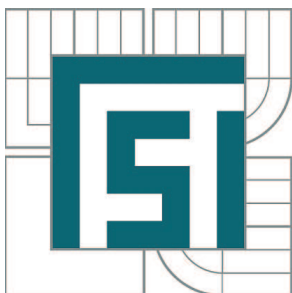


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## SVAŘOVÁNÍ JEMNOZRNNÝCH OCELÍ TYPU DOCOL VLÁKNOVÝM YBYAG LASEREM

WELDING OF FINEGRAIN STEEL FROM RANGE OF DOCOL STEEL BY YBYAG FIBER LASER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. KATEŘINA KOLLNEROVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Kateřina Kollnerová

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

### **Svařování jemnozrnných ocelí typu Docol vláknovým YbYAG laserem**

v anglickém jazyce:

### **Welding of finegrain steel from range of Docol steel by YbYAG fiber laser**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jemnozrnné oceli z řady Docol jsou moderní typy vysokopevnostních jemnozrnných ocelí, které se stále častěji využívají v automobilovém průmyslu. Jednou z velmi perspektivních svařovacích metod pro tyto oceli je svařování laserem. Pro dané druhy bude nutné prostudovat možnosti technologie a navrhnout svařovací postup, zjistit strukturní a mechanické vlastnosti výsledného spoje. Vyzkoušet i svaření různých druhů navzájem.

Cíle diplomové práce:

Seznámení se s možnostmi technologie laserového svařování.  
Seznámení se s metodikou návržení svařovacího postupu pro danou technologii a typ materiálu.  
Seznámit se se specifickými vlastnostmi svařovaného materiálu, zjistit technologické a technické limity technologie a materiálu.

Seznam odborné literatury:

- 1.BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technológie,1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
- 2.DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4
- 3.TURŇA M., Špeciálne metódy zvarovania, ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9
- 4.KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
- 5.KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
- 6.KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 2.11.2012

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

KOLLNEROVÁ KATEŘINA Svařování jemnozrnných ocelí typu DOCOL vláknovým Yb:YAG laserem

---

Projekt vypracovaný v rámci inženýrského studia oboru Strojírenská technologie předkládá experiment svařování vysokopevných ocelí Docol s využitím vláknového laseru. Součástí práce je literární rešerše popisující vlastnosti svařovaného materiálu, princip a jednotlivé typy laserů a technologii svařování laserem. V experimentální části bylo provedeno ověření nastavených svařovacích parametrů. Závěrem práce je vyhodnocení jednotlivých experimentů.

**Klíčová slova:** Docol, vysokopevné oceli, vláknový laser, laserové svařování, svařitelnost

## **ABSTRACT**

KOLLNEROVÁ KATEŘINA Welding of finegrain steel from range of Docol steel by YbYAG fiber laser

---

The project developed in the framework of engineering degree in Mechanical Engineering Technology presents experiment welding of high strength steels Docol using a fiber laser. The work is a literature review describing the properties of welded materials, principles and different types of lasers and laser welding technology. In the experimental part, the validation set welding parameters. Finally, work is the evaluation of experiments.

**Key words:** Docol, high strenght steel, fiber laser, laser welding, weldability.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KOLLNEROVÁ, Kateřina: *Svařování jemnozrnných ocelí typu DOCOL vláknovým Yb:YAG laserem*. Brno, 2013. 62 s., 6 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce RNDr.Libor Mrňa, Ph.D.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

Ve Vranovské Vsi dne 21.5.2013

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu RNDr. Liborovi Mrňovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Tato práce vznikla za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017).

# **OBSAH**

**Zadání**

**Abstrakt**

**Bibliografická citace**

**Čestné prohlášení**

**Poděkování**

**Obsah**

ÚVOD.....	11
1 LASEROVÁ TECHNOLOGIE.....	12
1.1 Historie a vývoj laseru.....	12
1.2 Princip laseru.....	12
1.3 Typy laserů.....	14
1.4 Základní prvky laseru.....	15
1.5 Interakce laserového paprsku s materiálem.....	16
1.6 Druhy laserů používaných v průmyslu.....	17
1.7 Využití laseru v průmyslu.....	19
2 SVAŘOVÁNÍ LASEREM.....	20
2.1 Mechanismus svařování.....	21
2.1.1 Kondukční svařování.....	21
2.1.2 Svařování penetrační metodou.....	22
2.2 Parametry svařování.....	23
2.2.1 Kontinuální režim.....	23
2.2.2 Pulzní režim.....	24
2.3 Ochranné plyny.....	24
2.4 Nejčastěji používané typy svarů.....	25
3 ZKOUŠENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ.....	25
3.1 Vady svarových spojů.....	25
3.2 Rozdělení vad svarů a jejich hodnocení.....	26
3.3 Kontrola svarů.....	27
3.4 Nedestruktivní zkoušky svarů.....	27
3.4.1 Vizuální zkouška.....	27
3.4.2 Penetrační (kapilární) zkouška.....	28
3.4.3 Magnetická prášková zkouška.....	28
3.4.4 Zkouška prozářením (RTG).....	29
3.4.5 Zkouška ultrazvuková [27], [31].....	30
3.5 Destruktivní zkoušky.....	31
3.5.1 Příčná zkouška tahem.....	31

3.5.2	Zkouška ohybem.....	32
3.5.3	Zkouška rozlomením .....	32
3.5.4	Zkouška hloubením podle Erichsena .....	33
3.5.5	Zkouška tvrdosti podle Vickerse .....	33
3.5.6	Zkouška makroskopická a mikroskopická.....	33
4	OCELI VYŠŠÍ PEVNOSTI.....	34
4.1	Fyzikálně metalurgická podstata zvýšení pevnosti.....	34
4.1.1	Zpevnění substitučními a intersticiálními atomy.....	34
4.1.2	Zpevnění hranicemi zrn a subzrn.....	35
4.1.3	Zpevnění precipitační .....	35
4.1.4	Vliv struktury matrice na zpevnění.....	36
4.2	Aplikace zpevňovacích mechanismů.....	36
4.2.1	Legování a mikrolegování ocelí .....	37
4.2.2	Termomechanické zpracování ocelí .....	37
4.3	Druhy vysokopevnostních ocelí.....	40
4.4	Využití ocelí.....	42
4.5	Svařitelnost jemnozrnných ocelí.....	43
5	PRAKTICKÁ ČÁST .....	45
5.1	Charakteristika svařovaného materiálu DOCOL 1200M .....	45
5.2	Metodika zkoušení.....	45
5.3	Použitá zařízení.....	46
5.4	Postup svařování .....	47
5.5	Vizuální kontrola .....	48
5.6	Příčná zkouška tahem .....	49
5.7	Zkouška tvrdosti .....	56
5.8	Makrostruktura a mikrostruktura .....	56
5.9	Technicko – ekonomické zhodnocení.....	60
6	ZÁVĚR .....	61

**Seznam použité literatury a zdrojů**

**Seznam použitých symbolů a zkratk**

**Seznam příloh**

**Seznam tabulek**

**Seznam obrázků**

## ÚVOD

Laserové technologie jsou v posledních letech velmi rozšířenou metodou výroby v průmyslu, ale uplatňují se i v jiných oborech např. medicíně. Laser lze využít při řezání materiálu stejně jako při svařování. Rozvoj laseru vede k nahrazování konvenčního způsobu svařování jako je metoda MIG metodou svařování pomocí laserového paprsku.

Cílem diplomové práce je seznámení se s možnostmi technologie laserového svařování. Tyto poznatky dále aplikovat na svaření materiálu typu Docol 1200M (jemnozrnná ocel) pomocí YbYAG laseru. V úvodu práce je popsáno, k jakým účelům lze využít laser, jeho počátky a typy laserů. V experimentální části budou provedeny svary na oceli Docol 1200M pomocí laseru. Tyto vzorky budou následně podrobeny destruktivním zkouškám, které budou provedeny na Fakultě strojní VUT Brno. Na vzorcích se provede zkouška tahem, zkouška ohybem, analýza mikrostruktury a mikrotvrdosti svarového spoje. V závěru diplomové práce bude vyhodnocení vhodnosti svařování laserem na daný typ oceli.



Obr. 1 Laser [3, 9, 10, 14, 15, 16].

# 1 LASEROVÁ TECHNOLOGIE

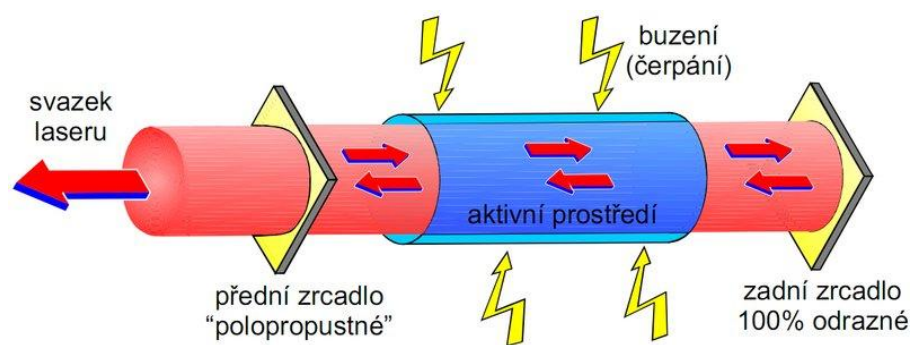
Laser (z angl. **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) v překladu znamená zesílení světla stimulovanou emisí záření. K zesílení světla dochází opakovaným průchodem fotonů médii se specifickými vlastnostmi.

## 1.1 Historie a vývoj laseru [4]

Počátek laseru nebyl nijak výrazný. V 19. století přišel J.C.Maxwell s teorií, že světlo není nic jiného než vlnění elektromagnetického pole. Max Planck v roce 1900 přišel s teorií, že záření je složeno z malých částech energie tzv. „kvanty“. Energie každého kvanta je úměrná kmitočtu záření. Čímž dal základ kvantové fyzice. Historie laseru se začíná psát v roce 1917, kdy Albert Einstein ukázal, že musí existovat stimulovaná emise. V roce 1939 ruský fyzik V.A.Fabrikant vyslovil možnost využití stimulované emise k zesílení elektromagnetického záření procházejícího prostředím. Teprve v roce 1952 moskevští fyzikové N.G.Basov a A.M.Prochorov využili teorii stimulované emise k využití zesilování záření v mikrovlnné oblasti, využili toho u molekulárního svazkového generátoru – MASERu pracujícím se svazkem molekulárního čpavku. První generátor maser byl sestaven v roce 1954. V roce 1960 byl sestaven první nedokonalý rubínový laser T.Maimanem. Rok 1962 první polovodičový laser z rukou R.Halla. Postupem času docházelo k zdokonalování laseru, především jeho aktivního prostředí. V roce 1964 byl sestaven první CO2 laser K.Patelamem a první Nd:YAG laser J. F. Geusicem a R.G.Smithem. V České republice byl první laser použit v roce 1963.

## 1.2 Princip laseru [1],[2]

Laser je optický zesilovač, který generuje elektromagnetické záření pomocí procesu stimulované emise fotonů. Základem laseru je aktivní prostředí, které je buzeno (opticky, elektricky apod.). Obecné schéma laseru obr. 2.

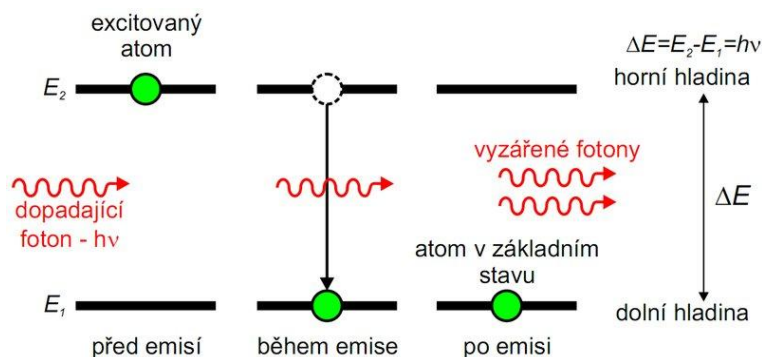


Obr. 2 Obecné schéma laseru [2].

Při procesu buzení dodáváme do laseru energii, která poté pomocí stimulované emise vyzáří laserový svazek.

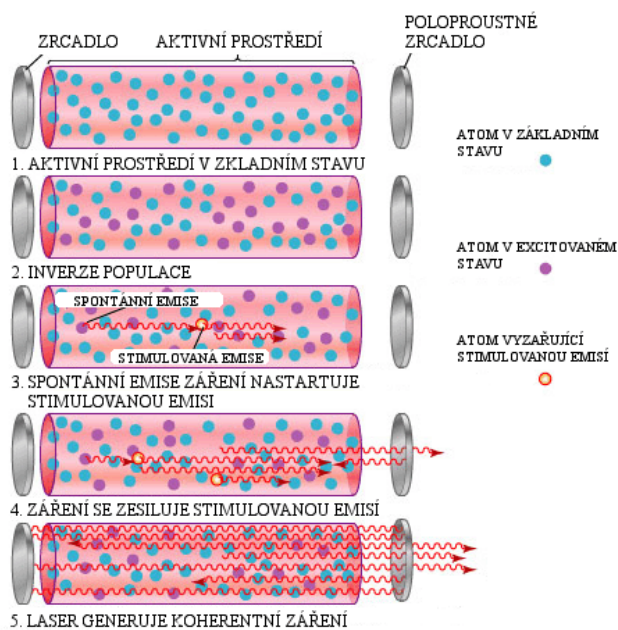
Obecně lze říci, že k tomu abychom mohli vyzářit laserový svazek, potřebujeme mít v aktivním prostředí element (atom, vibrační stav molekuly, chemická vazba apod.) v základním stavu s nižší energií nebo v excitovaném (vybuzeném) stavu s vyšší energií. Při přechodu elementu z vyššího energetického stavu do nižšího dochází k vyzáření fotonu. K tomuto přechodu dochází spontánně a prostředí má tendenci být ve stavu co nejnižší energie – stav termodynamické rovnováhy. Díky tomuto buzení je tento stav porušen a aktivní prostředí převedeno do excitovaného stavu, kdy je většina elementů ve stavu s vyšší energií (tento stav se nazývá inverze populace). Právě v tento okamžik můžeme energii dodanou aktivnímu prostředí přeměnit na laserový svazek pomocí stimulované emise. Princip stimulované emise viz obr. 3. Jde o lavinovitý efekt, kdy foton dopadající na excitovaný atom,

způsobí jeho přechod z horní na dolní energetickou hladinu a zároveň dojde k emisi dalšího fotonu.



Obr. 3 Princip stimulované emise [2].

Díky odrazu fotonů od zrcadel rezonátoru dochází k rapidnímu nárůstu počtu fotonů (lavinovitý efekt) a uvolnění energie v podobě laserového svazku fotonů viz obr. 4.



Obr. 4 Základní princip laseru [2].

### 1.3 Typy laserů [4], [5], [7]

Existuje mnoho typů laserů, základní princip konstrukce je podobný. Lze je dělit podle několika kritérií.

Tabulka 1 Typy laserů [7]

---

#### Podle aktivního prostředí

---

<i>pevnolátkové</i>	polovodičové diskové vláknové tyčové
<i>kapalinové</i>	
<i>plynové</i>	
<i>plazmatické</i>	

---

#### Podle režimu generace

---

<i>kontinuální</i>	
<i>pulzní</i>	pracující v režimu volné generace pracující v režimu spínání zisku pracující v režimu synchronizace módů

---

#### Podle způsobu čerpání

---

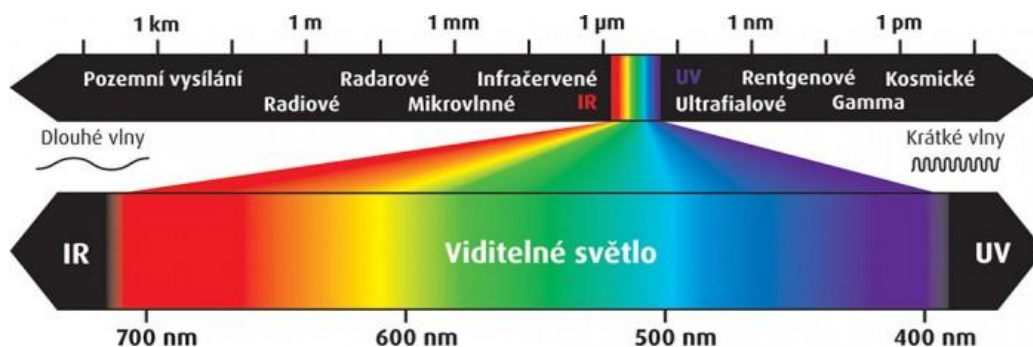
<i>opticky čerpané</i>	koherentně nekoherentně
<i>elektrickým výbojem</i>	
<i>chemickou reakcí</i>	
<i>elektronovým svazkem</i>	

---

#### Podle frekvenční oblasti

---

<i>submilimetrové</i>	
<i>infračervené</i>	(780 nm – 1 mm)
<i>viditelné</i>	(780 – 360 nm)
<i>ultrafialové</i>	(10 – 360 nm)
<i>rentgenové</i>	



Obr. 5 Vlnové délky laserů [5].

K vedení laserového paprsku na místo určení se používají:

- optická vlákna – použití u pevnolátkových laserů s vlnovou délkou svazku 1,064  $\mu\text{m}$  (převážně u robotizace),
- soustava zrcadel – použití u  $\text{CO}_2$  laserů spolu s laserovou pracovní hlavou zajišťují přenos laserového svazku, jehož vlnová délka je 10,6  $\mu\text{m}$ .

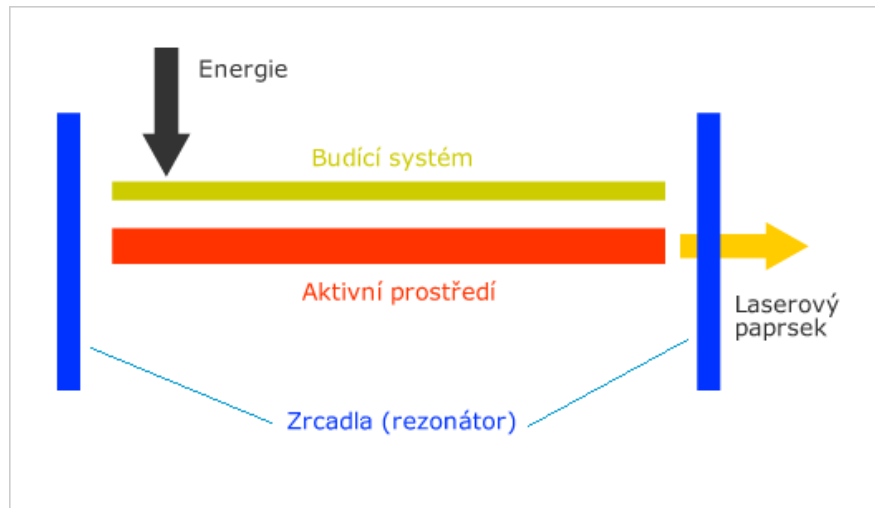
#### Vlastnosti laserového paprsku:

- tvořen elektromagnetickým zářením,
- vynikající fokusovatelnost,
- šíří se přímočaře rychlostí světla s minimální rozbíhavostí,
- koherentní – částice světelné vlny mají stejnou fázi (v rovině šíření i v rovině kolmé),
- má schopnost přenášet značné množství energie,
- monochromatický – záření má jednu vlnovou délku a jednu barvu.

#### 1.4 Základní prvky laseru [7]

Mezi základní prvky laseru patří (obr. 6):

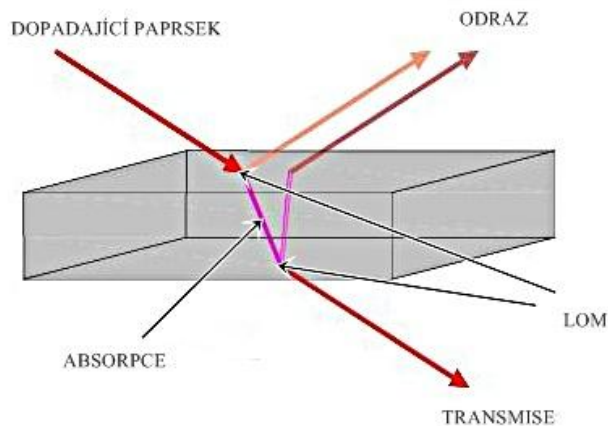
- **aktivní prostředí** tvoří látka, která je schopná zesílit záření jí procházející. Aktivní prostředí může tvořit krystal, plyn, diodový přechod nebo kapalina,
- **čerpací (budící) zařízení** zajišťuje dodávku energie aktivnímu prostředí. Tuto energii lze získat elektrickým výbojem, chemickou reakcí nebo optickým zářením,
- **optický rezonátor** tvoří jej zrcadla, která obklopují aktivní prostředí. Zajišťuje zvýšení počtu stimulovaných přechodů oproti spontánním. Svazek, který vystupuje z aktivního prostředí, se odráží od zrcadel a vrací se zpět do prostředí, kde zajišťuje vznik dalších stimulovaných emisí (tzv. zesílení svazku). Jakmile svazek dosáhne požadované intenzity, opustí rezonátor jedním ze zrcadel, které je polopropustné,
- **systém vedení svazku a pracovní hlava** zajišťuje fokusaci, dále vede svazek k místu určení,
- **chladicí systém,**
- **řídící jednotka,**
- **motorizované jednotky a roboti.**



Obr. 6 Hlavní součásti laseru [8]

### 1.5 Interakce laserového paprsku s materiálem [13], [42]

Hlavním předpokladem pro efektivní využití laserového paprsku je jeho interakce s povrchem materiálu (viz. obr. 7) a to především absorpce záření tímto materiálem. Při absorpci vzniká teplo důležité především u svařování nebo řezání. Účinné pohlcení a následná změna energie na teplo je důležitým parametrem při použití laseru v praxi.

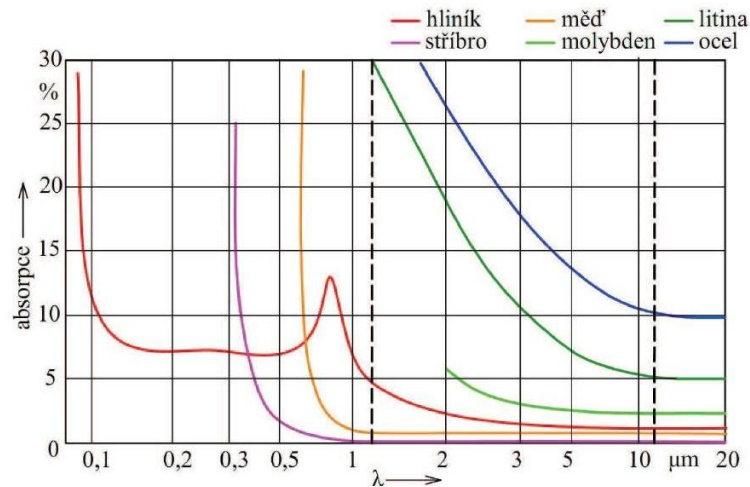


Obr. 7 Interakce paprsku s povrchem materiálu [13].

Laserový paprsek je nositelem energie. Při dopadu paprsku na povrch materiálu je jeho energie částečně absorbována (pohlčena), částečně prochází (transmise) a částečně se odráží od povrchu. U materiálů, které nejsou průhledné, jako jsou kovy, k průchodu paprsku materiálem nedochází. Důsledkem interakce paprsku s povrchem materiálu dochází k rychlému zahřívání povrchové vrstvy.

Na interakci paprsku má velký vliv nejen laserový paprsek, ale i obráběný materiál. Absorpce závisí na vlnové délce laserového záření, viz obr. 8. Všeobecně platí, čím vyšší vlnová délka, tím klesá koeficient absorpce (technicky vzato: čím vyšší koeficient, tím lepší absorpce). Absorpce závisí i na teplotě a tím i s vodivostí u kovů. Kovy s dobrou elektrickou vodivostí mají nízký koeficient absorpce. Významný vliv na absorpci paprsku má drsnost

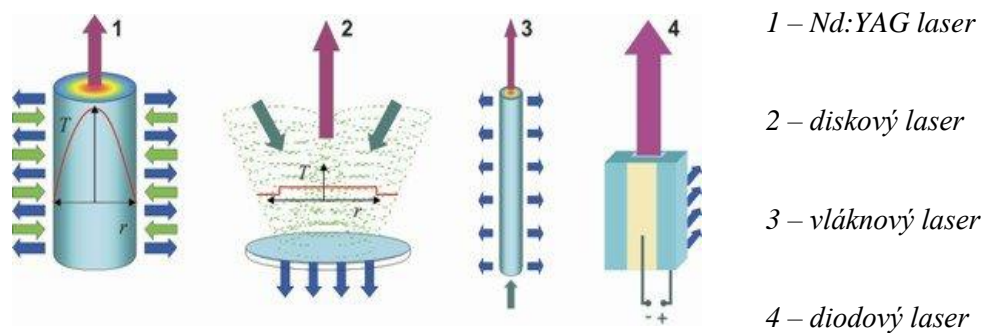
povrchu. Vysoká drsnost povrchu zapříčiní vyšší absorpci paprsku. Naopak u hladkých povrchů dochází k horší absorpci paprsku a musí být na povrch materiálu aplikován speciální povlak pro snížení odrazu paprsku.



Obr. 8 Pohltivost laserového záření různými materiály v závislosti na vlnové délce  $\lambda$  [42]

### 1.6 Druhy laserů používaných v průmyslu [6], [57]

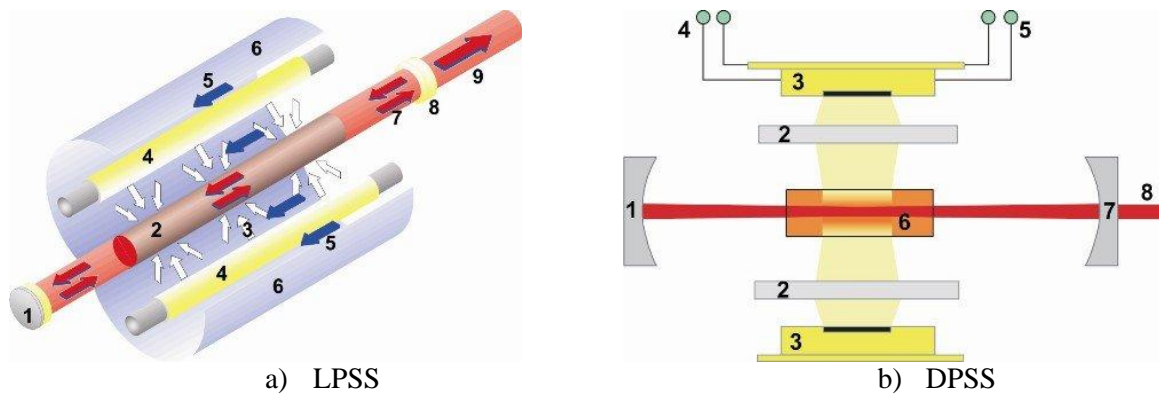
V současné době se v průmyslu používá 5 druhů laserů: plynové lasery na bázi CO<sub>2</sub>, Nd:YAG a jeho varianty – diskové, vláknové a diodové lasery (viz. obr. 9).



Obr. 9 Pevnolátkové lasery. Vysvětlivky k šipkám: modré – chlazení, zelené – buzení, fialové – svazek laseru. Červeně je zobrazen teplotní profil v aktivním médiu. U diodového laseru je buzení přímým elektrickým proudem [6].

### Nd:YAG laser

Nd:YAG je pevnolátkový laser (solid state) s aktivním prostředím tvořeným maticí umělého YAG krystalu (yttrium-aluminium-granát). Nd:YAG laser má aktivní prostředí ve tvaru tyčinky (délka 15-20 cm, průměr řádově v mm). Tento laser je historicky nejstarší typ nasazený v průmyslu. Jeho vlnová délka je řádově 1μm. Používají se dva typy laseru: lasery buzené výbojkami (LPSS – lamp pumped solid state obr.10a) nebo laserovými diodami (DPSS – diode pumped solid state obr.10b). DPSS Nd:YAG lasery mají vyšší účinnost a lepší kvalitu svazku. LPSS Nd:YAG lasery se používají zejména v pulzním režimu pro laserové svařování.



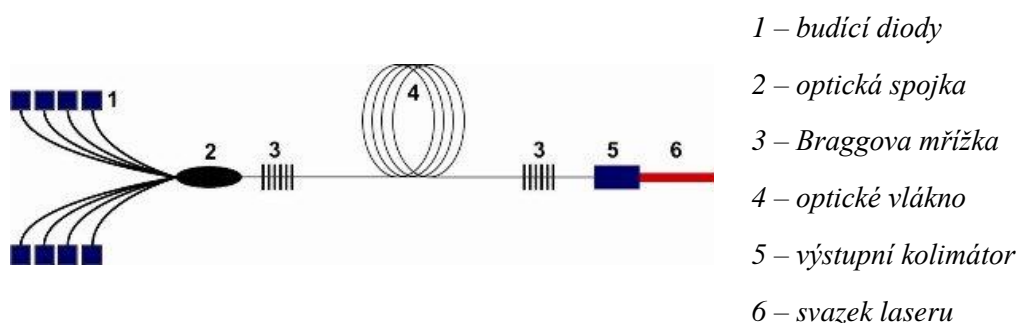
Obr. 10 Nd:YAG laser [6].

### Diskový laser

Princip podobný jako u Nd:YAG laseru, ale aktivní prostředí je zde tvořeno malým diskem. Výhodou je rovný teplotní profil po celém disku, který dovoluje dosáhnout vysokých výkonů až 16 kW s dobrou kvalitou výstupního svazku. Nevýhoda diskových laserů je menší účinnost (15 - 20%).

### Vláknový laser

Vláknový laser je nejmodernější typ pevnolátkového laseru, kde aktivní prostředí tvoří dlouhé optické vlákno dopované ytterbiem (obr. 11).



Obr. 11 Vláknový laser [6].

Výhodou vláknového laseru je jeho jednoduchost, celý laser je tvořen optickým vláknem. Robustnost a modularita je též výhodou. Díky laserovým modulům může být výkon laseru navýšen až na 80 kW a to pouhým napojováním modulů.

K dalším nesporným výhodám vláknových laserů patří i vysoká účinnost (30-35 %) a dlouhá životnost (až 100 000 h). Nejnižší provozní náklady a téměř nulové nároky na údržbu řadí vláknové lasery mezi špičku v tomto oboru. Vláknové lasery mohou dosáhnout větší hloubky provaření a až 2 krát vyšší svařovací rychlost v porovnání se staršími typy Nd:YAG.

### Diodový laser

Diodový laser generuje záření přímo v polovodiči (GaAs, AlGaAs) v PN přechodu průchodem elektrického proudu. Tyto mikroskopické emitery se skládají do řad délky několika mm a výkonu cca 10 W, které se dále skládají na sebe do sloupců o výkonu až 600 W. Pospojováním sloupců k sobě se dá dosáhnout výkonu v řádech až kW. Nevýhodou

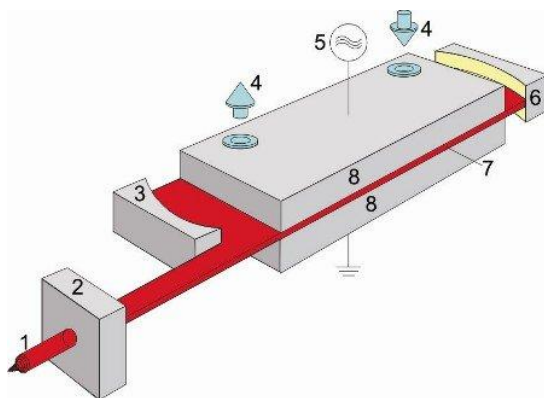
diodového laseru je jeho rozbíhavost paprsku, čímž nelze zaměřit paprsek na konkrétní místo. Výhodou je jeho velká účinnost 50 – 60 %.

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

CO<sub>2</sub> lasery se řadí do kategorie plynových laserů. Aktivní prostředí tvoří směs plynů s CO<sub>2</sub>. V průmyslové praxi mají využití lasery, které jsou buzeny radiofrekvenčně (RF) nebo elektrickým výbojem (DC). Dále se CO<sub>2</sub> lasery dělí podle uzavřenosti rezonátoru na tzv. sealed off lasery s hermeticky uzavřeným rezonátorem a na tzv. průtočné lasery, kdy plyn rezonátorem musí proudit neustále (nutné u vysokých výkonů laserů).

Základní princip laseru je na obr. 12. Pomocí radiofrekvenčního vlnění dochází k buzení aktivního plynu. Vlnění probíhá mezi dvěma elektrodami, které zároveň díky své velké ploše zajišťují i difúzní chlazení plynu. Tyto lasery mají vysokou spolehlivost, dlouhou životnost a nízké provozní náklady.

Tyto lasery se používají pro značení, gravírování a řezání nekovů, kdy nelze využít předchozí typy laserů. Další aplikací je řezání a svařování až do výkonu 20 kW.



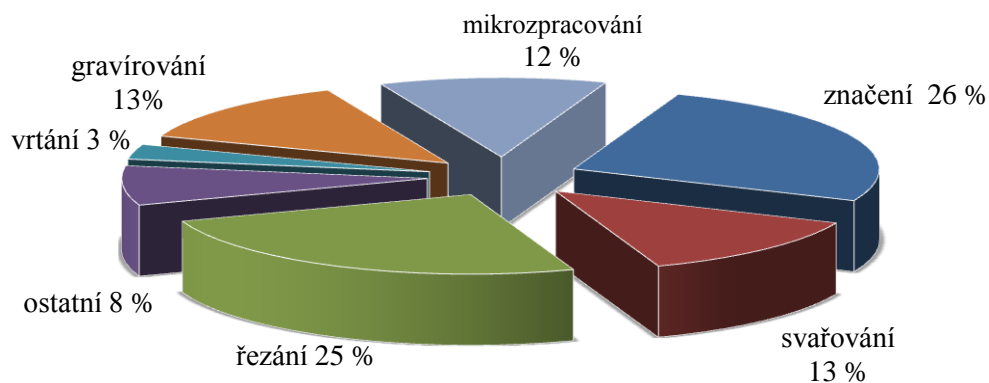
- 1 – výstupní svazek
- 2 – tvarovač svazku
- 3 – výstupní zrcadlo
- 4 – chlazení
- 5 – RF buzení
- 6 – zadní zrcadlo
- 7 – RF excitační výboj
- 8 – velkoplošné elektrody

Obr. 12 RF DC (radiofrekvenčně buzený, difúzně chlazený) CO<sub>2</sub> laser [6]

### 1.7 Využití laseru v průmyslu [7], [11], [12]

Laser se v průmyslu využívá především v oblasti obrábění a opracování materiálu. Díky schopnosti fokusace vystupujícího svazku na velmi malý průměr (10 až 100 μm) je laser zdrojem záření s vysokou plošnou hustotou. Soustředěním takto vysoké plošné hustoty lze dosáhnout vysoké teploty v místě dopadu fokusovaného svazku a tím k ohřevu materiálu pouze v místě dopadu, zároveň nedochází ke vzniku tepelně ovlivněné oblasti. Důsledkem toho lze odpařovat povrchové vrstvy materiálu, nebo odpařovat materiál bez narušení jeho vnitřní struktury. Záření z této energie je i naprosto čisté a tím pádem nevznáší do místa obrábění nečistoty, ohřev lze provádět i ve vakuu.

Využitím všech těchto vlastností lze umožnit široké spektrum využití laseru v průmyslu. Mezi průmyslové aplikace využívající těchto vlastností zahrnujeme laserové obrábění, vrtání, svařování, řezání, kalení, gravírování. Výhodou laseru je jeho schopnost univerzálnosti použití. Použitím jediného laseru o výkonu několika kilowattů lze změnou vstupních parametrů, jako jsou geometrie ozařování, volba časových prodlev a použitím vhodných přípravků provádět veškeré možné tepelné úpravy materiálů. Na obr. 13 je zachycen procentuální podíl jednotlivých laserových technologií.

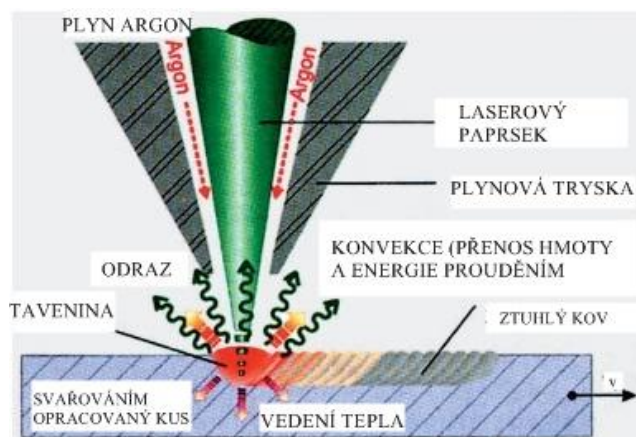


Obr. 13 Procentuální podíl jednotlivých laserových technologií [11]

## 2 SVAŘOVÁNÍ LASEREM [17], [18], [22]

Svařování pomocí laseru ovlivňuje materiál v okolí svaru a často degraduje původní vlastnosti materiálu. U vysokopevných a jemnozrnných ocelí se tyto problémy vyskytují výrazněji. Výsledky dosažené v současné době ukazují, že řada problémů vznikajících při svařování běžnými obloukovými metodami, může být potlačena použitím vysoce intenzivního laserového paprsku. Největší výhodou použití laseru ke svařování je minimální vnesené teplo do svarového spoje, a tím malá tepelně ovlivněná oblast. Díky odlišné geometrii svaru, zejména poměr mezi šířkou a hloubkou svaru, přináší další pozitivum v podobě menších deformací. Schéma fungování laseru je na obr. 14.

Svařování laserem je proces, při kterém dochází ke spojení dvou materiálů pomocí tepla vneseného koherentním světelným paprskem. Fokuseovaný laserový paprsek má spolu se svazkem elektronů nejvyšší koncentraci energie.



Obr. 14 Schéma fungování laseru při svařování [22]

Tabulka 2 Srovnání parametrů svařování s ostatními metodami [18]

Metoda	Hustota energie [W.cm <sup>2</sup> ]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka / hloubka svaru [mm]	Svařovací rychlost [mm.min <sup>-1</sup> ]
Laser	10 <sup>7</sup> – 10 <sup>9</sup>	25	0,1 – 0,5	až 10
Plamen	10 <sup>3</sup>	3	3	0,01
El.oblouk	10 <sup>4</sup>	4	2	0,5 – 3
Plasma	10 <sup>6</sup>	až 12	1	0,5 – 5
El.paprsek	10 <sup>8</sup>	200	0,03	0,5 – 5

## 2.1 Mechanismus svařování [19, 20]

Při interakci laserového svazku s povrchem materiálu dochází k lokálnímu ohřevu a dalším průvodním jevům. Dochází k odrazu paprsku od povrchu. Malé množství paprsku je absorbováno a jeho důsledkem dochází k ohřevu. Vlivem rostoucí teploty dochází k vyšší absorpci záření. Vlivem vysoké koncentrace energie na povrchu a nízkému odvodu tepla dochází k lokálnímu natavení materiálu a následnému odpaření. Následkem povrchového natavení a vypařování dojde ke vzniku tlakové vlny v roztaveném materiálu, která ovlivňuje následný tvar svaru.

Maximální tlak lze určit ze vztahu:

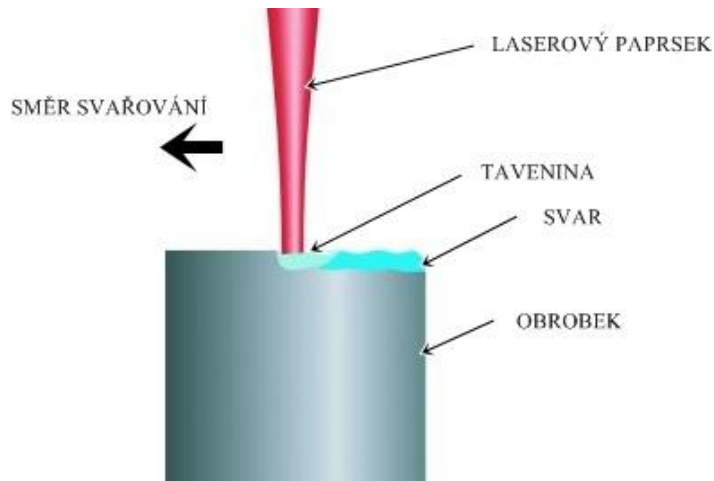
$$p_{max} = \Gamma \cdot I \cdot c_z^{-1} \cdot 0,01, \quad (2.1)$$

kde:  $p_{max}$  maximální tlak [MPa],  
 $\Gamma$  koeficient Grunajzera (pro kovy přibližně 1),  
 $I$  hustota výkonu [W.cm<sup>-2</sup>],  
 $c_z$  rychlost zvuku [m.s<sup>-1</sup>].

Během svařování mohou nastat dva základní režimy svařování v závislosti na hustotě výkonu. Při hustotách, které ještě nezpůsobují intenzivní odpařování materiálu (do 10<sup>6</sup> W.cm<sup>-2</sup>) se jedná o kondukční režim. Při vyšších koncentracích hustoty energie (nad 10<sup>6</sup> W.cm<sup>-2</sup>) se vlivem odpařování materiálu vytvoří paroplynový kanál, který se označuje jako „keyhole“ (v překladu klíčová dírka) – penetrační metoda.

### 2.1.1 Kondukční svařování [15], [21]

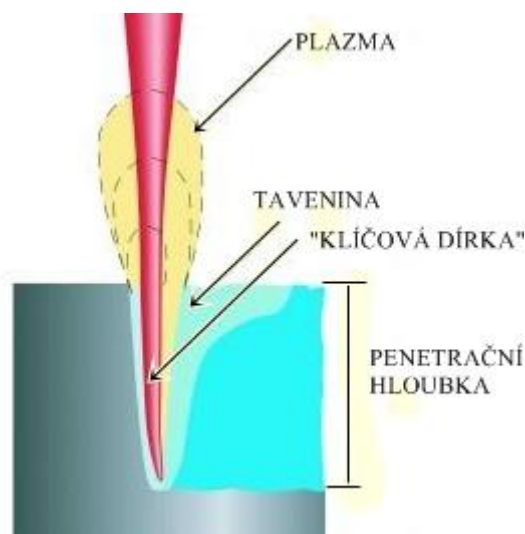
Při kondukčním svařování je přídavný svařovaný kov taven podél svaru. Taveniny se postupně promíchají a ztuhnou ve svar. Tento typ svařování se používá při svařování tenkostěnných plechů. Laser vytvoří hladký a zaoblený svar, který se již dále nemusí obrábět. Pro tyto aplikace se nejvíce hodí pevnolátkové lasery s impulsním nebo spojitým provozem. Energie se dostává do svaru pouze kondukcí tepla. Hloubka svaru se pohybuje od desetin milimetru až k jednomu milimetru. Geometrie svaru vždy vykazuje větší šířku než hloubku svaru. Pokud se teplo dostatečně rychle neodvádí, přechází kondukční svařování v hluboké svařování. Kondukční režim svařování se využívá při hustotě výkonu menší než 10<sup>6</sup> W.cm<sup>-2</sup>. Princip kondukčního svařování na obr. 15.



Obr. 15 Kondukční svařování [15]

### 2.1.2 Svařování penetrační metodou [15], [23]

Při svařování penetrační metodou jsou zapotřebí vysoké výkony až  $1 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Přitom laserový paprsek nejen taví kov, ale zároveň vytváří páru. Vystupující pára vytváří tlak na taveninu, která je částečně vypuzována ven. Obrobek je dále natavován. Díky tomuto mechanismu vzniká úzká a hluboká kapilára vyplněná párou – též nazývaná klíčová dírka (v angl. „key hole“). Kapilára je naplněna roztaveným kovem. Při pohybu obrobku při svařování se pohybuje i kapilára, roztavený kov za kapilárou tuhne a tím vzniká hluboký svar. Hloubka svaru je až desetkrát větší než šířka svaru a může dosáhnout až 25 mm. Na roztavených stěnách kapiláry se laserový paprsek ještě více odráží. Tavenina přitom dokáže téměř celý paprsek absorbovat a tím se zvyšuje účinnost svařování pomocí penetrační metody. Pokud se při svařování využívají  $\text{CO}_2$  lasery, dokáže pára nacházející se v kapiláře absorbovat laserové světlo, které se částečně ionizuje a vzniká plazma. Plazma poté vnáší do obrobku další energii, čím se zvyšuje ještě více účinnost, avšak na druhé straně příliš vysoký podíl plazmy poškozuje svar. Výhodou tohoto svařování je vysoká rychlost, vysoká účinnost, malá tepelně ovlivněná oblast a nepatrná deformace. Využití metody je v případech, kdy je potřeba hlubokého svaru nebo svařování více vrstev materiálu najednou. Schéma je na obr. 16.



Obr. 16 Svařování penetrační metodou [15]

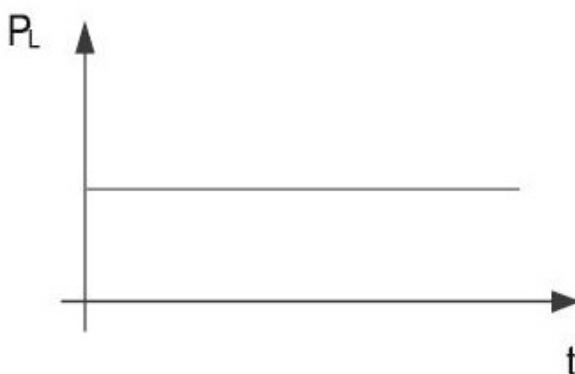
## 2.2 Parametry svařování [24], [57]

Parametry svařování jednoznačně ovlivňují konečný svar provedený laserem. Parametry mají vliv na efektivnost použití laseru na daný typ technologického procesu. Jde především o výkonové parametry, parametry zaostřovacího aparátu a také o pomocné parametry. Režimy využívající těchto parametrů, lze rozdělit na kontinuální (CW) nebo pulzní. Na geometrii laserového svaru má velký vliv svařovací rychlost, nejlepší výsledky jsou ověřeny pro rychlosti nejméně do  $20 \text{ m.min}^{-1}$ . Na druhou stranu vysoká rychlost svařování má i řadu pozitivních výsledků. Kromě menšího vneseného tepla s rostoucí rychlostí klesá šířka spoje, hrubnutí struktury je minimalizováno stejně jako zbytková pnutí a deformace svařence.

### 2.2.1 Kontinuální režim [24], [18], [43]

Základní parametry svařování:

- výkon laseru  $P$  [W],
- rychlost svařování  $v$  [ $\text{mm.s}^{-1}$ ],
- parametry fokusačního systému.



Obr. 17 Kontinuální režim,  $P_L$  výstupní výkon laseru [43]

### Výkon laseru

Výkon laseru je teplotním parametrem vyjadřujícím vliv paprsku na materiál. Jeho velikost ovlivňuje, do jak velké hloubky bude proveden svar. Zvyšování výkonu laseru je úměrné zvyšování jak hloubky, tak šířky svaru. Různé typy laserů potřebují jiný výkon k vyhotovení stejného svaru.

### Rychlost svařování

Rychlost svařování označuje dráhu, kterou musí urazit zdroj ohřevu v kontaktu se základním materiálem za jednotku času. Rychlost svařování charakterizuje množství energie, které je dodáno materiálu, za předpokladu konstantního výkonu.

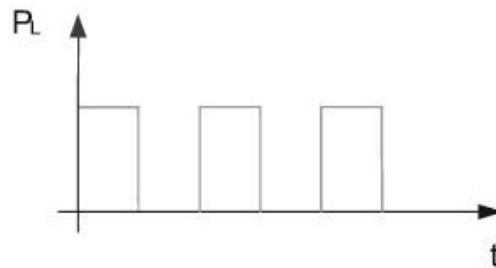
### Parametry fokusačního systému

Konstantní výkon laseru způsobuje nárůst energie při využití menšího průměru svazku. Z praktického hlediska průměry svazku pod  $0,4 \text{ mm}$  zvyšují citlivost na vznik vad v důsledku vysoké intenzity svařování a dynamickým účinkům plazmy. Na druhé straně svazky s větším průměrem nad  $1 \text{ mm}$  požadují zvýšení výkonu laseru a tím nárůst ceny takového zařízení. Maximální hloubka průvaru je dosažena při fokusaci svazku přibližně  $1 \text{ mm}$  pod povrchem základního materiálu.

### 2.2.2 Pulzní režim [18], [43]

Při svařování v pulzním režimu jsou generovány zdroje záření v krátkých intervalech – impulzech. Mezi základní parametry pulzního svařování patří:

- energie pulzu  $E$  [J],
- maximální výkon pulzu  $P_{max}$  [W],
- délka pulzu  $\tau$  [s],
- frekvence pulzu  $f$  [Hz],
- perioda pulzu  $T$  [s],
- rychlost svařování  $v$  [mm.s<sup>-1</sup>].



Obr. 18 Pulzní režim,  $P_L$  výstupní výkon laseru [43]

Při využití periodického pulzního režimu svařování lze dosáhnout 1,5 až 2 násobné hloubky penetrace v porovnání s kontinuálním režimem. Tento jev je způsoben vlivem redukce plazmy. Doba trvání pulzu musí být přibližně rovna času potřebnému na ohřev čelní strany paroplynového kanálu z teploty tavení na teplotu vypařování. Při použití pulzu větší délky dochází ke ztrátě energie. K dalším ztrátám dochází při vypařování materiálu a průchodem laserového svazku plazmovým oblakem. Při správném využití pulzního režimu svařování lze redukovat ztráty energie, přehřívání tavné lázně a výrazně zlepšit penetrační schopnost a výslednou kvalitu svaru.

### 2.3 Ochranné plyny [19], [20], [18], [26]

Laserové svařování umožňuje vysoké svařovací rychlosti za pomoci soustředění tepla na malou plochu obráběného materiálu. Laserové svařování je převážně prováděno bez přídavného materiálu. Někdy je však potřeba přídavný materiál přidat. Pro zachování vysoké kvality svaru je potřeba přivádět ochranné plyny. Tyto plyny plní kromě funkce ochrany tavné lázně a zabránění defektům při svařování (bublina a póry), také funkci posílení nebo utlumení plazmy nad svarem.

Plazma je ionizovaný plyn, který má za následek rozptyl energie paprsku. Pokud vznikne velký plazmový oblak, dojde k poklesu provařené hloubky (při konstantním výkonu laseru). Nejlepší hodnoty provaření zajišťují plyny s vyšším ionizačním potenciálem a vyšší tepelnou vodivostí. Nejlepších svarových výsledků dosahujeme při použití helia, avšak na druhé straně argon jako ochranný plyn se používá častěji při svařování o nižších až středních výkonech. Argon je výhodnější i z ekonomického hlediska, je levnější. Vysoká molekulová hustota poskytuje vyšší ochranu tavné lázně, hladší povrch svaru, ale je i potřeba menšího průtoku. Dále lze využít i směsí několika plynů.

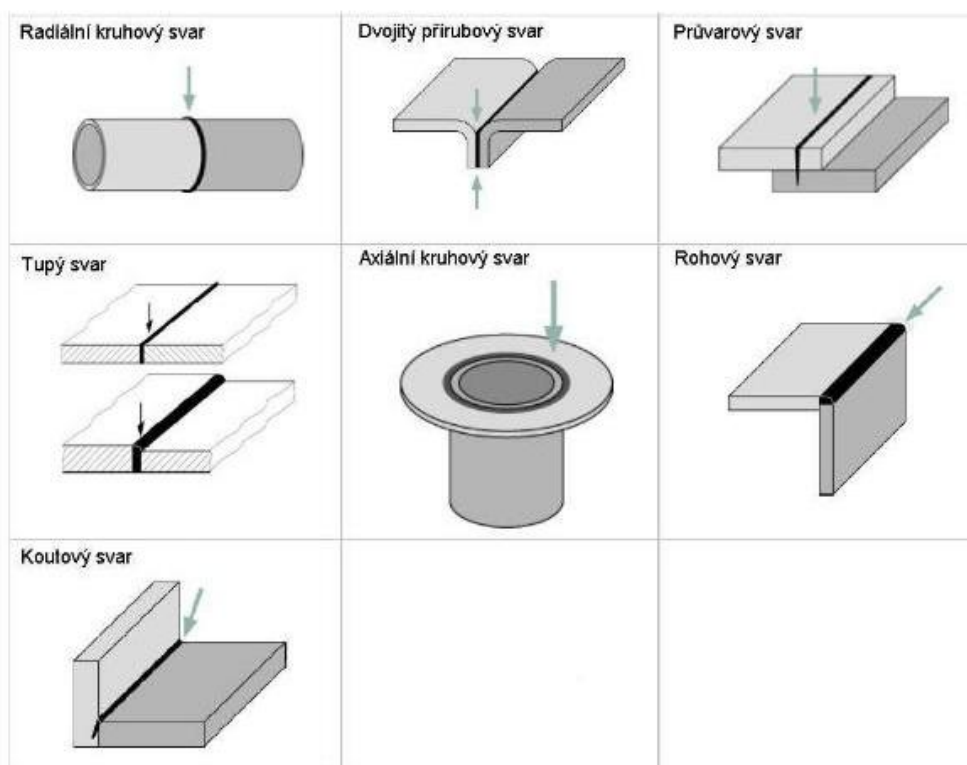
Abychom dosáhli dobré kvality svaru, je potřeba určit potřebný průtok ochranného plynu. Pokud dochází k malému průtoku plynu, dochází k nedostatečné ochraně, naopak velký průtok má za následek ekonomické ztráty. Ideální hodnoty průtoku plynu jsou: helium cca  $55 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a argon kolem  $15 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Tabulka 3 Fyzikální vlastnosti vybraných plynů [19]

Plyn	He	Ar	N	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Ionizační energie [eV]	24,6	15,8	15,5	14,4	12,5
Molární hmotnost [g.mol <sup>-1</sup> ]	4	40	28	44	24,8

## 2.4 Nejčastěji používané typy svarů [43]

Laserové svařování patří mezi tavné metody, proto lze využít většiny typů svarů. Avšak s ohledem na konstrukci svařovacích hlav je potřeba volit takové svary, ke kterým je dobrý přístup. Proto mezi nejčastější typy svarů patří: tupý svar, průvarový svar a axiální svar obr. 19.



Obr. 19 Nejčastěji používané typy svarů [43]

## 3 ZKOUŠENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

### 3.1 Vady svarových spojů [27]

Při běžných technologiích nelze vyrobit materiál bez vad, pokud bychom takový materiál chtěli vyrobit, podařilo by se nám to pouze za laboratorních podmínek. Každý kovový materiál si již z výroby nese nějakou tu vadu na submikroskopické úrovni (krystalová mřížka, atom nebo zrno). Z tohoto důvodu se zjišťují pouze vady na makroskopické úrovni.

Vadou výrobku se rozumí každá odchylka od technických požadavků. Nejčastěji odchylky od technických norem a předepsaných vzorků.

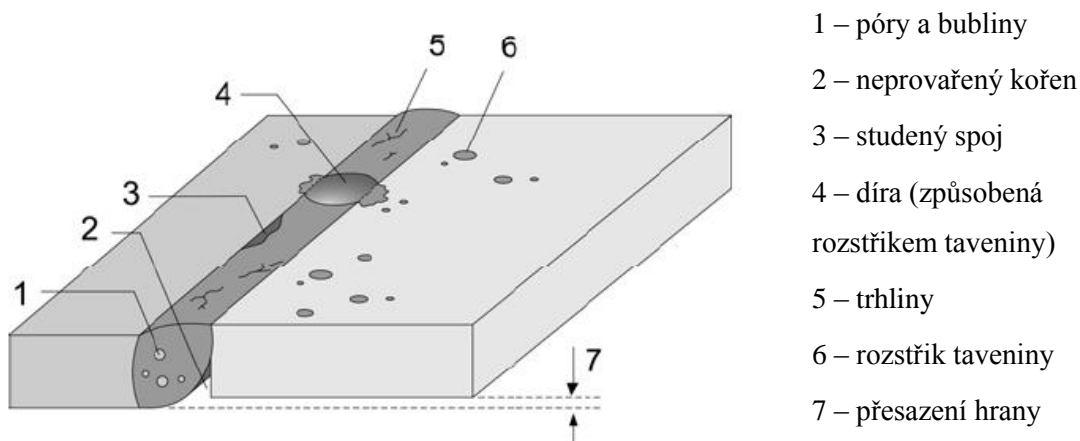
Vady lze rozdělit:

- **zjevné** – můžeme je zjistit pouhým pohledem,
- **skryté** – k jejich odhalení je potřeba již nějaká laboratorní zkouška nebo přístroj.

Podle ustanovení příslušných předpisů lze vady dále dělit:

- **přípustné** – vady, které příslušné normy dovolují a není třeba je odstranit,
- **neřípustné** – vady, které neodpovídají povoleným hodnotám, buď jsou opravitelné, nebo neopravitelné.

Vady vznikají u všech procesů svařování, zejména se jedná o necelistvosti. Defekty, které vznikají ve svarových spojích a návarech můžeme rozdělit na *plošné* (trhliny, neprůvary a studené spoje) a na *objemové* (póry, bubliny, vměstky kovové i nekovové, zápaly, vruby, nedodržení rozměrů a nepravidelnost povrchů svarů) (obr. 20).



Obr. 20 Vnější a vnitřní vady svaru [43]

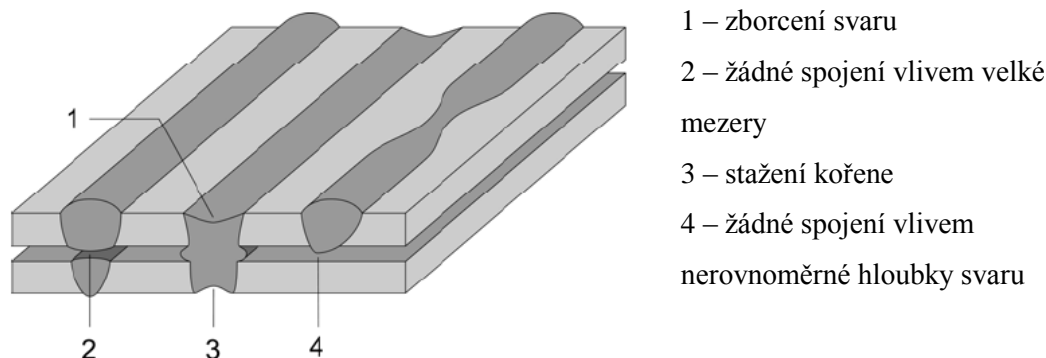
### 3.2 Rozdělení vad svarů a jejich hodnocení [27]

Vady se rozdělují podle umístění na svaru:

- vady **povrchové** – nacházejí se na povrchu svaru (rub i líc),
- vady **vnitřní** – nacházejí se pod povrchem a nevystupují vůbec na povrch.

Podle charakteru se rozdělují a číslovají podle normy ČSN EN ISO 6520-1:

- **trhliny** – podélné, příčné, kráterové, nespojité, rozvětvené...
- **dutiny** – póry, bubliny a staženiny,
- **vměstky** – struskové, tavidlové, lidické, kovové,
- **studený spoj** – není zde kovová vazba, materiál není nataven, je pouze přilepen, nebo **neprůvar** – neprovařený kořen,
- **vady tvaru a rozměru** – zápaly, vruby v kořeni, vruby mezi jednotlivými housenkami, nadměrné převýšení svaru, přetečení krycí nebo kořenové vrstvy, lineární přesazení, neúplné vyplnění svaru, nepravidelná šířka nebo vadné napojení,
- **různé vady** – např. stopa po hoření oblouku, rozstřík, vytržený povrch.



Obr. 21 Vady vzniklé v přeplátovaném spoji [43]

Hodnocení vad svarů vychází ze zkušeností vhodnosti použití pro daný účel, to znamená, jestli je materiál porušován křehkým lomem a pokud dochází k únavovému porušení. Toto hodnocení se týká především nejnebezpečnějších poruch svarů, kterými jsou trhliny.

### 3.3 Kontrola svarů [27]

Zkoušky svarů se dělí podle toho, jaký mají vliv na zkoušený materiál:

- *nedestruktivní* – výrobek lze po zkoušce dále použít,
- *destruktivní* – dojde k porušení svaru, např. rozlomením.

Nedestruktivní zkoušky jsou nejrozšířenější formou zkoušení. Vycházejí z jednoduchého principu, pokud se nevyskytují vady ve svaru nebo jen malé, málo četné nebo málo závažné vady, tak bude svarový spoj sloužit dobře.

### 3.4 Nedestruktivní zkoušky svarů [27]

Nedestruktivní zkoušky jsou důležité pro všechny etapy výroby. Nedestruktivní kontroly zajišťují kvalitu výrobku, technickou způsobilost a funkční bezpečnost.

Základní metody dělíme podle toho, jestli se vady indikují na povrchu svaru, nebo uvnitř svaru.

K zjišťování povrchových vad se používají metody:

- vizuální,
- penetrační (kapilární),
- magnetická prášková.

Pro vady uvnitř svaru se používají metody:

- prozářením,
- ultrazvukem.

#### 3.4.1 Vizuální zkouška [27]

Vizuální zkouška se řídí normou ČSN EN 970. Jde o nejjednodušší zkoušku, kdy svar je kontrolován pouhým okem, nebo v přísnějších podmínkách pomocí zvětšovacích pomůcek, např. lupy. Předpokladem pro dobře provedenou zkoušku je čistý povrch (odmaštěný, zbavený rozstříků, strusky). Vizuální zkouška se provádí buď přímo (pouhým okem nebo pomocí lupy) nebo nepřímo (pomocí endoskopů, především u uzavřených nádob).

Tato kontrola bývá často doprovázena kontrolou vnějších rozměrů svaru. Závěry a výsledky této zkoušky jsou důležité pro další postupy a měla by vždy předcházet všem ostatním zkouškám.

### 3.4.2 Penetrační (kapilární) zkouška [27], [29]

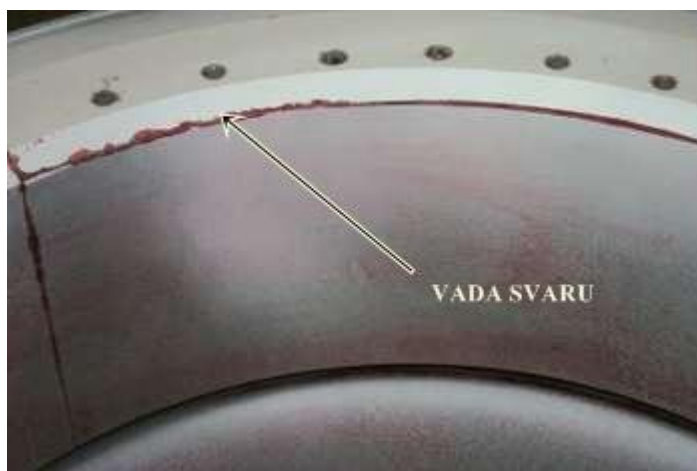
Tato zkouška dokáže s velmi vysokou citlivostí zjišťovat vady. Základem zjišťování vad je vztlínavost kapalin k této zkoušce používaných, jediným požadavkem je, aby vada byla spojena s povrchem.

Zkouška má několik fází. První fáze je příprava povrchu (odmaštění a umytí). Ve druhé fázi, která trvá 10 – 30 minut, dochází k nanesení zkušební kapaliny (penetrantu) na povrch materiálu. Menší výrobky se namáčí do lázně, u větších se provádí nátěr nebo postřik. Penetrační kapalina zateče do vad. Třetí fází je odstranění přebytku kapaliny, nejčastěji proudem vody. Toto je velmi kritická operace, neboť je potřeba důkladně umýt povrch od přebytků, aby nedocházelo k falešným indikacím, naopak velmi důkladné umytí by mohlo mít za následek vyplavení penetrantu z vad. Poté následuje osušení povrchu a nanesení „vývojky“ (tzn. vytvoření kontrastního a nasákavého povrchu pro vztlínání penetrantu). Základem vývojek je bílý prášek, nejčastěji oxid zinečnatý rozpuštěný v acetonu. Poslední fází je kontrola povrchu a vyhodnocení vad.

Podle detekčních prostředků rozeznáváme: **metodu barevné indikace** (přítomnost vady se projeví vznikem kontrastní barevné indikace – hodnocení se provádí na denním světle, nejjednodušší je zkouška petrolejem, kdy dojde k promaštění vývojky) a **metodu fluorescenční** (zkušební kapalina je pro zvýšení citlivosti fluoreskující a vada se projeví světélkováním pod ultrafialovým světlem, u této metody není potřeba vývojky). Existuje i kombinace obou metod.

Hodnocení je subjektivní a vyžaduje zkušenosti pracovníka, který ji provádí. Nevýhodou je, že lze odhalit pouze vady spojené s povrchem, potřeba velmi čistého a hladkého povrchu ( $Ra\ 3,2\ \mu m$ ). Výsledek zkoušky je na obr. 22.

Kapilární zkouška se provádí podle normy ČSN EN 579-1 a svary se vyhodnocují podle normy ČSN EN 1289.



Obr. 22 Penetrační zkouška [29]

### 3.4.3 Magnetická prášková zkouška [27], [28]

Tato metoda odhaluje vady na povrchu nebo těsně pod povrchem (max. 2 – 3 mm). Principem metody je zviditelnění siločar vystupujících na povrch z feromagnetických materiálů (nelegované a legované oceli – kromě austenitických). Pokud je na povrchu nebo těsně pod povrchem vada, která není feromagnetická (bublina, trhlina, struska), vada se indikuje na povrchu rozptylem magnetického pole.

Pro zviditelnění vad lze použít jemný železný prášek, který lze rozptýlit ve vhodné kapalině (např. petrolej) – tzv. polévací zkouška, nebo použití suchého prášku. V místě, kde vycházejí siločáry z povrchu zkoušeného svaru, dochází k ulpění prášku a zviditelnění vady. Naopak v neporušených místech se prášek neudrží a steče pryč. Pro lepší zviditelnění lze povrch potřít bílou barvou nebo prášek obarvit fluoreskující barvou.

U austenitických ocelí je potřeba počítat s nepravými indikacemi způsobených poškrábaným povrchem nebo nepravými indikacemi na rozhraní feromagnetického a nemagnetického materiálu.

Ke zmagnetování zkoušeného materiálu dochází buď průchodem elektrického proudu – **magnetování proudové** nebo elektromagnetem ve tvaru jha – **magnetování pólové**.

Výhodou této metody je rychlost provedení, nízké náklady na zařízení, snadná obsluha a schopnost odhalit i podpovrchové vady. Výsledek zkoušky na obr. 23.

Provádění magnetických zkoušek ošetřují normy ČSN EN 1290 a ČSN EN 1291.



Obr. 23 Magnetická prášková zkouška [28]

#### 3.4.4 Zkouška prozářením (RTG) [27], [30]

Zkouška prozářením je nejstarší metodou zjišťování vad. Jejím principem je pohlcování ionizovaného záření ve zkoušeném materiálu a jeho detekce na vhodném detektoru, čímž lze stanovit místa, ve kterých se nachází vady. V místech vad je záření pohlcováno méně a na detektoru (filmu) se poté objeví tmavší místa. Metoda je využívána pro zjišťování vnitřních vad, ale i vad povrchových, které jsou nepřístupné.

Využívá se různých vlastností materiálů a jejich schopnosti pohlcovat záření. Kovové materiály jsou nejčastěji prozařovány RTG zářením. Jako zdroje jsou využívány RTG lampy. Pokud prochází záření materiálem, tak na protilehlé straně registrujeme na fotografický papír intenzity prozáření. Intenzita záření je největší ve slabých místech, kdy k zeslabení může dojít dutinami v materiálu (bubliny, póry). Větší intenzita záření se projeví zčernáním fotopapíru, tento lze uchovat jako podklad pro pozdější vyhodnocení materiálu.

Nejlépe se provádí zkouška na rovinných svarech, kdy se směr prozáření volí kolmo k povrchu. I u ostatních svarů lze použít tuto metodu, jen je potřeba zvolit vhodný směr prozáření. Důležitým faktorem pro správné vyhodnocení je správné vyvolání filmu.

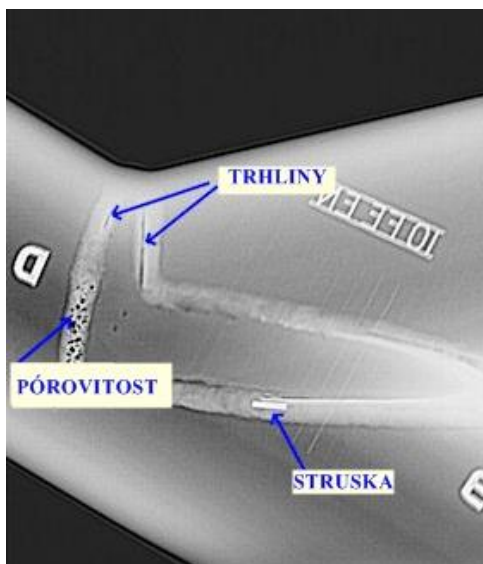
V závěrečné fázi je důležité správné vyhodnocení radiogramu, na kterém je díky různému zčernání zviditelněn rozdíl v pohlcování ionizačního záření. Prozařování lze použít na materiály od několika mm až do stovek mm. Rozeznatelnost vad se pohybuje v rozmezí 1 – 2 % prozařované tloušťky.

Zkouška prozářením je velmi citlivou metodou pro zjišťování hlavně objemových vad (bubliny, póry, struskové a kovové vměstky), méně citlivou je na plošné vady. Vady, které se

objeví na detektoru lze snadno identifikovat, o jakou vadu se jedná a lze také změřit jejich velikost.

Tato metoda je však velmi drahá na použitá zařízení, bezpečnost pracoviště, ale i na proškolený personál. Výsledek zkoušky na obr. 24.

Pro zkoušku prozářením jsou platné normy ČSN EN 1435 a pro vyhodnocení radiogramů ČSN EN 12517 a ČSN EN 25817.



Obr. 24 Zkouška prozářením [30]

### 3.4.5 Zkouška ultrazvuková [27], [31]

Principem zkoušky je odraz vlnění na rozhraní dvou prostředí, která mají odlišné vlastnosti při šíření tohoto vlnění. Mechanické vlnění se šíří prostředím bez vad určitou rychlostí, pokud narazí na jiné prostředí (vměstky, bubliny a póry), dojde ke změně rychlosti šíření vlny. To znamená, že se vlnění láme nebo odráží.

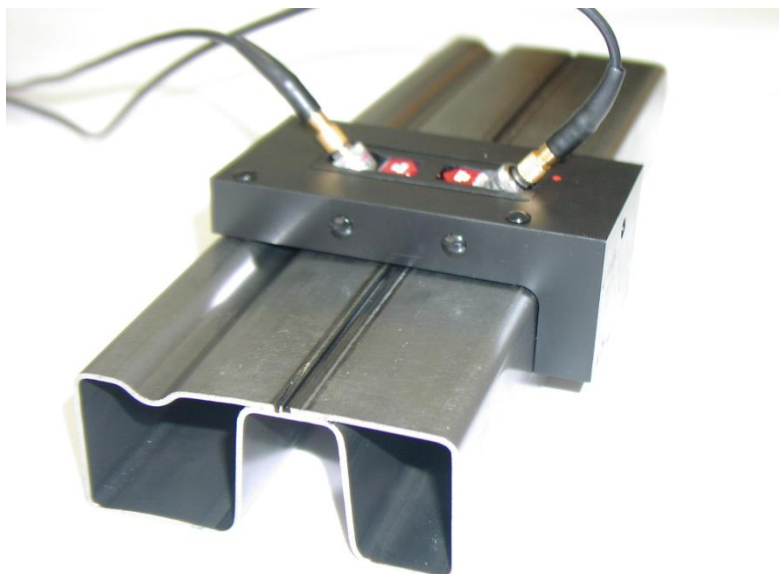
Zdrojem ultrazvukového vlnění jsou ultrazvukové sondy, jejichž základním prvkem je elektroakustický měnič. Vlnění se dělí podle druhu vln, které sonda vysílá, na sondy příčné nebo úhlové. Indikátorem je zde obrazovka, která na svém stínítku zobrazuje vysílané a přijímané impulzy. Na obrazovce se po zahájení snímání objeví vysílací impuls (počáteční echo) a koncové echo. Mezi nimi se případně objeví další echa, která zaznamenávají vady ve výrobku. Vzdálenost mezi počátečním a konečným echem je přímo úměrná tloušťce zkoušeného materiálu.

Používají se dvě ultrazvukové metody. **Metoda průchodová** je nejjednodušší metoda, kdy jsou použity dvě sondy umístěny souose. Při průchodu ultrazvukové vlny materiálem vzniká akustický tlak, pokud se nachází v materiálu vada, dojde k jeho poklesu, což se zaznamená na sondě. Nevýhoda této metody spočívá v nemožnosti odlišení vady od nedokonalého akustického navázání.

Nejrozšířenější **metoda je odrazová – impulzová**, zajišťuje všestranné použití a dává nám informace nejen o vadách, ale i o materiálu a rozměrech. Výhodou této metody je použití pouze jedné sondy, která vysílá ale i přijímá impulzy.

Ultrazvukem lze zjišťovat plošné vady, hůře se zjišťují vady objemového charakteru. Uspořádání zkoušky na obr. 25.

Pro zkoušení ultrazvukem je platná norma ČSN EN 1714 a pro vyhodnocení platí norma ČSN EN 1712.



Obr. 25 Zkouška ultrazvuková [31]

### 3.5 Destruktivní zkoušky [27]

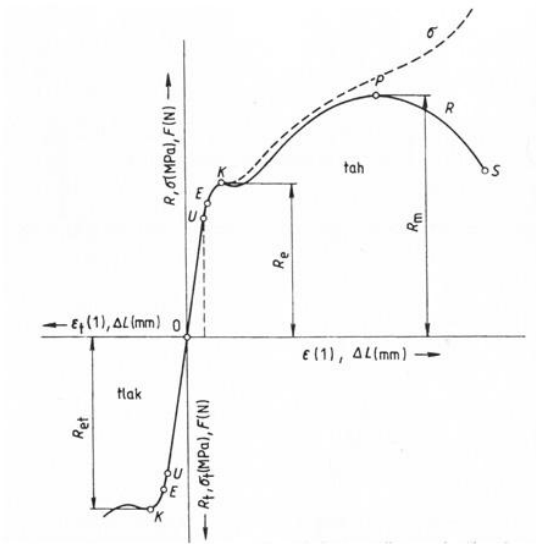
Destruktivní zkoušky svarů jsou obdobné pro zkoušení materiálů. Jedná se o zkoušky, u kterých dochází k porušení svaru. K destruktivním zkouškám je potřeba vyrobit speciální vzorky ze zkoušeného materiálu.

Nejčastěji používané destruktivní zkoušky a normy, které upravují jejich provádění, jsou:

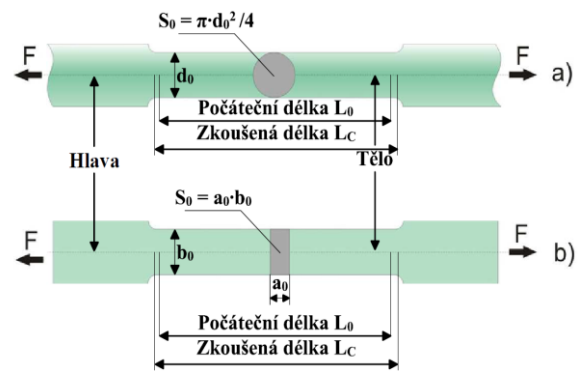
- příčná zkouška tahem (ČSN EN ISO 4136),
- zkouška ohybem (ČSN EN ISO 5173),
- zkouška rozlomením (ČSN EN 1320),
- zkouška hloubením podle Erichsena (ČSN EN ISO 20482),
- zkouška tvrdosti podle Vickerse (ČSN EN ISO 6507-1),
- zkouška makroskopická a mikroskopická (ČSN EN 1321).

#### 3.5.1 Příčná zkouška tahem [32], [54], [55]

Příčná zkouška tahem je založena na plynulém zatěžování zkušebního tělesa až do jeho přetržení. Těleso je vyřezáno napříč svarovým spojem. Výsledkem této zkoušky jsou mechanické vlastnosti  $R_e$  [MPa] – mez kluzu,  $R_m$  [MPa] – mez pevnosti,  $A$  [%] - tažnost a  $Z$  [%] - kontrakce. Na obr. 26 je průběh tahové zkoušky a na obr. 27 je zkušební těleso pro tahovou zkoušku.



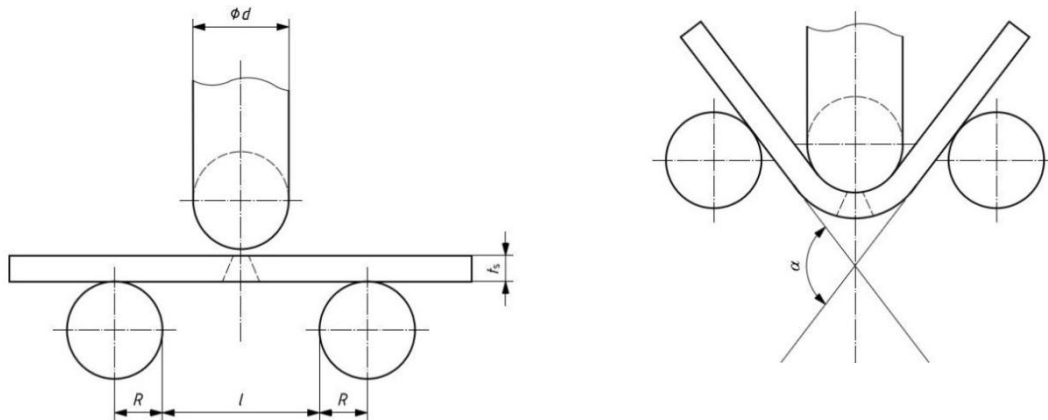
Obr. 26 Tahový diagram [54]



Obr. 27 Zkušební tělesa [55]

### 3.5.2 Zkouška ohybem [33], [34]

Při zkoušce ohybem je svařený vzorek plasticky deformován jednosměrným ohybem. Vzorek se odebrá napříč svarem. Zkušební vzorek je umístěn do zkušebního zařízení tak, aby síla působila v ose svaru. Během zkoušky dochází na jedné straně vzorku k namáhání tahem, kdežto druhá strana vzorku je namáhána tlakem. Rozlišuje se namáhání kořene a líce svaru. U zkoušky se vyhodnocuje úhel ohybu a typ vady. Na obr. 28 je znázorněno schéma zkoušky.



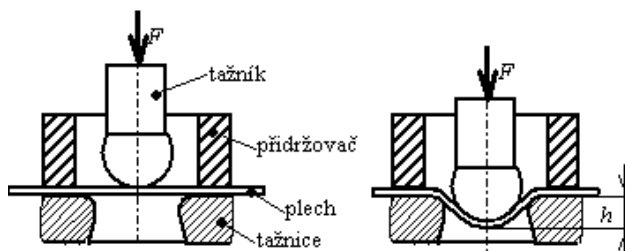
Obr. 28 Schéma zkoušky ohybem [33, 34]

### 3.5.3 Zkouška rozlomením [34], [35]

Principem zkoušky je rozlomení vzorku ve svaru takovým způsobem, aby šlo pozorovat svarovou plochu. Lomu lze dosáhnout působením krutu, dynamického ohybu nebo statickým zatížením. Vznik lomu je ovlivněn teplotou a tvarem vrubu. Výsledkem zkoušky je zjištění typů, rozměrů a rozmístění vad (neprůvazy, dutiny, trhliny) v lomové rovině. Zkouška je prováděna na svaru, který je rozdělen na několik segmentů a opatřen vruby, aby byla zajištěna kolmost lomu na svar.

### 3.5.4 Zkouška hloubením podle Erichsena [34], [36], [37]

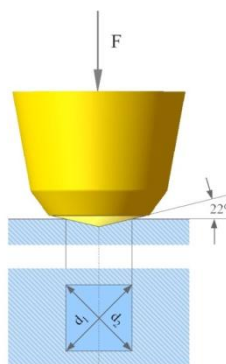
Zkouška hloubením podle Erichsena stanovuje schopnost materiálu (svaru) se plasticky deformovat. Z plechu je vyříznuto zkušební těleso o normovaných rozměrech. Těleso se upne do přístroje pomocí přidržovače silou 10 kN. Místo styku razníku a raznice se vzorkem je natřeno grafitovým práškem, pro lepší kluzné vlastnosti. Razník je zatlačován do zkušební tělesa rychlostí  $5 - 10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Zkouška je ukončena, jakmile se na vzorku objeví trhlina, procházející přes celou tloušťku materiálu. Poté se odečte hloubka vniknutí razníku. Na obr. 29 je znázorněno schéma zkoušky.



Obr. 29 Erichsenova zkouška [37]

### 3.5.5 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [38], [39]

Podstatou zkoušky je vnikání diamantového tělesa - indentoru, do zkoušeného materiálu. Indentor má tvar pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem  $135^\circ$ . Měřítkem tvrdosti materiálu jsou dvě úhlopříčky, které zanechá indentor. Po zkoušce se změří délky úhlopříček, které vzniknou po odlehčení zkušební tělesa předepsanou silou  $F$ . Schéma zkoušky je na obr. 30.



Obr. 30 Schéma zkoušky tvrdosti podle Vickerse [39]

### 3.5.6 Zkouška makroskopická a mikroskopická [40]

Makroskopická zkouška stanovuje charakter svarového spoje. Zkouška je provedena na zkušebním tělese, které je vyrobeno tak, aby bylo možné provést kontrolu svaru v příčném řezu svarem. Předmětem kontroly je nejen samotný svar, ale i tepelně ovlivněná oblast. Zkoumaná plocha vzorku je před zkouškou vyleštěna. Zkoumaná plocha je osvětlena, je kontrolována pouhým okem nebo při malém zvětšení. Zkoumaná oblast může být v naleptaném nebo nenaleptaném stavu. Výsledkem zkoušky je odhalení vad, jako jsou dutiny a trhliny.

Mikroskopická zkouška je prováděna obdobným způsobem jako makroskopická. Pouze samotný vzorek je zkoumán pomocí mikroskopu se zvětšením  $50 - 500$  krát. Zkoušku lze

provádět v naleptaném i nenaleptaném stavu. Výsledkem zkoušky je odhalení hranice zrn a struktura tuhého roztoku vzniklého po svaření.

## 4 OCELI VYŠŠÍ PEVNOSTI [44]

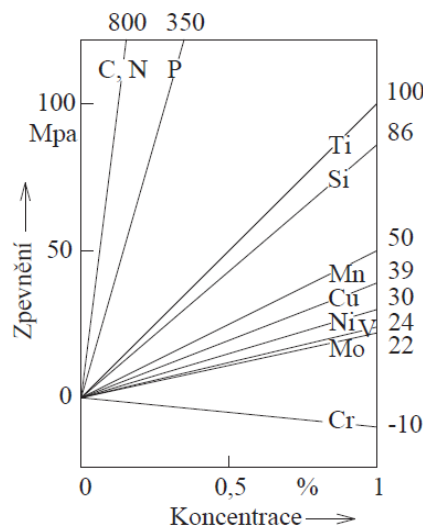
V průmyslově vyspělých zemích vývoj směřuje ke zvyšování užitečných vlastností ocelí. Dále je potřeba doplnit sortiment materiálů o nové druhy. Poslední léta se zaměřují na rozvoj výroby konstrukčních svařitelných ocelí se zvýšenou pevností. Tyto materiály představují více než 10% produkce válcovaného materiálu. Oceli mají především vysokou mez kluzu, sníženou citlivost ke křehkému porušení a dobrou svařitelnost. Všechny tyto pozitiva mají za následek snížení hmotnosti konstrukcí a zařízení, a s tím spojené veškeré výhody, jako jsou snížení spotřeby kovové substance, levnější doprava, rychlejší zpracování a montáž, a v neposlední řadě i nižší cena výrobků.

### 4.1 Fyzikálně metalurgická podstata zvýšení pevnosti [44]

Plastická deformace kovových materiálů je realizována pohybem dislokací. Zpevňování kovových materiálů lze charakterizovat jako růst jejich odporu proti vzniku a pohybu dislokací. Napětí potřebné k uskutečnění plastické deformace je závislé na typu překážek bránících dislokacím v pohybu, na rozložení a množství těchto překážek. Z tohoto hlediska mezi účinné překážky, působící proti pohybu dislokací, lze považovat hranice zrn a subzrn, dislokační sítě, hranové dislokační smyčky, atomy příměsí a jejich shluky, precipitáty. Vzájemné působení dislokací s těmito překážkami je předpokladem pro zpevňovací mechanismy využívané při výrobě těchto ocelí.

#### 4.1.1 Zpevnění substitučními a intersticiálními atomy [44]

Pomocí legujících prvků, které tvoří se železem tuhý roztok, lze dosáhnout zpevnění a zvýšení meze kluzu za předpokladu, že atomy rozpuštěných legur způsobují distorzi mřížky železa. Pohyb dislokací substitučně rozpuštěnými atomy je brzděn v důsledku vzájemného působení napěťového pole způsobeného distorzi mřížky s napěťovým polem dislokace – důsledkem je tzv. pružná rozměrová dislokace. V případě, že se atomy základního a legujícího prvku neliší velikostí, ale pouze modulem pružnosti ve smyku, nedochází k distorzi mřížky, ale pohyb dislokací je přesto ztížen v důsledku tzv. pružné modulové interakce. Na obr. 31 je znázorněno zpevnění feritu.



Obr. 31 Zpevnění feritu vybranými rozpuštěnými prvky [44]

#### 4.1.2 Zpevnění hranicemi zrn a subzrn [44]

Pevnost materiálu roste s klesající velikostí zrn v jejich struktuře. Hranice zrn a subzrn jsou překážkou pro pohyb dislokací. Velký úhel hranic zrn představuje pro dislokace neprůchodnou překážku, proto ve skluzových rovinách dochází u hranic zrn k nahromadění dislokací – tzv. model pile up. S narůstající plastickou deformací dochází k hromadění dislokací. Důsledkem toho narůstá napět'ové pole nahromaděných dislokací, a tím i jeho smyková složka  $\tau_2$ , která působí proti napětí  $\tau_1$ . Toto napět'ové pole uvádí v činnost Frankův – Readův zdroj dislokací FRZ 1. Jakmile hodnota  $\tau_1$  dosáhne hodnoty  $\tau_2$ , činnost zdroje se zastaví. Napět'ové pole nahromaděných dislokací současně může zasahovat do vedlejších zrn a po dosažení určité velikosti může jeho smyková složka  $\tau_3$  aktivovat dislokační zdroj FRZ 2. Z těchto předpokladů byl odvozen Hallův – Petchův vztah, který udává vliv velikosti zrna na mez kluzu. Platí

$$R_e = \sigma_0 + K_z d_z^{1/2} \quad (4.1)$$

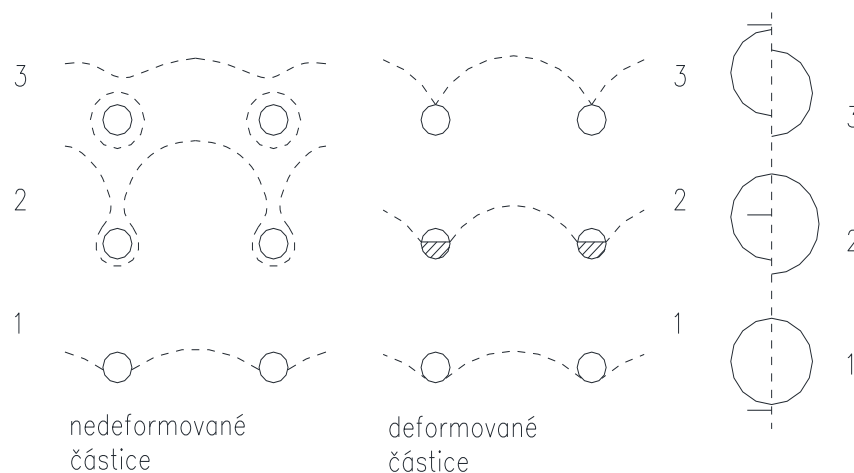
kde  $d_z$  střední velikost zrna [mm],  
 $\sigma_0$  třecí napětí mřížky [MPa],  
 $K_z$  faktor vlivu hranic zrn [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ ],  
 $R_e$  mez kluzu [MPa].

Mez kluzu je nepřímo úměrná odmocnině střední velikosti zrna  $d_z$ . Třecí napětí mřížky  $\sigma_0$  je napětí potřebné pro pohyb dislokací uvnitř zrn. Nízkolegovaná ocel má  $\sigma_0 \approx 40$  MPa. Konstanta  $K_z$  vyjadřuje vliv hranice zrn na indukovaný skluzový proces ve vedlejších, do té doby nedeformovaných zrnech. Pro nízkolegovanou ocel je  $K_z \approx 20 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ . Velikost  $\sigma_0$  a  $K_z$  je ovlivněna legováním, finální strukturou i deformačním stavem materiálu.

#### 4.1.3 Zpevnění precipitační [44]

Pokud dojde v základní matici k vyloučení dostatečného množství jemného precipitátu, dochází při plastické deformaci k výraznému vzájemnému působení pohybujících se dislokací navzájem s tímto precipitátem – uplatňuje se precipitační zpevnění.

Jakmile částice, které vzniknou rozpadem tuhého roztoku, nemají mřížku koherentní s maticí, mluvíme o tvrdých (nedeformovatelných) částicích. Při překonávání těchto částic s dislokacemi dochází k uplatnění Orowanova mechanismu. Pokud vznikající precipitát má mřížku ve stavu koherentním nebo semikoherentním s maticí, mluvíme o měkkých (deformovatelných) částicích. Dislokace při svém pohybu tyto částice protíná. Uplatňuje se zde Friedlův mechanismus obr. 32. Na obrázku dislokace vniká do částice a prochází jí. Během tohoto prostupu se vyruší energeticky nejvýhodnější meziatomové vazby uvnitř částice. Pro představu vznikne plocha, která bude odpovídat řezu částicí skluzovou rovinou dislokace.



Obr. 32 Schéma interakce dislokací s částicemi [44]

#### 4.1.4 Vliv struktury matrice na zpevnění [44]

Mez kluzu a mez pevnosti oceli jsou výrazně ovlivnitelné finální strukturou matrice, která může být feriticko – perlitická, bainitická, feriticko – bainitická, feriticko – martenzitická. V zušlechtné oceli může být matrice tvořena popuštěným martenzitem.

Feriticko – perlitické oceli využívají ke zpevnění výše uvedené mechanismy. Zvyšující se podíl perlitu zvyšuje mez pevnosti, naopak na mez kluzu má menší vliv. Zpevňující účinek perlitu se však nevyužívá, neboť způsobuje pokles vrubové houževnatosti a růst přechodové teploty.

Další zpevnění matrice lze dosáhnout pomocí bainitické struktury. Při správné kombinaci legování a tepelného zpracování lze zajistit vznik jemnozrnné precipitačně zpevněné bainitické struktury, jejími vlastnostmi jsou vysoká pevnostní hodnota a dobré rázové vlastnosti.

K dosažení dobrých kombinací pevnostních a rázových vlastností vytváříme dvoufázové oceli feriticko – bainitické a feriticko – martenzitické. Tyto oceli mají vysoký koeficient deformačního zpevnění a vysoký stupeň rovnoměrné plastické deformace za studena. Pevnost martenzitu je funkcí podílu uhlíku v tuhém roztoku, hrubostí martenzitu, hustoty dislokací a karbidického precipitátu.

#### 4.2 Aplikace zpevňovacích mechanismů [44], [45]

Abychom dosáhli požadovaných pevnostních hodnot u zaručeně svařitelných konstrukčních ocelí, využívá se superpozice všech výše uvedených zpevňovacích mechanismů. Největší význam má zpevnění hranicemi zrn a subzrn a zpevnění precipitační. Na hodnotách meze kluzu se podílejí až 80%.

Pro využití uvedených mechanismů zpevnění je potřeba za prvé zvolit vhodné chemické složení oceli a za druhé využít vhodnou technologii výroby, jako jsou termomechanické válcování, mnohostupňové ochlazování vývalku anebo zrychlené ochlazování. K dosažení těchto vlastností se upravují postupy výroby a tepelného zpracování, tepelné zpracování výhradně provádí výrobce.

#### 4.2.1 Legování a mikrolegování ocelí [44]

Mez kluzu, křehkolomové chování, svařitelnost i další vlastnosti svařitelných ocelí se zvýšenou pevností jsou významně ovlivněny jejich chemickým složením. Při volbě chemického složení je třeba brát ohled na to, že jednotlivé legury a mikrolegury často působí na uvedené vlastnosti protichůdně.

Nejčastěji používanými legurami pro zpevnění feritu jsou mangan a křemík. Obsah manganu se pohybuje v rozmezí 1,0 až 1,7 %, naopak křemík je v rozmezí 0,2 až 0,6 %. Mangan napomáhá k růstu pevnostních vlastností, ale zároveň i k růstu houževnatosti a poklesu přechodové teploty. Při vyšších koncentracích manganu dochází ke vzniku bainitických struktur, které naopak zhoršují lomovou houževnatost a zvyšují přechodovou teplotu. Křemík má za následek výraznější růst pevnostních hodnot oproti manganu. Avšak při obsazích nad 0,6 % způsobuje pokles vrubové houževnatosti, růst přechodové teploty a zhoršuje svařitelnost. Některé feriticko – martenzitické oceli mají obsah křemíku až 1,5 %.

U nízkolegovaných ocelí se mohou vyskytnout další legury (v desetinách %) jako jsou chrom, nikl a molybden, popřípadě bór (v tisícínách %). K dosažení vysoké meze kluzu se u tohoto typu ocelí dosahuje kalením, následným popouštěním se zlepšuje houževnatost.

Větší množství těchto ocelí je charakteristické mikrolegováním (úmyslé obohacení oceli malými přísadami karbido, nitrido, popřípadě karbonitridotvorných prvků). Maximální množství těchto prvků nepřesahuje 0,15 %. Tabulka 5 – ukazuje nejčastější mikrolegující prvky a jejich koncentrace v oceli.

Tabulka 4 Nejpoužívanější mikrolegující prvky [44]

Mikrolegující prvek	Al	Ti	Nb	V	Zr
Obvykle užívaný obsah [%]	0,02 až 0,08	0,02 až 0,15	0,01 až 0,06	0,01 až 0,12	do 0,15

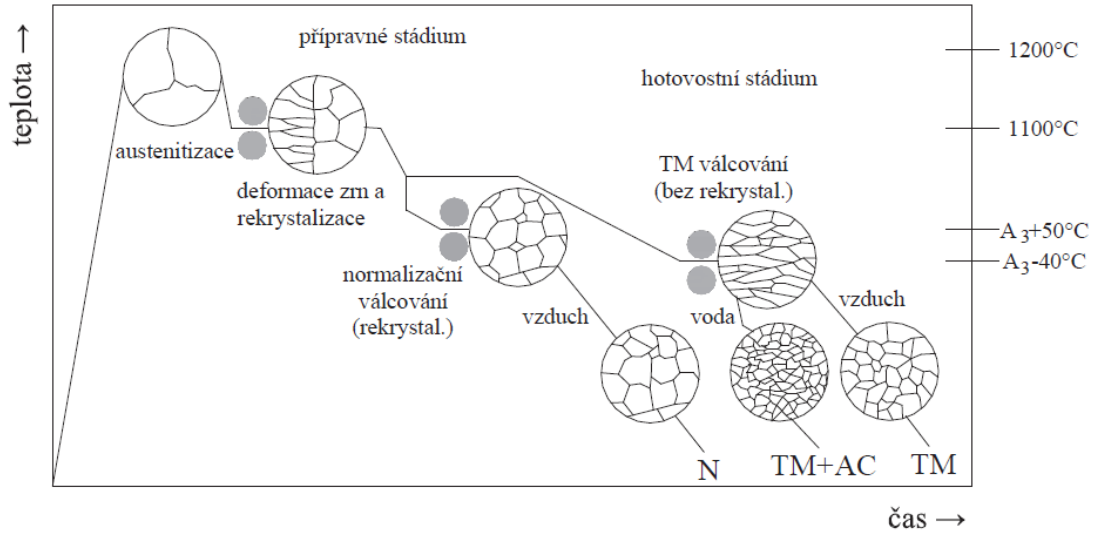
Obvykle používané množství se může měnit v závislosti na vzájemné kombinaci mikrolegur, popřípadě i s jinými legurami.

Úkolem mikrolegování není zpevnění nalegováním tuhého roztoku těmito prvky, ale precipitační zpevnění feritické matrice karbidy, nitridy, popřípadě karbonitridy těchto prvků. Tyto fáze blokují růst austenitického zrna a přispívají tak k tvorbě jemnozrnné sekundární struktury. Nežádoucím vlivem doprovázející precipitační zpevnění je růst tranzitní teploty, jako korekce se používá zjemňování zrna.

Z ekonomického hlediska je potřeba zvážit na jedné straně intenzitu jejich působení na mechanické vlastnosti, na druhé straně potřebné množství a cenu mikrolegury. Z ekonomického pohledu klesá progresivita využití mikrolegur v řadě Ti – Nb – V, Ti je tím pádem nejvýhodnější mikrolegura. Častým případem je poté kombinace mikrolegujících prvků.

#### 4.2.2 Termomechanické zpracování ocelí [44], [45], [46], [47], [48], [49]

K dosažení konečné struktury a vlastností svařitelných ocelí se zvýšenou pevností dosahujeme spojením válcování a normalizačního žíhání, popřípadě jiného tepelného zpracování. Můžeme využít i aplikací řízeného válcování a ochlazování. Obr. 33 znázorňuje schéma zjemňování zrna.

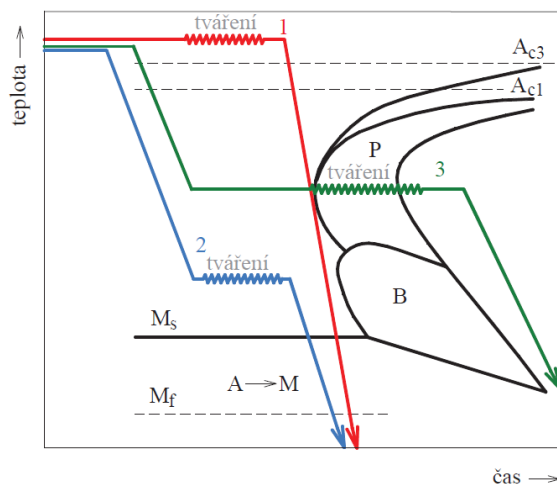


Obr. 33 Schéma zjemňování zrna: N – normalizační žhání, TM+AC – termomechanické zpracování se zrychleným ochlazováním, TM – termomechanické zpracování [48]

Při termomechanickém zpracování se spojují přeměny s deformacemi. Základem tohoto zpracování bývá zpravidla rychlé ochlazování tvářeného austenitu. Pokud se tváří austenit může dojít k podstatnému zjemnění jeho zrna a následné produkty přeměn (martenzit, ferit, perlit) budou mít jemnější strukturu. Následkem tváření je i zvýšená hustota dislokací.

Mezi nejčastější postupy termomechanického zpracování patří (obr. 34):

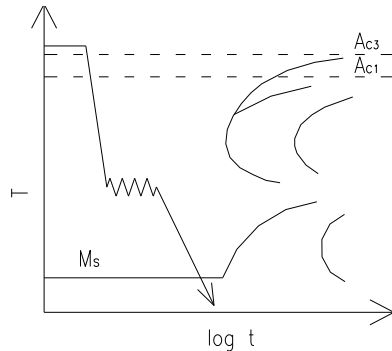
- nízkoteplotní termomechanické zpracování – NTMZ,
- vysokoteplotní termomechanické zpracování – VTMZ,
- izoforming,
- řízené válcování a ochlazování,
- zerolling.



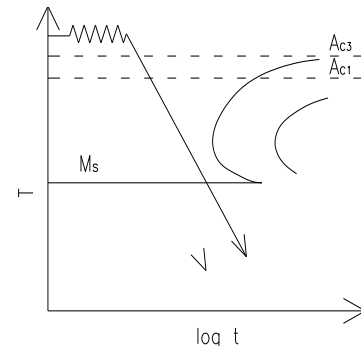
Obr. 34 Schéma průběhu (1) vysokoteplotního, (2) nízkoteplotního termomechanického zpracování a (3) izoforming [47]

## Nízkoteplotní termomechanické zpracování

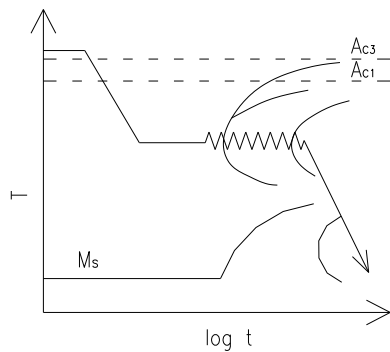
Při tomto způsobu zpracování se ocel zahřívá na teplotu stabilního austenitu. Po zahřátí se ocel prudce ochladí na teplotu 500 – 600°C, při tomto ochlazení je ocel vystavena intenzivní deformaci. Deformace dosahuje vyšších hodnot než v případě technologie vysokoteplotního zpracování. Následně je ocel kalena a nízkoteplotně popuštěna. Tohoto postupu je možno využít pouze u ocelí s dobrou prokalitelností. Při nízkoteplotním zpracování je třeba dbát na to, aby se nevyčerpala plasticita austenitu. Důsledkem toho se musí zvolit vhodná teplota, způsob deformace a její rychlost. Díky této technologii lze dosáhnout zvýšení pevnosti až na 3000 MPa a také zvýšení vrubové houževnatosti. Na obr. 35 je znázorněn diagram teploty a času této technologie.



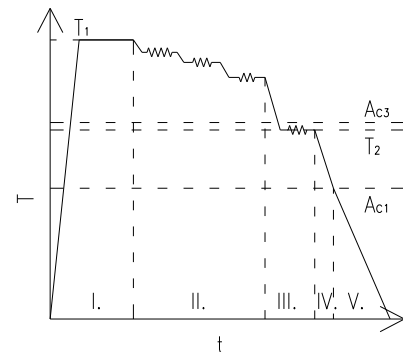
Obr. 35 ARA diagram NTMZ podeutektoidní oceli [46]



Obr. 36 ARA diagram VTMZ podeutektoidní oceli [49]



Obr. 37 ARA diagram izoformingu podeutektoidní oceli [49]



Obr. 38 Řízené válcování a ochlazování [49]

## Vysokoteplotní termomechanické zpracování

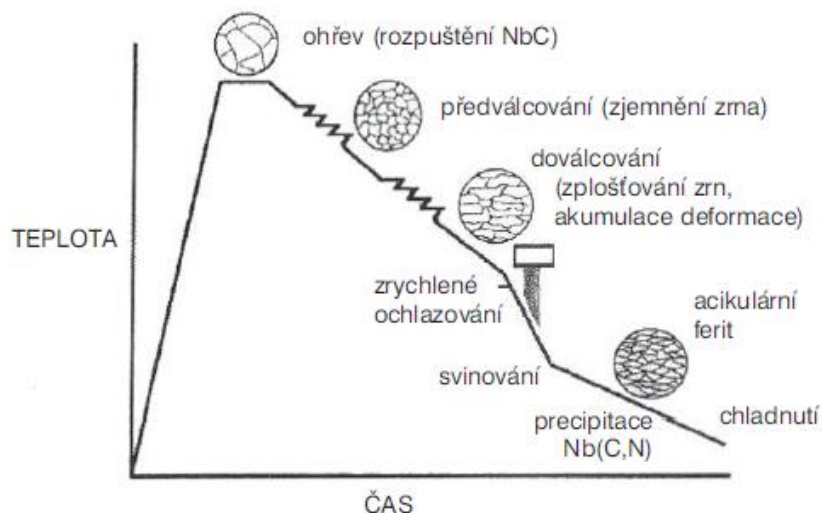
Principem metody je deformace v oblasti stabilního martenzitu. Po tomto procesu následuje ochlazení, které má za následek martenzitickou transformaci. Tato technologie se využívá pro zpracování ocelí s obsahem uhlíku do 0,6 %, nejčastěji to jsou legované oceli. Při zpracování se musí dbát na to, aby se nevyčerpala plasticita austenitu, aby k tomu nedošlo, je třeba zvolit vhodnou rychlost a velikost deformace (ta je závislá na způsobu tváření) spolu s vhodnou teplotou. Aby se zabránilo ztrátě deformačního zpevnění, nesmí dojít k úplné rekrytalizaci. Tato metoda je v současné době nejvyužívanější, neboť zvyšuje pevnost, vrubovou houževnatost a odolnost proti únavovému porušení. Na obr. 36 je znázorněn diagram teploty a času této technologie.

## Izoforming

Tato metoda je založena na ohřevu oceli na oblast stabilního austenitu, po kterém následuje rychlé ochlazení na teplotu perlitické přeměny ( $600 - 700^{\circ}\text{C}$ ). Zároveň je ocel při této teplotě intenzivně tvářena, zároveň je při tváření uplatněn proces transformace. Poté je ocel chlazená na vzduchu. Při použití této technologie se dosahuje zvýšení houževnatosti a zvýšení odolnosti proti rázovému zatížení. Na obr. 37 je znázorněn diagram teploty a času této technologie.

## Řízené válcování a ochlazování

Technologie se používá při zpracování mikrolegovaných a nízkolegovaných ocelí. Proces deformace probíhá v oblasti stabilního austenitu nad teplotou  $A_3$ . Nejdříve je ocel ohřívána na teplotu stabilního austenitu, následuje opakované vystavování deformacím až do fáze úplné rekrystalizace austenitu. Během procesu se austenitické zrna několikrát zjemní a v poslední fázi procesu je již jeho rekrystalizace potlačena. Pokud zpracováváme touto technologií mikrolegované oceli dochází navíc během ochlazovacího procesu k precipitaci jemných karbidů, která má vliv na zpevnění. Tato technologie zvyšuje u ocelí mez kluzu. Na obr. 38 je znázorněn diagram teploty a času této technologie a na obr. 39 je znázorněno schéma řízeného válcování a ochlazování ve Steckelově válcovně.



Obr. 39 Schéma řízeného válcování a ochlazování (Steckelova válcovna) [45]

## Zerolling

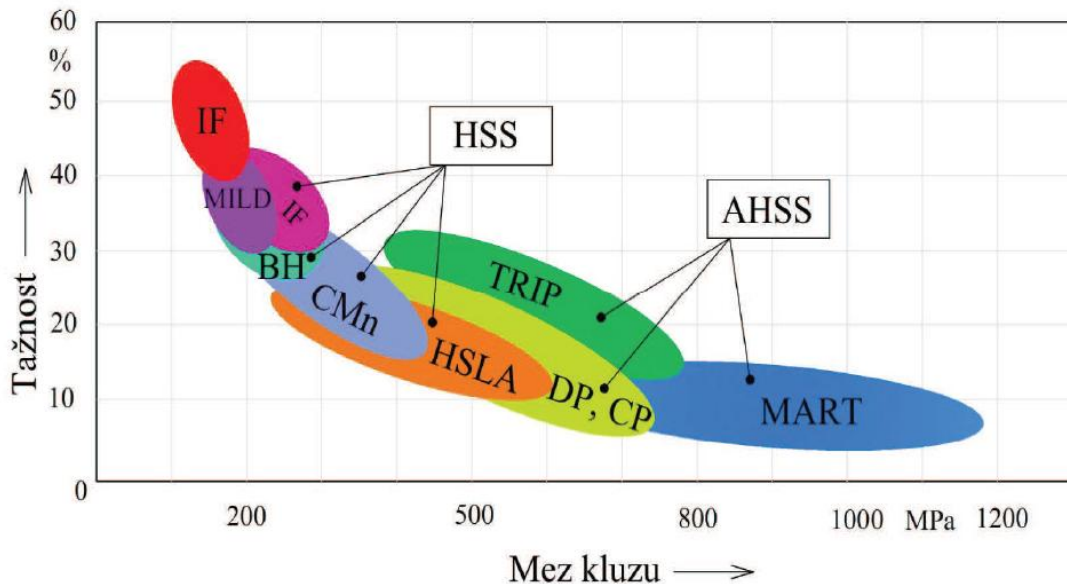
Tato technologie zpracování se využívá u vysokolegovaných ocelí, které mají strukturu nestabilního austenitu. Tyto oceli mají teplotu  $M_s$  v oblasti záporných hodnot. Při procesu plastické deformace austenitu dochází k ulehčení vzniku martenzitických zárodků, které se projeví zvýšením teploty počátku martenzitické přeměny na teplotu  $M_f$ . Pokud se teplota nachází v intervalu  $M_s - M_f$ , tak se plastická deformace používá k přeměně austenitu na martenzit. Při této přeměně dochází ke zvýšení meze kluzu při malé ztrátě houževnatosti a zároveň vede k významnému zvýšení plasticity.

### 4.3 Druhy vysokopevnostních ocelí [44], [45], [50]

Princip dělení těchto ocelí spočívá v hodnotách meze kluzu, kdy mezi ocele s vyšší pevností se řadí ty, které mají mez kluzu vyšší než 300 MPa. V poslední době je však tendence zařazovat tam oceli s mezí kluzu vyšší než 350 MPa.

Další dělení těchto ocelí se provádí podle chemického složení, způsobu zpracování ve válcovnách a tepelného zpracování. Při odstupňované mezi kluzu rozhodují další kritéria o ostatních užitečných vlastnostech a tím i o vhodnosti pro různé účely.

V zahraničních literaturách se můžeme setkat s označením vysokopevnostních ocelí jako HSS – oceli s vysokou pevností a AHSS – oceli s velmi vysokou pevností.



Obr. 40 Závislost meze pevnosti na tažnosti vybraných druhů ocelí [50]

**HSS** (High Strength Steel) – standardní vysokopevnostní ocel.

**AHSS** (Advanced High Strength Steel) – pokročile vysokopevnostní ocel.

**BH** (bake hardened steel) – ocel, u které je zvýšení pevnosti důsledkem kombinace deformace a stárnutí při teplotách a časech typických pro vytvrzování laku v peci.

**IF** (interstitial – free steel) – ocel s velmi nízkým obsahem uhlíku a dusíku, do které je přidáno malé množství Ti a Nb k zamezení nežádoucího zpevnění způsobeného zbytkovým množstvím C a N interstiticky rozpuštěných ve struktuře.

**MILD** – „měkké“ nízkouhlíkové oceli běžných jakostí.

**HSLA** (high strength, low alloy steel) – mikrolegovaná ocel obsahující přísady mikrolegujících prvků jako Al, Ti, V a Nb, které mají za následek zvýšení pevnosti řízením velikosti zrna a rovněž precipitačně zpevňují strukturu. Další možností zvýšení pevnosti je substituční zpevnění.

**DP** (dual phase steel) – dvoufázová ocel skládající se z feritické matrice, která obsahuje další tvrdou fázi ve formě ostrůvků martenzitu.

**CP** (komplex – phase steel) – vícefázová ocel s velmi jemnou feritickou strukturou s vysokým podílem tvrdých fází (martenzit, bainit), které jsou dále zpevněny jemnými precipitáty).

**TRIP** (transformation induced plasticity) – ocel s multifázovou strukturou obsahující 50 – 60 % feritu, 25 – 40 % bainitu a 5 – 15 % zbytkového austenitu. Zbytkový austenit je při teplotě

20°C nestabilní a vlivem napětí nebo při deformaci transformuje na martenzit. Tato fázová přeměna je doprovázena nejen zpevněním, ale i zvětšením plasticity.

**MART** (martensitic steel) – ocel, ve které se struktura během zpracování téměř přeměnila na tvrdý martenzit.

**CMn** (uhlíko – manganové oceli) – oceli s vyšším obsahem uhlíku a manganu. Při vyšších hodnotách meze kluzu zhoršují svařitelnost.

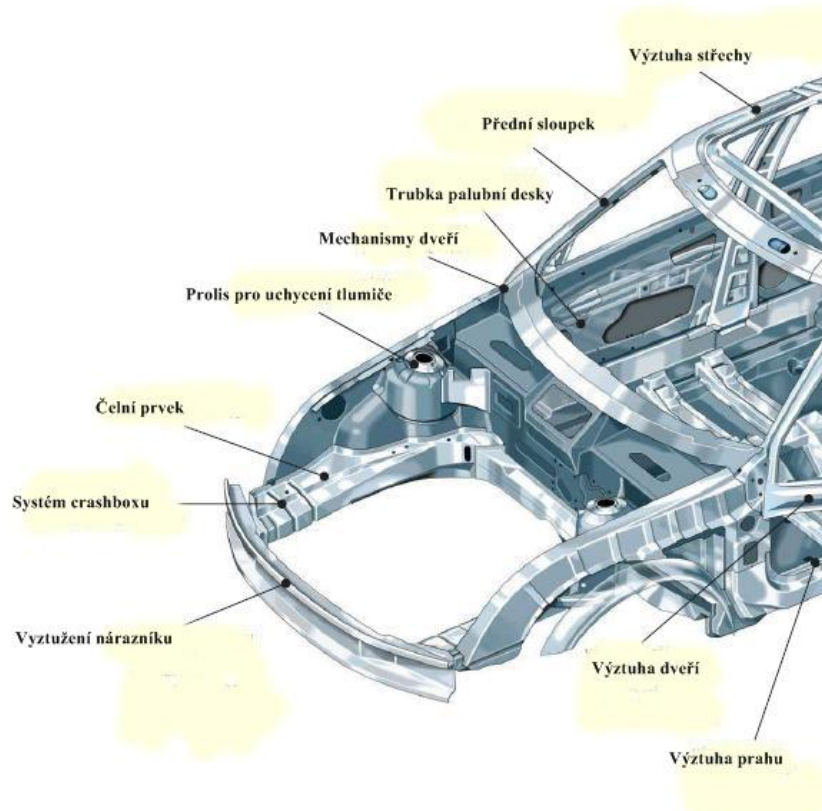
#### 4.4 Využití ocelí [45], [51]

V posledních letech je velká poptávka po vysokopevnostních ocelích. Tyto oceli se stále více využívají v technických oblastech. Jedná se především o mostové konstrukce, výškové budovy, dálkové plynovody, oceli pro automobilový průmysl, věže pro podmořskou těžbu a mnoho dalších kategorií.

Materiály, které se používají v automobilovém průmyslu, musí mít celou řadu užitných vlastností, jako například vysoká pevnost, odolnost proti únavě, svařitelnost různými metodami svařování, vhodnost pro tváření za studena, hlubokotažnost, odolnost proti rázu (i za nízkých teplot), schopnost absorbovat energii při srážce a další řadu vlastností. Jelikož tyto vlastnosti nemůže splnit pouze jeden materiál, východiskem je kombinace více druhů materiálů.

I když se stále více využívají hliníkové a hořčíkové slitiny v automobilovém průmyslu je pravdou, že i nadále se bude několik let v automobilovém průmyslu využívat ocel. Problém materiálů s protichůdnými vlastnostmi lze vyřešit novou a perspektivní metodou zvanou „tailored blanks“. Jedná se o technologii lisování polotovarů svařených ze dvou a více materiálů. Tato technologie umožňuje využití vysokopevnostní oceli pouze tam, kde je zapotřebí vyšší pevnosti z důvodu vyššího namáhání a naopak tam, kde je namáhání minimální použít běžnou konstrukční ocel nebo vysokopevnou ocel s menší tloušťkou. Při použití této metody se sníží náklady na materiál a také se sníží hmotnost konstrukce.

Z ekonomického hlediska nepřináší použití ocelí s vyšší pevností pozitiva. Ceny mikrolegovaných ocelí se odvíjí od cen běžných uhlíkových ocelí a nikoliv od cen vysokolegovaných, naopak oceli s vyšší pevností jsou dražší. Jediným ekonomickým přínosem používání ocelí s vyšší pevností je použití menšího množství ocele, sníží se hmotnost. Snížení hmotnosti konstrukce nemá vliv na zmenšení houževnatosti a spolehlivosti konstrukcí. Na obr. 41 je příklad použití vysokopevné oceli na karoserii auta.



Obr. 41 Příklad použití oceli se zvýšenou pevností [51]

#### 4.5 Svařitelnost jemnozrnných ocelí [52], [53]

Pro svařování jemnozrnných ocelí platí stejné zásady jako pro svařování běžných uhlíkových ocelí, neboť chemické složení mikrolegovaných ocelí je podobné chemickému složení nelegovaných konstrukčních ocelí. Svařování se liší jen v několika drobnostech.

Při svařování jemnozrnných ocelí bývá problémem růst zrn v tepelně ovlivněné oblasti. Proto se z tohoto důvodu svařuje, pokud možno, bez předehřevu a s minimálním měrným tepelným příkonem při svařování. Pokud je však předehřev nutný, volí se v rozmezí 100 – 150°C. Svary provedené na termomechanicky zpracovaných ocelí jsou náchylné na snížení tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti a z toho důvodu pokles pevnosti spoje. Řešením tohoto problému je snížení vneseného tepla do svaru z důvodu snížení šířky tepelně ovlivněné oblasti.

Po svaření jsou spoje tuhé, aby se zabránilo vnitřnímu pnutí, tak se svary žíhají. Tyto materiály jsou precipitačně zpevněné. Žíhací teploty se musí volit tak, aby nedocházelo k tvorbě nevyhovující disperze karbo – nitridické fáze. Pokud by došlo ke vzniku těchto fází, mělo by to za následek zvýšení meze kluzu, meze pevnosti a tvrdosti a ke snížení plastických schopností materiálu, výsledkem by bylo zkřehnutí materiálu. Tento stav se nazývá popouštěcí křehkost materiálu a z toho důvodu se volí žíhací teploty nižší, nejčastěji pod 600°C.

Oceli vyšší pevnosti jsou náchylné vůči trhlinám za studena. Zejména k tvorbě zbrzděných trhlin indukovaných difúzním vodíkem, nárůst této citlivosti je úměrný nárůstu meze kluzu. Tyto trhliny vznikají již při nízkých teplotách pod 200°C. Nejčastější lokalizace ve svaru bývá v podhousenkové oblasti. Orientovány mohou být podélně i příčně přes všechny oblasti svarového spoje. Studené trhliny jsou transkrystalického charakteru, jejich povrch je lesklý a nezoxidovaný.

Příčiny vzniku trhlin za studena:

- přítomnost vodíku ve svarovém spoji,
- vznik struktury citlivé na účinek vodíku (jako jsou martenzit a bainit),
- působení tahových zbytkových napětí.

Obsah uhlíku v kovu značně ovlivňuje svařitelnost materiálu, čím vyšší je obsah uhlíku, tím se zhoršuje svařitelnost. Abychom zjistili vhodnost materiálu ke svaření, vypočítáme uhlíkový ekvivalent, který nám určí, zda je potřeba použít nějaká zvláštní opatření při svařování (jako např. předehřev).

V uhlíkovém ekvivalentu je zohledněno množství legujících prvků a množství uhlíku obsaženého v materiálu. Do vzorce se dosazují hmotnostní procenta jednotlivých prvků.

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{CR + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (4.2)$$

Vzorec pro uhlíkový ekvivalent odvodil Mezinárodní svářečský institut (IIW) na základě měření tvrdosti.

Na druhou stranu trhliny za horka vznikají především za vyšších teplot kolem 850°C během krystalizace. Vznikají v kovech s plošně středěnou krystalickou mřížkou, což jsou austenitické oceli a hliníkové slitiny. Vzhled těchto trhlin je tvarově složitý, nejčastěji jsou rozevřené a vyskytují se v místech posledního tuhnutí svarového kovu, což je střed svaru.

## 5 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem experimentu je provedení svaření materiálu DOCOL 1200M pomocí vláknového Yb:YAG laseru. Svaření proběhlo za různých svařovacích parametrů. Materiál DOCOL 1200M byl zvolen v tloušťce 2 mm.

### 5.1 Charakteristika svařovaného materiálu DOCOL 1200M [41]

Jedná se o martenzitický ocelový plech válcovaný za studena. Tyto oceli jsou vyráběny pomocí kontinuálního tepelného zpracování. Ultra vysoké pevnosti se docílí rychlým ochlazením ve vodě za austenitických teplot. Výrobcem je švédská firma SSAB. Plechy jsou dostupné v tloušťce 0,5 – 2,1 mm. V příloze 1 je uveden materiálový list.

Tabulka 5 Mechanické vlastnosti [41]

Jakost	Mez kluzu [MPa]		Mez pevnosti po BH <sup>1)</sup> [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]		Tažnost A <sub>80</sub> [%]	Poloměr ohybu [mm] 90°ohyb
	min	max		min	max		
DOCOL 1200 M	950	-	1150	1200	1400	3	3 x t

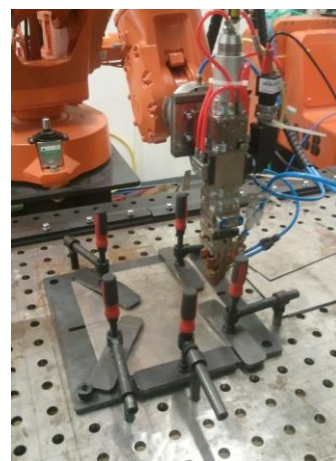
1) BH (bake hardening = „pečení“) po 2% plastické deformaci a zahřátí na 170°C

Tabulka 6 Chemické složení [41]

Jakost	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Nb %	Ti %
DOCOL 1200M	0,11	0,2	1,7	0,01	0,002	0,04	0,015	0,025

### 5.2 Metodika zkoušení

Došlo ke svaření čtyř vzorků materiálu DOCOL 1200M s různými svařovacími parametry. Poté bylo z každého plátu vyřezáno po 2 zkušebních tyčkách pro zkoušku tahem, po 2 vzorcích pro metalografické zkoušky. Dále bylo potřeba vyříznout 2 vzorky materiálu bez svaru, kvůli porovnání vlastností materiálu při tahové zkoušce. Polovina z každých vzorků byla podrobena „bake hardening“ (dále jen BH), kdy se vzorky umístili do pece na 30 min. při 180°C. Na obr. 42 je vyobrazeno ustavení vzorků při svařování.



Obr. 42 Ustavení vzorků při svařování

### 5.3 Použitá zařízení [56]

#### Laser YLS 2000

Laser YLS 2000 je vláknový laser od firmy IPG Photonics. Tento laser je umístěn na ústavu přístrojové techniky. Laser je univerzální a přizpůsobitelný různým technologickým účelům. Na ústavu lze laser opatřit řezací nebo svařovací hlavou. Zdroj pro laser je zabudován do vzduchem chlazené skříně, která je přizpůsobena pro využití v průmyslovém provozu.

Technické parametry:

- výrobce – IPG Photonics (USA),
- výstupní výkon – 2 kW,
- možnost rozšíření na 4 kW,
- vlnová délka – 1070 až 1080 nm,
- účinnost - > 30%,
- režim svařování – CW, QCW, SM,
- max. tloušťka řezu – cca 5 mm,
- max. hloubka průvaru – cca 5 mm.



Obr. 43 Laser YLS 2000

#### Průmyslový robot IRB 2400 – 10

Robot IRB 2400 – 10 je nejpoužívanější polohovací robot v dané kategorii. Používá se pro svařování, řezání, lepení, broušení, montáž, manipulaci s materiálem a mnoho dalších průmyslových aplikací. Robot také nabízí možnost zavěšení na strop i na stěnu.

Technické parametry:

- výrobce – ABB,
- dosah – 1,55 m,
- zatížení – 12 kg,
- stupně volnosti – 6,
- hmotnost – 380 kg,
- přesnost – 0,03 až 0,07 mm.



Obr. 44 Průmyslový robot IRB 2400 - 10

## Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

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

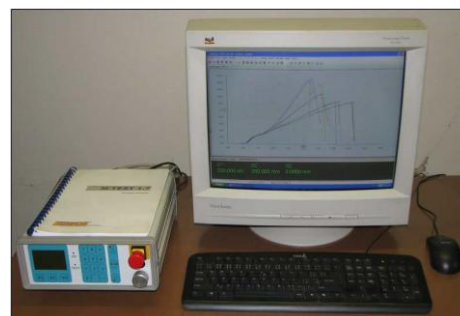
Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo – hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci univerzálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem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

Technické parametry:

- výrobce – HBM (SRN),
- měřicí rozsah – 8 až 400 kN,
- chyba měření síly – 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj.  $\pm 1$  % odpovídá třídě přesnosti 1,
- měřicí rozsah měření dráhy – 0 až 280 mm,
- chyba měření dráhy -  $\pm 0,01$  mm,
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 kB,
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy.



Obr. 45 Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/



Obr. 46 Řídicí jednotka EDC 60

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

### 5.4 Postup svařování

Jednotlivé zkušební kusy byly postupně ustaveny na stůl a zajištěny upínkami proti posunutí. Poté byly provedeny na koncích stehové svary, aby se zabránilo případnému rozevření při svařování, důsledkem tuhnutí svarového kovu. Po sestavení a provedení stehových svarů bylo provedeno samotné svaření zkušebních kusů. Svařovací parametry jsou uvedeny v tabulce 7. Jako ochranný plyn byl použit argon. Poloha ohniska je definována vůči povrchu, kladné hodnoty jsou pod povrchem.

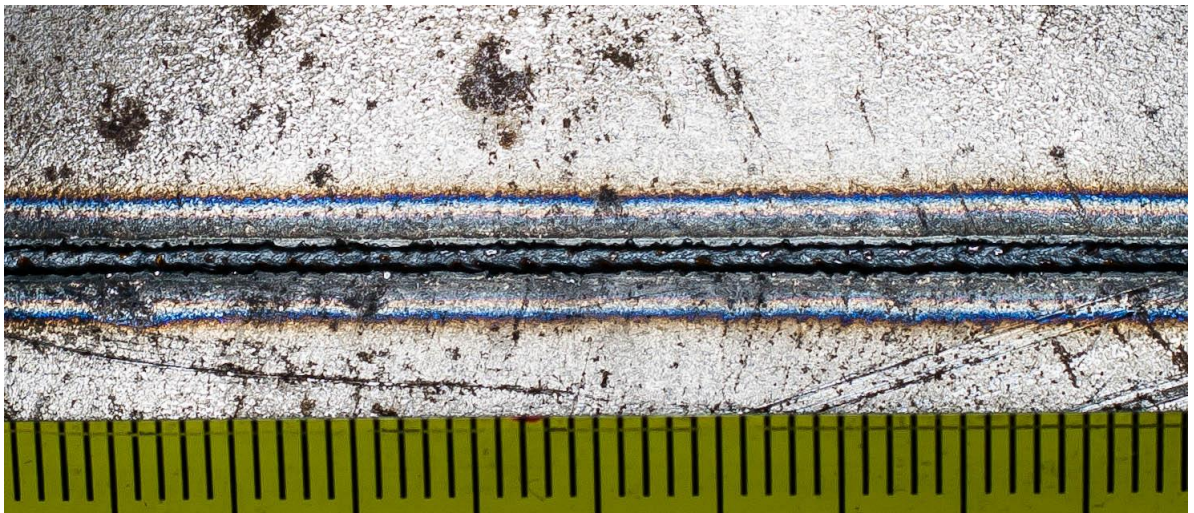
Tabulka 7 Parametry svařování

Svar č.	Materiál	Tloušťka [mm]	Výkon laseru [W]	Svařovací rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Poloha ohniska [mm]	Průtok plynu [l.min <sup>-1</sup> ]	Množství vneseného tepla [kJ.m <sup>-1</sup> ]
1	DOCOL 1200M	2	800	20	-1	12	40
2	DOCOL 1200M	2	1000	20	-1	12	50
3	DOCOL 1200M	2	1200	20	-1	12	60
4	DOCOL 1200M	2	1400	20	-1	12	70

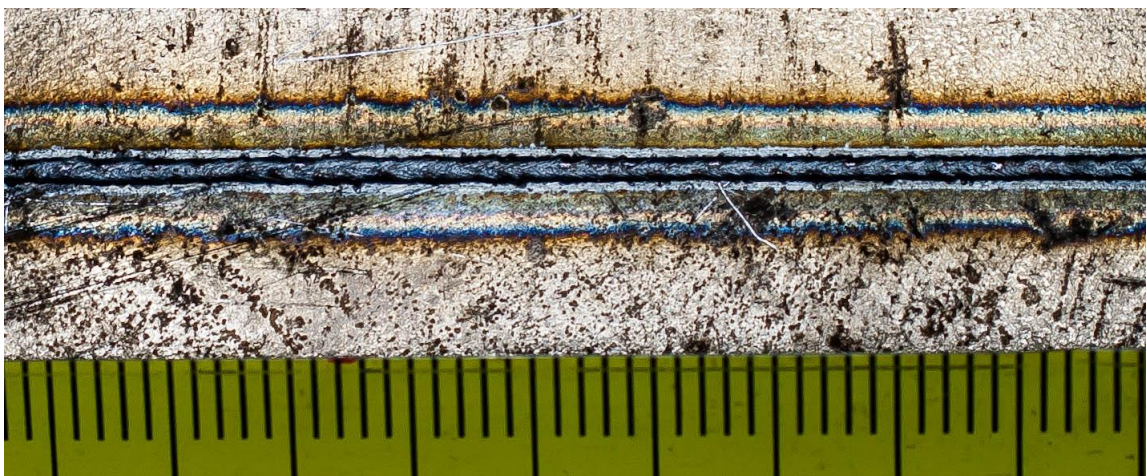
### 5.5 Vizuální kontrola

Vizuální kontrola byla provedena ze snímků pořízených po svaření.

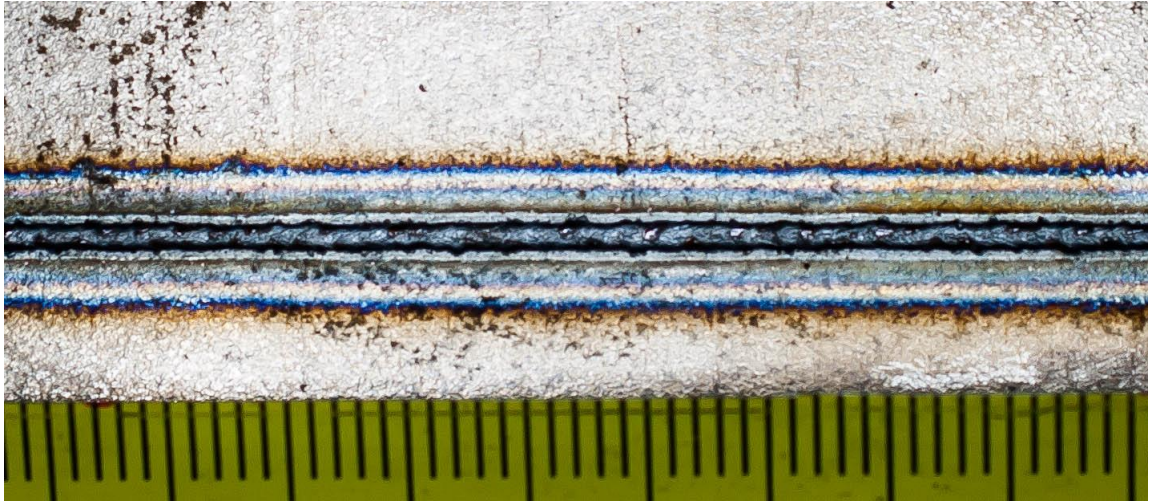
Při vizuální kontrole nebyla shledána žádná závažná chyba při svařování, naopak lze dobře rozlišit pouhým okem, jak s rostoucím výkonem se zvětšuje šířka svaru.



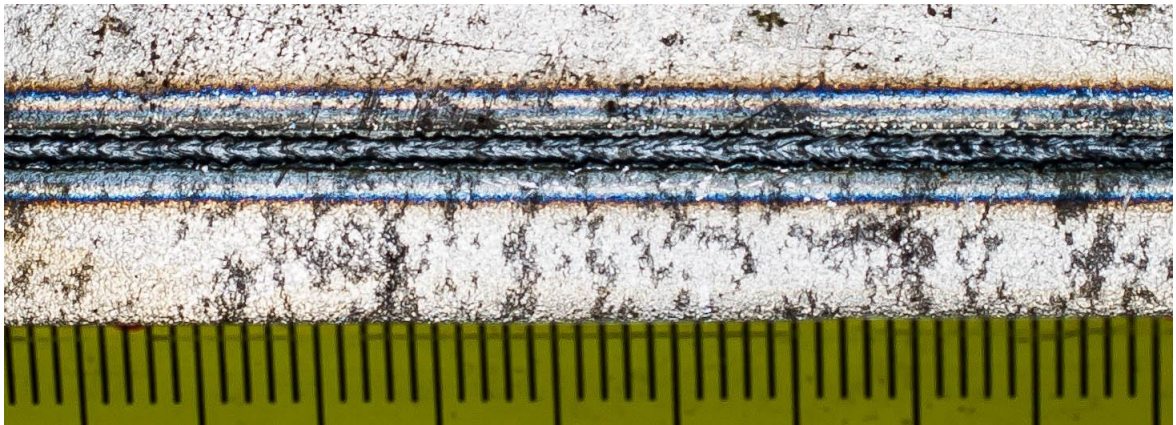
Obr. 47 Svar provedený výkonem 800 W



Obr. 48 Svar provedený výkonem 1000 W



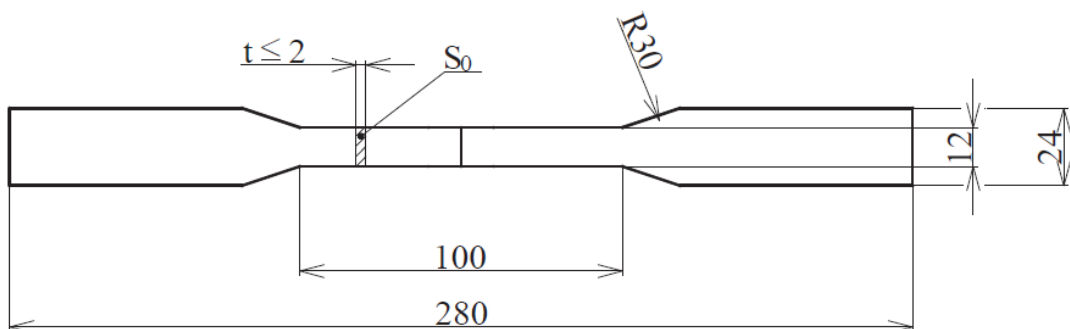
Obr. 49 Svar provedený výkonem 1200 W



Obr. 50 Svar provedený výkonem 1400 W

### 5.6 Příčná zkouška tahem

Tvar a rozměry vzorku byly zvoleny podle normy ČSN EN 895 v závislosti na tloušťce plechu.



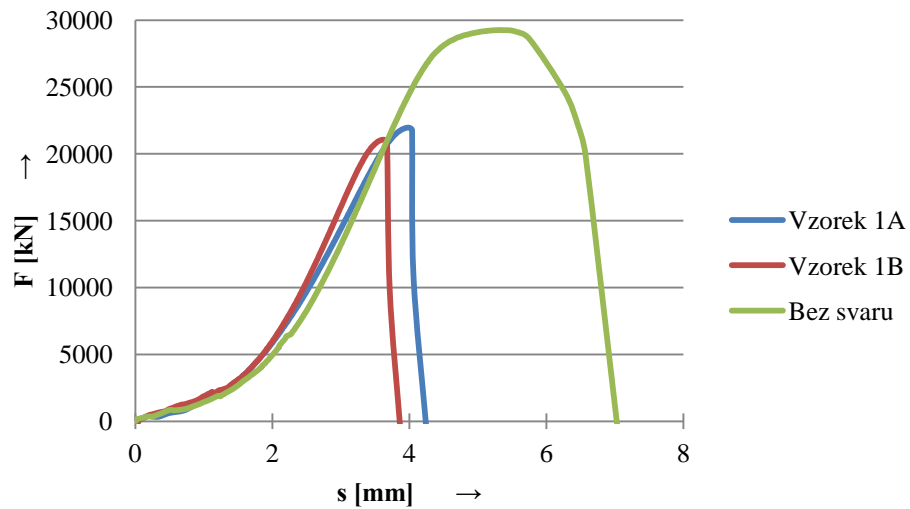
Obr. 51 Rozměry vzorku pro zkoušku tahem pro tloušťku  $t \leq 2$  mm

Fotodokumentace vzorků před zkouškou (Příloha 2) a po zkoušce (Příloha 3).

Z důvodu porovnání vlastností materiálu se provedla tahová zkouška u materiálu bez svaru.

Tabulka 8 Naměřené hodnoty: Výkon laseru P = 800 W (bez BH)

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>m</sub> [N]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]
<b>1A</b>	2,00	11,65	23,30	21958,80	466,58	942,44	1,25
<b>1B</b>	2,00	11,65	23,30	21074,80	420,17	904,50	1,25
<b>Bez svaru</b>	2,00	11,80	23,60	29255,20	1219,71	1239,63	2,50

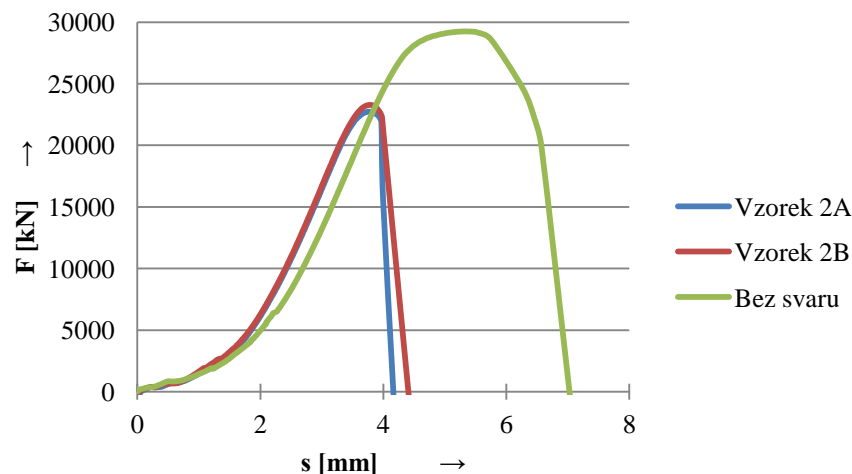


Obr. 52 Tahový diagram pro P = 800 W

U obou vzorků svařených výkonem P = 800 W došlo k poškození ve svaru, případně blízko svaru v tepelně ovlivněné oblasti. Hodnota R<sub>m</sub> neodpovídá údajům uvedených výrobcem. Vzorek 1A vydržel větší sílu při tahové zkoušce. Pro porovnání je uveden vzorek po tahové zkoušce bez svaru.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty: Výkon laseru P = 1000 W (bez BH)

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>m</sub> [N]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]
<b>2A</b>	2,00	11,80	23,60	23294,40	965,93	987,05	1,25
<b>2B</b>	2,00	11,50	23,00	22758,40	972,73	989,50	1,25
<b>Bez svaru</b>	2,00	11,80	23,60	29255,20	1219,71	1239,63	2,50

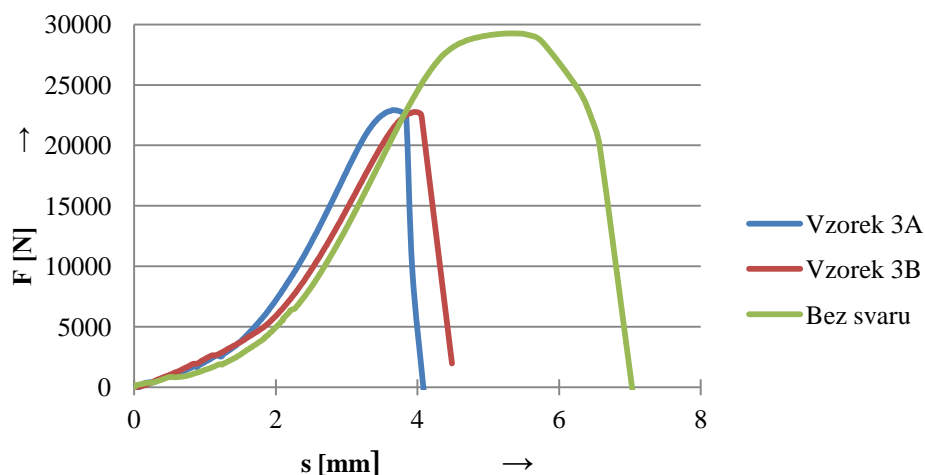


Obr. 53 Tahový diagram pro  $P = 1000 \text{ W}$

U obou vzorků svařených výkonem  $P = 1000 \text{ W}$  došlo k porušení ve svaru nebo blízko v tepelně ovlivněné oblasti. Tahová zkouška u obou vzorků proběhla téměř totožně. Pro porovnání je uveden vzorek bez svaru.

Tabulka 10 Naměřené hodnoty: Výkon laseru  $P = 1200 \text{ W}$  (bez BH)

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
3A	2,00	11,70	23,40	22767,60	84,41	972,97	1,25
3B	2,00	11,80	23,60	22918,00	956,76	971,10	1,25
Bez svaru	2,00	11,80	23,60	29255,20	1219,71	1239,63	2,50

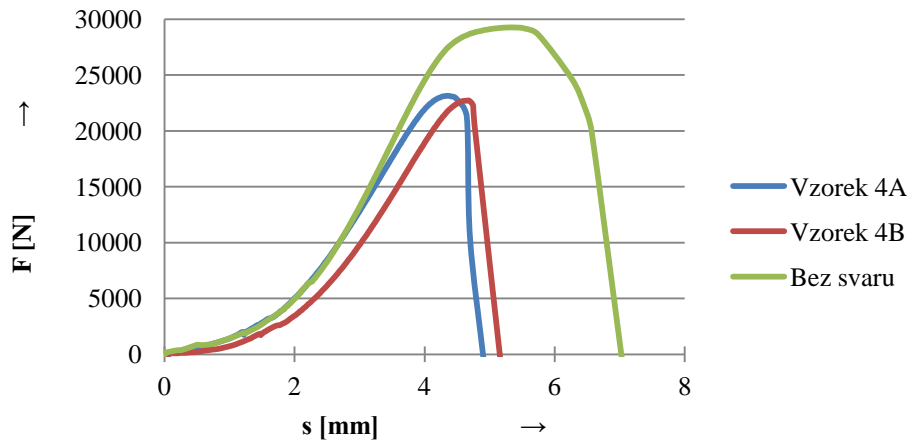


Obr. 54 Tahový diagram pro  $P = 1200 \text{ W}$

U obou vzorků svařených výkonem  $P = 1200 \text{ W}$  došlo k porušení ve svaru nebo blízko v tepelně ovlivněné oblasti. Vzorek 3A měl rychlejší náběh v počátku zkoušky. Pro porovnání je uveden vzorek bez svaru.

Tabulka 11 Naměřené hodnoty: Výkon laseru P = 1400 W (bez BH)

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>m</sub> [N]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]
4A	2,00	11,65	23,30	22711,20	885,53	974,73	1,25
4B	2,00	11,70	23,40	23162,40	981,01	959,71	1,25
Bez svaru	2,00	11,80	23,60	29255,20	1219,71	1239,63	2,50

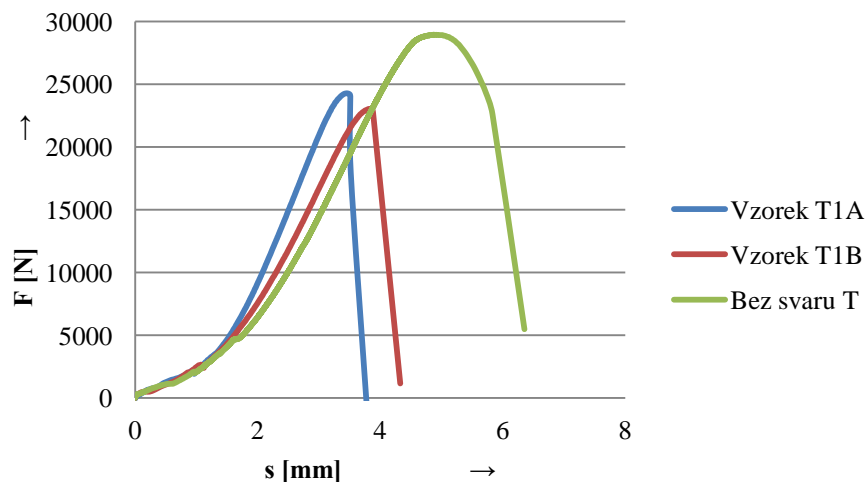


Obr. 55 Tahový diagram pro P = 1400 W

U obou vzorků svařených výkonem P = 1400 W došlo k porušení ve svaru nebo blízko v tepelně ovlivněné oblasti. Vzorek 4B je téměř totožný se vzorkem 4A, jen s rozdílem, že vzorek 4B vydržel větší prodloužení.

Tabulka 12 Naměřené hodnoty: Výkon laseru P = 800 W (po BH)

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>m</sub> [N]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]
T1A	2,00	11,90	23,80	23040,40	48,61	968,08	1,25
T1B	2,00	11,90	23,80	24281,60	1020,24	1020,24	1,25
Bez svaru T	2,00	11,80	23,60	28932,80	1225,17	1225,97	2,50

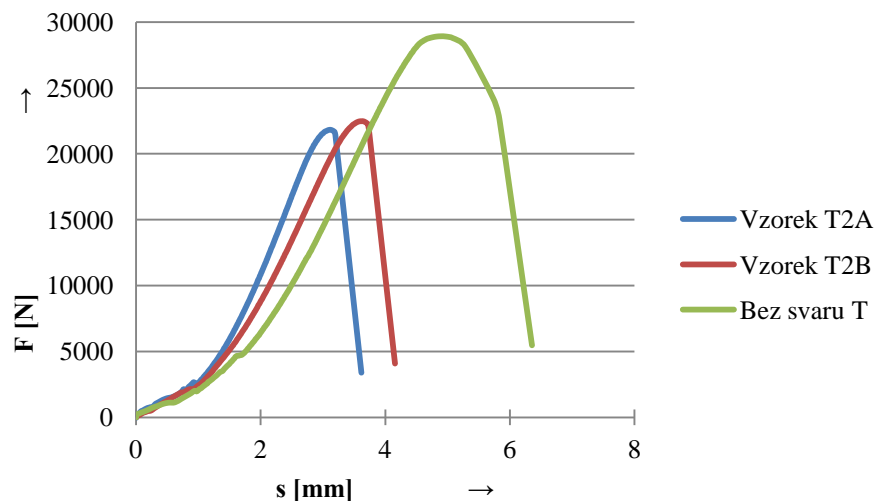


Obr. 56 Tahový diagram pro P = 800 W (po BH)

U obou vzorků svařených výkonem  $P = 800 \text{ W}$  a po BH došlo k porušení ve svaru nebo blízko v tepelně ovlivněné oblasti. Oba vzorky jakoby nebyly svařeny stejným výkonem. Pro porovnání je uveden vzorek bez svaru s BH.

Tabulka 13 Naměřené hodnoty: Výkon laseru  $P = 1000 \text{ W}$  (po BH)

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
<b>T2A</b>	2,00	11,40	23,80	22485,60	179,42	986,21	1,25
<b>T2B</b>	2,00	11,60	23,20	21808,40	145,93	940,02	1,25
<b>Bez svaru T</b>	2,00	11,80	23,60	28932,80	1225,17	1225,97	2,50

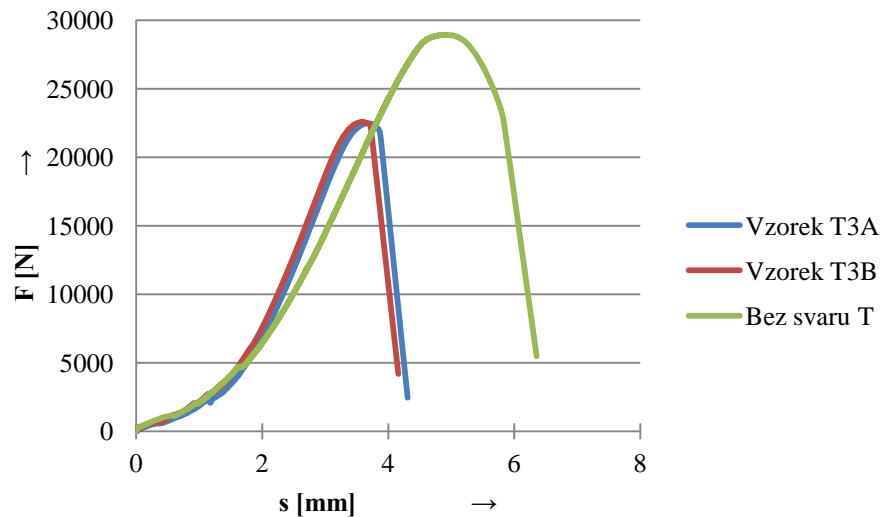


Obr. 57 Tahový diagram pro  $P = 1000 \text{ W}$  (po BH)

U obou vzorků svařených výkonem  $P = 1000 \text{ W}$  po BH došlo k porušení ve svaru nebo blízko v tepelně ovlivněné oblasti. Vzorek T2B vydržel větší prodloužení. Pro porovnání je uveden vzorek bez svaru s BH.

Tabulka 14 Naměřené hodnoty: Výkon laseru  $P = 1200 \text{ W}$  (po BH)

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
<b>T3A</b>	2,00	11,60	23,20	22588,80	959,07	973,66	1,25
<b>T3B</b>	2,00	11,60	23,20	22494,80	961,10	969,60	1,25
<b>Bez svaru T</b>	2,00	11,80	23,60	28932,80	1225,17	1225,97	2,50

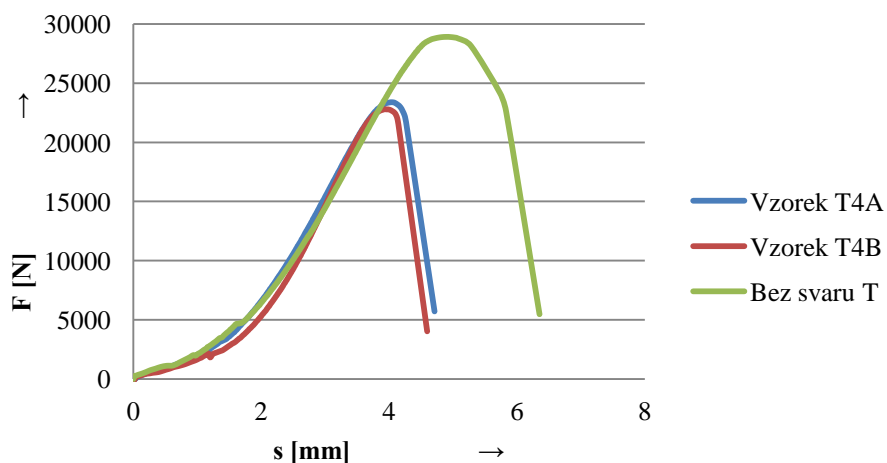


Obr. 58 Tahový diagram pro P = 1200 W (po BH)

U obou vzorků svařených výkonem P = 1200 W po BH došlo k porušení ve svaru nebo blízko v tepelně ovlivněné oblasti. Oba vzorky měly identický průběh. Pro porovnání je uveden vzorek bez svaru s BH.

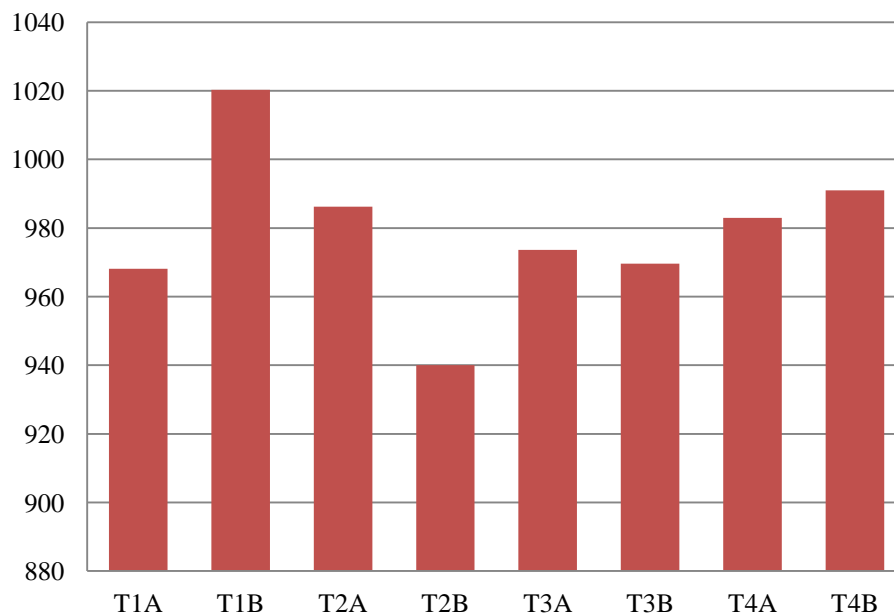
Tabulka 15 Naměřené hodnoty: Výkon laseru P = 1400 W (po BH)

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>m</sub> [N]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]
<b>T4A</b>	2,00	11,60	23,20	22805,20	967,59	982,98	1,25
<b>T4B</b>	2,00	23,60	23388,40	973,49	991,03	1,25	
<b>Bez svaru T</b>	2,00	11,80	23,60	28932,80	1225,17	1225,97	2,50

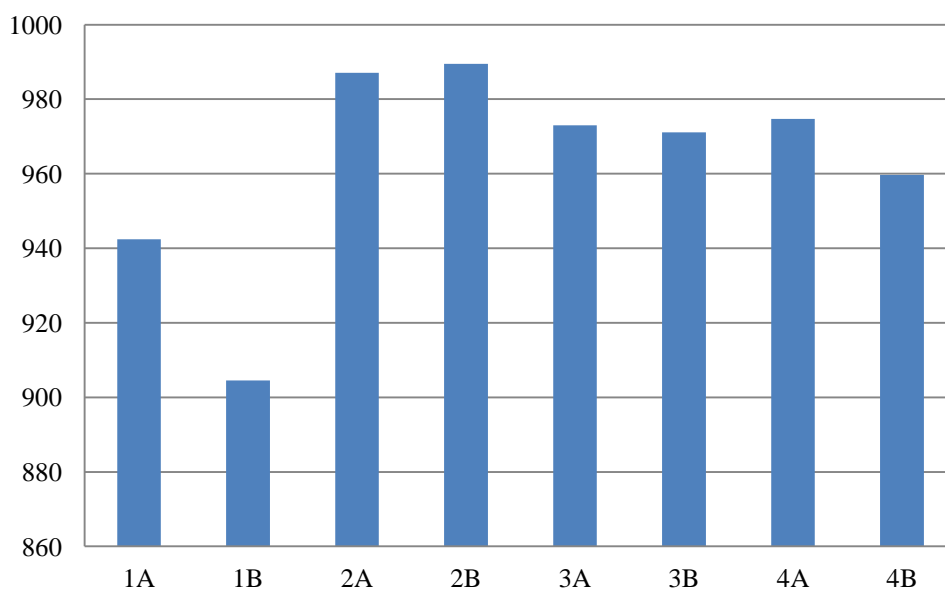


Obr. 59 Tahový diagram pro P = 1400 W (po BH)

U obou vzorků svařených výkonem P = 1400 W a po BH došlo k porušení ve svaru nebo blízko v tepelně ovlivněné oblasti. Pro porovnání je uveden vzorek bez svaru s BH.



Obr. 60 Srovnání hodnot  $R_m$  pro vzorky po BH



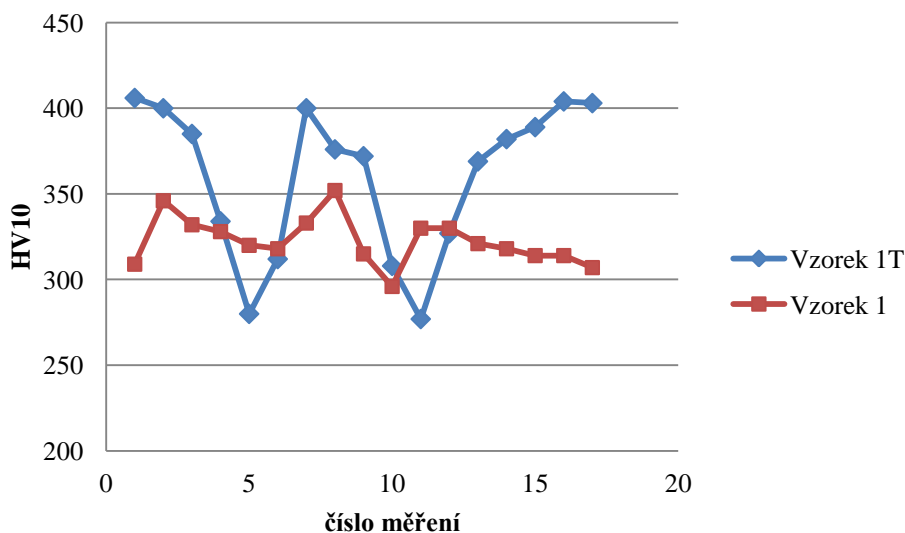
Obr. 61 Srovnání hodnot  $R_m$  pro vzorky bez BH

Z grafu na obr. 60 je patrné, že nejvyšší meze kluzu se dosáhlo při svaření vzorků (po BH) výkonem 800 W, avšak druhý vzorek neměl tak dobrou mez kluzu.

Z grafu na obr. 61 je patrné, že nejvyšší meze kluzu se dosáhlo při svaření vzorků (bez BH) výkonem 1000 W, dále by se dalo použít i vzorků svařených výkonem 1200 W, u kterých jsou výsledky skoro totožné.

## 5.7 Zkouška tvrdosti

Měření tvrdosti proběhlo dle normy ČSN EN ISO 6507-1 na tvrdoměru Zwick 3212 pod zatížením 10 kg. Vyhodnocení hodnot bylo provedeno pomocí softwaru Zwick/Roell test Expert. Na každém vzorku svařeném výkonem 800 W (jeden vzorek bez BH a jeden vzorek po BH) bylo provedeno 17 vtisků. Průběh měření byl proveden ze základního materiálu přes tepelně ovlivněnou oblast až do svaru na obě strany od svaru. Vzdálenost mezi jednotlivými vtisky byla zvolena 0,5 mm. Na obr. 60 je znázorněn průběh hodnot. Fotodokumentace ze zkoušky tvrdosti je uvedena v příloze 4.



Obr. 62 Zkouška tvrdosti

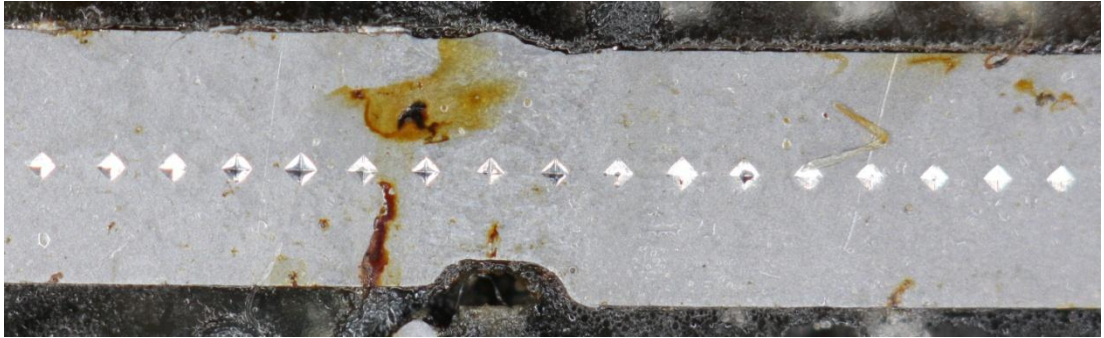
Z grafu je patrné, že u vzorku 1 se tvrdost pohybuje v rozmezí 290 až 360, naopak u vzorku po BH došlo ke zvýraznění oblastí. Základní materiál a svarový kov mají stejnou tvrdost, ale v tepelně ovlivněné oblasti došlo k prudkému poklesu tvrdosti.

Podle tvrdosti vychází lépe vzorek po BH, avšak během cyklického zatěžování hrozí riziko praskání. Z tohoto důvodu je lepší vzorek bez BH, i když má nižší tvrdost.

## 5.8 Makrostruktura a mikrostruktura

Ze vzorků pro makro a mikro strukturu byly pořízeny fotografie k vyhodnocení vad svarů a pro zjištění struktury materiálu. Fotodokumentace vzorků v příloze 5.

Na obr. 62 je zřetelné přesazení kořene. Obr. 64 viditelný propad paty svaru a naopak převýšení kořene svaru. V tomto rozlišení nelze určit přesné oblasti tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu, při svaření došlo téměř k dokonalému spojení materiálu.

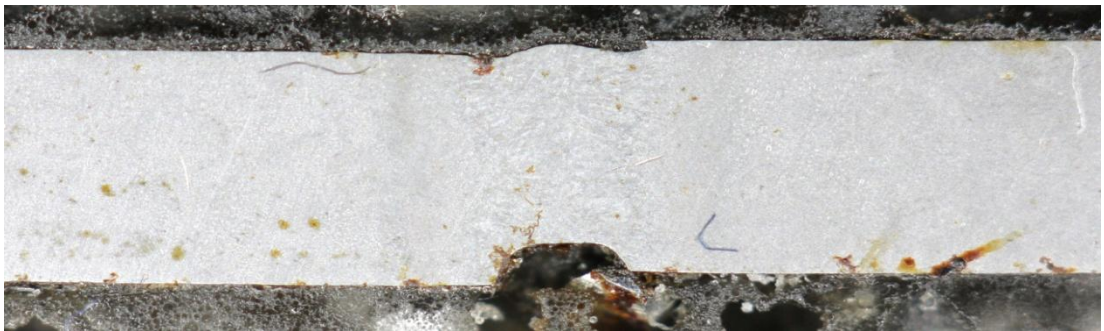


po BH



bez BH

Obr. 63 Vzorky svařené výkonem 800 W

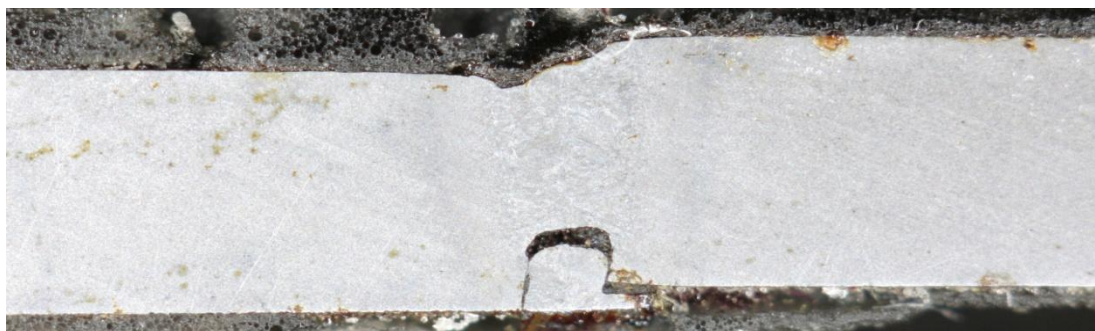


po BH



bez BH

Obr. 64 Vzorky svařené výkonem 1000 W



po BH



bez BH

Obr. 65 Vzorky svařené výkonem 1200 W



po BH



bez BH

Obr. 66 Vzorky svařené výkonem 1400 W

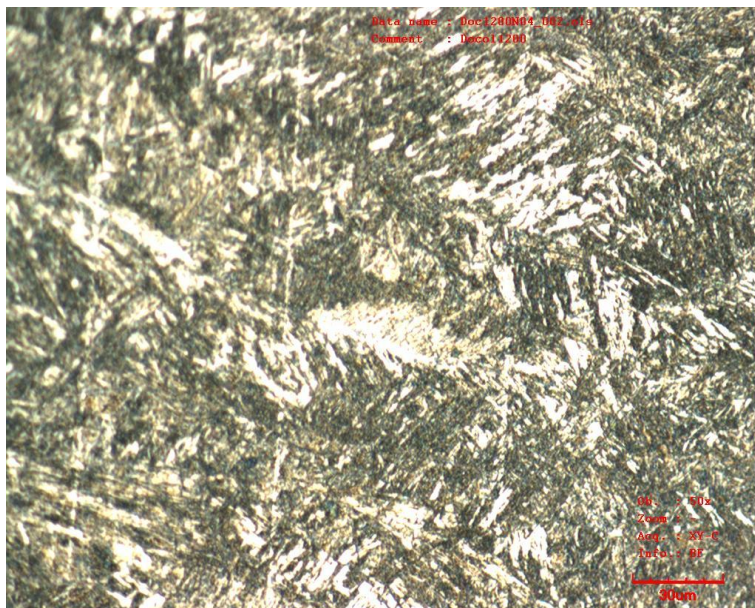
Na obr. 63 je patrné, že u vzorku po BH došlo k propadnutí kořene svaru a naopak k navýšení v patě svaru. Naopak u vzorku bez tepelné úpravy je zřetelné, že vzorky neměly stejnou tloušťku.

Na obr. 64 je opět u vzorku po BH patrný propad kořene svaru.

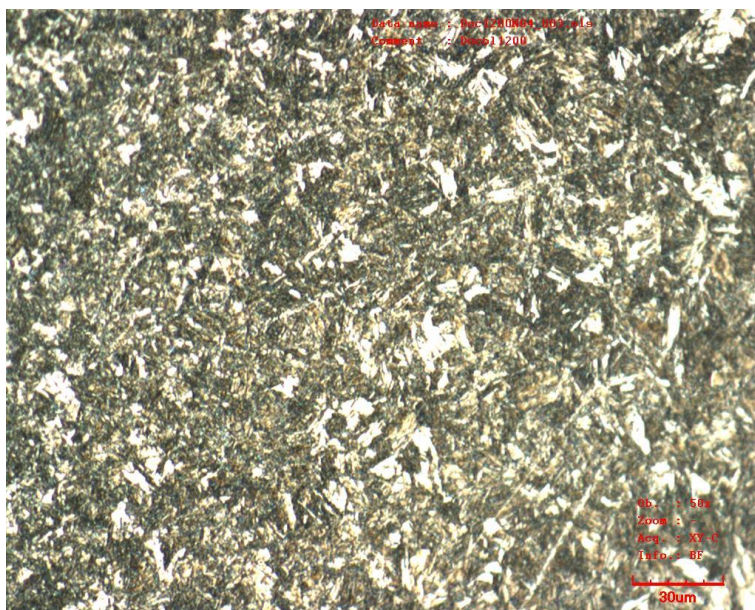
Na obr. 65 u tepelně opracovaného vzorku je vidět u kořene svaru vada typu bubliny a u vzorku bez tepelné úpravy je propad u paty svaru.

Na obr. 66 u vzorku po BH je patrný propad kořene svaru, nesterlná tloušťka materiálu a dutina u paty svaru, stejná vady typu bubliny se objevuje i u vzorku bez BH.

Při mikroskopickém zkoušení se objevily ve svarovém kovu dendrity s martenzitickou strukturou, tato struktura se objevuje u všech vzorků. Tepelně ovlivněná oblast vykazuje jemnou martenzitickou strukturu končící popuštěným martenzitem s bílými ostrůvky feritu, které dále přechází v původní jemnozrnnou strukturu. Ostatní fotografie v příloze 6.



Obr. 67 Mikrostruktura svarového kovu



Obr. 68 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti



## 6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provedení experimentu vzájemného svařování jemnozrné oceli DOCOL 1200M. Tato ocel se vyznačuje vysokou mezí kluzu, jemnozrnou strukturou a dobrou svařitelností. Icel byla speciálně vyvinuta pro výrobu karosérií v automobilovém průmyslu. Svary byly provedeny pomocí vláknového Yb:YAG laseru bez přídavného materiálu v ochranné atmosféře argonu. Pro plné zjištění mechanických vlastností byl simulován i cyklus „bake hardening“ (dále jen BH) a část zkoušek byla proběhla poté.

Při provádění příčné zkoušky tahem došlo k porušení všech předložených vzorků ve svaru nebo v tepelně ovlivněné oblasti. Na vzorky nemělo vliv ani BH po svaření. Jednotlivé vzorky se lišily pouze v délce prodloužení, při kterém došlo k porušení. Při konečném srovnání mezi kluzu jednotlivých vzorků je patrné, že vzorky bez BH svařené výkonem 1000 W (což odpovídá  $Q_s = 50 \text{ kJ.m}^{-1}$ ) a 1200 W ( $Q_s = 60 \text{ kJ.m}^{-1}$ ), jsou vhodné pro daný typ materiálu. U vzorků po BH je vhodné použít výkonu 800 W ( $Q_s = 40 \text{ kJ.m}^{-1}$ ).

Zkouška tvrdosti podle Vickerse byla provedena na dvou vzorcích svařených výkonem 800 W, jeden byl bez BH a druhý byl po BH. Zkouška ukázala, že vzorek po BH, měl výraznější nárůst tvrdosti ve všech oblastech svaru. Ze zkoušky lépe vyšel vzorek bez BH, neboť u vzorku po BH došlo k velkým výkyvům tvrdosti, které by mělo za následek při cyklickém zatěžování, nebezpečí praskání.

Zkouška makrostruktury ukázala, že svarový kov splýnul se základním materiálem. Nejsou zde výrazně odlišeny svarový kov, základní materiál a tepelně ovlivněná oblast. Při svařování došlo k vadám typu bublin, propadům kořene a převýšení paty svaru.

Z mikro výbrusů lze rozlišit dendrity s hrubou martenzitickou strukturou ve svarovém kovu. Jemnou martenzitickou strukturu končící popuštěným martenzitem s bílými ostrůvky feritu v tepelně ovlivněné oblasti. Základní materiál má jemnozrnou strukturu.

Výsledkem celého experimentu jsou doporučení pro svařování materiálu Docol vláknovým laserem. Materiál Docol je vhodný pro laserové svařování výkonem 1000 W a 1200 W, i když při tahových zkouškách nedosáhne hodnot garantovaných výrobcem. Ze zkoušky tvrdosti vyplývá, že když se provede svar laserem a poté dojde k BH, zvýší se tvrdost základního materiálu a svarového kovu, kdežto klesne tvrdost tepelně ovlivněné oblasti. Proto nejvhodnější parametry ke svařování materiálu Docol vláknovým laserem jsou výkon svařování 1000 W a 1200 W a neprovádět tepelnou úpravu po svaření, ale vyzkoušet BH před svařováním, i za předpokladu že dosáhneme o něco nižších hodnot meze kluzu, jak vyplynulo z experimentu. Z ekonomického hlediska jsou náklady na svařování laserem vyšší oproti metodě MAG, avšak toto navýšení je vykompenzováno rychlostí svařování a výsledným vzhledem a vlastnostmi svaru.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ [25]

1. Průmyslové lasery (1) – princip laser. *MMSpektrum.com* [online]. 2012 [cit. 2012-12-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>
2. Základní princip laseru a jejich dělení. *Lao.cz* [online]. 2011 [cit. 2012-12-17]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/serial-princip-a-typy-laseru.htm>
3. Lasery na vzestupu. *Epod.cz* [online]. 2011 [cit. 2012-12-18]. Dostupné z: <http://www.epod.cz/lasery-na-vzestupu/>
4. Lasery a jejich aplikace. *Plslaser.cz* [online]. 2002 [cit. 2012-12-18]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
5. DUŠEK, Jirí. Zelené a UV lasery. *Megablog* [online]. 2012 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/zelene-a-uv-lasery/>
6. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MMSpektrum.com* [online]. 2012 [cit. 2013-02-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
7. LAPŠANSKÁ, Hana. *Průmyslové aplikace laserů* [online]. 2010 [cit. 2013-02-11]. Dostupné z: [http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/lapsanska\\_prumyslove\\_aplikace\\_laseru.pdf](http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/lapsanska_prumyslove_aplikace_laseru.pdf)
8. O laseru / Princip. *Dental Laser Institut* [online]. 2008 [cit. 2013-02-11]. Dostupné z: <http://www.dentallaser.cz/laser2.html>
9. Laser a jeho využití. *ČEZ* [online]. 2004 [cit. 2013-02-11]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k31.htm>
10. Obrázkový archiv. *ESAB* [online]. 2013 [cit. 2013-02-11]. Dostupné z: <http://www.esab.cz/cz/cz/news/image-archive.cfm>
11. Nekonenční metody obrábění – 4. díl. *MMSpektrum.com* [online]. 2008 [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-4-dil.html>
12. Průmyslové aplikace laserových systémů. *Plslaser.cz* [online]. 2004 [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: <http://plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
13. DUNOVSKÝ, Jirí a Ladislav KOLAŘÍK. *Laserové technologie* [online]. 2008 [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/laser.pdf>
14. Průmyslové lasery (2) - svařovací lasery. *MMSpektrum.com* [online]. 2012 [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>
15. Nekonenční metody obrábění – 5. díl. *MMSpektrum.com* [online]. 2008 [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-5-dil.html>
16. Laserové plyny - přehled. *Airproducts* [online]. 2013 [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/lasery.htm>
17. Zpracování materiálů laserem 1.díl - Svařování. *MMSpektrum.com* [online]. 2011 [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: <http://www.matexpm.com/images/downloads/mm-spektrum-svarovani.pdf>

18. NĚMEČEK, Stanislav. *Využití laseru v průmyslu: MATEX PM : [Plzeň 29.-30.3.2011].* V Tribunu EU vyd. 1. Editor Stanislav Němeček. Brno: Tribun EU, 2011, 107 s. Knihovnicka.cz. ISBN 9788073993795.
19. KANNATEY-ASIBU, E. *Principles of laser materials processing.* Hoboken, N.J.: Wiley, c2009, xxvi, 819 p. Wiley series on processing of engineering materials. ISBN 04-701-7798-5.
20. TURŇA, Milan a Pavel KOVAČÓCY. *Zváranie laserovým lúčom.* 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2003, 90 s. ISBN 80-227-1921-8.
21. Kondukční svařování. *Trumpf.com* [online]. 2013 [cit. 2013-02-27]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svareni/kondukzni-svarovani.html>
22. Moderní způsoby svařování mikrosystémů včetně použití laseru. *Technik.ihned.cz* [online]. 2007 [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: <http://technik.ihned.cz/c1-22384750-moderni-zpusoby-svarovani-mikrosystemu-vcetne-pouziti-laseru>
23. Hluboké svařování. *Trumpf.com* [online]. 2013 [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svareni/hluboke-svarovani.html>
24. BENKO, Bernard. *Laserové technológie.* 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000, 122 s. ISBN 8022714259.
25. Citace.com. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: [generator.citace.com](http://generator.citace.com)
26. Ochranné a pracovní plyny pro svařování a řezání. *MMSpektrum.com* [online]. 2009 [cit. 2013-04-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/ochranne-a-pracovni-plyny-pro-svarovani-a-rezani.html>
27. Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I : Hodnocení kvality svarového spoje. [online]. 2006 [cit. 2013-04-06]. Dostupné z: [http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def\\_kontrola\\_sv.pdf](http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf)
28. NDT zkoušení > MT - magnetická prášková metoda. *Tediko* [online]. 2009 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.tediko.cz/index.php?sub=02cz&lang=cz&p=0207cz>
29. NDT zkoušení > PT - kapilární metody. *Tediko* [online]. 2009 [cit. 2013-04-06]. Dostupné z: <http://www.tediko.cz/index.php?sub=02cz&lang=cz&p=0208cz>
30. The Transition from Conventional Radiography to Digital Radiography. *Vidisco.com* [online]. 2011 [cit. 2013-04-06]. Dostupné z: <http://www.vidisco.com/DRtransition.asp>
31. Měření ultrazvukem. *NDT Trade* [online]. 2008 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.ndttrade.cz/category/63/mereni-ultrazvukem-sk>
32. ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 12 s.
33. ČSN EN ISO 5173. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušky ohybem.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 24 s.
34. HOLEČEK, Stanislav. *Kovové konstrukční materiály I.* 1. vyd. Praha: VŠCHT, 1997, 113 s. ISBN 80-708-0309-6.
35. ČSN EN 1320. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška rozlomením.* Praha: Český normalizační institut, 1998, 16 s.
36. ČSN EN ISO 20482. *Kovové materiály - Plechy a pásy - Zkouška hloubením podle Erichsena.* Praha: Český normalizační institut, 2004, 12 s.
37. Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. [online]. 2004 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>

38. ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2006, 24 s.
39. Zkouška tvrdosti podle Vickerse. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka\\_tvrdosti\\_podle\\_Vickerse](http://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka_tvrdosti_podle_Vickerse)
40. ČSN EN 1321. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Český normalizační institut, 1998, 12 s.
41. DOCOL M: Cold reduced martensitic steels. *SSAB* [online]. 2012, s. 4 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www.ssab.com/Global/Docol/datasheets\\_docol/en/207\\_Docol%20M.pdf](http://www.ssab.com/Global/Docol/datasheets_docol/en/207_Docol%20M.pdf)
42. Co rozhoduje při volbě typu laseru. *MMSpektrum.com* [online]. 2011 [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
43. Laser processing: CO2 laser. *TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG* [online]. 2007 [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.trumpf-machines.com/en/about-trumpf/media-center/library/laser-and-laser-processing.html>
44. MACEK, Karel. *Kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006, 164 s. ISBN 80-010-3513-1.
45. ZRNÍK, Josef. *Evropská strategie výrobních procesů: Příprava ultrajemnozrnných a nanokrystalických kovových materiálů extrémní plastickou deformací a jejich vlastnosti*. Vyd. 1. Ostrava: Repronis, 2007, 75 s. ISBN 978-80-7329-153-2. Dostupné z: [www.nanotechnologie.cz/storage/strategie4.pdf](http://www.nanotechnologie.cz/storage/strategie4.pdf)
46. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
47. KAREL MACEK, Petr Zuna a kolektiv. *Nauka o materiálu*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
48. VLACH, Bohumil. Tranzitní lomové chování ocelí. [online]. 2000 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: [http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/files/verejny/MVD/Vlach%20-%20Zaklady%20nauky%20o%20materialu%20\(CZ\)/stare/05%20-%20lomove%20chovani%20oceli.doc](http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/files/verejny/MVD/Vlach%20-%20Zaklady%20nauky%20o%20materialu%20(CZ)/stare/05%20-%20lomove%20chovani%20oceli.doc)
49. KRAUS, Václav. Tepelné zpracování a slinování. [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/TZSprcelk.pdf>
50. Automotive Steel Definitions. *WorldAutoSteel* [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-steel-definitions/>
51. Moderní oceli s vysokou pevností pro automobilový průmysl: Protože ekologické a bezpečné automobily nikdy nevyjdou z módy. *SSAB* [online]. 2011 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: [http://www.ssab.com/Global/DOMEXDOCOL/Brochures/cs/490\\_SSAB\\_automotive\\_final\\_Czech\\_2011.pdf](http://www.ssab.com/Global/DOMEXDOCOL/Brochures/cs/490_SSAB_automotive_final_Czech_2011.pdf)
52. FOLDYNA, Václav. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologiů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 1999, 296 s. Svařování. ISBN 80-857-7163-2.
53. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálův*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s. ISBN 978-80-227-3167-6.
54. Strojírenská technologie – 1. ročník Vlastnosti materiálů – pružnost, pevnost. *Www.stojirenstvi.wz.cz* [online]. 2007 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: [http://www.stojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a\\_pruznost\\_pevnost.php](http://www.stojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php)

55. Tahová zkušební tyč. *Http://www.person.vsb.cz/cz/index.php* [online]. 2013 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: [http://www.person.vsb.cz/archived/FMMI/ZPKM/Multimedia/kap3\\_2/animace/tahova\\_zkusebni\\_tyc\\_tvar.swf](http://www.person.vsb.cz/archived/FMMI/ZPKM/Multimedia/kap3_2/animace/tahova_zkusebni_tyc_tvar.swf)
56. IRB 2400. *ABB* [online]. 2013 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.abb.com/product/seitp327/c1f9874233fec095c125726f0043f260.aspx>
57. NĚMEČEK, Stanislav. *Využití laserů v průmyslu: MATEX PM: Plzeň [18.-20.3.2013]*. Editor Stanislav Němeček. Brno: Tribun EU s.r.o., 2013. ISBN 978-80-263-0359-6.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<i>Označení</i>	<i>Legenda</i>	<i>Jednotka</i>
A	Tažnost	%
b	Šířka	mm
CE <sub>IIV</sub>	Uhlíkový ekvivalent	-
c <sub>z</sub>	Rychlost zvuku	m.s <sup>-1</sup>
d <sub>z</sub>	Střední velikost zrna	Mm
E	Energie pulzu	J
F	Síla	N
f	Frekvence pulzu	Hz
F <sub>m</sub>	Maximální síla	N
I	Hustota výkonu	W.cm <sup>-2</sup>
K <sub>z</sub>	Faktor vlivu hranic zrn	N.mm <sup>-3/2</sup>
M <sub>f</sub>	Teplota martenzit start	°C
M <sub>s</sub>	Teplota martenzit finish	°C
P	Výkon laseru	W
P <sub>L</sub>	Výstupní výkon laseru	W
P <sub>max</sub>	Maximální výkon pulzu	W
p <sub>max</sub>	Maximální tlak	MPa
Q <sub>s</sub>	Množství vneseného tepla	kJ.m <sup>-1</sup>
R <sub>e</sub>	Mez kluzu	MPa
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti	MPa
R <sub>p0,2</sub>	Smluvní mez kluzu	MPa
S <sub>0</sub>	Průřez	mm <sup>2</sup>
s	Prodloužení	mm
T	Perioda pulzu	s
t	Tloušťka vzorku	mm
v	Rychlost svařování	mm.s <sup>-1</sup>
Z	Kontrakce	%
Γ	Koeficient Grunajzera	-
σ <sub>0</sub>	Třecí napětí mřížky	MPa
τ	Délka pulzu	s

## **SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Materiálový list materiálu DOCOL 1200M
- Příloha 2 Fotodokumentace vzorků před tahovou zkouškou
- Příloha 3 Fotodokumentace vzorků po tahové zkoušce
- Příloha 4 Fotodokumentace zkouška tvrdosti
- Příloha 5 Fotodokumentace vzorků mikro a makro struktury
- Příloha 6 Mikrostruktura vzorků

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Typy laserů [7].....	14
Tabulka 2 Srovnání parametrů svařování s ostatními metodami [18] .....	21
Tabulka 3 Fyzikální vlastnosti vybraných plynů [19] .....	25
Tabulka 4 Nejpoužívanější mikrolegující prvky [44].....	37
Tabulka 5 Mechanické vlastnosti [41].....	45
Tabulka 6 Chemické složení [41] .....	45
Tabulka 7 Parametry svařování .....	48
Tabulka 8 Naměřené hodnoty: Výkon laseru P = 800 W (bez BH) .....	50
Tabulka 9 Naměřené hodnoty: Výkon laseru P = 1000 W (bez BH) .....	50
Tabulka 10 Naměřené hodnoty: Výkon laseru P = 1200 W (bez BH) .....	51
Tabulka 11 Naměřené hodnoty: Výkon laseru P = 1400 W (bez BH) .....	52
Tabulka 12 Naměřené hodnoty: Výkon laseru P = 800 W (po BH).....	52
Tabulka 13 Naměřené hodnoty: Výkon laseru P = 1000 W (po BH).....	53
Tabulka 14 Naměřené hodnoty: Výkon laseru P = 1200 W (po BH).....	53
Tabulka 15 Naměřené hodnoty: Výkon laseru P = 1400 W (po BH).....	54
Tabulka 16 Srovnání metod pro 1 m svaru.....	60

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Laser [3, 9, 10, 14, 15, 16].....	11
Obr. 2 Obecné schéma laseru [2].....	12
Obr. 3 Princip stimulované emise [2]. ....	13
Obr. 4 Základní princip laseru [2]. ....	13
Obr. 5 Vlnové délky laserů [5]. ....	15
Obr. 6 Hlavní součásti laseru [8] .....	16
Obr. 7 Interakce paprsku s povrchem materiálu [13]. ....	16
Obr. 8 Pohltivost laserového záření různými materiály v závislosti na vlnové délce $\lambda$ [42]....	17
Obr. 9 Pevnolátkové lasery [6]. ....	17
Obr. 10 Nd:YAG laser [6]. ....	18
Obr. 11 Vláknový laser [6]. ....	18
Obr. 12 RF DC (radiofrekvenčně buzený, difúzně chlazený) CO <sub>2</sub> laser [6].....	19
Obr. 13 Procentuální podíl jednotlivých laserových technologií [11].....	20
Obr. 14 Schéma fungování laseru při svařování [22] .....	20
Obr. 15 Kondukční svařování [15] .....	22
Obr. 16 Svařování penetrační metodou [15].....	22
Obr. 17 Kontinuální režim, P <sub>L</sub> výstupní výkon laseru [43] .....	23
Obr. 18 Pulzní režim, P <sub>L</sub> výstupní výkon laseru [43] .....	24
Obr. 19 Nejčastěji používané typy svarů [43] .....	25
Obr. 20 Vnější a vnitřní vady svaru [43] .....	26
Obr. 21 Vady vzniklé v přeplátovaném spoji [43].....	27
Obr. 22 Penetrační zkouška [29].....	28
Obr. 23 Magnetická prášková zkouška [28] .....	29
Obr. 24 Zkouška prozářením [30].....	30
Obr. 25 Zkouška ultrazvuková [31] .....	31
Obr. 26 Tahový diagram [54] .....	32
Obr. 27 Zkušební tělesa [55].....	32
Obr. 28 Schéma zkoušky ohybem [33, 34].....	32
Obr. 29 Erichsenova zkouška [37].....	33
Obr. 30 Schéma zkoušky tvrdosti podle Vickerse [39] .....	33
Obr. 31 Zpevnění feritu vybranými rozpuštěnými prvky [44] .....	34
Obr. 32 Schéma interakce dislokací s částicemi [44] .....	36
Obr. 33 Schéma zjemňování zrna [48] .....	38
Obr. 34 Schéma průběhu (1) vysokoteplotního, (2) nízkoteplotního termomechanického zpracování a (3) izoforming [47] .....	38

Obr. 35 ARA diagram NTMZ podeutektoidní oceli [46].....	39
Obr. 36 ARA diagram VTMZ podeutektoidní oceli [49].....	39
Obr. 37 ARA diagram izoformingu podeutektoidní oceli [49] .....	39
Obr. 38 Řízené válcování a ochlazování [49].....	39
Obr. 39 Schéma řízeného válcování a ochlazování (Steckelova válcovna) [45].....	40
Obr. 40 Závislost meze pevnosti na tažnosti vybraných druhů ocelí [50].....	41
Obr. 41 Příklad použití oceli se zvýšenou pevností [51] .....	43
Obr. 42 Ustavení vzorků při svařování .....	45
Obr. 43 Laser YLS 2000.....	46
Obr. 44 Průmyslový robot IRB 2400 - 10 .....	46
Obr. 45 Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/ .....	47
Obr. 46 Řídící jednotka EDC 60.....	47
Obr. 47 Svar provedený výkonem 800 W .....	48
Obr. 48 Svar provedený výkonem 1000 W .....	48
Obr. 49 Svar provedený výkonem 1200 W .....	49
Obr. 50 Svar provedený výkonem 1400 W .....	49
Obr. 51 Rozměry vzorku pro zkoušku tahem pro tloušťku $t \leq 2\text{mm}$ .....	49
Obr. 52 Tahový diagram pro $P = 800\text{ W}$ .....	50
Obr. 53 Tahový diagram pro $P = 1000\text{ W}$ .....	51
Obr. 54 Tahový diagram pro $P = 1200\text{ W}$ .....	51
Obr. 55 Tahový diagram pro $P = 1400\text{ W}$ .....	52
Obr. 56 Tahový diagram pro $P = 800\text{ W}$ (po BH) .....	52
Obr. 57 Tahový diagram pro $P = 1000\text{ W}$ (po BH) .....	53
Obr. 58 Tahový diagram pro $P = 1200\text{ W}$ (po BH) .....	54
Obr. 59 Tahový diagram pro $P = 1400\text{ W}$ (po BH) .....	54
Obr. 60 Srovnání hodnot $R_m$ pro vzorky po BH.....	55
Obr. 61 Srovnání hodnot $R_m$ pro vzorky bez BH .....	55
Obr. 62 Zkouška tvrdosti .....	56
Obr. 63 Vzorky svařené výkonem 800 W .....	57
Obr. 64 Vzorky svařené výkonem 1000 W .....	57
Obr. 65 Vzorky svařené výkonem 1200 W .....	58
Obr. 66 Vzorky svařené výkonem 1400 W .....	58
Obr. 67 Mikrostruktura svarového kovu.....	59
Obr. 68 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti .....	59
Obr. 69 Mikrostruktura základního materiálu .....	60

**Příloha 1** Materiálový list materiálu DOCOL 1200M

Pos/Item		Charge/Cast	*p	*p	Provnr/Test No.	Dimension			Kg/Kilos	St/Pieces	*LEV TILLST	
1		25-8483	LD	S	12654118	2000	X	1250	2.00	195	5	2

Charge/Cast	*Ec	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Nb	V	TI	B	Desox
25-8483	38	106	19	158	10	3	4	3	3	1	0	44	15	1	0	3	SI+AL


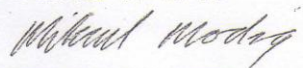
  

Provnr Test No	*L	RP02 N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	RM N/mm <sup>2</sup>	A% A80	A% mm
1265411	T	1095		1252	4	

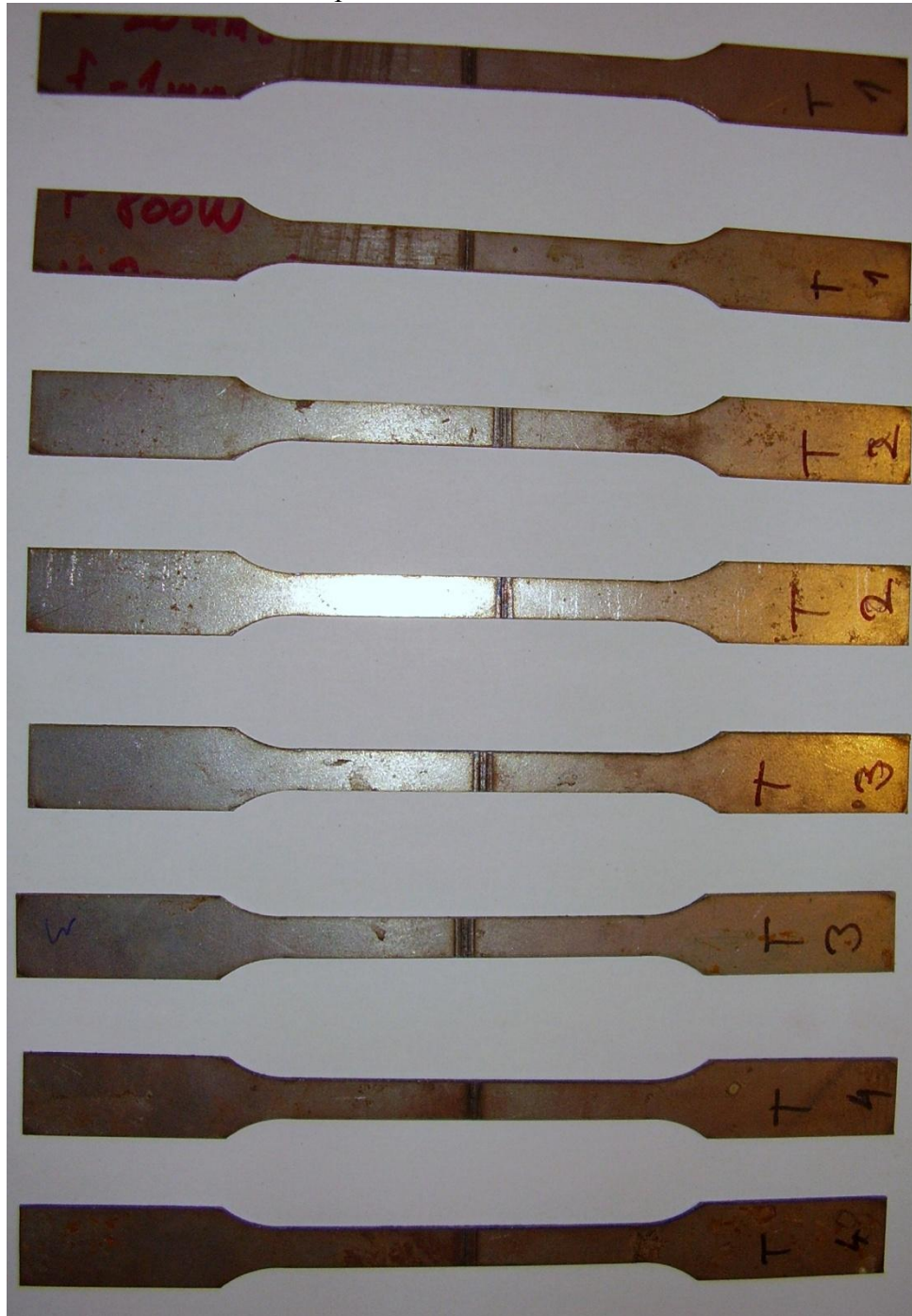
ANM/NOTES				ANM/NOTES				ANM/NOTES			
-----------	--	--	--	-----------	--	--	--	-----------	--	--	--

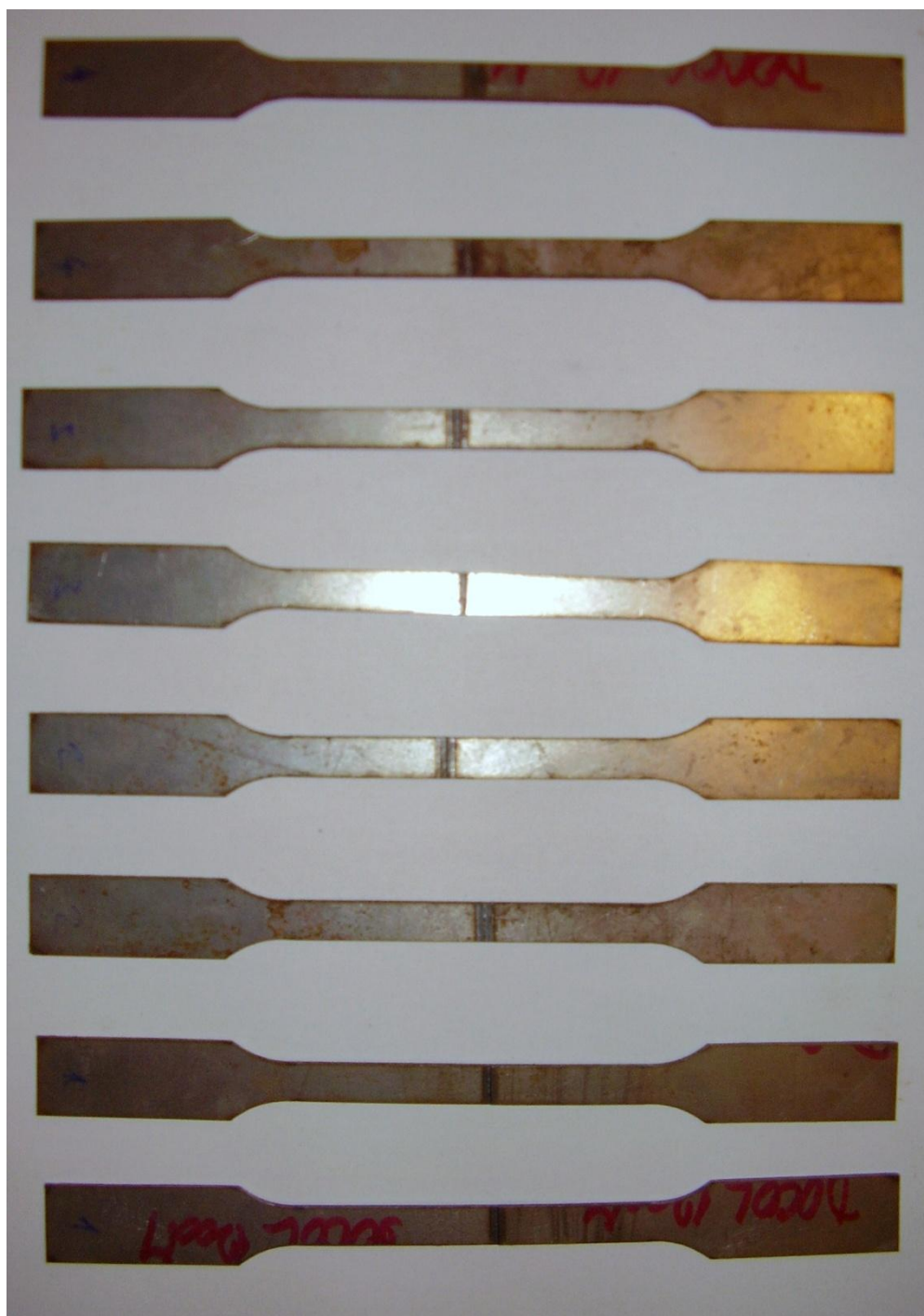
Y 2067 11-02 EDITA BOBERGS FALLUN 32622 MH Vi intygar härmed att materialet är tillverkat och provat i överensstämmelse med vår ovan angivna order. We hereby certify that the material has been made and tested in accordance with our the above mentioned order.	 Tillverkarens märke/ Mark of the Manufacturer	BORLÄNGE 11-05-19  DEPT MATERIALTESTING MIKAEL MODIG	Inspektör's stamp
		* = FÖRKLARINGAR, SE BAKSIDA EXPLANATIONS, PLEASE TURN OVER ERKLÄRUNGEN, BITTE WENDEN	

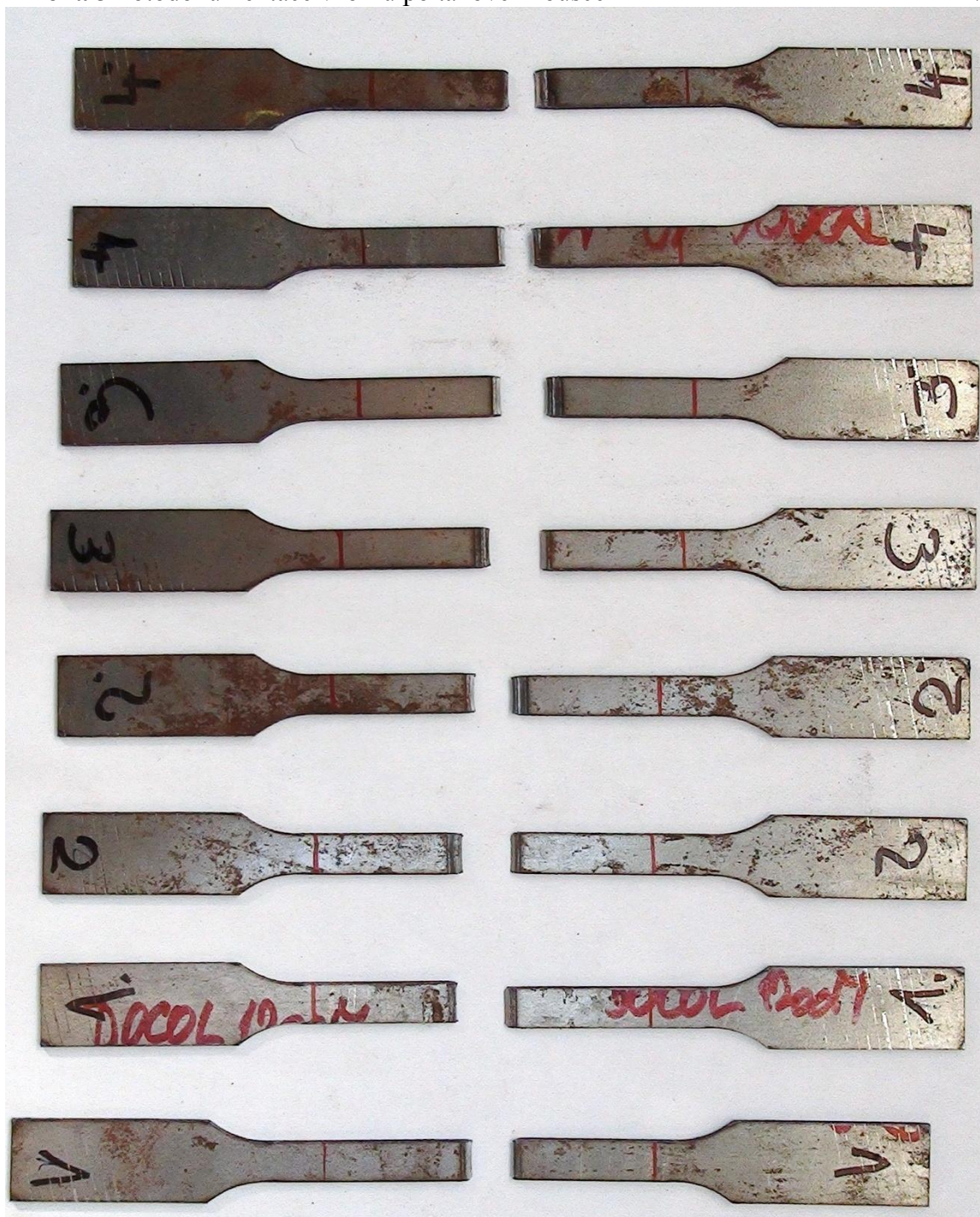
Postadress/Postal address S-781 84 BORLÄNGE Sweden	Telefon/Telephone 0243-700 00 +46 243 700 00	Telex 50950 ssab s
--	--	-----------------------



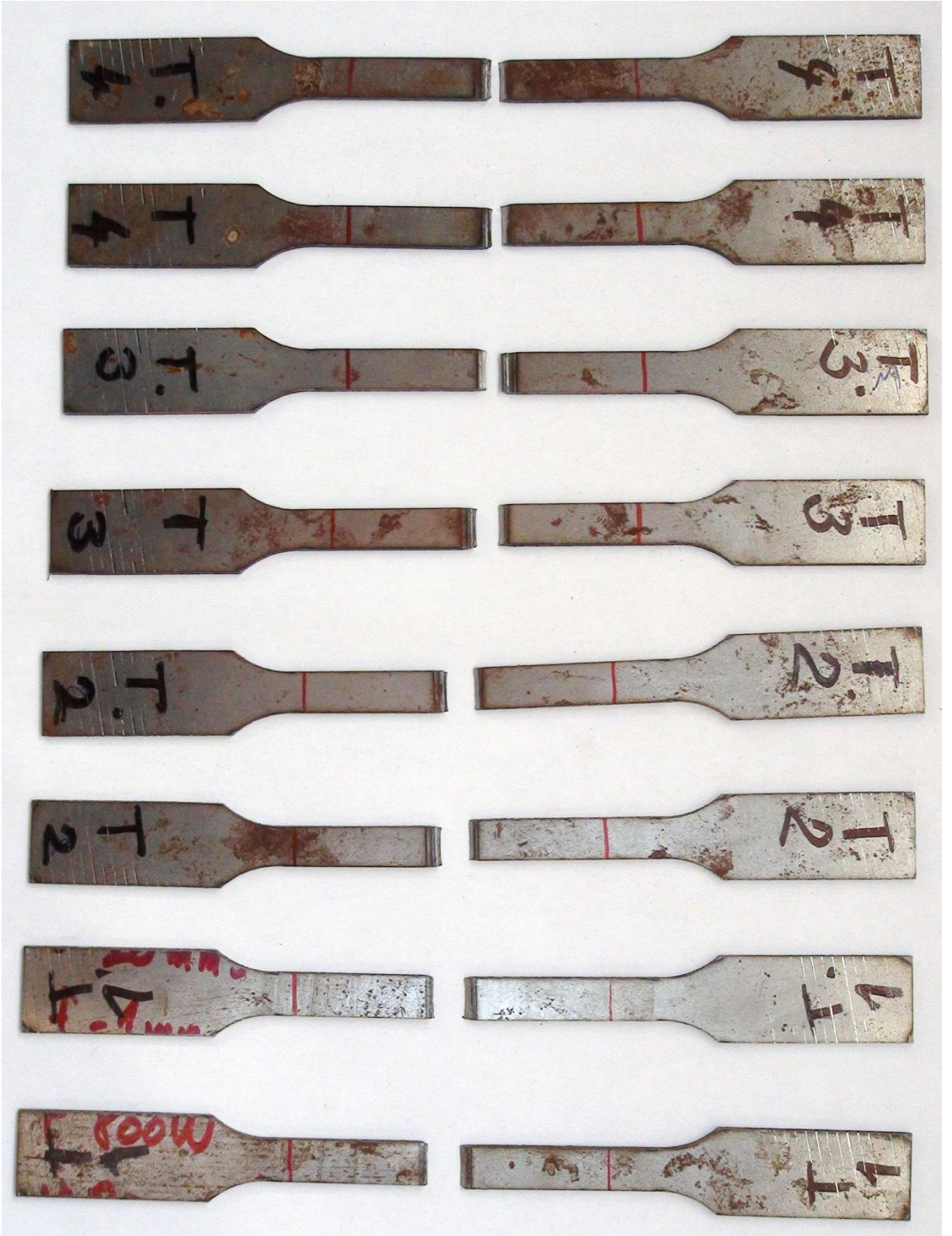
Vzorky po BH



Vzorky bez BH



Vzorky bez BH

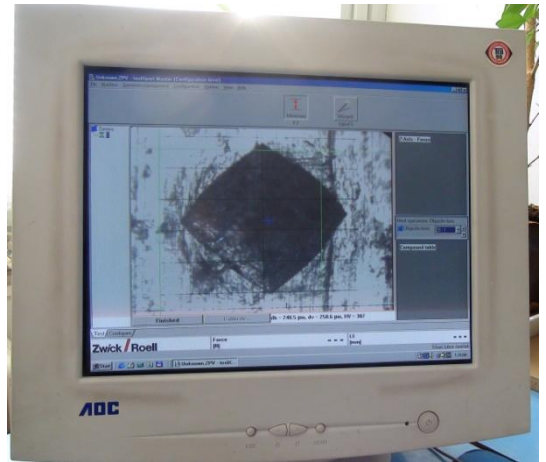


Vzorky po BH

#### Příloha 4 Fotodokumentace zkouška tvrdosti



Detail ustavení vzorku



Detail vrypu

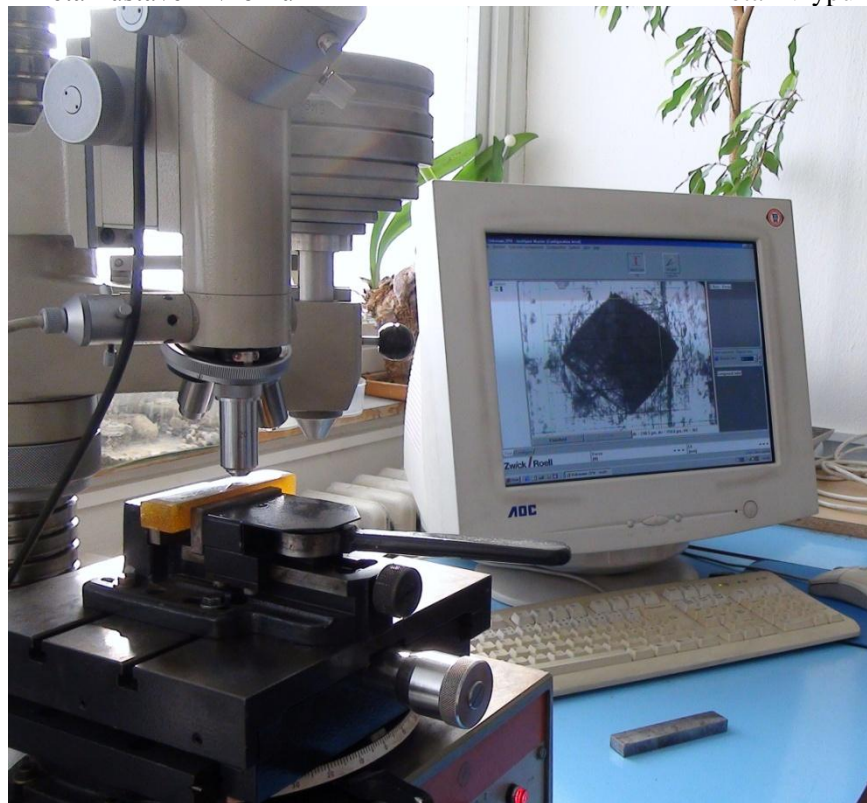
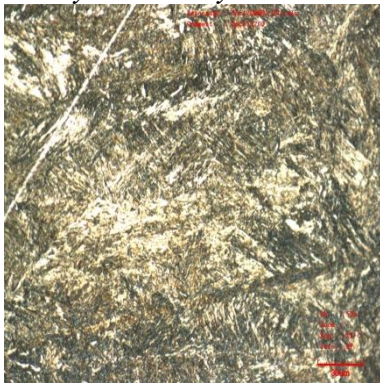


Schéma zkoušky

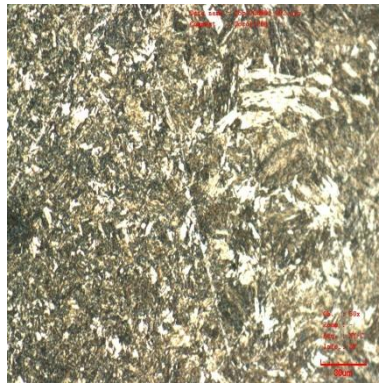
**Příloha 5** Fotodokumentace vzorků pro mikro a makro strukturu



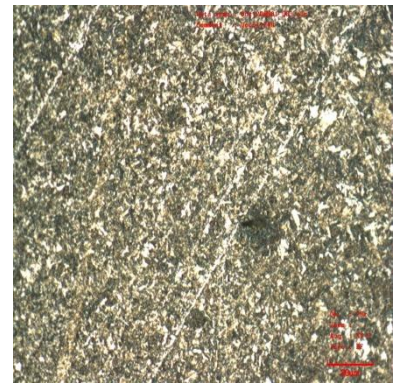
*Vzorky svařené výkonem 800 W bez BH*



Svarový kov

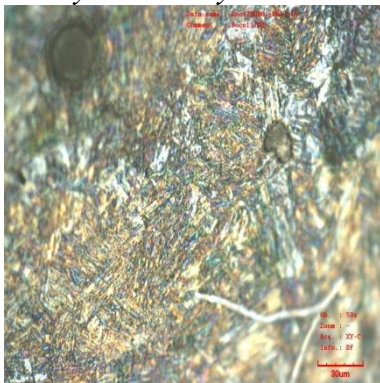


Tepelně ovlivněná oblast

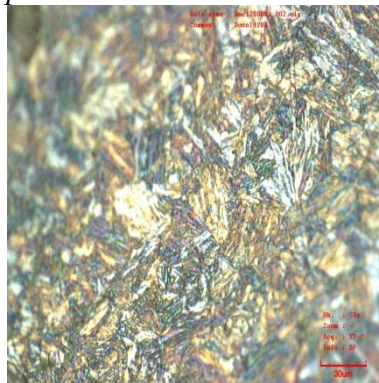


Základní materiál

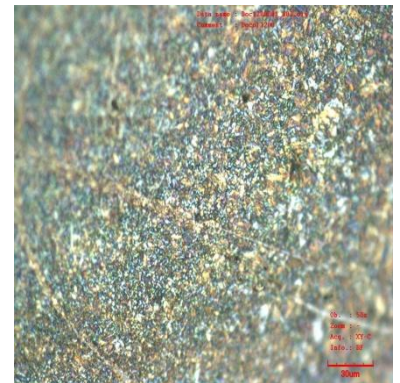
*Vzorky svařené výkonem 800 W po BH*



Svarový kov

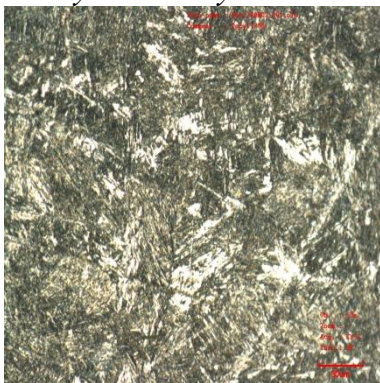


Tepelně ovlivněná oblast

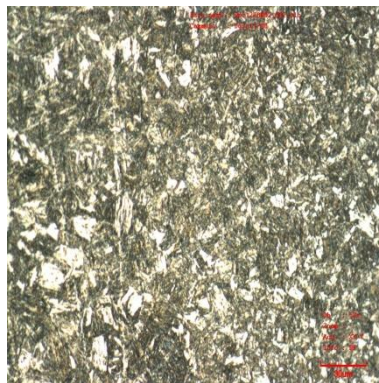


Základní materiál

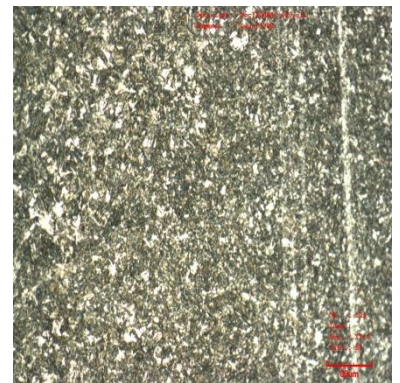
*Vzorky svařené výkonem 1000 W bez BH*



Svarový kov

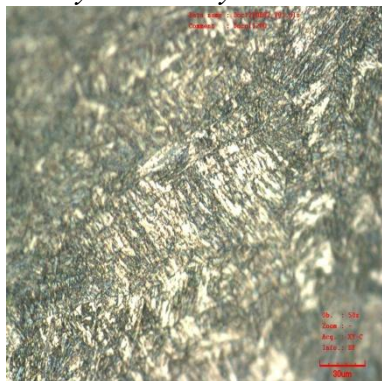


Tepelně ovlivněná oblast

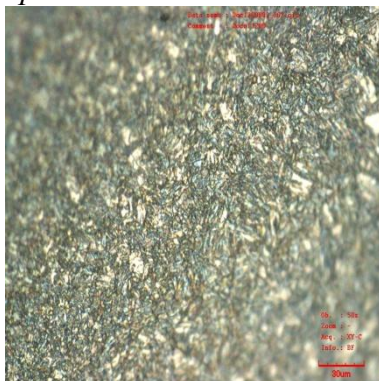


Základní materiál

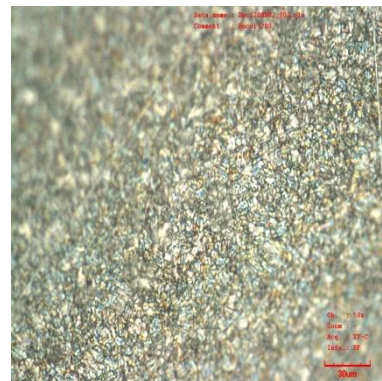
*Vzorky svařené výkonem 1000 W po BH*



Svarový kov

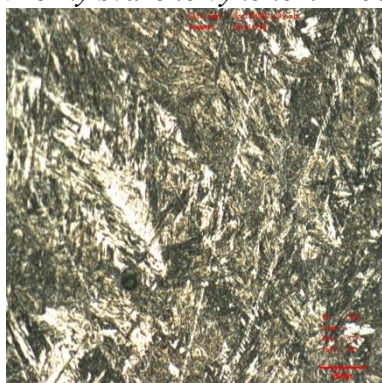


Tepelně ovlivněná oblast

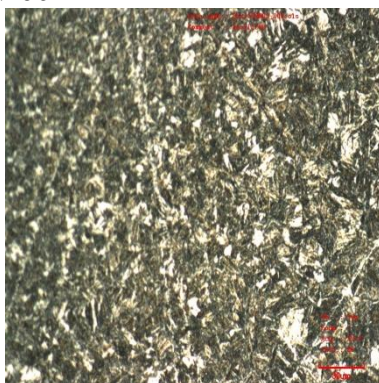


Základní materiál

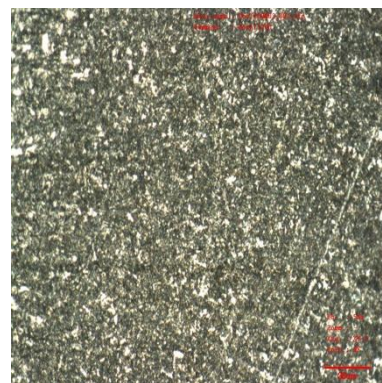
*Vzorky svařené výkonem 1200 W bez BH*



Svarový kov

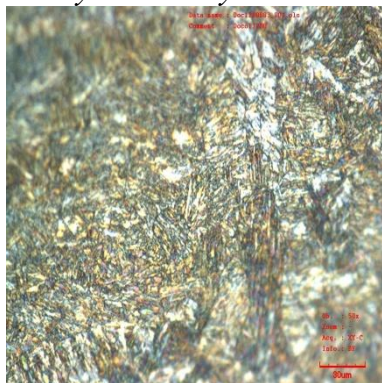


Tepelně ovlivněná oblast

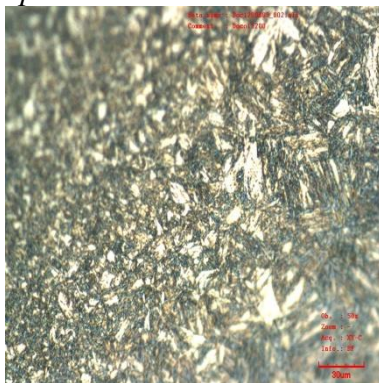


Základní materiál

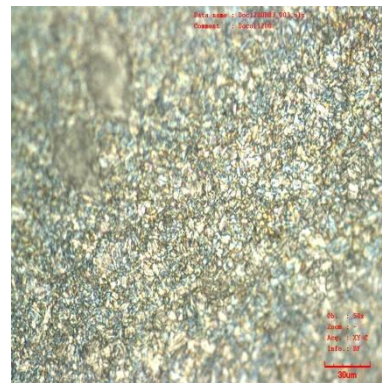
*Vzorky svařené výkonem 1200 W po BH*



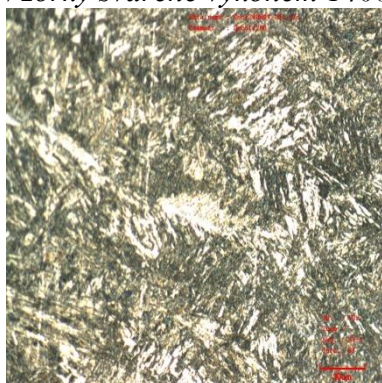
Svarový kov



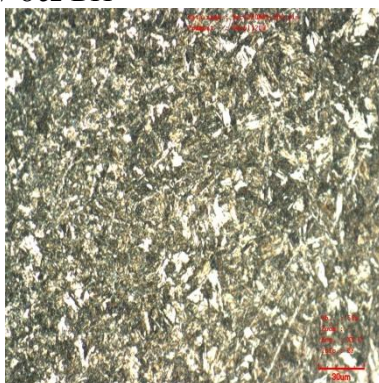
Tepelně ovlivněná oblast



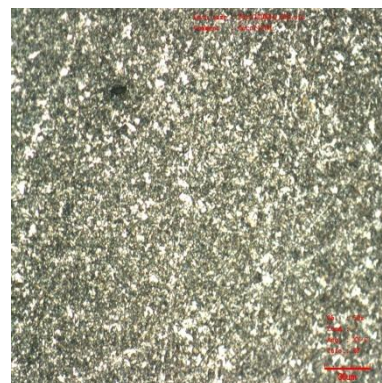
Základní materiál

*Vzorky svařené výkonem 1400 W bez BH*

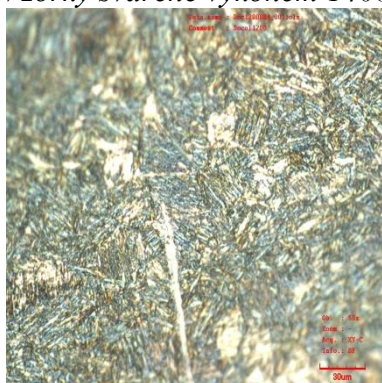
Svarový kov



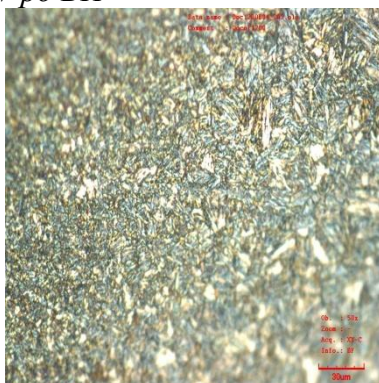
Tepelně ovlivněná oblast



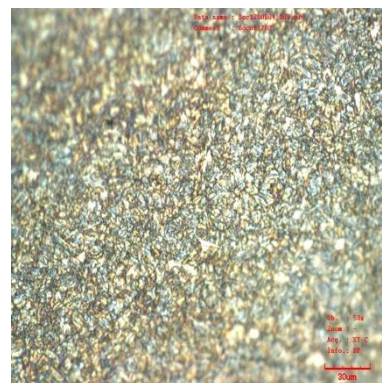
Základní materiál

*Vzorky svařené výkonem 1400 W po BH*

Svarový kov



Tepelně ovlivněná oblast



Základní materiál