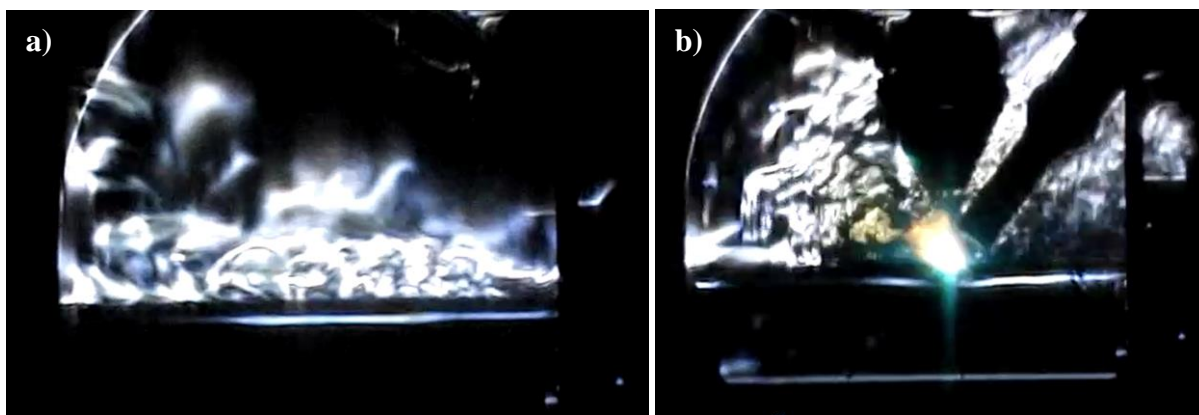
Obr. 42 Sestavení při experimentu

schlierová clona odstiňující část rozptýleného paprsku a propouštějící zbylou část do fotoaparátu s teleobjektivem. Fotoaparát s teleobjektivem, Schlierová clona, polopropustné zrcadlo a zdroj světelného záření jsou umístěny na pevném stolku umožňujícím nastavení vzájemných poloh mezi nimi. Výsledkem jsou vysokorychlostní snímky pořízené fotoaparátem při 300 a 1200 snímcích za sekundu.



Obr. 43 Schéma použité konfigurace Schlierové metody [65]

Na snímku (Obr. 44a) jde vidět proudění ochranného plynu před zahájením svařování, kdy argon proudí podél povrchu plechů ve směru TIG hořáku. Na snímku 44b je zachycen vliv ohřátého materiálu a dynamický vliv plynů kovu vzniklých při svařovacím procesu. Ohřáté plechy zahřívají a dynamicky odfukují ochranný plyn, který je tímto rozptýlen a stoupá výrazně vzhůru. I přes tento výrazný odvod plynu dochází k dostatečné ochraně svarového spoje při svařování.

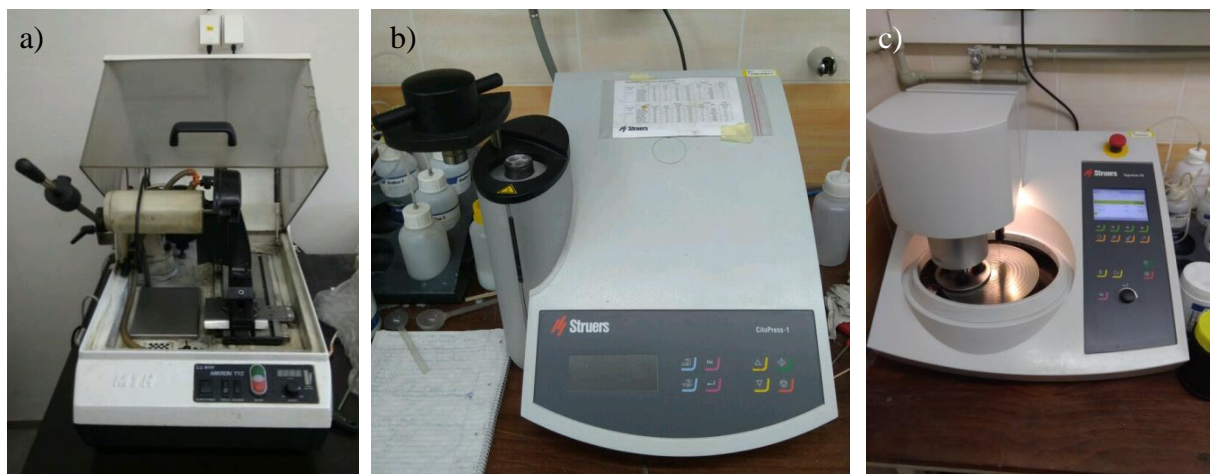


Obr. 44 Proudění ochranného plynu při laserovém svařování s předehřevem metodou TIG

3.5 Metalografie

Vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury se provádí na metalografických výbrusech, které by v ideálním případě měly reprezentovat celý pozorovaný vzorek. Příprava probíhala v metalografické laboratoři na Ústavu přístrojové techniky v Brně podle normy ČSN EN ISO 17639 následovně:

- Bylo vybráno vhodné reprezentativní místo svaru a jeho preparace proběhla za pomoci laserového řezání.
- Vyjmutý vzorek byl rozdělen na přesné laboratorní pile MTH Mikron 110 (Obr. 45a) na menší kousky, které je možno zalit do pryskyřice pro lepší manipulaci při dalších krocích. Dělení bylo provedeno s ohledem na tepelné neovlivnění struktury při řezání, proto bylo použito výrazného chlazení a speciálního řezného kotouče Struers o tloušťce 0,5 mm.
- Drobné preparáty byly odmaštěny od chladicí, řezné kapaliny technickým lihem a pro lepší stabilitu při zalévání do pryskyřice byly slepeny sekundovým lepidlem spolu s distančními vložkami vloženými mezi ně.
- Vzniklé sdružené vzorky byly zasypány plastovou hmotou MultiFast Black od firmy Struers a dále byly zalisovány v přístroji Struers CitoPress - 1 při 180°C a tlaku 250 bar po dobu 3,5 minuty (Obr. 45b).
- Vylisované plastové nosiče vzorků o průměru 30 mm byly upnuty do zařízení Struers Tegramin-20, které slouží pro broušení a leštění. Postupně byly použity brusné kotouče o zrnitosti 120, 220 a 500 k dosažení vhodného povrchu k leštění. Při broušení bylo použito vodní chlazení, což kromě odvodu tepla odvádělo i vzniklé odpadní částice, které by povrch vzorků mohly znehodnotit (Obr. 45c).

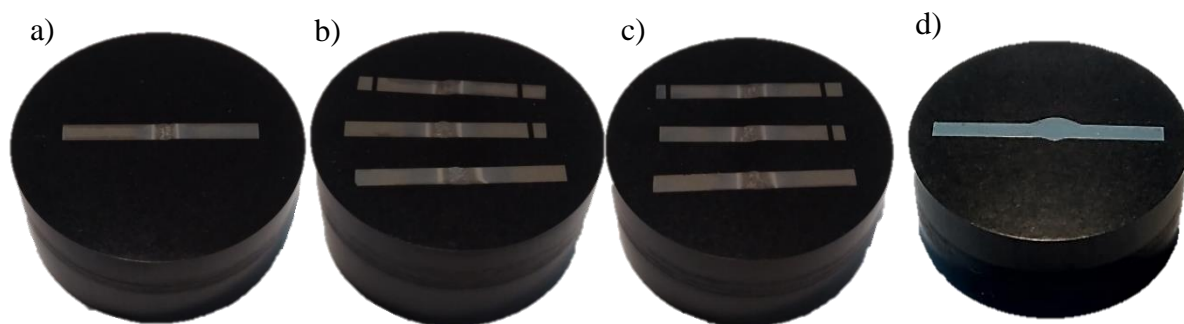


a) přesná laboratorní pila MTH Mikron 110 b) Stroj na lisování vzorků Struers CitoPress - 1
c) Stroj na broušení a leštění Struers Tegramin - 20

Obr. 45 Zařízení pro výrobu metalografických vzorků

- f) K dosažení zrcadlového povrchu kovu se provedlo postupné leštění diamantovými suspenzemi DiaDuo - 2 o velikosti zrn 9 μm , 3 μm a 1 μm
- g) Vyvolání struktury bylo dosaženo za pomoci leptání. Leptadlo, Nital (3% HNO_3 + 97% $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$), působilo na povrch kovu po dobu 2 až 3 vteřin. Následoval oplach vodou a lihem. Výsledné vzorky v nosičích jsou vyobrazeny na obrázku 46.

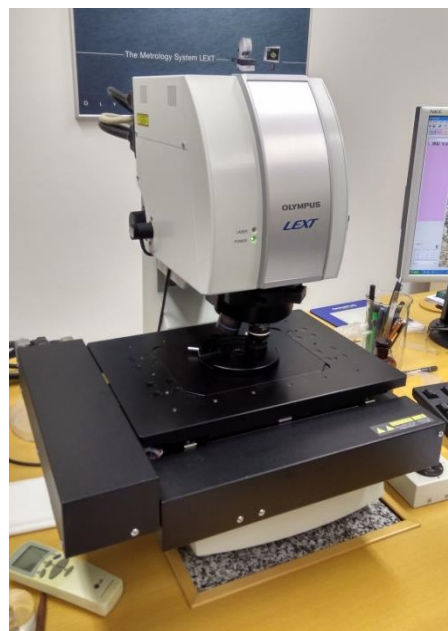
V průběhu celé přípravy vzorku bylo vše řádně značeno a zaznamenáváno.



a) LASER b) LASER + TIG jako přehřev c) LASER + TIG jako dohřev d) MAG

Obr. 46 Metalografické vzorky

Snímky makrostruktury pro všechny vzorky, mimo vzorky 1 a 9, byly pořízeny stereomikroskopem Olympus SZ 61 a SZX 10. Mikrostruktura a makrostruktura u zbylých vzorků 1 a 9 byla pořízena na konfokálním laserovém rastrovacím mikroskopu Olympus LEXT 3100 (Obr. 47) na Ústavu přístrojové techniky v Brně. Zobrazování struktury proběhlo při běžném osvětlení v režimu TV, 2D. Vytvořené fotografie byly upraveny v programech LEXT-OLS, QuickPHOTO Industrial 2.3 a Image Composite Editor pro tvorbu panoramatických snímků. U makrostruktury byla vyhodnocena velikost tepelně ovlivněné oblasti, vlastního svaru a dále byly snímky použity pro zakraslení průběhů tvrdostí. U mikrostruktury je především pozorována a hodnocena oblast svarového kovu při zvětšení 1200x, které umožňuje náhled na velikost a strukturu zrn.

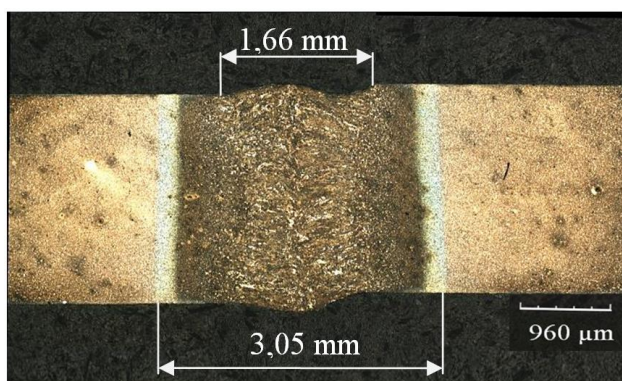


Obr. 47 Olympus LEXT 3100

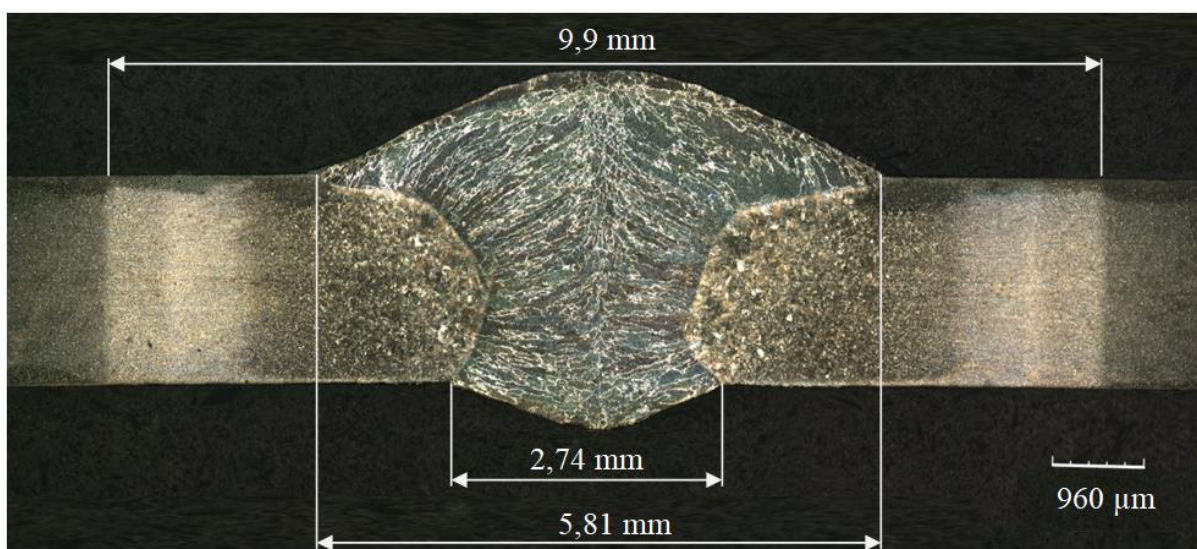
3.5.1 Makrostruktura [12]

a) Základní materiál a různé metody svařování – LASER a MAG (vzorky 1, 8, 9)

Makrostruktura u vzorků 1 a 9 dokazuje výrazné rozdíly těchto dvou odlišných technologií svařování při porovnání velikosti vlastního svaru a TOO. Na obrázcích 48 a 49 jsou oba svary o stejném měřítku, kde první svar je vytvořený laserem a druhý metodou MAG. Velikost TOO je u vzorku 1 široká 3,05 mm a u vzorku 9 je více než trojnásobná. Zvětšení tepelně ovlivněné oblasti téměř přesně odpovídá 335 % nárůstu vneseného tepla z tabulky číslo 4. Šířka svarového kovu dosahuje u laseru hodnoty 1,66 mm téměř po celé tloušťce plechu, zatímco u MAG svaru je velmi proměnná. V horní části měří 5,81 mm a u kořene pouze 2,74 mm. Dále je zde oproti laseru velmi výrazné převýšení svaru i kořene. To vzniká při chladnutí svaru a následném tuhnutí kovu, kdy od okrajů svarové lázně (hranice natavení) rostou do středu svaru zrna pevné fáze.



Obr. 48 Makrostruktura vzorku 1

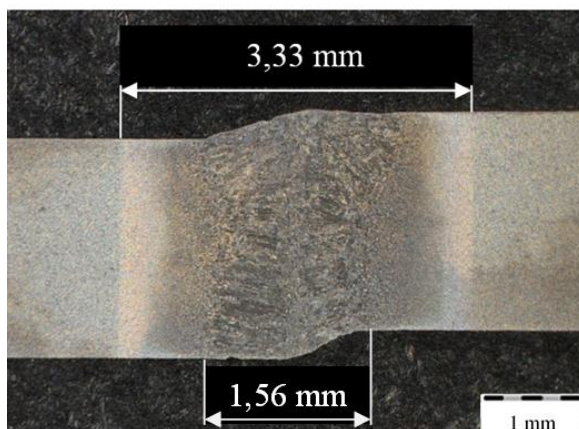


Obr. 49 Makrostruktura vzorku 9

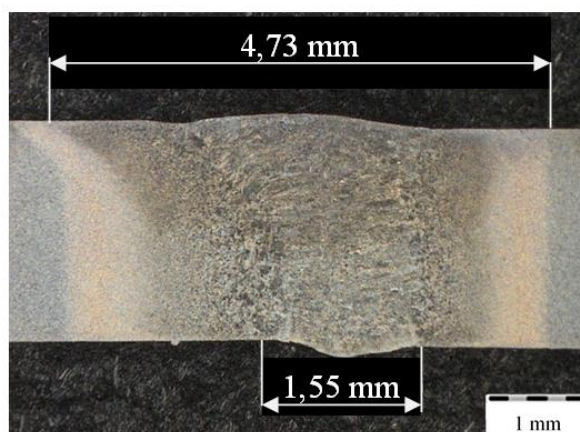
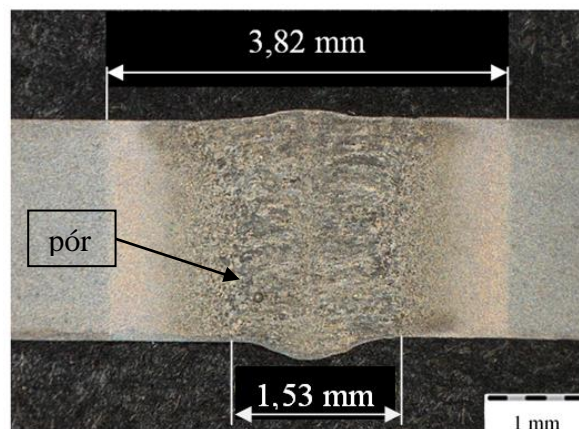
b) Svařování laserem s TIG předehřevem pro různá nastavení proudu (vzorky 2, 3, 4)

Na naleptaných vzorcích je pomocí stereolupy dobře pozorovatelná makrostruktura svařovaných vzorků. Vzorky 2, 3 a 4 se liší pouze přidáním ampér na TIG svářečce a tedy nárůstem vneseného tepla. Tato změna způsobuje, že při zvyšování tepelného příkonu se rozšiřuje TOO, ale průměrná šířka vlastního svaru zůstává přibližně stejná na hodnotě 1,55 mm (Obr. 50). Šířka TOO se pohybuje v rozmezí 3,33 mm až 4,73 mm u použití 60 A TIG předehřevu. Nárůst o 20 A v našem experimentu znamená rozšíření o zhruba 0,5 mm. Oproti vzorku 1 (pouze LASER) se přidáním teplem nepatrně rozšiřuje horní část svaru. Jisté svarové nedostatky specifikované v kapitole 2.8 jsou pozorovatelné na vzorku 2, kde svařené plechy nejsou v jedné rovině. Dále je u vzorku 3 k vidění menší pór ve svarovém kovu, který je podle ČSN EN ISO 6520-1 označován jako vada 2011 nebo podle ISO/TS 17845 jako 2BGAA. Mírné a vyhovující převýšení kořene je pozorovatelné u vzorků 3 a 4.

1) Vzorek 2, předehřev TIG 20 A



2) Vzorek 3, předehřev TIG 40 A



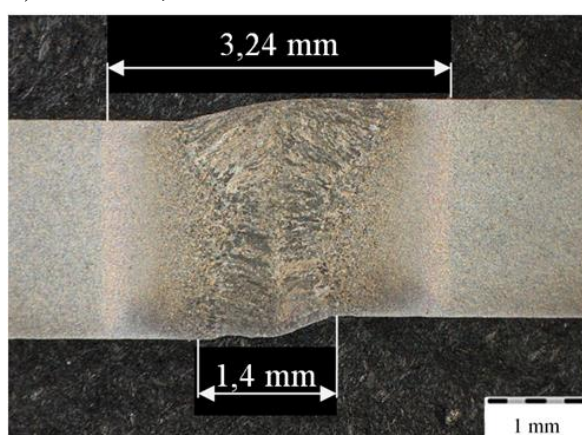
3) Vzorek 4, předehřev TIG 60 A

Obr. 50 Makrostruktura vzorků 2, 3 a 4

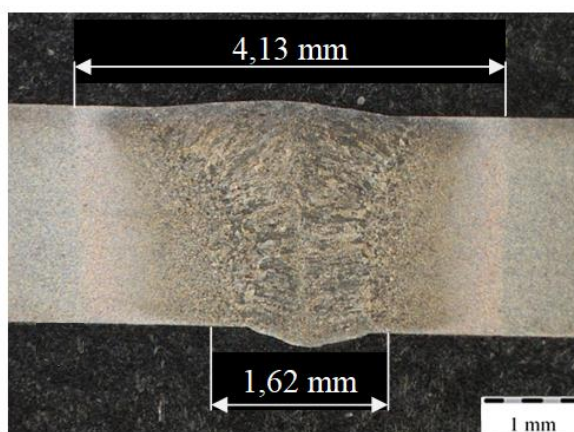
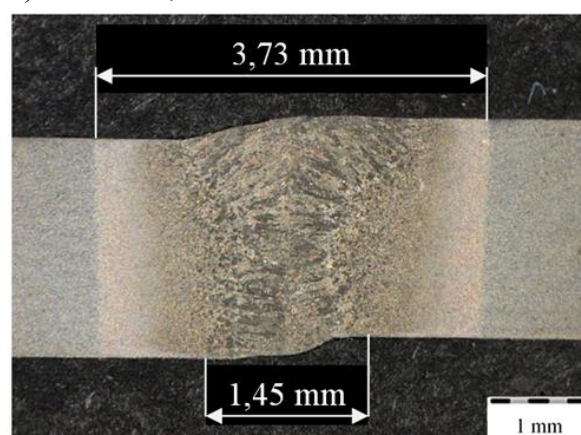
c) Svařování lasrem s TIG dohřevem pro různá nastavení proudu (vzorky 5,6,7)

Makrostruktura vzorků 5, 6 a 7 vznikala obdobně jako u předešlých vzorků s předeřevem. Vliv nastavení proudu, a tedy vneseného tepla na tepelně ovlivěnou oblast je stejný jako u vzorků 2, 3 a 4. TOO se rozšiřuje při přibližném zachování průměrné šířky vlastního svaru, která je cca 1,5 mm (Obr. 51). Odlišností je, že nastává výraznější rozšiřování horní části svaru ze směru umístění svařovacího zdroje. Tento rozdíl mezi horní a dolní stranou vzorku je přibližně dvojnásobné rozšíření oblasti svarového kovu. Zvětšování TOO je i zde zhruba 5 mm na 20 A přidaného proudu, šířka se tedy pohybuje od 3,24 mm do 4,13 mm při použití 60 A TIG dohřevu. Určité přesazení plechů je u vzorků 5 a 6. Mírně převýšený kořen je pak u vzorku 7.

1) Vzorek 5, dohřev TIG 20 A



2) Vzorek 6, dohřev TIG 40 A

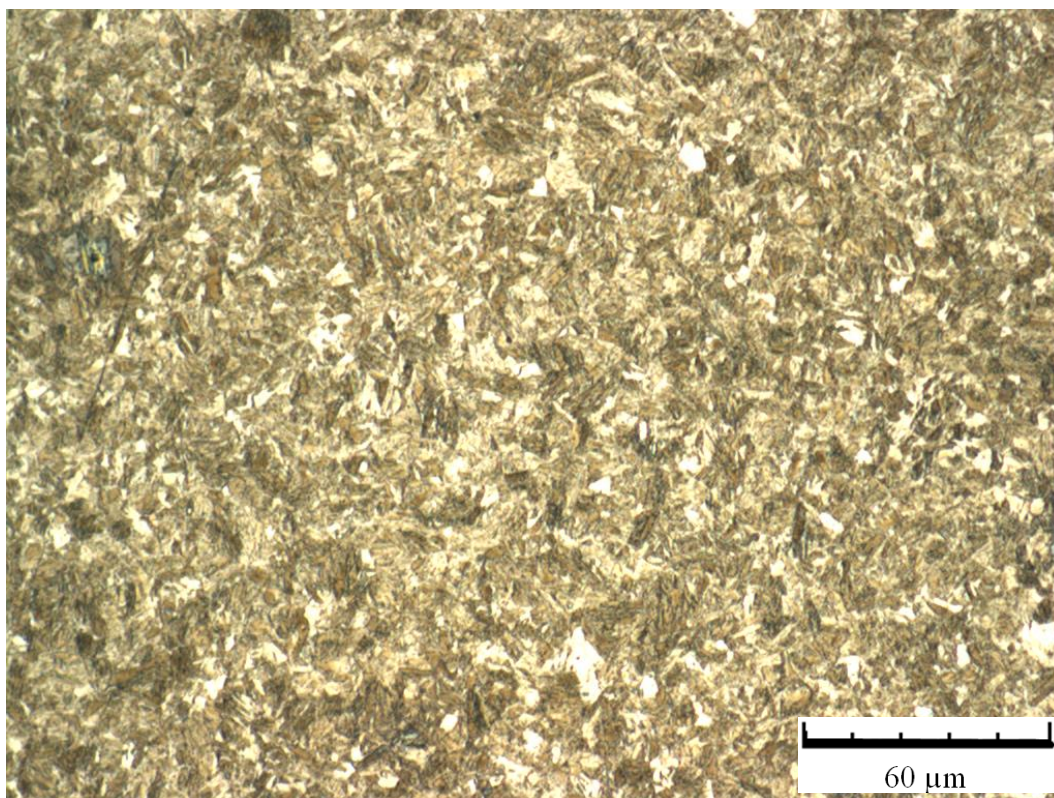


3) Vzorek 7, dohřev TIG 60 A

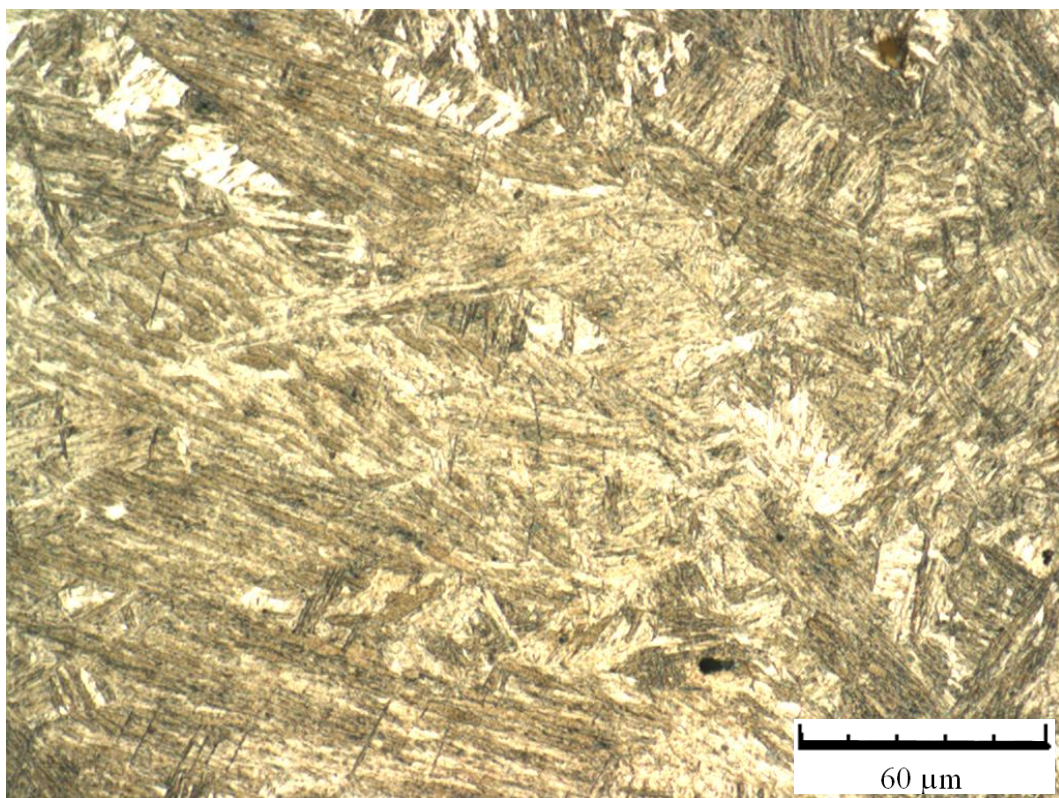
Obr. 51 Makrostruktura vzorků 5, 6 a 7

3.5.2 Mikrostruktura

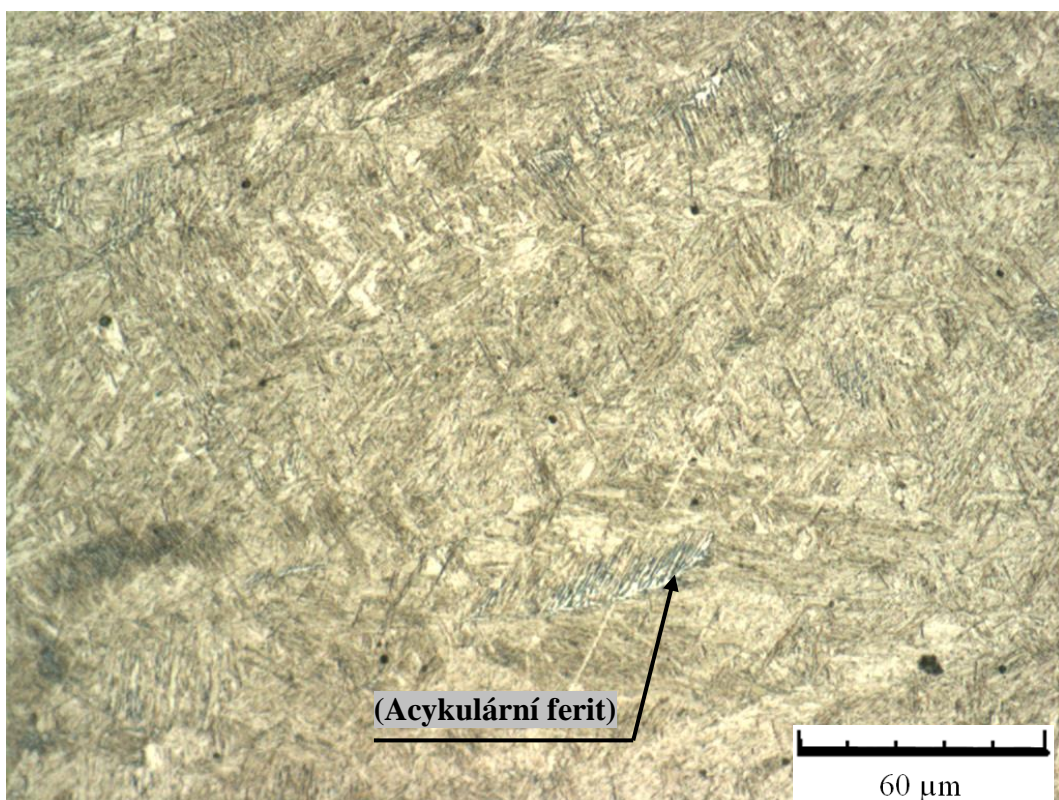
Hodnocení mikrostruktury bylo zaměřeno především na strukturu svarového kovu svařených vzorků v porovnání se základním materiálem. Dále byl pozorován průběh struktury podél celého svaru přes TOO až do základního materiálu, příloha č. 6. Na obrázku 52 je vidět zušlechťená mikrostruktura základního materiálu. Jedná se jemnozrnou strukturu, vzniklou kalením a nízkoteplotním popouštěním plechů při výrobě, která na snímku nevykazuje anizotropii tvaru zrn, protože snímek je v řezu kolmém na směr válcování. Při svařování je tento materiál roztaven a následně tuhne přímo z taveniny určitou rychlostí do struktury litého kovu. Maximální rychlost ochlazování je dosaženo u vzorku č. 1 (Obr. 53) svařeného laserem. U něj je zřejmě pozorovatelná jehlicovitá martenziticko-bainitická mikrostruktura, která vzniká vlivem vysokého teplotního gradientu, kdy je tavenina velmi rychle ochlazována. Přesnější strukturální vyhodnocení přinese až zkouška mikrotvrdosti v kapitole 3.7. Zpomalování rychlosti ochlazování je dosaženo přidáním tepla obloukovou metodou TIG a je v přímé úměrnosti s množstvím dodaného elektrického proudu. To se projevuje postupným rozšiřováním jednotlivých pásem TOO, omezením ostrých strukturálních přechodů mezi nimi, zjemněním zrna v oblasti svarového kovu a v místech jej přímo obklopujících. Dále se v důsledku postupného zvyšování celkového tepelného příkonu objevuje ve svarovém kovu větší množství feritických struktur, jako je zřejmě acykulární ferit (Obr. 54). U vzorků s TIG předehřevem a dohřevem nebyl u stejných nastavení proudu pozorován žádný významný rozdíl ve výsledné mikrostrukturu. Ze všech kombinací předehřevů a dohřevů je vyobrazen pouze snímek mikrostruktury vzorku č. 4 s 60 A elektrického proudu. U něj jsou nejvýrazněji rozpoznatelné rozdíly mikrostruktury oproti laserovému svařování u vzorku č. 1.



Obr. 52 Mikrostruktura základního materiálu Hardox 450, vzorek 1

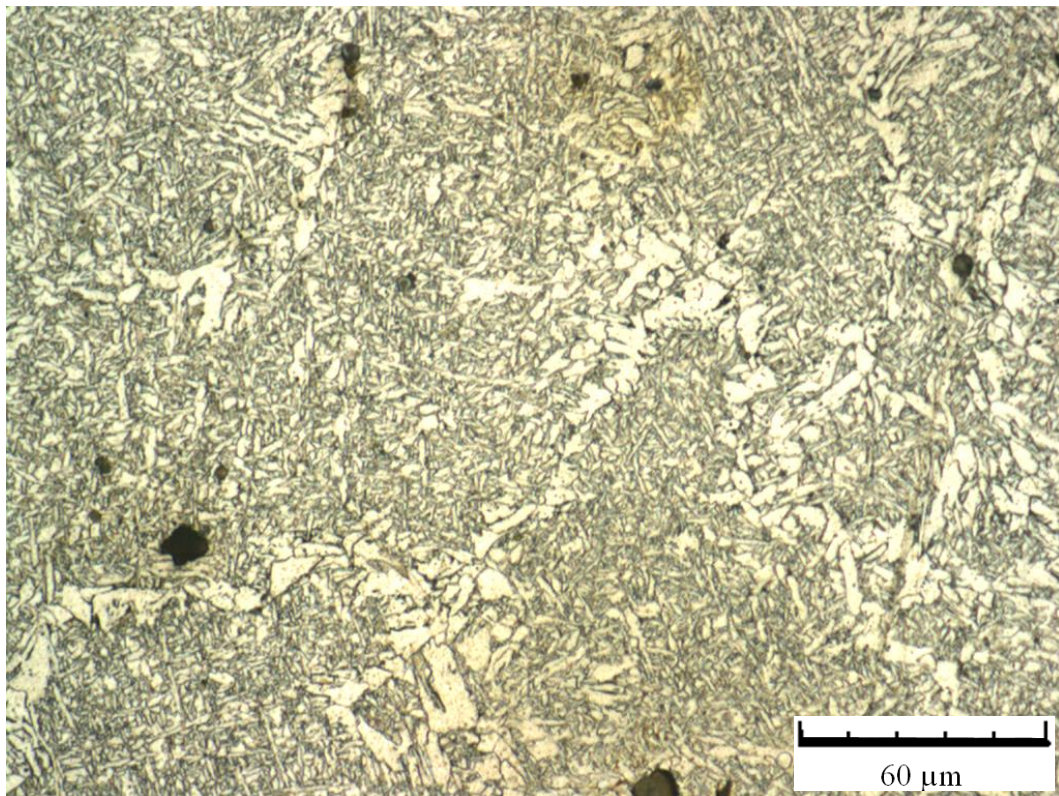


Obr. 53 Mikrostruktura svarového kovu – laser, vzorek 1



Obr. 54 Mikrostruktura svarového kovu – laser + předehřev TIG 60A, vzorek 4

Největších změn mikrostruktury je dosaženo u vzorku č. 9 svařeného metodou MAG, kdy je dodané teplo maximální ze všech testovaných konfigurací (Obr. 55). Výsledkem je litá jehlicovitá mikrostruktura svarového kovu s viditelnými hrubými zrny původních austenitických zrn. Na jejich hranicích je vyloučený ferit, vlivem menšího teplotního gradientu a tím pomalejšího ochlazování (v ARA diagramu protнула křivka ochlazování křivku počátku vylučování feritu).



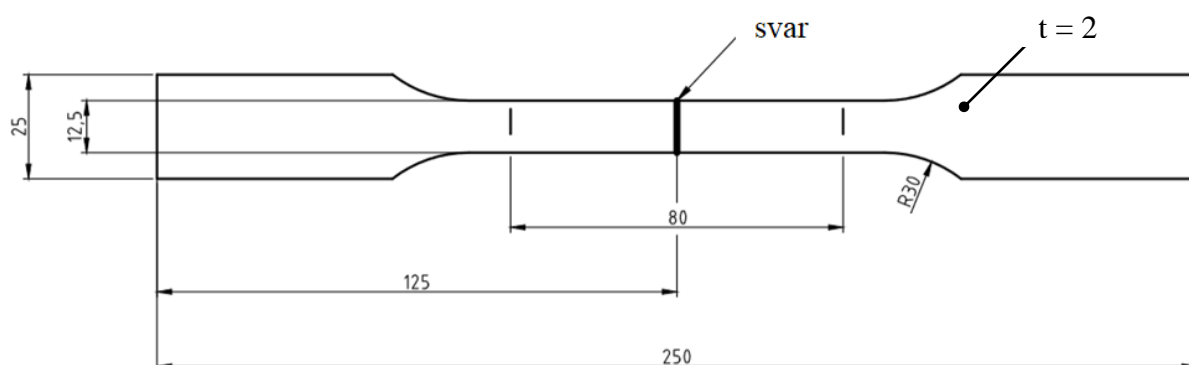
Obr. 55 Mikrostruktura svarového kovu – MAG, vzorek 9

3.6 Tahová zkouška

Průběh tahové zkoušky, od výroby vzorků až po vyhodnocení výsledků, probíhal podle normy ČSN EN ISO 6892 – 1. Z každé svařené dvojice plechů a z tabule plechu základního materiálu byly vyřezány 3 tahové vzorky reprezentující celý svarový spoj a vytvářející tak základní statistický soubor výsledků. Svar byl umístěn v polovině délky tělesa. Preparace proběhla s ohledem na orientaci plechu při válcování a vzniklo tak celkem 27 tahových těles (Obr.56). Pro tloušťku plechu 2 mm je podle přílohy B v normě ČSN EN ISO 6892 – 1 zvolena následující geometrie vzorku odebraná z plechu pomocí laserové řezání. (Obr. 57)



Obr. 56 Vzorky pro tahovou zkoušku



Obr. 57 Geometrie tahového zkušební tělesa

Celá zkouška byla uskutečněna na zkušebním hydraulickém stroji ZD 40 v dílnách ústavu strojírenské technologie. Zařízení je schopné vyvinout sílu $8 \div 400$ kN, kdy rychlost zatěžování je snímána a řízena řídicí jednotkou EDC 40. V našem případě byla zvolena konstantní rychlost zatížení 15 MPa za sekundu spadající do intervalu uvedeném v normě. Chyba měření je vyčíslena na $\pm 1\%$, což u měření napětí přibližně kolem 1200 MPa znamená toleranci výsledku ± 12 MPa. Kompletní specifikace zařízení je v příloze č. 1.

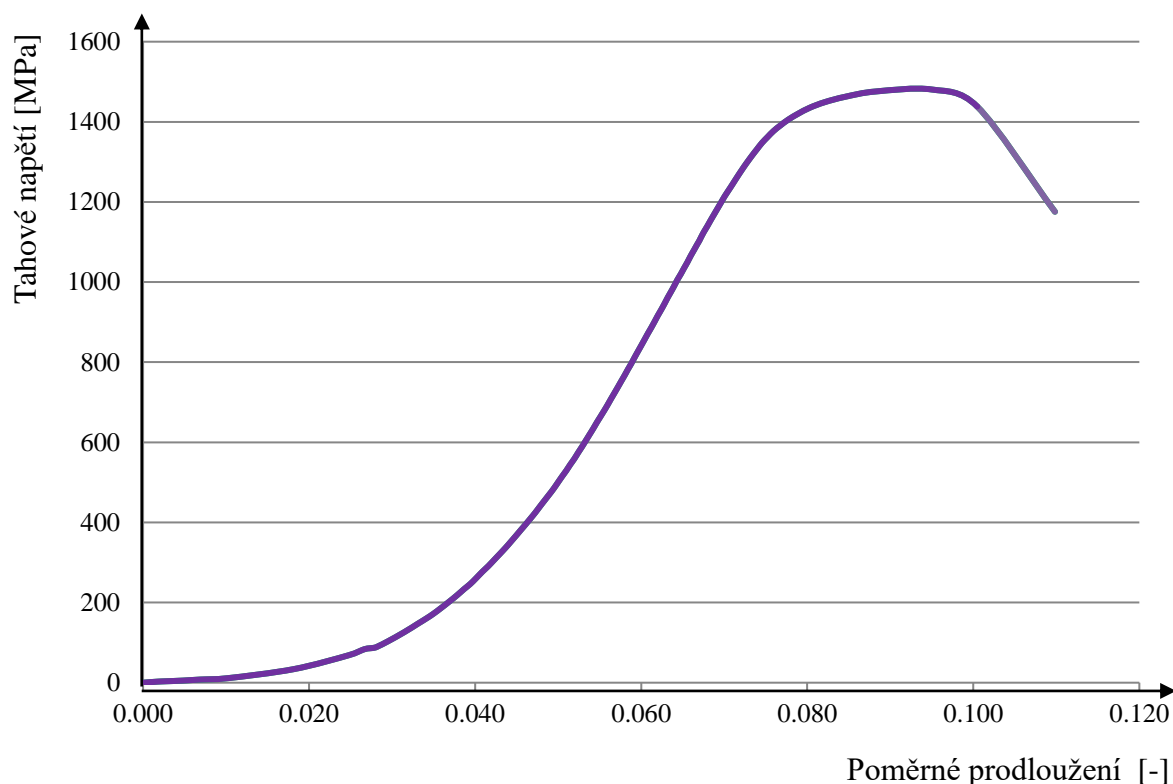
Na všechny tahová tělesa, vyobrazená na obrázku 56, byly vyznačeny rysky vymezující měřenou oblast. Ty byly umístěny ve vzájemné vzdálenosti 80 mm a 40 mm od středu vzorku. Takto označené vzorky byly postupně upnuty do drážkovaných čelistí stroje ZD 40 a poté byly při postupném zatěžování přetřeny (Obr. 58). V průběhu testu byla snímána časová závislost síly a dráhy přičníku. Po vyjmutí vzorku byla změřena vzdálenost rysek pro určení prodloužení zkoušeného materiálu. Výsledky testů byly následně zpracovány v programech M-TEST v. 1.7. Zpracování a filtrace dat byla provedena v programu Microsoft Excel 2014, kdy byla pro výpočetní možnosti vybrána každá 50. hodnota měření.

a) Základní materiál Hardox 450 (vzorek 8)

Při tahové zkoušce základního materiálu byla ověřena hodnota meze pevnosti R_m udávaná výrobcem v inspekčním certifikátu 3.1. Zjištěná pevnost 1483 MPa převyšuje udávanou $R_m = 1455$ MPa. Jedná se o materiál s nevýraznou mezí kluzu, kdy se určuje tzv. smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. Hodnota tažnosti zaznamenaná při zkoušce byla prokazatelně zjištěna pouze u jednoho ze tří vzorků z důvodu dvou přetržení mimo vyznačenou a měřenou oblast. Průměrná hodnota pevnosti svaru je však brána ze všech tří měření, protože k přetržení došlo vždy ve stejném průřezu i v případě chybných měření mimo rysky. Opakování zkoušky pro zpřesnění výsledku nebylo provedeno, protože se nejedná o předmět zkoumání, ale pouze pro informaci k porovnání. Výsledky tahové zkoušky základního materiálu jsou v tabulce číslo 5.



Obr. 58 Přetržený vzorek



Obr. 59 Tahový diagram základního materiálu (vzorek 8)

Tab. 5 Naměřené a zprůměrované hodnoty u vzorků 8.1, 8.2 a 8.3 základního materiálu

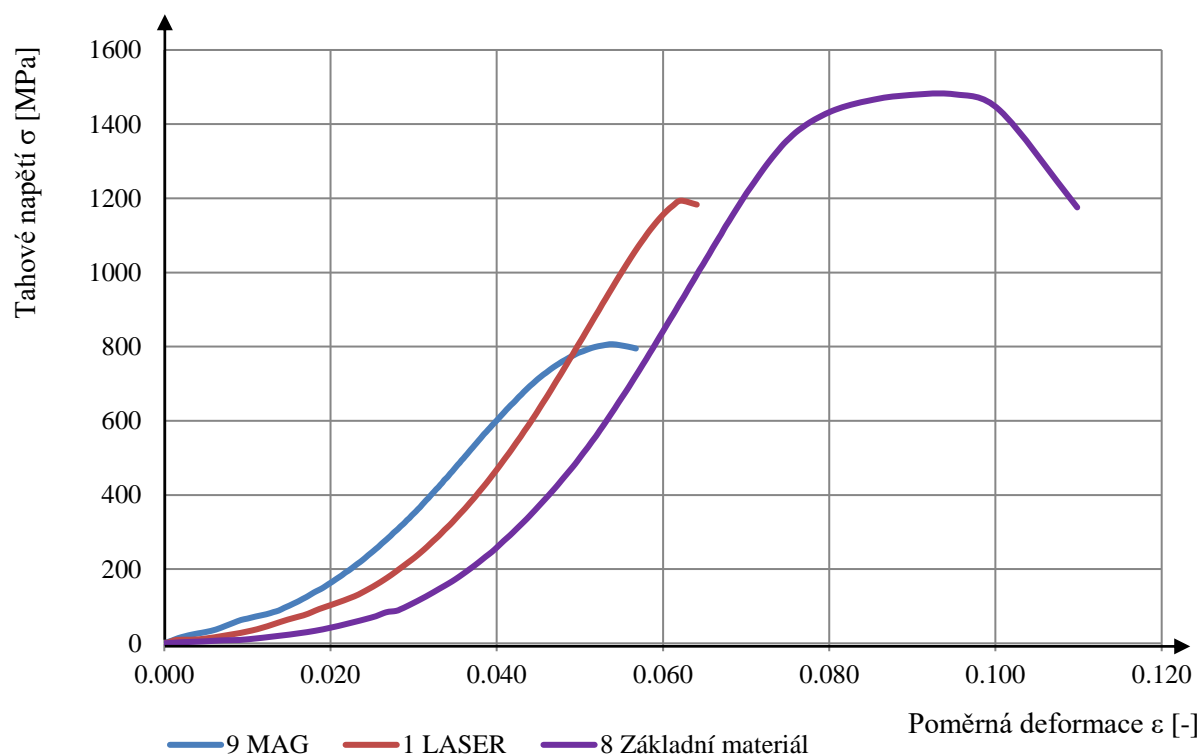
Vzorek	S_0 [mm]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	F_m [N]	A [%]	Umístění lomu
8 (8.1; 8.2; 8.3)	24,8; 25; 25	1453	1483	36987	3,75*	8.2; 8.3 mimo rysky

* Hodnota vzniklá z jednoho měřeného údaje, z důvodu selhání měření

b) Různé metody svařování – LASER a MAG (vzorky 1 a 9)

Tyto dva zkoumané vzorky 1 a 9 slouží k vytvoření určité představy jakých pevností je dosahováno při běžném svařování tohoto materiálu bez využití přídavné technologie sloužící k dohřevu či předehřevu. V prvním případě, u vzorku 1 (Obr. 60), se jedná o svařování laserem jak bylo uvedeno v kapitole 3.2 a 3.3., které do materiálu vnáší minimální teplo. Výsledkem je svarový spoj, který nejvíce zachovává pevnost původního materiálu, avšak vhodnost a vliv jeho struktury na houževnatost by bylo vhodné ověřit zkouškou rázem v ohybu. Spojený materiál dosahuje smluvní meze kluzu při 1172 MPa a meze pevnosti při 1205 MPa. Hodnota tažnosti u tohoto materiálu není relevantní, avšak je zmíněna v tabulkách výsledků z tahových zkoušek.

V druhém případě jde o zcela konvenční způsob svařování MAG, který naopak do svaru vnáší z testovaných konfigurací nejvíce vneseného tepla. Výsledkem je téměř poloviční pokles pevnosti spoje, a to v široké oblasti kolem něj. K přerušení vzorku došlo při průměrném tahovém napětí 812 MPa v tepelně ovlivněné oblasti. Veškeré výsledky jsou v tabulce číslo 6.



Obr. 60 Tahový diagram pro vzorky 1 a 9

Tab. 6 Naměřené a zprůměrované hodnoty u sady vzorků 1 a 9 laserového a MAG svaru

Vzorek	S_0 [mm]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa] (pokles R_m proti vzorku č. 1)	F_m [N]	A [%]	Umístění lomu
1 (1.1; 1.2; 1.3)	25; 24,8; 24,8	1172	1205	29972	2,50	v TOO
9 (9.1; 9.2; 9.3)	24,8; 24,6; 24,8	809	812 (-32,6 %)	20091	1,67	v TOO

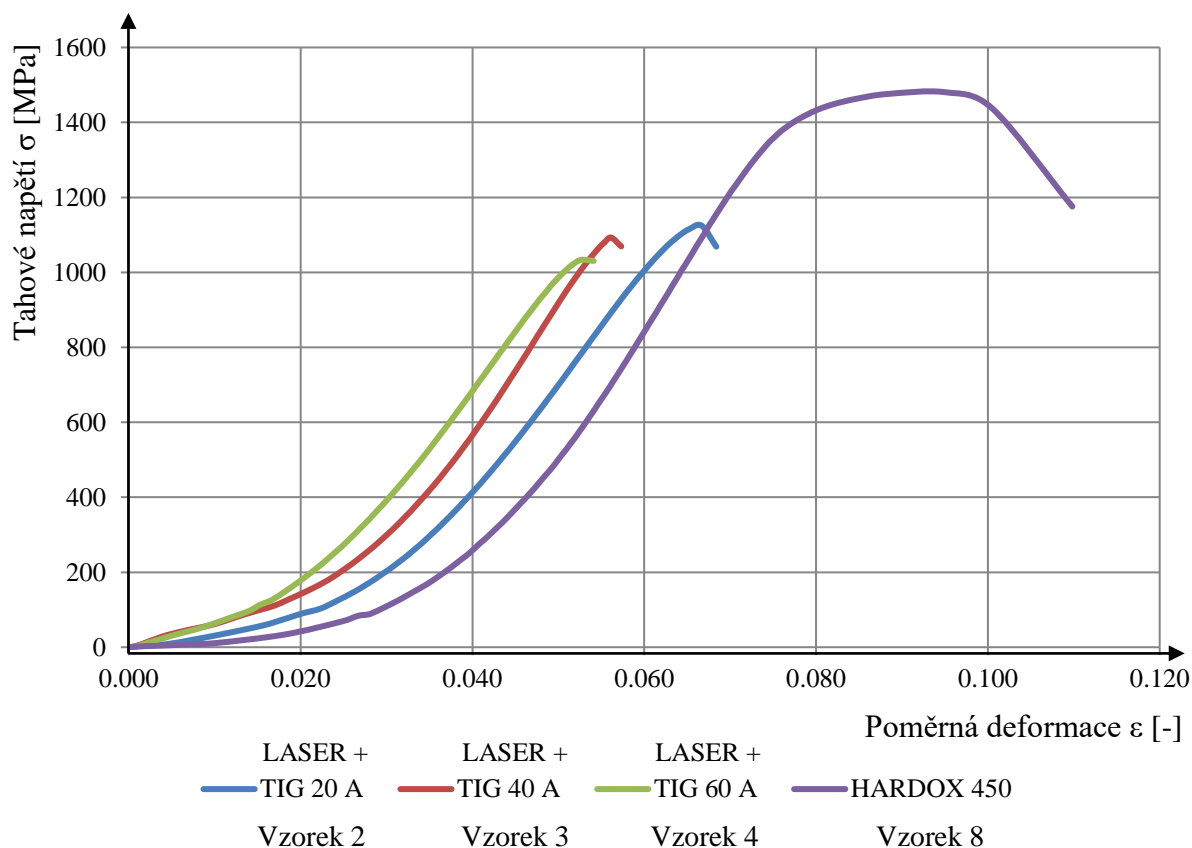
c) Svařování laserem s TIG přehřevem pro různá nastavení proudu (vzorky 2, 3, 4)

Při této konfiguraci svařování laserového paprsku předchází elektrický oblouk, který přehřívá svařovaný materiál. Zušlechtný materiál Hardox 450 je působením předaného tepla popouštěn, což je doprovázeno poklesem pevnostních charakteristik. Dalším negativním dopadem zvyšujícího se vneseného tepla je rozšíření tepelně ovlivněné oblasti, o čemž je pojednáno v kapitole 2.7. Pozitivní přínos této konfigurace může být v omezení vzniku nežádoucích struktur ve svaru, které snižují houževnatost spoje. V diagramu (Obr. 61) je patrné, že při zvyšování proudu u přehřevu a tedy i při zvyšování vneseného tepla nastává pokles pevnosti. Srovnáním s pevností původního materiálu je zřejmá výrazná teplotní degradace těchto vlastností. U vzorku s přehřevem obloukem o proudu 20 A došlo k přetržení v tepelně ovlivněné zóně při průměrném tahovém napětí 1138 MPa. Navyšením proudu na hodnotu 40 A klesla únosnost svarového na 1114 MPa a při 60 A až na hodnotu 1058 MPa, což je o 80 MPa méně než u 20 A. U všech tahových vzorků došlo k přetržení v tepelně ovlivněné oblasti. U některých vzorků nebyla při tahové zkoušce zjištěna smluvní mez kluzu z důvodu nedosažení požadované deformace pro její určení. Výsledky tahové zkoušky zkušebních těles 2, 3, 4 jsou zaznamenány v tabulce číslo 7. Hodnoty v tabulce u každého vzorku jsou průměrem ze tří naměřených hodnot.

Tab. 7 Naměřené a zprůměrované hodnoty u sady vzorků 2, 3 a 4 TIG přehřevu

Vzorek	S_0 [mm]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa] (pokles R_m proti vzorku č. 1)	F_m [N]	A [%]	Umístění lomu
2 (2.1; 2.2; 2.3)	24,8; 24,8; 24,6	1120	1138 (-5,6 %)	28147	1,88	v TOO
3 (3.1; 3.2; 3.3)	24,8; 24,8; 25	1100*	1114 (-7,6 %)	27689	1,25	v TOO
4 (4.1; 4.2; 4.3)	24,6; 24,8; 24,2	–	1058 (-12,2%)	25968	1,25	v TOO
8 (8.1; 8.2; 8.3)	24,8; 25; 25	1453	1483	36987	3,75*	8.2; 8.3 mimo rysky

* Hodnota vzniklá z jednoho měřeného údaje, z důvodu selhání měření



Obr. 61 Tahový diagram u sady vzorků 2, 3 a 4

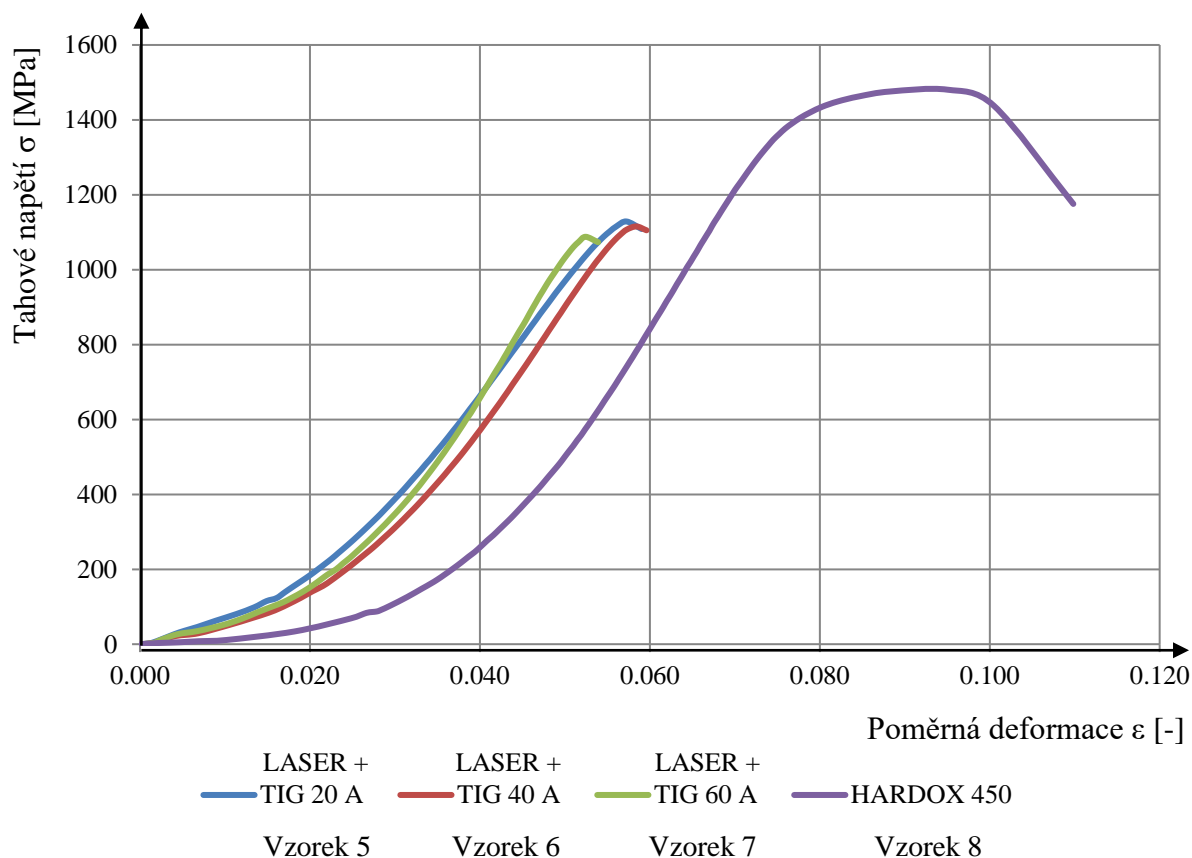
d) Svařování lasrem s TIG dohřevem pro různá nastavení proudu (vzorky 5, 6, 7)

Při dohřívání materiálu za vznikajícím laserovým svarem je přidané vnesené teplo odebíráno do okolí svaru a tak snižuje gradient teplot, který způsobuje příliš rychlé ochlazování. To by podle diagramu ARA mohlo vést k nadkritické rychlosti ochlazování a tím ke vzniku nežádoucích nestabilních a křehkých struktur ve svarovovém kovu. Na druhou stranu je tomu stejně jako u předehřevu v předchozím odstavci. Pevný zušlechtný materiál je tímto popouštěn, a tím je snižována jeho pevnost (Obr. 62). Pokles pevnosti dohřevu je mírně nižší než u předehřevu. Dosahuje hodnoty tahového zatížení 1143 MPa u 20 A, 1128 MPa při 40 A a nejnižší hodnoty pevnosti 1109 MPa při nejvyšší hodnotě proudu 60 A. I zde byla u všech vzorků nejslabším místem tepelně ovlivněná zóna ve které nastal lom. Téměř u všech vzorků nebyla možná odečíst reálná hodnota smluvní meze kluzu $R_{p0.2}$. Kompletní výsledky tahové zkoušky zkušebních vzorků s dohřevem (vzorky 5, 6, 7) jsou v tabulce číslo 8.

Tab. 8 Naměřené a zprůměrované hodnoty u sady vzorků 5, 6 a 7 TIG dohřevu

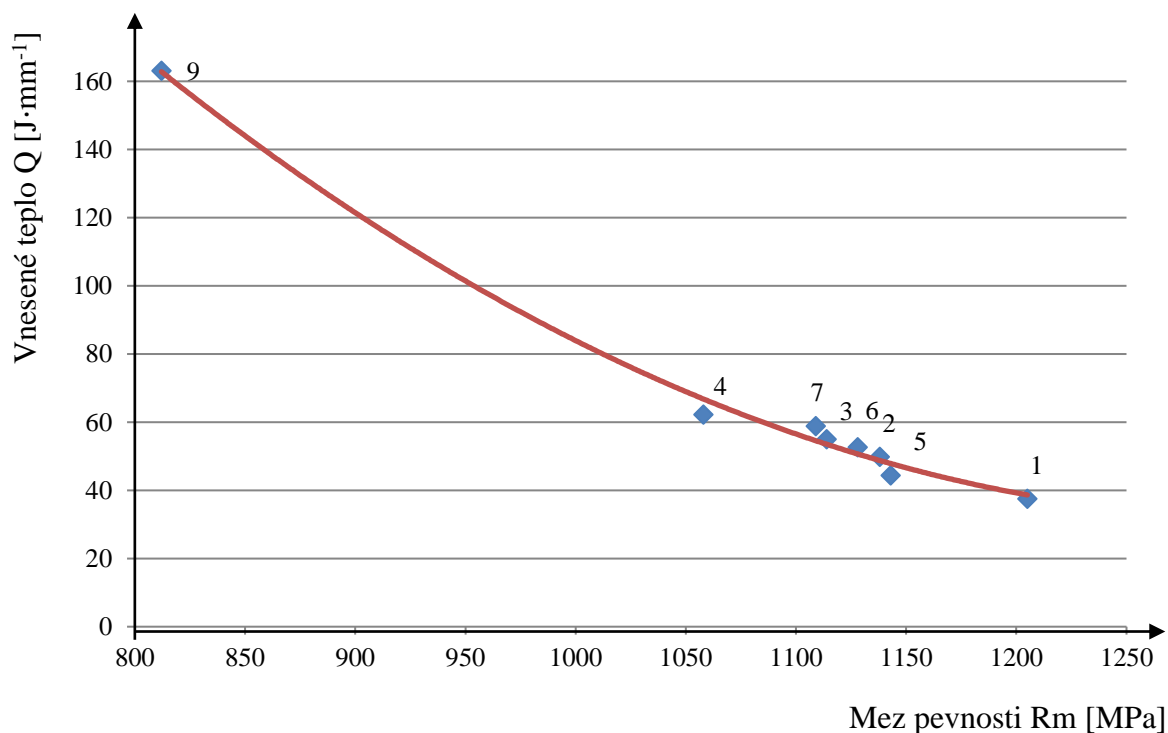
Vzorek	S_0 [mm]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa] (pokles R_m proti vzorku č. 1)	F_m [N]	A [%]	Umístění lomu
5 (5.1; 5.2; 5.3)	24,8; 24,6; 24,8	1116*	1143 (-5,1 %)	28279	1,25	v TOO
6 (6.1; 6.2; 6.3)	24,8; 25; 24,8	–	1128 (-6,4 %)	28050	1,25	v TOO
7 (7.1; 7.2; 7.3)	24,8; 24,6; 24,8	1040*	1109 (-8,0 %)	27433	1,25	v TOO
8 (8.1; 8.2; 8.3)	24,8; 25; 25	1453	1483	36987	3,75*	8.2; 8.3 mimo rysky

* Hodnota vzniklá z jednoho měřeného údaje, z důvodu selhání měření



Obr. 62 Tahový diagram u sady vzorků 5, 6 a 7

U předešlých vzorků (2 až 9) byl procentuálně vyjádřen pokles hodnoty meze pevnosti vůči vzorku číslo 1 s hodnotou $R_m = 1205$ MPa. Je pozorovatelná jistá úměra mezi nárůstem vneseného tepla, zmíněno v procentech v tabulce číslo 3 a poklesem pevnosti svarového spoje. Tento jev je ještě výraznější v důsledku rozšiřování svarového spoje a TOO, protože spolu s tím dochází také k rozšiřování oblasti se sníženou pevností. Závislost je vyobrazena v grafu na obrázku 63, kde čísla značí číslo vzorku a červená křivka představuje spojnicí trendu polynomem druhého řádu.



Obr. 63 Závislost meze pevnosti R_m na vneseném teple Q

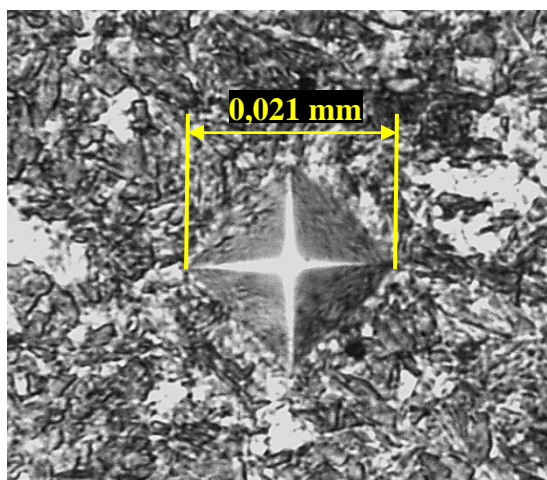
3.7 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Celý průběh zkoušky tvrdosti podle Vickerse probíhal podle normy ČSN EN ISO 6507 – 1. Měření zalisovaných vzorků se uskutečnilo v laboratoři Ústavu materiálových věd a inženýrství na zařízení Leco LM 247AT Microhardness tester s integrovanou CCD kamerou určenou pro měření délky úhlopříček (Obr. 64). Vyhodnocení tvrdosti proběhlo v programu Hardtest LECO AMH-2000. Vtisky podél celého svaru byly vytvořeny v automatickém režimu se zadanými parametry. Poté byly v poloautomatickém režimu ručně změřeny jednotlivé úhlopříčky vtisků a na základě těchto rozměrů byly programem vypočteny výsledné hodnoty tvrdostí. Podmínky měření byly následující:

- Indentor – diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136°
- Zatěžující síla $F = 1 \text{ N}$ odpovídá zatížení závažím 0,1 kg (mikrotvrdost HV0,1), jedná se o jemnozrnnou strukturu, takže vtisky o velikosti úhlopříčky 0,021 mm charakterizují reálnou tvrdost v měřené oblasti (Obr. 65)
- Doba zatížení silou F byla 10 sekund
- Tvrdost měřena v řadě vtisků přes celou oblast svaru s počátkem a koncem v základním materiálu
- Vzdálenost sousedních vtisků byla 0,3 mm (0,5 mm u vzorku č. 9) a tak byla dodržena podmínka, že vzdálenost musí být větší než 2,5x délka úhlopříčky vtisku pro zamezení ovlivnění výsledků
- Tvrdost byla měřena v polovině tloušťky vzorku, to je 1 mm pod povrchem
- Výrobce oceli garantuje povrchovou tvrdost $425 \div 475$ (jmenovitě 450) HBW, což při přepočtu odpovídá přibližně $450 \div 513$ (483) HV



Obr. 64 Leco LM 247AT

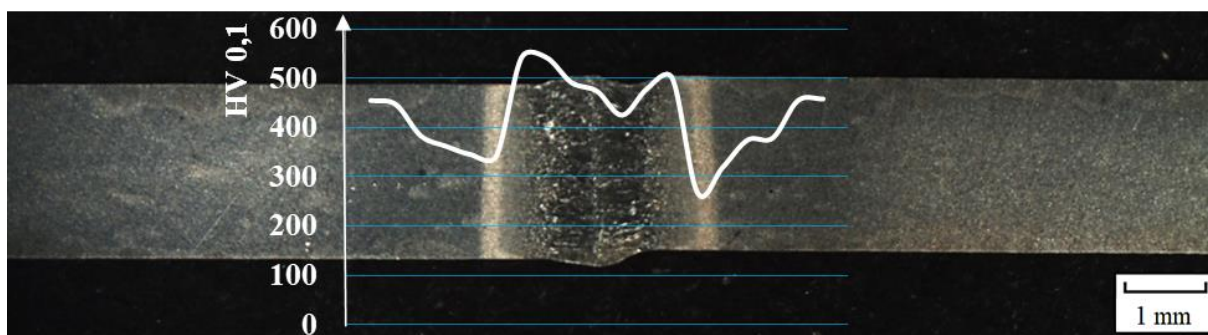


Obr. 65 Měření úhlopříček vtisku

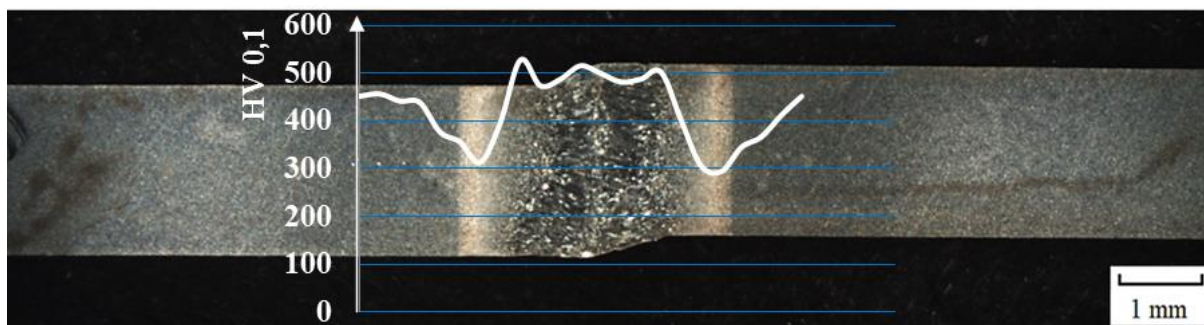
Výsledky měření tvrdosti jsou zaneseny do příslušných makroskopických snímků pořízených stereomikroskopem Olympus SZX 10 při zvětšení 9,45x (Obr. 66 až 70). Veškeré naměřené hodnoty tvrdosti jsou v tabulce v příloze č. 2, kde červené označení značí maximální hodnotu z celé řady. Výsledné průběhy tvrdostí vzorků s předehřevem a dohřevem si jsou velmi podobné, a z toho důvodu jsou vyobrazeny pouze snímky s průběhy u předehřevů. Tvrdost základního materiálu Hardox 450 byla změřena 480 HV_{0,1}, což téměř odpovídá jmenovité hodnotě dané výrobcem. Na základě relativně nízké hodnoty tvrdosti nemůže jít pouze o čistě martenzitickou mikrostrukturu, ale zřejmě jde o kombinaci popuštěného martenzitu s bainitem. Z této jmenovité hodnoty, tvrdost postupně ke svaru klesá z důvodů žíhání zušlechťených martenzitických a bainitických struktur. Při dosažení vizuálně pozorovatelné hranice TOO je materiál nejhouževnatější s minimální tvrdostí na úrovni přibližně 60 % původního stavu. Tvrdost následně roste v oblasti normalizace a nabývá maxima v oblasti hrubozrnné křehké struktury. Litá struktura svarového kovu u laserových a hybridních svarových spojů dosahuje mírně nižších hodnot na přibližně stejné úrovni jako základní materiál. U obloukové metody MAG nastává razantní pokles na hodnoty tvrdosti kolem 250 HV_{0,1}.

V kapitole 3.5.1 byla pozorována makrostruktura a velikost TOO na základě vizuálního rozlišení snímků. Při měření mikrotvrdosti bylo zjištěno, že TOO sahá do větších vzdáleností, než bylo měřeno na základě vizuálního pozorování. S nárůstem vneseného tepla je tento jev ještě výraznější, a tak je například u vzorku č. 9 TOO podle změny tvrdosti vůči základnímu materiálu široká téměř 20 mm oproti 9,9 mm při vizuálním pozorování. Při svařování s narůstajícím tepelným příkonem jsou přechody mezi jednotlivými pásmy TOO výrazně hladší, což potvrzují plynulejší průběhy tvrdostí přes celý svarový spoj. Dalším důsledkem většího množství dodaného tepla je snižování maximální tvrdosti dosažené ve svarovém kovu z hodnot 542 HV_{0,1} u vzorku č. 1 (LASER) až po 432 HV_{0,1} u vzorku č. 9 (MAG).

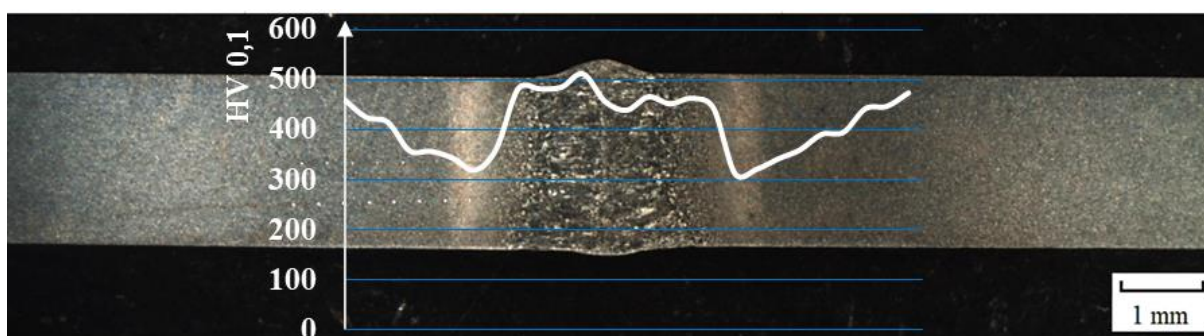
Při vnesení většího množství tepla zůstává materiál déle na vyšší teplotě, a tím vznikají v TOO nemartenzitické struktury s nižší tvrdostí a ve svaru a jeho blízkém okolí nastává hrubnutí zrna. Výsledkem toho je obecně větší pokles tvrdosti a pevnosti v mnohem širší oblasti materiálu. Tento jev se projevuje u obloukových metod svařování a u materiálů, které svou tvrdost a pevnost získaly při kalících procesech tepelného zpracování.



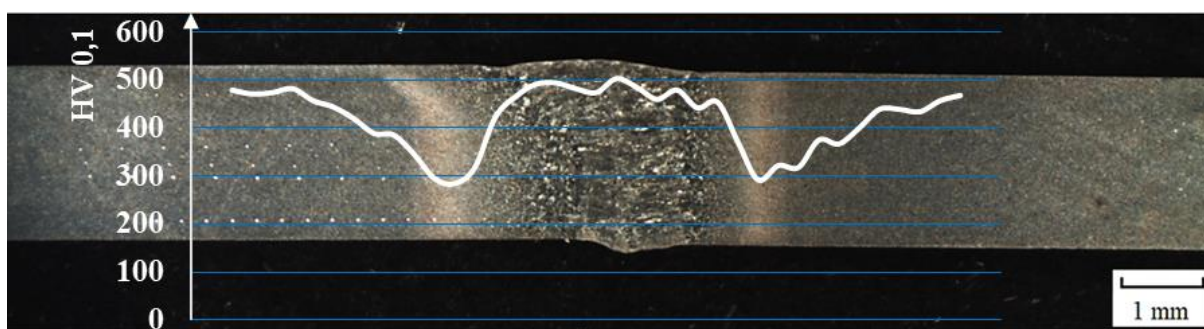
Obr. 66 Průběh tvrdosti u vzorku č. 1 svařeného laserem



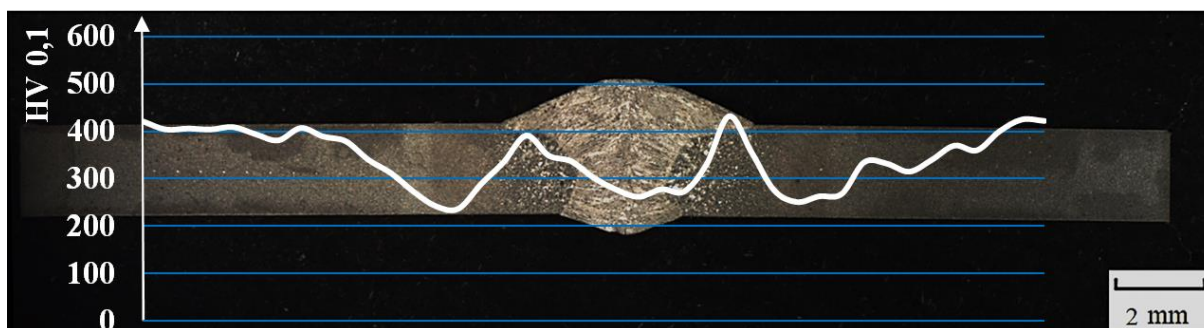
Obr. 67 Průběh tvrdosti u vzorku č. 2 svařeného laserem s TIG předehřevem 20 A



Obr. 68 Průběh tvrdosti u vzorku č. 3 svařeného laserem s TIG předehřevem 40 A



Obr. 69 Průběh tvrdosti u vzorku č. 4 svařeného laserem s TIG předehřevem 60 A



Obr. 70 Průběh tvrdosti u vzorku č. 9 svařeného metodou MAG

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [40], [66], [69], [72], [73]

Ekonomické hodnocení této práce není založeno na výrobě žádné reálné součásti. Práce se zabývá výzkumem a aplikací nové technologie a není v ní zahrnuta žádná optimalizace procesu nebo provozních nákladů. Proto je zde nutné brát ekonomiku pouze jako doplňkovou informaci. Navíc je počítáno s daty pocházejících z akademického prostředí, kde se zjištěné pořizovací, servisní a provozní náklady mohou výrazně lišit od reálné průmyslové výroby. První odlišností budou poskytované slevy pro výukové a výzkumné organizace. Dalším rozdílem pak bude výrazně nižší provozní zatížení u uvažovaných zařízení, což přímo ovlivní náklady na jejich údržbu a náhradní díly. Nakonec by se měly zohlednit i přídatné náklady na přípravování, které jsou u laserových technologií v průmyslu nutností.

Spočtené náklady na hodinu provozu a metru délky svaru jsou v tabulce číslo 9 vyjádřeny pro 3 různé varianty. U všech jsou počítány odpisy na 5 let (v reálném průmyslu se počítá i s 12 lety) při uvažovaném dvousměnném provozu. Ročně je bráno v úvahu 4000 pracovních hodin (50 týdnů, 5 dní a 2 x 8hodin) a uvedené ceny jsou včetně veškerého příslušenství.

Výsledky na hodinu provozu jsou u Laser + TIG varianty 1,5x vyšší než u metody MAG, která díky vysokému tepelnému příkonu nevyžaduje předehřev, ale více degraduje materiál. To se ale mění při počítání nákladů na metr vytvořeného svaru, kdy jsou výhody metody MAG převáženy velmi rychlou laserovou technologií ($v = 20$ oproti 9,2 mm/s). 25% nárůst ceny za metr svaru u varianty 2 oproti variantě 1 (pouze laser) je způsoben především absencí výrazné optimalizace proudění ochranných plynů. Na základě videosnímků ze šlierové metody je uvažováno úplné vynechání ofuku z koaxiální trysky laseru, čímž se náklady na technické plyny sníží o 56%.

Tab. 9 Výpočet ekonomiky provozu u různých variant

Varianta	1. bez předehřevu	2. s TIG předehřevem	3. MAG bez předehřevu
Svařovací zdroj	Laser IPG YLS 2000	Laser IPG YLS 2000 + TIG Fronius MagicWave 1700	Fronius TransPuls Synergic 4000 + podavač VR 4000
Manipulátor	ABB IRB 2400/16	ABB IRB 2400/16	ABB IRB 2400/16
Pořizovací cena [Kč]	10 000 000	10 080 000	6 600 000
Odpisy [Kč/hod]	500	504	330
Mzda operátora [Kč/hod]	238	238	238
Elektrická energie [Kč/hod]	20	24	27
Ochranný plyn [Kč/hod]	300	550	220
Přídavný materiál [Kč/hod]	0	0	38
Údržba [Kč/rok]	50 000	56 000	64 000
Údržba [Kč/hod]	12,5	14	16
Celkem [Kč/hod]	1071	1330	869
Vč. 180% režie [Kč/hod]	1927	2394	1564
Vč. 15% zisku [Kč/hod]	2216	2753	1799
Výsledná cena na 1 m svaru [Kč]	30,78	38,24	54,51

5 ZÁVĚRY

V této práci je zkoumán vliv využití obloukového přehřevu metodou TIG při laserovém svařování materiálu Hardox 450 bez aplikace na reálnou součást. Po podrobnějším rozboru byla tato hybridní kombinace shledána jako vyhovující a vhodnější než jiné konvenční metody. V posuzování hrál nejdůležitější roli zmíněný materiál, který svými dobrými mechanickými vlastnostmi dosahuje tepelným zpracováním, což při svařování způsobuje jeho tepelnou degradaci.

Při výpočtu teploty přehřevu u experimentálního materiálu Hardox 450 o tloušťce plechu 2 mm byla podle dostupných a běžně používaných vzorců spočtena minimální teplota ohřevu na 88°C. Tento výpočet byl proveden pouze použitím Sefariánovy metody, protože ostatní výpočtové algoritmy nebyly adekvátní z důvodu úzkých rozsahů vstupních parametrů (vnesené teplo, chemické složení, tloušťky plechů, atd.). Celkově nejsou běžné výpočtové postupy stavěné na tuto technologii především příčinou výrazně nízkého vneseného tepla. Při porovnání s metodou MAG je menší téměř 3,5x. Dále bylo v rámci jiného výzkumu na ÚPT změřeno, že rychlost ochlazování je v porovnání s metodou TIG přibližně 10x větší (500 °C/s oproti 50 °C/s u TIG). Z těchto výsledků je důvodné se domnívat, že přehřev je i u takto tenkého a svařitelného materiálu prospěšný pro výsledné svarové spojení, které nesmí být křehké.

Pro ověření těchto domněnek byl proveden experiment, kdy byly svařeny plechy s různým nastavením parametrů a pozic TIG hořáku (přehřev či dohřev). Z vyhotovených vzorků byly vytvořeny zkušební tělesa pro metalografii, tahovou zkoušku a pro měření mikrotvrdosti Vickersovou metodou.

Výsledky metalografie jsou rozděleny na snímky makrostruktury a mikrostruktury. Při vyhodnocování makrostruktury je pozorovatelná jistá úměra mezi rostoucím vneseným teplem, způsobeným navyšováním parametrů přehřevu, a rozšiřující se tepelně ovlivněnou oblastí. Při bližším pohledu na mikrostrukturu se při pomalejším chladnutí svaru zjemňuje struktura svarového kovu a začínají se zde objevovat určité feritické struktury. Přesné určení těchto struktur a jejich případnou vhodnost nelze podle zjištěných dat blíže určit. Na základě výsledků mikrostruktury se jedná o určité zlepšení oproti laseru bez TIG ohřevu. Mírným obětováním tvrdosti a pevnosti základního materiálu docílíme hladších přechodů mezi širšími pásmy TOO, čímž omezíme vznik strukturálních vrubů ovlivňujících únavové vlastnosti.

Tahová zkouška prokázala výhody testované technologie oproti běžné metodě MAG. Při svařování samostatným laserem byl pokles pevnosti svaru vůči základnímu materiálu necelých 19 % oproti 45 % poklesu u metody MAG. Testované varianty LASER + TIG se pohybovaly v rozmezí poklesu od zhruba 23 % do 28,5 % v závislosti na vneseném teple. Všechny vzorky byly přetrženy v TOO při přibližně třetinovém prodloužení vůči ZM.

Zkoušení mikrotvrdosti kopíruje a potvrzuje výsledky předchozích zkoušek. Tvrdost je s rostoucím vneseným teplem snižována ve větší vzdálenosti od svaru v důsledku žíhání ZM.

Optimální volbu zkoušené varianty by blíže určila zkouška rázem v ohybu, která by stanovila vliv parametrů svařování na houževnatost spoje. Výsledná volba by byla kompromisem mezi dostačující houževnatostí, pevností a tvrdostí v určité požadované vzdálenosti od svaru. Další data a zpřesnění by poskytl ARA diagram experimentálního materiálu, který by spolu s relativně přesným měřením pomocí termočlánků pomohl určit rychlosti ochlazovacích křivek při tepelných cyklech. Tím by byla snáze určena a potvrzena vzniklá struktura v měřeném místě a bylo by možné lépe predikovat výsledné vlastnosti.

Závěrem, lze říci, že získané výsledky nedostačují pro jednoznačné určení nejvhodnější experimentální varianty, avšak postačují k prokázání výhod vůči konvenčním metodám.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [70], [71]

1. DEBS, M. Materiály a technologie pro výrobu trialových kol. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 73 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.
2. TAČR: Program Gama [online]. 2018 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.tacr.cz/index.php/cz/programy/program-gama.html>
3. Svařovací metody. HAVELKA, P. Automig: internetový magazín [online]. 2018, 2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatic/>
4. Průmysl 4.0: Digitalizace v průmyslové výrobě. Siemens: Ingenuity for life [online]. 2017 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.siemens.cz/prumysl40/>
5. Svařování MIG/MAG. In: BV Group floor steel a.s. [online]. 2009 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <http://www.bvgroup.cz/svarovani-mig-mag.php>
6. GULA, N. Laser welding comes of age. In: Canadian metal working [online]. 2013-11-05 [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/article/fabricating/laser-welding-comes-of-age>
7. Svařování ocelí Hardox[®] a Weldox[®]. Oxelösund: SSAB, 2016, 12 s.
8. SSAB [online]. 2018 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/>
9. The Steel Book. Oxelösund: SSAB, 2016, 42 s. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/>
10. MRŇA, L. Dělení a svařování svazkem plazmatu [přednáška]. Brno, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně. 2016. In: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/> [online]. [cit. 2018-05-21] Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_deleni_a_svarovani_plasmou_2013_mrna.pdf
11. Technologie svařování a zařízení: Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT). Česká svářečská společnost ANB VUT v Brně, odbor svařování - ATB 2. Brno, 2016, 272 s.
12. Materiály a jejich chování při svařování: Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT). Ostrava, 2016, 404 s. Česká svářečská společnost ANB, Český svářečský ústav s.r.o.
13. MRŇA, L. Technologie využívající laser [přednáška]. Brno, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2018-09-28. 2016. In: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/> [online]. [cit. 2018-02-19] Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf

14. ŠEBESTOVÁ, H. Hybridní metody svařování [přednáška]. Olomouc, Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky. In: <http://fyzika.upol.cz/> [online]. [cit. 2018-04-25] Dostupné z: https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_hybridni_svarovani.pdf
15. HERMAN, P. Řízené tepelné zpracování v procesu svařování. Konstrukce: Odborná časopis pro stavebnictví a strojírenství [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, 2011, 2011-11-21 [cit. 2018-04-25]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/rizene-tepelne-zpracovani-v-procesu-svarovani/>
16. SHIGLEY, J. E., Ch. R. MISCHKE a R. G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. V Brně: VUTIUM, 2010, 269 - 306. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
17. PTÁČEK, L. a kolektiv. Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
18. AMBROŽ O., KANDUS B., KUBÍČEK J. Technologie svařování a zařízení, Ostrava, Zeross, 2001, 395 str. ISBN 80-85771-81-0.
19. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R. Laserové technológie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000, 122 s. edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.
20. Rozdelenie laserov. In: LASCAM Systems [online]. 2017 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/sk/rozdelenie-laserov/>
21. Historie vývoje laseru. Leonardo Technology, Automatizace průmyslového značení [online]. 2018 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/historie-vyvoje-laseru>
22. MRŇA, L. Základy laserové techniky [přednáška]. Brno, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2016-09-21. In: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/> [online]. [cit. 2018-02-19] Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv-specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf
23. TRUMPF [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.trumpf.com>
24. SCOTT, N. Laser cutting machines market 2017 to 2023 Bystronic. IBN Service: Independent news [online]. 2017-02-12 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://ibnservice.com/2017/12/02/laser-cutting-machines-market-2017-to-2023-cincinnati-trotec-coherent-tanaka-bystronic/>
25. MRŇA, L. Využití výkonových laserů ve strojírenské praxi svařování, dělení a další technologie [přednáška]. Brno, Ústav přístrojové techniky. In: <http://docplayer.cz/> [online]. [cit. 2018-02-19] Dostupné z: <http://docplayer.cz/7209420-Vyuziti-vykonovych-laseru-ve-strojirenske-praxi-svarovani-deleni-a-dalsi-technologie.html>

26. TOMÍČEK, L. Studium laserem indukovaného oxidativního značení proteinů. Brno, 2012, 48 s. Dostupné také z: <http://docplayer.cz/6176338-Masarykova-univerzita-prirodovedecka-fakulta.html>. Bakalářská práce. Masarykova Univerzita, Přírodověděcká fakulta, Ústav Biochemie. Vedoucí práce Jan Preisler.
27. Laser beam quality. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018, 2017-09-07 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_beam_quality
28. ČSN EN ISO 1011-6: Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 6: Laserové svařování. CEN Evropský výbor pro normalizaci, 2001, 34 s.
29. Pulsed laser / infrared / YAG. In: II-VI Infrared [online]. 2016, 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/ii-vi-infrared/product-37313-749747.html>
30. Princip vláknového fiber laseru. Elektro průmysl: Informace ze světa průmyslu a elektrotechniky [online]. 2018, 2016-06-21 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/technologicke-novinky/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
31. SAUCEDO, F. V., B. CHANN, B. SAMSON a P. TAYEBATI. Direct diode vs. other laser systems used in laser cutting. In: Industrial laser solutions for manufacturing [online]. 2016-03-16 [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-31/issue-2/features/direct-diode-vs-other-laser-systems-used-in-laser-cutting.html>
32. DULEY, W.W. Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4.
33. OTTO, A., H. M. KOCH a R. G. VÁZQUEZ. Multi-Physical Simulation of Laser Welding [online]. ELSEVIER B.V. 2014, 2014, , 1334-1342 [cit. 2018-03-06]. DOI: 10.1016. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389214002041>
34. KOŘÁN, P. Seriál na téma lasery - laserové svařování I (laser welding). LAO: Lasery a optika [online]. 2014, 2013-02-18 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
35. KESSE, M. A. Laser - TIG hybrid welding process [online]. Lappeenranta, 2013 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/91432/Laser-TIG%20hybrid%20welding%20process.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Thesis for the Degree of Master of Science in Technology. Lappeenranta University of Technology. Vedoucí práce J. Martikainen a P. Kah.
36. SIAD Czech spol. s.r.o. PROVAZNÍK, P. IndustryEU.cz: Business portal [online]. 2018 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.industry-eu.cz/en/firmy/siad-czech-spol-s-r-o>

37. Cladding head YC52 - basic model. In: Precitec [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processing-heads/yc52/>
38. ROORKEE, I.I.T. Principle of TIG Welding. In: NPTEL: A Project funded by MHRD, Govt. of India [online]. 2009 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://nptel.ac.in/courses/112107144/34>
39. ČSN EN ISO 1011-2: Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí. CEN Evropský výbor pro normalizaci, 2001, 56 s.
40. TransPuls Synergic 4000. Fronius Česká Republika [online]. 2017 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: https://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-8492D113-73497B15/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_1054.htm
41. Mika, I. Re: Diplomová práce VUT Hardox 450 [e-mailová komunikace]. 22. února 2018 10:34 [cit. 2018-02-26].
42. Feromat: Hutní a spojovací materiál [online]. Černý-počítačové služby, 2007 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://shop.feromat.cz/index.php>
43. Chapas de aço Hardox. In: In the mine [online]. 2015-09-09 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://inthemine.com.br/site/chapas-de-aco-hardox/>
44. STRÁNSKÝ, L. Konstrukční oceli [přednáška]. Brno, Fakulta strojního inženýrství VUT, In: <http://slideplayer.cz/> [online]. [cit.2018-04-10] Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2284510/release/woothee>
45. PILOUS, V. Technologie kovových materiálů. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008, 125 s. ISBN 978-80-7043-699-8.
46. KOUKAL, J. a T. ZMYDLENÝ. Svařování I. Dotisk 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 136 s. ISBN 978-80-248-0870-3.
47. OCHODEK, V. Stanovení teploty přehřevu [přednáška]. Ostrava, VŠB TU Ostrava, Katedra mechanické technologie – Ústav svařování, 2012-03. In: <http://www.domzo13.cz/> [cit. 2018-04-08] Dostupné z: http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/stanoveni_teploty_prehrevu_2012.pdf
48. Svařitelné oceli, hodnocení svařitelnosti: Podklady pro výuku předmětu HMT na Ústavu strojírenské technologie. Brno, Fakulta strojního inženýrství VUT, 2016, 5 s.
49. Mika, I. RE: ARA-diagram [e-mailová komunikace]. 8. ledna 2016 11:32 [cit. 2018-03-27].
50. Rapid Heat 35 Induction Heating System. In: FMT Field Machine Tools [online]. 2015, 2015 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.fmt.com.au/product/rapid-heat-35-induction-heating-system/>

51. P.W.H.T & Stress relieving. In: Tomco Group of companies [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.tomco.ca/home/productionservicesltd/p-w-h-t-stress/>
52. RAFIQUE, A. Welding Preheat Considerations. In: Weldpedia [online]. 2017, 2016 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <https://www.weldpedia.com/2015/12/welding-preheat-considerations.html>
53. STAUFER, H. A look at laser hybrid welding in the automotive industry. In: The Fabricator [online]. 2018, 2016-10-05 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/article/laserwelding/a-look-at-laser-hybrid-welding-in-the-automotive-industry>
54. Konstrukce termokamery. Termokamera.cz [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
55. Termokřídly. Wirpo [online]. 2018, 2018 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.wirpo.cz/pridavne-materialy/termokridy>
56. CIGOY, D. DPS Elektronika od A do Z: Měření teploty: ale správným způsobem [online]. 2018, 2012 (4) [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:7513/mereni-teploty-ale-spravnym-zpusobem>
57. DULA, J. Metrologie ve strojírenství: Kontrola svarů. Uherské Hradiště, 2010, 40 s. Dostupné také z: <http://www.uh.cz/szegsm/files/sblizovani/pdf/kontrola-svaru.pdf>. Projekt: Sbližování teorie s praxí. Střední odborná škola technická Uherské Hradiště.
58. MORAVEC, J., I. NOVÁKOVÁ, J. BUREŠ, T. KIK, J. PAJER, L. MÁDLE a M. MUSIL. DOM – ZO 13, s.r.o. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: Výukové materiály pro kurzy IWE a IWT. Brno, 2017, 202 – 229 s.
59. ČSN EN ISO 6507-1: Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse- část 1: Zkušební metoda. CEN Evropský výbor pro normalizaci, 2005, 21 s.
60. MOLLIKOVÁ, E. Nauka o materiálu: Studijní opora předmětu vyučovaného v kombinovaném bakalářském studiu. Brno, Fakulta strojního inženýrství VUT, 2002, 159 s.
61. PTÁČEK, L. a kolektiv. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 82 - 150. ISBN 80-720-4248-3.
62. ČSN EN ISO 6892 - 1. Kovové materiály - zkoušení tahem: Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017, 76 s.
63. FOREJT, M. Teorie tváření. Vyd. 2., v Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 24 - 30. ISBN 80-214-2764-7.

64. FUCIMAN, M. Elektrické výboje ve vodě a vodných roztocích [online]. Praha, 2006, 76 s. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/42757>. Disertační práce. Katedra elektroniky a vakuové fyziky, Matematicko – fyzikální fakulta University Karlovy a Ústav fyziky plazmatu AV ČR. Vedoucí práce P. Šunka.
65. MRŇA, L. a J. PAVELKA. Využití šlírové metody ve výkonových laserových technologiích [prezentace]. Brno, Ústav přístrojové techniky. [cit. 2018-02-19]
66. IRB 2400 Industrial Robot. ABB Robotics, 2018, 4 s. [cit. 2018-04-23]. Dostupné také z: http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=PR10034EN_R7&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch
67. SHINER, B. High Power Fiber Laser Technology [přednáška]. IPG Photonics. 2013-09-10 [online]. [cit. 2018-04-24] Dostupné z: <http://www-conf.slac.stanford.edu/lso/2013-Presentations/BShiner-HighPowerFiberLasers.pdf>
68. MagicWave 1700. Fronius Česká Republika [online]. 2017 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z :http://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-6DCBD0A7-6AD3C9D9/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_1251.htm#.WtuWnYhuZPY
69. MRŇA, L. Ekonomika technologií [přednáška]. Brno, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně. In: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/> [online]. [cit. 2018-05-21] Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/cviceni/hd4_ekonomika_technologii_mrna.pdf
70. Citace PRO [online]. [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>
71. KRČÁL, M. a Z. TEPLÍKOVÁ. Naučte (se) citovat. Blansko: Citace.com, 2014, 156 s. ISBN 978-80-260-6074-1.
72. VAVERKA, L. [Náklady na provoz automatizovaného svařovacího centra v průmyslové výrobě] [zvukový záznam rozhovoru], 2018-05-21
73. Výběr nejpoužívanějších typů svařovacích materiálů. 22. Vydání. Vamberk: ESAB, 2016, 46 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
A _{c1} , A _{c3}	překrystalizační teploty	[°C]
Ar	argon	[-]
As	arsen	[-]
ARA diagram	diagram anizotropního rozpadu austenitu	[-]
b ₀	počáteční šířka zkušební tyče	[mm]
B	bór	[-]
BPP	beam parametr product	[mm.rad]
C	uhlík	[-]
C _e	uhlíkový ekvivalent	[hm. %]
CET	uhlíkový ekvivalent podle CET	[hm. %]
CEV	uhlíkový ekvivalent podle IIW	[hm. %]
Co	kobalt	[-]
CO ₂	oxid uhličitý	[-]
Cr	chrom	[-]
Cu	měď	[-]
ČSN	Česká státní norma	[-]
D	délka úhlopříčky vtisku	[μm]
DC	stejnoseměrný proud	[-]
DPH	daň z přidané hodnoty	[-]
DT	destruktivní testování	[-]
E	Youngův modul pružnosti v tahu	[GPa]
EN	Evropská norma	[-]
f	frekvence	[Hz]
F	síla	[N]
Ge	germanium	[-]
HB	tvrdost podle Brinella	[-]
HV	tvrdost podle Vickerse	[-]
He	helium	[-]
HD	objem difúzního vodíku	[ml.100g ⁻¹]
I	proud	[A]
IIW	mezinárodní svářečský institut	[-]
ISO	International organization for standardization	[-]
k	tepelná účinnost přenosu tepla	[-]
K	měrná refraktivita prostředí (konstanta Gladstone-Dale)	[cm ³ /g]
KV	nárazová práce	[J]
l ₀	počáteční měřená délka zkušební tyče	[mm]
l _u	konečná měřená délka zkušební tyče	[mm]
LASER	light amplification by stimulated emission of radiation	[-]
LED	light emitting diode	[-]
m	zatížení	[kg]
MAG	metal active gas	[-]
MASER	microwave amplification by stimulated emission of radiation	[-]
MIG	metal inert gas	[-]

Mn	mangan	[-]
Mo	molybden	[-]
n	index lomu světla	[-]
N	dusík	[-]
Nb	nyob	[-]
Nd	neodym	[-]
NDT	nedestruktivní testování	[-]
Ni	nikl	[-]
P	výkon, fosfor	[W], [-]
PM	přídavný material	[-]
ppm	particle per million	[-]
Q _s	vnesené teplo	[kJ.mm ⁻¹]
Q _v	průtok plynu	[l.min ⁻¹]
R _e	mez kluzu	[MPa]
R _{eh}	hodní mez kluzu	[MPa]
R _{el}	dolní mez kluzu	[MPa]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
ROE	ruční obalová elektroda	[-]
RTG	rentgen	[-]
S ₀	počáteční průřez zkušební tyče	[mm ²]
S _u	konečný průřez zkušební tyče	[mm ²]
Si	křemík	[-]
SK	svarový kov	[-]
T	teplota	[°C]
T _p	teplota předehřevu	[°C]
t	tloušťka	[mm]
t _{8/5}	ochlazovací doba z 800 °C na 500 °C	[s]
TAČR	Technologická agentura České Republiky	[-]
Ti	titan	[-]
TIG	tungsten inert gas	[-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	[-]
U	napětí	[V]
v	rychlost svařování	[m.s ⁻¹]
V	vanad	[-]
YAG	yttrium aluminium granát	[-]
Yb	ytterbium	[-]
Z	kontrakce	[%]
ZM	základní material	[-]
Zn	zircon	[-]
Δ	rozdíl	[-]
ε	poměrné prodloužení	[-]
λ	vlnová délka	[μm]
η	účinnost	[%]
ρ	hustota	[g.cm ³]
σ	napětí	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Svařování MAG [5].....	10
Obr. 2 Svařování laserem [6].....	10
Obr. 3 Vzorky z plechu Hardox 450.....	11
Obr. 4 Rozdíl mezi laserovým a klasickým zdrojem záření [21]	13
Obr. 5 Aplikace průmyslových laserů [23, 24]	14
Obr. 6 Funkční schéma konstrukce rovinného rezonátoru laseru [26].....	15
Obr. 7 Geometrie fokusovaného svazku, Beam parametr product [27, 28]	16
Obr. 8 Konstrukce plynového SLAB laseru [20]	17
Obr. 9 Konstrukce tyčového Nd:YAG laseru [20]	19
Obr. 10 Fokuse laserové svazku u polovodičového laseru [20,25]	19
Obr. 11 Konstrukce diskového Yb:YAG laseru [29]	20
Obr. 12 Konstrukce Yb:YAG vláknového laseru [20, 25, 30]	21
Obr. 13 Absorpce záření v kovech v závislosti na vlnové délce laseru [31].....	22
Obr. 14 Režimy svařování laserem a) kondukční b) penetrační [25, 34].....	24
Obr. 15 Hlava Precitec YC52 [37]	25
Obr. 16 Schéma svařování metodou TIG [38]	27
Obr. 17 Schéma svařování metodou MIG/MAG [11].....	28
Obr. 18 Úspora materiálu [8].....	29
Obr. 19 Aplikace plechů Hardox 450 [43]	29
Obr. 20 Výroba plechů Hardox [9].....	30
Obr. 21 Pásma tepelně ovlivněné zóny [44].....	31
Obr. 22 Graf pro stanovení teploty přehřevu podle ČSN EN 1011-2 A-d [39].....	35
Obr. 23 ARA diagram firmy SSAB [49].....	36
Obr. 24 Indukční ohřev [50]	37
Obr. 25 Ohřev odporovými dečkami [51]	37
Obr. 26 Ohřev plamenem [52].....	38
Obr. 27 Hybridní technologie s	38
Obr. 28 Způsoby měření teploty [47]	39
Obr. 29 Svarové vady [57]	40
Obr. 30 Schéma zkoušky tvrdosti podle Vickerse [60].....	42
Obr. 31 Smluvní tahový diagram [60].....	44
Obr. 32 Ploché zkušební těleso [62].....	45
Obr. 33 Schéma Schlierové metody zviditelnění proudění plynu [64]	46
Obr. 34 Robot IRB 2400/16	47
Obr. 35 Laserový zdroj YLS 2000	47
Obr. 36 Fronius MagicWave 1700	48
Obr. 37 Fronius TransPulsSynergic 4000.....	48
Obr. 38 Nastavení pozice TIG hořáku.....	53
Obr. 39 Vliv vzdálenosti TIG oblouku od laserové svařovací hlavy na svařovací proces.....	54
Obr. 40 Nastavení pozice MAG hořáku	54
Obr. 41 Sdružené vzorky pro experimentální část	55

Obr. 42 Sestavení při experimentu	55
Obr. 43 Schéma použité konfigurace Schlierové metody [65].....	56
Obr. 44 Proudění ochranného plynu při laserovém svařování s předehřevem metodou TIG ..	56
Obr. 45 Zařízení pro výrobu metalografických vzorků.....	57
Obr. 46 Metalografické vzorky	58
Obr. 47 Olympus LEXT 3100	58
Obr. 48 Makrostruktura vzorku 1	59
Obr. 49 Makrostruktura vzorku 9	59
Obr. 50 Makrostruktura vzorků 2, 3 a 4	60
Obr. 51 Makrostruktura vzorků 5, 6 a 7	61
Obr. 52 Mikrostruktura základního materiálu Hardox 450, vzorek 1	62
Obr. 53 Mikrostruktura svarového kovu – laser, vzorek 1	63
Obr. 54 Mikrostruktura svarového kovu – laser + předehřev TIG 60A, vzorek 4	63
Obr. 55 Mikrostruktura svarového kovu – MAG, vzorek 9	64
Obr. 56 Vzorky pro tahovou zkoušku	65
Obr. 57 Geometrie tahového zkušební tělesa	65
Obr. 58 Přetržený vzorek.....	66
Obr. 59 Tahový diagram základního materiálu (vzorek 8)	66
Obr. 60 Tahový diagram pro vzorky 1 a 9	67
Obr. 61 Tahový diagram u sady vzorků 2, 3 a 4.....	69
Obr. 62 Tahový diagram u sady vzorků 5, 6 a 7.....	70
Obr. 63 Závislost meze pevnosti R_m na vneseném teple Q	71
Obr. 64 Leco LM 247AT.....	72
Obr. 65 Měření úhlopříček vtisku	72
Obr. 66 Průběh tvrdosti u vzorku č. 1 svařeného laserem.....	73
Obr. 67 Průběh tvrdosti u vzorku č. 2 svařeného laserem s TIG předehřevem 20 A.....	74
Obr. 68 Průběh tvrdosti u vzorku č. 3 svařeného laserem s TIG předehřevem 40 A.....	74
Obr. 69 Průběh tvrdosti u vzorku č. 4 svařeného laserem s TIG předehřevem 60 A.....	74
Obr. 70 Průběh tvrdosti u vzorku č. 9 svařeného metodou MAG.....	74

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Způsoby dělení laserů [19]	15
Tab. 2 Chemické složení materiálu Hardox 450 podle inspekčního certifikátu 3.1[8].....	49
Tab. 3 Mechanické vlastnosti materiálu Hardox 450 [8]	50
Tab. 4 Svařovací parametry a hodnoty vneseného tepla	51
Tab. 5 Naměřené a zprůměrované hodnoty u vzorků 8.1, 8.2 a 8.3 základního materiálu	67
Tab. 6 Naměřené a zprůměrované hodnoty u sady vzorků 1 a 9 laserového a MAG svaru	68
Tab. 7 Naměřené a zprůměrované hodnoty u sady vzorků 2, 3 a 4 TIG předehřevu.....	68
Tab. 8 Naměřené a zprůměrované hodnoty u sady vzorků 5, 6 a 7 TIG dohřevu.....	70
Tab. 9 Výpočet ekonomiky provozu u různých variant	75

SEZNAM PŘÍLOH

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

Příloha č. 2 – Naměřené hodnoty tvrdosti u vzorků č. 1 až 9 (mimo vzorek č. 8)

Příloha č. 3 – Přídavný materiál OK Autrod 12.51

Příloha č. 4 – Tabulka pro určení přehřevů od firmy SSAB

Příloha č. 5 – Inspekční certifikát EN 10204 – 3.1 materiálu Hardox 450

Příloha č. 6 – Snímky mikrostruktury TOO (9 snímků)

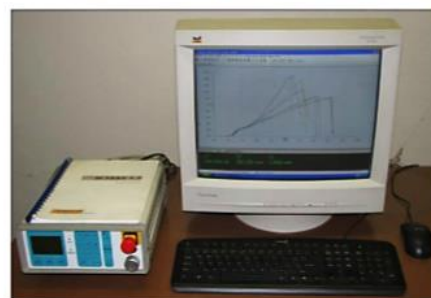
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

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

Technické parametry:

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

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

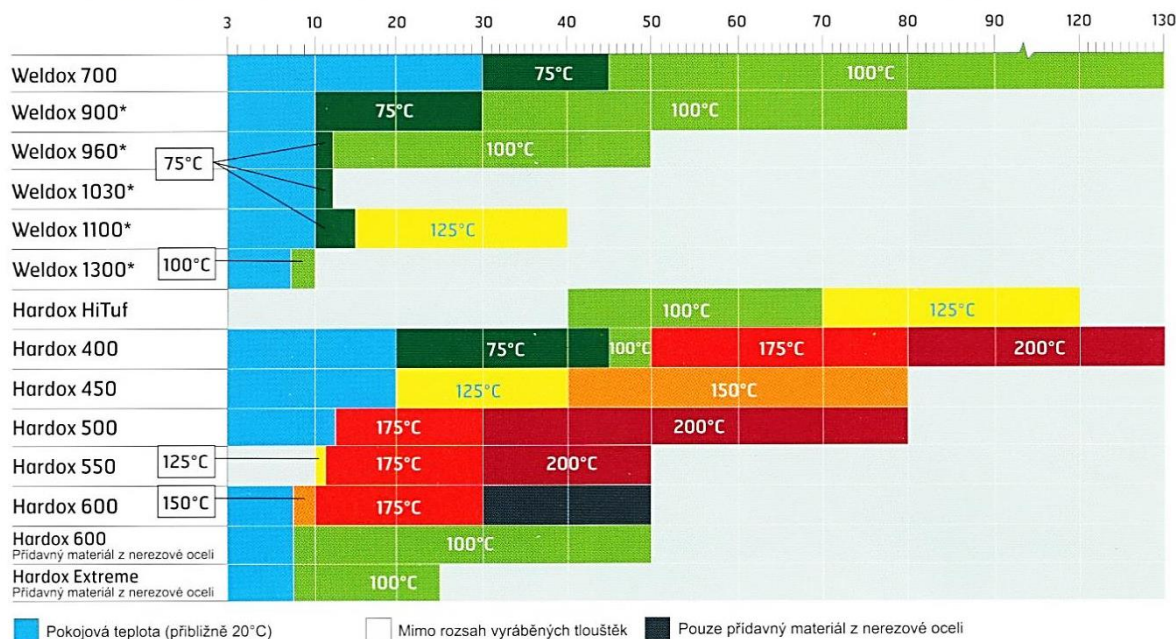


TEPLOTY PŘEDEHŘEVU A INTERPASS PRO OCELI WELDOX A HARDOX

V grafu níže jsou uvedeny nejnižší teploty předehřevu a interpass během svařování. Není-li stanoveno jinak, platí uvedené hodnoty pro svařování s přidavnými svařovacími materiály bez legujících prvků nebo s nízkým obsahem legujících prvků.

- ▶ Pokud se svařují plechy o různých tloušťkách, ale shodné jakosti oceli, řídí se požadovaná teplota předehřevu a interpass podle plechu s největší tloušťkou.
- ▶ Pokud se svařují plechy různých jakostí oceli, řídí se požadovaná teplota předehřevu a interpass podle plechu, který vyžaduje nejvyšší teplotu předehřevu a interpass.

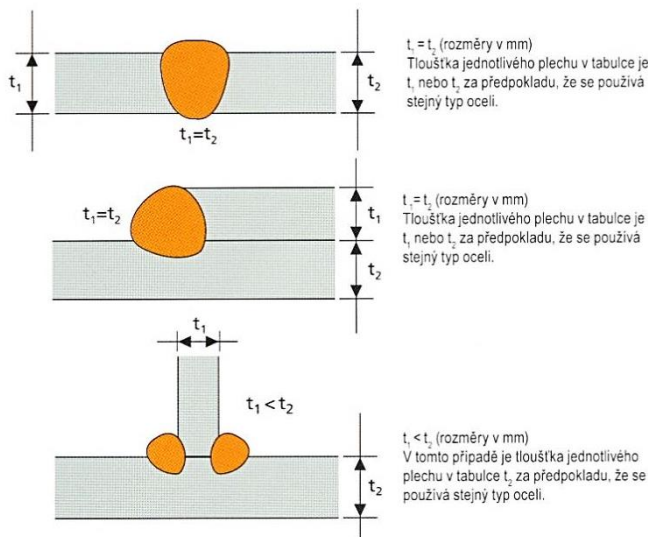
MINIMÁLNÍ DOPORUČENÉ TEPLOTY PŘEDEHŘEVU A INTERPASS TEPLOTY PRO RŮZNÉ TLOUŠTKY PLECHU [mm]



Poznámka: Tabulka se vztahuje na tloušťku jednotlivého plechu při svařování s tepelným příkonem 1,7 kJ/mm. Další informace o tloušťkách jednotlivých plechů najdete v dokumentu TechSupport č. 61 na webových stránkách www.ssab.com.

MAXIMÁLNÍ DOPORUČENÁ TEPLOTA INTERPASS

Weldox 700**	300°C
Weldox 900**	300°C
Weldox 960**	300°C
Weldox 1030	200°C
Weldox 1100	200°C
Weldox 1300	200°C
Hardox HiTuf**	300°C
Hardox 400	225°C
Hardox 450	225°C
Hardox 500	225°C
Hardox 550	225°C
Hardox 600	225°C
Hardox Extreme	100°C

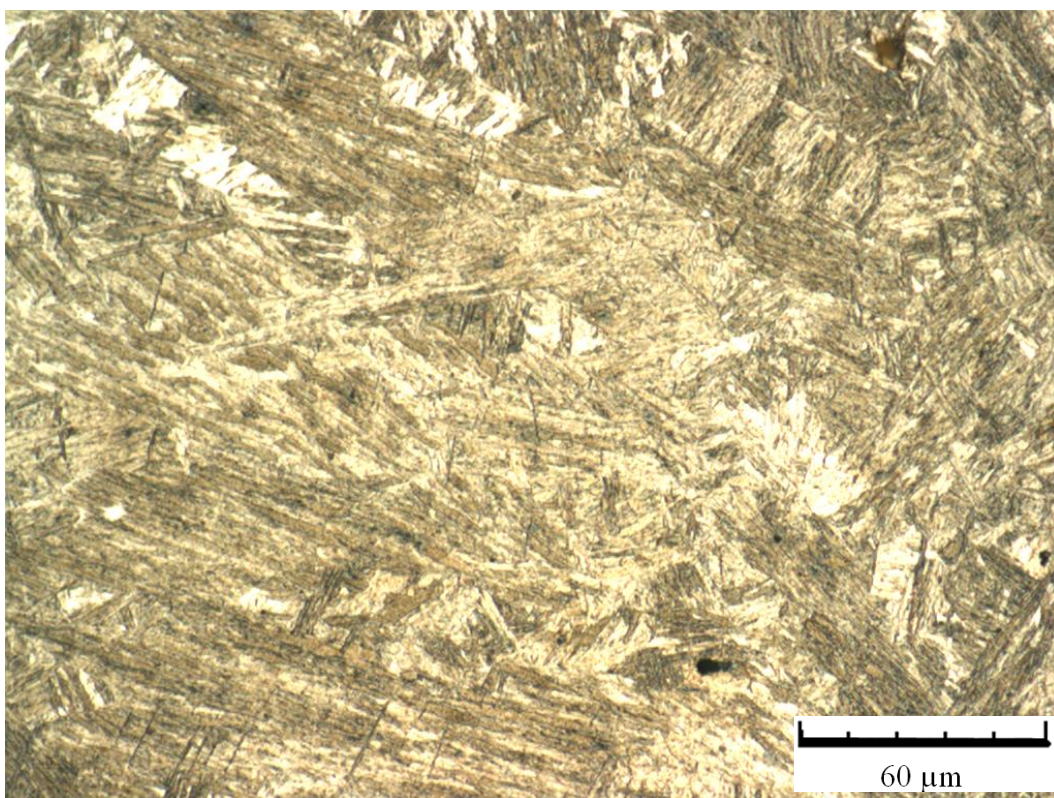


* Teplota předehřevu se řídí podle přidavného materiálu, má-li hodnotu uhlíkového ekvivalentu vyšší než plech.
 ** Teploty interpass až do hodnoty přibližně 400 °C lze použít v určitých případech u oceli Weldox 700–960 a Hardox HiTuf. V těchto případech použijte program WeldCalc.

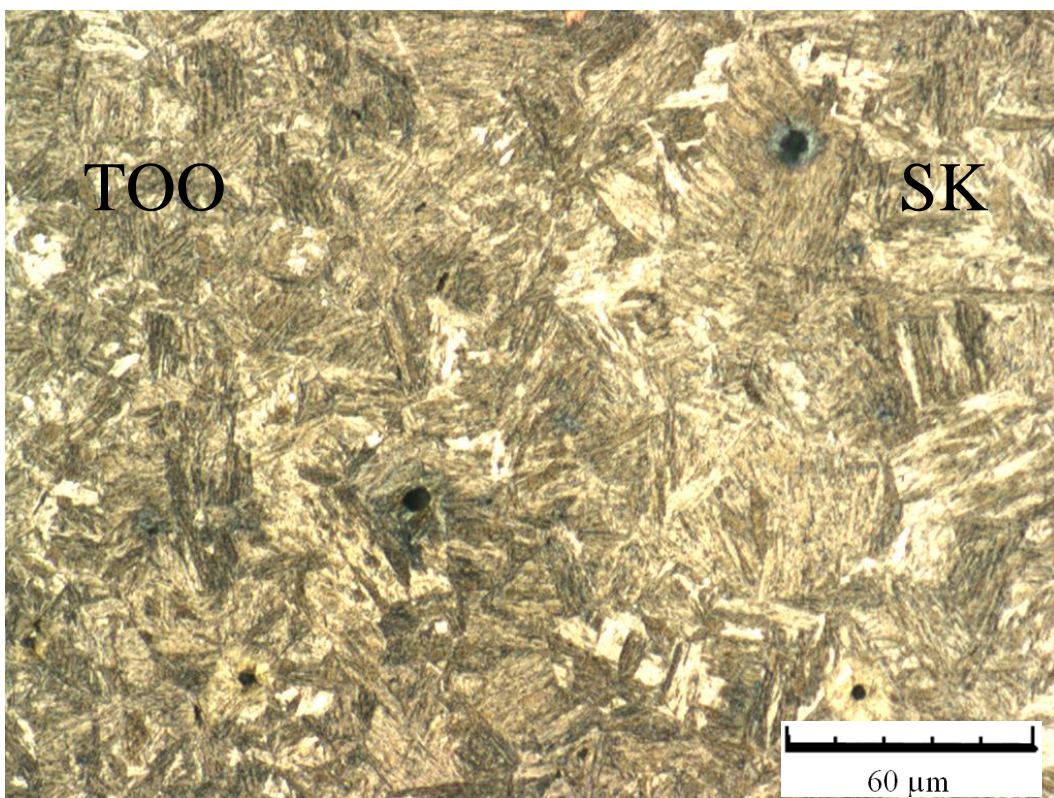


Příloha č. 5 – Inspekční certifikát EN 10204 – 3.1 materiálu Hardox 450

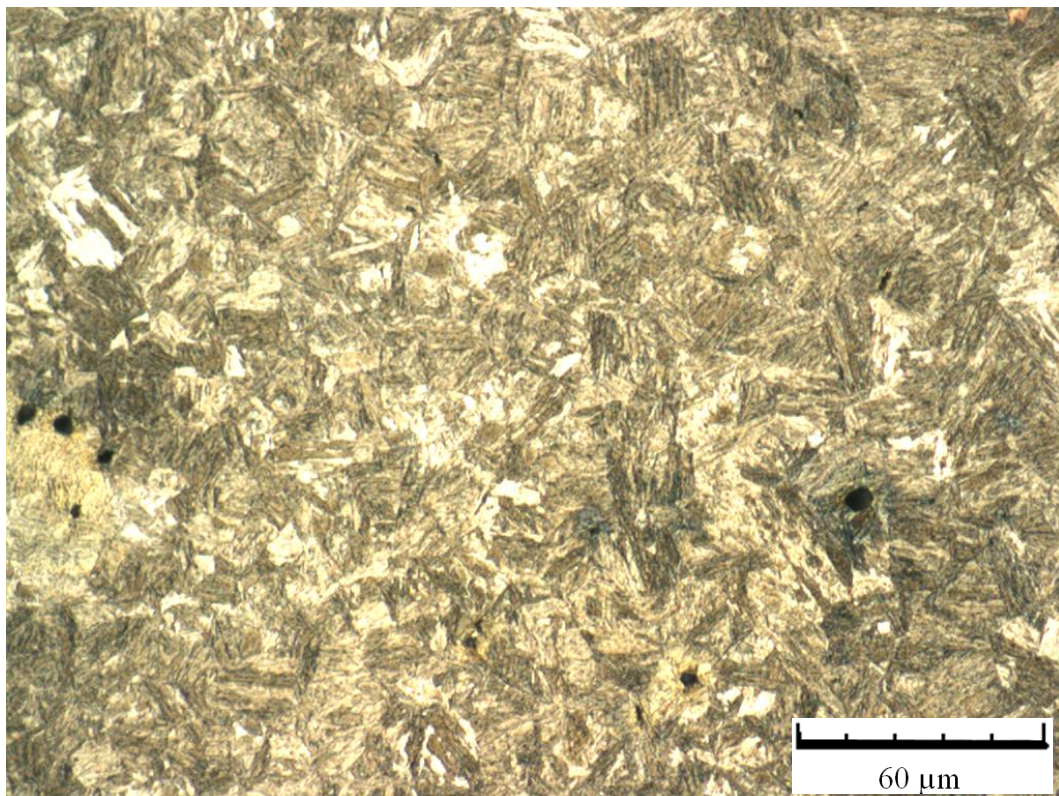
Inspection certificate EN 10 204 - 3.1		A02 Issuing department Quality inspection		A05 Purchaser order no		A07		A08 Our order no 874274-1		A09 Invoice no 2759223		A10 Certificate no and date 16023205 2016-06-07		A01 SSAB EMEA AB, SE-781 84 BORLÄNGE, Sweden		A03																	
Purchaser A11 22303				Product Cold rolled sheets		B01 Marking Manufacturer, MATERIAL ID		B06 Customer marks		B15		B16		B02		B07																	
Quantity 174		Dimensions [mm] T 2 W 1500 L 3000		B09-B11 Weight [kg] 12390		B12 Deliv. Cond.		B04 Internal code		B02		B07		B06		B02																	
Consignee Blatenské strojirny Blatná s.r.o. Ve Škalfi 324 388 01 BLATNÁ Czech Republic				A06 Standard/rules SSAB Steel grade HARDOX 450		MATERIAL ID 58-7171-C12158-01 , 58-7171-C12158-02 , 58-7171-C12158-03 , 58-7171-C12158-04 , 58-7171-C12158-05		C71-C92 Carbon equivalent etc Ceqv = C + Mn/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5		C83-C99		C71-C92		C83-C99		C71-C92		C83-C99															
Heat no 58-7171		C .171 .20		Si .20		Mn 1.20		P .009		S .002		Cr .03		Ni .03		Mo .00		V .01		Ti .04		Cu .15		Al .038		Nb .000		B .0016		N .003		Ceqv .39	
Testtype		C04 Millcode CIE841		C00 Specimen position Top end		C01 Direction Transvers		C02 Treatment Delivery condition		B05 Specimen type Rectangular 250x20		C10 Temp [degr C] C12 Rm [MPa] 1455		C03 Test results		C12 Rm [MPa] 1455		C12 Rm [MPa] 1455		C12 Rm [MPa] 1455		C12 Rm [MPa] 1455		C12 Rm [MPa] 1455		C12 Rm [MPa] 1455		C12 Rm [MPa] 1455		C12 Rm [MPa] 1455			
Production time: 2016-03-25																																	
This certificate is produced with EDP and valid without signature Material Testing/ M Eriksson				Z02		Z01		Z02		Z01		Z02		Z01		Z02		Z01		Z02		Z01		Z02		Z01		Z02		Z01		Z02	



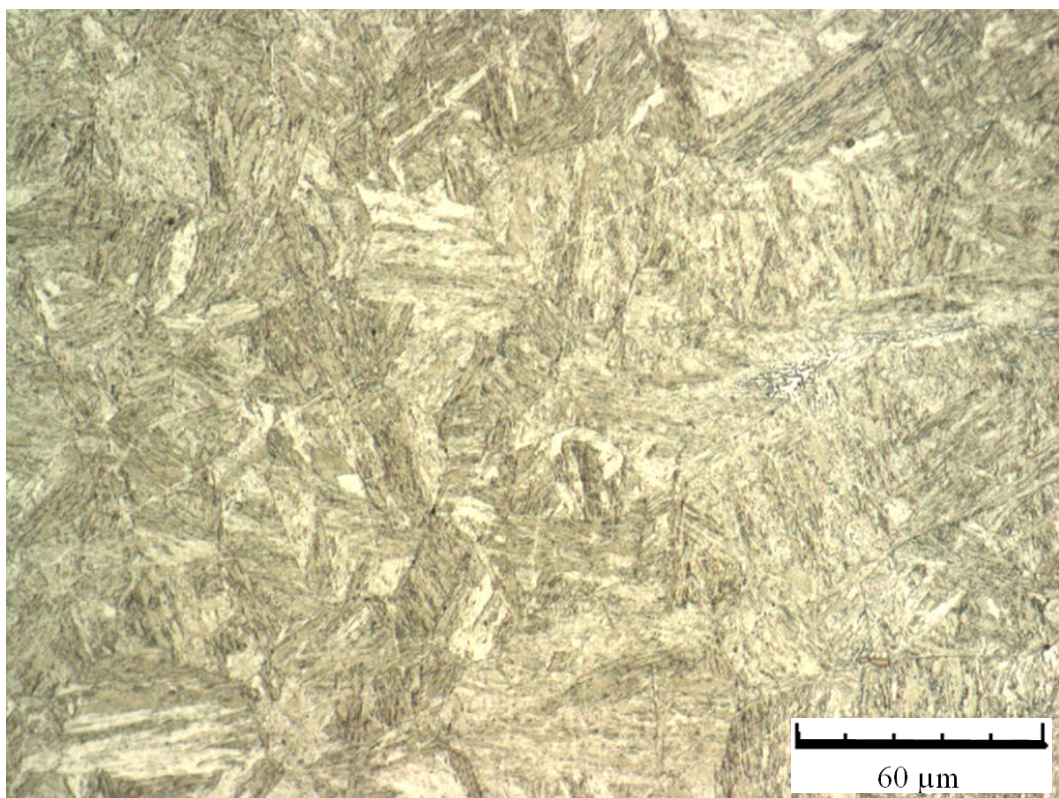
Obr. 1 Mikrostruktura svarového kovu, vzorek č. 1, LASER



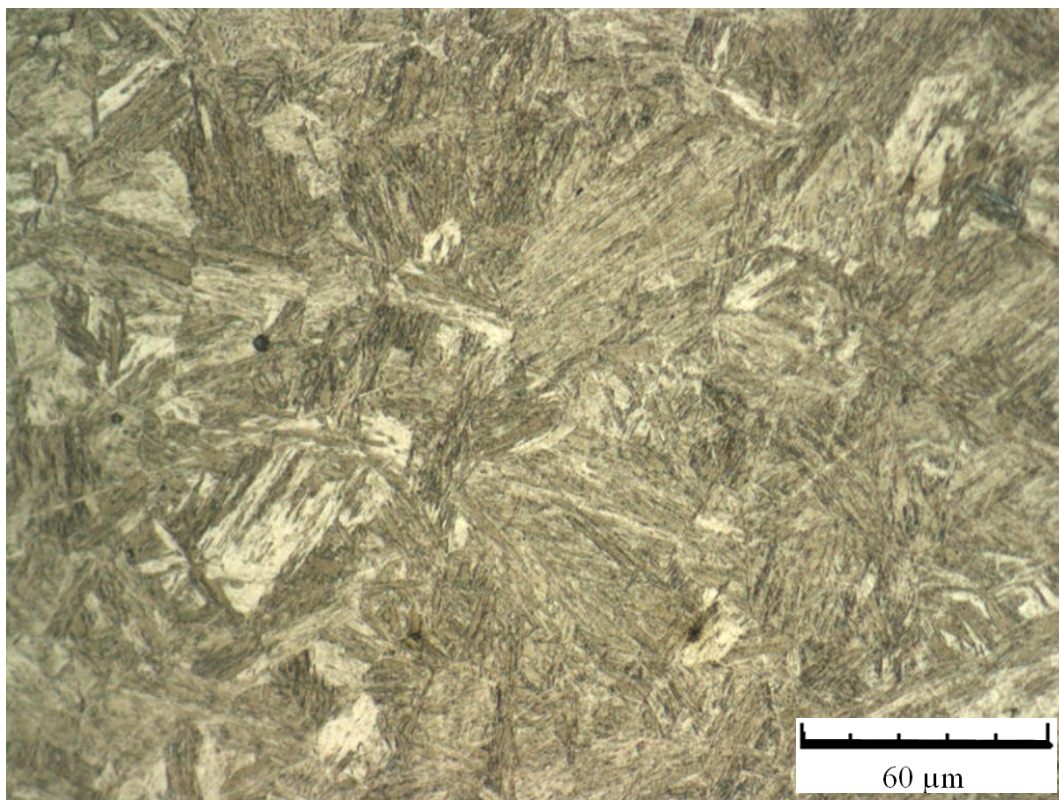
Obr. 2 Mikrostruktura hranice natavení, vzorek č. 1, LASER



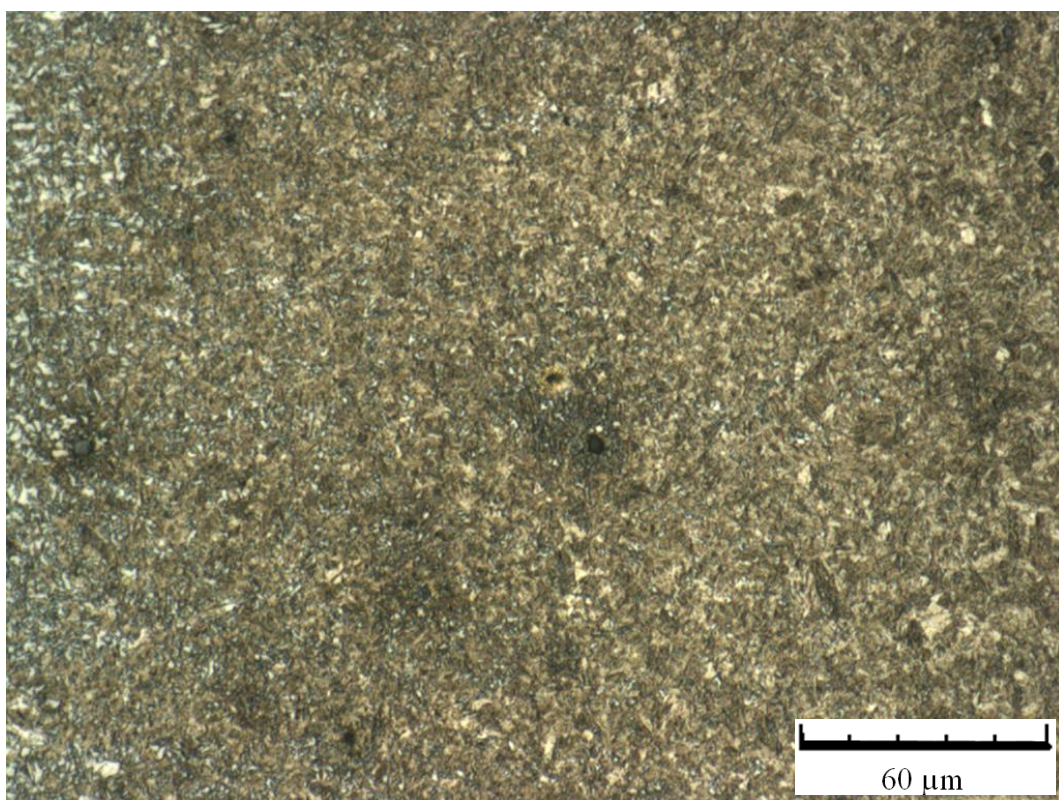
Obr. 3 Mikrostruktura přehřáté oblasti TOO, vzorek č. 1, LASER



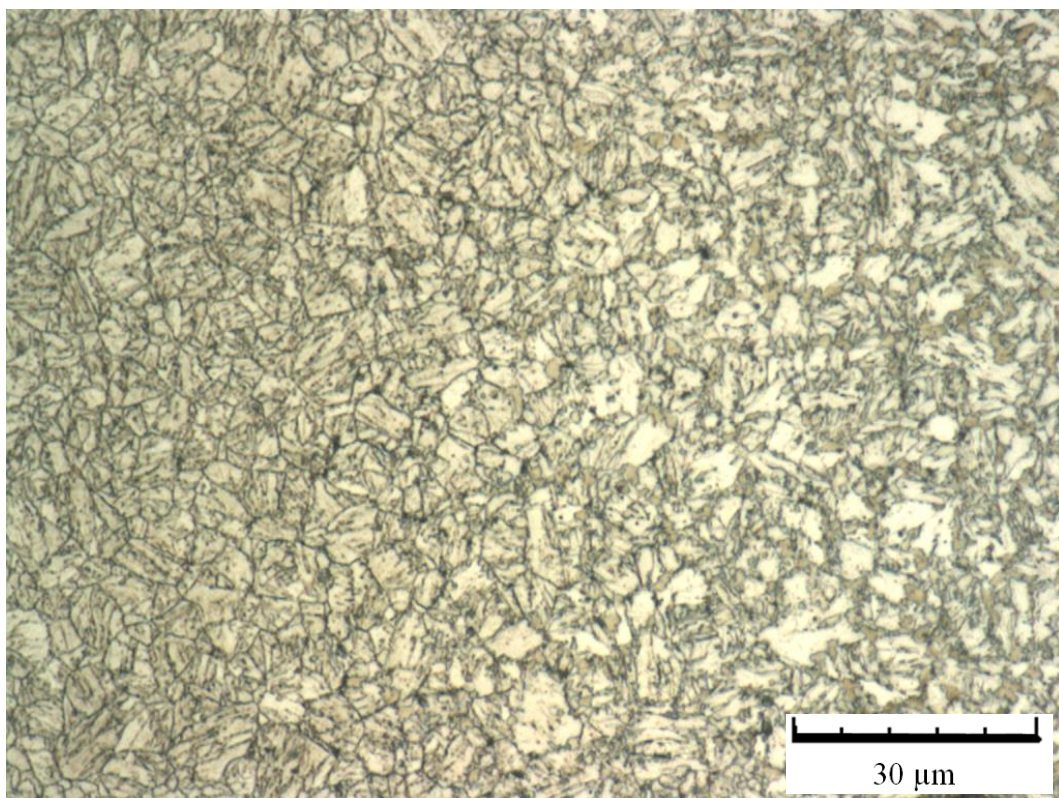
Obr. 4 Mikrostruktura přehřáté oblasti TOO, vzorek č. 4, LASER + TIG 60 A přehřev



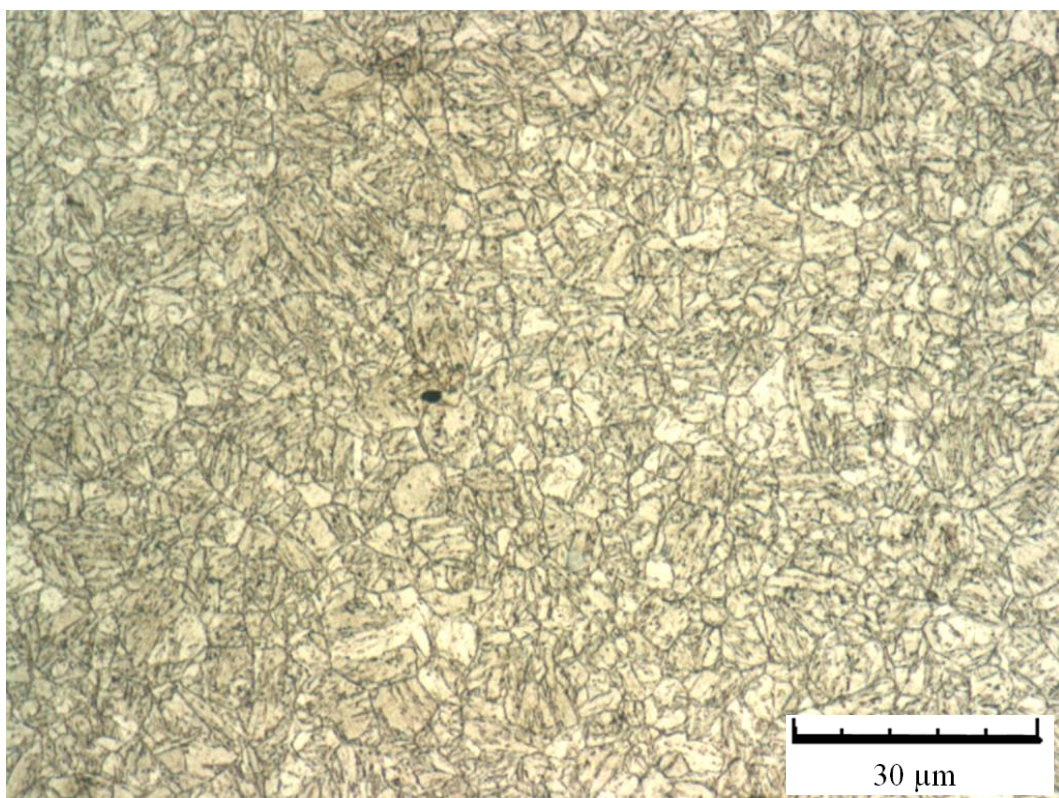
Obr. 5 Mikrostruktura přehřáté oblasti TOO, vzorek č. 7, LASER + TIG 60 A dohřev



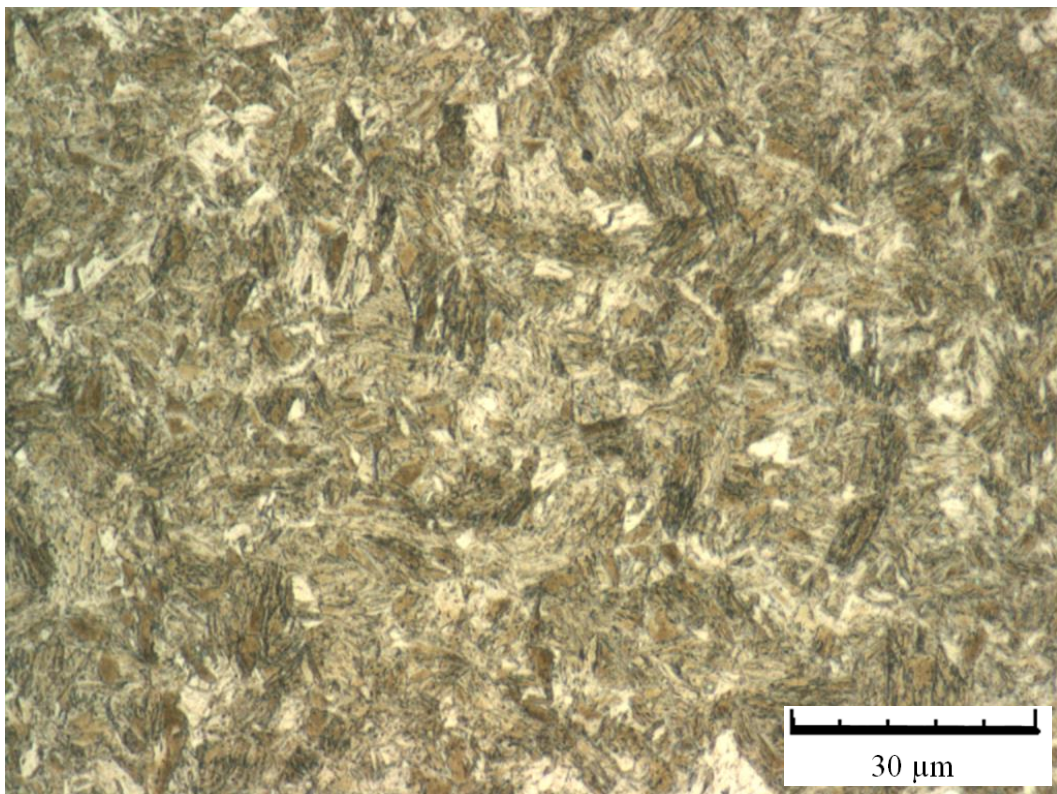
Obr. 6 Mikrostruktura normalizované oblasti TOO, vzorek č. 1, LASER



Obr. 7 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti (interkritická oblast), vzorek č. 1, LASER



Obr. 8 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti (subkritická oblast), vzorek č. 1, LASER



Obr. 9 Mikrostruktura základního materiálu Hardox 450