



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VYUŽITÍ HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE LASER-TIG PRO SVAŘOVÁNÍ ROZDÍLNÝCH MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH V ENERGETICE

USE OF LASER-TIG HYBRID TECHNOLOGY FOR WELDING OF DIFFERENT MATERIALS USED IN POWER ENGINEERING

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Žák

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2019

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Tomáš Žák</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	<b>doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

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:

## **Využití hybridní technologie Laser–TIG pro svařování rozdílných materiálů používaných v energetice**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Provést analýzu vlivu parametrů předeřevu pomocí elektrického oblouku z TIG hořáku na vlastnosti svaru rozdílných materiálů typu korozivzdorná martenzitická ocel – uhlíková ocel s vyšší pevností. Vzniklé svary vyhodnotit z hlediska makro a mikrostruktury a z hlediska mechanických vlastností, svarových vad. Provést ekonomické srovnání se stávajícími technologiemi svařování metodou TIG.

### **Cíle diplomové práce:**

- Osvojit si technologii laserového svařování včetně techniky hybridního svařování laser–TIG.
- Osvojit si problematiku svařování korozivzdorných martenzitických ocelí.
- Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu.
- Osvojit si základy metalografického vyhodnocování svaru.
- Osvojit si metody mechanických zkoušek svarového spoje.
- Osvojit si metody srovnání ekonomického hlediska rozdílných svařovacích metod.

### **Seznam doporučené literatury:**

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

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

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

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Práce se zabývá analýzou vlivu procesních parametrů předehřevu pomocí elektrického oblouku z TIG hořáku během laserového svařování na vlastnosti svaru korozivzdorné martenzitické oceli a uhlíkové oceli s vyšší pevností. V této práci byl zhotoven experiment, při němž se svařily plechy o tloušťce 3 mm z ocelí X12Cr13 a S355. Svařovalo se postupně laserem, pak laserem s TIG předehřevem a naposled laserem s předehřátím materiálu indukčním ohřevem. Při využití TIG předehřevu se měnil svařovací proud nastavený na zdroji. Zhotovené svary se následně vyhodnotily na základě makrostruktury, mikrostruktury a zkoušky tvrdosti podle Vickerse.

### Klíčová slova

laserové svařování, Laser-TIG, X12Cr13, S355, TIG, předehřev

## ABSTRACT

Thesis is focused on analyzing the influence of preheating process parameters using electric arc from TIG torch during laser welding on weld properties of stainless steel and carbon steel with higher strength. In this thesis experiment was done in which metal sheets 3 mm thick from X12Cr13 and S355 steels were welded. Welding was done first with using only laser, then laser with TIG preheating and lastly laser with preheated material by induction heater. When TIG preheating was used than set welding current was changed on the power source. The welds were subsequently evaluated based on macrostructure, microstructure and Vickers hardness test.

### Key words

laser welding, Laser-TIG, X12Cr13, S355, TIG, preheating

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽÁK, Tomáš. *Využití hybridní technologie Laser-TIG pro svařování rozdílných materiálů používaných v energetice*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojirenské technologie. 75 s. 2 přílohy. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Využití hybridní technologie Laser-TIG pro svařování rozdílných materiálů používaných v energetice** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23.5.2019

-----  
Datum

-----  
Bc. Tomáš Žák

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto mému vedoucímu diplomové práce doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, PhD. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji i pracovníkům Ústavu přístrojové techniky za pomoc při experimentech a zkouškách. Nakonec bych chtěl také poděkovat své rodině za podporu během studia.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODEĚKOVÁNÍ.....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 Rozbor zadání .....	9
1.1 Využitelné svařovací metody .....	9
2 Technologie svařování a zařízení .....	11
2.1 Laser.....	11
2.1.1 Rozdělení laserů.....	12
2.1.2 Pevnolátkové lasery .....	14
2.1.3 Plynové lasery .....	16
2.2 Svařování laserem .....	18
2.2.1 Metody svařování laserem .....	20
2.2.2 Svařovací hlava.....	22
2.3 Svařování TIG.....	22
2.3.1 Svařování stejnosměrným proudem (DC) .....	24
2.3.2 Svařování střídavým proudem (AC).....	24
2.3.3 Svařování impulsním proudem .....	25
2.4 Pochody při svařování ocelí .....	25
2.4.1 Svařitelnost ocelí.....	27
2.4.2 Využití Schaefflerova diagramu .....	31
2.4.3 Svařování martenzitických ocelí.....	31
2.5 Vady svarů .....	32
2.6 Zkoušky svarových spojů a materiálů.....	34
2.6.1 Zkoušky tvrdosti .....	34
2.6.2 Metalografické zkoušky.....	35
3 Experiment.....	37
3.1 Použitá zařízení pro svařování a předehřev .....	37
3.2 Použité materiály.....	38
3.2.1 X12Cr13.....	39
3.2.2 S355J2.....	40
3.3 Kontrola svařitelnosti a předpokládané struktury .....	41
3.4 Výroba vzorků.....	43

3.5	Metalografie .....	45
3.5.1	Makrostruktura.....	46
3.5.2	Mikrostruktura .....	50
3.6	Zkouška tvrdosti.....	53
4	Technicko – ekonomické zhodnocení.....	57
4.1	Zhodnocení z hlediska nákladů na svaření statoru.....	57
4.2	Zhodnocení z hlediska vyrovnání nákladů.....	59
4.3	Zhodnocení výsledků .....	62
	ZÁVĚR .....	63
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	64
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	73
	SEZNAM TABULEK .....	74
	SEZNAM PŘÍLOH.....	75



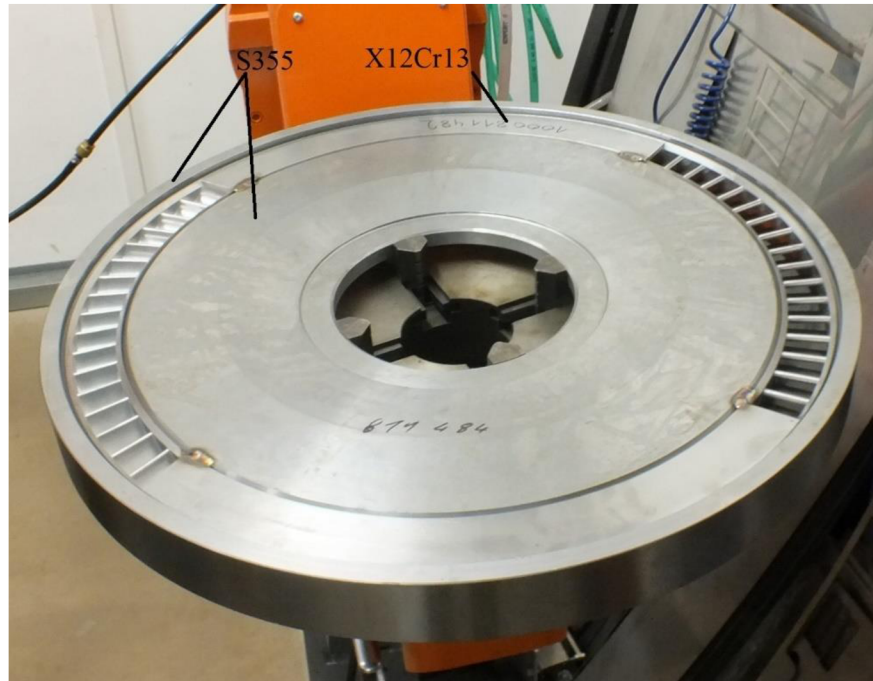
## ÚVOD

Svařování laserem se díky své schopnosti vytvářet štíhlé svary při vysoké svařovací rychlosti dostává do popředí zájmu. I když vývoj laserů započal již v sedmdesátých letech minulého století, tak jeho praktická aplikace je relativně nová. Celý proces svařování může probíhat zcela automatizovaně a vnáší do svaru pouze malé množství tepla, díky čemuž má svar malou tepelně ovlivněnou oblast ale zároveň i vysokou rychlost chladnutí, která může vést k vytvoření nežádoucích struktur ve svarovém kovu nebo tepelně ovlivněné oblasti. Ke snížení rychlosti chladnutí se využívá předehřevu nebo dohřevu. Teplo se může do materiálu dostat pomocí plamenu, což je metoda častá a jednoduchá, ale přináší i mnoho bezpečnostních rizik. Využít se dá i indukčních ohřevů, které tyto bezpečnostní nedostatky nemají ale velice efektivním způsobem, jak ohřát díl je využití obloukových metod.

Metody kombinující technologii svařování laserem s obloukovými metodami se nazývají hybridní. Tyto metody spojují TIG s laserem anebo častěji MIG/MAG s laserem. V průmyslu se těchto metod využívá nejčastěji v automobilovém odvětví. Při využití TIG hořáku přichyceného na svařovací hlavě za účelem předehřevu materiálu před svařováním, nedochází ke zhoršení předností laserového svařování, ale naopak se zvyšuje účinnost celého procesu, zlepšují se metalurgické vlastnosti svaru a snižuje se odrazivost povrchu. Technologům se díky těmto hybridním metodám otevírají nové možnosti, a to hlavně u spojování rozdílných materiálů nebo materiálů, které se klasickými metodami obtížně svažují. Na otázku, zda se tato metoda dá využít i při svařování martenzitické oceli s nelegovanou konstrukční ocelí a jestli přináší nějaké výhody oproti alternativním metodám se pokusí tato práce alespoň částečně odpovědět.

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ

Základním popudem pro zadání této práce byla potřeba společnosti Siemens Industrial Turbomachinery s.r.o. svařit díl parní turbíny (viz obr. 1) skládající se z částí zhotovených z ocelí jiné třídy.



Obr. 1 Stator turbíny.

Jedná se o stator turbíny, kde „lopatková“ část je zhotovena z martenzitické korozivzdorné oceli X12Cr13 a vnější i vnitřní z nelegované konstrukční oceli S355. Klasicky by tento díl byl svařovaný ručně metodou TIG s přídavným materiálem, po kterém by následovalo žihání pro uvolnění vnitřního pnutí. Dle ústních informací trvá svaření takového dílu jednu směnu. Vlivem vneseného tepla při svařování se díl krouť a z toho důvodu je nutno počítat s velkými přídávky na dokončovací operace.

Na začátku práce bude vytvořen teoretický základ vybraných svařovacích metod a problematiky svařování ocelí. V další části bude provedený experiment, ve kterém se popíše svařování vzorků. Z nich následně proběhne výroba metalurgických vzorků pro vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury. Svařené vzorky se také podrobí zkoumání tvrdosti v oblasti svaru. Na konci práce se provede ekonomické zhodnocení použitých metod.

### 1.1 Využitelné svařovací metody

Řešeným problémem je tedy vytvoření heterogenního spoje korozivzdorné martenzitické oceli X12Cr13 a nelegované konstrukční oceli S355. Ke zhotovení tohoto svaru je možné využít následujících metod:

## a) MAG/MIG,

Dvě metody založené na velice podobném principu. Jedná se o obloukové svařování s tavící se elektrodou v ochranném plynu. Ten může být buď aktivní ( $\text{CO}_2$ ), který reaguje s roztavenou lázní (MAG) nebo inertní (Ar), pokud s roztavenou lázní nereaguje (MIG). Zdrojem tepla je elektrický oblouk a přídavný materiál je kontinuálně dodáván v podobě drátu. Zařízení pro tyto metody je stejné, ale liší se použitý plyn a přídavný materiál. Metody se dají využít pro svařování nelegovaných, nízkolegovaných i vysokolegovaných ocelí. Výhodou těchto metod je nízká ekonomická náročnost, čistota pracovního prostředí, velká rychlost odtavení elektrody a možnost automatizace. Nevýhodou této metody je nebezpečí vytvoření studených spojů, velké tepelné ovlivnění místa svaru a přítomnost strusky [1,2,3,4,5].

## b) TIG,

Metoda někdy označovaná jako WIG využívá hořícího oblouku mezi netavicí se elektrodou a základním materiálem. Pro ochranu tavné lázně se využívá inertní plyn o vysoké čistotě. Nejčastěji se jedná o argon nebo hélium, případně jejich směs. Svařovat lze s přídavným materiálem, který se do svaru dopravuje většinou ručně. Nevýhodou této metody je poměrně nízká svařovací rychlost a porozita svarového kovu. Tato metoda se využívá například pro svařované konstrukce z vysokolegovaných ocelí pro chemický, farmaceutický, potravinářský průmysl a v energetice [1,3].

## c) svazek elektronů, plazma a laser.

Charakteristickým znakem těchto metod je vysoká hustota energie, která dopadá na svarovou plochu. Výhodou těchto metod je vysoká rychlost ohřevu materiálu, rychlost svařování, a tedy i vysoká produktivita. Díky vysoké hustotě dopadové energie je možné svařovat i materiály o velké tloušťce ale zároveň je dosaženo malé tepelně ovlivněné oblasti, zbytkových napětí a deformací. Výsledné svary tedy dosahují vysoké kvality. Nevýhodou těchto metod jsou složité přípravky a vysoké počáteční investice. Elektronový paprsek vyžaduje v prostoru svařování vysoký stupeň vakua. Plazma nedosahuje takového výkonu jako laser nebo elektronový paprsek ale oproti těmto technologiím dosahuje nižších nákladů. Nejvyšší svařovací rychlosti z těchto metod dosahuje laser [3,6].

Z těchto metod se jeví jako nejvhodnější laser nebo plazma. Výhodou těchto metod je možnost využití pro svařování většiny typů ocelí, včetně korozivzdorných. U martenzitických ocelí ovšem dochází vlivem vysoké rychlosti chlazení ke zhrubnutí zrna a zhoršení mechanických vlastností. Z toho důvodu je nutné při svařování využívat předehřevu. Využití technologie laserového svařování s TIG předehřevem, které je dostupné na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky, se jeví jako velice zajímavá alternativa k prosté metodě TIG využitě ve společnosti Siemens. Cílem této práce je ověření, jakých by mohlo být dosaženo výsledků, pokud by se pro svaření těchto materiálů využila alternativní metoda svařování laserem nebo laserem s předehřevem pomocí elektrického oblouku z TIG hořáku [7].

## 2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ A ZAŘÍZENÍ

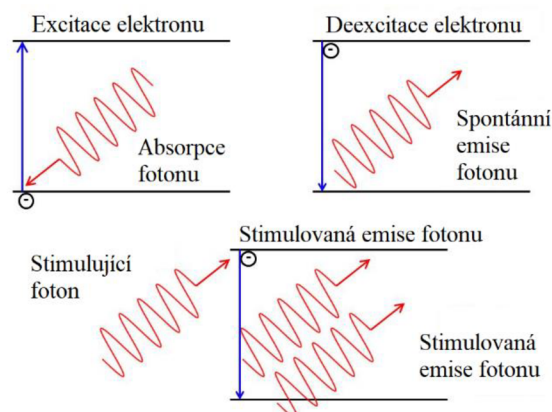
V této kapitole budou probrány jednotlivé metody svařování, které jsou relevantní pro tuto diplomovou práci. Zaměří se na princip, jakým metody fungují a dělení těchto metod dle použitých parametrů. Následně se zaměří na samotný proces svařování, vady, ke kterým může dojít při svařování, a nakonec na metody pomocí kterých se svary hodnotí.

### 2.1 Laser

Slovo LASER vychází z anglického názvu procesu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, v českém překladu tento výraz znamená „Zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Laser je tedy zařízení produkující záření, které je [8]:

- koherentní (synchronizované),
- monochromatické (jednobarevné – jedné vlnové délky),
- ve formě úzkého svazku,
- za pomoci vhodné optiky zaostřené do jednoho bodu – ohniska.

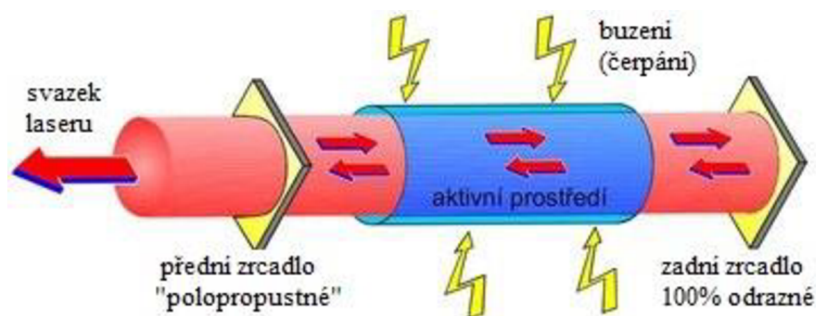
Podstatou laseru (viz obr. 2) je přechod elektronů do vyšší energetické hladiny, na které ovšem elektron dlouho nevydrží (řádově  $10^{-8}$  sekundy) a při přechodu zpět na základní hladinu elektron uvolní energii, díky které se na vyšší hladinu dostal, ve formě fotonu náhodným směrem. Laser tedy využívá aktivního prostředí složeného z prvků, které mají metastabilní hladinu. Díky této hladině nespadne elektron na základní energetickou vrstvu, ale na metastabilní hladinu, na které je následně schopen vydržet mnohonásobně delší dobu. Během doby, kdy je elektron na metastabilní vrstvě, může být stimulován okolo letícím fotonem. Neboli při průletu fotonu elektron spadne na základní hladinu a vypustí foton letící stejným směrem jako foton, který donutil elektron se přesunout na základní hladinu. Následně se tyto dva fotony spojí. Ve větším měřítku potom dochází k tomu, že díky zdroji neustále dodávajícímu energii se nashromáždí velké množství elektronů čekajících na metastabilní hladině a následně při průletu stimulujícího fotonu se uvolní velké množství fotonů se stejným směrem. Všechny tyto fotony se poté spojí do jedné vlny s mnohem větší amplitudou, a tedy i větší energií. Neboli dochází k zesilování světla stimulovanou emisí. Tento děj se díky zdroji neustále opakuje [3,8,9,10].



Obr. 2 Princip laseru [10].

Laser se obecně skládá (viz obr. 3) z těchto hlavních částí [3,8,10,11]:

Aktivní prostředí	Prostředí umožňující přechod elektronů ze základní hladiny na vyšší, následně na metastabilní a z té opět na základní hladinu. Při přechodu do nižší hladiny dochází k vyzáření fotonu a pomocí stimulované emise k zesílení záření.
Rezonátor	Laserové záření vzniklé v aktivním prostředí má ovšem různý směr, a proto je třeba rezonátoru, aby toto záření usměrnil do jednoho laserového paprsku. Rezonátor se skládá z nepropustného zrcadla a polopropustného zrcadla. Fotony se odráží mezi zrcadly a postupně narůstá počet fotonů letících stejným směrem, tak dlouho dokud energie proudu těchto fotonů nedosáhne hodnoty, kdy projde polopropustným zrcadlem.
Zdroj záření	Zařízení dodávající aktivnímu prostředí energii, která umožní elektronům se přesouvat z nižších energetických hladin na vyšší energetické hladiny.
Laserový paprsek	
Ostatní příslušenství	



Obr. 3 Složení laseru [8].

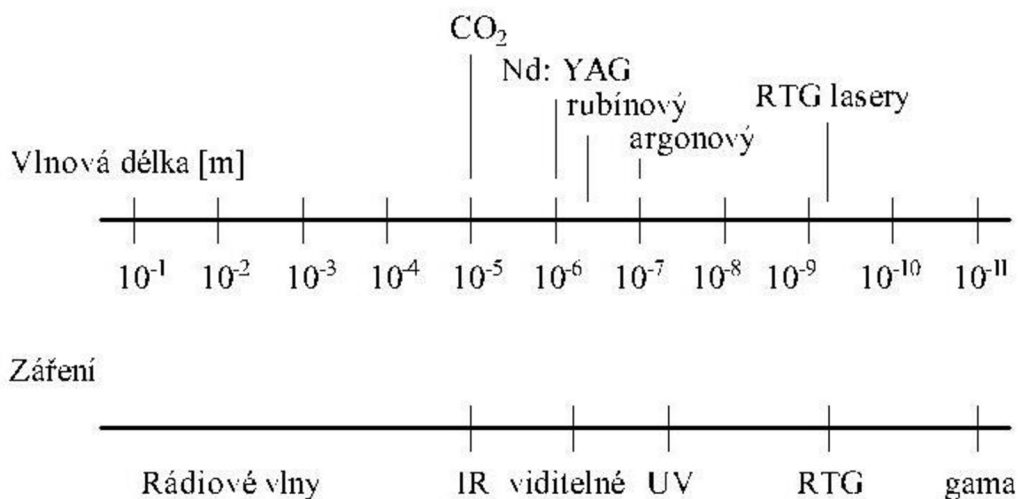
### 2.1.1 Rozdělení laserů

Lasery se dají rozdělit dle různých kritérií do několika kategorií [8,9,12]:

- |  |  |
|--|--|
| 1) <u>Druh aktivního prostředí:</u>              | 2) <u>Podle vlnových délek záření:</u> |
| a) Pevnolátkové (Nd:YAG, Yb:YAG, Ti:safir)       | a) Infračervené (780 nm – 1 mm)        |
| b) Plynné (He-NE, Ar, Kr, CO <sub>2</sub> , KrO) | b) Ultrafialové (10 nm – 1 pm)         |
| c) Kapalinové (fluorescein, rhodamin)            | c) Rentgenové (10 nm – 780 nm)         |
| d) Polovodičové – diodové (GaAs, GaN, InAsSb)    | d) Viditelné pásmo (360 nm – 780 nm)   |
| e) Plazmatické                                   |  |

- 3) Zúčastněné energetické hladiny na kvantovém přechodu:
- Molekulární
  - Elektronové
  - Jaderné
- 4) Podle časového provozu:
- Kontinuální (cw) – nepřetržitá generace záření
  - Pulsní (pw) – pulzy s vysokou opakovací frekvencí, kde doba trvání pulzu může být odlišná
  - Impulsní (Qs) – nízká opakovací frekvence a vysoká energie pulzů, využití pro vědecké účely
- 5) Dělení dle typu buzení:
- Optické
  - Elektrickým výbojem
  - Elektronovým svazkem
  - Tepelnými změnami
  - Chemické
  - Rekombinační
  - Injekce nosičů náboje

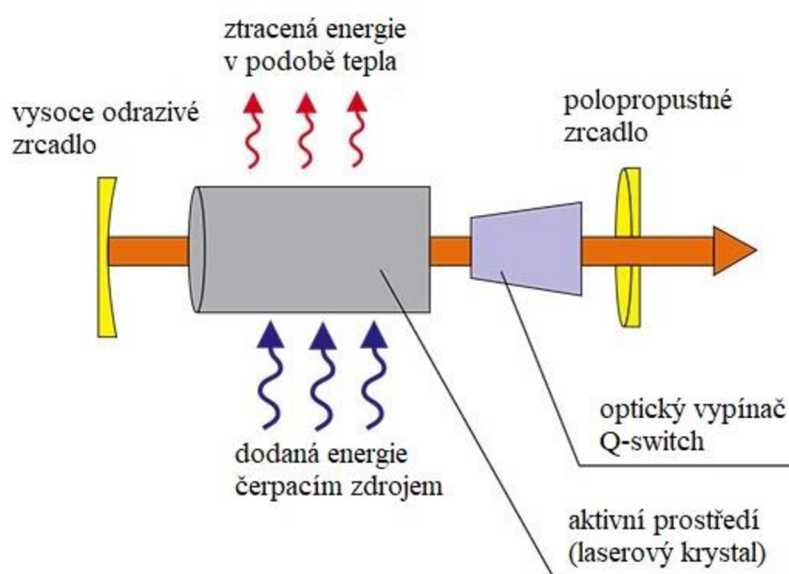
Na obr. 4 je znázorněno rozdělení podle vlnových délek.



Obr. 4 Rozdělení laserů podle vlnových délek [9].

### 2.1.2 Pevnolátkové lasery

Aktivním prostředím u pevnolátkových laserů (viz obr. 5) je dielektrikum neboli pevná opticky propustná látka, ve formě krystalů nebo skla. Do základního materiálu tvořeného monokrystalickými nebo amorfními látkami se přidávají přísady aktivačních prvků ve formě stechiometricky uložených iontů. Aktivní látka musí mít dostatečně široké absorpční pásmo, aby efektivně pohlcovala energii dodávanou čerpacím zdrojem, který je nejčastěji v podobě plynových výbojek uzavřených v reflexní dutině. Materiál, ze kterého je vytvořena matrice, se přímo nezúčastňuje procesu nucené emise, ale musí být opticky čistý, homogenní a ideálně i uměle vyrobitelný. Díky změnám energetického stavu přísadových prvků pak dochází k absorbování a vyzařování energie. Jako aktivní látky se využívají ionty vzácných zemin neodým, erbium, holmium dopované ve skle nebo umělých krystalech [3,9,12,13,14].



Obr. 5 Schéma pevnolátkového laseru [13].

Nejznámější lasery využívající pevnolátkové aktivní prostředí jsou [9]:

- rubínový laser (0,694  $\mu\text{m}$ ),
- Nd: YAG laser (1,064  $\mu\text{m}$ ),
- Nd: sklo laser (1,064  $\mu\text{m}$ ).

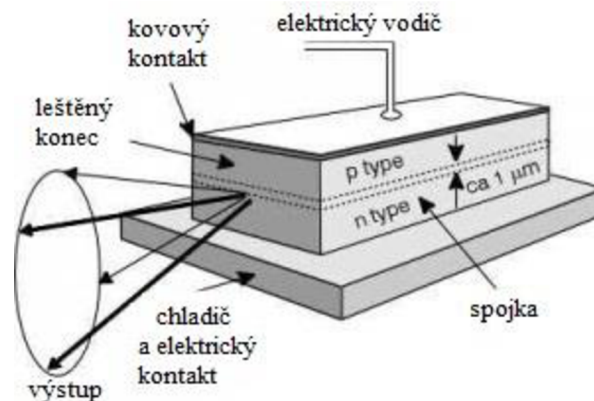
#### Nd: YAG laser

Je asi nepoužívanějším typem pevnolátkového laseru. Aktivní prostředí je tvořené umělým krystalem YAG (yttrium aluminium granát) se složením  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , dopovaném ionty  $\text{Nd}^{3+}$  (neodým). Běžné Nd:YAG lasery mají čerpání zajištěno kryptonovými výbojkami s bílým spektrem, z toho je ale absorbováno jen zelené a modré spektrum. Kryptonové výbojky mají vlnový rozsah od 0,450 do 0,850  $\mu\text{m}$ . Absorpční rozsah laseru je ale 0,790 až 0,830  $\mu\text{m}$ . To má za následek malou účinnost okolo 5 %. Zvýšení účinnosti čerpání se u nových typů laserů dosahuje změnou konstrukce a způsobu čerpání. Jedním ze způsobů, jak zvýšit účinnost až na 20 % je nahradit kryptonovou výbojku polem laserových

diod. Jedná se o nejefektivnější způsob buzení pevnolátkových laserů, protože emisní spektrum laserových diod je tvořené jednou úzkou spektrální čarou na vlnové délce 0,808  $\mu\text{m}$  [3,9,13,15].

### Diodový laser

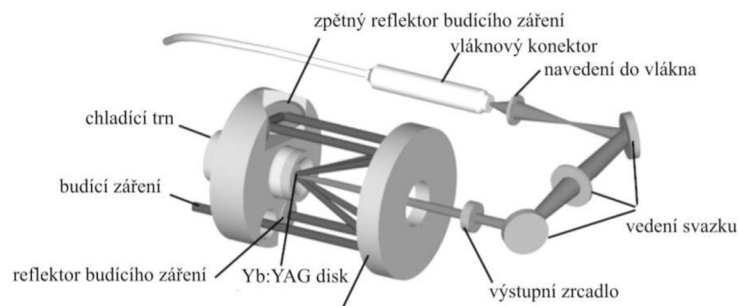
Aktivním prostředím je elektricky čerpaná polovodičová dioda. Kvalita svazku je v porovnání s ostatními lasery výrazně nižší, a proto se využívá hlavně pro svařování, navařování a povrchové úpravy, kde je žádoucí větší průměr paprsku. Nejčastěji využívaným typem je GaAs laser s vlnovou délkou 0,808  $\mu\text{m}$ . Mezi další využívané typy laserů patří například GaN, PbSnSe, AlGaInP atd. Výkon laseru může být až 15 kW. Hlavními přednostmi tohoto typu laseru (viz obr. 6) jsou nízká hmotnost, vysoká kompaktnost a účinnost dosahující 30 až 40 %. Svazek opouštějící rezonátor je možné navázat do optického vlákna [16,17,18].



Obr. 6 Princip diodového laseru [16].

### Diskový laser

Aktivní prostředí je tvořené malým diskem o výšce v desetinách milimetru a průměru do 100 mm s 30% obsahem ytterbia. Čerpání probíhá pomocí vícenásobného dopadu záření z diod s vlnovou délkou 0,940  $\mu\text{m}$  přivedeného optickým vláknem. Aktivní prostředí absorbuje budící záření celou svou tloušťkou, díky čemuž dosahuje účinnost čerpání 90 %. Celková účinnost je pak až 20 %. Při použití jednoho kotouče v konstrukci dosahuje laser výkonu až 500 W. Jednotlivé kotouče lze sériově spráhnout a tím dosáhnout výkonu až 16 kW. Životnost diskového laseru (viz obr. 7) je nižší než u vláknového a využívá se zejména pro svařování [16,17].

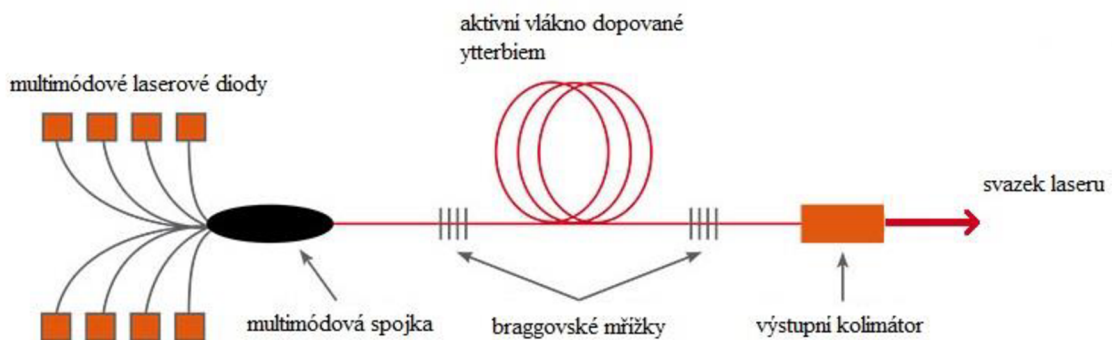


Obr. 7 Schéma diskového laseru [17].



### Vláknový laser

Na konci tohoto vývoje je vláknový pevnolátkový laser (viz obr. 8), který využívá čerpání pomocí záření z laserových diod kolmo na průřez aktivního vlákna. Braggovské mřížky na koncích vláken fungují jako rezonátor. Díky využití této technologie se zvýšil maximální výkon laseru na hodnotu až 10 kW a účinnost nad 30 %. Hlavní výhodou vláknových laserů je jejich kompaktnost, vysoká kvalita svazku, vysoká životnost a minimální údržba [3,9,13,15].



Obr. 8 Princip vláknového laseru [15].

### 2.1.3 Plynové lasery

Jako aktivní látka se u tohoto druhu laseru využívá plyn, nebo směs plynů a par. Pracují jak v kontinuálním režimu v rozsahu výkonu od mW až po desítky kW, tak v režimu impulzním, kdy jejich výkon dosahuje maximálně stovky kW. Oblast vlnové délky, ve které může daný typ laseru pracovat je poměrně rozsáhlý, ale nejčastěji pracuje na 10,6  $\mu\text{m}$  s účinností až 20 %. Jako zdroj buzení využívají plynové lasery elektrického proudu. Typickým představitelem této skupiny je CO<sub>2</sub> laser [3,19].

#### CO<sub>2</sub> laser

Patří do skupiny molekulových laserů. Emituje záření s vlnovou délkou 10,6  $\mu\text{m}$  při účinnosti 10 až 20 % a výkon může dosahovat až 30 kW. Aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů He + N<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> jejichž poměr se může lišit, ale nejčastější je 82:13,5:4,5. Celý proces začíná excitací molekul dusíku na vibrační hladinu, které při srážkách s molekulami oxidu uhličitého na ně přenáší energii a excitují molekuly CO<sub>2</sub> na vyšší hladinu. K vyzáření energie v podobě fotonu poté dojde při přechodu molekuly CO<sub>2</sub> na nižší hladinu. Hélium je poté využíváno z důvodu odebrání zbytkové excitační energie molekule oxidu uhličitého a jeho návratu na základní hladinu. Helium díky své vysoké tepelné vodivosti také ochlazuje aktivní prostředí laseru. U CO<sub>2</sub> laserů se vysoké procento energie přemění v teplo a to 85 až 90 %. Rozptylu tepla je dosaženo použitím tepelných výměníků. Hlavní nevýhodou CO<sub>2</sub> laseru je vlnová délka záření 10,6  $\mu\text{m}$ , které nelze vést optickým vláknem a je nutné pro vedení svazku využívat zrcadel [9,12,20].

Podle směru proudění plynu v aktivní zóně rozdělujeme na lasery s:

1) Podélným prouděním

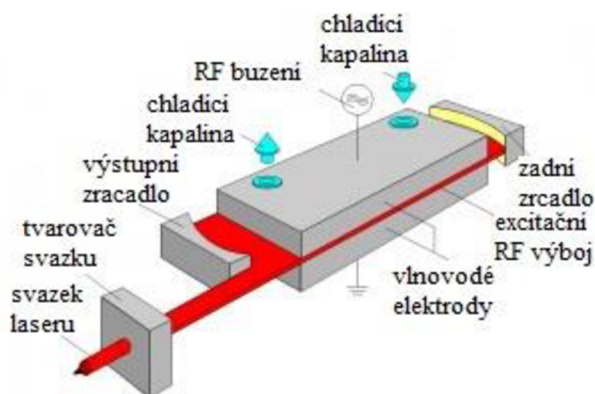
Lasery dosahují výkonu 10 W až 20 kW a vykazují vysokou kvalitu svazku pro řezání. K buzení se využívá stejnosměrného proudu s výkonem až 10 kW a elektrický výboj probíhá souběžně s osou trubice ve které proudí plyn vysokou rychlostí. Pro lasery s výkonem vyšším než 10 kW je nutné vysokofrekvenční buzení s výbojem probíhající kolmo k ose rezonátoru [20].

2) Příčným prouděním

Dosahují výkonu až 10 kW a mnohem menší spotřebu plynů i elektrické energie než lasery s podélným prouděním. Plynová směs proudí kolmo k ose rezonátoru malou rychlostí a je buzena vysokofrekvenčním proudem. Kvalita svazku je horší než u podélného proudění a vyhovuje svařování, kalení a povlakování. Jeho výhodou je nízká spotřeba plynů a díky tomu snížené náklady oproti laseru s podélným prouděním [20].

3) SLAB laser

Jedná se nejnovější typ průmyslového CO<sub>2</sub> laseru (viz obr. 9) dosahujícího výkonu 1 až 5 kW. Chlazení provozního plynu je zajištěno difúzí tepla do deskových vodou chlazených vysokofrekvenčních elektrod. Mezi elektrodami je velice malá mezera, ve které je intenzita chlazení plynu velice dobrá a není nutné nucené proudění plynu, díky čemuž se podstatně snižuje jeho spotřeba. Tlaková láhev s plynovou směsí vystačí na roční provoz laseru. Jeho náklady na údržbu a servis jsou tedy značně zredukované [17,19,20].



Obr. 9 Princip SLAB laseru [16].

Přehled laserů uvedený v tabulce 2.1 neobsahuje všechny možné specifikace a modifikace laserů ale obsahuje přibližné hodnoty pro typy využívané pro svařování [21].

Tab. 2.1 Přehled laserů a jejich vlastností [21].

Laser	Vln. délka [nm]	Buzení	Účinnost (přibližná)	Režim	Výkon	Údržba	Životnost [h]
Nd:YAG	1064	LD	7 %	CW	až 6 kW	ano	10 000
		lampy	3 %	pulsní	cca 600 W		1000
CO <sub>2</sub>	10 600	RF	10 %	CW i pulsní	až 5kW	ano	20 000
		El.	25 %		až 20kW		-
Diskový	1070	LD	15 %	CW	až 16 kW	ano	10 000
Vláknový	1070	LD	30 %	CW	až 80 kW	ne	100 000
Diodový	808-980	El.	60 %	CW	až 10 kW	ne	15 000

Kde zkratky znamenají:

LD – laserové diody

El. – elektricky (výbojem nebo proudem)

RF – radiofrekvenční buzení

CW – kontinuální režim

## 2.2 Svařování laserem

Svařování za pomoci laseru se využívá hlavně pro materiály, které se konvenčními metodami dají svařit jen obtížně nebo vůbec. Dále pro díly vyžadující vysokou svařovací rychlost, přesnost, kvalitní svár a malou tepelně ovlivněnou oblast. Vysoká intenzita laserového paprsku umožňuje, aby se do svaru vneslo celkově méně tepla než u konvenčních metod. Ve spojení s vysokou rychlostí svařování má výsledný svár malou tepelně ovlivněnou oblast, jemnější strukturu, menší deformace a zbytková pnutí. Výhodou je, že lze svařovat bez použití přídavného materiálu a nejsou nutné velké úpravy čistoty povrchu před svařováním, protože díky vysoké intenzitě laserového záření se většina nečistot odpaří před začátkem svařování [3,9,22,23].

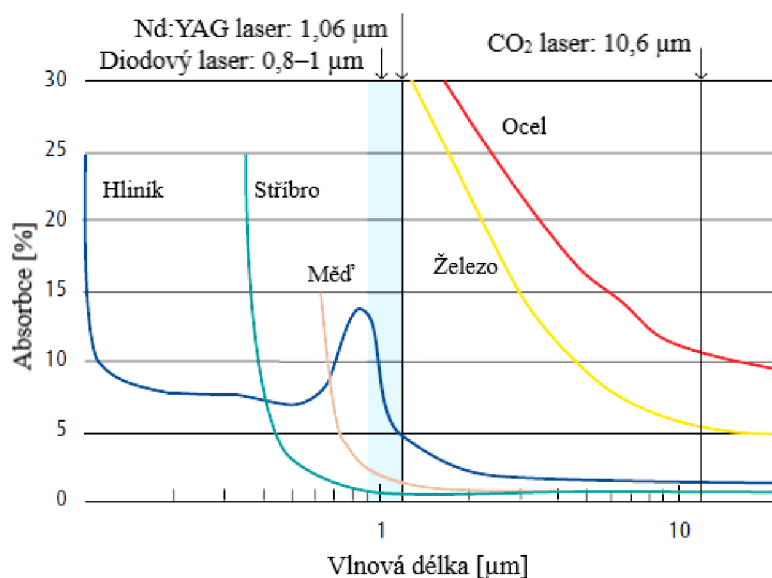
Výhody svařování laserem jsou [3,24]:

- malé tepelné namáhání součástí a tím pádem i malé deformace,
- hladký a symetrický spoj bez porozit,
- možnost svařování tenkých fólií nebo plechů až do tloušťky až 10 mm,
- vysoká svařovací rychlost,
- snadná automatizace procesu,
- velký poměr hloubky svaru k šířce svaru,
- ohniskovou vzdálenost lze upravit až na 1,6 m,
- možnost sváření v penetračním nebo indukčním režimu,
- svařitelnost různých materiálů,
- svařování bez přídavného materiálu.

Nevýhody jsou:

- složité přípravky,
- vysoké vstupní náklady.

Účinky laserového záření na materiál jsou podobné účinkům svařování svazkem elektronů, ale na rozdíl od elektronového svazku zde nedochází k přeměně kinetické energie na tepelnou. Kvantum energie představované fotonem působí přímo na mřížku a zvyšuje její frekvenci vibrací, čímž dochází ke zvýšení teploty materiálu. Při dopadu záření na povrch materiálu nedochází k úplné absorpci, ale část záření se odrazí (viz obr. 10). Zbylé záření, které se neodrazilo, se pohltí a energie se využije na ohřev materiálu. Velice malá část záření materiálem prochází. To kolik energie se absorbuje závisí hlavně na teplotě, vlnové délce záření a elektrických vlastnostech kovu, dále pak i na úhlu dopadu záření, struktuře materiálu, povrchové oxidové vrstvě a nečistotám na povrchu materiálu [3,12].



Obr. 10 Absorpce laserového záření [12].

V prvním okamžiku dopadu záření je většina odražená a pouze malá část je absorbována a ohřívá tedy materiál. Postupně se zvyšující se teplotou se zvětšuje i procentuální objem pohlceného záření [3].

Zvýšení absorpce je možné dosáhnout následujícími způsoby [9]:

- zdrsnění povrchu,
- úprava povrchu látkou s vyšší absorpcí záření,
- předehřev povrchu pomocí laseru s kratší vlnovou délkou,
- mořením.

Po roztavení materiálu teplota dále stoupá, dochází k vypařování a následné ionizaci atomů. Vlivem vysoké intenzity záření jsou volné elektrony urychleny tak, že dochází k ionizaci dalších molekul a vznikne plazma. Při zvýšení hustoty plazmatu nad roztaveným materiálem se sníží objem záření dopadajícího na materiál. To má za následek snížení teploty a tím i hustoty plazmy. Plazma s nižší hustotou již nebrání pronikání záření k materiálu, čím se opět zvýší teplota i hustota plazmy nad roztaveným materiálem. Celý tento proces zvyšuje nestabilitu procesu. Z toho důvodu se při svařování používá ochranných plynů. Nejčastěji Ar, Ar + CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a He. Tyto plyny zároveň chrání tavnou lázeň a tuhnoucí kov před oxidací vzdušným kyslíkem [3,9].

Fokusovaný svazek fotonů využitý jako zdroj energie se vyznačuje těmito vlastnostmi [3]:

- vysoká hustota výkonu v dopadové ploše a to až  $10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , pro běžné svařování se pohybuje v rozsahu  $10^4$  až  $10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,
- monochromaticnost,
- energie je soustředěna na velice malou plochu o průměru až  $10 \mu\text{m}$ ,
- svazek fotonů nemá elektrický náboj a nedochází k jeho ovlivnění magnetickým polem,
- přesné dávkování výkonu,
- v průzračném prostředí se laserový parsek šíří bez ztrát,
- snadná reprodukovatelnost procesu.

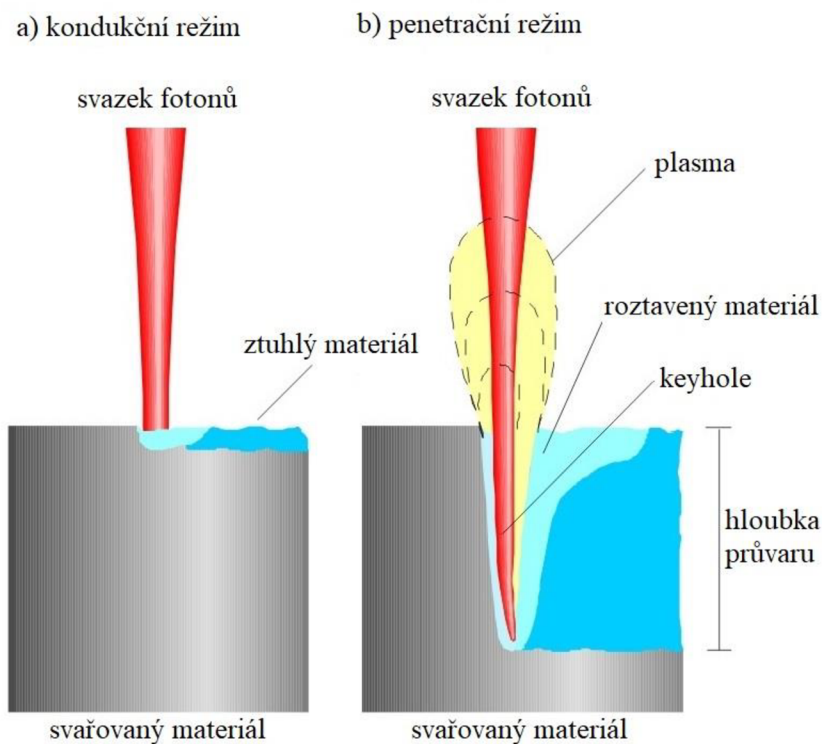
### 2.2.1 Metody svařování laserem

Obecně může zařízení pracovat v režimu pulzním nebo kontinuálním s kondukčním nebo penetračním účinkem (viz obr. 11) na svařovaný materiál [6,8,25].

Při použití pulsního režimu lze svařovat i velmi tenké materiály. To má využití zejména v mikroelektronice při spojování drátků a plíšků o rozměrech v řádech desítek  $\mu\text{m}$ . V tomto režimu je záření produkováno v krátkých oddělených dávkách. Na rozdíl od kontinuálního režimu, kdy je záření produkováno konstantně [8,9,25].

Kondukční svařování se využívá hlavně tam, kde je důležitější rychlost svařování než hloubka průvaru. Tato metoda svařování využívá tavení materiálu absorpcí a vedením tepla, které dopadá na materiál laserovým svazkem. Využívá se při nízkých výkonových hustotách pohybujících se okolo  $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  a dá se s ní dosáhnout pouze relativně malé hloubky průvaru [8,9,25].

„V penetračním režimu se využívá energie okolo  $10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , při těchto hodnotách se dosahuje intenzivního vypařování materiálu a díky tomu se oblast interakce s paprskem posouvá do hloubky materiálu a dochází k vzniku paroplynového kanálu, kterému se říká keyhole. Průvar má násobně větší hloubku než šířku. Rozvoj kanálu se zastaví, když hustota divergence záření a absorpce stěnami poklesne pod kritickou hodnotu, danou ztrátami tepla, odvodem do okolí a vypařováním materiálu. Při sváření s velkou hloubkou penetrace vzniká tavenina v důsledku dynamické rovnováhy tlaku plynů, par a tekutého kovu, proudí okolo stěn kanálu na zadní stěnu, kde se slévá, zaplní volný prostor a tuhne [9].“



Obr. 11 Pracovní režimy laseru [6].

### Procesní parametry laserového sváření

Základními parametry, podle kterých se nastavuje svařování jsou [9]:

- výkon laserového paprsku,  $P$  [W]
- rychlost sváření,  $v$  [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- druh a průtok ochranných plynů,  $Q_v$  [l/min]
- parametry optického systému,
- svařované materiály.

### Vnesené teplo do svaru $Q$

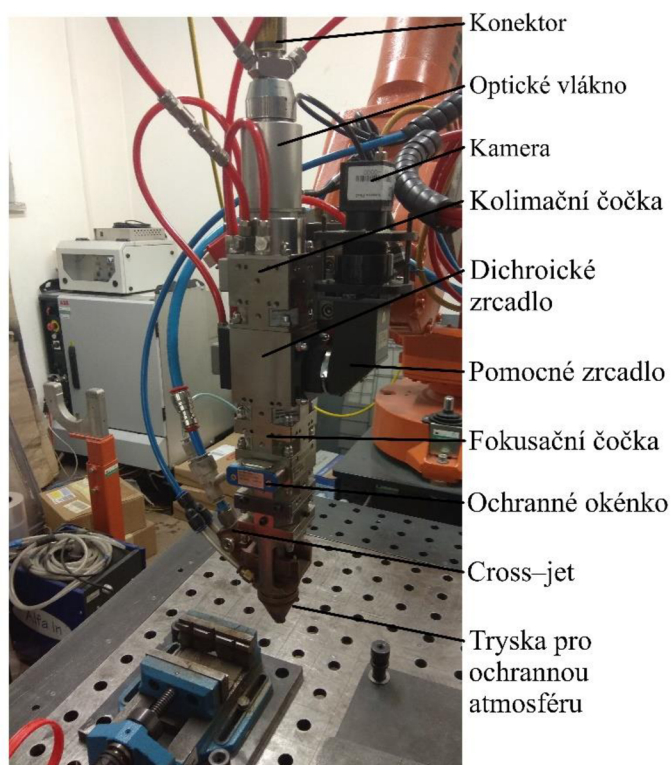
Vypočet se provádí pomocí vztahu (2.1) [9]:

$$Q = k \cdot \frac{P}{v} \quad [J \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2.1)$$

kde: koeficient účinnosti svařování  $k$  [-]

### 2.2.2 Svařovací hlava

Svařovací hlava (viz obr. 12), která je většinou osazena na průmyslovém robotu, zabezpečuje fokusaci laserového paprsku, jeho případné vychylování a aplikaci pracovního a ochranného plynu. Optika obsažená v hlavě a její geometrie ovlivňuje ohniskovou vzdálenost, velikost, do kterého je zaostřen paprsek a úhel dopadu na základní materiál. Na následujícím obrázku jsou popsány jednotlivé části svařovací hlavy, která byla použita při pokusech [6,26].



Obr. 12 Svařovací hlava.

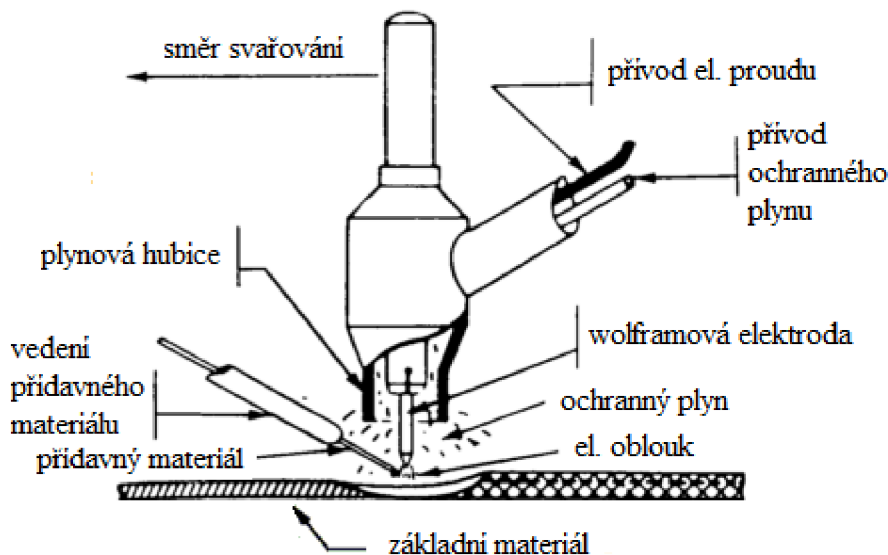
### 2.3 Svařování TIG

Název této metody pochází z anglického pojmenování Tungsten Inert Gas. Někdy se používá označení WIG neboli Wolfram Inert Gas, jehož význam je stejný pouze Wolfram se v angličtině překládá jako Tungsten [27].

Při samotném procesu svařování se využívá tepla, které se uvolňuje ze zapáleného elektrického oblouku udržovaného mezi netavitelnou wolframovou elektrodou a svařovaným dílem, za použití inertního plynu chránícího tavnou lázeň před oxidací vzdušným kyslíkem a dusíkem. Svařovat lze s použitím přídavného materiálu ve formě tyčky pro ruční svařování, drátu pro strojní použití, nebo bez přídavného materiálu pouhým tavením základního materiálu. Při procesu svařování se využívá hořáku připojeného ke zdroji hadic, která obsahuje přívod elektrického proudu, ochranného plynu a případně i chladicí kapaliny [3,27,28,29].

Hořák (viz obr. 13) zajišťuje přivedení elektrického proudu k elektrodě uchycené v kleštinách, přívod a usměrnění ochranného plynu, umístění a přesah elektrody z plynové hubice, dále pak přívod a odvod chladicí vody. Hořáky využívají chlazení pomocí procházejícího plynu při použití do cca 150 A a chlazení pomocí protékající vody do 350 až 500 A, pro ruční ale i strojní svařování. K zapálení oblouku dochází buď prostřednictvím jiskry vyvolané zdrojem vysokého napětí o vysoké frekvenci nebo dotykem [3,30,31].

Netavící wolframové elektrody používané při svařování TIG se vyrábí ze spékaného wolframu s teplotou tavení 3380 °C. Kromě elektrod z čistého wolframu se využívají i elektrody legované oxidy Thoria, Lanthanu, Ceru, Zirkonu, Ytria nebo vzácnými zeminami. Legující prvky snižují teplotu, na kterou se při svařování elektroda ohřívá, zvyšují živostnost, zlepšují zapalování oblouku a jeho stabilitu díky zvýšení emise elektronů. Elektrody se dle různých typů označují barvami na konci elektrody a volí dle druhu proudu, polaritě na elektrodě u stejnosměrného proudu, velikosti proudu, typu základního materiálu a parametrů svarového úkosu [3,28,32].



Obr. 13 TIG svařování [29].

Ochranné plyny plní při svařování funkce jako ochrana elektrody, svarové lázně a okolí před vlivem vzduchu, vytváření podmínek příznivých pro zapálení oblouku a jeho stabilitu, zajištění přenosu tepla do svaru a jeho tvarování. Používají se plyny argon a hélium, které se využívají buď v čisté formě nebo jako směsi a v některých případech se používají i jako směsi s vodíkem nebo dusíkem. Nejpoužívanějším plynem je argon, a to hlavně kvůli cenové dostupnosti a možnosti jej využít pro všechny svařitelné materiály. Argon má malou teplotní vodivost a poměrně nízký ionizační potenciál. Díky těmto vlastnostem vykazuje elektrický oblouk vysokou stabilitu, umožňuje dosažení vysokých teplot a dobře se zapaluje. Hélium je lehký plyn, a to zapříčiňuje potřebu vyššího průtoku při svařování. Vykazuje také oproti argonu vyšší teplotní vodivost i ionizační potenciál, což má za důsledek špatné zapalování a nestabilní oblouk při větší délce hoření. Díky zvýšené teplotní vodivosti se používá pro svařování hliníku, mědi a jejich slitin [3,33,34].



Výhody svařování metodou TIG jsou [29,30]:

- silnější spoj oproti svařování obalenou elektrodou,
- vhodné pro svařování tenkých materiálů,
- vysoce estetické a vzhledové svary,
- výborná kontrola a stabilita elektrického oblouku,
- lze svařovat se střídavým i stejnosměrným proudem,
- oproti ostatním metodám má více kontroly nad svařovacími parametry,
- malá tepelně ovlivněná oblast.

Nevýhody jsou:

- nízká produktivita při ručním svařování,
- vysoké nároky na zručnost svářeče.

### Vnesené teplo do svaru $Q$

Výpočet se provádí pomocí vztahu (2.2) [35]:

$$Q = k \cdot \frac{I \cdot U}{v} \quad [J \cdot mm^{-1}] \quad (2.2)$$

kde:	koeficient účinnosti procesu svařování	$k [-]$
	svařovací proud	$I [A]$
	svařovací napětí	$U [V]$
	svařovací rychlost	$v [mm \cdot s^{-1}]$

#### 2.3.1 Svařování stejnosměrným proudem (DC)

Při použití stejnosměrného proudu je elektroda připojena k zápornému pólu zdroje a ke kladnému pólu se připojí základní materiál (přímá polarita). Přibližně jedna třetina celkového tepla oblouku připadá na elektrodu a dvě třetiny se přenesou na základní materiál. Díky tomuto rozdělení nedochází k přetížení elektrody a svarová lázeň prokazuje velkou hloubku průvaru. Tento typ svařování se používá pro spoje všech druhů ocelí, mědi, niklu, titanu a jejich slitin. Tato metoda se většinou nevyužívá pro svařování hliníku. Výjimkou je, pokud se použije směs ochranného plynu argonu a helia, přičemž obsah hélia musí být minimálně 75 %. Vysoký obsah hélia ve směsi, díky jeho vysoké vodivosti, zapříčiní větší přenos tepla do svarové lázně, což umožní roztavení i povrchových oxidů, které se poté vlivem povrchových sil stáhnou do okraje taveniny a střed lázně zůstává čistý. Nepřímá polarita zapojení se většinou z důvodu velkého tepelného zatížení elektrody nevyužívá, pouze výjimečně pro svařování tenkostěnných svařenců z hliníku za nízkého proudu [3,28,31].

#### 2.3.2 Svařování střídavým proudem (AC)

Tato metoda je určena pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. Tyto materiály vytváří na svém povrchu vrstvy oxidů, které chrání za běžných podmínek před další oxidací. U hliníku se konkrétně na povrchu vytváří vrstva  $Al_2O_3$ , jehož teplota tavení je 2050 °C,

kteřá pak brání metalurgickému spojení, protože teplota tavení hliníku je 658 °C. Střídavý proud pro svařování hliníku se využívá kvůli své změně polaritě, kdy při zapojení elektrody na kladný pól zdroje dochází k čistícímu účinku neboli odpaření oxidů nebo jejich odtažení na okraj svarové lázně. Při kladné polaritě dochází pouze k malému průvaru, a naopak při záporné polaritě k velkému průvaru [3,28,31].

### 2.3.3 Svařování impulsním proudem

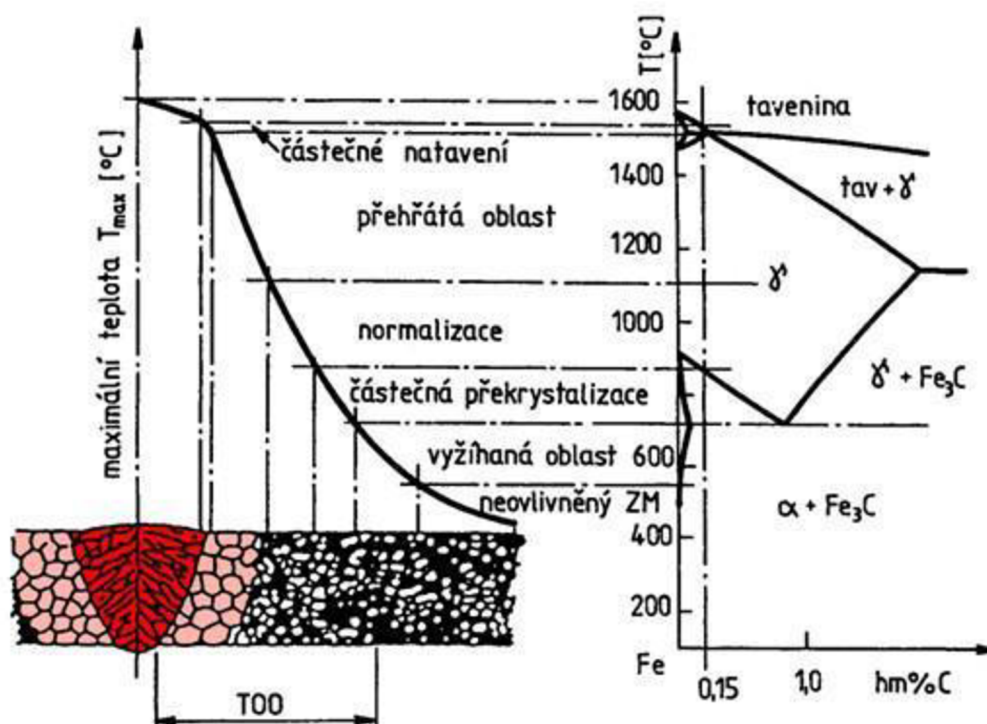
V této variantě se hodnota proudu pohybuje mezi dvěma hladinami, a to základní a impulsní. Elektroda je stále na kladném nebo záporném pólu zdroje. V základním proudu se dosahuje pouze malé hodnoty, která zajišťuje pouze ionizaci oblouku. Naopak impulsním proudem se dosahuje tavení materiálu. Tato metoda nachází největší využití při svařování tenkých plechů [3,28,36].

## 2.4 Pochody při svařování ocelí

Při svařování dochází k natavení základního případně i přídavného materiálu ve velmi krátkém čase díky působení koncentrovaných zdrojů tepla. V okolí místa, kde dochází ke svařování se vytvoří teplotní pole, jehož velikost a tvar jsou dány intenzitou zdroje tepla, fyzikálními vlastnostmi svařovaného materiálu, použitou svařovací metodou, rychlostí svařování, charakterem odvodu tepla a časem. Toto teplotní pole zapříčiňuje vznik teplotních cyklů, podle kterých se posuzuje vliv zdroje tepla na strukturu a vlastnosti svarového spoje. Vlivem působení teplotního pole na materiál dochází k vytvoření tepelně ovlivněných struktur v oblasti, která se nazývá tepelně ovlivněná oblast (viz obr. 14) neboli TOO. Velikost této oblasti je jedním z hlavních parametrů pro hodnocení svarů [7,37].

Jednotlivé oblasti svaru pak dělíme na [7,37]:

- svarový kov – část spoje zahřátá nad teplotu likvidu  $T_L$ ,
- přechodové pásmo nebo hranice natavení – úzká zóna kde došlo k zahřátí na teploty mezi teplotou solidu  $T_S$  a  $T_L$ ,
- tepelně ovlivněná oblast svarového spoje (TOO). Ta se následně dělí na:
  - přehřáté pásmo – hrubozrnná struktura vzniklá ochlazením z teplot mezi  $T_{př}$  a  $T_S$ ,
  - pásmo normalizace – jemnozrnná struktura definovaná ochlazením z teplot mezi  $T_{př}$  a  $A_{C3}$ ,
  - pásmo částečné překrytalizace – v rozmezí teplot  $A_{C1}$  až  $A_{C3}$ .
- Vyžíhaný materiál a základní materiál.



Obr. 14 Tepelně ovlivněná oblast svaru [37].

Na výbrusech svarových spojů lze po naleptání a zvětšení pod mikroskopem zřetelně rozeznat jednotlivá pásma a šířku tepelně ovlivněné oblasti [38].

Teplotní cyklus (viz obr. 15) vyjádřený v závislosti průběhu teplot na čase je charakterizován třemi oblastmi. První je oblast ohřevu, která je dána nárůstem oblasti teploty na maximální hodnotu. Rychlost, za jakou se materiál na tuto teplotu ohřeje je dána použitou technologií, fyzikálními vlastnostmi materiálu a intenzitou použitého zdroje. Ve druhé fázi je materiál zahřátý na maximální teplotu nebo neklesne pod určitou teplotu. V této fázi dochází k růstu zrn. Čím delší je čas, po který je materiál v této teplotní fázi, tím je i větší hrubnutí zrn. V poslední fázi dochází k ochlazení. Pokud se materiál nachází v transformačních teplotách pak čím je rychlost ochlazení větší tím větší je pravděpodobnost vytvoření nerovnovážné struktury jako například martenzitu. Menší rychlosti ochlazení u teplot nižších než 300 °C zvyšují pravděpodobnost úniku vodíku z oblasti svarového spoje [7].

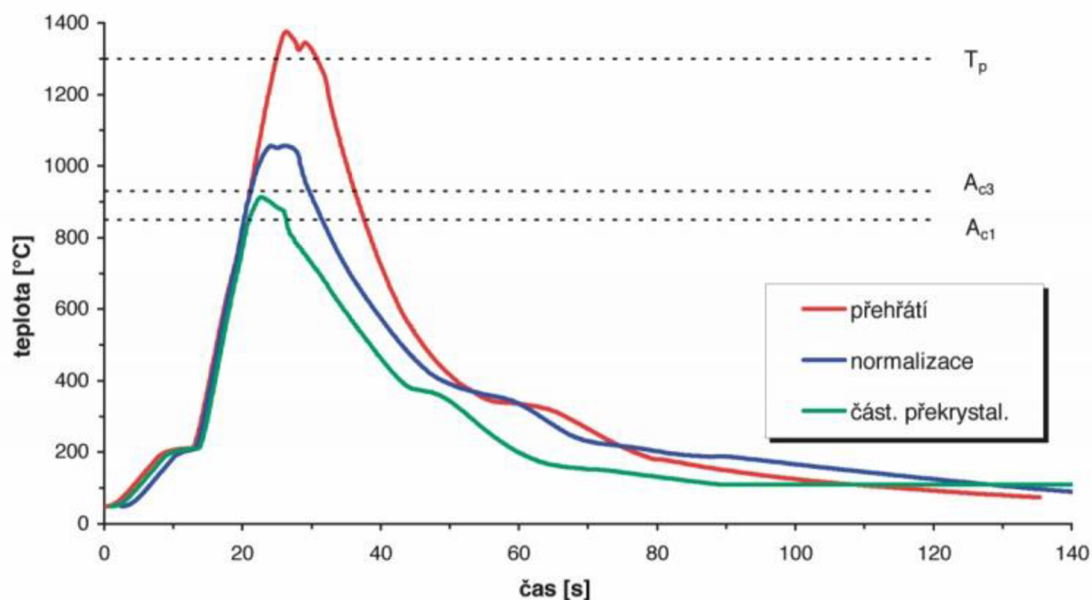
Teplotní cykly se charakterizují těmito parametry [7]:

- rychlost ohřevu na maximální teplotu,
- čas, po který se materiál nachází nad teplotami  $A_{C1}$ ,  $A_{C3}$  a  $T_{př}$ ,
- maximální teplota  $T_{max}$ ,
- rychlost ochlazení.

Vyjadřuje se parametrem času ochlazení.

- $t_{8/5}$  mezi teplotami 800 a 500 °C

- $t_{12/8}$  mezi teplotami 1200 a 800 °C
- $t_{T_{max}/10}$  mezi maximální teplotou cyklu a 100 °C



Obr. 15 Teplotní cykly [65].

Uvedené pochody svařování, chladnutí a různá pásma tepelně ovlivněné oblasti platí obecně pro svařování. V případě využití svařování laserem, jak bylo v předešlých kapitolách zmíněno, je celkové vnesené teplo menší a celkově lépe koncentrované do místa svaru než u klasických metod a s tím souvisí i vzhled tepelně ovlivněné oblasti. U laserového svařování je TOO podstatně menší a její jednotlivá pásma jsou špatně rozpoznatelná. Rychlost chladnutí  $t_{8/5}$  je potom až 500 °C/s a oproti cyklům znázorněným v obrázku a jejich průběh je strmější [7,23].

#### 2.4.1 Svařitelnost ocelí

Zásadní pro svařitelnost ocelí je jejich chemické složení. Jaký má vliv se posuzuje pomocí uhlíkového ekvivalentu, který vyjadřuje vliv zastoupení legujících prvků na kalitelnost. Čím je ocel snadněji zakalitelná, tím větší je riziko vytvoření křehkých struktur, jako martenzit nebo dolní bainit. Uhlíkový ekvivalent je tedy i ukazatelem svařitelnosti. Norma ČSN EN 1011-1 doporučuje pro výpočet uhlíkového ekvivalentu feritických ocelí u obloukových metod svařování využít vztah (2.3) [7]:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\%] \quad (2.3)$$

Tuto rovnici je možné použít pro oceli s chemickým složením při těchto podílech v hmotnostních procentech: C (0,05 až 0,25 %), Si (max. 0,8 %), Mn (max. 1,7 %), Cr (max. 0,9 %), Cu (max. 1 %), Ni (max. 2,5 %), Mo (max. 0,75 %), V (max. 0,2 %). V případě svařování ocelí s rozdílnými ekvivalenty se uvažuje vyšší hodnota. Pro oceli obsahující bór není tato rovnice vhodná. Hodnota CE by se měla pohybovat v rozsahu 0,3 až 0,7 [7].

Pro oceli ze skupin 1 až 4 podle TNI CEN ISO/TR 15608 s rozsahem legujících prvků v hmotnostních procentech: C (0,05 až 0,25 %), Si (max. 0,8 %), Mn (0,5 až 1,9 %), Cr (max. 1,5 %), Cu (max. 0,7 %), Ni (max 2,5 %), Mo (max. 0,75 %), Ti (max. 0,12 %), V (max. 0,18 %), B (max. 0,05 %), Nb (max. 0,06 %) je dle normy ČSN N 1011-2 doporučeno využít vztahu (2.4) [7]:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} [\%] \quad (2.4)$$

Uhlíkový ekvivalent vyjadřuje tedy sklon materiálu k zakalení svarového kovu a TOO ale i náchylnost svarových spojů ke vzniku studených trhlin. Vznik těchto trhlin je také ovlivněn obsahem difuzního vodíku ve svaru, tloušťkou svařovaných dílů a množstvím vneseného tepla při svařování na jednotku délky spoje. Způsob, jak zamezit vzniku studených trhlin je předehřevem spoje, pomocí kterého dojde ke snížení rychlosti ochlazování a tím se zabraňuje zakalení materiálu. Dojde ke snížení teplotního gradientu a tím i ke snížení zbytkového pnutí. Obecně platí, že nelegované uhlíkové oceli s obsahem uhlíku do 0,22 hm. %, uhlíkovým ekvivalentem do 0,45 hm. % a do tloušťky 25 mm nevyžadují předehřev. Teplotu předehřevu lze zjistit výpočtem nebo experimentálně pomocí zkoušek praskavosti jako např. Tekken nebo CTS test. Způsoby zjištění teploty předehřevu jsou [2,7,35,37]:

a) ČSN EN 1011–2 Metoda A

Tato metoda je vhodná pro stanovení teploty předehřevu u obloukových metod pro nelegované, jemnozrnné a nízkolegované oceli. Stanovení teploty vychází z výpočtu uhlíkového ekvivalentu CE dle vztahu 2.3. Chemické složení musí odpovídat rozsahu stanovenému ve vztahu pro uhlíkový ekvivalent. Teplota předehřevu se odečítá z grafů uvedených v normě. Grafy vyjadřují vliv obsahu difuzního vodíku, tloušťky svarového spoje, hodnoty uhlíkového ekvivalentu a tepelného příkonu na minimální teplotu předehřevu, která zajistí eliminaci studených trhlin.

b) ČSN EN 1011–2 Metoda B

Nejčastěji se využívá u obloukových metod pro nízkolegované vysokopevnostní oceli splňující podmínky pro výpočet uhlíkového ekvivalentu CET. Stanovuje se pomocí vztahů, které zahrnují vliv:

- chemického složení,

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 [^{\circ}C] \quad (2.5)$$

- tloušťky svařovaných materiálů  $d$  [mm],

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{h}\right) - 110 [^{\circ}C] \quad (2.6)$$

- obsahu difuzního vodíku HD [ml·100g<sup>-1</sup>],

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 [^{\circ}C] \quad (2.7)$$

- tepelného příkonu  $Q$  [ $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ ].

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.8)$$

Celková hodnota se přehřevu  $T_p$  se pak vypočítá jako součet dílčích vlivů:

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.9)$$

Tento výpočet lze použít pro svařování ocelí s těmito parametry:

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| - mez kluzu                      | $Re < 1000 \text{ MPa}$                            |
| - uhlíkový ekvivalent            | $CET = 0,2 \div 0,5 \text{ hm. \%}$                |
| - tloušťka svařovaných materiálů | $d = 10 \div 90 \text{ mm}$                        |
| - obsah difuzního vodíku         | $HD = 1 \div 20 \text{ ml} \cdot 100\text{g}^{-1}$ |
| - vnesené teplo                  | $Q = 0,5 \div 4,0 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ |

#### c) Výpočet podle Sefariana

Tento typ výpočtu přehřevu je vhodný pro uhlíkové a nízkoalokované oceli. Zejména se pak hodí pro žárupevné Cr-Mo oceli a konstrukční Cr-Ni-Mo oceli s obsahem uhlíku větším než 0,10 hm. %.

Teplota přehřevu  $T_p$  se spočítá:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.10)$$

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (\text{Mn} + \text{Cr}) + 20 \cdot \text{Ni} + 28 \cdot \text{Mo}}{360} \quad [\text{hm. \%}] \quad (2.11)$$

$$C_s = 0,005 \cdot t \cdot C_c \quad (2.12)$$

$$C_p = C_c + C_s \quad (2.13)$$

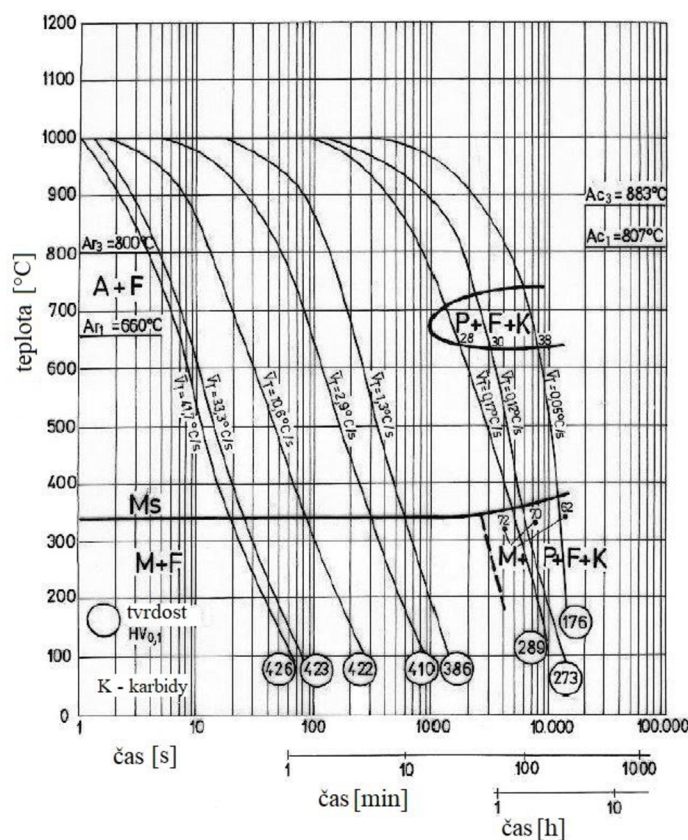
kde:	teplota přehřevu	$T_p$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
	ekvivalent uhlíku	$C_c$ [hm. %]
	ekvivalent tloušťky materiálu	$C_s$ [hm. %]
	celkový ekvivalent	$C_p$ [hm. %]
	tloušťka materiálu	$t$ [mm]

#### d) Použití materiálů výrobce

Pro stanovení teploty přehřevu lze využít materiálového listu v příloze. Výrobce v nich udává doporučenou teplotu přehřevu. Tu sice technolog nemusí považovat za závaznou, ale spokojenost zákazníka je pro výrobce většinou důležitá a dá se tedy předpokládat, že doporučené hodnoty mají své opodstatnění.

## e) Odhad pomocí ARA a IRA diagramů

Pokud je známá rychlost ochlazování v rámci teplotních cyklů, tak pomocí ARA diagramu oceli, u které se posuzuje svařitelnost, je možné s velkou pravděpodobností určit jaká bude výsledná mikrostruktura a díky tomu i mechanické vlastnosti. Lze toho využít i naopak. Pokud máme požadovanou mikrostrukturu, pak z ARA diagramu (viz obr. 16) lze určit požadovanou rychlost ochlazování  $t_{8/5}$  a na jejím základě zvolit parametry svařování takové, aby se dosáhlo požadované mikrostruktury. Pro potřeby svařování je vhodné využívat digramy na to konstruované, tedy ARA „in situ“, které mají na vodorovné ose parametr ochlazovací rychlosti  $t_{8/5}$  [7,39,40,41].



Obr. 16 ARA diagram oceli X12Cr13 [60].

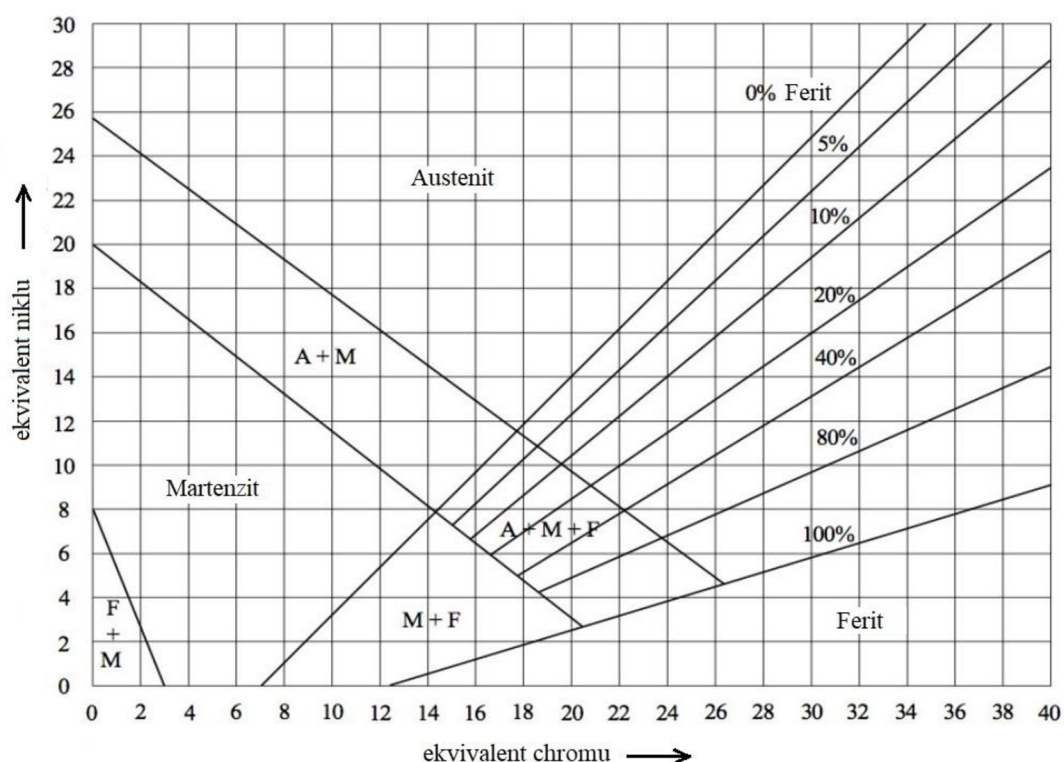
Teplota předehřevu se volí taková, aby byla rychlost ochlazování co nejnižší a ve struktuře se objevilo co nejméně martenzitu. Pro silně prokalitelné oceli se volí teplota předehřevu blízká teplotě  $M_s$ . Pro zjištění této teploty se využívá IRA diagramu [40,42].

Z přiloženého ARA diagramu je možné vyčíst přibližnou tvrdost ochlazeného materiálu podle Vickerse. Porovnáním tvrdostí zjištěné ve vzorcích v jednotlivých pásmech TOO je potom možné odhadnout strukturní složení.

Svařováním feritických korozivzdorných ocelí se zabývá norma ČSN EN 1011-3. Svařitelnost materiálů pomocí laseru je pak popsána normou ČSN EN 1011-6.

### 2.4.2 Využití Schaefflerova diagramu

Vysokolegované oceli se díky svým fyzikálním vlastnostem a vlastnostem jako odolnost proti korozi, žáruvzdornost a žárupevnost staly nenahraditelnými konstrukčními materiály. Legující prvky, díky kterým se dosahuje požadovaných vlastností, ale ovlivňují i strukturu materiálu po ochlazení. Výsledná struktura je závislá na množství jednotlivých přísad, které znázorňuje Schaefflerův diagram (viz obr. 17). Největší vliv na výslednou strukturu mají chrom a nikl. Vliv ostatních prvků se vyjadřuje jako násobek vlivu těchto prvků v podobě ekvivalentu chromu ( $Cr_E$ ) nebo niklu ( $Ni_E$ ). Tento diagram umožňuje také posoudit jaké budou strukturní změny svarového kovu po zředění základním materiálem. V případě této práce umožní diagram odhadnout výslednou strukturu svarového kovu po smíšení základních materiálů [40].



Obr. 17 Schaefflerův diagram [43].

Výpočet ekvivalentů dle vztahů (2.14 a 2.15) [43]:

$$Ni_e = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn \text{ [hm. \%]} \quad (2.14)$$

$$Cr_e = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti \text{ [hm. \%]} \quad (2.15)$$

### 2.4.3 Svařování martenzitických ocelí

Martenzitické oceli obsahující 13 až 17 % Cr a až 4 % Ni se klasicky svařují v popuštěném, žíhaném, zušlechťeném nebo tvrdém stavu. Tepelné zpracování, které přecházelo svařování nemá vliv na zakalení TOO a svarového kovu. Při svařování těchto ocelí je hlavním problémem jejich prokalitelnost a náchylnost k vytváření povrchových trhlin. Z tohoto důvodu se při svařování těchto materiálů využívá předehřevu a dohřevu svarů. Nejčastěji se doporučuje teplota předehřevu mezi  $M_f$  a  $M_s$ , tedy cca 250 °C.



Doporučená teplota předehřevu může být v závislosti na geometrii a tuhosti spoje odlišná a pro více namáhané spoje větších tlouštěk se doporučuje teplota předehřevu vyšší. Teploty jsou voleny v těchto hodnotách z toho důvodu, aby během svařování zůstal v materiálu dostatek austenitu, který díky své plasticitě a schopnosti rozpouštět difuzní vodík, napomáhá ke snížení vnitřního napětí. V pásmu přehřátí TOO a svarovém kovu je z hlediska mechanických vlastností nevhodná hodnota vrubové houževnatosti a z toho důvodu je nutné spoje tepelně zpracovat. Cílem tepelného zpracování je snížení zbytkových napětí a popuštění martenzitu neboli snaha snížit jeho tvrdost i pevnost a zároveň zvýšit jeho tažnost a houževnatost. Pokud se jedná o tuhý, tvarově členitý a tlustostěnný svařenec je nutné, aby došlo k jeho tepelnému zpracování ihned po svaření. Při svařování je nutné se vyhnout všem vrubům z důvodu vysoké vrubové citlivosti martenzitických ocelí. Dalším omezením pro tyto oceli je citlivost na nízkoteplotní žíhací prskavost, která je způsobena vysokými rychlostmi ohřevu na žíhací teplotu. Důlková a štěrbinová koroze se může u martenzitických ocelí také vyskytnout. Při sváření se doporučuje využít tepelného příkonu  $0,5 - 1,5 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$  [7] [44].

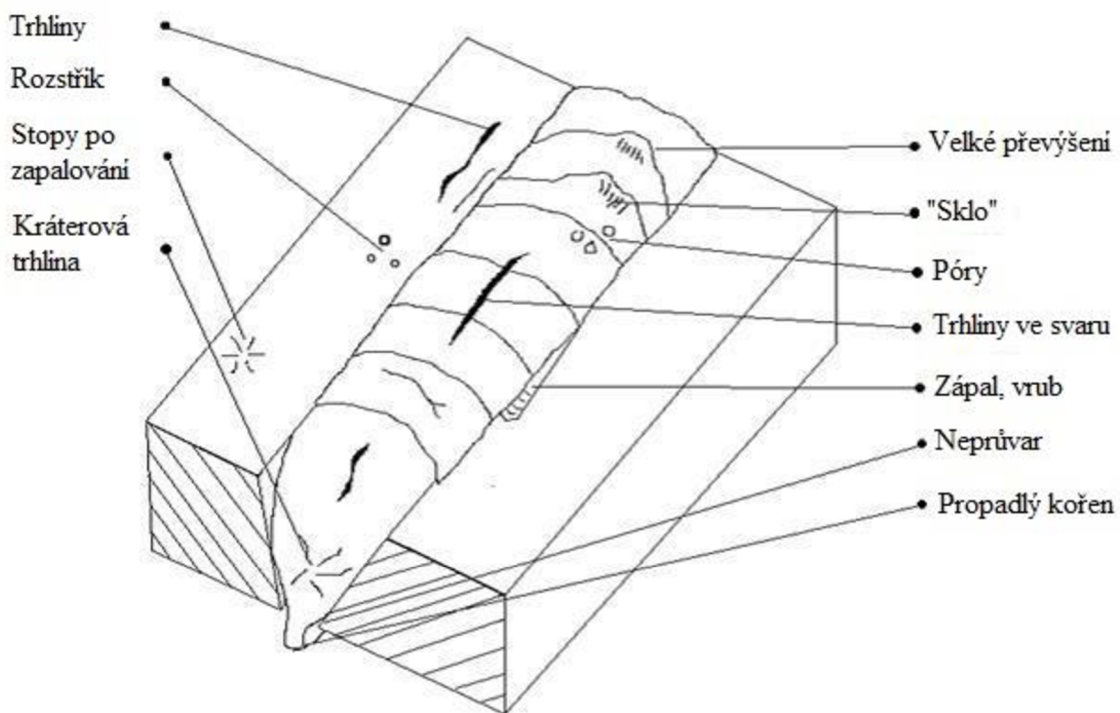
## 2.5 Vady svarů

Vadou svaru se rozumí všechny odchylky od vlastností určených normou, technickými podmínkami nebo smluvním vzorkem. Vady se mohou považovat za koncentrátoři napětí, které nepříznivě ovlivňují mez únavy a mohou se stát iniciátory křehkého lomu. Vady, které lze zjistit pouhou vizuální prohlídkou nebo pomocí jednoduchých pomůcek se označují jako vady zjevné. Pokud se k jejich nalezení musí využít přístrojů nebo zkoušek, pak se nazývají skryté. V závislosti na ustanovení předpisů pak mohou být vady přípustné, nepřípustné, opravitelné nebo neopravitelné. Základní rozdělení defektů ve svarových spojích se provádí z hlediska tvaru a polohy vad. Podle tvaru se defekty rozdělují do tří skupin, a to na vady bodové, plošné a objemové (viz obr. 18). Podle polohy se pak rozdělují na povrchové a vnitřní [38,45,46].

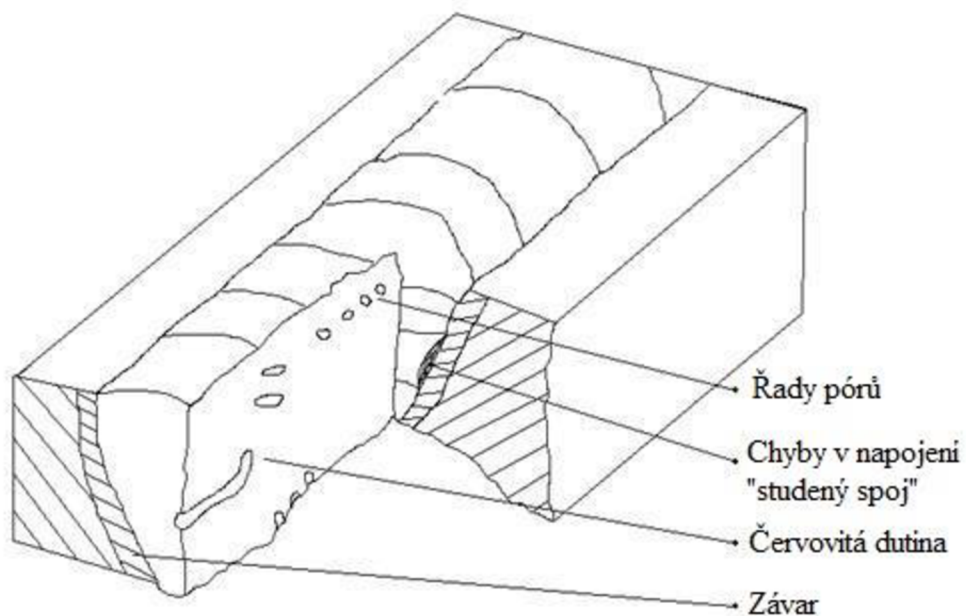


Obr. 18 Vady ve svarech dle tvaru a polohy [38].

Bodové vady se projevují jako mikropóry nebo malé sférické vměstky. Trhliny, neprůvody, a studené spoje se zařazují do vad plošných. Do objemových vad se řadí vměstky (struskové, tavidlové, oxidické, kovové), plynové dutiny (póry, bubliny), staženiny (mezidendritické, kráterové), nedodržený rozměr (hubený kořen, krápník, propadlý svar, převyšovaný svar), zápaly, vruby a nepravidelný povrch svaru. Příklady a rozdělení svarových vad podle polohy je znázorněno na obrázcích 19 a 20 [38,45,46].



Obr. 19 Viditelné vady [46].



Obr. 20 Vnitřní vady svaru [46].

## 2.6 Zkoušky svarových spojů a materiálů

Kontrola kvality svaru se dá rozdělit na dva základní způsoby. Zkoušení pomocí nedestruktivních metod, během kterých nedochází k porušení materiálu, a metod destruktivních. Příklady jednotlivých zkoušek jsou [45,47]:

Nedestruktivní zkoušky:

- vizuální kontrola
- prozáření RTG a  $\gamma$  zářením
- ultrazvukem
- magnetická prášková
- kapilární
- indukční metoda
- zkouška vířivými proudy

Destruktivní zkoušky:

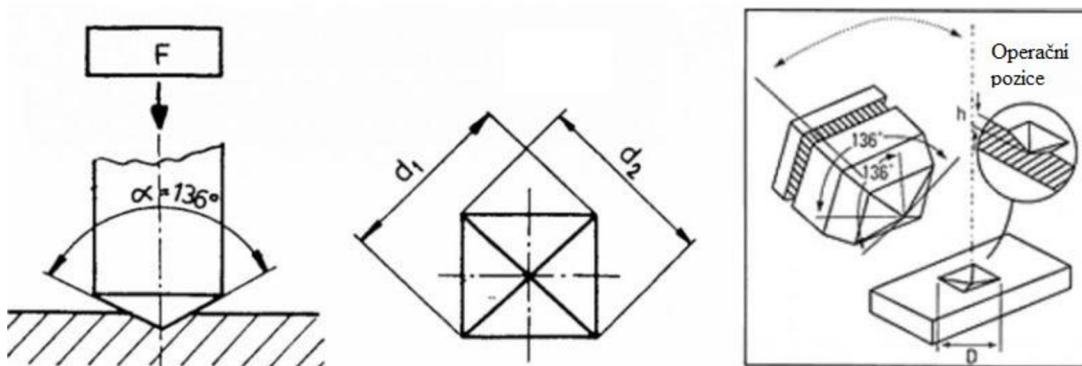
- tahem
- lámavosti
- ohybem
- rázem v ohybu
- tvrdosti
- metalografické
- korozní

V této práci se blíže zaměříme pouze na zkoušky provedené v experimentu, tedy zkoušku metalografickou a zkoušku tvrdosti.

### 2.6.1 Zkoušky tvrdosti

Tvrdot se definuje jako odpor materiálu proti vniknutí cizího tělesa do povrchu. V tomto případě svarového spoje. Posuzuje se na základě velikosti stopy, kterou zanechá po vlačování cizí těleso, které se liší podle typu použité zkoušky. U zkoušky podle Brinella se jedná o kuličku z kalené oceli nebo ze slinutého karbidu. Zkouška Rockwelova využívá kužele s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  vyrobeného z kalené oceli nebo diamantu [48].

V této práci se využila zkouška tvrdosti dle Vickerse (viz obr. 21), která používá čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  vyrobený z diamantu.



Obr. 21 Princip metody dle Vickerse [48].

Po zkoušce se změří velikost úhlopříček vtisku, který vznikne po odlehčení, a z nich vytvoříme střední hodnotu neboli aritmetický průměr, který se využije ve výpočtů (2.16 a 2.17) [48].

$$HV = 0,189 \cdot \left(\frac{F}{d^2}\right) [-] \quad (2.16)$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} [\mu m] \quad (2.17)$$

kde:     zatěžující síla                     F [N]  
          střední velikost úhlopříčky vtisku     d[ $\mu m$ ]  
          úhlopříčka vtisku                     d<sub>1,2</sub>[ $\mu m$ ]

Symbolem tvrdosti pro zkoušku podle Vickerse je HV, za kterým může následovat číslo podle použitého zkušebního zatížení. Vzorky, na kterých se provede zkouška se odeberou řezáním kolmo na osu svaru, tak aby povrch nebyl ovlivněn použitou technologií dělení. Ve vzorku musí být obsaženy oblasti materiálu neovlivněného svařováním, tepelně ovlivněné oblasti a svarový kov. Povrch vzorků se upraví broušením, případně i leptáním. Počet vtisků a jejich rozmístění musí být takové, aby výsledná zkouška mohla určit oblasti, kde došlo ke snížení nebo zvýšení tvrdosti v důsledku svařování. Vzdálenosti mezi jednotlivými vtisky jsou definovány příslušnými normami [7,49,50].

### 2.6.2 Metalografické zkoušky

Zkoušky se provádí pomocí pozorování metalografických vzorků pod optickými mikroskopy. Nejčastěji se jedná o klasické světelné mikroskopy nebo speciální metalografické mikroskopy. Metalografické vzorky je potřeba před začátkem pozorování upravit tak, aby byla pozorovatelná jeho struktura. Odebrané vzorky musí být z oblasti, která vystihuje charakter zkoumané struktury. Pro svařování tedy z oblasti svaru a tepelně ovlivněné oblasti ve formě řezu kolmého na osu svaru. Pro odebrání vzorků a jejich následném opracování se využívají takové metody, aby nedošlo ke změnám struktury vlivem deformace nebo tepelnému ovlivnění. Oblast řezu je tedy nutné intenzivně chladit [7,47,51,52].

Pro studium mikrostruktury je nutné vzorky zalít za studena do připravené formy nebo jej zalisovat za tepla. Pro zalévání za studena se nejčastěji používají různé pryskyřice promíchané s tvrdidlem. Zalisování za tepla se provádí při teplotách od 100 °C až do 180 °C a tlaku 30 kN až 50 kN, v komoře lisu, kam se vloží vzorek, který se následně zasype pryskyřicí ve formě prášku. Výhodou této metody je krátká doba výroby, která obvykle nepřesáhne 10 minut. Použít se může ale pouze v případě, že zvýšená teplota neovlivní strukturu zkoušeného materiálu [51].

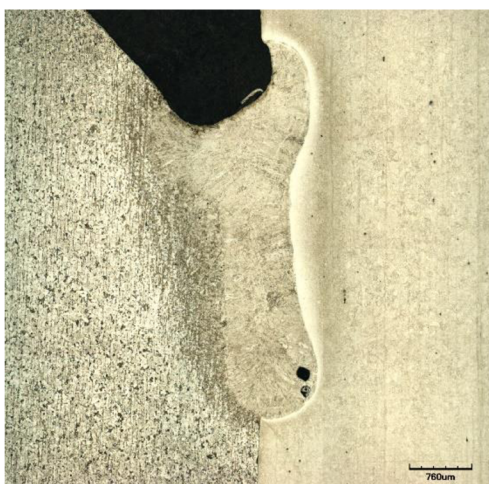
Po zalisování následuje broušení vzorků na brusce pomocí brusných papírů. Postupně se využívá papíru s menší drsností a po každé výměně se vzorek opláchne vodou a brousí se ve směru kolmém k předchozímu broušení. Obvykle se využívá brusných papírů z SiC nebo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se zrnitostí 60 až 2400 dle normy FEPA. K broušení se využívá i metalografických

brusek u kterých se vzorky při broušení chladí vodou nebo jiný médiem. Vzorek je zároveň přitlačen k brusivu přitlačnou silou [7,51].

Po broušení se vzorek upravuje leštěním, během kterého již nedochází k úbytku materiálu, případně k úbytkům minimálním. Průběh je podobný jako u broušení ale leštící kotouč je vyroben z textilie jako například samet, satén, flanel. Brusivo se nanáší ve formě prášku, pasty nebo suspenze [51].

Pro vyvolání mikrostruktury slouží leptání pomocí leptadel, které se liší podle druhu zkoumaného materiálu. Na povrch materiálu se nechá působit chemické leptadlo, které díky rozdílné rozpouštěcí schopnosti jednotlivých součástí struktury vytvoří povrchový reliéf a tím zviditelní strukturu [51].

Makroskopická kontrola probíhá pozorováním vzorků ve skutečné velikosti nebo při malém zvětšení, které dosahuje maximálně třiceti násobku. U svarových spojů se využívá pro hodnocení tvaru, způsobu kladení vrstev, odmíšení svarového kovu, velikosti a charakteru tepelně ovlivněné oblasti, hranice ztavení. Pozorování obvykle probíhá na příčném řezu, který obsahuje svarový kov, TOO a základní materiál [7,47].



Obr. 22 Makroskopický snímek.

K hodnocení mikroskopické struktury se využívá světelných mikroskopů dosahujících zvětšení do 1000x nebo laserových konfokálních mikroskopů, které dosahují zvětšení až 10000x. Pomocí těchto zařízení se pozorují jednotlivá zrna materiálu, hranice zrn, strukturní složky svaru a TOO. V případě, že jsou zvětšení přechozích zařízení nedostatečná využívá se elektronové mikroskopie [47,51].

### 3 EXPERIMENT

V této části práce je znázorněna praktická část. Postupně se zde znázorní pracoviště, na kterých se vykonávaly experimenty, použité stroje, zařízení, postupy, které byly aplikovány při provedení experimentu a výsledky zkoušek. Hlavní část experimentu byla provedena na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd v Brně. V laboratoři laserového svařování byly provedeny všechny svařovací úkony. Na tomto ústavu bylo provedeno i zhotovení metalurgických vzorků a jejich následné vyhodnocení pod mikroskopem. Zkoušky tvrdosti podle Vickerse byly provedeny na Ústavu materiálových věd a inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

#### 3.1 Použitá zařízení pro svařování a přehřev

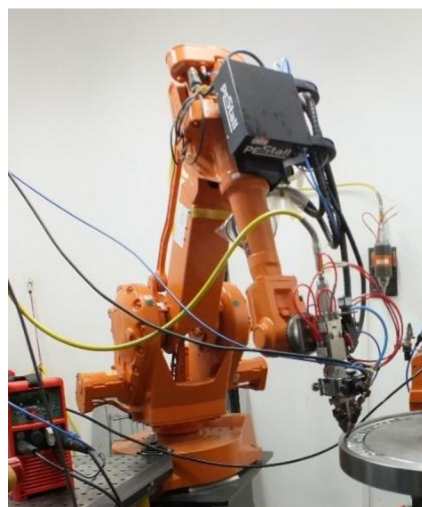
Pro účely této práce nejsou zdokumentovány kompletně všechny použité stroje ale pouze ty nejdůležitější, které se zúčastnily procesu svařování. Ostatní přístroje pro obrazový záznam, vyhodnocování materiálových charakteristik, přípravu metalurgických vzorků a řezání materiálu jsou v této práci pouze zmíněny.

- **Manipulační robot ABB IRB 2400**

Jedná se o šestiosý manipulační robot od výrobce ABB (viz obr. 23) nejčastěji využívaný pro svařování, řezání, odhrotování, lepení, těsnění, broušení či manipulaci s materiálem. Robot je schopen nést zátěž do hmotnosti 20 kg v pracovním rozsahu 1600 mm. V tomto případě je osazen laserovou svařovací hlavou Precitec YW 30 a přídavným hořákem TIG pro přehřev materiálu [53,54].

- **Výkonový laser IPG YLS 2000**

Tento pevnolátkový vláknový laser od firmy IPG (viz obr. 24) s výkonem až 2000 W pracuje na vlnové délce 1070nm. S osazenou svařovací hlavou je potom možné svařovat kovy až do hloubky 5 mm. Zdroj dosahuje účinnosti přibližně 30 % při kontinuálním nebo pulzním režimu. V sestavě se manipulačním robotem je kromě svařovací hlavy možné i osazení řezací hlavy [54,55].



Obr. 23 IRB 2400 se svařovací hlavou.



Obr. 24 Zdroj laserového záření YLS – 2000.

- **Zdroj TIG Fronius MagicWave 1700**

Tento svářecí zdroj byl v případě tohoto experimentu využit pouze jako zdroj tepla pro přehřev materiálu. Jedná se o digitálně řízený zdroj elektrického oblouku. Elektrický proud se může nastavit jako střídavý nebo stejnosměrný v rozsahu svařovacího proudu 3 až 170 A. Hořák TIG zdroje byl umístěn na laserovou svařovací hlavu [56,57].

- **Indukční ohřev Dawell DHI-4**

Tento mobilní indukční ohřev je určen pro rychlý ohřev feromagnetických vodivých materiálů. Stroj je vybaven vestavěným vodním chlazením induktoru a výměnnými nastavci indukčních cívek [58,59].



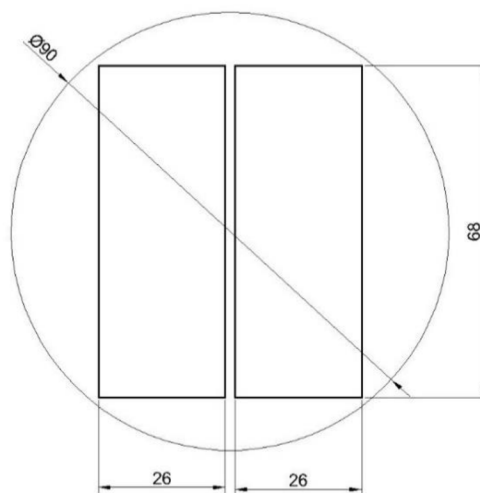
Obr. 25 Fronius MagicWave 1700 [56].



Obr. 26 Indukční ohřev Dawell.

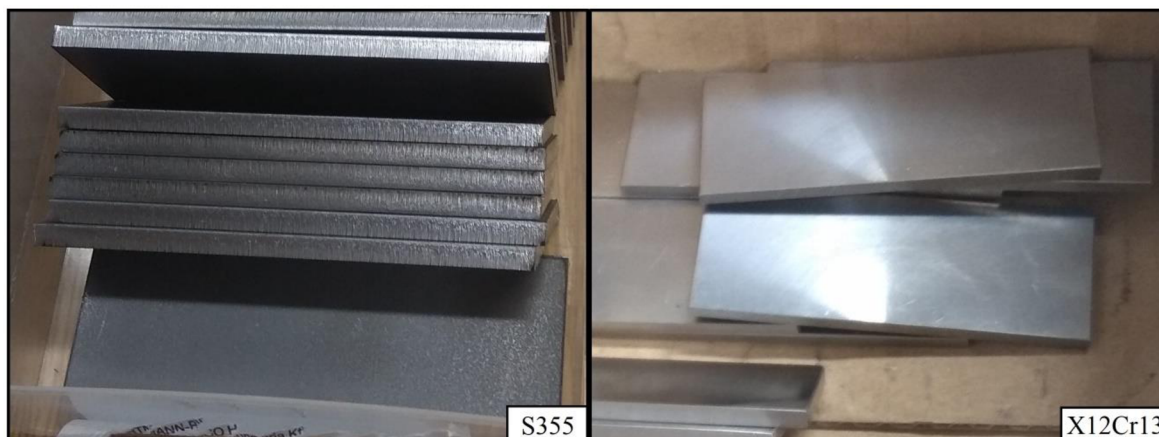
### 3.2 Použité materiály

Pro experiment byly zvoleny stejné materiály, které byly použity ve statoru turbíny. Tedy konstrukční ocel S355 a korozivzdorná ocel X12Cr13. Materiál byl dodán ve formě tyčového polotovaru o průměru 90 mm, který byl následně nařezán na plíšky (viz obr. 27) s požadovanou velikostí.



Obr. 27 Schéma výroby vzorků.

Tloušťka takto nařezaných plechů byla 3 mm. K dělení X12Cr13 bylo využito pásové pily a ocel S355 byla nařezána pomocí laseru s asistenčním plynem dusíkem. Kvůli využití dvou rozdílných způsobů řezání materiálu došlo k tomu, že vzorky měly v oblasti, kde mělo dojít ke svařování rozdílnou drsnost. K dosažení stejné drsnosti bylo využito smirkového papíru, pomocí kterého bylo obroušením dosaženo obdobné drsnosti.



Obr. 28 Připravené vzorky materiálů

Na obr. 28 je vidět rozdíl v drsnosti povrchů.

### 3.2.1 X12Cr13

Tato martenzitická ocel vykazuje dobré mechanické vlastnosti v kombinaci s odolností proti korozi ve středně korozivních prostředích. Využívá se v prostředích, kde mohou teploty vyšplhat až na 600°C. Využití nachází i při výrobě lopatek turbín nebo součástí ventilů. Dále se využívá pro strukturální díly používané ve vodním nebo parním prostředí a v komponentech pro papírenský, textilní nebo potravinářský průmysl [60,61,62].

Výrobci deklarují chemické složení dle následující tabulky 3.1.

Tab. 3.1 Chemické složení X12Cr13 [61].

Obsah prvků v hm. %						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,08÷0,15	max. 1,00	max. 1,50	max. 0,04	max. 0,03	11,5÷13,5	max. 0,75

Pro účely této práce bylo na Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT v Brně provedeno komplexní zkoumání chemického složení s výsledky v tabulce 3.2.



Tab. 3.2 Zjištěné chemické složení X12Cr13.

Obsah prvků v hm. %						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,11	0,73	0,31	0,019	0,002	12,2	0,41
Mo	V	W	Cu	Al	Ti	Co
0,12	0,07	0,05	0,09	0,023	0,00	0,03
B	Sn	Sb	Nb	Pb		
0,000	0,02	0,02	0,01	0,00		

Zjištěné chemické složení odpovídá specifikaci určené výrobcem. Zároveň byl zjištěn velice malý obsah síry, která dle normy ČSN EN 1011-6 zabývající se laserovým svařováním, v poměru s manganem ovlivňuje vznik krystalizačních trhlin. Dle této normy by měl být poměr Mn/S větší než 40. To je v tomto případě dodrženo a neočekává se tedy vznik trhlin.

Dodává se v žíhaném nebo zušlechtěném stavu. Žíhání se provádí za teplot 730 až 825 °C s chlazením na vzduchu. Při kalení se materiál zahřívá na teploty 950 až 1000 °C, následně se chladí v oleji nebo na vzduchu a popuštění se provádí při teplotách 650 až 750 °C. U takto upravených materiálů pak výrobci očekávají tyto mechanické vlastnosti [60].

Tab. 3.3 Mechanické vlastnosti X12Cr13 [60].

Tepelná úprava	Mez pevnosti R <sub>m</sub> [Mpa]	Mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [Mpa]	Tažnost A <sub>5</sub> [%]	Vrubová houževnatost KV [J]	Tvrдость [HB]
žíháno	max. 730	-	-	-	max. 220
zušl. QT650	650÷850	450	15	25 při 20 °C	-

### 3.2.2 S355J2

Nelegovaná konstrukční ocel se zaručenou hodnotou meze kluzu 355 MPa dodaná ve tvářeném stavu. Její další označení je ovlivněno hodnotou nárazové práce v plochém ohybu v závislosti na zkušební teplotě. Norma ČSN EN 10025-2 obsahuje výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí. Dle této normy S355J2 označuje konstrukční ocel se zaručenou hodnotou meze kluzu 355 MPa při teplotě 20 °C s minimální hodnotou nárazové práce 27 J v plochém ohybu při teplotě -20 °C. Je vhodná ke svařování pomocí všech normálně využívaných metod. Svařitelnost je řízena ekvivalentem uhlíku CE. Ten pak pro výrobky o tloušťce menší 30 mm nesmí překročit hodnotu 0,45 [63,64].

Tab. 3.4 Chemické složení S355J2 [64].

Dovolený obsah prvků v hm. %				
C	Si	Mn	P	S
max 0,24	max. 0,6	max. 1,7	max. 0,035	max. 0,035

Tab. 3.5 Zjištěné chemické složení S355

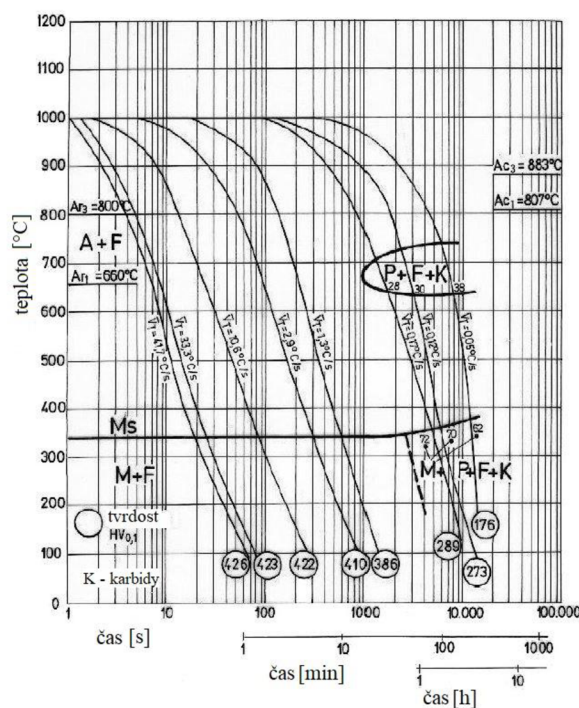
Zjištěný obsah prvků v hm. %						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,17	0,19	1,01	0,014	0,005	0,01	0,01
Mo	V	W	Cu	Al	Ti	Co
0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,00	0,00
B	Sn	Sb	Nb	Pb		
0,00	0,01	0,00	0,00	0,00		

Dle poměru manganu a síry obsaženém v oceli se neočekává vznik krystalizačních trhlin.

### 3.3 Kontrola svařitelnosti a předpokládané struktury

Při posuzování svařitelnosti oceli je dle kapitoly 2.5.1 první možností výpočet uhlíkového ekvivalentu, který je použitelný pro určitý rozsah chemického složení. Ten není u oceli X12Cr13 splněn, a tudíž jej nelze pro posouzení využít. Řídit se tedy budeme dle doporučení výrobců a dle kapitoly 2.5.3 tj., že ocel je svařitelná při použití přehřevu. Ten je dle materiálových listů dostupných v příloze doporučen 177 až 204 °C nebo 100 až 300 °C. Dostupná literatura, podle které byla vypracována kapitola 2.5.3 doporučovala teplotu přehřevu blízkou teplotě MS. Ta je dle dostupného ARA diagramu cca 340 °C.

V případě použití pouze laserového zdroje záření je rychlost ochlazování až 500 °C/s. Při pohledu na ARA diagram oceli X12Cr13 je vidět, že se zvyšující se rychlostí chladnutí se zvyšuje i tvrdost.



Obr. 29 ARA diagram oceli X12Cr13 [60].

Pro ocel S355 byl proveden kontrolní propočet uhlíkového ekvivalentu, dle vztahu 2.3.

$$CE = 0,17 + \frac{1,01}{6} + \frac{0 + 0,01 + 0}{5} + \frac{0,01 + 0,02}{15} = 0,342 \text{ hm. \%}$$

Ocel S355 tedy splňuje jak obecnou podmínku svařitelnosti, tak podmínku maximální hodnoty uhlíkového ekvivalentu.

### Schaefflerův diagram

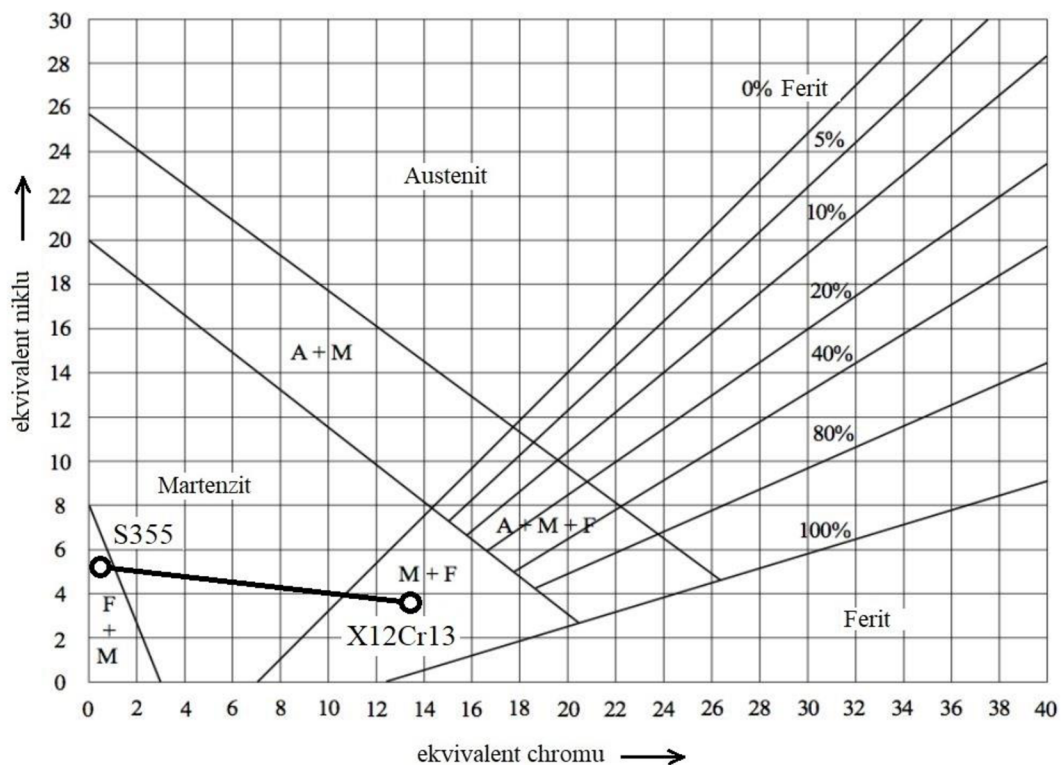
Výpočet ekvivalentů byl použit vztahy 2.14 a 2.15 z kapitoly 2.5.2.

$$Ni_{eX12Cr13} = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn = 0,41 + 30 \cdot 0,11 + 0,5 \cdot 0,31 = 3,865 \text{ hm. \%}$$

$$Cr_{eX12Cr13} = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti \\ = 12,2 + 0,12 + 1,5 \cdot 0,73 + 0,5 \cdot 0,01 + 2 \cdot 0 = 13,4155 \text{ hm. \%}$$

$$Ni_{eS355} = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn = 0,01 + 30 \cdot 0,17 + 0,5 \cdot 1,01 = 5,615 \text{ hm. \%}$$

$$Cr_{eX12Cr13} = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti \\ = 0,01 + 0 + 1,5 \cdot 0,19 + 0,5 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = 0,295 \text{ hm. \%}$$

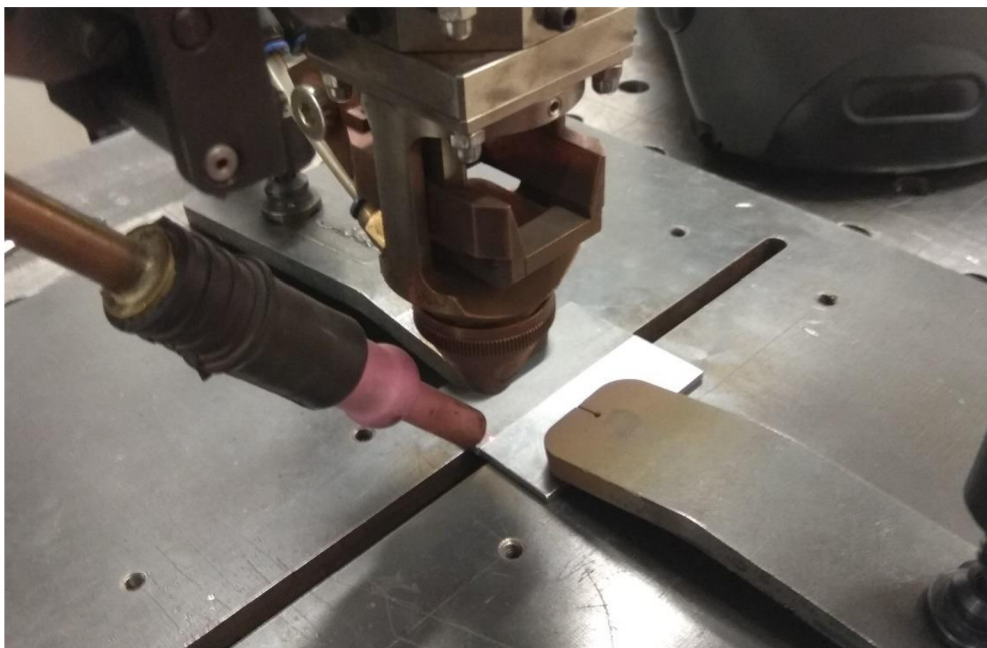


Obr. 30 Umístění oceli S355 a X12Cr13 v Schaefflerově diagramu [43].

Po vypočtení jednotlivých ekvivalentů pro obě oceli se vynese jejich poloha do Schaefflerova diagramu. Výsledná struktura svarového kovu by se měla nacházet poblíž středu spojnice těchto bodů. Dle Schaefflerova diagramu by tedy výsledná struktura měla pravděpodobně být martenzitická či martenziticko-feritická.

### 3.4 Výroba vzorků

Před svařováním byly vzorky upnuty pomocí upínek ke svařovacímu stolu. Po upnutí se najelo se svařovací hlavou nad vzorky (viz obr. 31) a provedl se testovací průjezd naprogramované trajektorie pro kontrolu, aby svařování proběhlo na požadovaném místě. Pokud byla testovacím průjezdem potvrzena správnost trajektorie a polohy vzorků, pak proběhlo samotné svařování. Před svařením celé délky stýkajících se povrchů byl na konci trajektorie proveden bodový svar, aby nedošlo k rozevření vzorků při svařování.



Obr. 31 Svařování vzorků.

Postupně bylo tímto způsobem vytvořeno šest svarů s následujícími svařovacími parametry, které byly určeny z předchozích zkušeností.

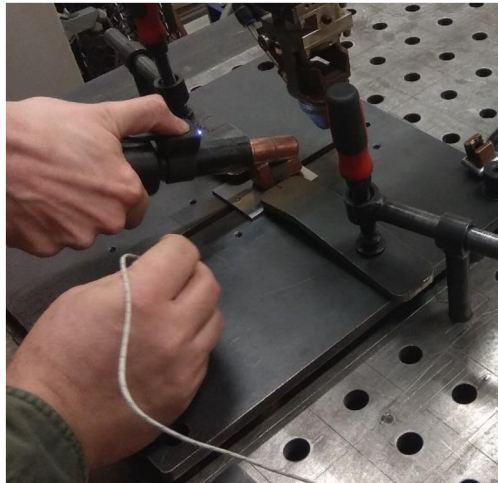
Tab. 3.6 Svařovací parametry.

Vzorek č.	Metoda	Výkon laseru	Nastavený proud na TIG zdroji	Skutečné napětí na zdroji	Teplota předehřevu
		P [W]	I[A]	U[V]	[°C]
1	Laser	1400			
2	Laser	1600			
3	Laser + TIG	1600	20	20	
4	Laser + TIG	1600	40	14,5	
5	Laser + TIG	1600	60	13,5	
6	Laser + Ind. předehřev	1600			285 °C

Doplňující parametry shodné pro všechny vzorky:

- kontinuální režim laseru,
- poloha ohniska byla nastavena 1 mm pod povrch materiálu,
- rychlost posuvu  $v = 20$  mm/s,
- průtok ochranného plynu (100% Argon)  $Q_v = 16,7$  l/min,
- poloha TIG elektrody byla 2 mm nad svařovaným materiálem a 3 mm před paprskem laseru,
- stejnosměrný proud v zapojení s přímou polaritou (wolframová elektroda byla připojena na záporný pól zdroje).

Při svařování prvního vzorku bylo zjištěno, že materiál nebyl provařen v celé své tloušťce. Z tohoto důvodu byl při svařování všech dalších vzorků zvýšen výkon laseru na 1600 W. Po této úpravě byl problém odstraněn. Volba rychlosti posuvu byla určena na základě předchozích zkušeností. U dalších tří vzorků byl otestován proces svařování za použití předehřevu pomocí TIG elektrody, při různých svařovacích proudech nastavených dle předchozích zkušeností. Poslední vzorek se před svařením ručně předehřál pomocí indukčního ohřevu Dawell DHI-4 na teplotu 285 °C. Při použití induktoru k ohřevu se snímala teplota svařovaných materiálů pomocí kontaktního termočlánku. Viz obrázek 32.



Obr. 32 Indukční ohřev a měření teploty.

**Výpočet vneseného tepla do spoje.**

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. [35]

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} = k \cdot \frac{P}{v} = [J \cdot mm^{-1}]$$

$$Q_1 = 0,63 \cdot \frac{1400}{20} = 44,1 J \cdot mm^{-1}$$

$$Q_2 = 0,63 \cdot \frac{1600}{20} = 50,4 J \cdot mm^{-1}$$

$$Q_3 = Q_2 + k \cdot \frac{U \cdot I}{v} = [J \cdot mm^{-1}]$$

$$Q_3 = 50,4 + 0,6 \cdot \frac{20,5 \cdot 20}{20} = 50,4 + 12,3 = 62,7 J \cdot mm^{-1}$$

$$Q_4 = 50,4 + 0,6 \cdot \frac{14,5 \cdot 40}{20} = 50,4 + 17,4 = 67,8 J \cdot mm^{-1}$$

$$Q_5 = 50,4 + 0,6 \cdot \frac{13,5 \cdot 60}{20} = 50,4 + 24,3 = 74,7 J \cdot mm^{-1}$$

Z výsledků je zřejmé, že množství vneseného tepla je poměrně malé a při použití předeřevu pomocí metody TIG při největším nastaveném proudu se množství vneseného tepla zvýšilo o zhruba polovinu.

**3.5 Metalografie**

Vzorky jejichž výroba byla popsána v předchozí kapitole byly následně dopraveny na metalografickou laboratoř na Ústavu přístrojové techniky v Brně, kde proběhla příprava metalografických vzorků pro makroskopické a mikroskopické pozorování. Proces výroby byl následující:

- a) Svařence byly pomocí pily MTH Mikron 110 rozřezány na menší kusy, které je možné zalít do pryskyřice. Aby nedošlo k tepelnému ovlivnění řezaných vzorků bylo při dělení využito chlazení.
- b) Po dělení byly vzorky očištěny a odmaštěny od chladicí kapaliny pomocí technického lihu.
- c) Očištěné vzorky se vložily do lisovacího stroje Struers CitoPress – 1. Následně byly zasypány hmotou MultiFast a zalisovány při teplotě 180 °C a tlaku 250 bar.

- d) Po zalisování byly vzorky přesunuty do broušícího stroje Struers Tegamin – 20, kde proběhlo broušení a leštění. Při broušení využívalo brusných kotoučů, jejich zrnitost se postupně zvyšovala. Broušení probíhá za soustavného chlazení vodou, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění a probíhal odvod odpadních částic.



Obr. 33 Broušení na stroji Struers.

- e) Po broušení se vzorky leštili pomocí diamantové suspenze DiaDuo-2.
- f) Poslední operací bylo leptání vzorků pro vyvolání struktury. Vzorek se položil do leptadla na určitou dobu, po které následoval oplach vodou a technickým lihem. Bylo využito leptadla Villela-Bain, které je vhodné pro leptání oceli X12Cr13. Pro leptání S355 se normálně využívá slabšího leptadla Nital. Z tohoto důvodu byly zkráceny časy, při kterých byly vzorky ponořeny v leptadle a pokud to bylo nutné tak se leptání opakovalo, dokud nebyla viditelná struktura X12Cr13, ale zároveň nedošlo k přešetání S355.

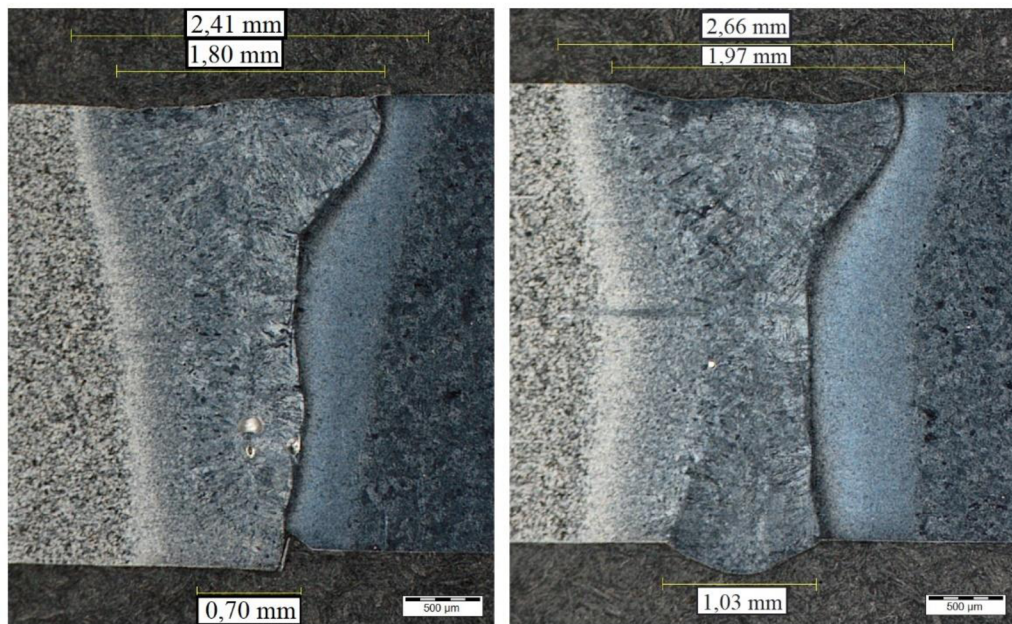
### 3.5.1 Makrostruktura

Snímky makrostruktury byly pořízeny stereomikroskopem Olympus SZ61 (viz obr. 34) na Ústavu přístrojové techniky v Brně. U snímků se posuzovala velikost tepelně ovlivněných oblastí a svarů. Zkoumání makrostruktury také ukazuje na případné svarové vady jako pórovitost, přítomnost vměstků apod.



Obr. 34 Stereomikroskop Olympus SZ61.

## a) Svařování laserem (vzorky č. 1 a 2)



Vzorek č. 1

Vzorek č.2

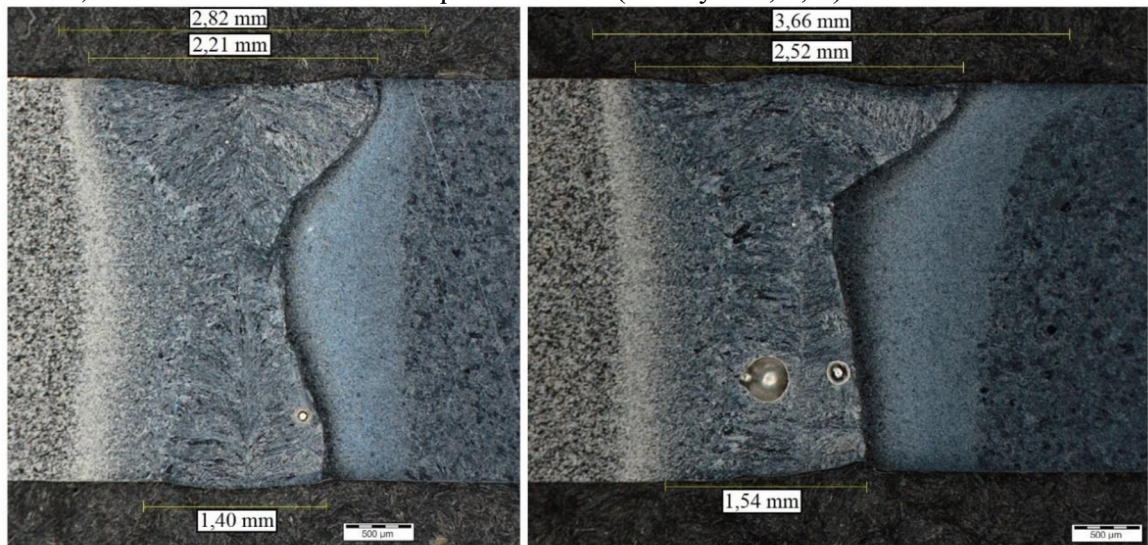
Obr. 35 Snímek makrostruktury svarů vytvořených laserem.

U všech snímků je patrný rozdíl struktury základních materiálů. Na levé straně se nachází S355 a vlevo pak X12C13. Na vzorku č. 1 je patrné, že nedošlo k provaření kořene, plechy nejsou v jedné rovině a ve svaru jsou viditelné póry. Na hranici mezi svarovým kovem a TOO je viditelná vada v napojení, která by se dala označit za studený spoj. Zvýšením výkonu na laseru při svařování vzorku č. 2 se zvýšilo množství vneseného tepla do svaru díky kterému již došlo k provaření materiálu. U tohoto vzorku je zase pozorovatelný propadlý svar i kořen svaru.

Zvětšení vneseného tepla se projevilo i zvětšením šířky svaru a TOO. Šířka svarového kovu je po celé tloušťce plechu velice proměnná, kdy horní částí má svarový kov šířku přibližně dvakrát větší oproti šířce u kořene svaru. Šířka TOO se u vzorku č. 1 průběžně zmenšuje, zatímco u druhého vzorku je po celé tloušťce poměrně konstantní. Na straně oceli X12Cr13 je podél svarového kovu viditelná tmavá plocha, která se v rozdílné šířce objevuje po celé tloušťce plechu. Pravděpodobně se díky difúzi prvků do svaru vytvoří jiná fáze, která jinak odráží světlo nebo lépe odolává leptání. Tato tmavá plocha je pak pozorovatelná u všech vzorků včetně vzorků s přehřevem.

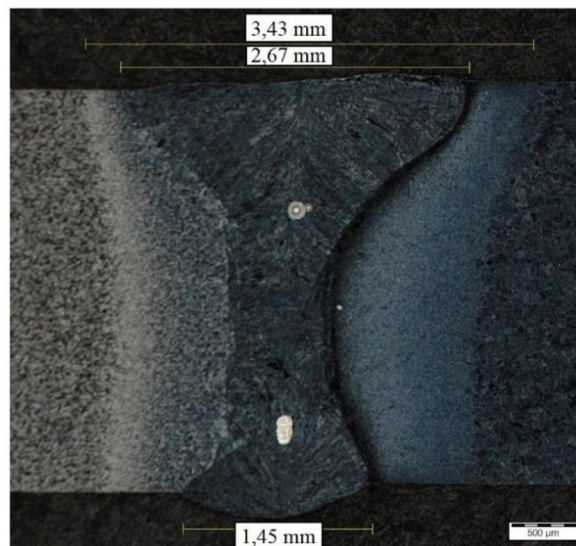


## b) Svařování laserem s TIG přehřevem (vzorky č. 3, 4, 5)



Vzorek č.3

Vzorek č. 4



Vzorek č.5

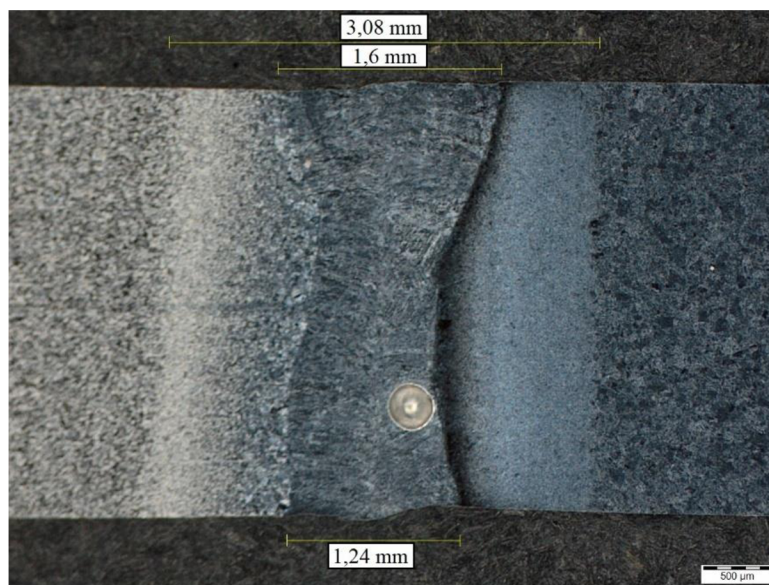
Obr. 36 Snímky makrostruktur svarů vytvořených laserem s TIG přehřevem.

Rozdíl mezi jednotlivými vzorky je pouze v použitém proudu na TIG zdroji, a tedy v množství vneseného tepla. To se projevuje postupným zvětšením šířek svarového kovu a tepelně ovlivněných oblastí. Už samotné použití TIG přehřevu ovlivňuje nejen velikost TOO ale i svarového kovu.

Vzorek č. 4 vykazuje na povrchu největší šířku TOO a celkově má asymetrický tvar TOO a svarového kovu. To by mohlo být způsobeno nevhodnou připraveností povrchu ve stykových plochách nebo byl laserový paprsek vychýlen mimo ideální trajektorii ve stykové ploše. U všech tří svarů se vyskytují svarové vady v podobě pórů a na vzorku č. 4 je viditelná bublina. Na vzorku č. 5 je pozorovatelný propadlý kořen. U všech vzorků je svarový kov v horní části

nejširší, postupně se sužující a následně v oblasti kořene se opět zvětšuje. Tepelně ovlivněná oblast je největší na povrchu a kromě vzorku č. 4 se nepatrně zmenšuje.

c) Svařování s indukčním předehřevem (vzorek č. 6)



Vzorek č. 6

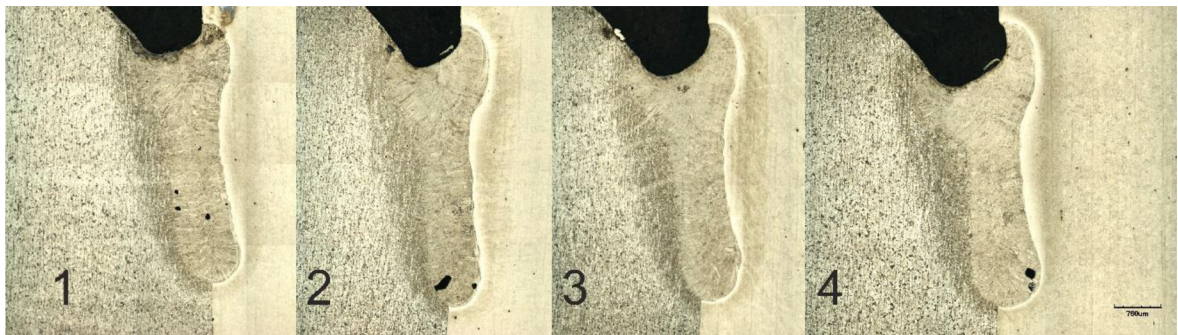
Obr. 37 Snímek makrostruktury svaru vytvořeného laserem s indukčním předehřevem.

Vzorek vznikl nejdříve předehřevem pomocí indukčního zdroje, kdy došlo k předehřátí celého vzorku a nejenom oblasti svaru jako u TIG předhřevu. Při svařování tedy nebyl svarový kov ochlazován částí vzorku, na kterou přímo nepůsobil TIG. Indukční zdroj tedy posloužil jako zdroj tepla pro simulaci ohřevu v peci. Na vzorku je viditelná vada v podobě bubliny.

Velikost tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu se nejvíce podobá vzorku č. 3, tedy aplikaci TIG předehřevu s nastaveným proudem 20 A. Oproti tomuto vzorku je ale šířka svarového kovu a TOO poměrně konstantní v celé tloušťce plechu.

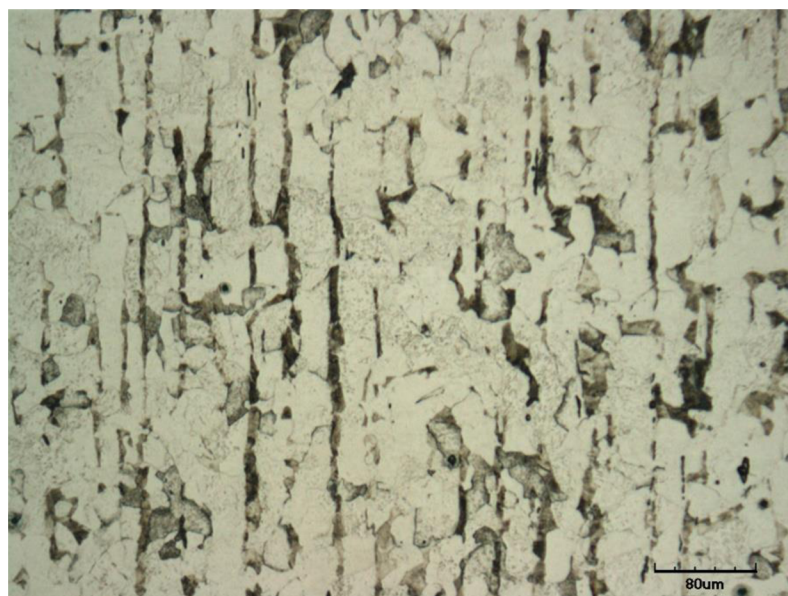
### 3.5.2 Mikrostruktura

Pro pořízení snímků mikrostruktury bylo využito konfokálního mikroskopu Olympus LEXT 3100 na Ústavu přístrojové techniky v Brně. Bohužel v průběhu vypracování této práce došlo k pracovní neschopnosti paní Ing. Mgr. Šebestové, Ph.D., pod jejímž vedením mělo dojít k tvorbě snímků. Pořízení snímků ze dříve popsanych vzorků tedy nebylo možné. Ke zhodnocení mikrostruktury svaru a základních materiálů se pro účely této práce využily jiné vzorky, jejichž snímky byly k dispozici. Jednalo se o S355J2 a X12Cr13 svařovaných laserem bez předehřevu a s TIG předehřevem se stejnými parametry jako u vzorků jejichž výroba zde byla popsána. Na obrázku 38 je možné vidět makrostrukturní snímky, na kterých jsou pozorovatelné podobné vady jako u vzorků v kapitole 3.5.1 tedy póry a bubliny.



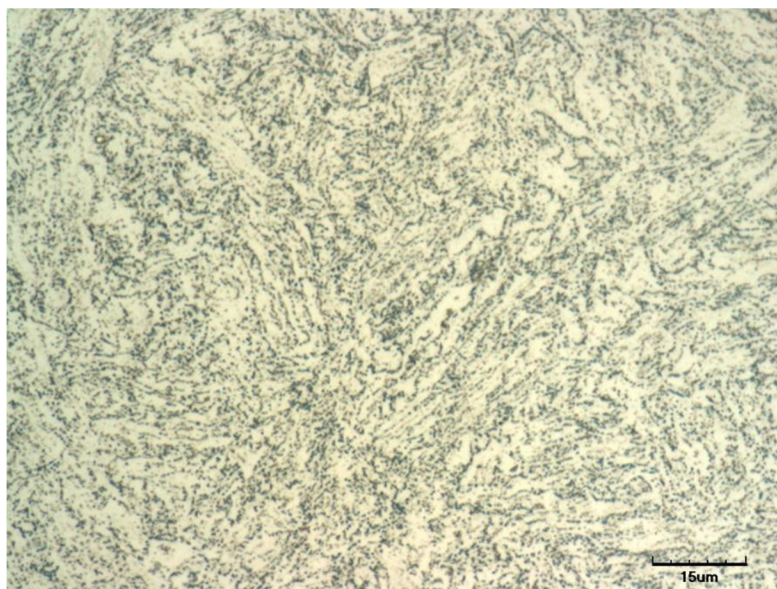
Obr. 38 Snímky svarů: 1) laser bez předehřevu 2) laser s předehřevem TIG 20 A  
3) laser s předehřevem TIG 40 A 4) laser s předehřevem TIG 60 A

Obrázek č. 39 znázorňuje mikrostrukturu základního materiálu S355, na kterém jsou patrná protáhlá zrna feritu a perlitu po válcování.



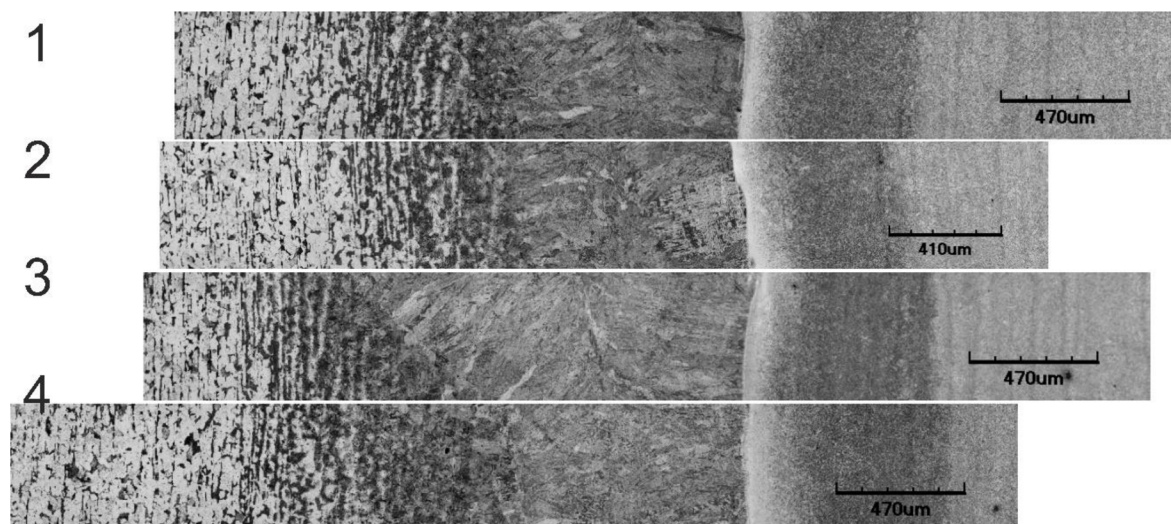
Obr. 39 Mikrostruktura základního materiálu S355.

Na obrázku 40 je patrná sorbitická struktura oceli X12Cr13 vzniklá popuštěním martenzitu.

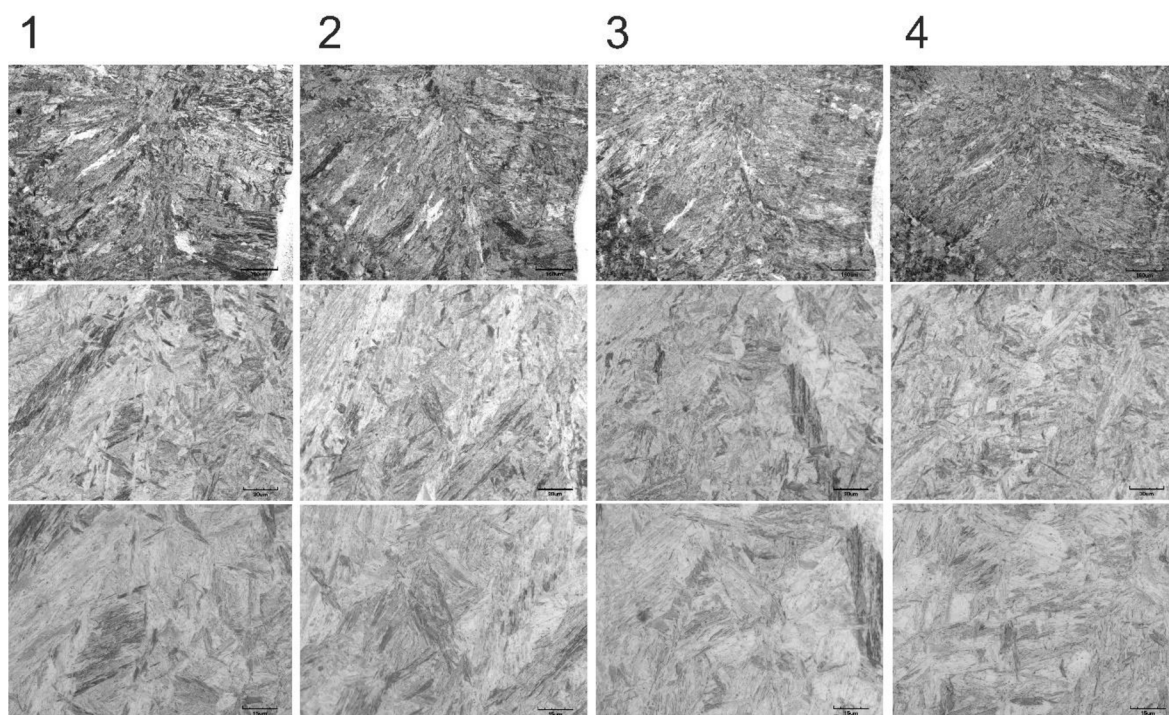


Obr. 40 Mikrostruktura základního materiálu X12Cr13

Na obrázku 41 jsou snímky svarů uspořádány tak, aby bylo možné porovnat velikosti tepelně ovlivněných oblastí. Tyto snímky ukazují na stejné chování jako u předchozích vzorků. Vlivem zvyšování vneseného tepla pomocí předehřevu dochází ke zvětšení TOO. Na hranici svarového kovu a X12Cr13 dochází opět k tvorbě odlišně zbarvené struktury (lépe odolává leptání nebo lépe odráží světlo).

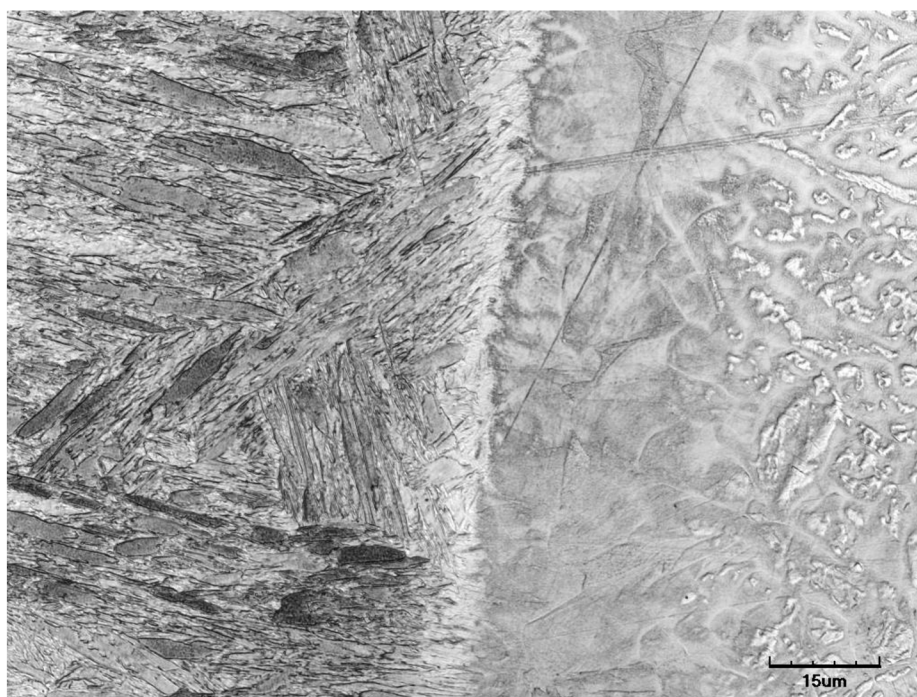


Obr. 41 Porovnání velikosti TOO.



Obr. 42 Svarový kov.

Z obrázku 42 je patrná martenzitická struktura ve svarovém kovu. Předpoklad ze Schaefflerova diagramu byl potvrzen. Strukturní složení svarového kovu se vlivem přehřevu výrazně nemění. Výsledné hodnocení se bude odvíjet od velikosti tepelně ovlivněných oblastí.

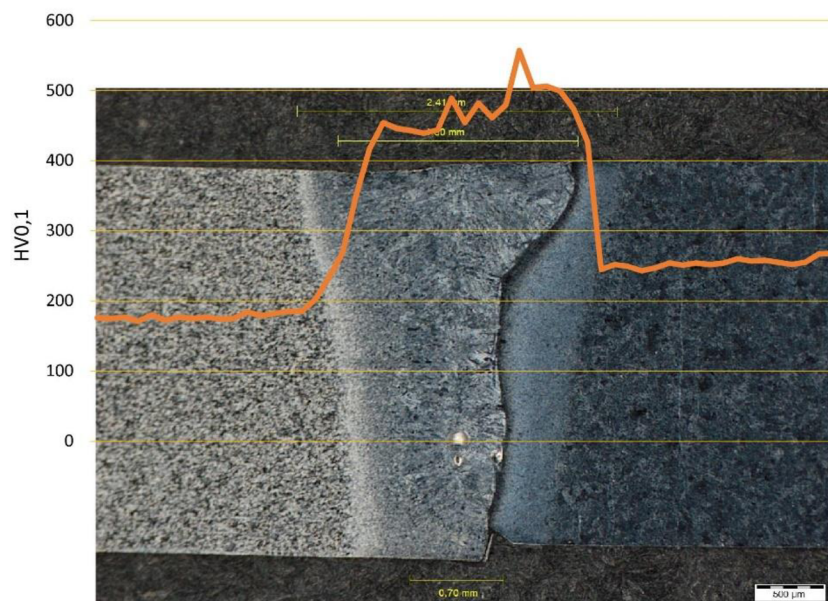


Obr. 43 Hranice mezi svarovým kovem a TOO – přehřev 40 A.

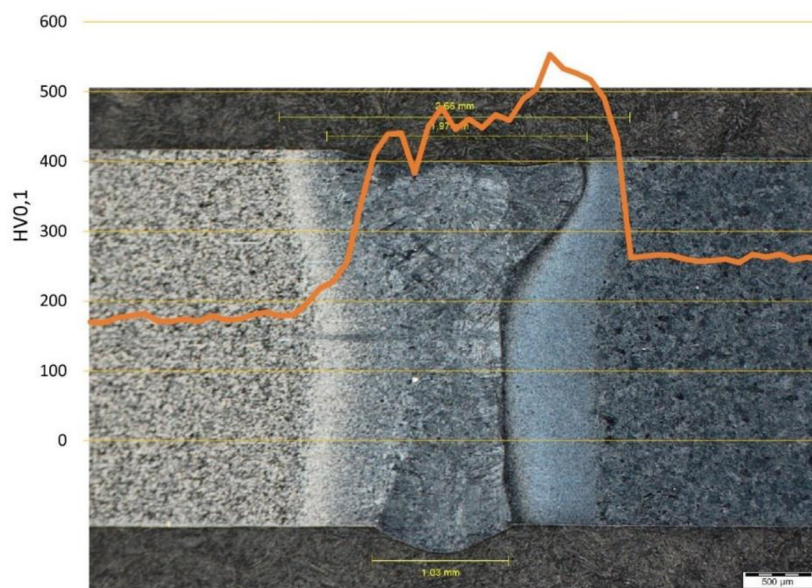
### 3.6 Zkouška tvrdosti

Průběh a princip zkoušky byl vysvětlen v kapitole 2.7.1. Měření se vykonalo na Ústavu strojírenské technologie zařízením, které automaticky provedlo vtisky a poté pomocí integrované kamery provedlo měření délek úhlopříček vtisků. Na základě těchto měření byl programem proveden výpočet tvrdosti. Zkouška byla provedena se zatěžující silou 1 N, tedy označovanou jako HV0,1. Měření tvrdosti bylo provedeno v oblasti svaru se vzdáleností 0,1 mm mezi jednotlivými vtisky a v hloubce 1 mm pod povrchem. Výsledná data z měření se následně použila pro vykreslení průběhu mikrotvrdosti v TOO, které se následně ve vhodném měřítku zaneslo do snímků makrostruktury.

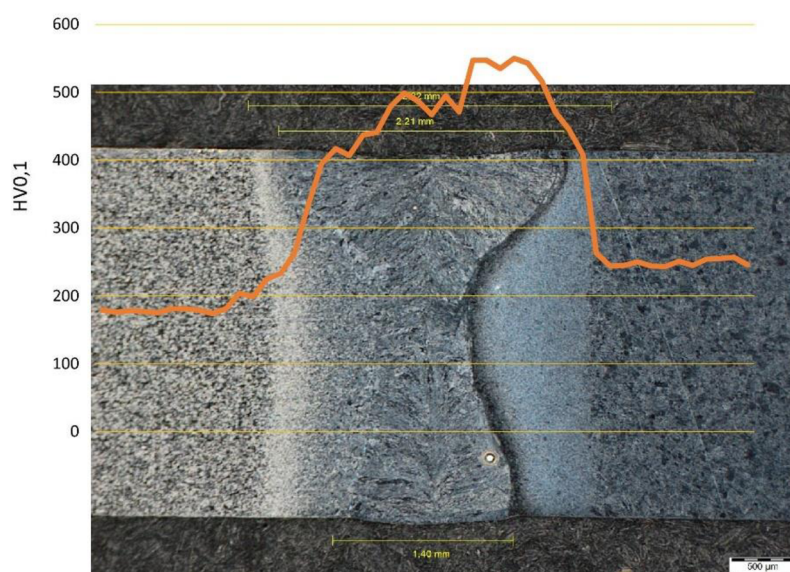
Tvrdot základního materiálu X12Cr13 byla zjištěna mezi 250 až 260 HV0,1 a tvrdost S355 se pohybovala mezi 170 a 180 HV0,1. U všech vzorků je celkový průběh křivek tvrdosti poměrně podobný, liší se hlavně v závislosti na šířce TOO. Na straně oceli S355 dochází na hranici TOO k postupnému nárůstu tvrdosti až na hodnoty 400 až 500 HV0,1, které má svarový kov. Tvrdot ve svarovém kovu lehce kolísá. Za svarovým kovem v určitém pásmu na straně oceli X12Cr13 dochází ke skokovému nárůstu tvrdosti až k hodnotám cca 560 HV0,1. Za tímto pásmem pak dochází výraznému poklesu až na hodnoty tvrdosti základního materiálu. Dle vykreslených křivek tvrdosti lze soudit, že velikost tepelně ovlivněné oblasti je shodná s vizuálním pozorováním.



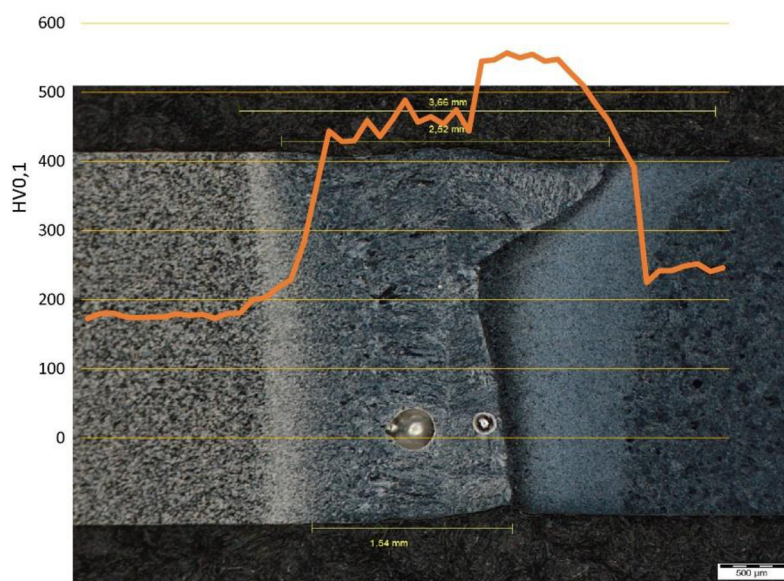
Obr. 44 Průběh tvrdosti u vzorku č. 1.



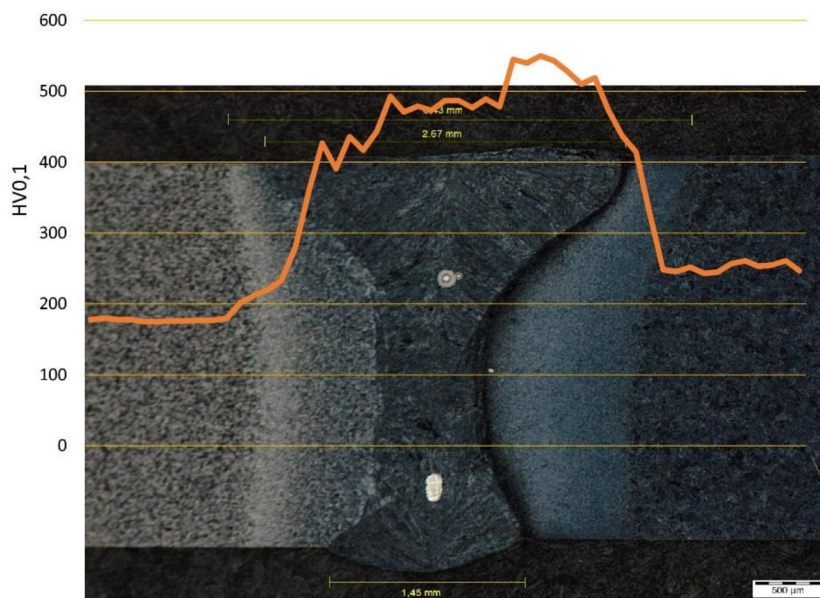
Obr. 45 Průběh tvrdosti u vzorku č. 2.



Obr. 46 Průběh tvrdosti u vzorku č. 3.

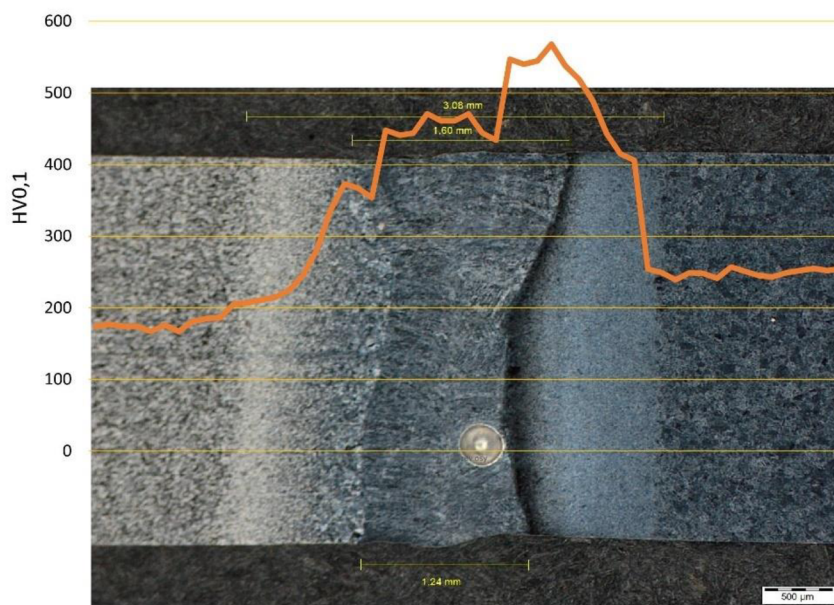


Obr. 47 Průběh tvrdosti u vzorku č. 4.



Obr. 48 Průběh tvrdosti u vzorku č. 5.





Obr. 49 Průběh tvrdosti u vzorku č. 6.

Dle ARA diagramu oceli X12Cr13 by při snížení rychlosti ochlazování měla klesat i tvrdost. Při měření tvrdosti ve svarech není pozorovatelné snížení tvrdosti, ale dochází pouze k rozšíření TOO. Jako nejvhodnější se jeví svar zhotovený pomocí laseru bez předehřevu, u kterého je nejmenší TOO.

## 4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

### 4.1 Zhodnocení z hlediska nákladů na svaření statoru

Pro zhodnocení z ekonomického hlediska byl proveden výpočet nákladů na jeden metr svaru. Společnost Siemens bohužel neposkytl detailní údaje o jejich jednotlivých nákladech při výrobě tohoto dílce. Vycházelo se proto z faktu, že svaření popisovaného dílu trvá jednu směnu. Tato informace tedy byla využita ve výpočtu. Většina cen použitých ve výpočtech není volně dostupná, ve skutečnosti se mohou lišit dle implementace, pro výpočet proto byly využity odhadované či přibližné hodnoty. Například cena laserového zařízení a manipulátoru byla odvozená od nákladů za které byly pořízeny pro Ústav přístrojové techniky AV v Brně. Ceny pro jiný subjekt se mohou výrazně lišit. Cena za svařování laserem se běžně udává okolo 2000 Kč/h. Tato hodnota pro tuto práci bude sloužit jako kontrolní, zda byl výpočet proveden alespoň orientačně správně.

Před provedením výpočtu byly provedeny propočty základních vstupních hodnot. Jako první se provedl výpočet časového fondu. Viz tabulka 4.1. Za normálních okolností by do jeho výpočtu měly vstupovat další aspekty jako časové ztráty na opravy, seřízení, údržbu nebo fond volna. Vzhledem k tomu, že výpočet slouží pouze pro orientační rozpočítání odpisů do hodinové sazby, tak byly tyto aspekty zanedbány.

Tab. 4.1 Výpočet pracovních hodin v roce.

počet pracovních dní	250	dny
pracovní doba	8	h
směnnost	2	
počet pracovních hodin	4000	h/rok

Jako další se provedly výpočty nákladů na spotřebu elektrické energie, asistenčních plynů a mzdy operátora. Opět vzhledem k nedostatečným podkladům se jedná o odhad nákladů. Výsledné náklady za spotřebu ochranného plynu v Kč/h byly v dalších propočtech odhadem poníženy, protože vypočítaná hodnota odpovídá nepřetržité spotřebě během svařování. Do uvažované doby svařování ale spadají i například časy na přípravu, během kterých nedochází ke spotřebě plynu.

Tab. 4.2 Výpočet nákladů za el. energii, plyn a operátora.

Cena el. energie	2,5 Kč za kW/h	
Spotřeba el. energie laser	8 kW	20 Kč/h
Spotřeba el. energie TIG	1,7 kW	4,25 Kč/h
Spotřeba plynu	16,7 l/min	
Ochranný plyn (Ar)	2000 Kč/11,3 m <sup>3</sup>	177,35 Kč/h
HM operátora	200 Kč/hod	
Náklady na operátora (HM + 34 %)	268 Kč/hod	

Následně byly tyto dílčí výpočty použity pro výpočet odhadovaných nákladů za metr svaru. Výpočet byl proveden pouze pro metodu Laser-TIG využitou v experimentu a metodu TIG, která se využívá ve společnosti Siemens.

Tab. 4.3 Výpočet nákladů za metr svaru

Varianta		Laser-TIG	TIG
Svařovací zdroj		IPG YLS 2000 + Fronius MagicWave 1700	Fronius MagicWave 1700
Manipulátor		ABB IRB 2400	
Vstupní investice	[Kč]	10095000	95000
Odpisy (živostnost 5let)	[Kč/h]	504,75	4,75
Náklady na operátora	[Kč/h]	268	268
Elektrická energie	[Kč/h]	24,5	4,25
Ochranný plyn	[Kč/h]	50	25
Údržba a náhradní díly	[Kč/rok]	150000	2000
Údržba a náhradní díly	[Kč/h]	37,5	0,5
Součet nákladů	[Kč/h]	884,75	302,5
Režijní náklady + 100 %	[Kč/h]	884,75	
Celkové náklady	[Kč/h]	1769,5	302,5
Rychlost svařování vč. příprav	[m/h]	6,5	1,2
Náklady na svařování	[Kč/m]	272,2	252,1

Vypočítané náklady za Laser-TIG 1769,5 Kč/h jsou podobné jako běžně udávaná hodnota 2000 Kč/h. Pokud by se do této sumy započítala i zisková marže, pak by se udávané hodnotě přibližovala ještě více. Využitá rychlost svařování pro metodu TIG byla odvozena z ústních informací. Pokud se na satoru provedly čtyři svary, kde každý byl dlouhý přibližně 2,35 m a jejich zhotovení trvalo jednu směnu (8 h), pak rychlost svařování byla přibližně 1,2 m/h. Když byl díl svařován metodou Laser-TIG, tak včetně přípravy byla doba svařování cca 1,5 h. Vzhledem ke skutečnosti, že většina tohoto času byla strávena prvním programováním trajektorie svaru, pak lze očekávat, že každý další stejný či podobný díl by se svařoval rychleji. Pro výpočet byla tedy využita lehce navýšená hodnota průměrné rychlosti svařování 6,5 m/h.

Vlivem svařování metodou TIG nebo přesněji vlivem vneseného tepla do svaru dochází ke zkroucení součástí. Kvůli tomu jsou voleny větší přídavky, které je potřeba následně odebrat soustružením. Při využití metody Laser-TIG není potřeba součást po svaření vyžíhat a zároveň nedochází k jejímu zkroucení. Díky tomu stačí menší přídavky, dochází k úspoře materiálu a ke snížení času potřebného k jejich odebrání. Z toho plynoucí úspory jsou pomocí nákladů u jednotlivých metod vyjádřeny v tabulce 4.4.

Tab. 4.4 Ostatní náklady

Varianta	Laser-TIG	TIG
Žihání po svaření	bez žihání	3000 Kč/ks
Náklady na soustružení	300 Kč/h	
Doba soustružení	1 h	3 h
Náklady za soustružení	300 Kč	900 Kč
Náklady na materiál (větší přídavky)		450 Kč (cca 16 kg S355)

Z vypočtených údajů je tedy možné dospět k celkovým nákladům spojených se svařováním statorů turbín.

Tab. 4.5 Výpočet celkových nákladů

Varianta	Laser-TIG	TIG
Náklady na svařování	272,2 Kč/m	252,1 Kč/m
Délka svaru	9,42 m	
Náklady za svaření dílu	2564,12 Kč	2374,8 Kč
Ostatní náklady	300 Kč	4350 Kč
Celkové náklady	2864,12 Kč	6724,8 Kč

Z výsledků v tabulce 4.5 je vidět, že využitím metody Laser-TIG lze dosáhnout úspory skoro 4000 Kč na jednom statoru. Výsledek lze také vyjádřit, že využitím metody Laser-TIG dojde ke snížení nákladů spojených se svařováním o 58 %. Bohužel jsou ale výsledky založené pouze na přibližných a odhadovaných hodnotách, které se mohou lišit v reálném prostředí.

Největším problémem metody Laser-TIG se jeví velké počáteční investice. Z toho důvodu je laserová technologie využívána hlavně ve velkosériové a hromadné výrobě. Kdy pomocí laseru lze svařovat při vysokých svařovacích rychlostech a tím dosáhnout vysoké produktivity. Během svařování popsaném v předchozích výpočtech ale doba, za kterou se díl svařil, byla velice ovlivněna časem stráveným přípravou. Není znám objem produkce těchto součástí ani využitelnost této technologie pro jiné součásti produkované společností Siemens. Minimálně lze ale říci, že pokud by jakákoliv společnost neměla pro tuto technologii patřičné využití, aby se její pořízení vyplatilo, pak minimálně u dílu podobné konstrukce nebo materiálového složení může využití této technologie ve formě kooperace přinést úspory.

#### 4.2 Zhodnocení z hlediska vyrovnání nákladů

V následujících grafech se tato práce pokusí nahlédnout na investiční náklady na vybavení pro obě metody jako na náklady fixní, porovnat tyto metody pomocí nákladových funkcí a vyjádřit jakým způsobem je ovlivněna volba metody na procentuálním vyjádření samotného procesu svařování z celkového času operace svařování laserem.

Jak již bylo dříve řečeno, laser se využívá hlavně ve velkosériové a hromadné výrobě. Pro tyto výpočty se tedy bude předpokládat, že uvažovaná společnost má pro laser plné využití. Při porovnání se využijí svařovací rychlosti popsané v předchozích kapitolách.

Tab. 4.6 Svařovací rychlosti

Použitá svařovací rychlost u vzorků	20 mm/s	72 m/h	100 %
Průměrná svařovací rychlost při svař. statoru Las TIG	6,5 m/h		9,03 %
Průměrná svařovací rychlost při svař. statoru TIG	1,2 m/h		1,67 %

Z tabulky 4.6 je možné vidět, že potenciál laseru je úplně jiný v porovnání s dosaženou hodnotou. Naměřená hodnota 6,5 m/h znamená, že pouze 9,03 % z celkového času bylo stráveno vlastním svařovacím procesem.

V další tabulce 4.7 bylo provedeno rozdělení nákladů a z nich následně vytvořeny nákladové funkce. V tomto výpočtu byly oproti přechozímu zanedbány režijní náklady. Tedy náklady na administrativu, výrobní prostor atd. a to z důvodu složitějšího určení těchto nákladů pro obecný subjekt. Porovnání tedy proběhlo pouze na základě přímých nákladů a vstupních investic v podobě svařovacích zařízení.

Tab. 4.7 Určení nákladových funkcí

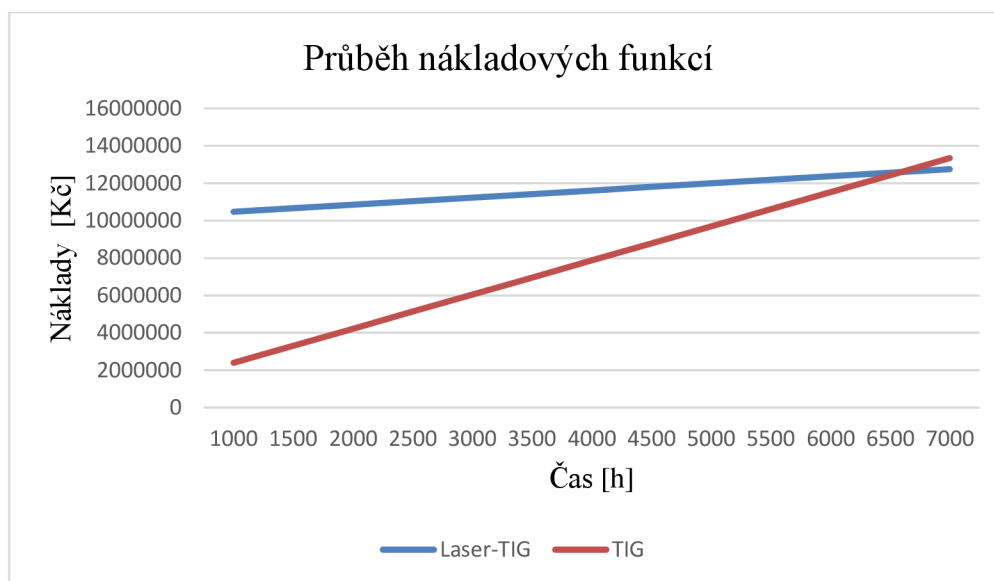
Varianta		Laser-TIG	TIG
Svařovací zdroj		IPG YLS 2000 + Fronius MagicWave 1700	Fronius MagicWave 1700
Manipulátor		ABB IRB 2400	
Fixní náklady	[Kč]	10 095 000	95 000
Náklady na operátora	[Kč/h]	268	268
Elektrická energie	[Kč/h]	24,5	4,25
Ochranný plyn	[Kč/h]	50	25
Údržba a náhradní díly	[Kč/h]	37,5	0,5
Variabilní náklady	[Kč/h]	380	304,25
Nákladová funkce	[Kč]	$N_1 = 10\,095\,000 + 380 \cdot Q$	$N_2 = 95\,000 + 304,25 \cdot Q$

Úvaha je tedy taková. Pokud má společnost zakázky v takovém množství, aby využila Laser-TIG na 100 %, ale neměla tuto technologii zakoupenou, musela by zaměstnat více svářečů TIG včetně zakoupení potřebných zařízení. V tomto případě se nákladová funkce TIG vynásobí takovým číslem, aby byl výkon stejný jako u Laser-TIG. Je nutné uvážit, že v některých případech není možné, aby na jedné součásti pracovalo více svářečů. Tento výpočet tedy může pozbýt svého významu. V případě, že je nutné například dodržet termíny dodání, získá výhodu technologie, která je mnohem rychlejší a vyžaduje méně pracovníků.

Tab. 4.8 Upravení nákladové funkce

Průměrná svařovací rychlost při svař. statoru metodou Laser-TIG	6,5 m/h
Průměrná svařovací rychlost při svař. statoru metodou TIG	1,2 m/h
Počet svářečů TIG pro dosažení stejného výkonu jako Laser-TIG	5,42 ≈ 6
Upravená nákladová funkce TIG	$N_2 = 570\,000 + 1825,5 \cdot Q$ [Kč]

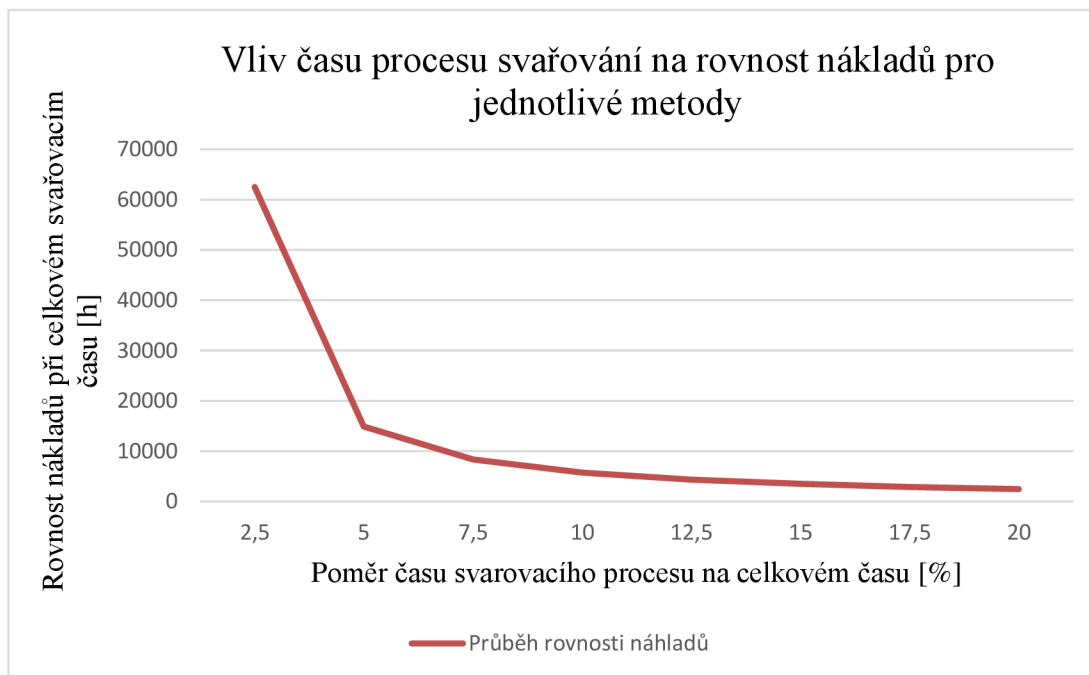
Nákladové funkce byly následně spočteny s proměnou  $Q$  [h] znamenající počet hodin strávených svařováním a jejich průběh byl znázorněn v grafu na obr. 50.



Obr. 50 Průběh nákladových funkcí.

Z grafu je tedy viditelné, že v případě použitých vstupních parametrů výpočtu se od cca 6500 hodin strávených svařováním (což odpovídá cca 42 250 m svaru při průměrné rychlosti svařování 6,5 m/h) se vyplatí využít technologie svařování Laser-TIG, která má od tohoto množství nižší náklady.

Pokud by se ovšem zlepšením přípravy výroby dosáhlo lepšího využití, pak k vyrovnání nákladů dojde dříve. Viz obrázek 51.



Obr. 51 Graf rovnosti nákladů.

### 4.3 Zhodnocení výsledků

Využití technologie Laser-TIG v porovnání s TIG má dle provedených výpočtů svůj potenciál. Výpočty ukazují, že je možné využitím této technologie dosáhnout zajímavých peněžních úspor a v případě správné logistiky i časové úspory, která může vést ke zkrácení termínu dodání a tím získání konkurenční výhody. Úspor by se pravděpodobně dosáhlo i pokud by se využilo svařování touto technologií formou kooperace. Výpočty provedené v kapitole 4.2 ukázaly, že v případě investic do této technologie jsou hlavní tyto faktory:

- vysoká počáteční investice, která může velice ovlivnit výběr technologie,
- zda má společnost pro tuto technologii dostatečné využití a je schopná zvládnout přípravu výroby, aby byl výrobní tok co nejrychlejší a nejplynulejší.

Ve výpočtu v kapitole 4.2 bylo s těmito metodami počítáno jako s rovnocennými, ale pokud by se vzaly v potaz ostatní náklady z tabulky 4.4, pak by jistě výsledky hovořily více ve prospěch metody Laser-TIG.

## ZÁVĚR

Práce byla zaměřena na využití hybridní technologie Laser-TIG pro materiály používané v energetice. Za tímto účelem byly vytvořeny vzorky z materiálů, které využívá společnost Siemens pro zhotovení statorů parních turbín. Výsledné testované spoje byly heterogenní z korozivzdorné martenzitické oceli a uhlíkové oceli s vyšší pevností. Bylo zhotoveno šest vzorků, které se svařovaly laserem s použitím nebo bez použití přehřevu, u kterého se testovali různé parametry. Z těchto svařenců se následně vyhotovily vzorky, které se podrobily metalografickému hodnocení a zkoušce tvrdosti v oblasti svaru.

Z hodnocení makrostruktury bylo zjištěno, že velikost tepelně ovlivněné oblasti je přímo úměrná vnesenému teplu při procesu svařování. Což potvrdila i zkouška tvrdosti podle Vickerse provedená v oblasti svaru. Tvrdost se ve všech vzorcích pohybovala v podobných hodnotách, kdy nebyl patrný žádný podstatný rozdíl v dosažených tvrdostech. Pouze se v závislosti na velikosti tepelně ovlivněné zóny zvětšovala i oblast zvýšených hodnot tvrdosti. To odporuje ARA diagramu oceli X12Cr13, podle kterého by při menších ochlazovacích rychlostech mělo dojít ke snížení tvrdosti. Tento rozpor by mohl být předmětem dalšího výzkumu. Mikrostrukturní snímky ukázaly, že výsledné struktury v oblasti svarového kovu jsou velice podobné. Jako nejvhodnější se jeví využití metody, pro které je výsledná velikost tepelně ovlivněné oblasti nejmenší. Tedy metoda svařování laserem bez přehřevu.

Při využití svařovací metody Laser-TIG se stator parních turbín ve společnosti Siemens dále tepelně nezpracovávaly a díky zmenšení vneseného tepla nedošlo ke zkroucení. To umožnilo zvolit menší přídavky na následné obrábění. Tyto skutečnosti se promítly v ekonomickém zhodnocení této práce, kde se spočítala odhadovaná cena za jeden metr svaru. Ta se poté aplikovala na uvažovaný díl. Zjistilo se, že využitím této technologie může dojít ke znatelnému snížení nákladů, a to hlavně díky snížení náročnosti na operace následující po svařování. Metoda svařování Laser-TIG se podrobila porovnání s metodou TIG i z hlediska vyrovnání nákladů v případě, že by měla pro laser neustálé využití. Z tohoto porovnání vzešlo, že po cca 6500 hodinách provozu je výhodnější investovat do technologie Laser-TIG.



**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] Svařovací metody. In: *Automig* [online]. Migatronik CZ a.s., b.r. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/>
- [2] *Přehled svařování* [online]. Praha, b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT\\_01\\_Prehled\\_svarovani\\_T08.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf). Studijní text. ČVUT Praha.
- [3] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- [4] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování* [online]. ÚST, b.r. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie\\_svarovani\\_5te\\_etv\\_etv-k\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie_svarovani_5te_etv_etv-k_kubicek.pdf). Studijní opora. VUT Brno.
- [5] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Hybridní metody svařování* [online]. Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, b.r. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova\\_hybridni\\_svarovani.pdf](https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_hybridni_svarovani.pdf). Přednáška.
- [6] MRŇNA, Libor. *Technologie využívající laser* [online]. b.r. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_svarovani\\_laserem\\_2013\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf). Přednáška. VUT Brno.
- [7] *Materiály a jejich chování při svařování: Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*. Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, Český svářečský ústav s.r.o., 2016.
- [8] NOVÁK, Miroslav. SERIÁL NA TÉMA LASERY. In: *Lao - průmyslové systémy* [online]. 2011 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [9] BENKO, B, P FODEREK, M KOSEČEK a R BIELAK. *Laserové technológie*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
- [10] *Princip laseru* [online]. In: . SlidePlayer, b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/7294372/>
- [11] Laser. In: *Wikiskripta* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Laser>
- [12] FATOBA, Olawale, Patricia POPOOLA, Sisa PITYANA a Olanrewaju ADESINA. Computational Dynamics of Anti-Corrosion Performance of Laser Alloyed Metallic Materials: Fiber Laser. In: *IntechOpen* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. DOI: 10.5772/62334.
- [13] Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů. In: *Leonardo technology* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>

- [14] Solid - state lasers. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/solid\\_state\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/solid_state_lasers.html)
- [15] Princip vláknového Fiber laseru. In: *Leonardo technology* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
- [16] DUŠEK, Jiří. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. In: *Megablog* [online]. 2013 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
- [17] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Průmyslové lasery pro svařování: studijní text k předmětu SLO/UMTI* [online]. In: . b.r. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: [https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova\\_prumyslove\\_lasery\\_pro\\_svarovani.pdf](https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_prumyslove_lasery_pro_svarovani.pdf)
- [18] Diodové lasery. In: *Lascam* [online]. b.r. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/produkty/laserove-periferie-a-komponenty/prumyslove-lasery/diodove-lasery/>
- [19] Princip CO2 laseru. In: *Leonardo technology* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>
- [20] CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Plynové lasery pro průmyslové využití* [online]. In: . SLO UP a FZÚ AV ČR Olomouc, b.r., s. 20 [cit. 2019-05-11].
- [21] KOŘÁN, Pavel. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu: Seriál na téma lasery. In: *Lasery a optika* [online]. b.r. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [22] Laserové svařování a navařování. In: *Lasery a optika* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-svarovani-a-navarovani-86>
- [23] NĚMEČEK, Stanislav. Zpracování materiálů laserem. *MM Spektrum* [online]. 2011, (4) [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zpracovani-materialu-laserem-1-dil-svarovani.html>
- [24] Laserové svařování. In: *Lasertherm* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-svarovani/>
- [25] KOŘÁN, Pavel. SVAŘOVÁNÍ LASEREM – poslední trendy. In: *IStrojirenství* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?nazev=svarovani-laserem-posledni-trendy&id=20>
- [26] Welding head YW30. *Precitec* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processing-heads/yw30/#tab2>
- [27] *Svařování* [online]. Praha, b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT\\_01\\_Prehled\\_svarovani\\_T08.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf). Studijní text. ČVUT Praha.
- [28] O svařovací metodě TIG. In: *Alfin-Trading* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.alfin-trading.cz/o-svarovani-tig>

- [29] GRILL, Jeff. Guide to TIG Welding. In: *WeldGuru* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://weldguru.com/OLDSITE/tig-welding.html>
- [30] What is TIG Welding : Principle, Working, Equipment's, Applications, Advantages and Disadvantages. In: *Mech4study* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11].
- [31] Základní metody svařování. In: *Svářečky - Elektrody* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/zakladni-metody-svarovani/t-87>
- [32] Druhy W - elektrod. In: *Svářečky - Elektrody* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/druhy-a-pouziti-wolframovych-elektrod/t-30/t-107>
- [33] How to Choose A Shielding Gas for TIG Welding. In: *Baker's gas and welding supplies* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.bakersgas.com/weldmyworld/2017/02/28/choose-shielding-gas-tig-welding/>
- [34] GAS TYPES USED IN WELDING: MIG VS. TIG. In: *Crom weld* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.cromweld.com/welding-gas-types/>
- [35] OCHODEK, Vladilav. *Vliv teplotního režimu na vlastnosti svarových spojů* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: [http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv\\_tepl\\_rezimu\\_a1.pdf](http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv_tepl_rezimu_a1.pdf). Přednáška. VŠB TU Ostrava.
- [36] TIG impulse welding. In: *Stamos welding group* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.stamos-welding.com/tig-impulse-welding>
- [37] *Konstrukční oceli* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2284510/release/woothee>. Přednáška. Vedoucí práce Ing. Lubomír Stránský CSc.
- [38] BARTÁK, Jiří. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. In: *Česká svářečská společnost ANB* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11].
- [39] *Weldability of Metals I* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://nptel.ac.in/courses/112107090/module8/lecture5/lecture5.pdf>. Studijní text.
- [40] AMBROŽ, Oldřich. *Svařitelnost materiálů* [online]. Brno, b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/fsm\\_svaritelnost\\_materialu\\_ambroz.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/fsm_svaritelnost_materialu_ambroz.pdf). Učební text. VUT Brno.
- [41] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [42] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 978-80-7204-248-7.
- [43] *Application of the Schaeffler diagram* [online]. In: . Helmond, Nizozemsko: Dacapo Stainless BV, b.r. [cit. 2019-05-11].
- [44] Svařitelnost některých technických materiálů a volba přídavných materiálů. In: *Spektrum: Obchodně technický zpravodaj* [online]. ESAB Vamberk s.r.o., b.r., s. 16 [cit. 2019-04-23].

- [45] *Hodnocení kvality svarového spoje* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/assets/subject/files/105/def-kontrola-sv.pdf>. Studijní text. ČVUT Praha.
- [46] *Metrologie ve strojírenství* [online]. Uherské Hradiště, 2012 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.uh.cz/szesgsm/files/sblizovani/pdf/kontrola-svaru.pdf>
- [47] ŠTORKÁN, Zdeněk. Problematika hodnocení svarových spojů. *Konstrukce* [online]. 2014 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
- [48] Měření tvrdosti. In: *ELUC* [online]. 2014 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1569>
- [49] HLAVATÝ, Ivo. *Zkoušky tvrdosti* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/Vyuka/2008tvrdsti.pdf>. Přednáška. VŠB TU Ostrava.
- [50] HLAVATÝ, Ivo. *Metalografické zkoušky* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/Vyuka/2008mikrostruktury.pdf>. Přednáška. VŠB TU Ostrava.
- [51] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>. Studijní text.
- [52] Metalografická laboratoř. In: *TÜV NORD* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.tuv-nord.com/cz/cs/nase-sluzby/laboratore-a-zkusebny/metalograficka-laborator/>
- [53] IRB 2400. *ABB: ABB Group* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-2400>
- [54] MRŇA, Libor. Výkonový laser IPG YLS2000. *Ústav přístrojové techniky AV ČR* [online]. Brno, b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.isibrno.cz/cs/vykonovy-laser-ipg-yls2000>
- [55] Ytterbium Laser System. In: *IPG Photonics* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/high-power-cw-fiber-lasers/1-micron/yls-sm-1-10-kw>
- [56] Svářecí zdroj FRONIUS: MagicWave 1700. In: *Weldtech v.o.s.* [online]. 2017 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.weldtech.cz/produkty/produkt/svareci-zdroj-fronius-magicwave-1700>
- [57] *Fronius* [online]. Wels, 2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en>
- [58] DHI-44F WORKSHOP DÍLENSKÝ MOBILNÍ OHŘEV. In: *Dawell* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.dawell.cz/produkt/dhi-44f/>
- [59] Indukční ohřev DHI-44F Dawell. In: *AEK svařovací technika* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.aek-svareci-technika.cz/zbozi-1636-zdroje-a-vybaveni-pro-tepelne-zpracovani---ohrevy-Indukcni-ohrev-DHI-44F-Dawell>
- [60] SINOXX 4006 Steel. In: *Sij group* [online]. b.r. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://steelselector.sij.si/steels/PK330.html>

- [61] X12Cr13. In: *Bolzano* [online]. Bohdan Bolzano, s.r.o., 2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x12cr13-martenziticke>
- [62] X12Cr13 dle EN/DIN. In: *XL Metal* [online]. 2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.xlmetal.cz/materialy/nerezova-ocel/din/x12cr13-dle-en-din.html>
- [63] PILOUS, Václav. Volba konstrukčních ocelí pro stavební svařované konstrukce podle významu označení. *Konstrukce* [online]. b.r. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/volba-konstrukcnich-oceli-pro-stavebni-svarovane-konstrukce-podle-vyznamu-oznaceni/>
- [64] Přehled vlastností oceli S355J2. In: *Bolzano* [online]. b.r. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: [https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP\\_%20Tycova\\_ocel/EN\\_10025/MOP-%20Prehled%20vlastnosti\\_S355J2.pdf](https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10025/MOP-%20Prehled%20vlastnosti_S355J2.pdf)
- [65] KUBOŇ, Zděňěk, Drahomír SCHWARZ a Martin SONDEL. Vlastnosti jednotlivých pásem tepelně ovlivněné oblasti 9% Cr ocelí včetně jejich dlouhodobé žárupevnosti. *Konstrukce* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/vlastnosti-jednotlivych-pasem-tepelne-ovlivnene-oblasti-9-cr-oceli-vcetne-jejich-dlouhodobe-zarupevnosti/>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
<b>A</b>	austenit
<b>AC</b>	střídavý proud
<b>ARA diagram</b>	diagram anizotropního rozpadu austenitu
<b>IRA diagram</b>	diagram izotermického rozpadu austenitu
<b>AV</b>	Akademie věd
<b>CTS</b>	zkouška praskavosti
<b>CW</b>	continuous welding
<b>ČR</b>	Česká republika
<b>ČSN</b>	Česká státní norma
<b>DC</b>	stejnoseměrný proud
<b>EN</b>	Evropská norma
<b>F</b>	ferit
<b>FEPA</b>	Federation of European Producers of Abrasives
<b>HB</b>	tvrdost podle Brinella
<b>HM</b>	hrubá mzda
<b>HV</b>	tvrdost podle Vickerse
<b>ISO</b>	International organization for standardization
<b>LD</b>	laserové diody
<b>LASER</b>	light amplification by stimulated emission of radiation
<b>LasTIG</b>	svařování laserem s předehřevem TIG
<b>LED</b>	light emitting diode
<b>M</b>	martenzit
<b>MAG</b>	metal active gas
<b>MIG</b>	metal inert gas
<b>P</b>	perlit
<b>PW</b>	pulse welding
<b>QT</b>	kalení a pouštění
<b>RF</b>	radiofrekvenční buzení
<b>RTG</b>	rentgen

<b>SK</b>	svarový kov
<b>TIG</b>	tungsten inert gas
<b>TOO</b>	tepelně ovlivněná oblast
<b>VUT</b>	Vysoké učení technické
<b>WIG</b>	wolfram inert gas
<b>YAG</b>	yttrium aluminium granát
<b>ZM</b>	základní materiál

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
<b>A</b>	[%]	tažnost
<b>A<sub>c1</sub>, A<sub>c3</sub></b>	[°C]	překryštalizační teploty
<b>Ar</b>	[-]	argon
<b>As</b>	[-]	arsen
<b>B</b>	[-]	bór
<b>C</b>	[-]	uhlík
<b>C<sub>c</sub></b>	[°C]	ekvivalent uhlíku
<b>C<sub>p</sub></b>	[°C]	ekvivalent celkový
<b>C<sub>s</sub></b>	[°C]	ekvivalent tloušťky materiálu
<b>CE</b>	[-]	uhlíkový ekvivalent
<b>CET</b>	[-]	uhlíkový ekvivalent podle CET
<b>Cr<sub>E</sub></b>	[hm.%]	chromový ekvivalent
<b>CO<sub>2</sub></b>	[-]	oxid uhličitý
<b>Cr</b>	[-]	chrom
<b>Cu</b>	[-]	měď
<b>F</b>	[N]	síla
<b>Ge</b>	[-]	germanium
<b>He</b>	[-]	helium
<b>HD</b>	[ml.100g <sup>-1</sup> ]	objem difúzního vodíku
<b>KV</b>	[J]	nárazová práce
<b>M<sub>f</sub></b>	[°C]	teplota martenzit finish

<b>Mn</b>	[-]	mangan
<b>M<sub>s</sub></b>	[°C]	teplota martenzit start
<b>Mo</b>	[-]	molybden
<b>N</b>	[-]	dusík
<b>Nb</b>	[-]	nyob
<b>Nd</b>	[-]	neodym
<b>Ni</b>	[-]	nikl
<b>Ni<sub>E</sub></b>	[hm. %]	niklový ekvivalent
<b>N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub></b>	[Kč]	náklady
<b>P</b>	[W], [-]	výkon, fosfor
<b>Q</b>	[m]	množství
<b>Q<sub>s</sub></b>	[kJ.mm <sup>-1</sup> ]	vnesené teplo
<b>Q<sub>v</sub></b>	[l.min <sup>-1</sup> ]	průtok plynu
<b>Re</b>	[MPa]	mez kluzu
<b>R<sub>p0,2</sub></b>	[MPa]	smluvní mez kluzu
<b>R<sub>m</sub></b>	[MPa]	mez pevnosti
<b>Si</b>	[-]	křemík
<b>T</b>	[°C]	teplota
<b>T<sub>L</sub></b>	[°C]	teplota likvidu
<b>T<sub>max</sub></b>	[°C]	teplota maximální
<b>T<sub>p</sub></b>	[°C]	teplota předehřevu
<b>T<sub>pCET</sub></b>	[°C]	vliv chemického složení na teplotu předehřevu
<b>T<sub>pd</sub></b>	[°C]	vliv tloušťky materiálu na teplotu předehřevu
<b>T<sub>pHD</sub></b>	[°C]	vliv obsahu difuzního vodíku na teplotu předehřevu
<b>T<sub>pQ</sub></b>	[°C]	vliv tepelného příkonu na teplotu předehřevu
<b>T<sub>s</sub></b>	[°C]	teplota solidu
<b>Ti</b>	[-]	titan
<b>U</b>	[V]	napětí
<b>V</b>	[-]	vanad
<b>Yb</b>	[-]	ytterbium



<b>Zn</b>	[-]	zinek
<b>d</b>	[ $\mu\text{m}$ ]	střední velikost úhlopříčky
<b>d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub></b>	[ $\mu\text{m}$ ]	velikost úhlopříček
<b>t<sub>8/5</sub>, t<sub>12/8</sub>, t<sub>max/10</sub></b>	[s]	doba chladnutí
<b>v</b>	[mm.s <sup>-1</sup> ]	rychlost svařování
<b>k</b>	[-]	tepelná účinnost přenosu tepla

<b><math>\lambda</math></b>	[ $\mu\text{m}$ ]	vlnová délka
<b><math>\eta</math></b>	[%]	účinnost

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Stator turbíny. ....	9
Obr. 2 Princip laseru [10]. ....	11
Obr. 3 Složení laseru [8]. ....	12
Obr. 4 Rozdělení laserů podle vlnových délek [9]. ....	13
Obr. 5 Schéma pevnolátkového laseru [13]. ....	14
Obr. 6 Princip diodového laseru [16]. ....	15
Obr. 7 Schéma diskového laseru [17]. ....	15
Obr. 8 Princip vláknového laseru [15]. ....	16
Obr. 9 Princip SLAB laseru [16]. ....	17
Obr. 10 Absorpce laserového záření [12]. ....	19
Obr. 11 Pracovní režimy laseru [6]. ....	21
Obr. 12 Svařovací hlava. ....	22
Obr. 13 TIG svařování [29]. ....	23
Obr. 14 Tepelně ovlivněná oblast svaru [37]. ....	26
Obr. 15 Teplotní cykly [64]. ....	27
Obr. 16 ARA diagram oceli X12Cr13 [59]. ....	30
Obr. 17 Schaefflerův diagram [65]. ....	31
Obr. 18 Vady ve svarech dle tvaru a polohy [38]. ....	32
Obr. 19 Viditelné vady [45]. ....	33
Obr. 20 Vnitřní vady svaru [45]. ....	33
Obr. 21 Princip metody dle Vickerse [47]. ....	34
Obr. 22 Makroskopický snímek. ....	36
Obr. 23 IRB 2400 se svařovací hlavou. ....	37
Obr. 24 Zdroj laserového záření YLS – 2000. ....	37
Obr. 25 Fronius MagicWave 1700 [55]. ....	38
Obr. 26 Indukční ohřev Dawell. ....	38
Obr. 27 Schéma výroby vzorků. ....	38
Obr. 28 Připravené vzorky materiálů. ....	39
Obr. 29 ARA diagram oceli X12Cr13 [59]. ....	41
Obr. 30 Umístění ocelí S355 a X12Cr13 v Schaefflerově diagramu [65]. ....	42
Obr. 31 Svařování vzorků. ....	43
Obr. 32 Indukční ohřev a měření teploty. ....	44
Obr. 33 Broušení na stroji Stuers. ....	46
Obr. 34 Stereomikroskop Olympus SZ61. ....	46
Obr. 35 Snímek makrostruktury svarů vytvořených laserem. ....	47
Obr. 36 Snímky makrostruktur svarů vytvořených laserem s TIG předehřevem. ....	48
Obr. 37 Snímek makrostruktury svaru vytvořeného laserem s indukčním předehřevem. ....	49
Obr. 38 Snímky svarů: 1) laser bez předehřevu 2) laser s předehřevem TIG 20 A 3) laser s předehřevem TIG 40 A 4) laser s předehřevem TIG 60 A. ....	50
Obr. 39 Mikrostruktura základního materiálu S355. ....	50
Obr. 40 Mikrostruktura základního materiálu X12Cr13. ....	51
Obr. 41 Porovnání velikosti TOO. ....	51
Obr. 42 Svarový kov. ....	52
Obr. 43 Hranice mezi svarovým kovem a TOO – předehřev 40 A. ....	52
Obr. 44 Průběh tvrdosti u vzorku č.1. ....	53

Obr. 45 Průběh tvrdosti u vzorku č. 2.....	54
Obr. 46 Průběh tvrdosti u vzorku č. 3.....	54
Obr. 47 Průběh tvrdosti u vzorku č. 4.....	55
Obr. 48 Průběh tvrdosti u vzorku č. 5.....	55
Obr. 49 Průběh tvrdosti u vzorku č.6.....	56
Obr. 50 Průběh nákladových funkcí.....	61
Obr. 51 Graf rovnosti nákladů.....	61

## SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Přehled laserů a jejich vlastností. [21].....	18
Tab. 3.1 Chemické složení X12Cr13 [60].....	39
Tab. 3.2 Zjištěné chemické složení X12Cr13.....	40
Tab. 3.3 Mechanické vlastnosti X12Cr13 [59].....	40
Tab. 3.4 Chemické složení S355 [42].....	40
Tab. 3.5 Zjištěné chemické složení S355.....	41
Tab. 3.6 Svařovací parametry.....	43
Tab. 4.1 Výpočet pracovních hodin v roce.....	57
Tab. 4.2 Výpočet nákladů za el. energie, plyn a operátora.....	57
Tab. 4.3 Výpočet nákladů za metr svaru.....	58
Tab. 4.4 Ostatní náklady.....	58
Tab. 4.5 Výpočet celkových nákladů.....	59
Tab. 4.6 Svařovací rychlosti.....	59
Tab. 4.7 Určení nákladových funkcí.....	60
Tab. 4.8 Upravení nákladové funkce.....	60

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1      Výsledky mikrotvrdomosti  
Příloha 2      Materiálový list oceli X12Cr13


# PŘÍLOHA 1

## Výsledky mikrotvrdosti

S355J2+X12Cr13						
vzdálenost [mm]	tvrdost HV0,1					
	vz.1	vz.2	vz.3	vz.4	vz.5	vz.6
0	0	0	0	0	0	0
0,1	169	166	180	174	176	171
0,2	166	172	171	175	166	168
0,3	170	177	182	175	177	177
0,4	176	170	176	180	174	174
0,5	175	169	175	177	187	177
0,6	177	176	174	179	174	174
0,7	171	179	175	173	173	174
0,8	180	182	171	180	177	167
0,9	172	171	178	181	178	176
1	177	171	179	175	180	167
1,1	175	174	176	174	178	181
1,2	177	171	178	175	178	185
1,3	174	179	177	175	175	186
1,4	175	173	175	180	175	205
1,5	184	174	181	177	176	207
1,6	179	180	181	179	176	211
1,7	182	184	179	173	177	215
1,8	185	179	174	180	177	224
1,9	185	180	181	181	180	245
2	202	196	204	200	202	280
2,1	233	218	199	203	212	336
2,2	268	228	225	218	220	373
2,3	350	256	233	229	233	367
2,4	417	338	263	281	279	354
2,5	454	411	333	363	359	448
2,6	446	439	395	444	427	441
2,7	443	441	417	429	391	444
2,8	439	383	407	430	436	471
2,9	444	450	437	459	417	461
3	489	477	441	436	444	461
3,1	454	446	479	461	493	471
3,2	482	461	499	489	471	444
3,3	461	448	487	457	479	434
3,4	479	467	467	465	473	547
3,5	557	459	495	454	487	540

S355J2+X12Cr13						
vzdálenost [mm]	tvrđost HV0,1					
	vz.1	vz.2	vz.3	vz.4	vz.5	vz.6
3,6	504	489	471	475	487	545
3,7	506	504	547	444	477	568
3,8	499	553	547	545	489	538
3,9	473	533	535	547	478	519
4	427	526	550	557	545	489
4,1	245	517	543	550	540	443
4,2	252	491	517	555	550	415
4,3	249	430	471	545	543	406
4,4	243	262	445	548	528	254
4,5	247	264	409	528	510	249
4,6	254	266	263	510	519	239
4,7	251	265	244	483	473	249
4,8	254	260	245	459	437	248
4,9	252	257	250	424	415	241
5	254	258	244	392	329	257
5,1	260	260	243	225	248	251
5,2	257	255	251	242	246	245
5,3	258	267	245	242	252	243
5,4	255	263	254	249	243	249
5,5	252	267	255	252	245	252
5,6	255	259	257	241	257	255
5,7	267	263	246	246	261	252
5,8	268	259	251	249	253	255
5,9	267	258	251	245	255	252
6	262	261	255	258	261	253
6,1	260	265	253	258	247	246
6,2				255		
6,3				253		
6,4				240		
6,5				240		
6,6				244		
6,7				250		
6,8				251		
6,9				256		
7				249		
7,1				249		

## PŘÍLOHA 2

Quality	X12Cr13					Martensitic Stainless Steel						
Number	1.4006											
TECHNICAL CARD GRUPPO LUCEFIN REVISION 2015 ALL RIGHTS RESERVED												
												
Chemical composition												
C%	Si%	Mn%	P%	S% <sup>a)</sup>	Cr%	Ni%						
0,08-0,15	max 1,00	max 1,50	max 0,040	max 0,015	11,5-13,5	max 0,75	EN 10088-1: 2014					
± 0.01	+ 0.05	± 0.04	+ 0.005	+ 0.003	± 0.15	± 0.03						
Product deviations are allowed												
<sup>a)</sup> for improving machinability, it is allowed a sulphur content of 0,015 % - 0,030; for polishability, it is suggested a controlled sulphur content of max 0,015 %												
Temperature °C												
Melting range	Hot-forming	Subcritical annealing	Soft annealing +A	Full annealing	MMA welding – AWS electrodes							
1530-1480	1190-900	790-730 air	825-745 air	870-840 cooling 15 °C/h to 590, then air	pre-heating 200 annealing after w. 750-700							
Isothermal annealing +I	Quenching +Q	Tempering +T	Stress-relieving +SR	joint with steel								
885-830 controlled cooling 30 °C/h to 705, then air	1000-950 oil / polymer (HRC 36 ~)	780-650 fast cooling in air	200 air	carbon	CrMo alloyed	stainless						
				E60 xx	E8018-B 2	E309 – E308						
				cosmetic welding	E410							
Transformation temperature during heating Ac <sub>1</sub> ~ 810, Ac <sub>3</sub> ~ 885 and during cooling Ms ~ 340, Mf ~ 190												
Chemical treatment • Pickling (20 - 50% HNO <sub>3</sub> ) hot or cold												
Mechanical properties												
Heat-treated material EN 10088-3: 2014 in conditions 1C, 1E, 1D, 1X, 1G, 2D												
size Testing at room temperature												
mm	R	Rp 0.2	A%	Kv +20 °C	HB <sup>a)</sup>	<sup>a)</sup> for information only						
from to	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup> min	min	J min	max							
	730 max				220	+A annealed material						
160	650-850	450	15	25		+QT650 quenched and tempered						
Bright bars of heat-treated material EN 10088-3: 2014 in conditions 2H, 2B, 2G, 2P												
size Testing at room temperature												
mm	R	HB <sup>a)</sup>	R	Rp 0.2	A%	Kv +20 °C						
from to	N/mm <sup>2</sup> max	max	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup> min	min	J min						
10 <sup>a)</sup>	880	280	700-1000	550	9							
10 16	880	280	700-1000	500	9							
16 40	800	250	650-930	450	10	25						
40 63	760	230	650-880	450	10	25						
63 160	730	220	650-850	450	15	25						
	+A annealed material		+QT650 quenched and tempered material									
<sup>a)</sup> for information only												
<sup>b)</sup> in the range of 1 mm ≤ d < 5 mm, values are valid only for rounds – the mechanical properties of non round bars of < 5 mm of thickness have to be agreed at the time of request and order												
Forged EN 10250-4: 2001												
size Testing at room temperature												
mm	R	Rp 0.2	A%	Kv +20 °C	HB							
from to	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup> min	min	J min	max							
	730 max				220	+A annealed						
160	650-850	450	15	25		+QT650 quenched and tempered						
Table of tempering values at room temperature on rounds of Ø 10 mm after quenching at 980 °C in oil												
R	N/mm <sup>2</sup>	1490	1450	1420	1410	1430	1450	1420	1150	860	740	690
Rp 0.2	N/mm <sup>2</sup>	1210	1170	1150	1150	1160	1180	1140	870	650	550	500
A	%	10.8	10.8	10.9	12.0	12.5	13.0	16.0	16.5	18.0	20.0	21.5
Kv	J	35	40	36	29	28	27	28	30	41	49	100
Tempering °C		200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Transition-curve determined with Kv. Material quenched at 970 °C in oil												
Average J		6	16	26	50	80	120	140	150	170	tempering at 790 °C	690
Average J		5	12	18	26	50	84	110	114	140	tempering at 665 °C	820
Average J		4	6	8	14	26	36	76	78	120	tempering at 595 °C	950
Tests at °C		-160	-120	-80	-40	0	+40	+80	+100	+200	tensile strenght	N/mm <sup>2</sup>

X12Cr13 n° 1.4006 martensitic stainless steel

Lucefin Group

Effect of cold-working (hot-rolled +A+C). Approximate values

R	N/mm <sup>2</sup>	580	650	700	750	790	800	850	920	1050
Rp 0.2	N/mm <sup>2</sup>	380	500	580	600	690	720	780	810	900
A	%	20	10	8	8	8	8	8	8	7
Reduction %		0	10	20	30	40	50	60	70	80

Minimum values at high temperatures on quenched and tempered material EN 10088-3: 2014

Rp 0.2	N/mm <sup>2</sup>	420	410	400	385	365	355	305		+QT 650
Test at	°C	100	150	200	250	300	350	400		

Thermal expansion	10 <sup>-6</sup> · K <sup>-1</sup>		▶	10.5	11.0	11.5	12.0			
Modulus of elasticity	longitudinal GPa			215	212	205	200	190		
Poisson number	v			0.235	0.210					
Electrical resistivity	Ω · mm <sup>2</sup> /m			0.60						
Electrical conductivity	Siemens·m/mm <sup>2</sup>			1.67						
Specific heat	J/(Kg·K)			460						
Density	Kg/dm <sup>3</sup>			7.70						
Thermal conductivity	W/(m·K)			30						
Relative magnetic permeability	μr			900 <sup>1)</sup>						
°C				20	100	200	300	400		

The symbol ▶ indicates temperature between 20 °C and 100 °C, 20 °C and 200 °C .....

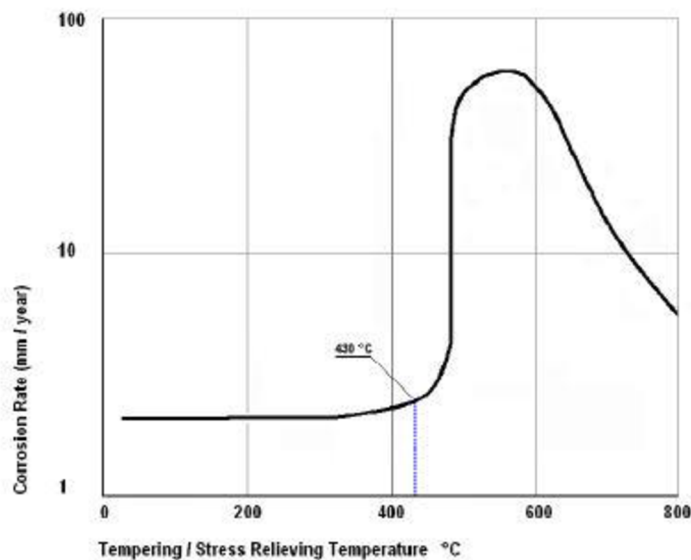
<sup>1)</sup> max 900 for material in its natural state; max 750 for full annealed material

Corrosion resistance	Atmospheric	Chemical	x petroleum, gasoline, alcohol, ammonia, mercury, food
Fresh water	industrial marine	medium oxidizing reducing	
x		x	

Magnetic	yes
Machinability	good on annealed and quenched and tempered
Hardening	by quenching
Service temperature in air	continuous service up to 705 °C; intermittent service up to 815 °C

Europe	USA	USA	China	Russia	Japan	India	Republic of Korea
EN	UNS	ASTM	GB	GOST	JIS	IS	KS
X12Cr13	S41000	410	1Cr12	12Ch13	SUS 410	X12Cr12	STS 410

Schematic diagram - Loss of resistance to corrosion - AISI 410 steel



Cigada & Re