

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# OPTIMALIZACE LASEREM VYTVÁŘENÝCH PRŮVAROVÝCH SVARŮ U POZINKOVANÝCH PLECHŮ

OPTIMIZATION OF THE LASER WELD OF OVERLAP SEAM FOR ZINK LAYERED SHEET  
METAL

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Bc. Roman PLÍŠEK

**VEDOUcí PRÁCE**  
SUPERVISOR

RNDr. Libor MRŇA, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Roman Plíšek

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:

### **Optimalizace laserem vytvářených průvarových svarů u pozinkovaných plechů**

v anglickém jazyce:

### **Optimization of the laser weld of overlap seam for zink layered sheet metal**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V automobilovém průmyslu se stále častěji svařují laserem již pozinkované ocelové výlisky. Při přeplátovaném spoji je důležité zachovat určitou mezeru mezi oběma svařovanými díly, která zajistí odvod zinkových par z místa svaru. Pokud tato podmínka není dodržena, zinkové páry způsobují svarové vady a sníženou pevnost spojem. Cílem práce je studovat závislost mezi pevností a kvalitou svaru na velikosti mezery mezi oběma plechy.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii svařování laserem. Navrhnout metodiku experimentu. Provést mechanické zkoušky a vyhodnotit strukturu svarů. Komplexně posoudit vliv svařovacích parametrů na výsledný svar.



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, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
- 5.KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
- 6.KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 18.11.2013

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Bc. PLÍŠEK Roman: Optimalizace laserem vytvářených průvarových svaru u pozinkovaných plechů

---

Diplomová práce popisuje experiment svařování pozinkovaných plechů pomocí vláknového laseru. Experiment je založen na zkoušení svarů překládaných spojů s rozdílnou mezerou mezi oběma svařovanými díly. Teoretická část práce popisuje princip a jednotlivé typy laserů, technologii laserového svařování, svarové vady, zinkování a kontroly svarových spojů. V experimentální části práce byly provedeny, vyhodnoceny zkoušky svarů a rozbor výsledků experimentu.

Klíčová slova

laser, laserové svařování, zinkování, zkouška

## **ABSTRACT**

Bc. PLÍŠEK Roman: Optimization of the laser weld of overlap seam for zink layered sheet metal

---

This diploma thesis deals with the experiment of welding galvanized sheets using fiber laser. The experiment is based on testing of welds lap joints with different gap between the welded parts. Theoretical part of this diploma thesis describes the principles and different types of lasers, laser welding technology, welding defects, galvanizing and inspection of welded joints. In the experimental part of the thesis welding tests and analysis of the results of the experiment have been realised and evaluated.

Key words

Laser, Laser welding, Galvanizing, Examination

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PLÍŠEK, R. *Optimalizace laserem vytvářených průvarových svarů u pozinkovaných plechů*. Brno, 2014. 54s, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí diplomové práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

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

V Brně 27. 5. 2014

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za uskutečnění destruktivních zkoušek. Poděkování patří také mé rodině za podporu během celého studia.

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) "ALISI - Centrum pokročilých diagnostických metod a technologií" a tento je dále podpořen z Národního programu udržitelnosti I. - NPU I (LO1212), jehož cílem je podpora výzkumu, experimentálního vývoje a inovací z veřejných prostředků.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD .....	9
1 LASER .....	10
1.1 Historie laseru .....	10
1.2 Princip laseru a jeho vlastnosti .....	11
1.3 Základní součásti laseru a jejich rozdělení .....	13
1.4 Interakce laserového paprsku s materiálem .....	14
1.5 Nejrozšířenější lasery používané v průmyslu .....	14
1.6 Využití laseru v průmyslu .....	17
1.7 Bezpečnost práce s lasery .....	19
2 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ.....	20
2.1 Svařovací parametry.....	21
2.2 Ochranné plyny .....	22
2.3 Příprava svarových ploch a typy svarů .....	24
2.4 Přednosti a nedostatky laserového svařování.....	25
3 SVAROVÉ SPOJE A JEJICH KONTROLA.....	27
3.1 Rozdělení svarových vad .....	27
3.2 Nedestruktivní zkoušky svarového spoje.....	28
3.3 Destruktivní zkoušky svarového spoje.....	31
4 POVRCHOVÁ ÚPRAVA ZINKOVÁNÍM.....	35
4.1 Žárové zinkování.....	35
4.2 Galvanické zinkování.....	37
4.3 Ostatní způsoby zinkování .....	38
4.4 Svařování pozinkované oceli .....	39
5 PRAKTICKÁ ČÁST .....	40
5.1 Návrh experimentu.....	40
5.2 Svařovací proces .....	41
5.3 Zkouška tahem .....	44
5.4 Zkouška makrostruktury .....	51
6 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU .....	53
ZÁVĚR.....	54

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků, grafů a tabulek

## ÚVOD [23], [38]

Laserové technologie nachází stále větší uplatnění v průmyslové výrobě, především u svařování nebo dělení materiálů. I když metoda laserového svařování obr. 1 patří mezi nejmladší technologie, díky rozvoji a zvyšování výkonů laserů zaznamenala v poslední době poměrně bouřlivý rozvoj. Postupně tak dochází k nahrazování jiných technologií. Může za to nejen vývoj výkonnějších a nových typů laserů, ale i používání nových moderních materiálů, které mohou být jinými metodami těžce svařitelné. Podstatnou míru na tomto rozvoji mají rostoucí požadavky na zvyšování produktivity výroby a opakovatelnosti technologického procesu. Hlavní předností laserového svařování je kvalita svaru, podstatně nižší tepelně ovlivněná oblast, vysoká produktivita a snadnější možnost automatizace, také vyšší hloubka průvaru, povrchový vzhled a svařování bez přídavného materiálu.

Diplomová práce se zabývá experimentem svařování pozinkovaných plechů. Jedná se o laserové průvarové svary, kde je mezi svařovanými plechy určitá mezera, která umožňuje odpařování zinku a tím se docílí lepších svarů. Cílem je optimalizovat tyto mezery v závislosti na kvalitě svarů pomocí vyhodnocení zkoušky v příčném tahu a vyhodnocení makrostruktury.



Obr. 1 Laserové svařování automobilových dveří [23]

## 1 LASER [43], [44]

Objevení laseru můžeme považovat za jeden z nejvýznamnějších objevů v historii lidstva. V dnešní době se s laserem setkáme doslova na každém kroku a stal se naprosto běžnou a neodmyslitelnou součástí našeho života. Z převážné většiny našel uplatnění ve strojírenském průmyslu, zdravotnictví, ale i ve výpočetní technice, se kterou se každodenně setkáváme. Název LASER pochází z názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilovač světla pomocí stimulované emise záření) a jde o složení počátečních písmen.

### 1.1 Historie laseru [7], [47]

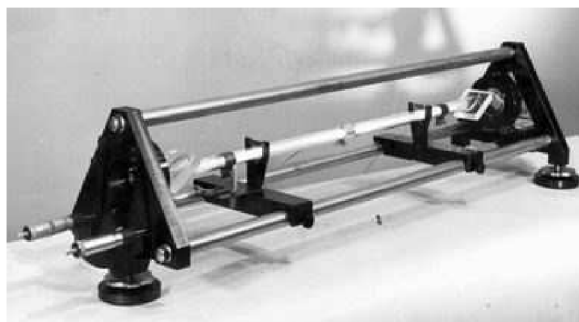
Počátky laseru zaznamenáváme již na počátku 19. století. V roce 1916 Albert Einstein ve své práci popsal princip stimulované emise, a představil jeden ze základních principů kvantové elektroniky. Roku 1928 Rudolph W. Landenburg s Hansem Kopfermannem potvrdili svým pozorováním existenci stimulované emise. Další významný datem je rok 1939, kdy Valentín A. Fabrikant navrhuje využít stimulovanou emisi k zesilování světla.

Podstatným mezníkem byl r. 1951 kdy Charles H. Townes vynalezl čpavkový MASER, název je odvozen z počátečních písmen Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (v překladu zesilovač mikrovln pomocí stimulované emise záření). Roku 1954 byly nezávisle na sobě zkonstruovány první masery, v New Yorku ho sestavil zmíněný Ch. H. Townes společně s Jamesem P. Gordonem a Herbertem J. Zeigerem a v Moskvě Nikolaj G. Basov s Alexandrem M. Prochorovem. V roce 1958 popsali nezávisle na sobě Basov s Prochorovem a Townes s Arthurem L. Schawlowem ideu, že jev simulované emise, užitý v maseru, může být použit i v infračervené a optické oblasti spektra.

Za vynálezce pevnolátkového a plynového laseru je pokládán Gordon Gould, který vyhrál dlouholetý spor na základě notářsky ověřeného zápisu z roku 1957. První laser postavil 16. května roku 1960 Theodore H. Maiman a jako aktivní látku použil tyčinku ze syntetického rubínu, která vydávala červené světlo o vlnové délce 694,3 nanometrů. Jeho kvantový generátor dostal jméno LASER. Tento prototyp laseru byl sice velmi primitivní, ale všechny dnešní nejmodernější a nejvýkonnější lasery vycházejí z jeho sestavy. Téhož roku Ali Javan, William Bennett a Donald Herriott sestrojili první plynový laser, aktivní látkou byla směs helia a neonu, jeho vlnová délka světla byla 1150 nanometrů. Od té doby začal bouřlivý vývoj různých typů laserů a také hledání jejich využití.

V roce 1962 vznikly první polovodičové lasery, které musely být chlazeny kapalným dusíkem na teplotu  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O dva roky později sestrojil Kumar Patel první výkonný laser s použitím oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) jako aktivní látky, a první neodymový laser (Nd:YAG) uvedli do provozu Joseph E. Geusic a Richard G. Smith. V roce 1971 Izuo Hayashi a Morton B. Panish sestavili polovodičový laser, který dokázal pracovat při pokojové teplotě.

V České republice se objevil první maser v roce 1961, téhož roku byl v Brně zkonstruovaný i první československý plynový laser obr. 2. Následující rok vznikl další laser s neodymovým sklem a poté byl na ČSAV v Brně sestrojen helium-neonový laser.

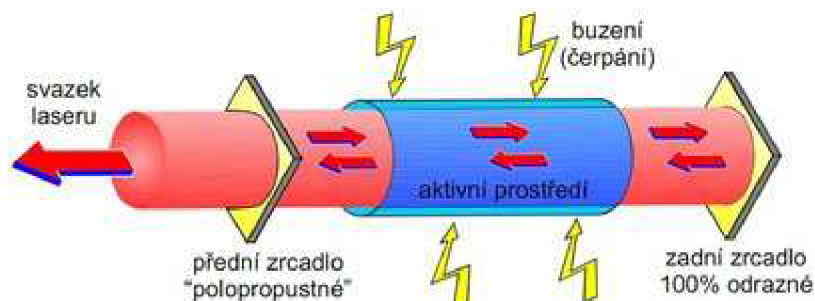


Obr. 2 První československý plynový laser z r. 1961 [47]



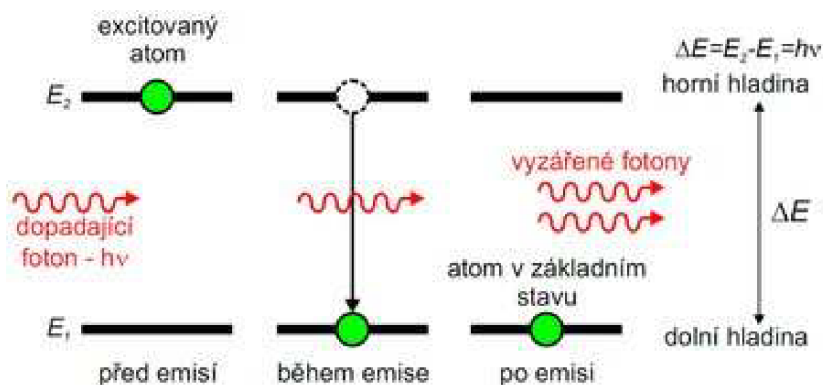
## 1.2 Princip laseru a jeho vlastnosti [2], [37], [39], [43]

Aktivní prostředí tvoří základ každého laseru. Jedná se o medium, které je schopné zesilovat jím procházející záření díky stimulované emisi. Zesílení aktivního prostředí docílíme buzením (opticky, elektricky apod.). Tato energie je potom vyzářena v podobě laserového svazku viz obr. 3.



Obr. 3 Schéma laseru [39]

Jednoduše řečeno, aktivní prostředí vždy obsahuje nějaký element. Tímto elementem je nejčastěji atom, ale může to být např. vibrační stav molekuly, chemická vazba apod. Atom se může nacházet v základním stavu s nižší energií nebo ve stavu vybuzeném (excitovaném) s vyšší energií. Při přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu atom vyzáří foton. Vyzáření fotonu se děje spontánně, prostředí má vždy snahu být ve stavu s co nejnižší energií, ve stavu termodynamické rovnováhy. Při dodání energie, buzením aktivního prostředí, porušíme tento stav. Tím převedeme aktivní prostředí do vybuzeného stavu a většina atomů je ve stavu s vyšší energií. Tento stav se nazývá inverze populace. V tuto chvíli, kdy je dodána energie aktivnímu prostředí a elementy jsou převedeny na vyšší hladinu, můžeme získanou energii přeměnit na laserový paprsek pomocí stimulované emise, která je zobrazena na obr. 4.



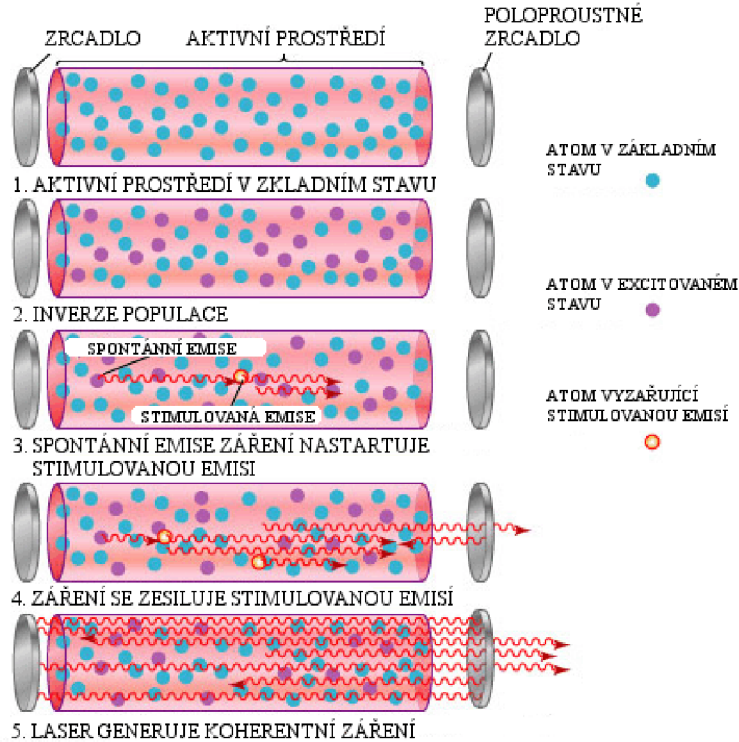
Obr. 4 Princip stimulované emise [39]

Fotony, které dopadají na vybuzený atom, způsobí přechod atomu z nižší na vyšší energetickou hladinu a dojde k emisi dalšího fotonu. Jak se fotony odráží rezonátorem od jednoho zrcadla k druhému, jejich počet narůstá a dochází tak k zesílení stimulované emise, která vede k uvolnění energie v podobě proudu fotonů, neboli laserového paprsku viz obr. 5. Nejjednodušší a nejrozšířenější rezonátor je rovinný rezonátor s paralelními zrcadly. Další typy jsou prstencové neboli kruhové rezonátory. Správná funkčnost rezonátoru závisí na vzniku stojatého vlnění v rezonátoru. Vzdálenost mezi zrcadly je velmi důležitá, jelikož na ní závisí vznikající záření podle vztahu:

$$L = n \cdot \lambda$$

(1.1)

kde:  $L$  – vzdálenost zrcadel [mm],  
 $n$  – přirozené číslo [-],  
 $\lambda$  – vlnová délka záření [mm].



Obr. 5 Schéma základního principu laseru [39]

### Vlastnosti laserového paprsku

Oproti elektromagnetickému záření má laserové záření unikátní vlastnosti. Těmi charakteristickými vlastnostmi je koherentnost, monochromaticnost, vysoká intenzita a malá rozbíhavost svazku záření.

- **Koherentnost** - uspořádanost, světelné vlny nejsou proti sobě posunuté, postupují stejným směrem a mají stejnou fázi
- **Monochromaticnost** - jednobarevnost, paprsek je tvořený fotony stejné vlnové délky, která definuje jeho barvu
- **Směrovost** - divergence, vysoká směrovost neboli malá rozbíhavost paprsku je jedinečná vlastnost laserového záření.
- **Módová struktura** - elektromagnetické pole v optickém rezonátoru rozděluje amplitudu a fázi vlnění vznikající v rezonátoru. Tato částečné rozdělení pole ovlivňuje TEM (transversal electromagnetic mode - příčný elektromagnetický mód) pasivního rezonátoru. Čím vyšší je hodnota indexů, tím vyšší je řád módu, který má velký vliv na velikost stopy zaostřeného paprsku.

### 1.3 Základní součásti laseru a jejich rozdělení [2], [37], [39], [43]

Mimo aktivní prostředí, které bylo již zmíněno a dochází v něm ke stimulované emisi, jsou nezbytnými základními součástmi laserových systémů čerpací zařízení, optický rezonátor, vedení svazku, chlazení, manipulační zařízení.

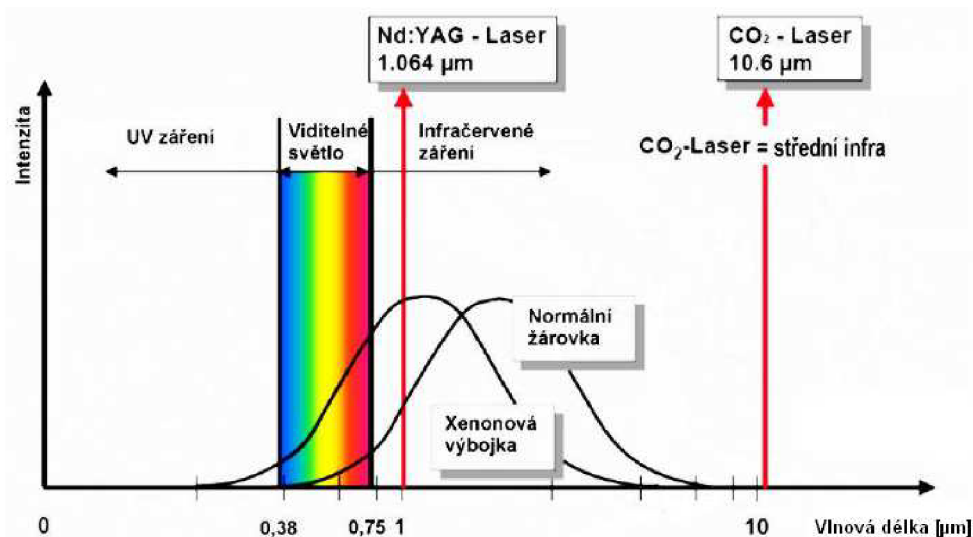
- **Aktivní prostředí** - ve kterém dochází ke stimulované emisi, je nezbytnou základní součástí laserových systémů. Může to být krystal, kapalina, směs plynů nebo diodový přechod.
- **Budící (čerpací) systém** - dodává energii aktivnímu prostředí a zajišťuje přebytek částic ve vyšším energetickém stavu, tedy inverzní populaci nutnou pro zajištění stimulované emise. Jako budící zařízení se dnes používá světlo, ultrazvuk, svazek elektronů, elektrický proud nebo chemická reakce.
- **Optický rezonátor** - slouží pro dosažení vyššího počtu stimulovaných přechodů oproti spontánním. Jde o dvě zrcadla, mezi nimiž je umístěno aktivní prostředí. Záření vystupující z aktivního prostředí se odráží od zrcadla zpět do aktivního prostředí, kde funguje jako podnět k další stimulované emisi. Opakovanými odrazy se laserové záření zesiluje. Po dosažení požadované intenzity opouští svazek rezonátor jedním ze zrcadel, které je částečně propustné.
- **Expander (vedení svazku)** - u průmyslových laserů je svazek opouštějící rezonátor dále upravován systémem čoček a clon, který zvyšuje kvalitu a upravuje průměr výstupního svazku. Filtrovaný svazek je dále soustavou zrcadel a čoček veden do pracovní hlavy laseru, případně do optického vlákna až k místu určení.
- **Chladicí zařízení** - slouží k chlazení aktivního prostředí, rezonátoru a optických prvků. Využívá především chlazení založené na proudění kapaliny.

#### Rozdělení laserů

Veškeré lasery pracují sice na stejném principu, ale můžeme je rozdělit hned na základě několika hledisek. Podle druhu aktivního prostředí, vlnové délky obr. 6., generovaného impulsu a podle typu buzení.

Dělení laserů podle:

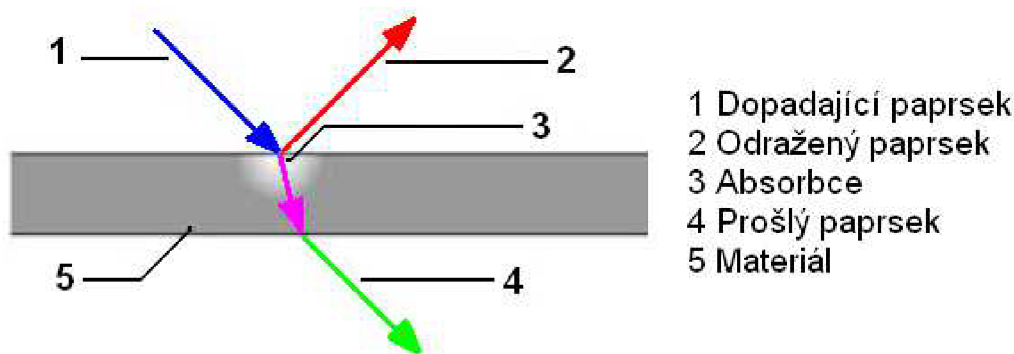
- |   |   |
|---|---|
| a) aktivního prostředí <ul style="list-style-type: none"><li>▪ plynové<ul style="list-style-type: none"><li>- atomární</li><li>- iontové</li><li>- molekulární</li></ul></li><li>▪ pevnolátkové</li><li>▪ kapalinové</li><li>▪ polovodičové</li></ul> | c) typu buzení (čerpaní) <ul style="list-style-type: none"><li>▪ optickým zářením</li><li>▪ elektrickým polem</li><li>▪ injekcí nosičů náboje</li><li>▪ chemickou reakcí</li><li>▪ elektronovým svazkem</li><li>▪ tepelnými změnami</li><li>▪ rekombinací</li></ul> |
| b) vlnové délky <ul style="list-style-type: none"><li>▪ infračervené lasery</li><li>▪ ultrafialové lasery</li><li>▪ rentgenové lasery</li><li>▪ lasery viditelného světla</li><li>▪ submilimetrové lasery</li></ul>                                   | d) délky generovaného impulsu <ul style="list-style-type: none"><li>▪ kontinuální</li><li>▪ pulzní</li><li>▪ impulzní</li></ul>   |



Obr. 6 Elektromagnetické záření [27]

#### 1.4 Interakce laserového paprsku s materiálem[46], [50]

U všech strojírenských procesů, ve kterých je laser používán, je důležitá interakce povrchu paprsku s obráběným materiálem. Laserový paprsek je nositelem energie, který je při dopadu na povrch materiálu částečně absorbován, částečně odražen od povrchu a částečně prochází materiálem obr. 7. Pro kovy které jsou neprůhledné, k průchodu paprsku nedochází. Když se paprsek dotkne povrchu materiálu, dojde k interakci a v jejím důsledku k rychlému zahřívání povrchu materiálu. Na interakci má vliv nejen laserový paprsek, ale i obráběný materiál. U paprsku má velký vliv na jeho absorpci povrchem vlnová délka. Čím je vlnová délka kratší, tím větší je součinitel absorpce. Se zvyšující se teplotou obráběného materiálu klesá odrazivost a zvyšuje se koeficient absorpce. Drsnost povrchu má také významný vliv na pohltivost paprsku. V případě drsných povrchů dochází vlivem odrazení paprsku od nerovností k vyšší pohltivosti paprsku. Kdežto u hladkých a lesklých povrchů je nízká absorpce energie paprsku v důsledku odrazivosti paprsku do povrchu materiálu. Na povrchy, které mají vysokou odrazivost, jsou aplikovány speciální povlaky pro snížení odrazivosti.



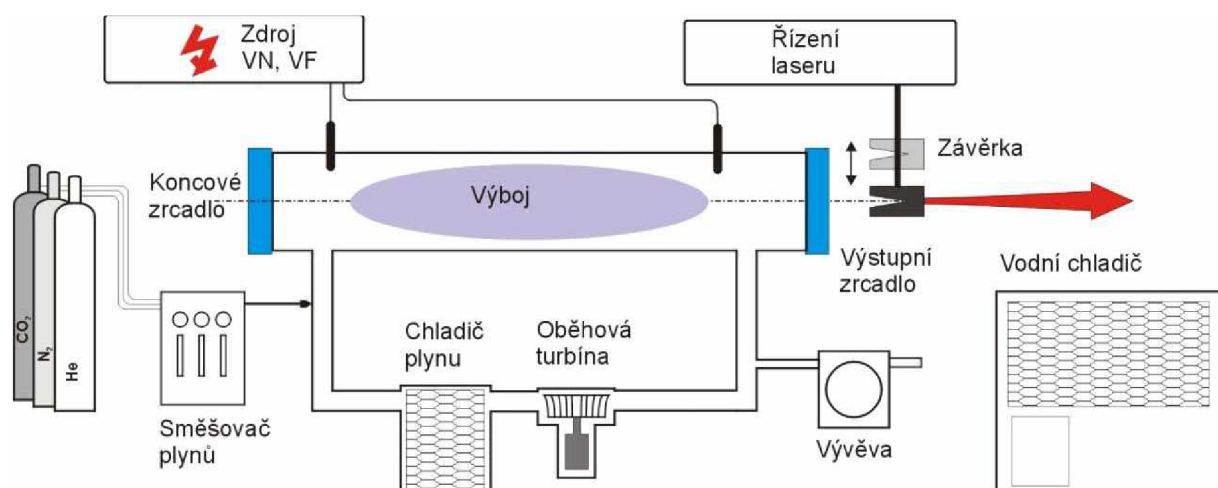
Obr. 7 Interakce laserového paprsku s povrhem materiálu [46]

#### 1.5 Nejrozšířenější lasery používané v průmyslu [10], [20],[25], [38]

K základním typům průmyslových laserů ve světě stále patří plynové CO<sub>2</sub> lasery, které jsou také nejrozšířenější. Dalším používaným laserem je pevnolátkový Nd:YAG laser nebo diskový laser, který je variantou Nd:YAG laseru. Své místo zaujímají též diodové lasery a v poslední době se stále více využívá vláknových laserů.

## CO<sub>2</sub> lasery

Patří mezi nejvýznamnější typy plynových laserů obr. 8. Mají plynné aktivní prostředí, které tvoří oxid uhličitý a další plyny zlepšující podmínky inverzní populace. Je to dusík (ve kterém plynný výboj vytváří energii potřebnou na nabuzení), helium (zajišťuje odvod tepla). Buzení se provádí elektrickým výbojem. U CO<sub>2</sub> laserů generované záření spadá do infračervené oblasti a pracovní vlnovou délkou má 10,6 μm. Účinnost těchto laserů je do 10%. Jejich výkon generovaného paprsku až 30 kW. Tyto lasery vynikají tedy vysokým výkonem a dobrou kvalitou laserového paprsku. Mají ale i své nevýhody. Vlnová délka výstupního paprsku neumožní převod paprsku na místo určení pomocí optických vláken, ale pouze pomocí systému zrcadel. Vysokovýkonné lasery disponují velkou hmotností i velikostí, a zařízení se tak stává prakticky nemobilní. Provoz takových zařízení je závislý na přívodu chladicí kapaliny a dodávce pracovních plynů, kterým je dusík a nákladné helium. I přes tyto nevýhody a složitou, náročnou údržbu patří CO<sub>2</sub> lasery mezi jedny k nejpoužívanějším laserům ve strojírenském průmyslu. Používají se především při svařování a řezání plechových materiálů vyšších tloušťek.

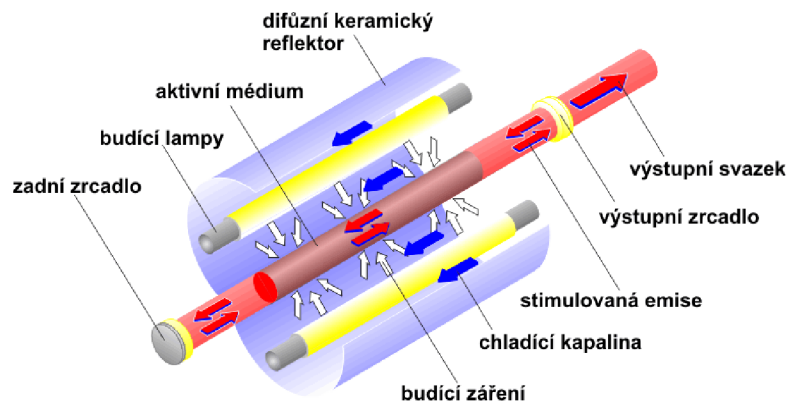


Obr. 8 Schéma CO<sub>2</sub> laseru [27]

## Nd:YAG lasery

Jde o nejpoužívanější pevnolátkový laser dnešní doby. Jeho aktivní prostředí tvoří krystal yttrium-aluminium granátu (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>), který je dopovaný neodymem (Nd<sup>3+</sup>) obrázek 9. Pracovní režim může být kontinuální nebo pulzní. Výstupní paprsek má vlnovou délku 1,06 μm, při které dosáhne maximálního výkonu až 200 kW. S použitím nelineární optiky lze dosáhnout výstupního paprsku o vlnové délce 0,53 μm. Hlavní výhodou u těchto laserů spočívá ve vlastnostech použitého velmi stabilního aktivního prostředí, které vyniká vysokou hustotou energie a akumulací schopností, umožňující generovat krátké pulzy o vysokém výkonu. Krátká vlnová délka umožňuje laserový paprsek přenášet optickými vlákny na místo určení vzdálené několik metrů. Buzení je realizováno pomocí výbojky, kterou v poslední době nahrazuje polovodičová dioda. V porovnání s výbojkou, kde je účinnost do 3%, dosahuje dioda větší účinnosti až 20 %. Použitím diody klesá spotřeba elektrické energie, chladicí vody a tím klesají i provozní náklady. Výbojky mají mnohem menší životnost než polovodičové diody, které mají vyšší pořizovací náklady. Nd-YAG lasery se využívají k laserovému obrábění, vrtání a svařování.

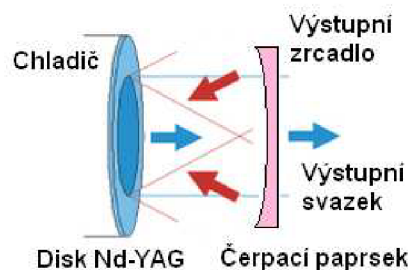




Obr. 9 Schéma Nd-YAG laseru [47]

### Diskové lasery

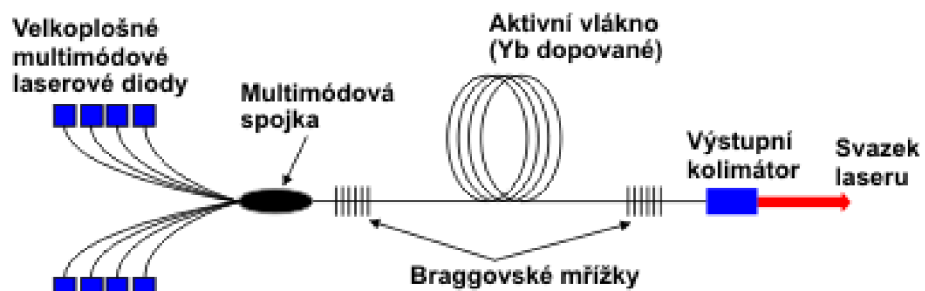
Jedná se v podstatě o modifikaci Nd-YAG laseru, kde aktivní krystal nemá tvar válce, ale tenkého disku obr. 10. Tloušťka disku je velmi malá a pohybuje se řádově v desetínách milimetru, průměr dosahuje obvykle do 10 mm. Buzení tohoto aktivního disku se provádí pomocí laserových diod. Touto změnou Nd-YAG laseru se výrazně zvýšila kvalita výstupního laserového paprsku, vyšší výkon až 17 kW a kompaktnější rozměry.



Obr. 10 Schéma diskového laseru [25]

### Vláknové lasery

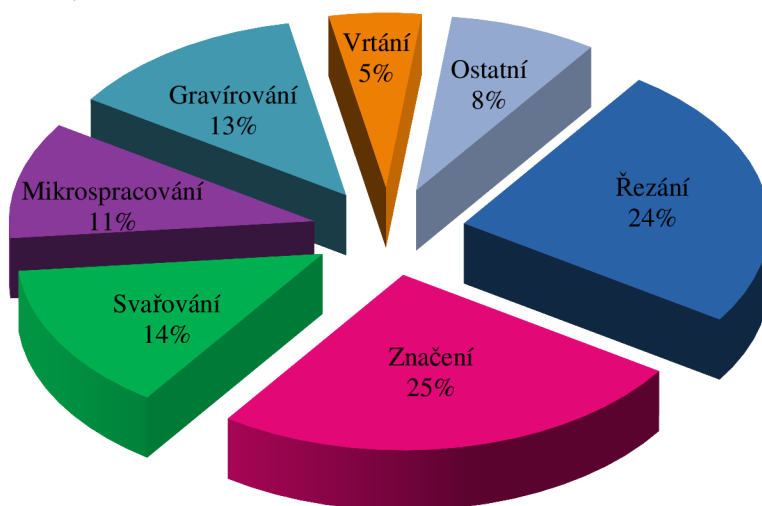
Patří mezi technologicky nejmodernější typ pevnolátkových laserů. U těchto speciálních pevnolátkových laserů je aktivní prostředí tvořeno optickým vláknem, které je dopované nejčastěji erbiem, ytterbiem nebo neodymem. Pro buzení se používá nízkovýkonových laserových diod, které vynikají vysokou životností a účinností a také nízkou cenou. Záření je z těchto diod přivedeno do aktivního vlákna také optickým vláknem obr. 11. Jedná se o tzv. *vlákno-vlákno* architekturu a laser díky tomu neobsahuje žádné opto-mechanické prvky jako zrcadla apod. Výkony dnes dosahují až 40 kW. V dnešní době se jedná o nejmodernější technologii pro průmyslové řezání, svařování a značení a podíl vláknových laseru na trhu neustále stoupá.



Obr. 11 Schéma vláknového laseru [47]

## 1.6 Využití laseru v průmyslu [2], [17], [20], [21], [44]

V posledních letech dochází ke zvyšování výkonu laserového paprsku a snižování ceny laserů. Díky lepší dostupnosti se začalo využívat laseru v mnoha odvětvích, zejména v průmyslové výrobě. Mezi hlavní technologické operace, ve kterých je laser využíván, patří dělení materiálu, značení a gravírování, vrtání, kalení, a především svařování. V grafu 1 můžeme vidět jednotlivé podíly využití. Nesmírnou výhodou laserů je jejich univerzálnost technologického zařízení. Jeden laser pomocí změny geometrie ozařování, volby časových prodlev a použití nutných periferních přípravků může provádět různé operace např. řezání, svařování, kalení, vrtání atd.



Graf 1 Podíl jednotlivých využití laseru v průmyslu [19]

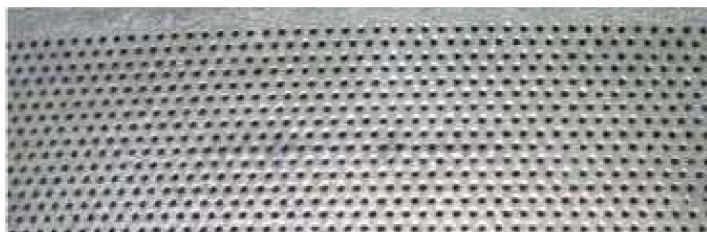
### Řezání laserem

Ve strojírenském průmyslu se laser využívá vedle svařování hlavně při dělení materiálu neboli řezání. Řezání materiálu laserem můžeme rozdělit na tři způsoby na tavné, oxidační a sublimační.

- **Tavné řezání** - u tavného řezání se materiál v místě řezu nataví pomocí laseru a vzniklá tavenina je oddělena od základního materiálu proudem čistého inertního plynu, který je do místa řezu přiváděn a na vlastním řezání se nepodílí. Absorpce laserového paprsku u tohoto způsobu řezání je velmi malá a proto se technologie využívá zejména k vytváření nezoxidovaných řezů kovových materiálů.
- **Oxidační řezání** - jedná se o velmi podobnou technologii tavného řezání, s tím rozdílem, že místo inertního plynu se používá kyslík jako řezný plyn. Kyslík působí na roztavený povrch materiálu a tím vzniká exotermická reakce, která způsobuje další ohřívání materiálu. V důsledku tohoto efektu je možné u vybraných ocelí dosáhnout vysokých řezných rychlostí, ovšem řez je širší a jeho kvalita je horší. Proto se nedají zhotovovat menší otvory nebo přesné a ostré geometrické tvary. Kvalitu řezu lze ovlivnit použitím pulzního provozu laseru a také regulací výkonu laseru, který se optimalizuje podle tloušťky řezaného materiálu.
- **Sublimační řezání** - Při použití této metody odpařuje laser materiál pokud možno bez tavení, vzniklá pára vytváří ve štěrbině řezu vysoký tlak, který taveninu vytlačuje směrem nahoru a dolů. Izolování plochy řezu od okolního prostředí zajišťuje atmosféra procesního plynu, který zabraňuje oxidaci řezu. Sublimační řezání vyžaduje vysoké výkony laseru a je pomalejší než jiné řezací metody, vytváří ale vysoce kvalitní řez.

## Vrtání laserem

Vrtání laserovým paprskem závisí na koncentraci laserového paprsku na povrchu materiálu. Pro tyto účely se používají pulzní lasery. Krátký impuls laseru s vysokou hustotou výkonu dodává energii při vrtání laserem do obrobku ve velmi krátké době. Tím se taví a odpařuje materiál. Čím větší je energie impulsu, tím více se materiál taví a odpařuje. Při odpařování se prudce zvětší objem materiálu ve vrtaném otvoru a vznikne vysoký tlak. Tento tlak páry vypudí roztavený materiál z otvoru ven a vznikne dutina. Příklad vrtání laserem na obr. 12.



Obr. 12 Disk pro výrobu skelných vláken, průměr díry 0,58 mm [35]

## Značení a gravírování pomocí laseru

Laserové značení a gravírování je technologie, která se v průmyslu používá stále častěji. Hlavní výhodou této technologie je, že se dá aplikovat na běžně používané materiály. Samotný popis obr. 13 na povrchu materiálu vzniká v jednom kroku přímým působením laserového záření na daný materiál. Další výhody laserového značení a gravírování jsou rychlost, bezprašnost procesu a jednoduchost v porovnání s ostatními technologiemi.



Obr. 13 Laserem gravírovaný obrázek [8]

## Laserové kalení

Princip laserového kalení spočívá v rychlém tepelném cyklu v povrchových vrstvách materiálu. Jde o rychlý ohřev povrchu materiálu s krátkou výdrží na teplotě a následné ochlazení vlivem tepelné vodivosti materiálu. U ocelí ve fázi ohřevu dochází k austenitizaci a ve fázi rychlého ochlazování k martenzitické transformaci. Díky zvýšení tvrdosti martenzitické struktury dojde ke zlepšení odolnosti povrchu proti opotřebení.

## Laserové svařování

V porovnání s laserovým řezáním a vrtáním požaduje laserové svařování nižší intenzitu laserového paprsku a větší délku laserového impulsu. Ohřev, natavení, spojení i následné ochlazení součástí při svařování laserem probíhá velmi rychle, díky tomu vzniká úzká tepelně ovlivněná oblast v okolí svaru, a tím pádem i mnohem menší deformace svaru. Laserem lze svařovat nesoudržné materiály s velmi rozdílnými teplotami tavení, které jsou jiným způsobem nesvařitelné, například kov s keramikou nebo s plastem.



## 1.7 Bezpečnost práce s lasery [3], [4], [13]

Každá práce a proces s sebou nesou bezpečnostní rizika. Díky nejrůznějším předpisům, upozorněním a ochranným pomůckám je v dnešní době úrazovost vlivem laserového záření mizivá. Přesto úrazy byly, jsou a stále budou. Proto je potřeba dbát předpisům a upozorněním obr. 14 a chránit si zdraví ochrannými pomůckami.

Existují dva základní typy laserových nebezpečí při jeho manipulaci:

- **přímé nebezpečí** - jde o nebezpečí vyvolané přímo laserovým paprskem. Rizikovým faktorem laserového paprsku jsou oční a kožní popáleniny.
- **nepřímé nebezpečí** - jde o nebezpečí, které nepřímo souvisí s laserovým paprskem. Do těchto rizik řadíme například nebezpečné látky, které se ze zařízení uvolňují nebo zplodiny, které se uvolňují z materiálu vystavených působení laserových paprsků.

Při práci s laserem je nutné se vyvarovat jakéhokoli přímému zásahu záření byť i malé energie. Nejvíce ohroženou částí na těle jsou oči, které jsou citlivé i na velmi malou energii, třeba jen odraženého paprsku. Poškození oka je podobné jako při záření gama a projevuje se poškozením sítnice, rohovky, čočky a cévní soustavy oka, kde hrozí nebezpečí trombózy. Ochranu oka zajistíme ochrannými brýlemi z organického skla, na kterých je nanесena zrcadlová vrstva, která je maximálně nepropustná pro vlnovou délku použitého záření. Další velmi citlivá část těla je pokožka. Stupeň jejího poškození závisí na délce vystavení záření, vlnové délce, výkonu, zaostření v místě dopadu, pigmentaci atd. Pokožku ochráníme vhodným oděvem a rukavicemi. Nejlepší ochranou proti zásahu záření je krytování místa svařování nebo řezání pomocí krytu z organického skla. Běžně dostupné lasery bývají maximálně III. třídy (optické soustavy CD a DVD přehrávačů, laserová ukazovátka).

Lasery jsou dle výkonu a vlnové délky záření rozděleny do čtyř bezpečnostních tříd:

- **třída I.** - možný trvalý pohled do svazku laserových paprsků
- **třída II.** - kontinuální a viditelné záření, přímý pohled do zdroje možný, oko ochrání mrkací reflex
- **třída III.**
  - a) - oko již může být poškozeno za pohledu do zdroje pomocí optické soustavy (např. dalekohled)
  - b) - nebezpečí poškození oka, nutno používat ochranné pomůcky (i při pozorování odrazu), max. emise 0,5 W
- **třída IV.** - stejně jako u III. b), emise překračuje výkon 0,5 W, může způsobit požár, poškození očí při přímém kontaktu s paprskem



Obr. 14 Bezpečnostní tabulka, označení laseru II. třídy a vyšší [29]

## 2 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ [22], [24], [42]

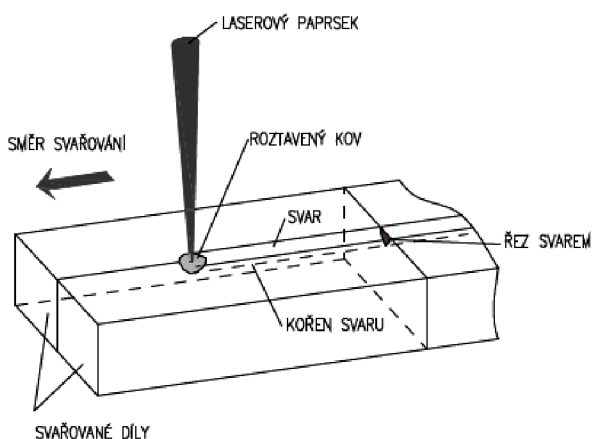
Laserové svařování patří k nejmodernějším metodám spojování různých materiálů. Využívá se zejména pro svařování materiálu, u nichž je kladen důraz na nízké tepelné deformace okolního materiálu, přesný a kvalitní svar bez trhlin, vysoké svařovací rychlosti a možnost automatizace. Svařování laserem je spojení materiálu, ke kterému dochází vlivem vyvinutého tepla při aplikaci koncentrovaného koherentního světelného paprsku na povrch svařovaného materiálu. Podle způsobu přenosu tepla z laserového zařízení do svařovaného materiálu můžeme rozdělit laserové svařování na dva typy.

### Kondukcční svařování

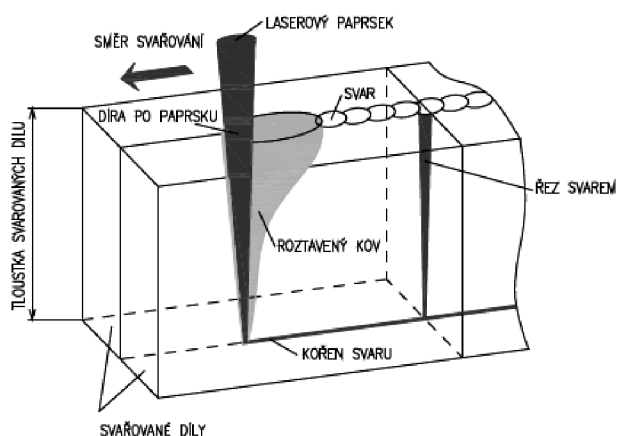
U kondukcčního svařování je materiál ohříván a taven pouze přes mechanismus vedení tepla a hloubka průvaru je velice malá viz obr. 15. Svařování probíhá při hustotě výkonu nižší než  $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  a dochází jen k minimálnímu odpařování materiálu. Část energie paprsku se po dopadu na povrch materiálu odrazí, zbytek energie se absorbuje a kondukcčním mechanismem vytváří na povrchu taveninu, která postupně zvětšuje svůj objem. Vše probíhá do doby, kdy se přivedené teplo do materiálu za jednotku času nevyrovná odvedenému teplu za jednotku času. Hloubka svarové oblasti zpravidla nepřesahuje šířku svaru a výsledný svar je poměrně hladký. Tento způsob je vhodný pro svařování tenkostěnných součástí, folií, vnějších koutových svarů atd. Nejčastěji se používá pevnolátkových laserů.

### Penetrační svařování

Oproti kondukcčnímu svařování je u penetračního svařování charakteristickým znakem vznik paroplynové dutiny tzv. klíčové dírky neboli keyhole, která vytváří hluboký a úzký svar obr. 16. Pro vznik keyhole je zapotřebí vysokých výkonů větších než  $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , čímž se liší penetrační svařování od kondukcčního. Působením laserového paprsku na materiál dochází k jeho rychlému tavení a odpařování. Tím vzniká na povrchu dutina, která je vyplněna výparů z vypařujícího se materiálu. Ty v dutině expandují a tím ji udržují otevřenou. Laserový paprsek stále dopadá do dutiny, kde se odráží, vnáší do ní další energii a pořád ji prohlubuje. Roztavený materiál, který obtéká dutinu, se za paprskem slévá a dutinu uzavírá. Tvoří se tak velmi úzký a přitom hluboký svar.



Obr. 15 Kondukcční svařování [46]



Obr. 16 Penetrační svařování [46]

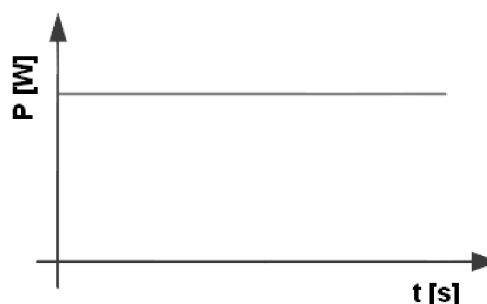
## 2.1 Svařovací parametry [2], [50]

Kvalitu svaru ovlivňují parametry svařování, které podmiňují efektivnost využití laseru na technologické procesy. Jedná se především o výkonové parametry, parametry zaostřovacího systému a také pomocné parametry. Svařování pomocí laseru můžeme rozdělit podle režimu generace záření na kontinuální obr. 17 a pulzní obr. 20.

### Kontinuální režim svařování

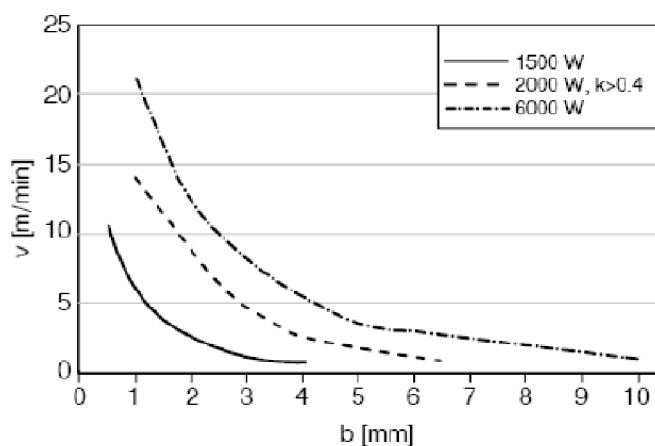
Základní svařovací parametry, které ovlivňují výsledek svařovacího procesu při kontinuálním režimu:

- výkon laseru  $P$  [W]
- svařovací rychlost  $v$  [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]
- parametry zaostřovacího systému



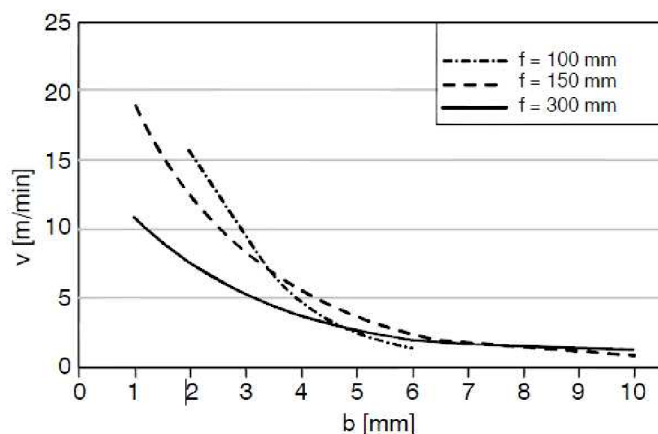
Obr. 17 Výkon laseru při kontinuálním režimu svařování [46]

- **Výkon laseru** - uvádí se ve wattech a jedná se o teplotní parametr, který vyjadřuje vliv laserového paprsku na materiál, tedy záření zaměřené do fokusačního systému. U všech operací, při kterých je laser využíván, je výkon laseru jeho základním parametrem. Maximální výkon laseru souvisí s maximální tloušťkou svařovaného materiálu.
- **Rychlost svařování** - jde o dráhu, kterou projede paprsek laseru za jednotku času. Společně se svařovacím výkonem velice ovlivňují geometrii, materiálovou strukturou a kvalitu svaru. Na obrázcích 18 a 19 můžeme vidět různé závislosti svařovacích rychlostí.



Obr. 18 Graf závislosti svařovací rychlosti -  $v$  a hloubky svaru -  $b$  pro různé výkony -  $W$  [46]

- **Parametry zaostřovacího systému** - zaostření laserového paprsku je ovlivňováno zejména těmito faktory:
  - průměr zastřeného paprsku
  - poloha ohniska od povrchu materiálu
  - divergence paprsku
  - složení objektivu

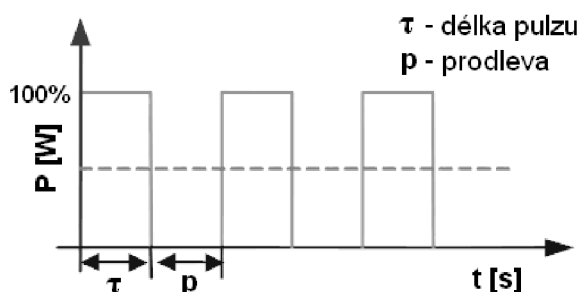


Obr. 19 Graf závislosti svařovací rychlosti - v a hloubky svaru - b pro různé ohniskové vzdálenosti - f [46]

### Pulzní režim svařování

Základní svařovací parametry, které mají vliv na kvalitu svaru při pulzním režimu:

- energie pulzu E [J]
- svařovací rychlost v [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]
- délka pulzu  $\tau$  [s]
- frekvence pulzů f [Hz]
- poloha ohniska vzhledem k povrchu materiálu s [mm]
- maximální výkon pulzu  $P_{\text{max}}$  [W]



Obr. 20 Výkon laseru při pulzním režimu svařování [46]

- **Energie pulzu** - je to množství energie, které působí na povrch materiálu během jednoho pulzu. Ovlivňuje množství vneseného tepla do materiálu i některé další charakteristiky.
- **Délka pulzu** - určuje délku působení laserového paprsku na povrch materiálu, při kterém proběhne ohřev a tavení kovu i následné chladnutí. Délky pulzů jsou pro každý materiál jiné a jsou ovlivněny chemickým složením materiálu a tloušťkou. Každý materiál má optimální interval pulzu, který zaručuje kvalitní svar bez výstřiku.

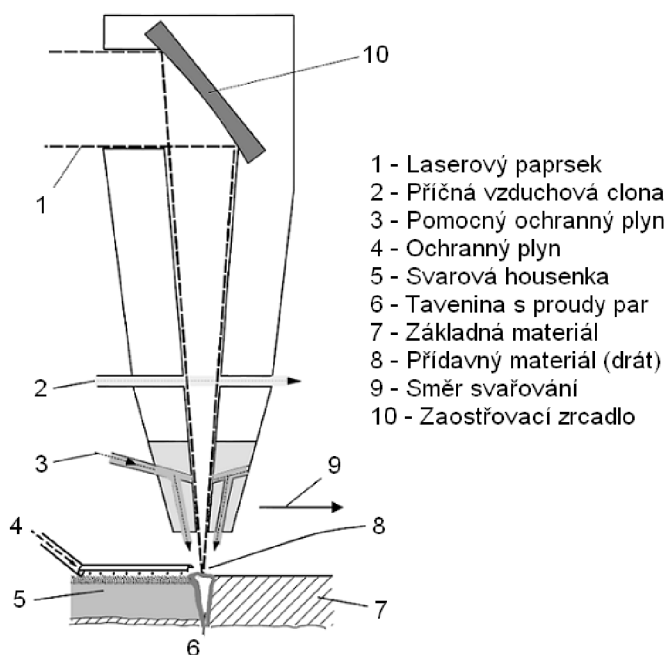
## 2.2 Ochranné plyny [1], [5], [15]

Ochranné plyny jsou zásadní součástí každého laserového systému a plní hned několik funkcí. Hlavním úkolem je ochrana svařovaného materiálu před okolní atmosférou. Zabrání se tak absorpci kyslíku, dusíku a vzdušné vlhkosti do svarové lázně a nedojde tak ke tvorbě oxidů, nitridů a pórů. Ochranný plyn chrání i zaměřovací optiku před parami a rozstříknutým kovem, zajišťuje stálé odfukování plazmy vystupující nad svar obr. 21. Volba plynu je závislá na typu a výkonu laseru, uspořádání trysky, svařovaném materiálu, tloušťce svařovaného materiálu, mechanických požadavcích daného svaru a v neposlední řadě na nákladech. Plyny nebo jejich směsi, které se používají při svařování laserem, jsou: argon - Ar, dusík -  $\text{N}_2$ , helium - He a oxid uhličitý -  $\text{CO}_2$ . S jejich pomocí se zvyšuje a stabilizuje stupeň absorpce plazmatu indukovaného laserem a energie laserového paprsku může po vzniku plazmatu proniknout do materiálu, dochází tak k hloubkovému provaření tzv. keyholu. V tabulce 1 můžeme vidět vlastnosti těchto plynů. Díky jejich ionizačnímu potenciálu se plyn dostává do plazmatického stavu. Menší hodnota ionizačního potenciálu znamená vznik více plazmatu.

Tab. 1 Porovnání ochranných plynů [5]

Ochranný plyn	Molekulová hmotnost [g·mol <sup>-1</sup> ]	Ionizační energie [eV]	Tepelná vodivost [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Relativní hustota vztažená ke vzduchu
Argon - Ar	40	15,8	0,01732	1,38
Helium - He	4	24,6	0,15363	0,14
Oxid uhličitý - CO <sub>2</sub>	44	13,8	0,01615	1,52
Dusík - N <sub>2</sub>	28	15,6	0,02550	0,96

- **Argon** - je jednoatomový plyn, který patří do skupiny inertních plynů a vyznačuje se značnou chemickou netečností. Jeho hustota je větší než u vzduchu, při svařování klesá přímo ke svaru a tím výborně zajišťuje ochranu svarové lázně. Argon je vhodné používat pro lasery s výkonem od 3 kW. Nízký ionizační potenciál omezuje do jisté míry jeho použití, jelikož podporuje vznik plazmatu. Potlačení vzniku plazmatu lze docílit smícháním argonu s heliem, kyslíkem nebo oxidem uhličitým. Nejběžněji používaná směs je argon a helium.
- **Helium** - je stejně jako argon jednoatomový inertní plyn. Jeho měrná hmotnost je desetkrát menší než u argonu, což působí menší problémy při ochraně svarové lázně, jelikož stoupá vzhůru a snižuje efektivitu plynové ochrany. Při použití helia je tedy nutné zvýšit průtok plynu až na 30 - 35 l·min<sup>-1</sup>. Helium má vysoký ionizační potenciál, který do značné míry minimalizuje ionizaci ochranného plynu a tím i tvorbu plynového plazmatu. Oproti argonu umožňuje vyšší svařovací rychlosti.
- **Oxid uhličitý a dusík** - jsou reaktivní plyny, které mohou při reakci s kovem svaru tvořit oxidy, karbidy nebo nitridy. V některých případech nelze tyto plyny pro svařování použít, protože tak může dojít k zhoršení mechanických vlastností svarů. Někdy ale reaktivní plyny mohou při svařování dokonce představovat výhodu, jako například u některých nerezových ocelí kde dusík zajišťuje lepší korozivzdornost a mikrostrukturu svárů.



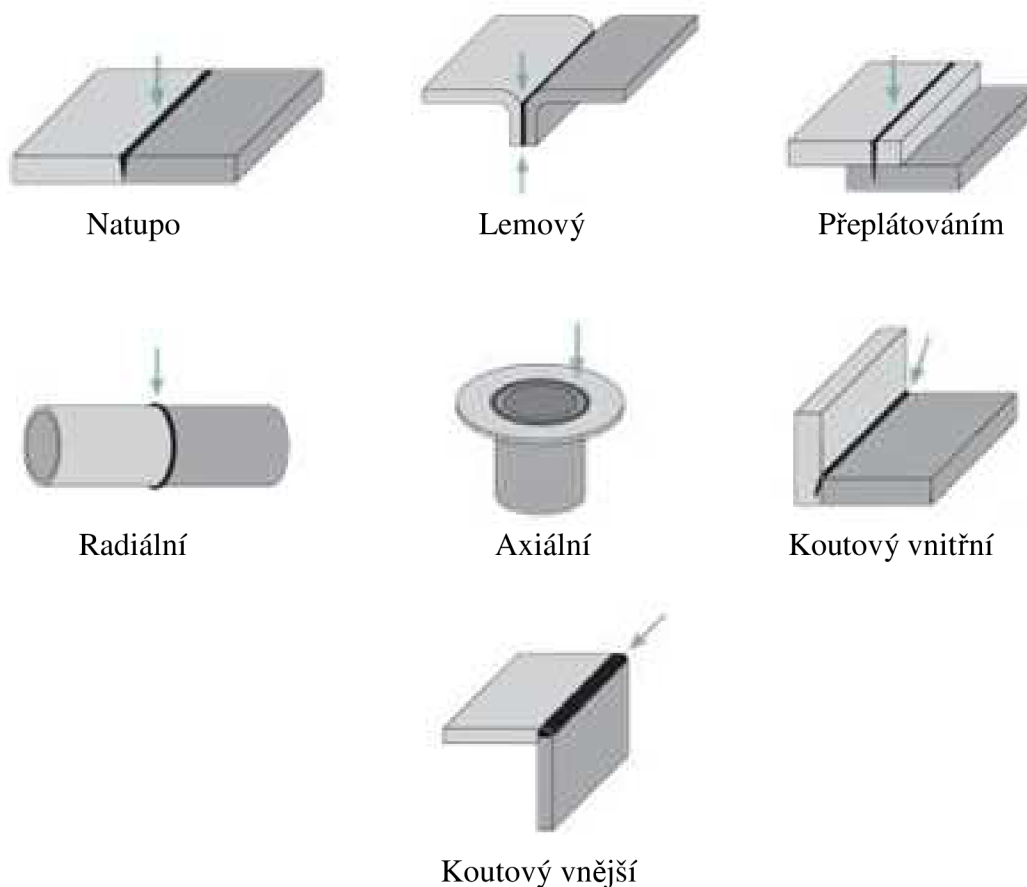
Obr. 21 Laserová hlava s přívodem ochranného plynu [46]

## 2.3 Příprava svarových ploch a typy svarů [16], [50]

Laser je přesný nástroj, proto je nutné pečlivě připravit daný materiál tak, aby bylo dosaženo co nejmenší mezery mezi svařovanými polotovary. Velikost mezery se pohybuje mezi 0,05-0,2 mm, materiály se skoro dotýkají. Převážně se svařuje bez přídavného materiálu a nedodržením vzdálenosti mezi polotovary mohou vznikat po svaření vruby. Při normální kvalitě svaru nejsou kladeny zvláštní požadavky na povrch svarových materiálů, jelikož veškeré nečistoty, mastnota, popřípadě ochranné fólie jsou před natavením svarové lázně odpařeny. Povrch materiálu by měl absorbovat větší část laserového paprsku, zvýšení absorpce lze docílit zdrsňením povrchu nebo použitím vhodného absorpčního povlaku. V případě, že se svařují speciální materiály s vysokými požadavky na jakost svaru, je potřeba zbavit svarové povrchy oxidů a nečistot.

### Typy svarů laserového svařování

Svařováním pomocí laseru můžeme provést téměř všechny typy svarů obr. 22. Laserovým svařováním můžeme také provádět speciální svary, jako jsou průvarové svary. Při těchto svarech je možné spojit dva přeplátované materiály, aniž by došlo k protažení spodního materiálu. Tento typ svaru je možné provést jedině laserem nebo pomocí elektronového svazku. Svařování je však omezeno rozměrností svařovací hlavy, která nemusí umožnit dopravení laserového paprsku do místa budoucího svaru. Laserové svary mají výhodu, že se provádí bez přídavného materiálu. V současnosti lze využít i kombinaci laserového svařování s ostatními svařovacími metodami. Jde o Laser-hybrid svařování, které spojuje techniku laserového svařování s technikou MIG/MAG nebo s TIG.



Obr. 22 Nejčastější laserové typy svarů [26]



## 2.4 Přednosti a nedostatky laserového svařování [19], [24]

Laserové svařování má oproti jiným metodám celou řadu předností, jako například svary s dobrým poměrem mezi šířkou a hloubkou při jejich porovnání viz tab. 2.

### Výhody

- bezkontaktní procesy bez znečištění materiálu
- čistota svaru bez používání přídavných materiál
- malá tepelně ovlivněná oblast
- malý průměr stopy
- vysoká jakost spoje
- malá setrvačnost laserového paprsku
- přesné rozměry
- hluboké svary
- malé zbytkové napětí ve svaru
- svařování na vzduchu pouze s použitím ochranné atmosféry
- vysoká pracovní rychlost
- nízké náklady na dokončovací operace
- nízké náklady na přípravné práce
- vysoká produktivita svařovacího procesu
- možná opakovatelnost technologie
- automatizace procesu
- snadná regulace svařovacích parametrů

### Nevýhody

- vysoká pořizovací cena svařovacího zařízení
- malá účinnost proti vstupnímu příkonu zařízení
- problematičnost u zpracování vysoce odrazných materiálů
- vysoké nároky na bezpečnost procesu

Tab. 2 Porovnání parametrů různých metod svařování [16]

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

Díky velmi rychlému ohřevu umožňuje laser svařit materiály s vysokou teplotní vodivostí i vysokou teplotou tavení. Zásadní roli má kombinace svařovaných materiálů viz tabulka 3 s přehledem základních prvků, která platí v podstatě i pro jejich slitiny.

Tab. 3 Přehled svařitelnosti základních prvků [50]

	Al	Ag	Au	Cu	Pd	Ni	Pt	Fe	Be	Ti	Cr	Mo	Te	W
Al	V													
Ag	U	U												
Au	U	V	V											
Cu	U	U	V	V										
Pd		V	V	V										
Ni	U		V	V	V	V								
Pt		U	V	V	V	V	V							
Fe			U	U	D	D	D	V						
Be			U	U	U	U		U						
Ti	U	U	U	U	U	U	U	U		V				
Cr			U		D	D	V	V		D				
Mo						U	V	D		V	V			
Te					D	D	U	U		V		V		
W					U	U	D	U		U	V	V	V	V

V - velmi dobře  
D - dobře  
U - uspokojivě

Technologie laserového svařování materiálů je vhodná pro výroby, kde je potřeba vytvořit velmi náročné svary z hlediska kvalitativního a z hlediska sériové či hromadné výroby se základním požadavkem automatizace procesu.

Nejvýznamnější odvětví kde se využívá laserového svařování:

- strojírenská výroba především automobilový průmysl
- elektrotechnická výroba
- elektrotechnická výroba
- zdravotnická výroba



### 3 SVAROVÉ SPOJE A JEJICH KONTROLA [45], [48]

Běžnými technickými postupy není možné docílit výroby kovového materiálu bez vad. Pokusně je to možné v laboratoři ve zvláštních podmínkách, ale ne ve velkovýrobě. Každý kovový materiál má už od výroby veliké množství submikroskopických vad. Jde o vady na úrovni krystalových mřížek, atomů a zrn, které mají zásadní vliv na vlastnosti každého kovového materiálu. Tyto vady osahuje každý technicky vyrobený materiál a jsou těžko zjištěitelné. Z tohoto důvodu se při zkoumání věnujeme vadám makroskopickým, které jsou snáze zjištěitelné například pomocí ultrazvuku či vizuálně. Tyto vady podstatně ovlivňují tu část užitečných vlastností, které se mohou ovlivnit správnou technologií svařování.

Pod pojmem vada výrobku se obecně rozumí každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami případně smluvním vzorkem.

Vady výrobku můžeme rozdělit na:

- **Zjevné vady** - zjistíme je při prohlídce výrobku pouhým okem nebo jednoduchými pomůckami
- **Skryté vady** - zjistíme je za pomoci přístrojů nebo laboratorními zkouškami

Tyto vady mohou být buď:

- **přípustné** - jsou to vady, které normy nebo technické podmínky dovolují a není nutné je odstraňovat
- **nepřípustné** - vady, které neodpovídají povoleným hodnotám a jsou opravitelné či neopravitelné

U svařování vzniká největší problém s necelistvostí svaru. Svarové vady na obr. 23 a 24 rozdělujeme do dvou skupin, na vady plošné (trhliny, neprůvary a studené spoje) a objemové (póry, bubliny, různé vměstky, vruby, nedodržení rozměrů a nepravidelnost povrchu svarů).

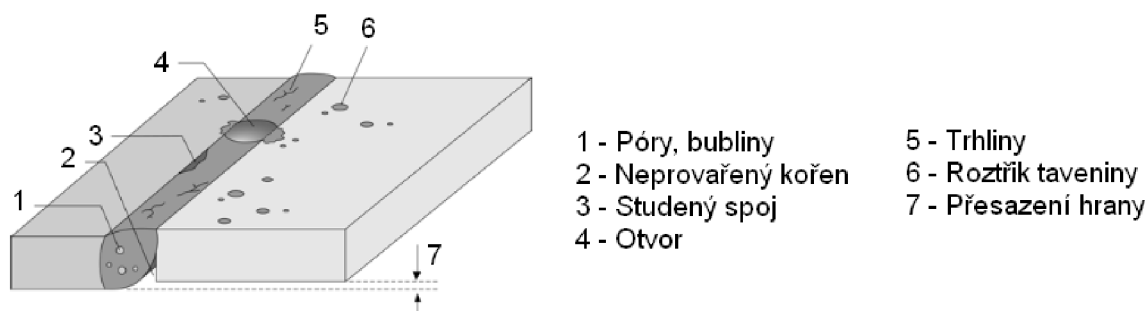
#### 3.1 Rozdělení svarových vad [33], [45]

Svarové vady se rozdělují podle polohy vady v daném svaru:

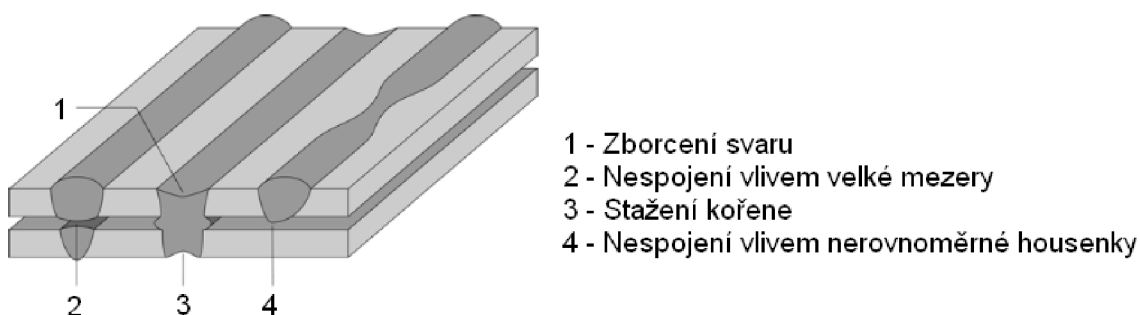
- **povrchové vady** – nacházejí se na povrchu svaru (líc, rub, kořen svaru)
- **vnitřní vady** - vyskytují se pod povrchem svaru a na povrch svaru vůbec nevystupují

Vady se podle charakteru rozdělují a číselně označují podle normy ČSN EN ISO 6520-1na:

- trhliny (podélné, příčné, kráterové, nespojité, rozvětvené atd.)
- dutiny (póry, bubliny, staženiny)
- vměstky (struskové, kovové, tavidlové, oxidické)
- studený spoj (bez kovové vazby, materiál nebyl nataven jen nalepen)
- neprůvar (neprovaření kořene na jedné nebo druhé straně svarové plochy)
- různé vady (rozstřík, vytržený povrch, vada stehu, brusné stopy ...)
- 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, vadné napojení ...)



Obr. 23 Vnější a vnitřní vady svaru při laserovém svařování [46]



Obr. 24 Vady přeplátovaného spoje u laserového svařování [46]

### Hodnocení vad

Při hodnocení přípustnosti konkrétního typu vady se vychází z přístupu vhodnosti pro daný účel, v principu přípustné vady se vychází ze zkušenosti, že vada ovlivňuje nejvíce porušování křehkým lomem a únavové porušení. Platí to především u nejnebezpečnějších vad, jako jsou trhliny. Hodnocení přípustnosti vychází z teorie lomové mechaniky, jde o základní nástroj posouzení vlivu těchto vad na životnost svařovaných konstrukcí. Hodnocení přípustnosti některých dalších druhů vad ve svarech vychází z interakce následujících faktorů: geometrie svařované konstrukce a z ní vyplývajícího stavu napjatosti. Typu, orientace a velikosti vady. Mechanických vlastností svarového spoje a pracovního prostředí namáhané konstrukce. Klasifikaci vad obecně se vyskytujících ve svarových spojkách při tavném svařování uvádí norma ČSN ISO 6520 a dále pak norma ČSN EN 25817, kde jsou uvedeny tolerované velikosti vad v souladu s předepsaným stupněm jakosti.

Zkoušky svaru rozdělujeme podle toho, jaký mají vliv na svarový spoj. Jedná se o zkoušky:

- nedestruktivní - svar není při zkoušce porušen
- destruktivní - dojde k poruše svaru

### 3.2 Nedestruktivní zkoušky svarového spoje [33], [34], [40], [45], [48]

Nedestruktivní zkouška svarů patří mezi nejběžnější skupinu zkoušek svarových spojů. Je to z důvodu toho, že se výrobky zkouškou nedeformují a lze je tedy nadále bez problému používat, protože není porušena celistvost a kvalita svaru. Tento typ zkoušek však prokáže pouze část dosažených užitečných vlastností svarových spojů. Rozdělení nedestruktivních zkoušek dělíme podle toho, zda identifikujeme vady na povrchu svaru, nebo uvnitř.

## **Povrchové vady**

- vizuální metoda
- penetrační (kapilární) zkouška
- magnetická prášková zkouška

## **Vnitřní vady**

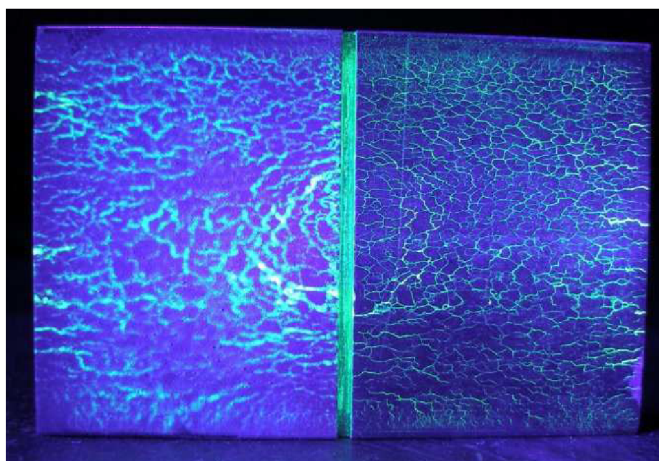
- prozářením RTG
- ultrazvukem

### **Vizuální metoda**

Vizuální kontrola vychází z předpokladu, že i vnitřní vady svarů se nakonec projeví nějakým způsobem na jeho povrchu. Zjištění nepravidelností resp. vad výrobku, se provádí buď posouzením pouhým zrakem bez pomůcek, případně s jednoduchými pomůckami (lupy, etalony povrchu, měrky svarů, apod.), nebo pomocí technických zařízení – přístrojů (endoskopy, foto nebo video kamery apod.). V obou případech však musí být kontrolovaný povrch dostatečně osvětlen denním, nebo většinou umělým světlem. Vizuální kontrola svarů je obecně popsána v normě ČSN EN 970.

### **Penetrační (kapilární) zkouška**

Touto zkouškou můžeme zjišťovat vady bezprostředně související s povrchem zkoušené části, vady jsou na povrchu otevřené, aby do nich mohla natéct detekční kapalina. Je tedy založena na vzlínivosti a smáčivosti některých kapalin do otevřených dutin v materiálu. Aby mohla být zkouška provedena, musí být povrch omyt a odmaštěn. Po té je nanese zkušební kapalina, která se nechá působit po dobu 10-30 minut a následně se povrch vzorku opět umyje a osuší. Vyvolá se indikace nanesením tzv. vývojky. Jde o bílý prášek např. oxid zinečnatý, který je suspendovaný v těkavém rozpouštědle. Vytváří kontrastní a nasákový podklad pro kapalinu vzlínající z dutin vady a zajišťuje lepší viditelnost vad. Poslední fází je vizuální zkoumání povrchu a případné posouzení a vyhodnocení indikovaných vad. Podle detekčních prostředků rozeznáváme metodu barevné indikace (vada se projeví vznikem kontrastní indikace) a metodu fluorescenční obr. 25 (vada se projeví po ozáření ultrafialovým světlem světélkující indikací). Kapilární zkouška se provádí podle normy ČSN EN 579-1 a svary se vyhodnocují podle normy ČSN EN 1289.



Obr. 25 Princip kapilární zkoušky fluorescenční metodou [14]

### **Magnetická prášková zkouška**

Tato metoda umožňuje detekci povrchových nebo podpovrchových vad (max. do hloubky 2 - 3 mm). Je založena na principu zviditelnění magnetických siločar vystupujících na povrch feromagnetických materiálů. Pokud je na povrchu zkoušeného materiálu nebo těsně pod ním nějaká vada, která není feromagnetická např. trhлина, struska, bublina, tak magnetické siločary

tuto vadu obcházejí, uzavírají se vzduchem a vystupují nad povrch materiálu, kde tvoří tzv. rozptylové magnetické pole. Metoda je založena na zjišťování rozptylu magnetického toku, který vznikne ve zmagnetovaném feromagnetickém materiálu v místě necelistvosti - trhlin nebo náhlé změny magnetických vlastností - struska. Vystupující siločáry se zviditelňují jemným železným prachem, který může být suchý nebo rozptýlený ve vhodné kapalině, jako je petrolej nebo fluorescenční roztok obr. 26. Zkoušený předmět magnetizujeme buď průchodem elektrického proudu, nebo elektromagnetem. Provádění magnetických zkoušek se řídí normou ČSN EN ISO 23278.



Obr. 26 Magnetická prášková zkouška s použitím UV lampy [28]

### Ultrazvuková zkouška

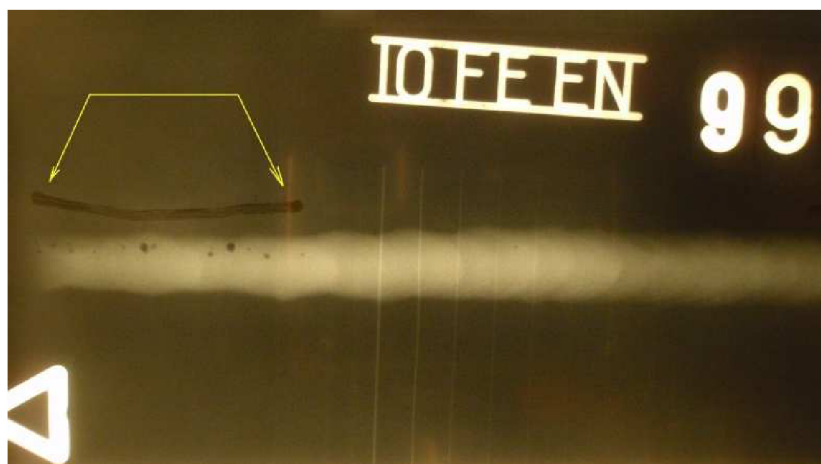
Zkouška slouží ke zjišťování skrytých vad v materiálu. Je založena na principu odrazu vlnění na rozhraní dvou prostředí mající odlišné vlastnosti při šíření tohoto vlnění. V každém materiálu je rychlost šíření ultrazvuku jiná. Rychlost šíření závisí na druhu prostředí a na frekvenci vlnění. Používají se zkušební sondy, kde při měření jedna slouží jako vysílač ultrazvukového signálu a druhá jako přijímač. K vyhodnocení se používá obrazovka, na které se objeví vysílací impuls i přijatý impuls obr. 27. V případě vyskytnutí jiných impulsů je zjištěna vada v materiálu. Pro ultrazvukovou zkoušku se používají metody průchodová a odrazová. Ultrazvukem sedají dobře zjistit vady plošného charakteru, kdy rovina vady je přibližně kolmá na směr šíření vlnění. Hůře se zjišťují objemové vady (bubliny, póry) a plošné vady umístěné rovnoběžně se směrem vlnění.



Obr. 27 Ultrazvuková zkouška [34]

## Zkouška prozáření (RTG)

Tato zkouška patří k nejstarším nedestruktivním metodám. Slouží pro zjišťování vnitřních vad a někdy i povrchových nepřijatelných vad. Princip spočívá v pohlcování ionizačního záření. Kontrolovaný svar je z jedné strany prozařován a prošlé záření je zachyceno na druhé straně na radiografický film. Vady (dutiny a póry) jsou vidět v místech, kde je záření méně pohlcováno a na filmu tvoří tmavší místa, viz obr. 28. Metoda RTG se často kombinuje s ultrazvukovou metodou. Provádění ultrazvukovou zkoušky popisuje norma ČSN EN 1435.



Obr. 28 RTG snímek s vnitřními vadami [53]

### 3.3 Destruktivní zkoušky svarového spoje [11], [33], [40], [45]

Destruktivní zkoušky slouží ke zjišťování mechanických vlastností materiálů. Existuje celá řada destruktivních zkoušek, které se provádí na daných zkušebních vzorcích.

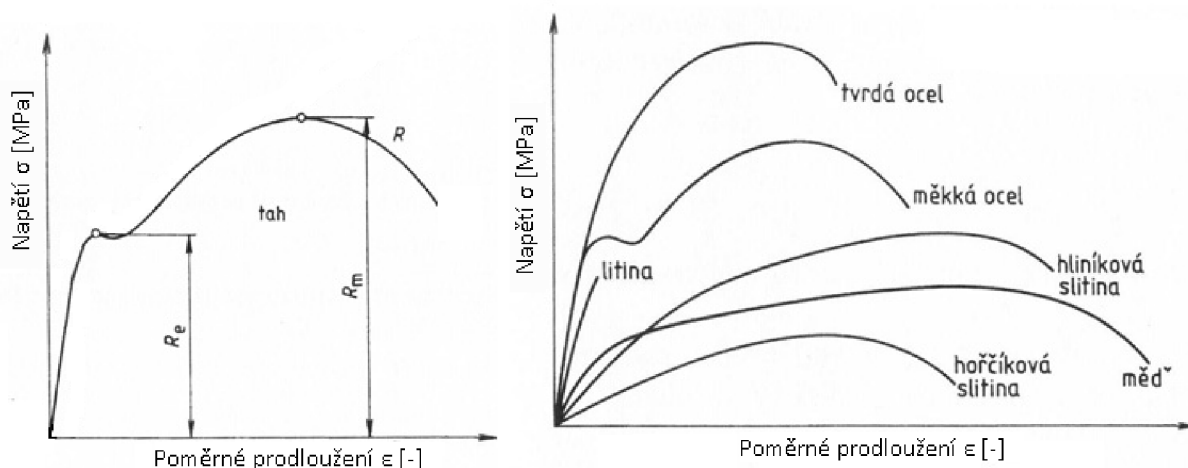
Nejčastěji používané destruktivní zkoušky jsou:

- příčná zkouška tahem (ČSN EN ISO 4136)
- zkouška ohybem (ČSN EN ISO 5173)
- zkouška rozlomením (ČSN EN 1320)
- zkouška rázem v ohybu (ČSN EN ISO 9016)
- zkouška hloubením podle Erichsena (ČSN EN ISO 20482)
- zkouška tvrdosti podle Vickerse (ČSN EN ISO 6507-1)
- zkouška makroskopická a mikroskopická (ČSN EN 1321)

#### Příčná zkouška tahem

Příčná zkouška tahem je základní statickou zkoušku, která ověřuje pevnostní a plastické charakteristiky. Princip zkoušky tahem spočívá na plynulém zatěžování normalizovaného zkušebního tělesa. Dochází k deformaci zkušební tyče jednoosým tahovým zatížením od nulového zatížení až do jejího přetržení. Výstupem zkoušky je tahový diagram závislosti zatížení na prodloužení obr. 29. Pomocí této zkoušky zjišťujeme mechanické vlastnosti: mez kluzu  $R_e$  [MPa], mez pevnosti  $R_m$  [MPa], tažnost  $A$  [%] a kontrakci  $Z$  [%]. Způsob provedení zkoušky popisuje norma ČSN EN ISO 4136.

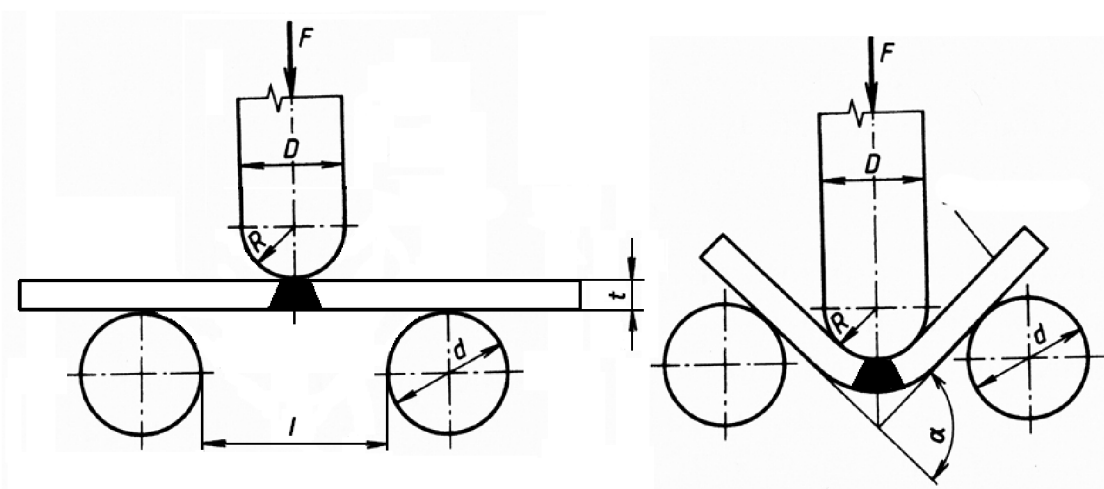




Obr. 29 Tahové diagramy [41]

### Zkouška ohybem

Zkouška ohybem se používá zejména pro zkoušení deformačních schopností tupých svarových spojů za studena. Svar se zatěžuje příčně, z boku nebo podélně. Vzorek je umístěn do zkušebního zařízení tak, aby síla působila v ose svaru. Průměr trnu je předepsán podle tloušťky a pevnosti zkoušeného materiálu. Následuje ohnutí ploché zkušební tyče okolo trnu do předepsaného úhlu ohybu obr. 30. Jedna strana zkušební vzorku je namáhána tahem a druhá tlakem. U zkoušky vyhodnocujeme úhel ohybu a druh: Provedení zkoušky lámavosti se řídí normou ČSN EN ISO 5173.



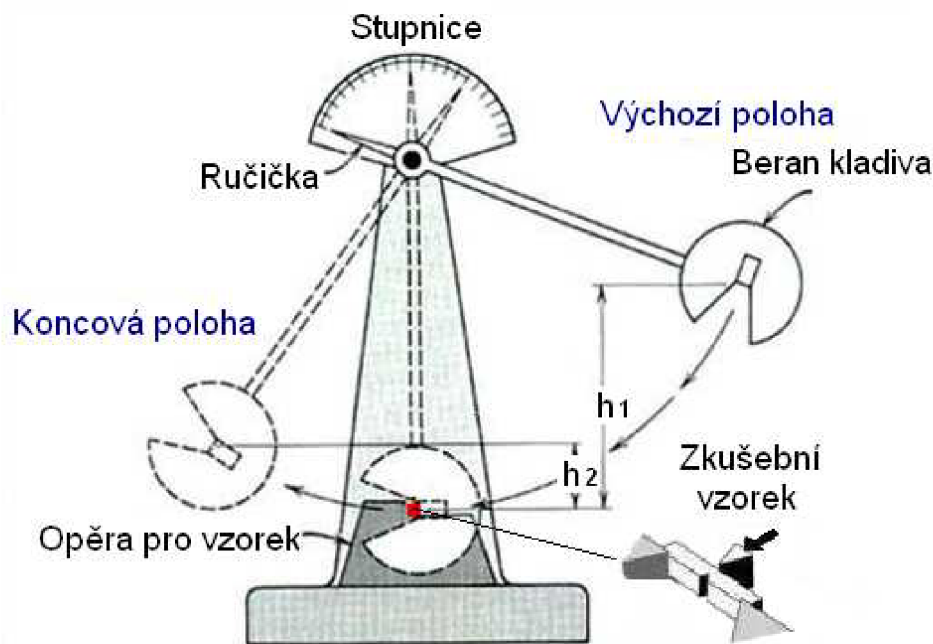
Obr. 30 Schéma příčné zkoušky ohybem [41]

### Zkouška rozlomením

Podstata zkoušky je založena na rozlomení svarového spoje takovým způsobem, aby bylo možné pozorovat svarovou plochu. Lom může být vyvolán krutem, dynamickým nebo statickým ohybem, jeho vznik ovlivňuje teplota a tvar vrubu. Jde o nejjednodušší zkoušku pro zjištění typů, rozměrů a rozmístění vad jako jsou neprůvary, dutiny, studené spoje, vměstky a trhliny v ploše lomu. Zkoušený svar se rozdělí na několik zkušebních těles, která jsou opatřena vrubem, aby byl zajištěn lom ve svarovém kovu. Postup zkoušky je popsán normou ČSN EN 1320.

## Zkouška rázem v ohybu

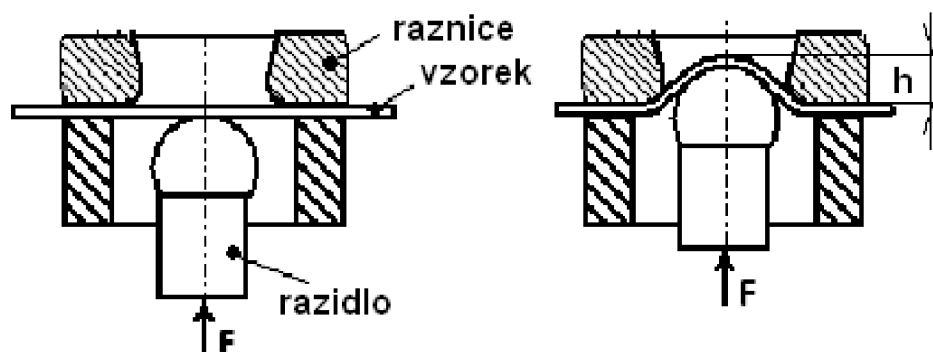
Je definována jako zkouška náchylnosti materiálu vůči křehkému porušení. Zkouška se provádí na zkušebních tělesech, které mají v příčném směru normalizovaný vrub, představující trhlinu v materiálu. Vzorky se vloží do Charpyho kladiva, na kterém se zkouška provádí. Na ustavený vzorek na opačnou stranu než je vyroben vrub, udeří břit kladiva o definované hmotnosti obr. 31. Zkouškou se zjišťuje velikost nárazové práce nutné k porušení zkušebního tělesa a hodnotí se charakter lomu buď je štěpný, nebo tvárný. Z nárazové práce je stanovena hodnota vrubové houževnatosti. Zkoušky popisuje norma ČSN EN ISO 9016.



Obr. 31 Schéma zkoušky rázem v ohybu [49]

## Zkouška hloubením podle Erichsena

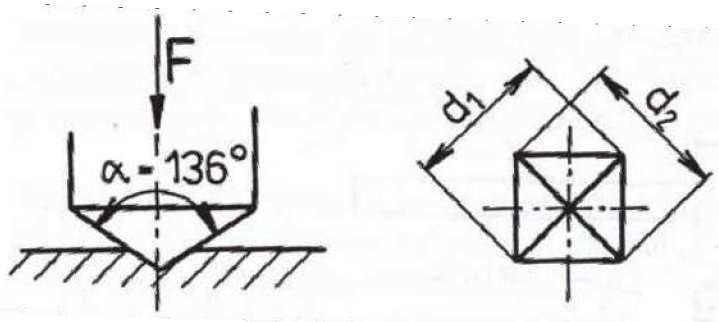
Zkouškou se stanovuje schopnost kovových materiálů se plasticky deformovat. Zkušební těleso o normovaných rozměrech se v místě styku s razítkem a raznicí natře grafitovým mazivem. Na upnutý vzorek dosedne razítko, to je tvořeno vyleštěnou ocelovou koulí, která je pomalu vtlačuje do povrchu zkoušeného vzorku obr. 32. Po vyskytnutí první trhliny, která prochází přes celou tloušťku materiálu, se zkouška zastaví. Změří se posuv razítkla, který je měřítkem schopnosti plechu k hloubení a hodnota je charakteristikou materiálu. Postup a způsob provádění zkoušky popisuje norma ČSN EN ISO 20482.



Obr. 32 Schéma zkoušky hloubením podle Erichsena [11]

## Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Podstatou zkoušky je měření odporu materiálu proti statickému nebo dynamickému vnikání cizího tělesa, určí se tak nejvyšší a nejnižší hodnoty tvrdosti daného materiálu. Zkouška tvrdosti podle Vickerse spočívá ve vnikání diamantového tělesa, které má tvar pravidelného jehlanu se čtvercovou základnou a předepsaný vrcholový úhel mezi protilehlými stranami, do povrchu zkušební vzorku obr. 33. Po zkoušce se měří délka vtisknuté úhlopříčky jehlanu, která zůstane v materiálu po odlehčení zkušební tělesa, po předepsaném zatížení danou silou. Výsledná hodnota tvrdosti je vyjádřena poměrem zatěžované síly k ploše vtisku. Postup zkoušky předepisuje norma ČSN EN ISO 6507-1.



Obr. 33 Podstata zkoušky podle Vickerse [41]

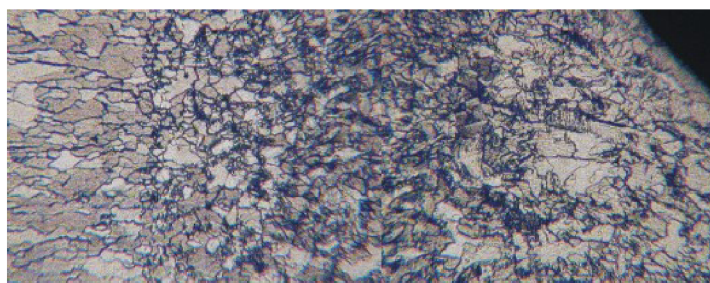
## Zkouška makroskopická a mikroskopická

Makroskopickou zkouškou se stanovuje charakter svarového spoje. Kontrola se provádí na zkušebních vzorcích, které jsou vyhotoveny tak, aby se daly svary prohlédnout v jejich příčném řezu obr. 34. Řezné plochy jsou před zkouškou přebroušeny a vyleštěny. Na vzorcích se pozoruje pouhým okem nebo menším zvětšením svarová kov i tepelně ovlivněné oblasti na obou stranách a vady jako například dutiny nebo trhliny.

Mikroskopická zkouška je založena na stejném principu jako zkouška makroskopická. Rozdíl je ve zkoumání vzorku, u mikroskopické zkoušky se zkoumají hranice zrn a struktura kovu. Vzorky se někdy ještě po vyleštění naleptávají, aby lépe vynikly hranice zrn. Zkoumání se provádí pod mikroskopem při 50 až 500 x zvětšení obr. 35. Provádění mikroskopické a makroskopické zkoušky popisuje norma ČSN EN 1321.



Obr. 34 Laserový svar zvětšeno 50x [30]



Obr. 35 Laserový svar zvětšeno 250x [30]



## 4 POVRCHOVÁ ÚPRAVA ZINKOVÁNÍM [18], [31], [32]

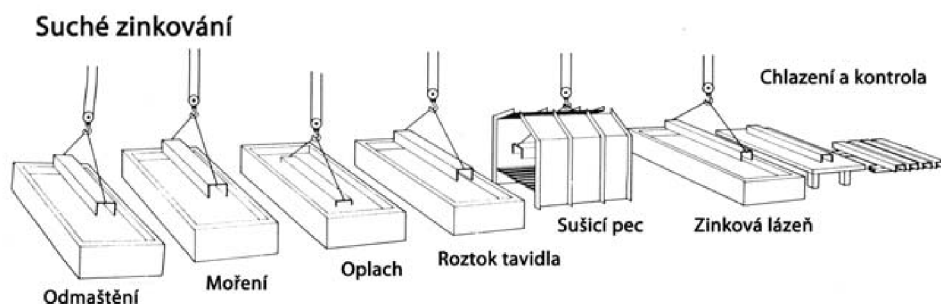
Běžným způsobem ochrany oceli proti korozi jsou ochranné povlaky, které vytvářejí bariéru mezi ocelí a korozním prostředím. Nejčastěji využívaným prvkem, který zajišťuje především dlouhodobou ochranu a životnost ocelového dílu proti atmosférické korozi, je zinek. Již v roce 1741 objevil francouzský chemik Paul Jacques Malouin zásadní podstatu ochrany oceli proti korozi pomocí zinku. Zjistil, že ponořením železného povrchu do roztaveného zinku se na kov vytvoří ochranná vrstva. O necelých 100 let později se touto problematikou zabýval francouz Stanislas Sorel. Ten jako tavidlo použil chlorid amonný. Díky tomu se metoda začala rozšiřovat a v roce 1837 si tento postup nechal patentovat pod názvem žárové zinkování. Od té doby se vyvinulo několik typů povrchové zinkové ochrany.

### 4.1 Žárové zinkování [12], [18], [32]

Žárové zinkování je metalurgický proces, při kterém se povlak na ocelovém nebo železném dílu vytváří vzájemnou reakcí zinkové taveniny a základního materiálu v lázni. Při reakci kovového materiálu s roztaveným zinkem vznikají postupně slitinové fáze železa a zinku. Po vytáhnutí z lázně ulpí na slitinových fázích vrstva čistého zinku. Existují dvě metody žárového zinkování.

#### Suché zinkování

Materiál je po odmaštění, moření a oplachu ponořen do tavidlové lázně. Tavidlovou lázeň tvoří vodný roztok chloridu zinečnatého a chloridu amonného. Následně je materiál usušen v sušicí peci. Regenerací tavidla se udržuje obsah železa pod 1 g/l, což umožňuje minimalizovat tvorbu tvrdého zinku v zinkové lázni. Ponořením materiálu do tavidla se na jeho povrchu vytvoří tenká vrstva tavidla, která brání oxidaci. Vrstva tavidla čistí hladinu roztaveného zinku od oxidů při ponořování materiálu. Z hladiny roztaveného zinku se před ponořením a vynořením materiálu stírá popel ze spáleného tavidla a také oxidy zinku. Když je zinkovaný materiál vytažen ze zinku, chladí se ve vodě nebo na vzduchu. Konečnou fází je kontrola. Postup suchého zinkování je na obrázku 36.

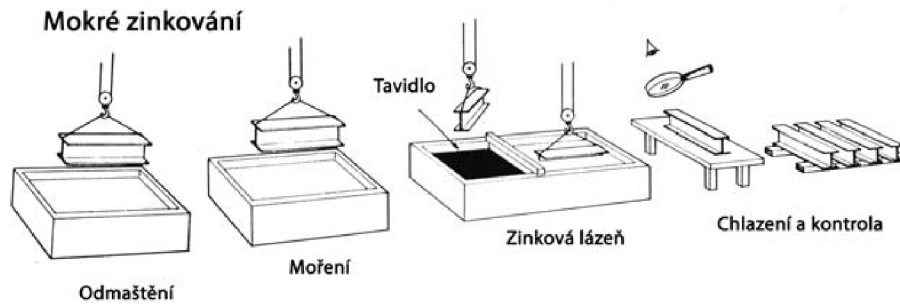


Obr. 36 Postup při suchém zinkování [32]

#### Mokrý zinkování

Materiál je stejně jako u suchého zinkování nejprve odmaštěn a mořen. Po tomto procesu se materiál zanořuje přes vrstvu tavidla do zinkové lázně, která je rozdělena přepážkou na dvě části. V jedné části je tavidlo chloridu amonného a v druhé roztavený zinek. Materiál se protáhne zinkovou lázní až k čisté volné hladině, ze které se také stírá popel ze spáleného tavidla a oxidy zinku. Po vytažení ze zinku se materiál stejně ochladí na vzduchu nebo ve vodě a připraví se ke kontrole. Postup mokrého zinkování je na obrázku 37.

Obě zmíněné metody poskytují z hlediska kvality a úrovně protikorozní ochrany zcela rovnocenné povlaky. Suchý způsob je ale běžnější, jelikož se dá snáze mechanizovat. Kontinuální způsob zinkování viz obr. 38.



Obr. 37 Postup při mokrém zinkování [32]

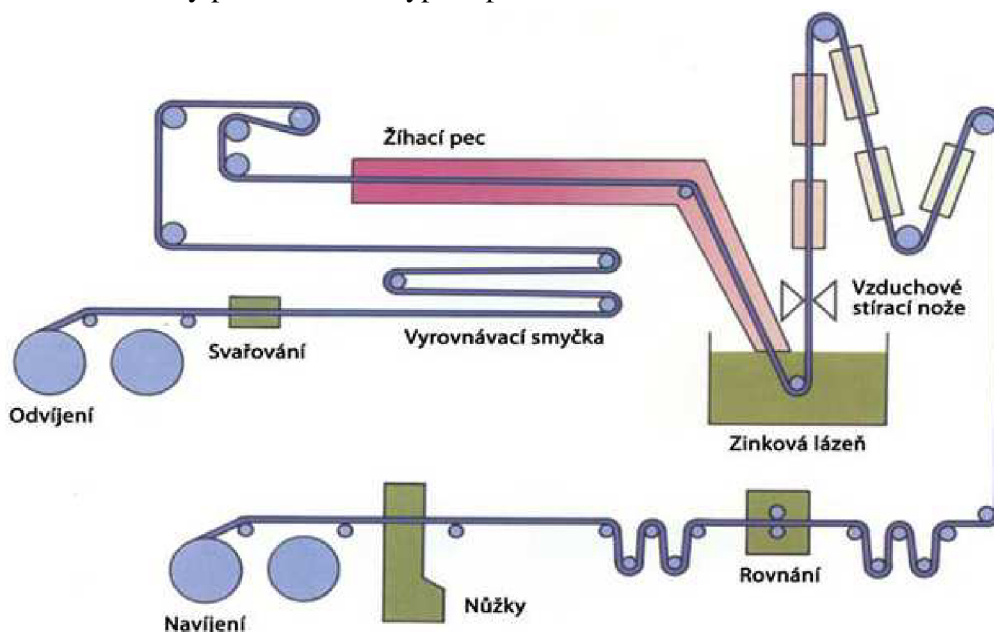
### Výhody a nevýhody žárového zinkování

Výhody:

- nízké vstupní náklady
- rovnoměrnost a kvalita nanášené vrstvy i na méně přístupných plochách.
- tvorba vyššího nebo stejného povlaku na ostrých zlomech a nerovnostech
- odolnost proti mechanickému poškození (oproti nátěru)
- žárové zinkování nemění vlastnosti oceli
- jednoduchá a rychlá kontrola
- šetrnost k životnímu prostředí
- dlouhá životnost povlaku (úbytky zinkové vrstvy v závislosti na korozním prostředí upravují normy ČSN EN ISO 14713, v našich klimatických podmínkách je úbytek zinkové vrstvy 0,002 mm/rok)

Nevýhody:

- vyžaduje pevné zařízení
- rozměry konstrukce jsou limitovány rozměry zinkovací lázně
- u povrchů tvářených za studena riziko deformace vlivem tepla v zinkovací lázni
- poněkud složitější technika svařování pozinkovaných kovů, navíc zde existuje riziko zinkové horečky při vdechnutí výparů při svařování



Obr. 38 Kontinuální žárové zinkování plechu [32]

## 4.2 Galvanické zinkování [9], [31], [51]

Galvanické zinkování patří mezi jednu z nejrozšířenějších metod galvanické povrchové úpravy oceli, v celosvětovém měřítku tvoří dokonce téměř 68%. Zinek a jiné jeho slitiny jsou v této metodě používány jako povlakový kov, chránící ocel proti korozi. Při styku s železem se zinek chová jako anoda, přednostně se rozpouští a pokrývá se vrstvou kysličníků, která zpomaluje korozi. Různá prostředí mají na zinkované povlaky pokaždé jiný vliv. Například v běžném venkovním prostředí je kov napadán jen málo. Při styku s průmyslovými exhaláty nebo mořskou vodou však značně korodují.

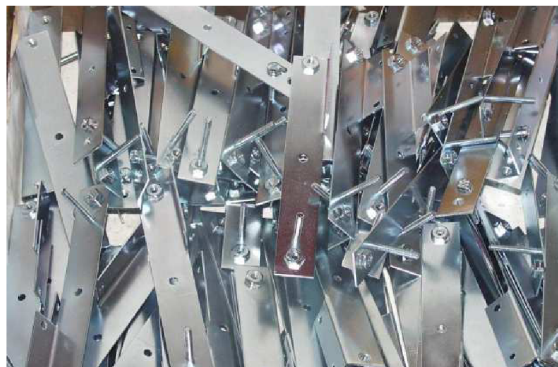
### Typy galvanického zinkování

- **Alkalická kyanidová lázeň** - výborné technické a technologické vlastnosti zinkových povlaků. Nejsou náročné na úpravu před zinkováním, povlaky jsou dobře přilnavé. Nevýhodou je nákladná likvidace odpadních vod (hygienická a ekologická nebezpečnost kyanidů).
- **Alkalická nekyanidová lázeň** - výhodou je snadná a levná likvidace odpadních vod a možnost náhrady kyanidové složky beze změn v technologickém zařízení. Nevýhodou je nižší vylučovací rychlost, nízká teplotní odolnost a horší mechanické vlastnosti povlaků. Na obrázku 39 vidíme zinkovanou součást tímto způsobem.



Obr. 39 Alkalicky zinkované součástky v nekyanidové lázni [51]

- **Slabě kyselá lázeň** - co se týče vzhledu, umožňují slabě kyselá lázně nejkvalitnější povlaky obr. 40, nejrychlejší vylučovací rychlost a omezují nebezpečí vzniku vodíkové křehkosti u pevných a velmi pevných ocelí. Negativem jsou například větší nároky na čistotu pokovované oceli. Agresivita lázně k oceli může někdy způsobit problémy při pokovení předmětů s kapilárními štěrbinami, zbytky lázně v kapilárách, které nebyly opláchnuty, způsobují korozi železa. Metoda je vhodná pro závěsové i hromadné pokovení a v dnešní době je nejrozšířenější technologií galvanického zinkování.



Obr. 40 Pásy zinkované ve slabě kyselá lázni [52]

- **Slitinová zinkovací lázeň** - tyto lázně vylučují povlaky zinku s kovy skupiny železa, kobaltem, železem a niklem. Výhodou této metody je vysoká odolnost proti korozi, a to dokonce i za vyšších teplot. Nevýhodou mohou být nákladnější technologie a problémy při likvidaci odpadních vod.

### 4.3 Ostatní způsoby zinkování [32], [36]

#### Žárové stříkání – metalizace

Žárové stříkání dle norem ČSN EN ISO 2063 je technologie pro vytvoření ochranných povlaků, známá jako metalizace či šopování. Pro zhotovení antikorozních povlaků používáme zařízení pro plynovou metalizaci, kdy je drát taven pomocí plamene v plynovém hořáku viz obr. 41 nebo elektrickým obloukem. Nanášené materiály jsou Zn, Al, Cu, Ms a jejich slitiny. Vytvořená vrstva nekorodujícího kovu na povrchu oceli brání vzniku koroze a tím několikanásobně prodlužuje životnost takto upravených celků. Před nástřikem musí být povrch dokonale čistý, odmaštěný a zdrsňený. Tato aplikace je vhodná pro provádění ve výrobních halách i na místech montáže.



Obr. 41 Žárové stříkání zinku [32]

#### Mechanické zinkování

Proces je vhodný pro ušlechtilé ocele s určitou tvrdostí, kde hrozí vodíková křehkost. Po odmaštění, odmoření a pomědění (vycementování mědí) se součásti nasypou do bubnu spolu se skleněnými kuličkami, zinkovým prachem a chemickými aktivátory. Součásti se omílají v bubnu a zinek se při tom pomocí skleněných kuliček navaluje na jejich povrch. Tloušťka vytvořeného povlaku se reguluje množstvím přidaného zinku. Běžně se pohybuje kolem 10 až 15  $\mu\text{m}$ , avšak mohou se vytvářet i tlustší povlaky. Jsou rovnoměrné i na dílech s komplikovanou geometrií. Povrch je poněkud matný a vzniklé povlaky jsou podobné těm, které vznikly galvanickým pozinkováním.

#### Sherardizace (difuzní pokovování)

Korozivzdorná vrstva vzniká difundováním ochranného kovu z pevného, kapalného nebo plyného prostředí do součástí za ohřevu v ochranné atmosféře nebo vakuu. Vzniklé povrchové vrstvy chemických sloučenin základního a ochranného kovu mají podobnou chemickou odolnost jako povlaky získané ponorem nebo elektrochemicky. Tyto postupy jsou používány pro malé součásti, které mohou být zahřáté nad 300 °C a i když je na ně nanesen povlak, jsou prakticky rozměrově nezměněné. Sherardizace poskytuje relativně tenké povlaky (15 až 40  $\mu\text{m}$ ) s temně šedým až hnědošedým povrchem. Povlaky mají dobrou přilnavost a velmi rovnoměrnou tloušťku i na předmětech s velmi složitým tvarem. Metoda má přibližně stejnou oblast použití jako elektrolytické zinkování.

## Nátěrové hmoty

Jedná se o tzv. studené zinkování. Tato metoda se však kvalitativně nedá srovnat s ostatními aplikacemi jako je třeba žárové zinkování. Při studeném zinkování se kov chrání pouze nátěrem, kdežto při ostatních formách aplikace se na kov vytvoří nová další vrstva, která kov chrání účinněji než nátěr. Nátěrová hmota se nanáší stříkáním nebo štětcem. Obsahuje jemně rozptýlený zinkový prášek v organickém a anorganickém pojivu. Nátěrové hmoty jsou k dispozici jednosložkové a dvousložkové s minimálním obsahem 92% zinku v sušině.

## 4.4 Svařování pozinkované oceli [32], [36]

Zinkovaná ocel se dá svařovat přibližně stejným způsobem a stejnými metodami jako normální černá ocel. Nedají se však použít stejné parametry pro svařování materiálu bez povlaku, protože zinkový povlak má určitý rušivý efekt na průběh svařování. Jeho poměr závisí na tloušťce zinkového povlaku, složení a struktuře.

### Hlavní problémy jsou:

- větší rozstřík
- menší průvar
- zvýšený vývin výparů
- zvýšená tvorba pórů
- riziko tvorby mezikrystalických prasklin

Při svařování oceli se vždy tvoří exhalace, které obsahují různá množství oxidů železa, ozon, vodík, oxidy uhlíku, dusíku a fluoridy. U pozinkované oceli se navíc při svařování tvoří oxid zinečnatý jako bílá plynná sloučenina, která je ze zbylých uvedených sloučenin v exhalacích jasně viditelná.

Nadýchání oxidu zinečnatého může způsobit tzv. zinkovou horečku a symptomy připomínají chřipku. Jde o horečku, zimničný třes, zvýšené vylučování slin, bolest hlavy a v horších případech nevolnost a zvracení. Zinek se naštěstí neukládá v těle stejným způsobem jako třeba olovo a kadmium, ale vylučuje se močí a stolicí. Příznaky zinkové horečky běžně zmizí během několika hodin a trvalé následky nejsou známy. Proto při každém svařování nejen s pozinkovaným povlakem je nutné dbát na spolehlivé odsávání výparů, aby svářeči nebyli vystaveni riziku, že se nadýchají exhalací ze svařování.



## 5 PRAKTICKÁ ČÁST

### 5.1 Návrh experimentu

Experiment spočívá na vyhodnocení daných destruktivních zkoušek průvanového svarového spoje překlátovaných pozinkovaných plechů, které měly rozdílné distance mezi plechy. Všechny svary byly provedeny pomocí stejného laserového paprsku.

Ke zjištění kvality svarového spoje byly navrženy tyto zkoušky

- příčná zkouška tahem (ČSN EN ISO 4136)
- kontroly makrostruktury (ČSN EN 1321).



Obr. 42 Upnutí překlátovaných pozinkovaných plechů pomocí přípravku

#### Vlastnosti materiálu

Pro experiment byla zvolena hlubokotažná jakostní nelegovaná ocel 11 321, která je vhodná pro tváření za studena se zaručenou svařitelností. Plechy jsou žárově pozinkované, tloušťka zinkové vrstvy je 21  $\mu\text{m}$ . Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4 a chemické složení v tabulce 5.

Tab. 4 Mechanické vlastnosti svařovaného materiálu

Materiál	Mez kluzu Re [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost $A_{80}$ min. [%]
Ocel 11 321	235	280-380	29



Tab. 5 Chemické složení svařovaného materiálu

Materiál	Obsah uhlíku C – max. [%]	Obsah manganu Mn – max. [%]	Obsah fosforu P – max. [%]	Obsah síry S – max. [%]
Ocel 11 321	0,1	0,45	0,03	0,03

Při svařování nejen uhlíkových ocelí je nutné znát uhlíkový ekvivalent  $C_{ekv}$ , který se počítá dle daného vzorce.

Uhlíkový ekvivalent

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (5.1)$$

$$C_{ekv} = 0,1 + \frac{0,45}{6} + \frac{0 + 0 + 0}{5} + \frac{0 + 0}{15} = 0,175 \%$$

Z daného výpočtu můžeme konstatovat, že materiál má zaručenou svařitelnost. Platí, že  $C_{ekv} \leq 0,45$  hm. % a zároveň  $C \leq 0,35$  hm. % při svařované tloušťce  $s \leq 25$  mm, lze svařovat bez předehřevu a nejsou nutná žádná zvláštní opatření.

### Volba počtu vzorků

Pro experiment se svařilo 5 různých vzorků. Vždy se svařovaly přeplátované pozinkované plechy 11 321 tloušťky 2 mm, ale pokaždé s různou distancí. Distance byly zvoleny 0,4 mm; 0,15 mm; 0,08 mm; 0,05 mm a 0,00 mm. Všechny vzorky byly svařeny stejným způsobem pomocí laseru. Při svařování plechů s mezerou 0,4 mm nedošlo ke svaření a tento vzorek byl z dalšího experimentu vyloučen. Každý vzorek byl pracovním označen, aby nebyl při manipulaci a zkouškách zaměněn.

- Vzorky pro příčnou zkoušku tahem - celkem bylo připraveno 12 vzorků

3 x plechy 11 321 tloušťky 2 mm s distancí 0,15 mm - pracovní označení 8.1; 8.2; 8.3

3 x plechy 11 321 tloušťky 2 mm s distancí 0,08 mm - pracovní označení 9.1; 9.2; 9.3

3 x plechy 11 321 tloušťky 2 mm s distancí 0,05 mm - pracovní označení 10.1; 10.2; 10.3

3 x plechy 11 321 tloušťky 2 mm s distancí 0,00 mm - pracovní označení 11.1; 11.2; 11.3

- Vzorky pro makroskopickou zkoušku - celkem byly připraveny 4 vzorky

1 x plechy 11 321 tloušťky 2 mm s distancí 0,15 mm - pracovní označení 8

1 x plechy 11 321 tloušťky 2 mm s distancí 0,08 mm - pracovní označení 9

1 x plechy 11 321 tloušťky 2 mm s distancí 0,05 mm - pracovní označení 10

1 x plechy 11 321 tloušťky 2 mm s distancí 0,00 mm - pracovní označení 11

## 5.2 Svařovací proces

Svaření vzorků bylo provedeno na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Byl použit vláknový laseru YLS 2000 od společnosti IPG a pro manipulaci s laserovou svařovací hlavou manipulační robot IRB 2400-10 obr. 43.



Obr. 43 Vlákňový laser a průmyslový robot [26]

Laser YLS 2000 je vlákňový laser od firmy IPG Photonics. Jedná se o univerzální a přizpůsobitelný laser, použitelný k různým technologickým účelům. Na pracovišti ústavu přístrojové techniky je možné tento laser osadit řezací nebo svařovací hlavou. Zdroj je umístěn v kompaktní, vzduchem chlazené skříni, která je přizpůsobena pro využití v průmyslových podmínkách.

Technické parametry:

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

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

Technické parametry:

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

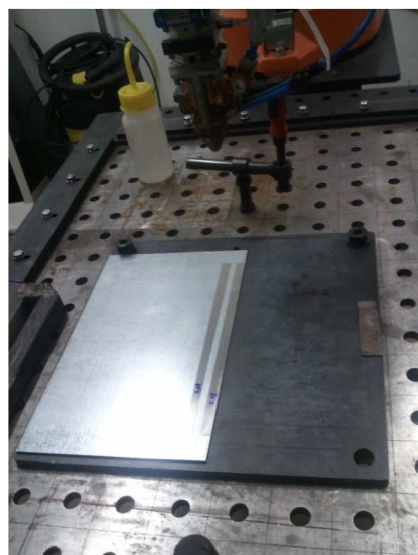
Jednotlivé svarové plechy byly před svařováním odmaštěny a byly zbaveny mechanických nečistot. Na spodní plechy byly umístěny a nalepeny nerezové distanční folie daných rozměrů obr. 44, které zaručovaly potřebnou mezeru mezi svařovanými plechy. Po přiložení horního plechu, byly oba plechy k sobě přidrženy speciálním přípravkem a pomocí upínek přichyceny ke stolu obr 45, 46 a pohledový řez obr. 47. Svařovací parametry byly zvoleny podle doporučení pro provedení laserových svarů v ochranné atmosféře argonu, které jsou popsány v tabulce 6.

Tab. 6 Parametry svařování

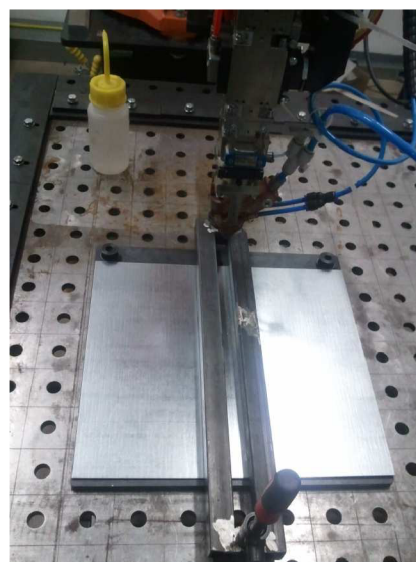
Ochranný plyn	Objem plynu [l.min <sup>-1</sup> ]	Poloha ohniska [mm]	Výkon laseru [W]	Svařovací rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Tloušťka plechu [mm]	Tloušťka vrstvy Zn [μm]
Ar	14	1	1400	20	2	21



Obr. 44 Nalepené nerezové pásky



Obr. 45 Příprava upnutí

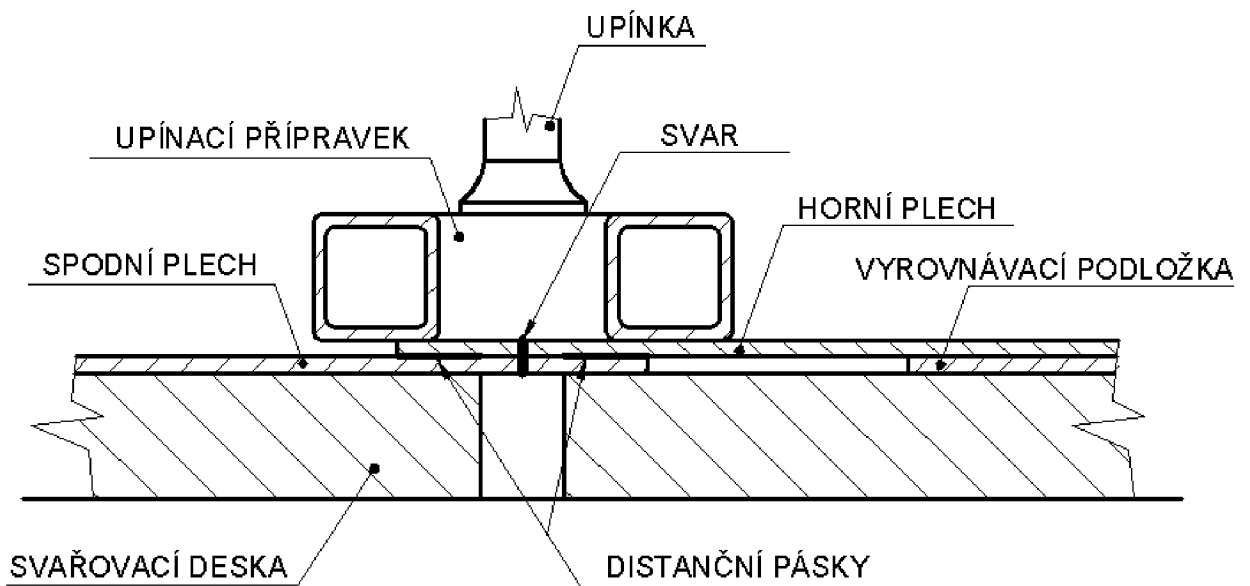


Obr. 46 Trasování dráhy laseru

### Výroba vzorků

Pro zkoušku v příčném tahu byly vyřezány vzorky podle normy ČSN EN ISO 4136. Celkem bylo vyřezáno 12 kusů vzorků, ze čtyř různých svarů vždy po třech kusech.

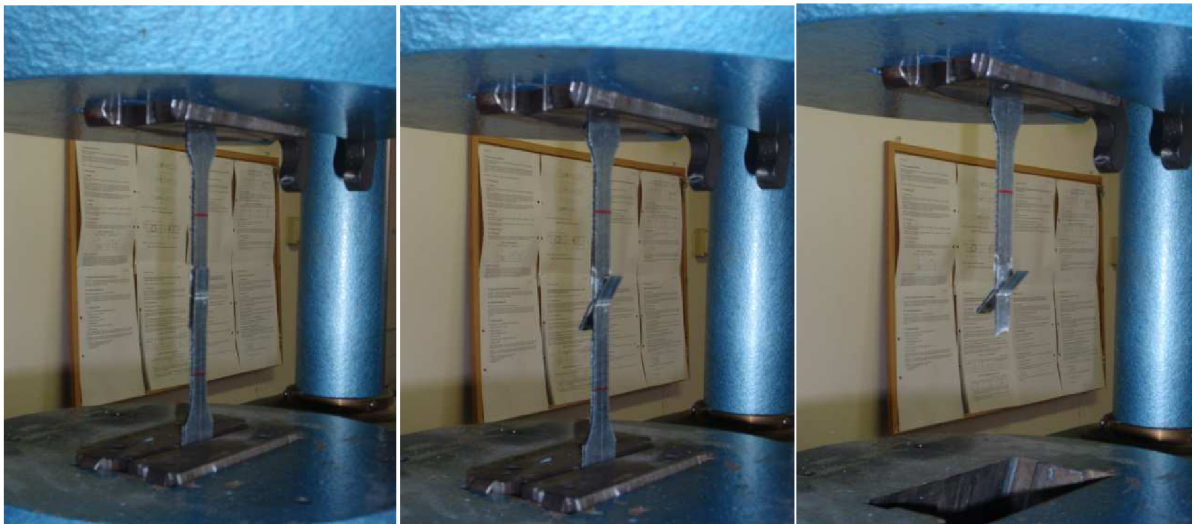
Čtyři kusy vzorků byly vyhotoveny pro makroskopickou zkoušku. Jednalo se o jeden vzorek od každého svaru. Vzorky byly po vyřezání zality a následně došlo k přebroušení a vyleštění jejich povrchu.



Obr. 47 Pohled řezu - upnutí pozinkovaných plechů s distančními pásky

### 5.3 Zkouška tahem

Na hydraulickém zkušebním stroji ZD40 /400kN obr. 29 byla provedena zkouška v příčném tahu obr. 48 a, b, c. Rychlost zatěžování byla zvolena 500kN/min. Vzorky daných rozměrů obr. 50 se ve zkušebním stroji upínaly pomocí kleštin, které způsobovaly malý prokluz, jenž je patrný v tahových diagramech.



a) upnutí vzorku

b) průběh zkoušky

c) výsledek zkoušky

Obr. 48 Průběh tahové zkoušky



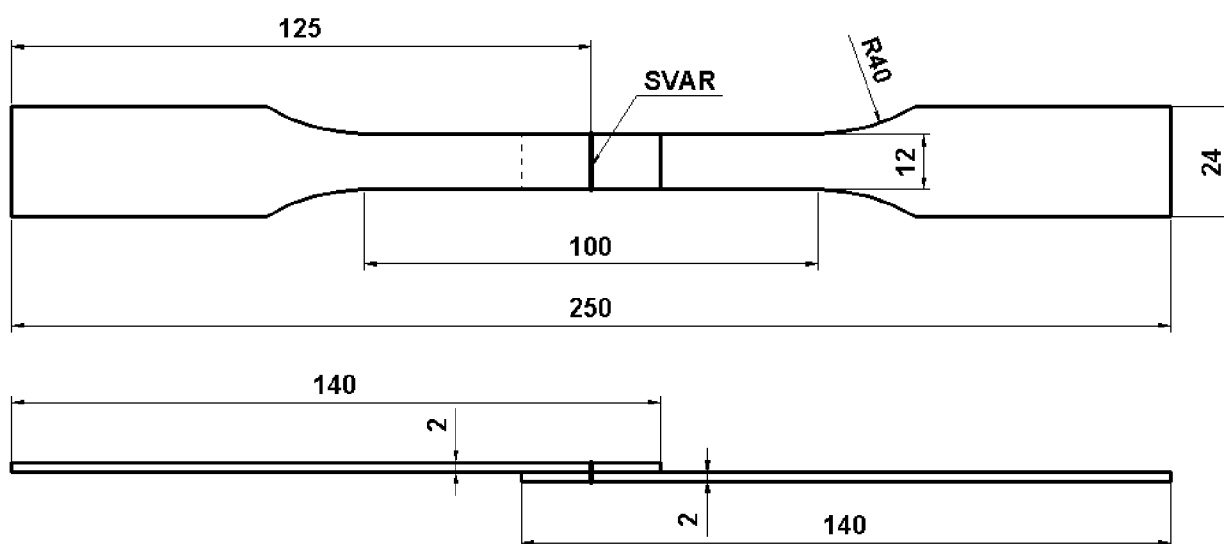
Pro zkoušku v příčném tahu byl použit hydraulický zkušební stroj ZD40 /400 kN. Jedná se o hydraulický zkušební stroj pro tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do maximálního zatížení 400 kN, který je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60. Zpracování dat probíhá na počítači, který je vybaven programem M-TEST v.1.7. Daný program slouží k vyhodnocování a ke grafickému zpracování naměřených hodnot z tahové, tlakové a ohybové zkoušky dle EN 10001-2.

Technické parametry:

- výrobce: HBM (SRN)
- měřicí rozsah: 8 až 400 kN
- měřicí rozsah dráhy: 0 až 280 mm
- sériové rozhraní RS 232.
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy



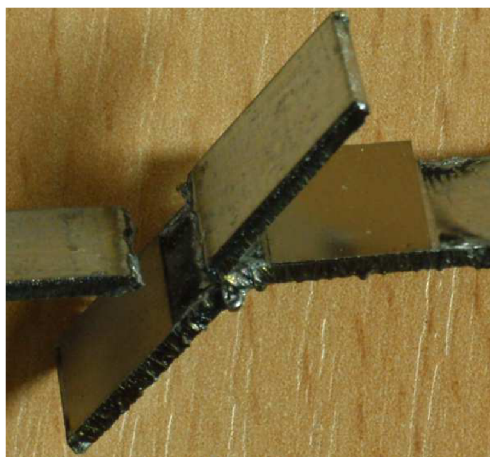
Obr. 49 Zkušební stroj ZD40



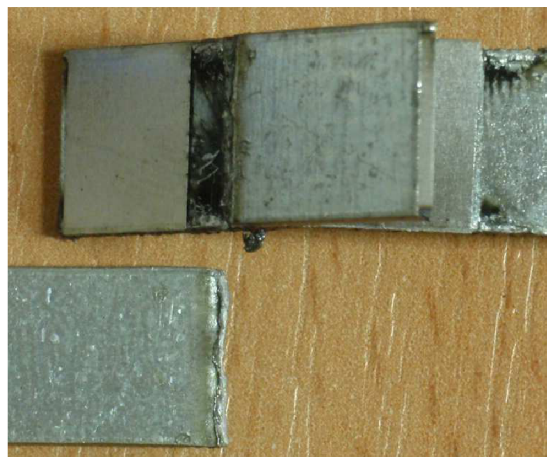
Obr. 50 Rozměry vzorku pro zkoušku tahem

## Vzorky 8 s distancí 0,15 mm

U všech vzorků s distancí 0,15 mm došlo k porušení mezi tepelně ovlivněnou oblastí svaru a svarem horního plechu obr. 51 a 52. Naměřené hodnoty tab. 7 nedosahují hodnot uváděných výrobcem. Svaření těchto vzorků je tedy nevyhovující.



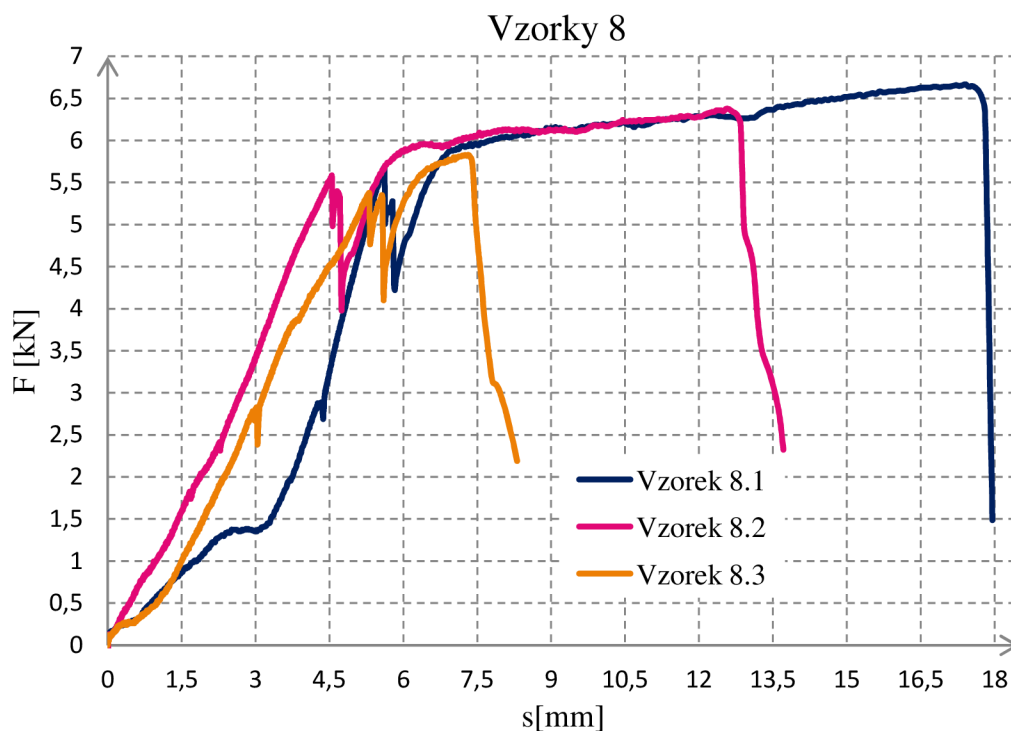
Obr. 51 Vzorek 8 po tahové zkoušce boční pohled



Obr. 52 Vzorek 8 po tahové zkoušce horní pohled

Tab. 7 Naměřené hodnoty vzorků 8 s distancí 0,15 mm

Číslo vzorku	a [mm]	b [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
8.1	2	11,9	23,8	6668	179,39	280,17	11,25
8.2	2	11,9	23,8	6376,4	224,05	267,92	8,75
8.3	2	11,8	23,6	5830,8	223,56	247,07	3,75

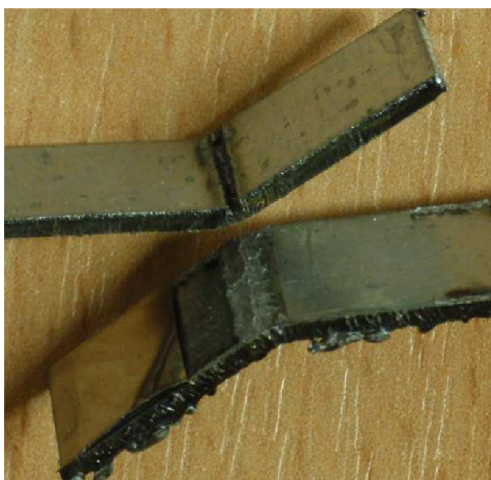


Graf 2 Tahový diagram vzorků 8 s distancí 0,15 mm



## Vzorky 9 s distancí 0,08 mm

U všech vzorků s distancí 0,08 mm došlo k porušení ve svaru mezi překlátovanými plechy obr. 53 a 54. Naměřené hodnoty tab. 8 nedosahují hodnot uváděných výrobcem. Svaření těchto vzorků je nevyhovující.



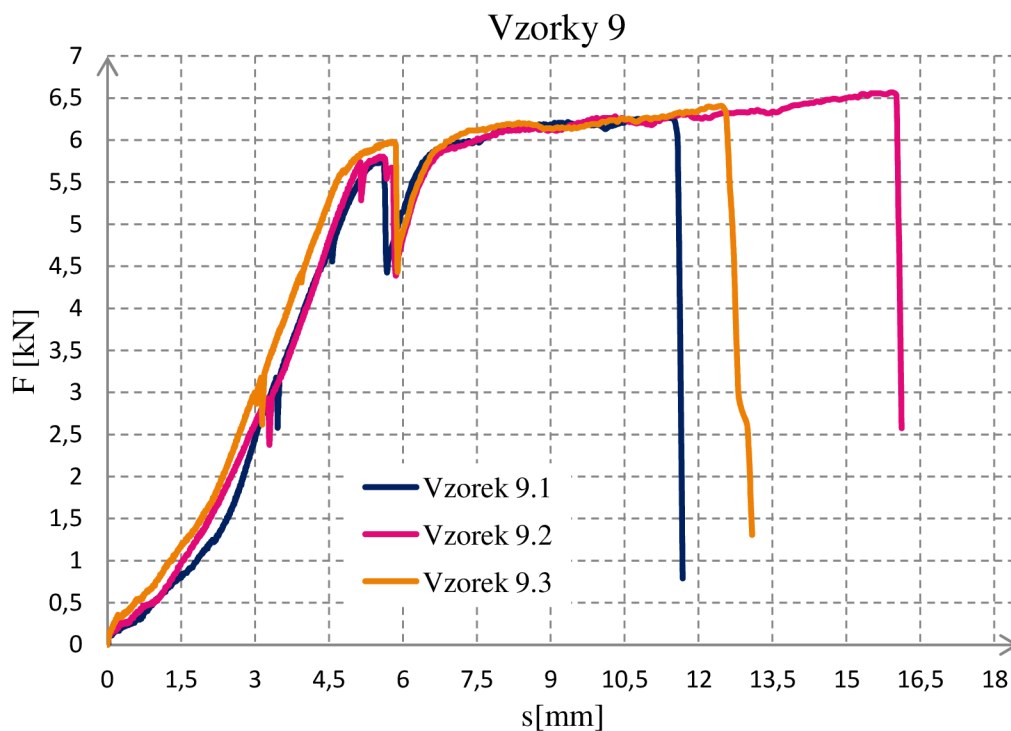
Obr. 53 Vzorek 9 po tahové zkoušce boční pohled



Obr. 54 Vzorek 9 po tahové zkoušce horní pohled

Tab. 8 Naměřené hodnoty vzorků 9 s distancí 0,08 mm

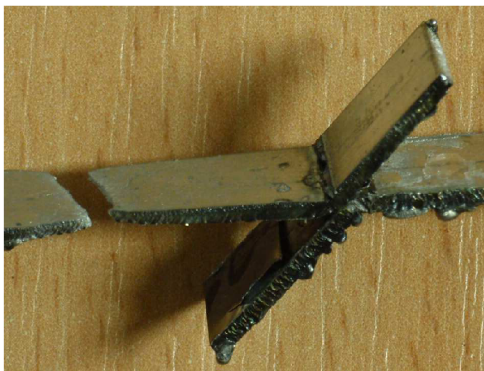
Číslo vzorku	a [mm]	b [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
9.1	2	12	24	6263,6	239,43	260,98	5
9.2	2	11,8	23,6	6564,4	239,9	278,15	7,5
9.3	2	11,8	23,6	6404,8	248,66	271,39	7,5



Graf 3 Tahový diagram vzorků 9 s distancí 0,08 mm

## Vzorky 10 s distancí 0,05 mm

U všech vzorků s distancí 0,05 mm došlo k porušení mimo svar a tepelně ovlivněnou oblast obr. 55 a 56. To svědčí o provedení kvalitního a pevného svaru. K poruše došlo po překonání meze kluzu daného materiálu, z čehož vyplývá kvalitní provedení svaru. Naměřené hodnoty tab. 9 se shodují s hodnotami uváděných výrobcem.



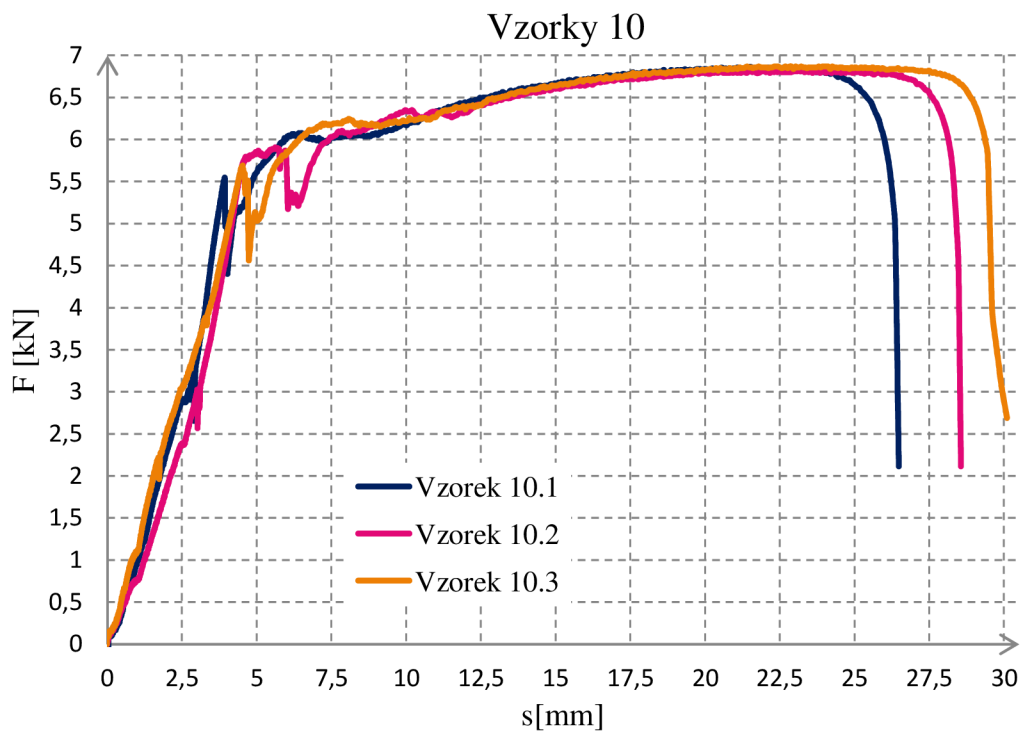
Obr. 55 Vzorek 10 po tahové zkoušce boční pohled



Obr. 56 Vzorek 10 po tahové zkoušce horní pohled

Tab. 9 Naměřené hodnoty vzorků 10 s distancí 0,05 mm

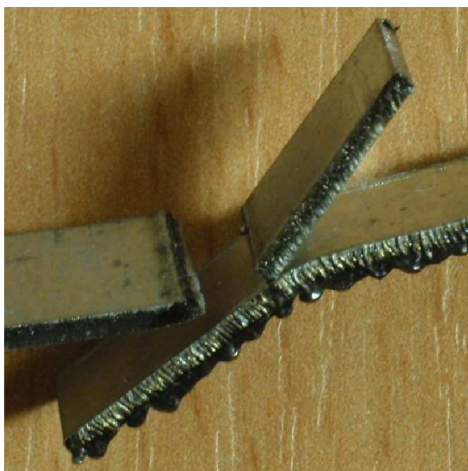
Číslo vzorku	a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>m</sub> [N]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]
10.1	2	11,7	23,4	6865,6	221,85	293,4	22,5
10.2	2	11,65	23,3	6818,4	249,05	292,64	21,25
10.3	2	11,8	23,6	6865,6	215,98	290,92	22,5



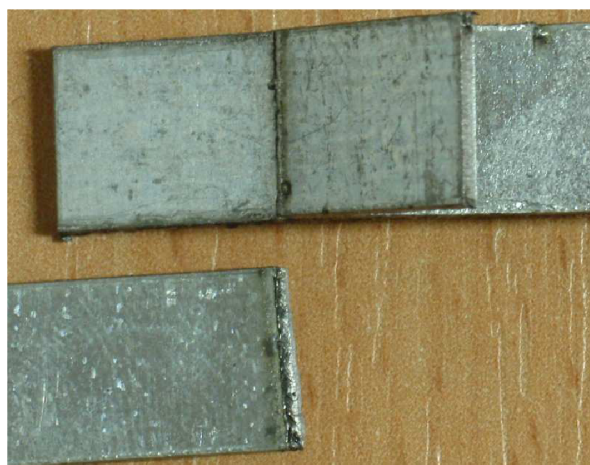
Graf 4 Tahový diagram vzorků 10 s distancí 0,05 mm

## Vzorky 11 s distancí 0,00 mm

U všech vzorků s nulovou distancí došlo k porušení přímo ve svaru horního plechu obr. 57 a 58. Naměřené hodnoty tab. 10 nedosahují hodnot uváděných výrobcem. Svaření těchto vzorků je nevyhovující a jde o nejhorší svar experimentu.



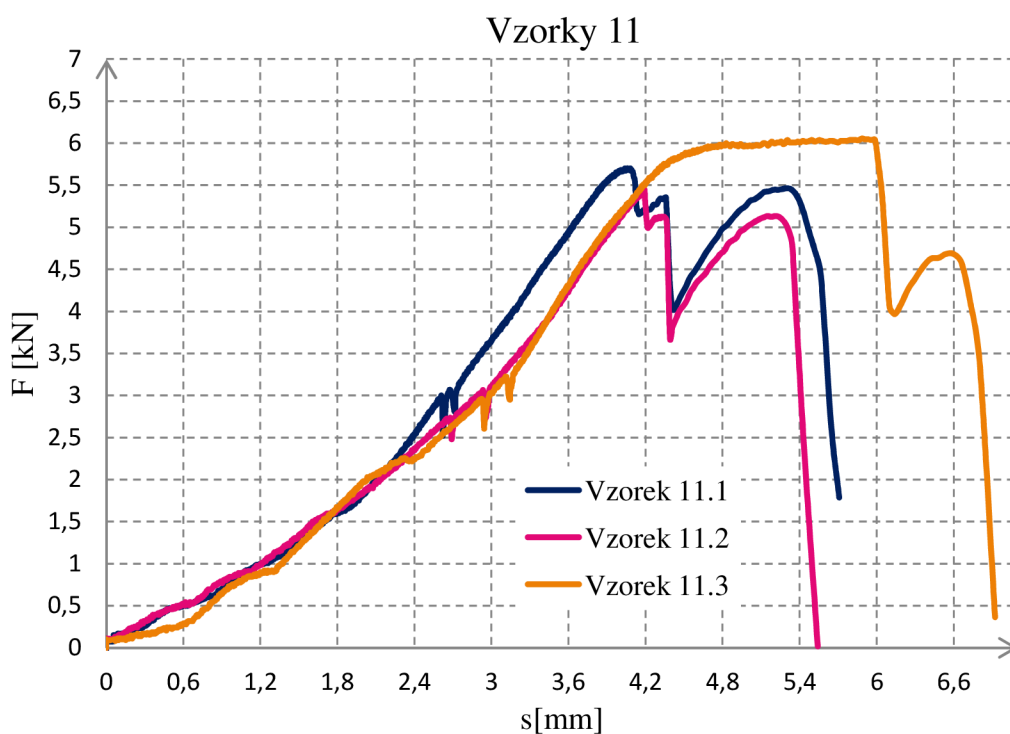
Obr. 57 Vzorek 11 po tahové zkoušce boční pohled



Obr. 58 Vzorek 11 po tahové zkoušce horní pohled

Tab. 10 Naměřené hodnoty vzorků 11 s distancí 0,00 mm

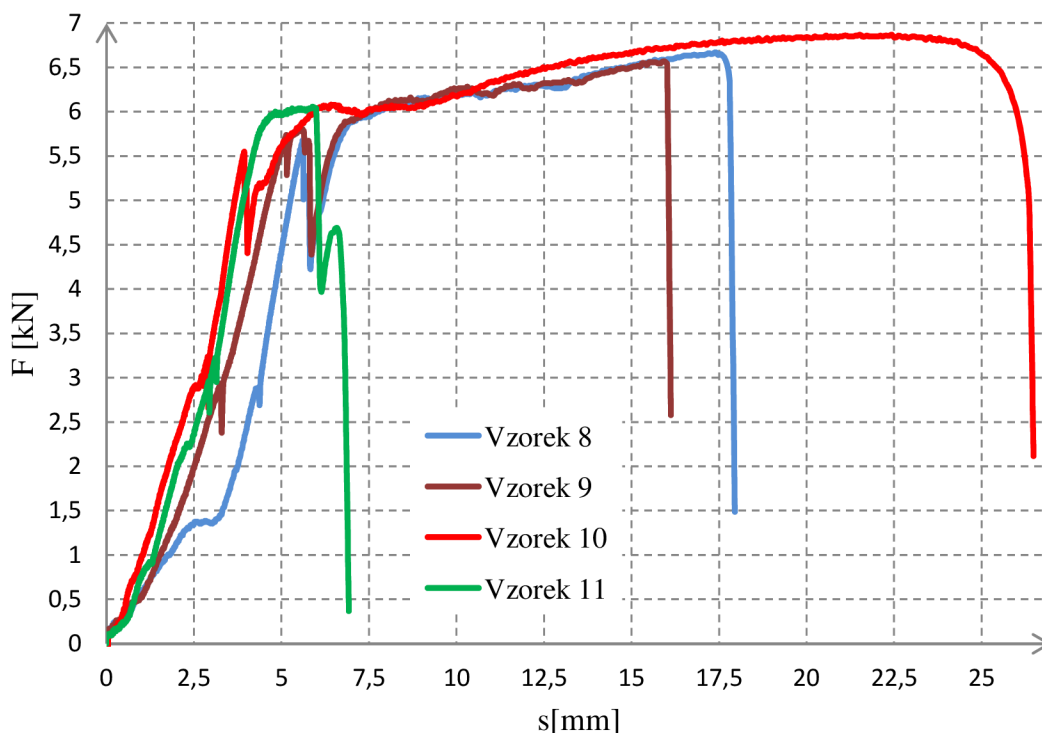
Číslo vzorku	a [mm]	b [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
11.1	2	11,6	23,2	5699,2	227,02	245,66	2,5
11.2	2	11,8	23,6	5445,2	155,81	230,73	2,5
11.3	2	11,9	23,8	6056,8	252,5	254,49	2,5



Graf 5 Tahový diagram vzorků 11 s distancí 0,00 mm

## Zhodnocení zkoušky příčným tahem

Je zřejmé, že různé distance mezi pozinkovanými přeplátovanými plechy mají vliv na kvalitu svaru. Při zkoušce v příčném tahu u čtyř různých vzorků nedošlo pouze v jednom případě k lomu ve svarovém spoji ani v tepelně ovlivněné oblasti svaru. Jednalo se o vzorky 10 s distancí 0,05 mm a všechny tři pokusy zkoušky proběhly téměř shodně. U zbylých vzorků došlo k porušení přímo ve svaru nebo v tepelně ovlivněné oblasti. Nejhorší výsledky byly zaznamenány u vzorků 11 s nulovou mezerou. Právě nulová mezera zapříčinila nekvalitní svar, protože zinkové výparu neměly možnost úniku. V grafu 6 a v tabulce 11 jsou názorně vidět rozdíly jednotlivých zkoušek všech čtyř vzorků.



Graf 6 Tahový diagram všech 4 vzorků

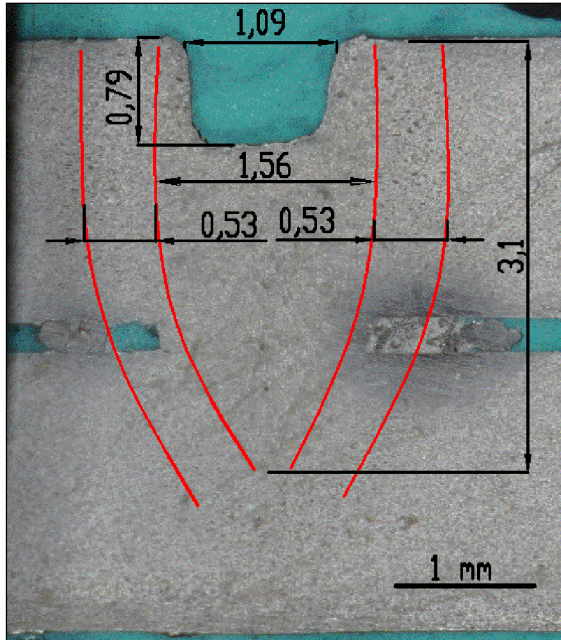
Tab. 11 Porovnání všech 4 vzorků

Číslo vzorku	a [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 [%]
8	2	11,9	23,8	6668	179,39	280,17	11,25
9	2	11,8	23,6	6564,4	239,9	278,15	7,5
10	2	11,7	23,4	6865,6	221,85	293,4	22,5
11	2	11,9	23,8	6056,8	252,5	254,49	2,5

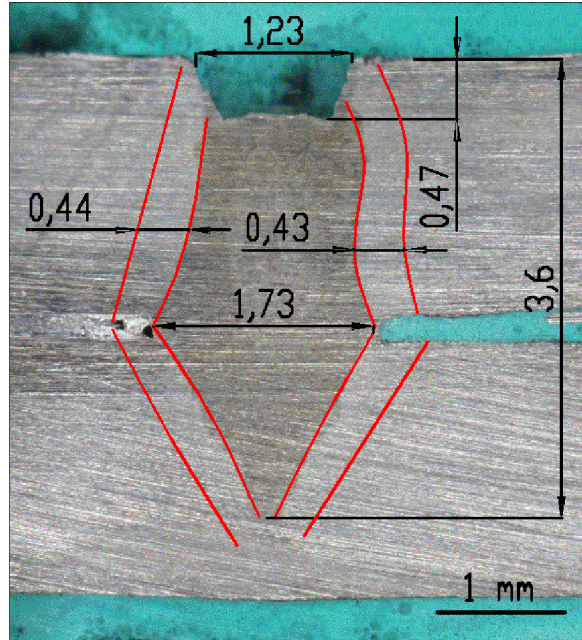


## 5.4 Zkouška makrostruktury

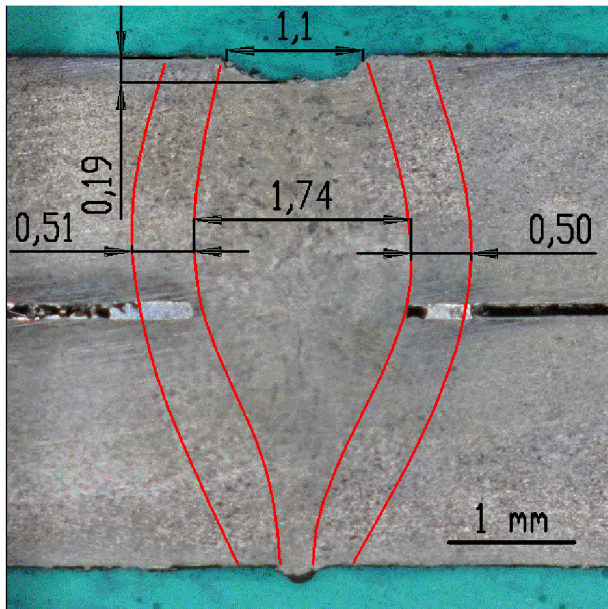
Pro makroskopickou zkoušku byly provedeny snímky jednotlivých svarových spojů, u kterých byly pomocí programu AutoCad 2002 změřeny tepelně ovlivněné oblasti a šířky svarů. Jednotlivé odečty jsou zobrazeny na obrázcích 59 až 62 a v tabulce 12.



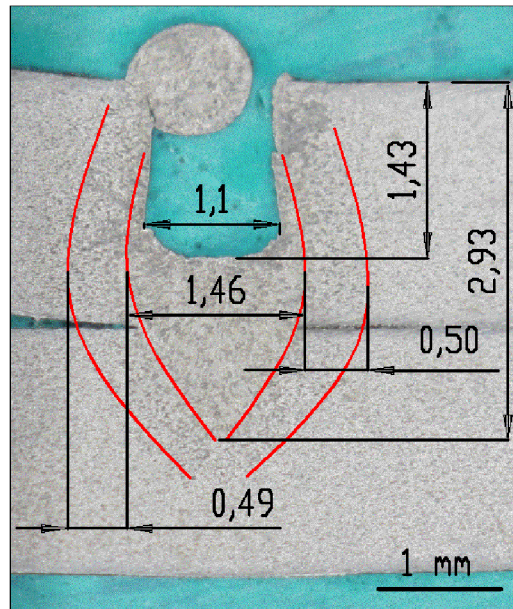
Obr. 59 Vzorek 8 s distancí 0,15 mm



Obr. 60 Vzorek 9 s distancí 0,08 mm



Obr. 61 Vzorek 10 s distancí 0,05 mm



Obr. 62 Vzorek 11 s distancí 0,00 mm

Tab. 12 Odměřené hodnoty šířek TOO a svarů u jednotlivých vzorků

Číslo vzorku	Šířka TOO [mm]	Šířka svaru [mm]	Šířka svaru s TOO [mm]	Hloubka svaru [mm]
Vzorek 8	0,53	1,56	2,62	3,1
Vzorek 9	0,44-0,43	1,73	2,53	3,6
Vzorek 10	0,51-0,50	1,74	2,75	4
Vzorek 11	0,50-0,49	1,46	2,45	2,9

### Zhodnocení zkoušky makrostruktury

U všech vzorků je poměrně malá tepelně ovlivněná oblast a to díky ochranné atmosféře argonu. Ve svaru na vzorku 8 je velmi prohloubený povrch svaru a kořen svaru sahá jen do poloviny spodního plechu, nedošlo tedy k úplnému provaření. Vzorek 9 byl pravděpodobně špatně přebroušen a vyleštěn, rozpoznání svaru a tepelně ovlivněné oblasti bylo velice problematické. I u tohoto vzorku ale nedošlo k úplnému provaření obou plechů. Nejlepší svaření je vidět na vzorku 10, který má jen velmi málo prohloubený povrch, došlo k úplnému provaření obou plechů a svar nemá žádné viditelné vady. Extrémně prohloubený povrch svaru a rozstřík způsobený vypařováním zinku je vidět na vzorku 11. Provaření není úplné, kořen sahá jen do poloviny spodního plechu. Jedná se o nejhorší svar experimentu.



## 6 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU

V experimentální části byly zhotoveny čtyři různé přeplátované svary pozinkovaného plechu z oceli 11 321, vždy s jinou mezerou mezi přeplátovanými plechy. Byl použit vláknový laser s ochrannou atmosférou argonu, jde o běžně používaný plyn pro svařování laserem. Cílem experimentu bylo posouzení vlivu jednotlivých mezer mezi svařovanými pozinkovanými plechy na výslednou kvalitu svaru, jelikož při laserovém svařování pozinkovaných ocelí dochází k vypařování zinku a to negativně ovlivňuje svar. K vyhodnocení vlastností svarů byla použita příčná tahová zkouška a zkouška makrostruktury. Zkoušky prokázaly, že nedodržení určité mezery mezi svařovanými díly má za následek sníženou pevnost svaru a svarové vady.

Při příčné zkoušce tahem došlo u tří vzorků k lomu v tepelně ovlivněné oblasti svaru nebo přímo ve svaru. Jen u jednoho vzorku, který měl označení vzorek 10 a mezeru 0,05 mm, došlo k lomu mimo svar a TOO svaru, naměřené hodnoty tak odpovídaly vlastnostem základního materiálu a to svědčí o dobré kvalitě svaru. Ze získaných hodnot je patrné, že svaření pozinkovaných plechů bez mezery má nejhorší vlastnosti, protože zinek nemá možnost úniku a značně poškozuje svar. Na druhé straně při svařování s větší mezerou mezi plechy nastává problém svarového kovu s překlenutím mezery a tím se zhoršují mechanické vlastnosti svaru.

Při kontrole makrostruktury byly zjištěny rozměry svarů, tepelně ovlivněné oblasti, hloubky kořenů a prohlubně povrchů daných svarů. Laserový paprsek vytvořil poměrně tenké svary a díky použití argonu jako ochranné atmosféry byly vidět i malé TOO. Na vzorcích byly dobře viditelné průvary jednotlivých svarů a jejich vady. Stejně jako u příčné zkoušky tahem, nejhorší kvalitu svaru měl vzorek 11 s nulovou distancí. Bylo vidět, že zinek se snažil unikat svarem a došlo tak k rozstříku svarového kovu, což mělo za následek extrémní prohlubeň povrchu svaru. Nejlepší svar měl vzorek 10 s mezerou 0,05 mm, který obstál i v tahové zkoušce. Svar byl bez vad a došlo k úplnému provaření obou plechů. Potvrdila se i závislost zvětšující se mezery na menší hloubku kořene.

## ZÁVĚR

Diplomová práce se v teoretické části zabývá lasery, jejich rozdělením, technologií laserového svařování, zinkováním, svarovými vadami a jejich kontrolou. Hlavní část diplomové práce byla zaměřena na provedení experimentu svařování přeplátovaných pozinkovaných plechů s rozdílnou mezerou mezi oběma svařovanými díly. Pozinkované oceli nachází stále větší uplatnění převážně v automobilovém průmyslu a podíl pozinkovaných plechů při výrobě automobilů dosahuje 80% použitého materiálu. Povrchová úprava pozinkováním zaručuje sice protikorozní ochranu, ale přináší problémy při svařování těchto materiálů. Při svařování pozinkovaných plechů dochází k vypařování zinku, který způsobuje svarové vady a snižuje pevnost svaru. Pro experiment se zhotovily čtyři přeplátované svary pozinkovaných plechů, mezi kterými byla vždy jiná mezera. Pro vyhodnocení vlastností svarů byla použita zkouška v příčném tahu a zkouška makrostruktury.

U příčné tahové zkoušky došlo k porušení mimo tepelně ovlivněnou oblast a svar pouze u jednoho vzorku a to vzorku 10 s distancí 0,05 mm. Naměřené hodnoty korespondovaly s hodnotami základního materiálu danými výrobcem, které svědčí o dobré kvalitě svaru. Nejhorší výsledky měl vzorek 11 s nulovou distancí, u něhož došlo k porušení přímo ve svaru horního plechu.

Při kontrole makrostruktury byly změřeny velmi malé šířky svarů a i malé tepelně ovlivněné oblasti díky ochranné atmosféře argonu. Jediný svar, který byl provařen přes oba plechy, měl malé prohloubení povrchu a nebyly na něm vidět žádné vady, byl na vzorku 10. Vzorek 11 s nulovou distancí měl nejhorší parametry. Díky vypařujícímu se zinku měl extrémně prohloubený povrch svaru a malou hloubku provaření.

Na základě tohoto experimentu a příčné zkoušky tahem se zkouškou makrostruktury lze konstatovat, že při svařování přeplátovaných pozinkovaných plechů je vhodné dodržet distanci kolem 0,05 mm pro umožnění úniku zinku a tím docílit dobré kvality svaru. V opačném případě můžeme říci, že při stejném svařování, ale bez jakékoliv mezery mezi plechy, dochází díky vypařování zinku k nekvalitnímu svaru. A při svařování s větší mezerou je problém s překlenutím mezery a svar také nedosahuje požadované kvality.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [6]

1. Air Products. AIR PRODUCTS. *Kovovýroba: Laserové svařování* [online]. © 1996 – 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/industries/Transportation/Aerospace/aerospace-Metal-Fabrication/product-list/laser-welding-aerospace-metal-fabrication.aspx?itemId=846C79F53C28480FB28D0499B8953E67>
2. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000, 122 s. ISBN 80-227-1425-9.
3. Bezpečnost při používání laseru se zaměřením na zdravotnictví. *BOZP: Profi.cz* [online]. Praha: Verlag Dashöfer s.r.o., © 1997 - 2014 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: [http://www.bozpprofi.cz/33/bezpecnost-pri-pouzivani-laseru-se-zamerenim-na-zdravotnictvi-uniqueidgOke4NvrWuOKaQDKuox\\_ZyDs6-r29kev86iZlrc5-dg/?reltype=2](http://www.bozpprofi.cz/33/bezpecnost-pri-pouzivani-laseru-se-zamerenim-na-zdravotnictvi-uniqueidgOke4NvrWuOKaQDKuox_ZyDs6-r29kev86iZlrc5-dg/?reltype=2)
4. Bezpečnost při práci s laserem. *Lasers by Haluška* [online]. 2009 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://lasery.kvalitne.cz/index.php?text=8-bezpecnost-pri-praci-s-laserem>
5. BOC. *Laser Welding: Laserline Technical*. Dostupné z: [http://www.boconline.co.uk/internet.lg.lg.gbr/en/images/laser-welding410\\_39555.pdf](http://www.boconline.co.uk/internet.lg.lg.gbr/en/images/laser-welding410_39555.pdf)
6. *Citace.com: ...citovat je snadné* [online]. Blansko: KMa Webdesign, ©2004-2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.citace.com/index.php>
7. Časový přehled. *Celat: Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. Plzeň, © 2000 – 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/casovy-prehled>
8. Fotografie gravírovaná do masivního dřeva. MALÁ, Miloslava. *MiliMala: Stvoření pro tvoření* [online]. Hošťálková u Vsetína, 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.milimala.cz/milimala/eshop/7-1-Gravirovane-fotografie/0/5/318-Fotografie-gravirovana-do-masivniho-dreva>
9. *Galvanické zinkování*. Olomouc: Olomoucké weby, © 2014, 2 s. Dostupné z: [http://www.festa.cz/admin/upload/file/3\\_%20Galvanick%C3%A9%20zinkov%C3%A1n%C3%AD.pdf](http://www.festa.cz/admin/upload/file/3_%20Galvanick%C3%A9%20zinkov%C3%A1n%C3%AD.pdf)
10. HADYNA, Daniel. Laserové svařování: Základní informace o technologii laserového svařování / řezání. In: *Laserové svařování: Základní informace o technologii laserového svařování / řezání* [online]. Ostrava [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: [http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2011-3\\_Laser.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2011-3_Laser.pdf)
11. HAMERNÍK, J. *Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení* [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
12. HAVRÁNKOVÁ, Ing. Zdeňka. Žárové zinkování ponorem: Základní informace pro uživatele. *Asociace českých a slovenských zinkoven* [online]. © 2011 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.acsz.cz/clanek/zarove-zinkovani-ponorem-zakladni-informace-pro-uzivatele/>
13. CHMELÍČKOVÁ, Hana. UPOL. *Laserové technologie v praxi II.: Bezpečnost práce s lasery*. Olomouc, 2011. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp2-pr1.pdf>

14. Kapilární zkouška- PT linka. *Technotest s.r.o.: nedestruktivní zkoušení materiálů* [online]. Blansko: TECHNTEST s.r.o. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: [http://www.technotest.cz/kapilarni\\_zkouska\\_pt\\_linka](http://www.technotest.cz/kapilarni_zkouska_pt_linka)
15. KAŠPAR, Ing. Jan a Doc. Ing. Stanislav NĚMEČEK, PH.D. Laserové svařování: posouzení vlivu ochranného plynu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. © 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani-posouzeni-vlivu-ochranneho-plynu.html>
16. KUBÍČEK, Ing. Jaroslav a RNDR. Libor MRŇA. *Technické aspekty svařování laserem*. Dostupné z: <http://www.svarak.cz/images/stories/pdf/Svarov%C3%A1ni%20laserem.pdf>
17. KUBÍČEK, J. *Technologie svařování: Studijní opory pro výuku v kurzech 5TE, ETV, ETV-K ÚST, odbor svařování a PÚ* [online]. Vysoké učení technické Brno [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/technologie\\_svarovani\\_\\_5te\\_etv\\_etv-k\\_\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_svarovani__5te_etv_etv-k__kubicek.pdf)
18. KUKLÍK, Ing. Vlastimil. Povrchové úpravy: Nová evropská směrnice pro žárové zinkování. *Povrchové úpravy: Odborný časopis pro průmysl, stavebnictví a řemeslníky* [online]. 2010, roč. 2010, č. 2 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.povrchoveupravy.cz/2010-02-clanek01.html>
19. Laserová technologie: Co je laserová technologie?. LINTECH. *Lintech: Průmyslové značení výrobků a dílů* [online]. Domažlice, © 2009-2011 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/co-je-laserova-technologie>
20. *Laserové a plazmové řezání*. 2008, 13 s. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>
21. Laserové kalení. *Celat: Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. Plzeň, © 2000 – 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-kaleni>
22. Laserové svařování. *Celat: Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. Plzeň, © 2000 – 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-svarovani>
23. Laserové svařování. *LAO: Lasery a optika* [online]. Praha, 2014 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.laserovesvarovani.cz/>
24. LUKÁŠEK, CSC., Ing. Jaromír. *Welding.cz: Svařování v České republice* [online]. 2007 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/svarovani.htm>
25. MARTAN, PH.D, Ing. Jiří. Víte, co máte v laserovém stroji za zdroj?. In: *Automobil Industry* [online]. Brno: infocube s.r.o., © 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://infocube.cz/cs/vite-co-mate-v-laserovem-stroji-za-zdroj/>
26. MRŇA PH.D., RNDr. Libor. *Speciální metody svařování*. Brno, 2013. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_svarovani\\_laserem\\_2013\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_laserem_2013__mrna.pdf)
27. MRŇA PH.D., RNDr. Libor. *Základy laserové techniky*. Brno, 2013. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_zaklady\\_laserove\\_techniky\\_2013\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techniky_2013__mrna.pdf)

28. Nedestruktivní kontrola materiálu: Jak objevit prasklinu na rámu, vidlici či řídítkách. *TBB-Bike* [online]. Brno, ©2004–2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.tbb-bike.cz/articles/nedestruktivni-kontrola-materialu-jak-objevit-prasklinu-na-ramu-vidlici-ci-riditkach/1920>
29. Pozor laserové záření. *Safetyshop.cz* [online]. Havířov: KRIŽAN s.r.o., © 2003 - 2010 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.safetyshop.cz/p333-pozor-laserove-zareni>
30. Praktické porovnání technologií spojování: Laserový svar. *Použití laseru při svařování karoserií* [online]. © 2003 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://dp.bajaja.net/09a.html>
31. První plzeňská galvanovna s.r.o.: Historie. *První plzeňská galvanovna s.r.o.* [online]. Plzeň, © 2008 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.galvanovna.cz/techcz.html>
32. *Příručka žárového zinkování* [online]. 2. aktualizované vydání. Praha, 2007 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: [http://www.zinkoza.sk/prirucka\\_ziaroveho\\_zinkovania.pdf](http://www.zinkoza.sk/prirucka_ziaroveho_zinkovania.pdf)
33. PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-227-1425-9.
34. Radiografie. *GAMMALUX NDT* [online]. Plzeň, ©2013 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.gammalux.cz/metody.php>
35. Realizované zakázky. LCV [online]. Praha [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.lcv.cz/?url=realizovane-zakazky&idk=13>
36. ROUBÍČEK, PH.D., Ing. Martin. Příspěvek do problematiky spojování pozinkovaných plechů. In: *Air Liquide* [online]. ©2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: [http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/pozink\\_plechu49115.pdf](http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/pozink_plechu49115.pdf)
37. Rozdělení laserů. *Celat: Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. Plzeň, © 2000 – 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>
38. Seriál na téma lasery: Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *LAO: Lasery a optika* [online]. Praha, 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
39. Seriál na téma lasery: Základní princip laseru a jejich dělení. *Lao: Lasery a optika* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy s.r.o., 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
40. SCHWARZ, CSC, Doc. Ing. Drahomír. ČESKÝ SVÁŘEČSKÝ ÚSTAV S.R.O. *Technologie svařování: Hodnocení svarových spojů*. Ostrava. Dostupné z: [http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2009-2\\_Hodnocen%C3%AD%20svarov%C3%BDch%20spoj%C5%AF.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2009-2_Hodnocen%C3%AD%20svarov%C3%BDch%20spoj%C5%AF.pdf)
41. Strojírenská technologie – 1. ročník: Vlastnosti materiálů – pružnost, pevnost. *Strojírenství* [online]. Mikel, 2005-2007 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: [http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a\\_pruznost\\_pevnost.php](http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php)
42. Svařování laserovým paprskem a pájení laserem. *Trumpf: Česká republika* [online]. Praha: Trumpf, © 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svareni.html>

43. ŠULC, Jan. *Lasery a jejich aplikace*. 2002, 6 s. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
44. ŠULC, Jan. *Průmyslové aplikace laserových systémů*. 2004, 8 s. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
45. *Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I.: Hodnocení kvality svarového spoje*. Praha, 2013. Dostupné z: [http://hotelfinal.com/doc/pdf/download/u12133\\_\\_fsid\\_\\_cvut\\_\\_cz--podklady--TE1--def\\_kontrola\\_sv.pdf](http://hotelfinal.com/doc/pdf/download/u12133__fsid__cvut__cz--podklady--TE1--def_kontrola_sv.pdf)
46. TRUMPF WERKZEUGMACHINEN GMBH + CO. KG. *Technical information: Laser processing*. Ditzingen, 2007. Dostupné z: [http://iconmachinetool.com/education/Library\\_Laser\\_CO2\\_Laser.pdf](http://iconmachinetool.com/education/Library_Laser_CO2_Laser.pdf)
47. Tým koherentních polovodičových laserů a jejich aplikací: Muzeum oboru koherenční optiky. *ÚPT AV ČR* [online]. Brno [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: [http://www.isibrno.cz/kgs/index.php?menu=hist&prep\\_lang=cz](http://www.isibrno.cz/kgs/index.php?menu=hist&prep_lang=cz)
48. Vizuální kontrola svarů. *Svarinfo.cz: Magazín praktického svařování* [online]. 2005 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008021901>
49. Vybrané vlastnosti vrstvených ocelí. *NOZE-NUZ.COM: nabídka značkových nožů* [online]. Nová Paka [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.noze-nuz.com/recenze/vlastnosti-damasku/vlastnosti-damasku.php>
50. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ. *Nekonvenční metody svařování*. 2009. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-03--52.pdf>
51. Zinkování alkalické. *Bárta a Cihlár: Povrchové technologie* [online]. WEBSTYL.cz, © 2009 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.povrchove-technologie.cz/cz/technologie/zinkovani-alkalicke/>
52. Zinkování. GALVANIZOVNA ZAJÍC. *Galvanizovna Zajíc* [online]. Jilemnice, 2013 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.chromovani-zajic.cz/Zinek.php>
53. Zkoušení kapilární: Fotografie. *Defektoskopie Liberec* [online]. Liberec: CMG Webdesign, © 2009 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.def-liberec.cz/fotogalerie>



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis	Jednotka
A	Tažnost	[%]
$C_{ekv}$	Uhlíkový ekvivalent	[%]
E	Energetický rozdíl mezi hladinami	[J]
$E_1$	Energie na základní hladině	[J]
$E_2$	Energie na excitační hladině	[J]
F	Síla	[N]
$F_m$	Síla na mezi pevnosti v tahu	[N]
L	Vzdálenost zrcadel	[mm]
P	Výkon	[W]
$P_{max}$	Maximální výkon pulzu	[W]
$R_e$	Mez kluzu	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
$S_0$	Průřez vzorku	[mm <sup>2</sup> ]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	[mm]
Z	Kontrakce	[%]
a	Tloušťka zkušebního plechu	[mm]
b	Šířka zkušebního plechu	[mm]
b	Hloubka svaru	[mm]
f	Frekvence pulzu	[Hz]
n	Přirozené číslo	[-]
s	Poloha ohniska	[mm]
s	Svařovaná tloušťka	[mm]
v	Svařovací rychlost	[m·min <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení	[-]
$\lambda$	Vlnová délka	[mm]
$\sigma$	Napětí	[MPa]
$\tau$	Délka pulzu	[s]

## SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK

### Seznam obrázků

Obr. 1 Laserové svařování automobilových dveří.....	9
Obr. 2 První československý plynový laser z r. 1961.....	10
Obr. 3 Schéma laseru.....	11
Obr. 4 Princip stimulované emise.....	11
Obr. 5 Schéma základního principu laseru.....	12
Obr. 6 Elektromagnetické záření.....	14
Obr. 7 Interakce laserového paprsku s povrhem materiálu.....	14
Obr. 8 Schéma CO <sub>2</sub> laseru.....	15
Obr. 9 Schéma Nd-YAG laseru.....	16
Obr. 10 Schéma diskového laseru.....	16
Obr. 11 Schéma vláknového laseru.....	16
Obr. 12 Disk pro výrobu skelných vláken, průměr díry 0,58 mm.....	18
Obr. 13 Laserem gravírovaný obrázek.....	18
Obr. 14 Bezpečnostní tabulka, označení laseru II. třídy a vyšší.....	19
Obr. 15 Kondukční svařování.....	20
Obr. 16 Penetrační svařování.....	20
Obr. 17 Výkon laseru při kontinuálním režimu svařování.....	21
Obr. 18 Graf závislosti svařovací rychlosti a hloubky svaru pro různé výkony.....	21
Obr. 19 Graf závislosti svař. rychlosti a hloubky svaru pro různé ohniskové vzdálenosti.....	22
Obr. 20 Výkon laseru při pulzním režimu svařování.....	22
Obr. 21 Laserová hlava s přívodem ochranného plynu.....	23
Obr. 22 Nejčastější laserové typy svarů.....	24
Obr. 23 Vnější a vnitřní vady svaru při laserovém svařování.....	28
Obr. 24 Vady přeplátovaného spoje u laserového svařování.....	28
Obr. 25 Princip kapilární zkoušky fluorescenční metodou.....	29
Obr. 26 Magnetická prášková zkouška s použitím UV lampy.....	30
Obr. 27 Ultrazvuková zkouška.....	30
Obr. 28 RTG snímek s vnitřními vadami.....	31
Obr. 29 Tahové diagramy.....	32
Obr. 30 Schéma příčné zkoušky ohybem.....	32
Obr. 31 Schéma zkoušky rázem v ohybu.....	33
Obr. 32 Schéma zkoušky hloubením podle Erichsena.....	33
Obr. 33 Podstata zkoušky podle Vickerse.....	34
Obr. 34 Laserový svar zvětšeno 50x.....	34
Obr. 35 Laserový svar zvětšeno 250x.....	34
Obr. 36 Postup při suchém zinkování.....	35
Obr. 37 Postup při mokřím zinkování.....	36
Obr. 38 Kontinuální žárové zinkování plechu.....	36
Obr. 39 Alkalicky zinkované součástky v nekyanidové lázni.....	37
Obr. 40 Pásky zinkované ve slabě kyselé lázni.....	37
Obr. 41 Žárové stříkání zinku.....	38
Obr. 42 Upnutí přeplátovaných pozinkovaných plechů pomocí přípravku.....	40
Obr. 43 Vláknový laser a průmyslový robot.....	42
Obr. 44 Nalepené nerezové pásky.....	43
Obr. 45 Příprava upnutí.....	43
Obr. 46 Trasování dráhy laseru.....	43
Obr. 47 Pohled řezu - upnutí pozinkovaných plechů s distančními pásky.....	44
Obr. 48 Průběh tahové zkoušky.....	44

Obr. 49 Zkušební stroj ZD40 .....	45
Obr. 50 Rozměry vzorku pro zkoušku tahem .....	45
Obr. 51 Vzorek 8 po tahové zkoušce boční pohled .....	46
Obr. 52 Vzorek 8 po tahové zkoušce horní pohled.....	46
Obr. 53 Vzorek 9 po tahové zkoušce boční pohled .....	47
Obr. 54 Vzorek 9 po tahové zkoušce horní pohled.....	47
Obr. 55 Vzorek 10 po tahové zkoušce boční pohled .....	48
Obr. 56 Vzorek 10 po tahové zkoušce horní pohled.....	48
Obr. 57 Vzorek 11 po tahové zkoušce boční pohled .....	49
Obr. 58 Vzorek 11 po tahové zkoušce horní pohled.....	49
Obr. 59 Vzorek 8 s distancí 0,15 mm .....	51
Obr. 60 Vzorek 9 s distancí 0,08 mm .....	51
Obr. 61 Vzorek 10 s distancí 0,05 mm .....	51
Obr. 62 Vzorek 11 s distancí 0,00 mm .....	51

### **Seznam grafů**

Graf 1 Podíl jednotlivých využití laseru v průmyslu .....	17
Graf 2 Tahový diagram vzorků 8 s distancí 0,15 mm .....	46
Graf 3 Tahový diagram vzorků 9 s distancí 0,08 mm .....	47
Graf 4 Tahový diagram vzorků 10 s distancí 0,05 mm .....	48
Graf 5 Tahový diagram vzorků 11 s distancí 0,00 mm .....	49
Graf 6 Tahový diagram všech 4 vzorků.....	50

### **Seznam tabulek**

Tab. 1 Porovnání ochranných plynů .....	23
Tab. 2 Porovnání parametrů různých metod svařování .....	25
Tab. 3 Přehled svařitelnosti základních prvků.....	26
Tab. 4 Mechanické vlastnosti svařovaného materiálu .....	40
Tab. 5 Chemické složení svařovaného materiálu .....	41
Tab. 6 Parametry svařování .....	43
Tab. 7 Naměřené hodnoty vzorků 8 s distancí 0,15 mm .....	46
Tab. 8 Naměřené hodnoty vzorků 9 s distancí 0,08 mm .....	47
Tab. 9 Naměřené hodnoty vzorků 10 s distancí 0,05 mm .....	48
Tab. 10 Naměřené hodnoty vzorků 11 s distancí 0,00 mm .....	49
Tab. 11 Porovnání všech 4 vzorků.....	50
Tab. 12 Odměřené hodnoty šířek TOO a svarů u jednotlivých vzorků.....	52