

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojírenství  
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Svařování vysokopevné oceli laserem a elektronovým paprskem

Autor: **Michal BRÁZDA**  
Vedoucí práce: **Ing. Jan KAŠPAR**

Akademický rok 2016/2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal BRÁZDA**

Osobní číslo: **S16B0281P**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**

Název tématu: **Svařování vysokopevné oceli laserem a elektronovým paprskem**

Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Osnova bakalářské práce:

1. Rešerše - popis technologie svařování laserem a elektronovým paprskem
2. Experimentální část:
  - a) Svařování vzorků laserem a elektronovým paprskem
  - b) Metalografie a mechanické zkoušky
3. Posouzení vlivu metody svařování na průvar a mechanické vlastnosti svarových spojů
4. Zhodnocení výsledků, využitelnost v praxi
5. Závěr



Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

W. W. Duley, *Laser Welding* John Wiley & Sons, INC., New York, 1999

SCHULTZ, H. *Electron beam welding* Abington, Cambridge, England : Abington Publishing, 2002

VON DOBENECK, Dietrich. *Electron Beam Welding - Examples of 30 Years of Job-Shop Experience*. [s.l.] : [s.n.], 2005

Dupák, J., Vlček, I., Zobač, M. *Electron gun for computer - controlled welding of small components* Vacuum, , 62, 2001, s. 159?164, ISSN 0042?207X.

S. Němeček. *Využití laseru v průmyslu* Tribun EU s.r.o., Plzeň, 2013

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Kašpar

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant bakalářské práce: Ing. Štěpán Jeníček

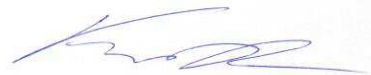
Výzkumné centrum tvářecích technologií

Datum zadání bakalářské práce: 19. září 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2017



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž  
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2016

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Brázda	<b>Jméno</b> Michal	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Kašpar	<b>Jméno</b> Jan	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KKM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtně- te
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Svařování vysokopevné oceli laserem a elektronovým paprskem		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	52	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	52	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Bakalářská práce obsahuje porovnání svařovacích metod laserem a elektronovým paprskem. Základní přiblížení daných technologií a jejich další využití. V praktické části je na vzorcích provedena metalografie a mechanické zkoušky. Dále posouzení vlivu metody svařování na průvar a mechanické vlastnosti svarových spojů.</p>
<p><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>svařování, laser, elektronový paprsek, metalografie, mechanické zkoušky, svar</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Brázda	Name Michal	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kašpar	Name Jan	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<del>DIPLOMA</del>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Welding of high-strength steel with laser and electron beam		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2017
----------------	---------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	52	<b>TEXT PART</b>	52	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The aim of this bachelor thesis is to compare welding methods with laser and with electron beam. It deals with basic description of these technologies and their further use. The empirical part deals with metallography and mechanical tests conducted on selected samples. Next, it is concerned with the assessment of the effect of welding method on the draft and mechanical properties of the welded joints.
<b>KEY WORDS</b>	Welding, laser, electron beam, metallography, mechanical tests, weld

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomáhali při zpracování mé bakalářské práce. Největší poděkování patří vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Janu Kašparovi, který mi byl nápomocen při vypracovávání práce, za ochotu, užitečné rady a jeho vynaložený čas. Dále bych rád poděkoval konzultantovi práce panu Ing. Štěpánovi Jeníčkovi a kolektivu z RTI za poskytnutí vzorků a veškerou pomoc při práci na bakalářské práci. V neposlední řadě bych rád poděkoval firmě MATEX PM, s.r.o. za laserové svaření vzorků.

## Obsah

Seznam symbolů a zkratk .....	10
1 Úvod.....	11
2 Svařování laserem .....	12
2.1 Historie .....	12
2.2 Princip laseru .....	12
2.3 Vlastnosti laserového záření.....	13
2.3.1 Koherentnost .....	13
2.3.2 Monochromaticnost.....	13
2.3.3 Usměrněnost.....	14
2.4 Rozdělení laserů .....	14
2.4.1 Pevnolátkové lasery.....	14
2.4.2 Kapalinové lasery .....	14
2.4.3 Plynové lasery .....	14
2.4.4 Polovodičové lasery .....	14
2.5 Laserové technologie.....	15
2.5.1 Obrábění .....	15
2.5.2 Tepelné zpracování .....	15
2.5.3 Řezání.....	16
2.5.4 Vrtání.....	16
2.5.5 Texturování a gravírování .....	17
2.5.6 Další technologie.....	17
2.6 Svařování laserem.....	17
2.6.1 Základní svařovací parametry .....	18
2.6.2 Metoda vedením tepla .....	18
2.6.3 Metoda hlubokého sváru .....	19
2.6.4 Svařování vysokoodrazivých materiálů .....	20
2.6.5 Svařování v ochranné atmosféře .....	20
2.6.6 Příprava svarového spoje při laserovém svařování .....	20
2.6.7 Průmyslové využití laserového svařování.....	21
2.7 Výhody a nevýhody laserového svařování.....	21
3 Svařování elektronovým paprskem.....	22
3.1 Historie .....	22
3.2 Princip elektronové trysky .....	23



3.3	Svařování elektronovým paprskem .....	25
3.3.1	Příprava svarového spoje při elektronovém svařování .....	25
3.3.2	Průmyslové využití elektronového svařování .....	25
3.4	Technologie elektronového paprsku.....	26
3.4.1	Obrábění .....	26
3.4.2	Tepelné zpracování .....	26
3.4.3	Texturování a gravírování .....	27
3.4.4	Aditivní postupy pro rychlou prototypovou výrobu .....	27
3.5	Výhody a nevýhody svařování elektronovým paprskem .....	27
4	Svařovaný materiál .....	28
4.1	Ocel 42SiCr .....	28
5	Tepelné zpracování svařovaného materiálu.....	28
5.1	Kalení.....	29
5.2	Q-P proces (quenching and partitioning).....	30
6	Úvod do experimentální části .....	31
7	Zkušební vzorky.....	32
7.1	Příprava vzorků.....	32
7.1.1	Kalení - 950RT.....	32
7.1.2	Q-P proces - QT230 PT380 Pt600 .....	33
7.1.3	Q-P - QT200 PT250 Pt600.....	34
7.2	Svařování vzorků laserem .....	35
7.3	Svařování vzorků elektronovým paprskem .....	35
8	Vnesené teplo při svařování.....	36
8.1	Vypočtené vnesené teplo .....	37
9	Metalografie .....	38
9.1	Příprava vzorků.....	38
9.2	Hodnocení tepelně ovlivněné oblasti.....	39
9.3	Hodnocení svarů .....	40
10	Mikrostruktury .....	41
11	Zkouška tahem .....	45
12	Mikrotvrdost .....	48
13	Diskuze výsledků .....	50
14	Závěr .....	51
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	52

## Seznam symbolů a zkratek

$E_2$  - energie pulsu

$\tau$  - doba pulsu

$P_2$  - výstupní výkon

$v_{sv}$  - svařovací rychlost

IR lasery - infračervené lasery

$U_A$  - urychlovací napětí

$M_s$  - martenzit start

$M_f$  - martenzit finish

Q-P - quenching and partitioning

ARA - anizotermický rozpad austenitu

TRIP - Transformation-Induced Plasticity

$l$  - délka svaru

$Q_s$  - specifické vnesené teplo

$Q_c$  - celkové vnesené teplo

$\eta$  - účinnost

TOO - tepelně ovlivněná oblast

$S_0$  - obsah zkušební tyče

$l_0$  - délka zkušební tyče

$R_m$  - mez pevnosti v tahu

$F_m$  - maximální síla pro přetržení

$S_0$  - obsah zkušební tyče

A - tažnost

$\Delta l$  - prodloužení

HV - tvrdost podle Vickerse

## 1 Úvod

Speciální svařovací technologie mají ve strojírenství široké využití. Dané svařovací metody mají využití od automobilového až po kosmický průmysl kde je kladen důraz na kvalitu svaru. Cílem této práce je porovnání svařovacích metod pomocí laseru a svazku elektronů. Obě dvě svařovací technologie se vyznačují velice podobnými parametry, od kvality svarů až po velmi malé tepelně ovlivněné oblasti. Mezi další výhody patří svařitelnost různých typů materiálů, které jinak nelze svařit běžnými technologiemi.

Teoretická část této práce se zabývá základním popisem svařovacích technologií a celkovému přiblížení dané problematiky.

V experimentální části práce se zabývám porovnání výsledků svařených vzorků a to metalografií a mechanickými zkouškami. Dále budu posuzovat vliv metody svařování na průvar a mechanické vlastnosti svarových spojů.

## 2 Svařování laserem

Výraz LASER je zkratkou slov z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, v překladu Zesílení světla stimulovaným zářením.

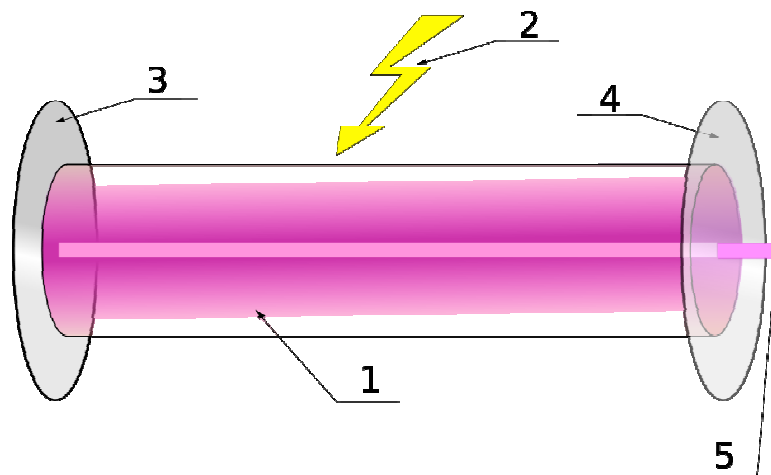
### 2.1 Historie

Fyzikální princip laseru byl popsán již v roce 1917 Albertem Einsteinem, první laser byl však zkonstruován až v roce 1960. Jednalo se rubínový laser, který představil Theodore H. Maiman. O tři roky později představil C. Kumar N. Patel první CO<sub>2</sub> laser.

### 2.2 Princip laseru

Laserové světlo vzniká stimulovanou emisí, která ke svému vzniku vyžaduje vnější podnět. Kdyby se zdroj skládal jen z jediného atomu, byl by vznik stimulované emise velmi nepravděpodobný. Ve zdroji je však světlo vyzařováno obrovským množstvím atomů a to stimulovanou emisí usnadňuje. Nejprve je nutné, aby se co nejvíc atomů dostalo do vybuzeného stavu a pak v něm setrvalo dostatečně dlouhou dobu. Látky, ve kterých k tomuto jevu může dojít, se nazývají aktivní prostředí. Energetickým hladinám, na kterých setrvávají atomy delší dobu, se říká metastabilní hladiny. U prvního zkonstruovaného laseru byl aktivním prostředím krystal rubínu a buzení zajišťovala výbojka, podobná jako se používá u fotografických blesků. V současné době se jako aktivní prostředí využívá nepřeberného množství látek všech skupenství. [1]

Základem laseru je aktivní prostředí, rezonátor a zdroj energie. Na obrázku č.1 lze rozdělit základní části konstrukce laseru: 1 - aktivní prostředí, 2 - zdroj energie, 3 - odrazné zrcadlo, 4 - polopropustné zrcadlo, 5 - laserový paprsek



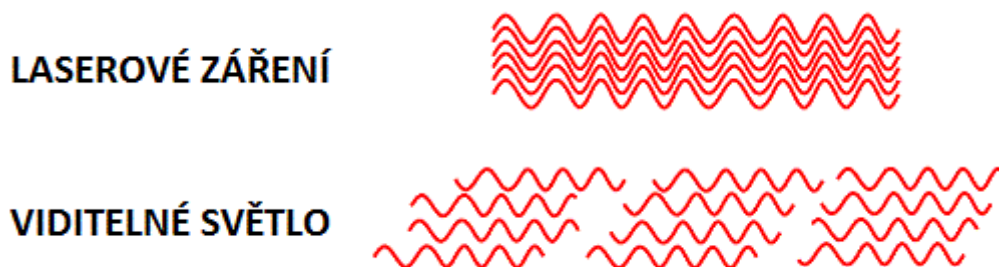
obr. 1 konstrukce laseru [2]

## 2.3 Vlastnosti laserového záření

Světelná emise má určité vlastnosti, mezi které patří koherence záření, monochromaticnost světla a usměrňenost toku fotonů.

### 2.3.1 Koherentnost

Koherentnost záření lze vysvětlit jako synchronní kmitání fotonů se stejnou fázovou polohou.



obr. 2 Koherentnost světla [3]

### 2.3.2 Monochromaticnost

Vyzářené fotony laserového paprsku mají stejnou vlnovou délku, která je určena energetickými přechody v látkách aktivního prostředí rezonátoru.

### 2.3.3 Usměrněnost

Usměrněnost je jednou z vlastností při svařování materiálů. Fotony jsou vyzařovány jedním směrem po stejné dráze s minimálním rozptylem. Určité druhy laserů mají svůj daný rozptyl.

## 2.4 Rozdělení laserů

Základní princip laserů je stejný, ale jednotlivé lasery se od sebe liší použitím různých aktivních prostředí.

### 2.4.1 Pevnolátkové lasery

Aktivním prostředím je pevná, opticky propustná látka, která může být amorfní nebo krystalická. Mezi pevnolátkové lasery patří např.: rubínový laser, Nd:YAG laser, Alexandritový laser, atd..

### 2.4.2 Kapalinové lasery

Aktivním prostředím je kapalina s organickým barvivem nebo speciálně připravené kapaliny, dopované ionty vzácných zemin. Kombinací různých barviv lze dosáhnout širokého spektra vlnových délek. Nevýhodou je krátká životnost aktivního prostředí, Mezi kapalinové lasery patří např.: Rhodamin 6G laser nebo Kumarin C30 laser.

### 2.4.3 Plynové lasery

Aktivním prostředím je plyn nebo směs plynů. Výhodou plynových laserů je vysoká účinnost. Další výhodou plynových laserů je nízká rozbíhavost laserového svazku. Plynové lasery se dále mohou dělit na atomární, iontové a molekulární. Mezi plynové lasery patří např.: He-Ne laser, Xenonový laser, Argonový laser, CO<sub>2</sub> laser, atd..

### 2.4.4 Polovodičové lasery

Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou být injektovány. Hlavní předností polovodičových laserů je jejich kompaktnost a velká účinnost (až 50 %). Nevýhodou je rozbíhavost generovaného záření a velká závislost parametrů generovaného záření na teplotě aktivního polovodičového materiálu. Typickými představiteli po-

lovodičových laserů jsou: polovodičový laser buzený svazkem elektronů, tzv. diodový laser a injekční polovodičové lasery. [4]

## 2.5 Laserové technologie

Základní předností laserových technologických operací je možnost opracování bez mechanického kontaktu s výrobkem, možnost opracování obtížně přístupných částí obrobku a technologické zpracování těžkoobrobitelných materiálů. V technologii se laser používá pro řezání, svařování, vrtání, značení a gravírování, povrchové úpravy, povlakování, renovaci součástí, tvorbu modelů a prototypů (Rapid Prototyping) a na laserovou podporu konvenčního obrábění. Každá z těchto oblastí má svá specifika, pokud jde o typ laseru a způsoby jeho užití. [5]

### 2.5.1 Obrábění

Pro soustružení obrobků s využitím laseru se používají tři metody:

- obrábění s předehřevem - vychází se z poznatku, že s rostoucí teplotou obráběného materiálu se mění jeho mechanické vlastnosti (snižuje se pevnost a tvrdost, a tím se zlepšuje obrobitelnost). Princip metody spočívá v nasměrování paprsku laseru na obráběnou plochu obrobku bezprostředně před břit rezného nástroje.
- odtavování materiálu z povrchu obrobku: je založeno na intenzivním přívodu tepla na povrch obrobku, který se otáčí proti paprsku laseru. Působením tepla se materiál odtavuje a pomocí asistentního plynu je roztavený materiál odstraňován z místa obrábění.
- odřezávání materiálu dvěma různoběžnými paprsky laseru: dva nezávislé paprsky laseru jsou vzájemně skloněny pod určitým úhlem. [6]

### 2.5.2 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování materiálů laserem je charakterizováno krátkou dobou ohřevu a malým objemem ohřátého materiálu. Metody tepelného zpracování jsou založeny na:

- ohřevu materiálu - žíhání, kalení a popouštění;
- tavení materiálu povrchu součástí - tepelné zpevnění s natavením a amorfizace povrchu;
- odpařování materiálu - rázové zpevnění, založené na mechanismu vypařování.

Kalení laserem je tepelné zpracování kovů, využívající k jejich rychlému ohřevu optické záření laserů. Výhodou oproti jiným způsobům ohřevu je opět možnost lokalizovaného tepelného zpracování i na místech jinými způsoby nepřístupných. Není nutné používat chladičové médium. Zpravidla se používá kontinuálních CO<sub>2</sub> laserů o výkonu několika tisíc wattů. Kalit lze např. vodící plochy, drážku v díře, vnější i vnitřní dosedací plochy apod. [6]

### 2.5.3 Řezání

Řezání může být:

- sublimační - materiál je odstraňován převážně odpařováním v důsledku vysoké intenzity záření laseru v místě řezu;
- tavné - materiál je v místě řezu působením paprsku laseru roztaven a asistentním plynem odfukován. Tímto způsobem jsou řezány nekovové materiály, jako jsou keramika, plasty, dřevo, textilní materiály, papír a sklo;
- pálením - paprsek laseru ohřeje materiál na zápalnou teplotu tak, že pak může s přiváděným reaktivním plynem (např. kyslíkem) shořet v exotermické reakci, vzniklá struska je z místa řezu odstraňována asistentním plynem. Tímto způsobem lze řezat např. titan, ocele s nízkým obsahem uhlíku a korozivzdorné ocele. [6]

### 2.5.4 Vrtání

Poprvé byl laser použit v roce 1965 k vrtání otvorů v diamantových průvlacích pro tažení drátů. Vrtání laserem je založeno na odstraňování materiálu odpařováním. Intenzita svazku musí být vyšší než u svařování, a proto se pro tento účel používá pulzních laserů s délkou pulzu menší než 1ms. Pro vrtání laserem platí: čím je díra delší, tím více se odchyluje tvar díry od geometrie (tj. rozdělení energie) paprsku. Z provedených výzkumů plyne, že kvalitnější díry se získávají při použití krátké doby pulzu. Samotné zkrácení doby pulzu však nestačí, neboť se na stěnách vyvrtané díry tvoří 0,1 mm tlustá vrstva odtaveného materiálu. Zlepšit odstraňování odtaveného materiálu lze použitím vhodné metody vrtání. Vrtání laserem je možné jednotlivými pulzy, opakovanými pulzy, vyřezáváním díry při pohybu stopy po kružnici, vyřezáváním díry při pohybu stopy po šroubovici či laserovou erozí.

Předností laserového vrtání je vytváření malých otvorů o průměru od 10 do 100 mm i v místech, kde je to pomocí jiných metod obtížné nebo nemožné. Díry mohou být kruhové i tvarové. Délka vrtané díry může být až 50 mm. Vrtat lze kovy, plasty, textilie, dřevo, sklo,



keramiku a jiné přírodní materiály. Tato technologie se používá pro vrtání kamenů do hodin-  
nek, filtrů, vstřikovacích trysek, lopatek proudových motorů apod. [6]

### 2.5.5 Texturování a gravírování

Změnou parametrů laseru lze spojitě přecházet od povrchového popisu v několikamik-  
ronové hloubce materiálu až po laserové gravírování do větší hloubky. Gravírování se použí-  
vá pro vytváření jednoduchých i velmi složitých reliéfů, především do kalených ocelí (např.  
do forem pro stříkání plastů, zápustek apod.), keramických materiálů, dřeva, gumy apod. Pod-  
statou metody je odpařování materiálu v místě, kde působí paprsek laseru. Pro gravírování do  
kovových a keramických materiálů se používají především Nd:YAG lasery, pro gravírování  
do dřeva a gumy jsou vhodné CO<sub>2</sub> lasery. [6]

### 2.5.6 Další technologie

Mezi další oblasti, ve kterých se uplatňuje laser v průmyslu, patří:

- technologie Rapid Prototyping;
- měření - délek, tvaru, polohy obrobku, počítání počtu vyrobených kusů, měření jakosti  
povrchu;
- renovace opotřebovaných součástí a nástrojů - navařování;
- vyvažování součástí - úběr materiálu součásti v předem daném místě;
- měření stavu napjatosti součástí - holografie;
- dálkové řízení strojů;
- měření stavu opotřebení činné části nástroje;
- analýza chemického složení materiálů;
- vytváření textů na nedabovaných filmech;
- vytváření dekorací na a ve skleněných předmětech;
- renovace starých uměleckých děl - čištění;
- výzkum termojaderné fúze vyvolané laserem;
- 3D-tisk

## 2.6 Svařování laserem

Hlavní předností laserového svařování oproti klasickým metodám je kvalita svaru,  
vyšší hloubka průvaru, podstatně menší tepelně ovlivněná oblast, vysoká produktivita, ze kte-

ré plyne snadnější možnost automatizace a v neposlední řadě kvalita povrchu svaru. Kromě svařování kovů se stále více začíná uplatňovat i při svařování plastů a speciálních materiálů. Konstrukce laserů umožňují svařovat pulsně nebo kontinuálně a změnou hustoty výkonu v dopadové ploše lze přecházet od svařování k tepelnému dělení, popřípadě dalším technologiím. Současný vývoj laserů pro technologické účely se projevuje hlavně v růstu jejich výkonů. Vysoká hustota výkonů v dopadové ploše snižuje spotřebu energie na jednotlivou délku svaru, v důsledku to se snižují napětí a deformace ve svařovaných součástech. Dále umožňuje rychlý ohřev a svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí (Cu, Ag) a materiálů s vysokou teplotou tavení (W, Ta, Re, Mo), které se jinými technologiemi svařují obtížně nebo vůbec. Svařování laserem má také výhodu v tom, že svazek fotonů nemá elektrický náboj a proto je nezávislý na elektrické vodivosti materiálu a není ovlivněn magnetickým polem svařované součásti. Což umožňuje svařovat i ve velmi úzkých mezerách a spárách, kde při použití elektronového paprsku dochází k jeho odklonu a vadám svarů. Hustoty výkonu v místě dopadu svazku jsou v řádu  $10^7$  až  $10^9$  W/cm<sup>2</sup>. [7; 8]

### 2.6.1 Základní svařovací parametry

Základní parametry pro svařování laserem se určují podle druhu provozu laseru a typu svaru:

- pulzní provoz, jsou to: energie pulsu  $E_2$  [J], tj. energie na výstupu z laseru a doba pulsu  $\tau$  [ms];
- kontinuální provoz, kdy je to: výstupní výkon  $P_2$  [kW] a svařovací rychlost  $v_{sv}$  [mm · s<sup>-1</sup>].

Mimo uvedené parametry se určují podle specifických podmínek další hodnoty, jako např. průměr clony, teplota chladicí kapaliny, průměr stopy dopadu svazku fotonů apod. [8]

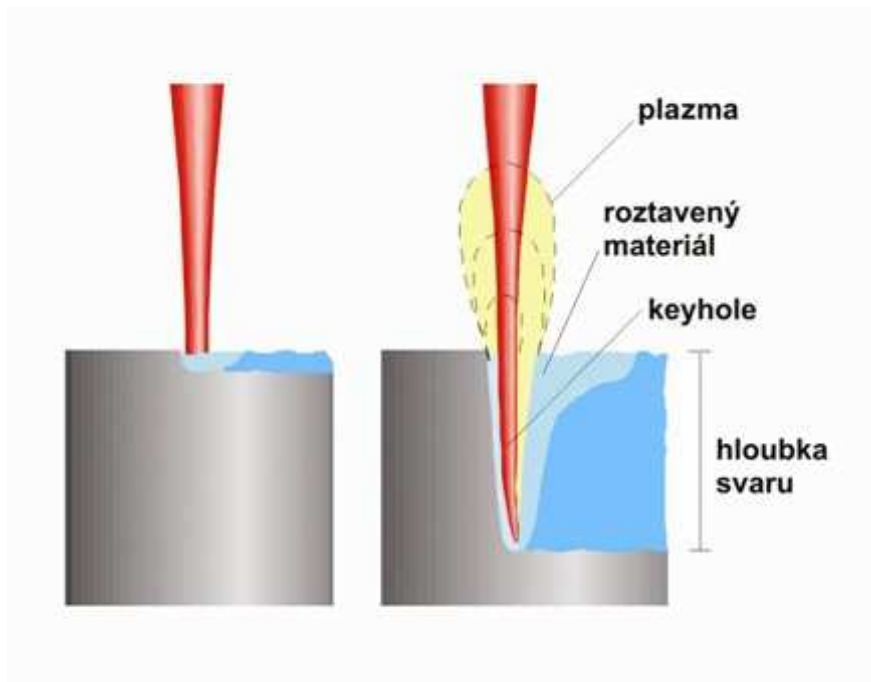
### 2.6.2 Metoda vedením tepla

Při svařování vedením tepla (levá část obr. 3) se materiál taví absorpcí a vedením tepla dopadajícím laserovým svazkem. Tento postup umožňuje svařování jen do relativně malých hloubek průvaru, který se u tohoto typu svařování pohybuje do 2 mm. Nicméně rychlost svařování může být vyšší a pro některé aplikace je porovnání hloubky průvaru a rychlost svařování

vání vyhovující. Využívá se tedy zvláště v případech, kdy rychlost svařování je důležitější než úzký a hluboký průvar. [9]

### 2.6.3 Metoda hlubokého sváru

Pro svařování hlubších svarů docílíme zvyšováním plošné hustoty výkonu na kritickou hodnotu (empiricky  $1-5 \times 10^6 \text{ W.cm}^{-2}$ ), kdy dochází k tvorbě par kovů nad samotným povrchem svařovaného materiálu. Společně pak s působením vysoké plošné energie fokusovaného laserového paprsku se vytváří plazma a začíná docházet k hlubokému provařování. Laserový paprsek vytvoří „kapiláru“, která má průměr 1,5- až dvojnásobek průměru ohniska. Uzavření této kapiláry je zabráněno tlakem plynů vystupující z této kapiláry. Plazma na povrchu materiálu pak zpětně ovlivňuje tvar kapiláry. Ze stěn kapiláry se následně vedením dostává vložená energie laserového paprsku do taveniny a dále do tuhého materiálu. Tak může laserový paprsek pronikat hluboko do materiálu a vytváří kapiláru, tzv. keyhole. Tím se i díky mnohonásobné reflexi uvnitř kapiláry výrazně zlepšuje absorpce v místě dopadu laserového paprsku. Vzniká tak relativně úzký a hluboký svar. To je pak hlavním důvodem, proč je laserový svazek užší než předpokládaná a teoretická dráha laserového svazku za vlastním bodem jeho fokusace. Pohybem samotného svařovaného materiálu nebo fokusovaného laserového svazku vzniká svarový šev. [9]



Obr. 3. Svařování vedením tepla v porovnání s hlubokým svarem (tzv. keyhole) [9]

#### 2.6.4 Svařování vysokoodrazivých materiálů

Další podstatou při svařování laserem je povrch materiálu. Záření, které dopadá na povrch materiálu, může být pohlceno, odraženo, nebo v případě čirého materiálu projde materiálem. Pro svařování a tepelné dělení materiálů má význam pouze ta část záření, která je pohlcena. Pohltivost materiálů je závislá na mnoha faktorech, jako je barva, drsnost povrchu, geometrická konfigurace, vlnová délka dopadajícího záření. Pro svařování mědi se používají speciální pasty na zvýšení pohltivosti materiálu. Nejnovější lasery se světlem o vlnové délce 515 nm a pulzním režimu již svařují měď daleko lépe než IR lasery. [8; 10; 11]

#### 2.6.5 Svařování v ochranné atmosféře

Ochranné plyny ve svařování mají svůj význam. Hlavním úkolem při svařování je ochrana svarové lázně před okolní atmosférou. Cílem je zabránit absorpci kyslíku, dusíku a okolní vlhkosti do svarové lázně, čímž se zabrání tvorbě oxidů, nitridů a pórů. Mimo jiné ochranný plyn zajistí stálé odfukování plazmatu vystupující nad svařenec. Vznikající plazma snižuje hloubku provaření tím, že její drobné částice rozptylují laserový paprsek. Stejně jako u ostatních metod svařování s ochranným plynem lze i při svařování laserem svařovací proces cíleně ovlivnit. Mezi nejčastěji používané plyny a jejich směsi při laserovém svařování jsou argon a helium. Ochranné plyny mohou v závislosti na základním materiálu obsahovat také aktivní složky ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ), které ovlivňují svařovací proces rovněž termicky a metalurgicky. [12]

#### 2.6.6 Příprava svarového spoje při laserovém svařování

Správné sestavení svarového spoje je při laserovém svařování velmi důležitým faktorem. Laser je velice přesný nástroj vyžadující poměrně vysokou úroveň přípravy. Typická šířka stopy při svařování vysokovýkonovým laserem je asi 1 mm a mezera pro svařování by neměla překročit 25% šířky této stopy. Jen tak je zajištěna správná fúze svarových ploch. U většiny laserových svarů se nepoužívá přídavný materiál, proto musí být mezery mezi plochami svaru velice úzké, jinak mohou vznikat vruby.

Laser může být použit i pro svařování s překlátováním s částečným nebo úplným průvarem. Požadavky pro nastavení šířky mezery mezi plochami budoucího svaru jsou v tomto případě méně přísné.

Další možností používanou při laserovém svařování je oboustranný tupý spoj. V tomto případě vytvoří laserový paprsek jednoduchou stopu po obou stranách na tupo spojovaných součástích.

Při svařování laserem je možné použít také přídavný materiál, a to buď ve formě drátu přidávaného do svaru nebo plnicí kovové vložky. V tomto případě je možno tolerovat větší mezery mezi stěnami budoucího svaru. Přídavným materiálem je možno i ovlivnit chemické složení svaru a zvýšit např. svařitelnost vysokouhlíkatých ocelí. [13]

### **2.6.7 Průmyslové využití laserového svařování**

Tato technologie klade důraz na kvalitu svarů. Dalšími požadavky jsou realizace velmi náročných svarů, aplikace sériové nebo hromadné výroby a její následné automatizace. Proto tuto technologii můžeme hledat v automobilovém, kosmickém, elektrotechnickém a zbrojním průmyslu.

## **2.7 Výhody a nevýhody laserového svařování**

Laserové svařování má hned několik výhod a předností, mezi které patří:

- produktivita výroby a technologického procesu,
- svařitelnost různých druhů materiálů,
- možnost automatizace,
- kvalita svaru a povrchový vzhled svaru bez nutnosti dalšího opracování,
- malá tepelně ovlivněná oblast a malé pnutí ve svařenci,
- možnost svařování tenkých kovových fólií až po tloušťky kolem 30mm,
- přesně nastavitelná hustota vnesené energie do svařovaného materiálu,
- možnost svařování bez přídavného materiálu.

Mezi hlavní nevýhody patří:

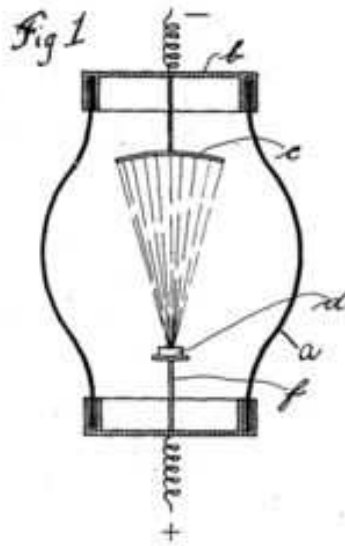
- vysoké pořizovací náklady,
- špatná svařitelnost některých materiálů, např. vysokoodrazové materiály.

### 3 Svařování elektronovým paprskem

Při tomto způsobu svařování se používá k ohřevu materiálu tepla získaného přeměnou kinetické energie rychle letících elektronů na energii tepelnou při jejich dopadu na povrch materiálu. Hustoty výkonu v místě dopadu svazku jsou v řádu  $10^4$  až  $10^6$  W/mm<sup>2</sup>. [8]

#### 3.1 Historie

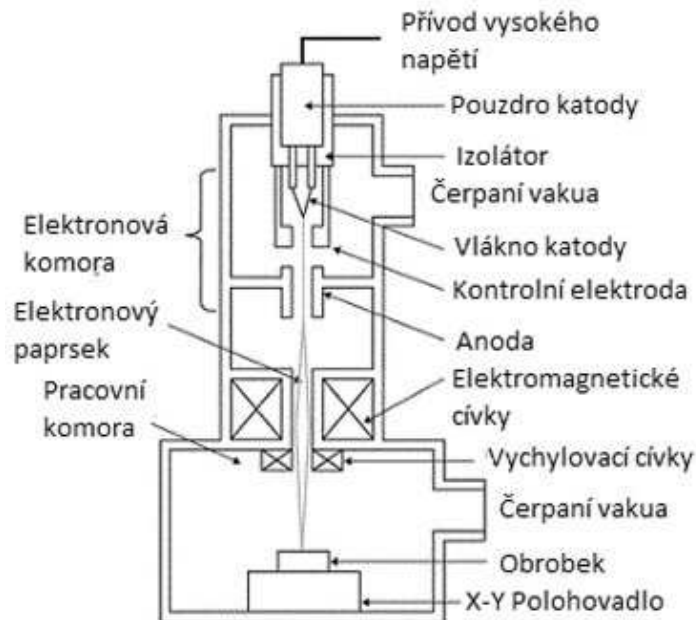
Na počátku využití elektronového svazku byl objev elektronu anglickým fyzikem J. J. Thomsonem v roce 1897. Ten svým objevem objasnil podstatu tzv. katodových paprsků, které v polovině 19. století byly zájmem mnoha dalších fyziků. Ani technologické využití elektronového svazku na sebe nedalo dlouho čekat. Elektrony při interakci s pevnou látkou předávají velkou část své kinetické energie materiálu ve formě tepla, což bylo poprvé využito Němcem Marcello von Piranim k tavení kovů. Pirani si princip patentoval v roce 1905 v Německu a od dva roku později v USA (viz obr. 1). Zařízení, které představuje v podstatě vakuovou diodu s anodu tvořenou taveným kovem, se používá (samozřejmě v modernějším provedení) i dnes pro materiály ze skupiny obtížně tavitelných či vysoce reaktivních, mezi jinými například titan a jeho slitiny, tantal, niob, molybden, wolfram, zirkon, hafnium, vanad, uran, křemík, platinu nebo iridium. Jako zdroj elektronů slouží nejčastěji Piercova tryska. Též lze tímto způsobem zpracovávat některé keramické materiály. Přetavením ve vakuu lze získat velice čisté kovy či slitiny pro chemický nebo elektrotechnický průmysl. Ačkoliv uvedená schopnost elektronového svazku zahřát materiál na vysokou teplotu byla známa již dlouho před druhou světovou válkou, historie elektronového svařování začala až v padesátých letech 20. století. První publikovaná práce na toto téma byla od J. A. Stohra z roku 1957 působícího ve Francii, ačkoliv Steigerwald měl v té době k dispozici vrtací zařízení, které bylo jistě schopno i svařovat, ale zřejmě chyběla potřeba. V dalších letech vznikají obdobná zařízení jako Stohrovo i v Německu, Velké Británii, Spojených státech a Rusku. Jedna z prvních elektronových svářeček v bývalém Československu vznikla nedlouho po první publikaci v roce 1963 i v Ústavu přístrojové techniky v Brně. [14]



Obr. 4: Zařízení pro tavení kovů elektronovým svazkem, detail z americké patentové přihlášky M. von Piraniho. [14]

### 3.2 Princip elektronové trysky

K vytvoření elektronového svazku slouží elektronová tryska, někdy též označovaná jako elektronové dělo. Potřebujeme-li svazek soustředit na malou plochu, je vhodná tryska s bodovým zdrojem elektronů. Schéma takové trysky je na obr. 5. [14]



Obr. 5: Schéma elektronové trysky [15]

K získání volných elektronů se zpravidla využívají termoemisioní zdroje. Popisovaná elektronová tryska má termoemisioní katodu žhavenou průchodem elektrického proudu. Katoda je nejčastěji z wolframového drátu ohnutého do tvaru písmene „V“. Na katodu je přivedeno urychlovací napětí ze zdroje vysokého napětí  $U_A$ , zatímco anoda je na nulovém potenciálu. Mezi oběma elektrodami je tak vytvořeno silné elektrické pole, které urychluje elektrony směrem k anodě. Množství elektronů, které opustí katodu, lze ovlivňovat pomocí napětí  $U_W$  na třetí elektrodě — tzv. Wehneltově válci. Jde v podstatě o obdobu řídicí mřížky v obrazovce či elektronce. [14]

Ve vzduchu atmosférického tlaku je volná dráha elektronů velice krátká (typicky stovky nanometrů). Aby nedocházelo k rozptylu svazku kolizemi s molekulami vzduchu, je nutné dosáhnout dostatečného vakua v prostoru, kterým má procházet. Zatímco v pracovní komoře postačuje tlak pod 0,1 Pa, v prostoru katody je nutné lepší vakuum, zejména z důvodu zamezení nežádoucích reakcí horké katody se zbytkovým plynem a pro velmi dobré elektroizolační vlastnosti vysokého vakua. Zde je nutné udržovat tlak pod 0,001 Pa. To, že proces probíhá ve vakuu, je sice technická komplikace, na druhou stranu jsou zpracovávané materiály chráněny před reakcemi s okolní atmosférou. To je velmi výhodná skutečnost, neboť nedochází ke kontaminaci či oxidaci. [14]

Anoda má ve svém středu otvor, kterým prochází již urychlené elektrony do další části tubusu. Zde je svazek nejprve pomocí magnetického pole centrovacího systému vystředěn tak, aby probíhal po optické ose zařízení. Následně přirozeně rozbíhavé trajektorie jednotlivých elektronů ve svazku magnetické pole fokusační čočky změni na sbíhavé tak, aby v místě dopadu měl svazek požadovaný průřez. Tímto způsobem lze dosáhnout značných hodnot plošné hustoty výkonu (až 1 MW/mm<sup>2</sup>). [14]

V další části trysky se obvykle nachází vychylovací systém, který dává možnost svazek odklonit od své přímé dráhy a změnit místo dopadu. Většinou, ve shodě s televizními obrazovkami, je vychylovací systém magnetický. Výhoda ve srovnání s mechanickým způsobem je v téměř úplné absenci setrvačnosti polohování, což umožňuje přesouvat svazek obrovskými rychlostmi (až tisíce metrů za sekundu) a prakticky okamžitě jej v cílovém bodě zastavit. [14]

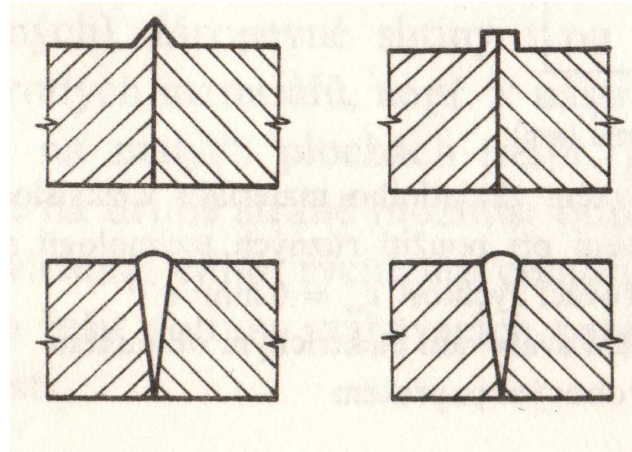


### 3.3 Svařování elektronovým paprskem

Zaostřený svazek zahřívá materiál spojovaných součástek na teplotu vyšší, než je teplota tavení. Při dobře sesazených komponentech dojde k promísení taveniny na rozhraní, většinou bez přídavku materiálu, a po vychladnutí vzniká pevný spoj. Svazek má díky tzv. hloubkovému efektu schopnost pronikat pod povrch vysokou rychlostí. To umožňuje vytvářet velmi hluboké průvary, které navíc vynikají minimální šířkou tepelně ovlivněné oblasti. Dosahovaný poměr hloubky k šířce svaru je až 30:1. Průvary dosahované v současnosti špičkovými zařízeními jsou více než 300 mm hluboké. Současně existuje jako protipól oblast svarů se sub-milimetrovými až mikrometrovými rozměry. [14]

#### 3.3.1 Příprava svarového spoje při elektronovém svařování

Příprava svarů je velmi důležitá, aby se zaručil kvalitní průřez svaru. Při dopadu elektronového paprsku se dosahuje teploty 5 000 °C až 6 000 °C a dochází k okamžitému odpaření svařovaného materiálu. Jelikož se většinou nepoužívá přídavný materiál, svar na povrchu vytváří minimální kráter. Zamezení vzniku kráteru se musí styčné plochy náležitě připravit podle obrázku č. 6. Oxidační vrstvičky na povrchu materiálu se při svařování naruší, takže nezhoršují průběh svařování.



Obr. 6. Konstrukční úprava stykových hran [8]

#### 3.3.2 Průmyslové využití elektronového svařování

U svařování elektronovým paprskem je kladen důraz na kvalitu svaru, stejně jako u laserového svařování. Jelikož svařování probíhá ve vakuu, umožňuje tento způsob svařovat materiály chemicky velmi aktivní, které reagují s okolní atmosférou a tím dochází k podstatnému zhoršení mechanických vlastností svaru. Proto tento způsob svařování budeme využí-

ván v kosmickém průmyslu. Dalšími odvětvím kde můžeme tento způsob svařování hledat jsou například automobilový průmysl, těžký průmysl nebo jaderný průmysl.

### **3.4 Technologie elektronového paprsku**

#### **3.4.1 Obrábění**

Prvním známým použitím elektronového svazku k obrábění bylo vytváření clonek s miniaturními otvory pro použití v elektronových mikroskopech a to přímo svazkem v mikroskopu samém (práce von Ardenne okolo roku 1938). V roce 1942 von Borris obdržel patent na elektronově-optický vrtací přístroj. V roce 1949 německý fyzik Karl-Heinz Steigerwald, který se zabýval mimo jiné výrobou safírových ložisek do hodinek, zahájil se svými spolupracovníky výzkum tepelného působení svazku. Ten v roce 1952 vyústil v konstrukci prvních průmyslově použitelných vrtacích zařízení. Ze všech uvedených technologií vyžaduje obrábění nejvyšší výkonovou hustotu svazku. Aby došlo k odpaření materiálu, je třeba dosáhnout hodnot v řádu 0,1 až 1 MW/mm<sup>2</sup>. Moderní zařízení, pracující většinou s urychlovacím napětím 150 kV, dosahují úctyhodné produktivity až 3000 „vyvrtaných“ otvorů za sekundu. Nejmenší dosahované průměry otvorů se pohybují okolo 25 μm a poměr hloubky k průměru otvoru je až 25:1. Touto metodou lze vrtat i díry, které nejsou kolmé k povrchu součástky. [14]

#### **3.4.2 Tepelné zpracování**

Do skupiny tepelného zpracování v tuhé fázi — tedy v případech, kdy nedochází k roztavení materiálu — patří tvrzení a žíhání. Při povrchovém tvrzení se využívá toho, že po velmi krátkou dobu trvajícím ohřevu tenké povrchové vrstvy dochází k rychlému odvodu tepla z horké zóny do hloubky materiálu a tím k zakalení povrchové vrstvy materiálu. Pokles teploty dosahuje rychlosti až 10<sup>4</sup> K/s. Žíhání se uplatní zejména při lokální povrchové rekrytalizaci. Dojde-li při procesu k roztavení materiálu, mluvíme o zpracování v tekuté fázi. Přetavení povrchové vrstvy se uplatní například při zhutňování litiny či hliníkových licích slitin, případně ke „slití“ porézních povlaků získaných například šopováním. Při legování je roztavena tenká vrstva materiálu spolu s deponovanou vrstvou vhodné příměsi. Difúzním procesem v tekuté fázi dojde ke vzniku požadované slitiny. Při plátování (v podstatě jde o navařování) dojde k celoplošnému přitavení přidané vrstvy materiálu. Disperzním přetave-

ním se dosáhne rozptýlení drobných částic v tavenině. Tím lze například zvýšit otěruvzdornost houževnatého materiálu obohacením o tvrdá zrna. [14]

### 3.4.3 Texturování a gravírování

Numerické řízení polohy místa dopadu svazku lze využít k tvorbě obecných textur na povrchu materiálu. Parametry procesu a vlastnosti materiálu pak rozhodují, dojde-li jen k přetavení materiálu nebo k jeho odpaření a tím ke vzniku depresí. Tímto postupem lze například vytvářet značky či nápisy na povrchu součástek. Možné praktické užití je například „vyražení“ sériového čísla svaru s logem firmy a podobně. [14]

### 3.4.4 Aditivní postupy pro rychlou prototypovou výrobu

Díky této pozoruhodné technice lze vyrobit trojrozměrnou kovovou součást na základě virtuálního modelu v počítači. Princip spočívá ve vytváření součásti vrstvu po vrstvě z kovového prášku umístěného v nádobě s pohyblivým dnem. Elektronový svazek je vychylován po povrchu prášku, přičemž přetaví oblast odpovídající řezu daného objektu v příslušné rovině. Poté je dno nádoby sníženo a nanesen další prášek. Ten je opět lokálně roztaven, přičemž dojde k propojení s předchozí vrstvou. Proces se opakuje tak dlouho, až je kompletní celý objem tělesa. Nepřetavený prášek se použije pro výrobu dalšího kusu. Tloušťka jedné vrstvy je 0,05 až 0,2 mm, dosahovaná laterální přesnost až 0,4 mm. Rychlost přetavování materiálu je okolo 60 cm<sup>3</sup>/hodinu. Používané materiály jsou například čistý titan a jeho slitiny (pro použití v lékařství) nebo slitina kobaltu, chromu a molybdenu (pro použití v lékařství či pro výrobu forem pro vstřikování plastů). Mezi aplikace patří například výroba implantátů zhotovených na míru podle podkladů z počítačové tomografie. Obdobná známější laserová technika je založena na vytvrzování polymeru UV zářením. Takto získaný výrobek však svými mechanickými vlastnostmi nemůže konkurovat kovovým tělesům získaným 3D-tiskem elektronovým svazkem. Ty svými mechanickými vlastnostmi často předčí, alespoň podle tvrzení firmy, výrobky získané konvenčním obráběním. [14]

## 3.5 Výhody a nevýhody svařování elektronovým paprskem

Elektronové svařování má hned několik výhod a předností, mezi které patří:

- možnost automatizace,
- vysoká produktivita,
- lze svařovat několik součástí nad sebou při jediném průchodu elektronového svazku,

- vysoká kvalita svarů,
- svařování bez přídavného materiálu,
- minimální tepelně ovlivněná oblast i při hloubkových svarech,
- možnost regulace hloubky svaru,
- svařování vysoce chemicky reaktivních materiálů.

Mezi hlavní nevýhody patří:

- pořizovací náklady,
- svařování ve vakuu - omezený prostor komory a prodlevy ve vyčerpání a zavzdušnění komory
- při urychlovacím napětí vyšším než 15kV vzniká rentgenové záření

## 4 Svařovaný materiál

### 4.1 Ocel 42SiCr

Základem pro svařovaný materiál bude ocel 42SiCr pod interním označením H0. Tento materiál vychází z pružinové oceli 54SiCr. Jeho chemické složení viz. tabulka č.1. Ocel má v základním stavu perliticko-feritickou mikrostrukturu s pevností 980 MPa a tažností ve výši 30%. Po tepelném zpracování tato ocel dosahuje mezi pevnosti okolo 2000MPa a mezi kluzu v rozmezí od 1400MPa do 1780MPa a tažností kolem 20%.

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Al	Nb	Mo	M <sub>s</sub> [°C]	M <sub>f</sub> [°C]
42SiCr	0,43	0,59	2,03	0,009	0,004	1,33	0,07	0,008	0,03	0,03	298	178

Tab. 1: Chemické složení experimentální oceli 42SiCr [hm.%]

## 5 Tepelné zpracování svařovaného materiálu

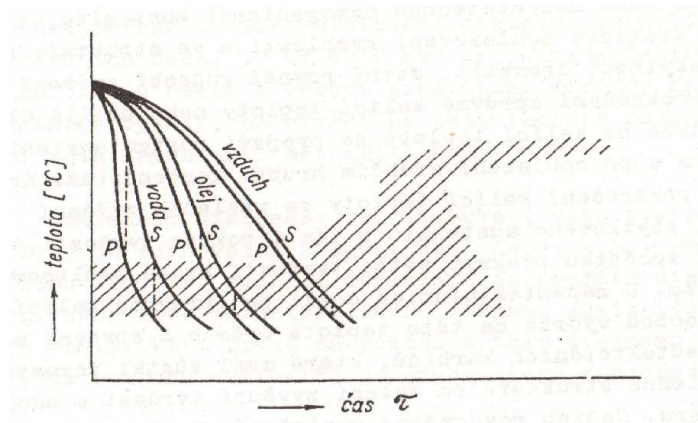
Na svařovaný materiál se aplikují dva druhy tepelného zpracování. Jeden vzorek projde kalením a následující dva vzorky projdou dvěma druhy Q-P procesu.

## 5.1 Kalení

Účelem kalení je zvýšení tvrdosti oceli vytvořením částečně nebo zcela nerovnovážné struktury. Kalením nazýváme postup tepelného zpracování, při kterém se součást zahřeje na austenitizační teplotu (zpravidla u podeutektoidních ocelí 30 až 50 °C nad  $A_{c3}$ , u nadeutektoidních ocelí nad  $A_{c1}$ , u oceli s vysoce stabilními karbidy na teploty podstatně vyšší), po výdrži na této teplotě následuje ochlazení větší rychlostí než kritickou.

Velké podkročení kalící teploty u podeutektoidních ocelí se ve výsledné struktuře projeví výskytem feritu v martenzitu a tím snížením teploty. Menší podkročení kalící teploty nebo příliš krátká doba výdrže na správné kalící teplotě má za následek nedostatečnou homogenizaci austenitu, tím zvýšení kritické ochlazovací rychlosti a ve struktuře se může vyskytnout troostit, který rovněž způsobí snížení tvrdosti. Překročení správné kalící teploty nebo příliš dlouhá doba výdrže na kalící teplotě se projeví růstem austenitického zrna a po ochlazení křehkým hrubým martenzitem. Kromě toho má překročení kalící teploty za následek zvýšení množství zbytkového austenitu a tím i pokles tvrdosti, který může být zpočátku překryt větší tvrdostí hrubě jehlicového martenzitu. U nadeutektoidních ocelí je správnou kalící teplotou a dobou výdrže na této teplotě určeno i správné množství nadeutektoidních karbidů, které musí zůstat nerozpuštěny a ve výsledné struktuře po kalení zvyšují tvrdost a odolnost proti oděru. Jejich rovnoměrné rozložení, velikost a tvar jsou dány již výchozí strukturou před kalením. Proto musí být nadeutektoidní oceli před kalením správně vyžihány.

Základní kalení je nejjednodušší a nejčastější způsob kalení. Po ohřevu na správnou kalící teplotu následuje ihned plynulé (nepřetržité) ochlazení až na teplotu ochlazovacího prostředí (nejméně pod  $M_s$ ). Na obr. 7 je systematicky znázorněno ochlazování do vody, do oleje a na vzduchu zakreslené do diagramu ARA. Svislé přímký znázorňují rozdíl teploty na povrchu a ve středu kaleného předmětu na začátku a na konci martenzitické přeměny. Z diagramu je jasné, proč při kalení do oleje nebo na vzduchu je menší nebezpečí vzniku trhlin a deformací než při kalení do vody. Pro kalení je používáno prakticky všech druhů pecí od komorových a šachtových pecí, přes solné lázně až k pecím průběžným. Nejvhodnější se jeví použití moderních pecí s řízenou atmosférou event. pecí vakuových. [16]

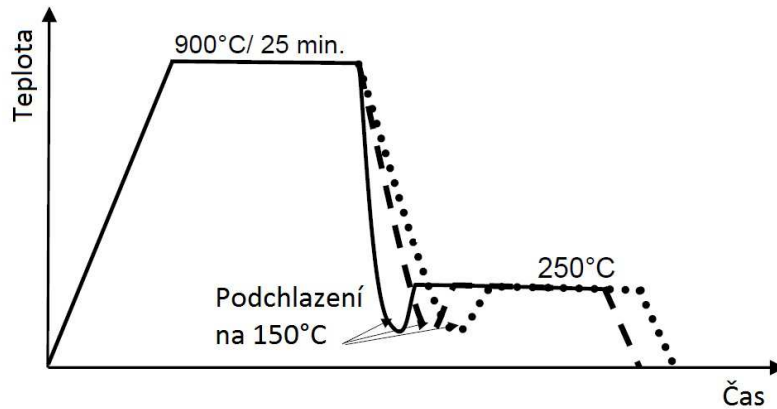


Obr. 7: Základní kalení, S - teplota středu, P - teplota povrchu [16]

## 5.2 Q-P proces (quenching and partitioning)

Nové metody tepelného a tepelně-mechanického zpracování byly vyvinuty v posledních letech k uspokojení poptávky po zlepšení mechanických vlastností materiálů. Využití těchto nových metod byl započat vývoj ocelí s vynikající kombinací mechanických vlastností. Vysoká pevnost nízkolegovaných ocelí, se ukázaly být jedním z nejlepších materiálů, protože mohou dosáhnout konečné pevnosti vyšší než 2000 MPa při zachování relativně vysoké tažnosti. Další výhodou pokročilé vysokopevnostní oceli je, že se snaží udržet celkovou část legujících prvků na několik hmotnostních procent. Konvenční zpracování vysokopevnostních oceli může mít za následek velmi vysokou mez pevnosti, ale je obvykle dosaženo na úkor snížení tvárnosti. Nové netradiční technologie tepelného a tepelně-mechanického zpracování může vést ke značnému zlepšení jak pevnosti tak i tažnosti. Intenzivní výzkum termomechanicky upravené TRIP (transformace indukované plasticity) oceli prokázali blahodárné účinky stabilizovaného zbytkového austenitu na provedení vysokopevnostních ocelí. Vícefázová mikrostruktura TRIP oceli se skládala převážně z feritu, bainitu a zbytkového austenitu. Příležitost pro další zlepšení mechanických vlastností se nabízí pod pojmem martenzitické oceli s řízeným podílem zbytkového austenitu. Tato mikrostruktura lze získat Q-P (kalení a žihání) procesem. Tento Q-P proces se skládá z austenitizačního kalení na teplotu mezi začátkem martenzitu  $M_s$  a koncovým martenzitem  $M_F$ , s následným žiháním při mírně zvýšené teplotě. Izotermické žihání umožňuje rozdělení uhlíku, který difunduje z přesyceného martenzitu vytvořeného kalením do zbývajících austenitu. Vyšší obsah uhlíku stabilizuje tento austenit proti martenzitické transformaci v průběhu konečného ochlazení na pokojovou teplotu. Finální mikrostruktura se skládá z matrice kubického martenzitu a asi 15% zbytkového stabilizovaného austenitu. Austenit by měl být hlavně přítomen jako tenký film mezi martenzitickými lame-

lami. Výsledky výzkumu TRIP ocelí ukazují, že mechanické vlastnosti takové vícefázové mikrostruktury bude ovlivňován objemový zlomek, stabilita a morfologie zbytkového austenitu. [17]



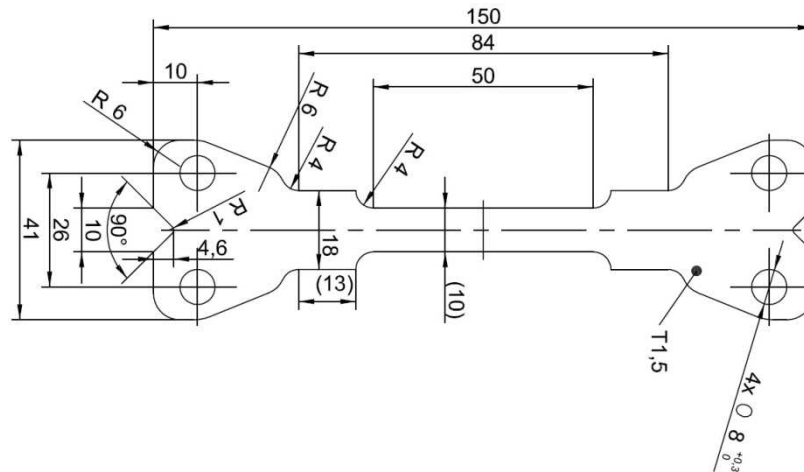
Obr. 8: Q-P proces; Plná čára - nejrychlejší ochlazení na 150°C ve vodě, Přerušovaná čára - ochlazení v oleji, Tečkovaná čára - ochlazení v solné lázni [17]

## 6 Úvod do experimentální části

Experimentální část bakalářské práce se zabývá zpracováním mechanických a metalografických zkoušek na zavařených vzorcích a výsledným porovnáním daných svařovacích metod. Obě metody jsou velice podobné, jde o svařování paprskem energie, z čehož by mohlo vyplývat, že lze očekávat srovnatelné či obdobné výsledky. Jedním z našich cílů bylo navržení takových svařovacích parametrů, aby nedošlo k úplnému provaření, možná až propálení svařovaných vzorků a druhá strana zůstala pohledová. V experimentu budou provedeny metalografické a mechanické zkoušky. Z mechanických zkoušek to bude zkouška tahem a mikrotvrdost. Z metalografického hlediska budou porovnány tepelně ovlivněné oblasti a celkové hodnocení svarů (hloubka průvaru, tvar svaru, vady ve svarech).

## 7 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky jsou ploché tyče o rozměrech viz. obrázek č.9. Nekótované rozměry byly vygenerovány pomocí počítače.



Obr. 9: Výkres zkušební tyče

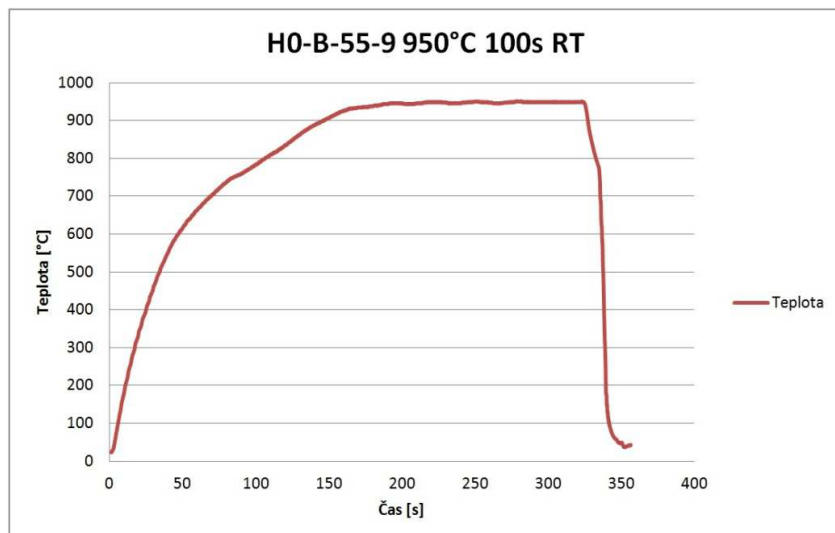
### 7.1 Příprava vzorků

Všechny vzorky byly vyřezány na vodním paprsku. Poté byly poniklovány, z důvodu zamezení vytváření okují a dalších oxidů při tepelném zpracování. Dalším krokem bylo tepelné zpracování vzorků. Vzorky podstoupily celkem tři způsoby tepelného zpracování.

#### 7.1.1 Kalení - 950RT

První sada vzorků byla zakalena ve vodě z kalicí teploty 950°C. Průběh kalení je znázorněn na grafu 1. Dále tyto vzorky budou označovány jako KAL.

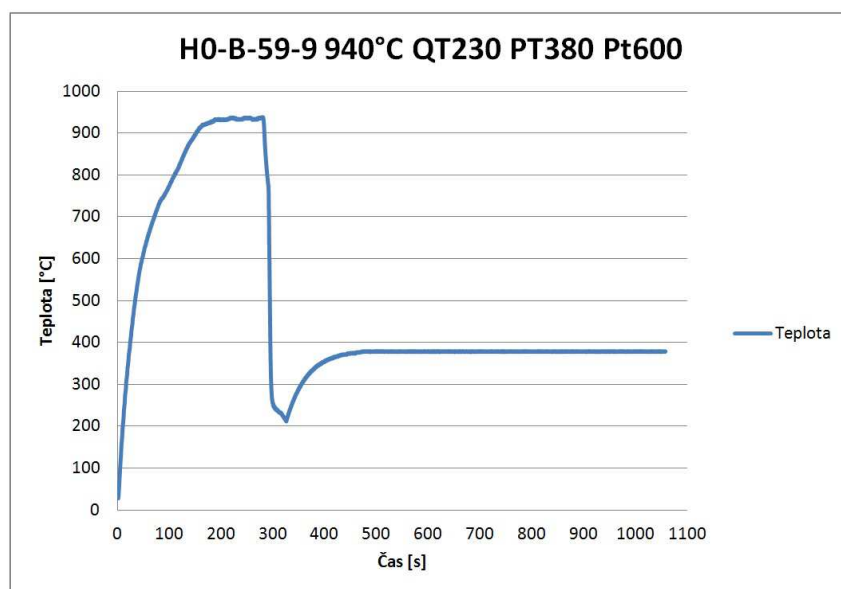




Graf 1: Průběh kalení (KAL)

### 7.1.2 Q-P proces - QT230 PT380 Pt600

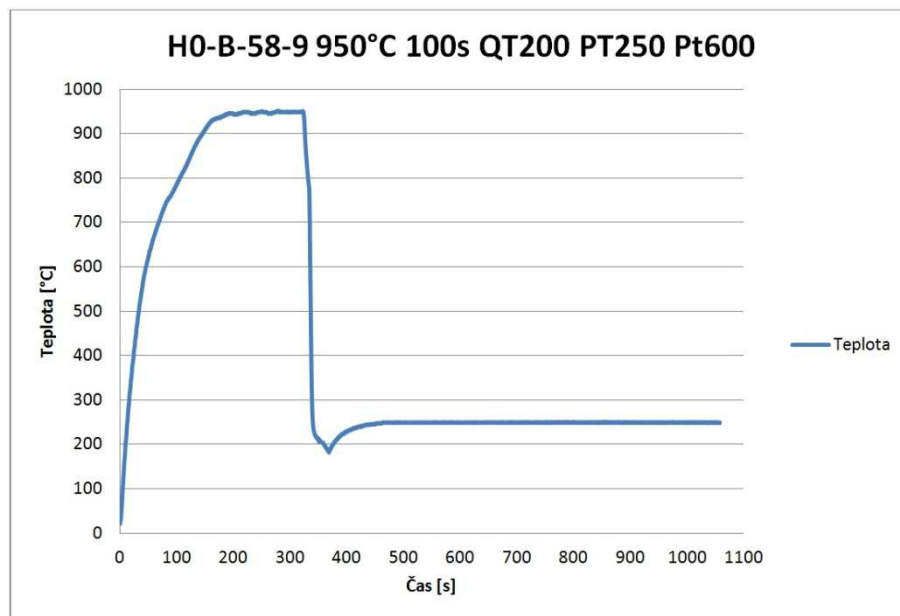
Druhá sada vzorků byla zpracována Q-P procesem a to tak, že nejdříve se vzorky ohřály na teplotu 940°C. Poté byly zakaleny na teplotu 230°C. Dalším krokem bylo zvednutí na žíhací teplotu 380°C a na této teplotě se udrželo 600s. Průběh Q-P procesu je znázorněn ve grafu 2. Dále tyto vzorky budou označovány jako QP1.



Graf 2: Průběh Q-P procesu (QP1)

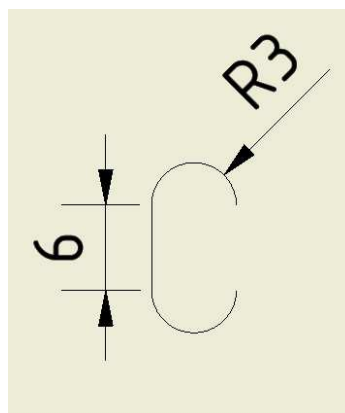
### 7.1.3 Q-P - QT200 PT250 Pt600

Třetí sada vzorků byla zpracována druhým Q-P procesem a to tak, že nejdříve se vzorky ohřály na teplotu 950°C. Poté byly zakaleny na teplotu 200°C. Dalším krokem bylo zvednutí na žíhací teplotu 250°C a na této teplotě se vydrželo 600s. Průběh Q-P procesu je znázorněn ve grafu 3. Dále tyto vzorky budou označovány jako QP2.



Graf 3: Průběh Q-P procesu (QP2)

Po tepelném zpracování byly vzorky zbaveny niklové vrstvy a přeříznuty v polovině. Pro všechny vzorky byl zvolen překryv cirká 16mm a poté byly svařeny. Na překrytí byl udělán svar ve tvaru C (viz obr. 9). U všech vzorků byl použit stejný spot (průměr paprsku) 0,4 mm. Geometrie svaru je znázorněna na obrázku 10 kde je délka svaru  $l = 24,85\text{mm}$ .



Obr. 10: C svar

## 7.2 Svařování vzorků laserem

Pro svařování byl použit diodový, vláknem vedený laser Laserline LDF 5.000-40, který používá jako aktivní prostředí diody, dále je tento laser schopný vyvinout výkon až 5kW. Před finálním svařováním muselo dojít na odladění a optimalizaci svařovacích parametrů. Optimalizace probíhala na malých vzorcích, které byly upnuty do malého svěráku. Při odladění svařovacích parametrů došlo na svaření finálních vzorků. Tyto vzorky byly upnuty pouze za konce a při svaření se zjistilo, že svařovací výkon byl až příliš velký. Do vzorků bylo vneseno tolik tepla, že se buď přímo upálily nebo po svaření svítily od červené až po žlutou, odhadem kolem 800 °C. Tyto vzorky byly nepoužitelné, z důvodu zaniknutí tepelného zpracování. Při přepracování (snížení svařovacího výkonu) svařovacích parametrů se vzorky zavařily, aniž by došlo k poškození vzorku. Jediným vysvětlením je, že do čelistí svěráku unikalo velké množství tepla, a proto zkušební vzorky snesly větší výkon než finální vzorky uchycené pouze za konce (překrytí svařované části bylo volně v prostoru). Nejdříve se svařily vzorky QP2, kde byl použit výkon  $P = 1600\text{W}$ , rychlost svařování  $v = 25\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Z těchto vzorků bylo usouzeno, že by mohl být přidán výkon o hodnotě  $P = 200\text{W}$ , při zachování stejné svařovací rychlosti. Tím pádem pro zbylé vzorky (KAL a QP1) byly použity tyto hodnoty:  $P = 1800\text{ W}$ ,  $v = 25\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pro všechny vzorky svařované laserem byl použit argon 5.0 jako ochranná atmosféra.



Obr. 11: Vzorky KAL



Obr. 12: Vzorky QP2

## 7.3 Svařování vzorků elektronovým paprskem

Pro svařování byla zvolena svářečka MEBW-60 s urychlovacím napětím 5 až 60kV a maximálním výkonem až 2 kW. Při svařování byl postup totožný, jako v případě svařování laserem. Nejdříve došlo k odladění a optimalizaci svařovacích parametrů, s následným svaře-

ním vzorků. Například při použití stejné svařovací rychlosti  $v = 13 \text{ mm.s}^{-1}$  a výkonu  $P = 550\text{W}$  došlo k neúplnému provaření, naopak při zvýšení výkonu na  $P = 800\text{W}$  došlo k propadnutí kořene svaru. Konečné svařovací parametry po odladění byly zvoleny takto: svařovací výkon  $P = 630\text{W}$  a rychlost svařování byla použita  $v = 13 \text{ mm.s}^{-1}$ . Jediným zajímavým dějem, který nastal při svařování, byly elektrické výboje. Tyto výboje měly za následek neprovaření materiálu nebo různé rozstříky svarového kovu. Výboje probíhaly vždy ke konci svařování a byly náhodné. Bylo zajímavé, že po zavaření několika vzorků tyto výboje naprosto zmizely a svařování dále probíhalo bez dalších problémů. U některých vzorků se vytvořila prasklina v kráterové sedlině.



Obr. 13: Vzorky QP1



Obr. 14 Vzorky QP2

## 8 Vnesené teplo při svařování

$$Q_s = \frac{P}{1000 \cdot v_s} \text{ [kJ.mm}^{-1}\text{]}$$

kde:

$Q_s$  ..... specifické vnesené teplo [ $\text{kJ.mm}^{-1}$ ]

$P$ ..... svařovací výkon [W]

$v_s$  ..... svařovací rychlost [ $\text{mm.s}^{-1}$ ]

$$Q_c = Q_s * l \text{ [kJ]}$$

kde:

$Q_c$  ..... celkové vnesené teplo [kJ]

$Q_s$  ..... specifické vnesené teplo [ $\text{kJ.mm}^{-1}$ ]

$l$  ..... délka svaru

## 8.1 Vypočtené vnesené teplo

Podle množství vneseného tepla do základního materiálu se vytvoří odpovídající tepelně ovlivněná oblast, kde její velikost je úměrná velikosti teplotních pnutí vedoucích ke vzniku případných deformací. Dále způsobuje změnu struktury základního materiálu v blízkosti svaru.

	Laser 1	Laser 2	Elektronový paprsek
Svařovací výkon P [W]	1600	1800	630
Svařovací rychlost $v_s$ [mm.s <sup>-1</sup> ]	25	25	13

Tab. 2: Svařovací parametry

Pro svařování laserem jsme dále zvolili hodnotu účinnosti  $\eta = 0,4$  a pro elektronový paprsek  $\eta = 0,8$ .

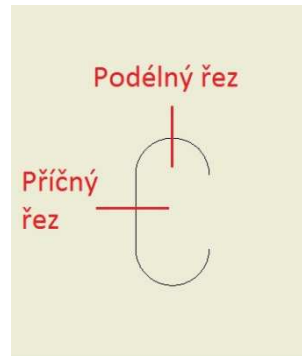
	Laser 1	Laser 2	Elektronový paprsek
Specifické vnesené teplo $Q_s$ [kJ.mm <sup>-1</sup> ]	0,064	0,072	0,048
Celkové vnesené teplo $Q_c$ [kJ]	1,59	1,79	1,19
Celkové vnesené teplo $Q_c$ včetně účinnosti [kJ]	0,636	0,716	0,952

Tab. 3: Hodnoty vneseného tepla

Z vypočtených hodnot je vidět, že se při svařování laserem vneslo více tepla než u el. paprsku a to při výkonu laseru 1800W je rozdíl 33,5% a při výkonu 1600W je rozdíl 25%. S větším vneseným teplem by měla zároveň být i větší teplotně ovlivněná oblast.

## 9 Metalografie

Pro metalografii bylo připraveno celkem šest vzorků, od každého tepelného zpracování jeden. Z každého vzorku byl proveden podélný a příčný řez (viz obr. 16).



Obr. 15: Řez vzorkem

### 9.1 Příprava vzorků

Vzorky byly nejdříve rozřezány na pile Buehler ISOMET 4000, při řezání byla nejprve zvolena rychlost řezání  $1,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , po zařiznutí řezného kotouče do vzorku se rychlost zvýšila na  $2,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Po rozřezání z každého vzorku vznikly další dva vzorky na metalografii. Dalším postupem bylo rozřezané vzorky zalisovat pomocí lisovačky Struers Citopress 10. Zalisování vzorků bylo zapotřebí z důvodu příliš malých vzorků, které by nešly moc dobře vyleštit. Zalisované vzorky se nadále musely vybrousit. Broušení probíhalo postupně na brusných kotoučích od hrubosti P200 až po hrubost P1200, s tím, že hrubost se zvyšovala po P200. Při každé výměně brusného kotouče se vzorky musely opláchnout pod vodou, z důvodu aby na vzorkách nezůstaly zbytky brusného abraziva z předchozího broušení, ty by mohly vzorky dál poškrábat. Doba broušení při každé hrubosti byla dvě minuty. Po vybroušení přišlo na řadu leštění. Na leštění se také snížila rychlost otáčení. Nejdříve se leštilo s emulzí  $0,9 \mu\text{m}$  po dobu tří minut. Při výměně leštících kotoučů se vzorky oplachovaly v lihu. Nakonec se leštilo s emulzí  $0,3 \mu\text{m}$ , také po dobu tří minut. Broušení a leštění probíhalo na automatu Buehler Beta. Po vyleštění všech vzorků se na leptání použilo leptadlo nital, což je směs lihu a kyseliny dusičné a to v 3% koncentraci. Leptání vzorků probíhalo po dobu čtyř vteřin. Po naleptání se všechny vzorky fotily na mikroskopu Olympus GX51, kde se obraz zpracovával pomocí softwaru Quick PHOTO Industrial 3.1. Vzorky se fotily se zvětšením 50x až po zvětšení 1000x.

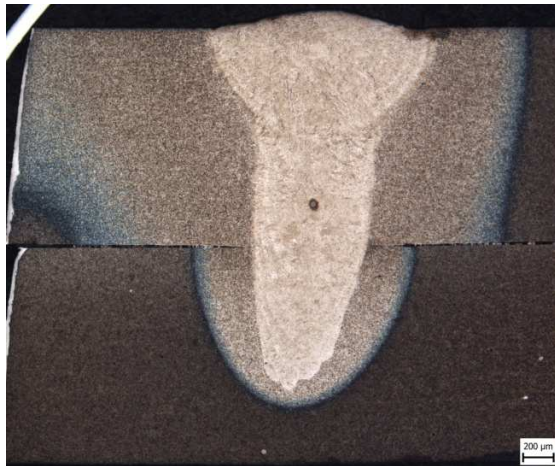
## 9.2 Hodnocení tepelně ovlivněné oblasti

Při svařování je v nejbližším okolí svaru jiná struktura materiálu. Tato oblast se především týká tavných metod svařování. Tepelně ovlivněná oblast (dále jen TOO) bývá nejslabším místem svarového spoje, co se týče mechanických vlastností, za předpokladu, že svar je proveden dobře a nevyskytují se v něm různé trhliny a další poškození. Velikost TOO a změna struktury je převážně ovlivněna množstvím vneseného tepla i schopností materiálu odvádět teplo.

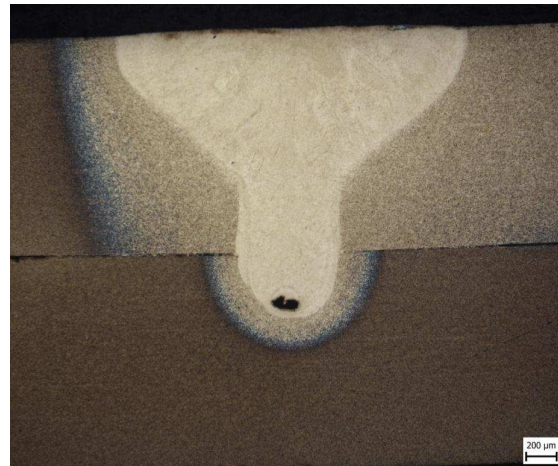
Šířka TOO byla měřena cca uprostřed horní části svaru (od svaru do základního materiálu) a pouze na jedné straně svaru, z důvodu, že na druhé straně byla TOO až do konce materiálu a proto nepoužitelná. V tabulce č.4 jsou znázorněny šířky TOO, kde je vidět, že šířky jsou velice obdobné a liší se jenom minimálně. Na druhou stranu by měla být TOO u laseru širší než u elektronového svazku a to z důvodu menšího vneseného tepla.

Šířka TOO [mm]	El. paprsek	Laser
KAL, podélný řez	1,43	1,41
KAL, příčný řez	0,93	1,03
QP1, podélný řez	1,38	1,34
QP1, příčný řez	0,97	1,03
QP2, podélný řez	1,41	0,89
QP2, příčný řez	0,97	1,15

Tab. 4: Šířka TOO v mm



Obr. 16: TOO (el. paprsek, KAL, 50x)



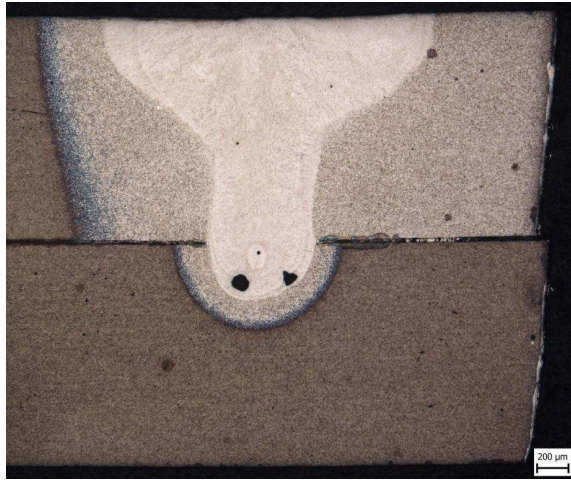
Obr. 17: TOO (laser, QP1, 50x)

Jak je vidět z obrázku č. 16 a 17, tak v každé části vzorku je TOO různě široká a kopíruje tvar svaru. V horní části vzorku je TOO širší než ve spodní části a to z důvodu většího odvedeného tepla v horní části vzorku a tím pádem se do spodní části nedostalo tolik energie.

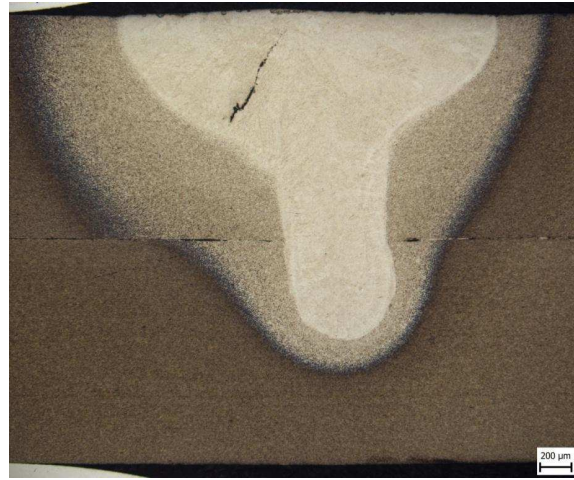
### 9.3 Hodnocení svarů

Obě svařovací technologie mají různé průvary. Vzorky svařené laserem mají menší průvar než vzorky svařené el. paprskem. Svar u laseru je zhruba do čtvrtiny až třetiny spodní části vzorku. Namísto u el. paprsku je průvar od dvou třetiny spodního části vzorku, dokonce skoro úplný průvar (viz obr. 26). Tvar svarů je také velmi odlišný. U vzorků svařených el. paprskem je tvar svaru klínový, u povrchu mírně rozšířený. Naopak svary z laseru mají horní část skoro trojnásobně širší než je kořen svaru. U laserových svarů se také objevily staženiny nebo praskliny (viz obr. 17 - 19) Další rozdíl je v povrchové kvalitě svarů. Laserem svařené vzorky mají na povrchu vidět minimální vrstvičku oxidů, i když byla použita ochranná atmosféra. Také kolem svarů je barevné zabarvení. Vzorky svařené el. paprskem mají povrch naprosto dokonalý. S malým průvarem laserových vzorků nastala obava z toho, aby nedošlo při zkoušce tahem ke smykovému vtrhnutí celého svaru ze spodní části vzorku. Nakonec došlo k lomu ve vrcholu svaru a žádný vzorek neměl tendenci se vytrhnout.





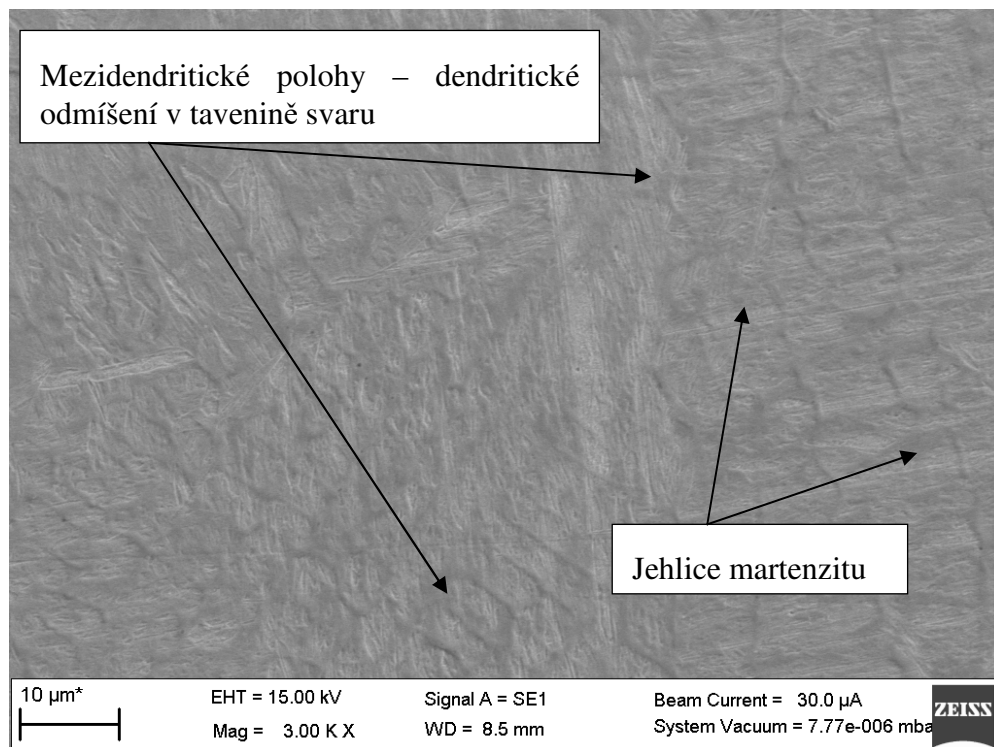
Obr. 18: Vady ve svaru (laser, KAL, 50x)



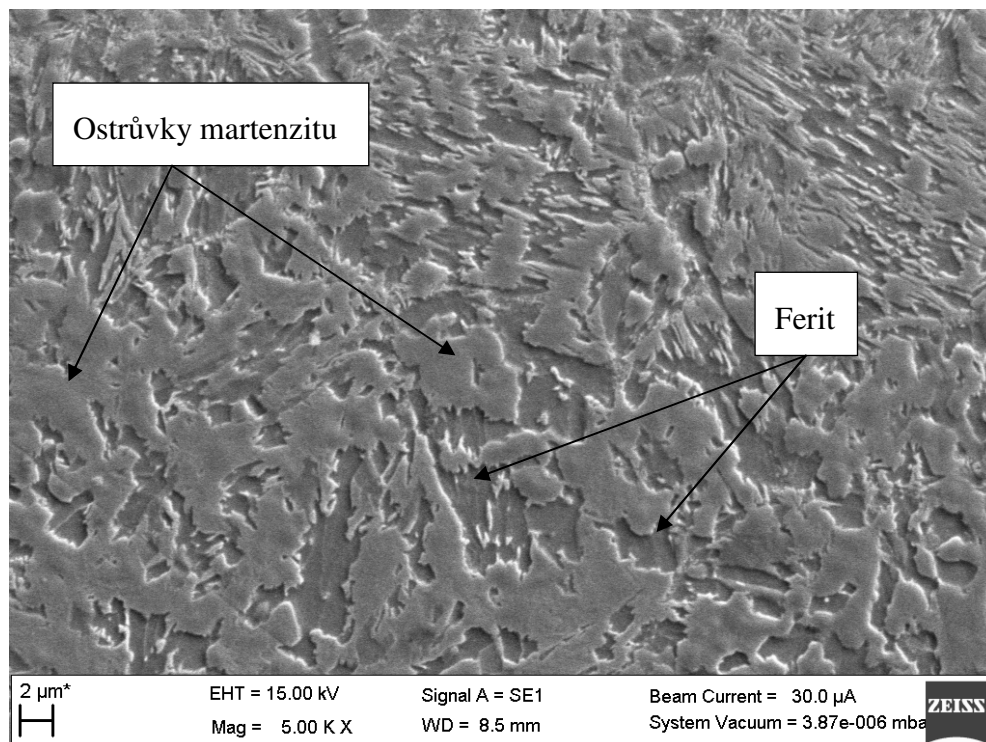
Obr. 19: Vady ve svaru (laser, QP1, 50x)

## 10 Mikrostruktury

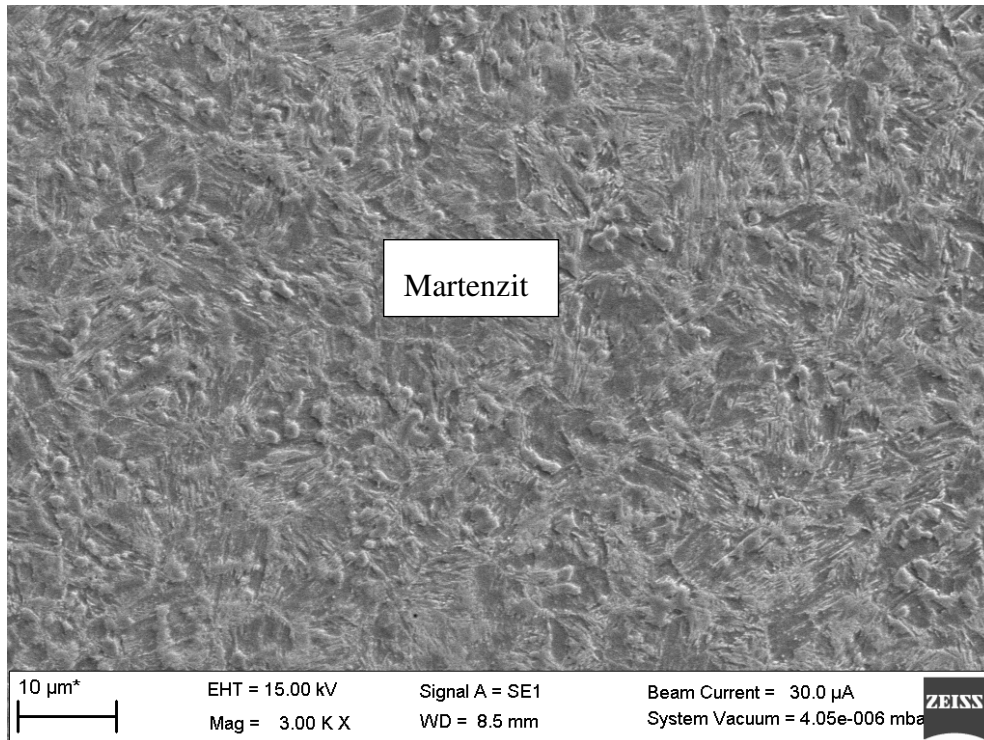
Na vzorkách QP1 byl proveden rozbor mikrostruktur ve svaru, TOO a základním materiálu. Vzorky se fotily na elektronovém řádkovacím mikroskopu. Z fotografií je patrné, že svařovací metoda neměla vliv na mikrostrukturu v materiálu. U laseru i elektronového paprsku jsou stejné struktury. Ve svaru se nacházejí mezidendritické polohy z dendritického odmíšení v tavenině svaru a mezi nimi jsou jehlice martenzitu (Obr. 20 a 23). V TOO se nachází ferit s ostrůvky martenzitu (Obr. 21 a 24). Základní materiál je čistě tvořený martenzitem (Obr. 22 a 25).



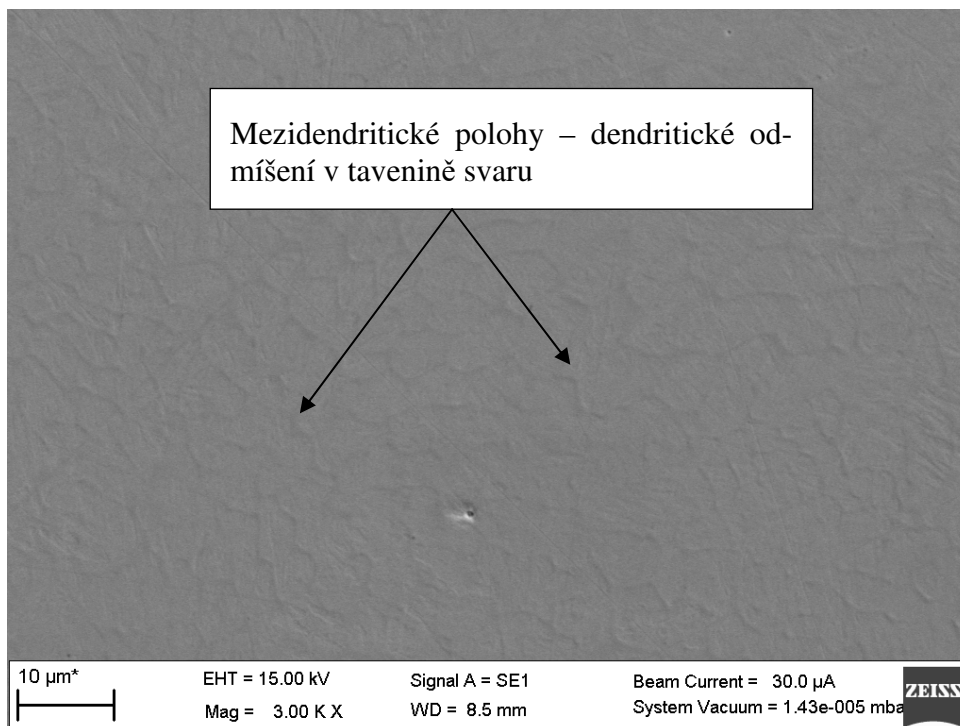
Obr. 20: Mikrostruktura ve svaru (laser, Q1)



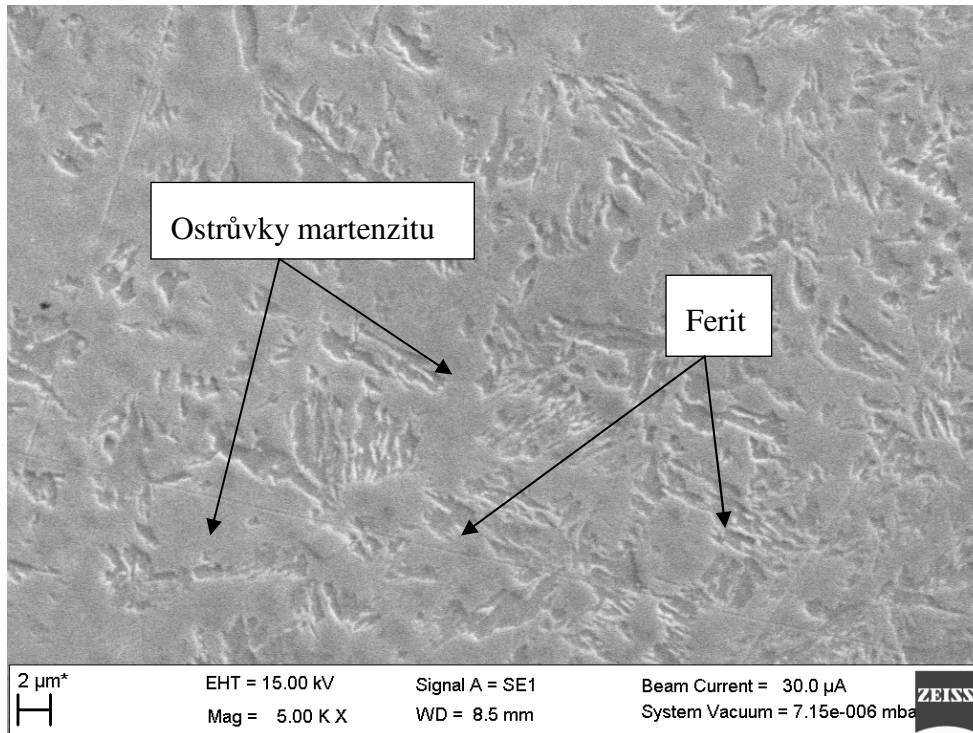
Obr. 21: Mikrostruktura v TOO (laser, Q1)



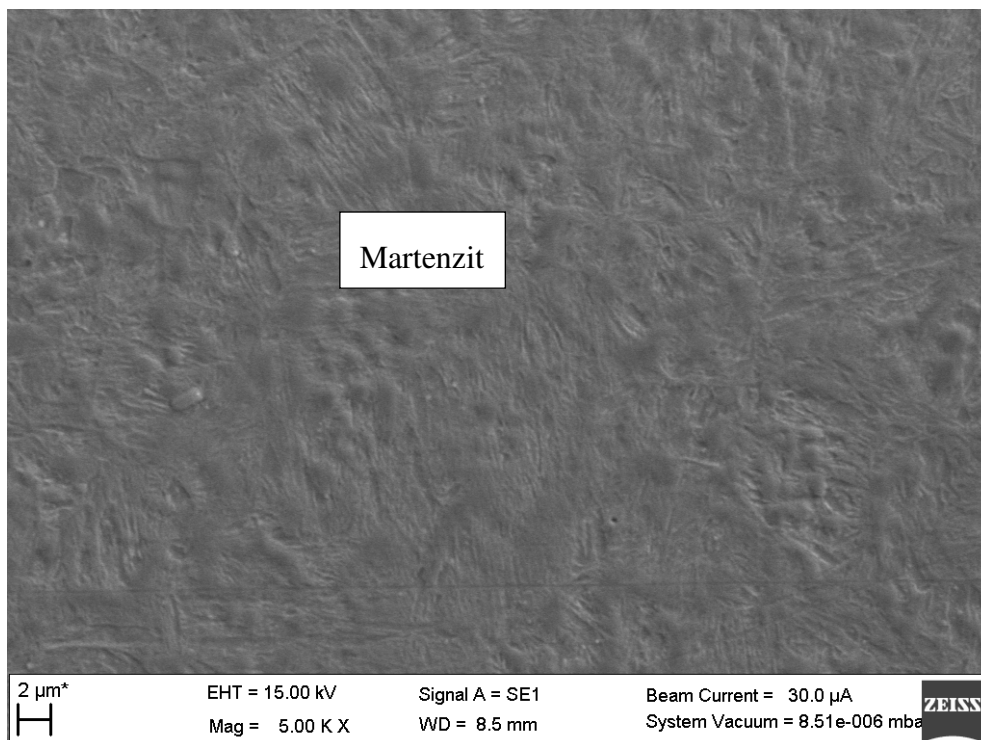
Obr. 22: Mikrostruktura v základním materiálu (laser, QP1)



Obr. 23: Mikrostruktura ve svaru (elektronový paprsek, QP1)



Obr. 24: Mikrostruktura v TOO (elektronový paprsek, QP1)



Obr. 25: Mikrostruktura v základním materiálu (elektronový paprsek, QP1)

## 11 Zkouška tahem

Zkouška tahem byla provedena dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Pro tahovou zkoušku bylo vybráno celkem dvanáct vzorků, z toho bylo šest vzorků zavařeno laserem a zbylých šest bylo zavařeno pomocí elektronového paprsku. Z každé svařovací technologie byly dále vybrány dva vzorky pro každé tepelné zpracování (dva druhy QP procesu a kalení). Zkouška se prováděla na stroji Zwick Z250. Pro všechny vzorky bylo použito předzatížení 30N a rychlost zkoušky byla  $0,00025 \text{ s}^{-1}$ . Dalšími známými hodnotami byl obsah zkušební tyče  $S_0 = 13,31 \text{ mm}^2$  a měřená délka zkušební tyče  $l_0 = 30 \text{ mm}$ . Při zkoušce tahem se musely vystředit upínací čelisti (vzorky byly přeložené přes sebe a proto byly vyosené), aby šlo o čistý tah. Po přetržení vzorků bylo vidět, že i přes vyosení čelistí nebyly vzorky namáhány čistě na tah, ale i na smyk. Na vrcholu "C" svaru bylo vidět minimální prohnutí.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

$R_m$ ..... mez pevnosti v tahu [MPa]

$F_m$ ..... maximální síla pro přetržení [N]

$S_0$ ..... obsah zkušební tyče [mm]

$$A = \frac{\Delta l}{l_0} * 100$$

$A$  ..... tažnost [%]

$\Delta l$  ..... prodloužení [mm]

$l_0$ ..... počáteční délka [mm]

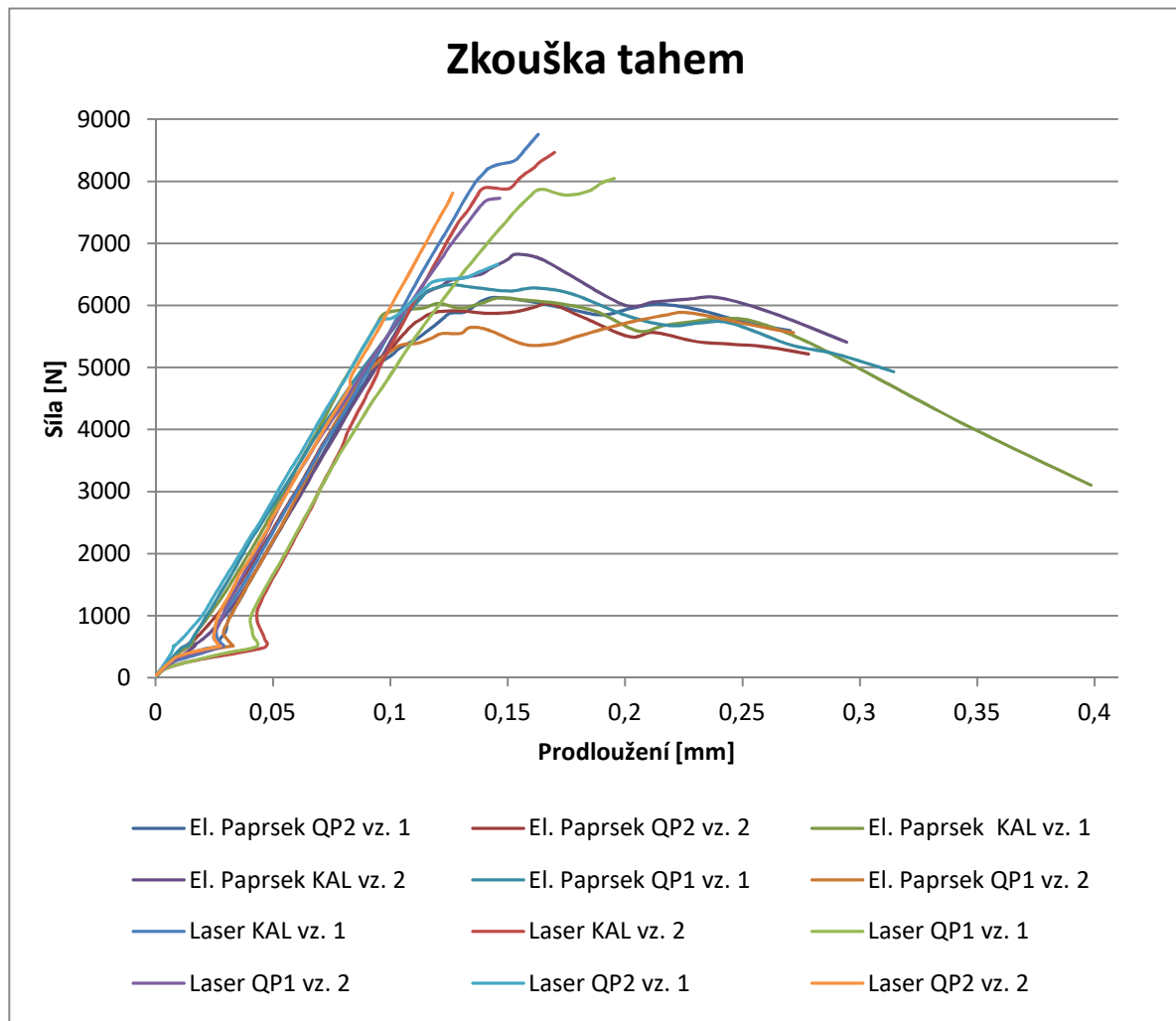
	Síla F [N]	Mez pevnosti [MPa]	Prodloužení [mm]	Tažnost [%]
El. paprsek KAL vz. 1	6150	462	0,40	1,33
El. paprsek KAL vz. 2	6860	515	0,29	0,97
El. paprsek QP1 vz. 1	6370	479	0,31	1,03
El. paprsek QP1 vz. 2	5910	444	0,27	0,90
El. paprsek QP2 vz. 1	6150	462	0,27	0,90
El. paprsek QP2 vz. 2	6060	455	0,28	0,93
Laser KAL vz. 1	8830	663	0,16	0,53
Laser KAL vz. 2	8520	640	0,17	0,57
Laser QP1 vz. 1	8070	606	0,20	0,67
Laser QP1 vz. 2	7810	587	0,15	0,50
Laser QP2 vz. 1	6700	503	0,15	0,50
Laser QP2 vz. 2	7900	594	0,13	0,43

Tab. 3: Naměřené a vypočtené hodnoty z tahové zkoušky

Z naměřených hodnot je vidět, že vzorky zavařené laserem dosahují větší pevnosti než vzorky svařené elektronovým paprskem. Průměrně vydržely vzorky svařené laserem o 1700N více než vzorky svařené elektronovým paprskem. Co se týče tažnosti, vzorky svařené elektronovým paprskem mají skoro dvakrát větší tažnost než vzorky svařené laserem.

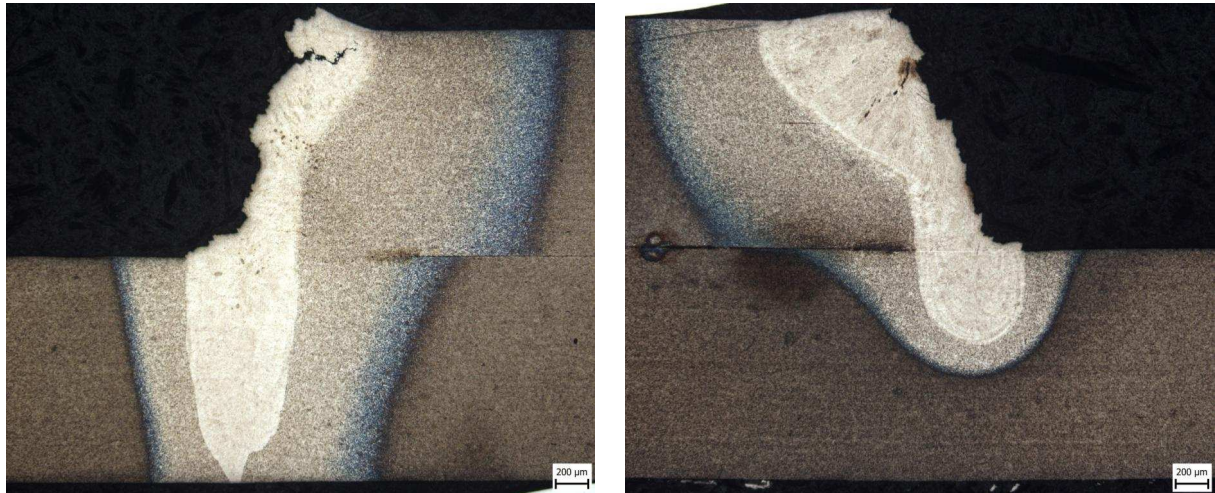
Z hlediska tepelného zpracování a jeho vlivu na výslednou pevnost vzorku jsou vidět rozdíly v pevnosti (je brána průměrná hodnota). U elektronového paprsku nejsou až tak znatelné, ale nejvyšší pevnost měly vzorky kalené. Rozdíl mezi QP1 a QP2 je minimální, přičemž proces QP1 má o trochu větší pevnost v tahu. U vzorků svařených laserem jsou také vidět rozdíly, i když vzorky QP2 byly svařené menším výkonem než vzorky ostatní. Stejně jako u vzorků zavařených pomocí elektronového paprsku, dosáhly největší pevnosti vzorky kalené. Rozdíl mezi vzorky QP1 a QP2 je diskutabilní, ale pokud by se zavařily se stejným výkonem, byl by rozdíl menší. Tepelné zpracování mělo vliv i na výslednou tažnost, kde u

obou svařovacích technologií měly nejvyšší tažnost vzorky kalené a u QP procesů byly výsledky obdobné.



Graf 4: Zkouška tahem

Po přetrhání vzorků byly dva náhodně vybrány na metalografii, aby bylo vidět kudy lom probíhal. U všech vzorků vypadal průběh lomu stejně s tím, že lom nejspíše probíhal uprostřed svaru. Z metalografie se nakonec ukázalo, že lom opravdu probíhal ve svaru, ne v tepelně ovlivněné oblasti (viz. obr. 26 a 27). U vzorku svařeného laserem je vidět, že ve svaru byly i vady, které ale neměly vliv na průběh lomu ve vzorku.



Obr. 26: Průběh lomu (el. paprsek, KAL, 50x) Obr. 27: Průběh lomu (laser, KAL, 50x)

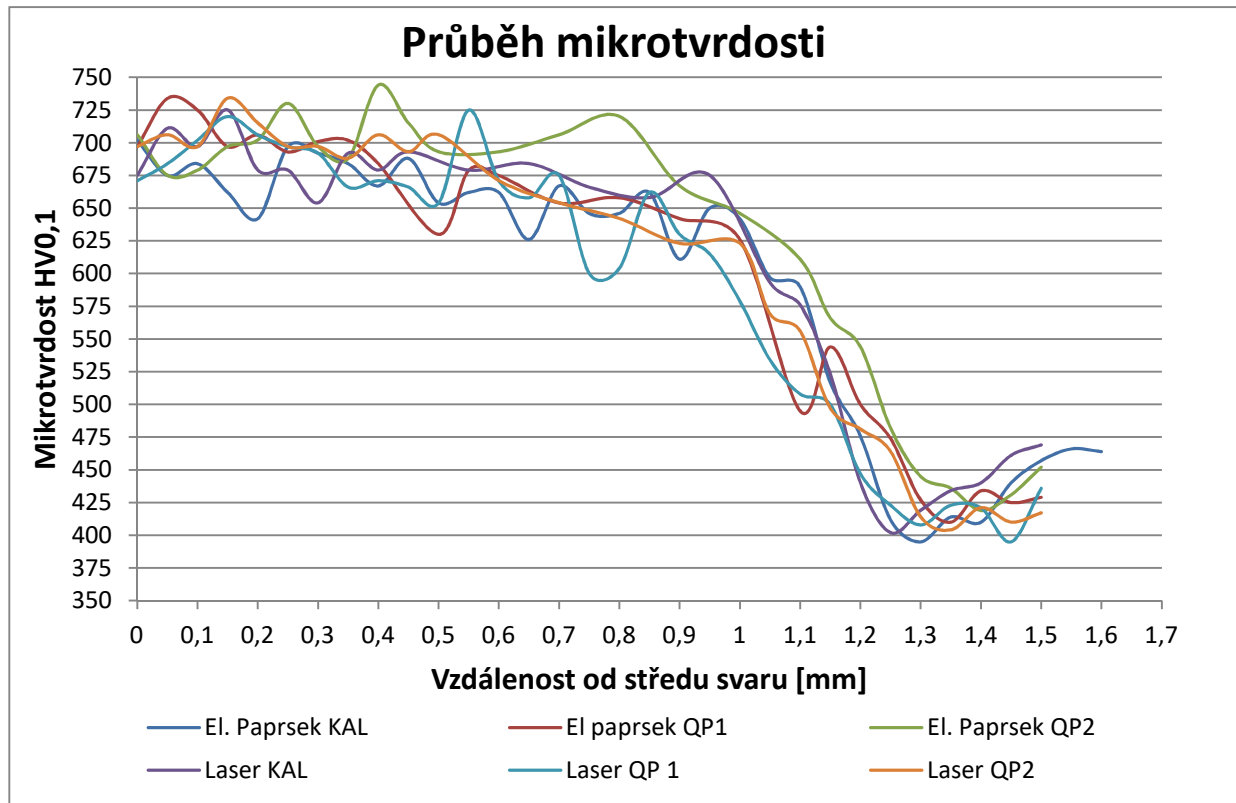
## 12 Mikrotvrдость

Mikrotvrдость byla měřena na stroji UHL VMHT. Pro měření mikrotvrđosti byla zvolena metoda pomocí Vickerse dle normy ČSN EN ISO 6507-1, kde indentorem je diamantový jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$ . Přesněji bylo měření HV 0,1 což znamená, že indentor byl zatížen silou 0,1N. Mikrotvrđost byla měřena na všech vzorcích, ale pouze na podélném řezu. Vpichy byly provedeny od středu svaru postupně až do základního materiálu. Nejprve byly rozestupy provedeny po 0,05mm. U poloviny vzorků se nakonec v některých oblastech použily rozestupy 0,1mm s tím, že na výsledný průběh grafu to nemělo vliv (viz. obr. 28 a 29).

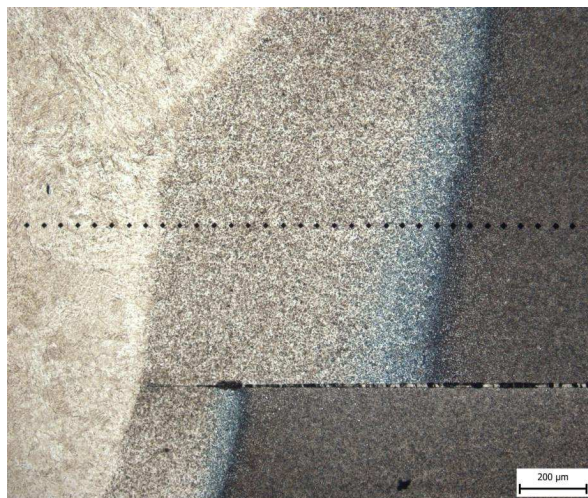
Z naměřených hodnot vyplynulo, že na průběh mikrotvrđosti nemělo vliv tepelné zpracování ani svařovací technologie. Tvrđost začínala přibližně na  $HV_{0,1} = 700$  a končila v základním materiálu na hodnotách kolem  $HV_{0,1} = 400$ .

Průběh mikrotvrđosti je přibližně stejný, až do vzdálenosti od středu svaru cca 0,9 mm až po 1 mm, kde se průběh moc neliší. Přejít mezi svarem a TOO není na průběhu mikrotvrđosti znatelný. Od vzdálenosti 1 mm až po 1,3 mm mikrotvrđost klesá. Klesání mikrotvrđosti je v oblasti, kde TOO přechází v základní materiál. Následně v základním materiálu mikrotvrđost nepatrně vzroste, z čehož vyplývá, že nejnižší mikrotvrđost je v oblasti přechodu TOO v základní materiál.

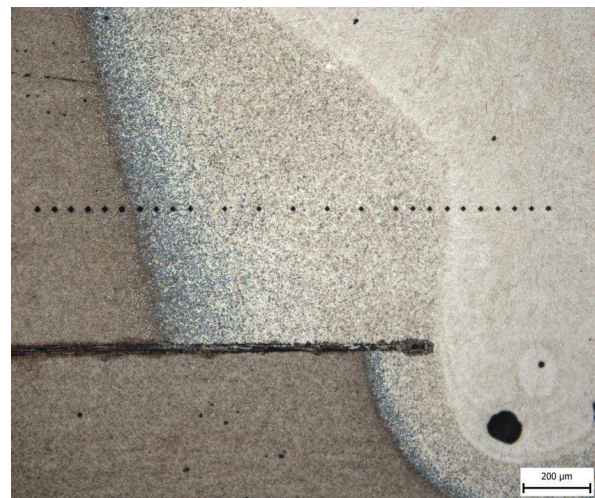




Graf 5: Průběh mikrotvrdosti na vzdálenosti od středu svaru



Obr. 28: Průběh mikrotvrdosti (el. paprsek, KAL, 100x)



Obr. 29: Průběh mikrotvrdosti (laser, KAL, 100x)

## 13 Diskuze výsledků

Svařování probíhalo na vzorcích z materiálu 42SiCr pod interním označením H0. Tyto vzorky byly nadále tepelně zpracovány a to přesněji kalením a dvěma způsoby Q-P procesu. Také nás zajímalo jestli bude mít tepelné zpracování vliv na výslednou pevnost a mikrotvrdost u svařovaných vzorků. Vypočtením vneseného tepla do svarů bylo zjištěno, že do vzorků svařených laserem bylo přivedeno více tepla než do vzorků svařených elektronovým paprskem. Při zavedení účinnosti  $\eta = 0,4$  pro laser a pro elektronový paprsek  $\eta = 0,8$  bylo větší vnesené teplo od elektronového paprsku. TOO je u laserových svarů nepatrně širší než u svarů elektronovým paprskem. Větší vnesené teplo od laseru je také vidět na celkové kvalitě svaru, kde se u některých vzorků objevily staženiny nebo praskliny. Svary z elektronového paprsku jsou jakostně na vyšší úrovni, jak v celkovém průvaru, tak i v pohledové kvalitě svarové housenky. Mikrostruktury nezávisely na svařovací technologii, kde v základním materiálu, TOO i svaru jsou velice obdobné. Z fotografií je patrné, že svařovací metoda a tepelné zpracování nemělo vliv na mikrostrukturu ve výsledném materiálu. Ve svaru se nacházejí mezidendritické polohy z dendritického odmíšení v tavenině svaru a mezi nimi jsou jehlice martenzitu. V TOO se nachází ferit s ostrůvky martenzitu. Základní materiál je čistě tvořený martenzitem.

Z výsledků mikrotvrdosti vyplynulo, že na průběh mikrotvrdosti nemělo vliv tepelné zpracování ani svařovací technologie. Tvrdost začínala přibližně na  $HV_{0,1} = 700$  a končila v základním materiálu na hodnotách kolem  $HV_{0,1} = 400$ .

Ze zkoušky tahem vyplynulo, že vzorky zavařené laserem dosahují větší pevnosti než vzorky svařené elektronovým paprskem. Průměrně vydržely vzorky svařené laserem o 1700N více než vzorky svařené elektronovým paprskem. Největší rozdíl v pevnosti je u kalených vzorků kde se pevnost v tahu lišila o 2500N. Co se týče tažnosti, tak vzorky svařené elektronovým paprskem mají dvakrát větší tažnost než vzorky svařené laserem.

## 14 Závěr

Tato bakalářská práce spočívala ve srovnání dvou moderních svařovacích metod a to svařování laserem a svařování elektronovým paprskem. V rešeršní části byly přiblíženy základní principy daných svařovacích metod včetně využití v dalších technologiích a dále bylo přiblíženo tepelné zpracování vzorků.

V experimentální části bylo naším úkolem porovnání tepelně ovlivněných oblastí a celkového hodnocení svarů. Další porovnání svařovacích metod bylo ve zkoušce tahem, zkoušce mikrotvrdosti a vlivu vneseného tepla do svarů.

Tato práce ukázala srovnání dvou paprskových metod svařování. Výsledky tahových zkoušek ukázaly významné rozdíly v mezi pevnosti a tažnosti při použití laseru a elektronového paprsku. Vyšší pevnost v tahu u vzorků svařených laserem může být způsobena nižším vneseným teplem než u vzorků svařených elektronovým paprskem. Lepší vizuální jakosti svarových spojů bylo dosaženo při svařování elektronovým paprskem, což je dáno procesem probíhajícím ve vakuu. Tato skutečnost však může v praxi představovat určité omezení velikosti svařence (limitovaná velikostí vakuové komory). Ostatní výsledky (zkoušky mikrotvrdosti, strukturní stav) jsou srovnatelné. V obou případech bylo dosaženo velmi kvalitních svarů, což tyto metody předurčuje k významnému průmyslovému využití.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČEZ. Lasery kolem nás [online] [citace 15.10.2016] Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/obsah.htm>
- [2] WIKIPEDIA. Laser. [online] [citace 15.9.2016] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [3] FOTONA. Co je laser a jak funguje [online] [citace 23.10.2016] Dostupné z: <http://www.fotona.cz/cs/technologie/co-je-laser-a-jak-funguje/>
- [4] MM Spektrum. Nekonenční metody obrábění - 4. díl. Ing. Jaroslav Řasa, CSc., Ing. Zuzana Kerečanicinová, Ph.D. [online] [citace 23.10.2016] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- [5] MM Spektrum. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. Ing. Jaroslav Řasa, CSc., Ing. Radka Jindrová [online] [citace 24.10.2016] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
- [6] MM Spektrum. Nekonenční metody obrábění - 5. díl. Ing. Jaroslav Řasa, CSc., Ing. Zuzana Kerečanicinová, Ph.D. [online] [citace 27.10.2016] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-5-dil.html>
- [7] MM Spektrum. Poslední trendy ve svařování laserem. Ing. Pavel Kořán. [online] [citace 27.10.2016] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/posledni-trendy-ve-svarovani-laserem.html>
- [8] KUNCIPÁL, J., PILOUS, V., DUNOVSKÝ, J.: *Nové technologie ve svařování*. Praha, 1984
- [9] MM Spektrum. Průmyslové lasery (2) - svařovací lasery. Ing. Pavel Kořán. [online] [citace 3.11.2016] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>
- [10] MM Spektrum. Průmyslové lasery (3) - laserové svařování. Ing. Pavel Kořán. [online] [citace 7.11.2016] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-3-laserove-svarovani.html>
- [11] MM Spektrum. Zelená vlna pro svařování mědi. Filip Plch. [online] [citace 21.11.2016] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zelena-vlna-pro-svarovani-medi.html>

- [12] MM Spektrum. Laserové svařování - posouzení vlivu ochranného plynu. Ing. Jan Kašpar, Doc. Ing. Stanislav Němeček. [online] [citace 22.11.2016] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani-posouzeni-vlivu-ochranneho-plynu.html>
- [13] WELDING.CZ. Laserové svařování Ing. Jaromír Lukášek, CSc. [online] [citace 24.11.2016] Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/svarovani.htm>
- [14] ÚPT AVČR. Elektronový svazek v technologiích. Ing. Martin Zobač, Ph. D. [online] [citace 24.11.2016] Dostupné z: <http://ebt.isibrno.cz/elektronovy-svazek-v-technologiech>
- [15] MM Spektrum. Elektronové svařování - perspektivní metoda pro speciální materiály. Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze, ÚJV Řež  
Ing. Tomáš Kramár, Ph.D., Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. , Ing. Petr Vondrouš, Ph.D. , Ing. Karel Kovanda, Ph.D., Ing. Jaroslav Málek, Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. [online] [citace 30.11.2016] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/elektronove-svarovani-perspektivni-metoda-pro-specialni-materialy.html>
- [16] KRAUS, V.: *Technologie tepelného zpracování*. Plzeň, 1992
- [17] METAL 2010. ANALYSIS OF 42SiCr STEEL AFTER QUENCHING AND PARTITIONING BY LASER SCANNING CONFOCAL MICROSCOPY. Ludmila KUČEROVÁ , Hana JIRKOVÁ, Daniela HAUSEROVÁ , Bohuslav MAŠEK. [online] [citace 2.12.2016] Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2010/sbornik/lists/papers/217.pdf>