

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## SIMULACE GEOMETRIE KEY HOLE V ZÁVISLOSTI NA SVAŘOVACÍCH PARAMETRECH PŘI LASEROVÉM PENETRAČNÍM SVAŘOVÁNÍ

SIMULATION OF GEOMETRY OF KEY HOLE DEPENDING ON THE WELDING PARAMETERS IN  
LASER DEEP PENETRATION WELDING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MILOŠ KŘIVAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Miloš Křivan

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:

**Simulace geometrie key hole v závislosti na svařovacích parametrech při laserovém penetračním svařování**

v anglickém jazyce:

**Simulation of geometry of key hole depending on the welding parametrs in laser deep penetration welding**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při laserovém svařování se tvoří dutina - key hole absorbující laserové záření prostřednictvím vícenásobných odrazů. Geometrické rozměry key hole závisí na vlastnostech materiálu, svařovacích parametrech a geometrii zaostření. Tyto závislosti bude nutné podrobněji prozkoumat pomocí simulací na softwarovém modelu key hole v prostředí Matlab. Studium možností optimalizace vazby energie laserového svazku do stěn key hole. Experimentální ověření na reálných materiálech.

Cíle diplomové práce:

Seznámení se s dynamikou tvorby key hole a závislosti její geometrie na svařovacích parametrech a fyzikálních vlastnostech materiálu. Seznámení se s možnostmi stávajícího softwarového modelu a jeho případná modifikace a verifikace.

Seznam odborné literatury:

1. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.l: Laserové technologie, 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. Karban P.: Výpočty a simulace v programech MATLAB a simulink. Computer press, Brno 2006, ISBN 978-80-251-1448-3

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

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

V Brně, dne 14.10.2012

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Bc. KŘIVAN Miloš: Simulace geometrie key hole v závislosti na svařovacích parametrech při laserovém penetračním svařování.

---

Diplomová práce je zaměřena na simulaci vzniku keyhole při laserovém penetračním svařování a na vliv svařovacích parametrů na geometrii keyhole (svaru). V souvislosti s touto problematikou jsou popsány teorie vzniku keyhole. 2D simulační model vytvořený v matematickém softwaru Matlab je verifikován na základě výsledků svařování nelegované konstrukční oceli 1.0122 a korozivzdorné oceli 1.4301. Vliv svařovacích parametrů na geometrii a kvalitu svaru je zkoumán prostřednictvím svarů v nelegované oceli 1.0122.

Klíčová slova: laserové penetrační svařování, keyhole, simulace svařovacího procesu

## **ABSTRACT**

Bc. KŘIVAN Miloš: Simulation of geometry of key hole depending on the welding parameters in laser deep penetration welding

---

The diploma thesis is focused on simulation of keyhole creation in laser deep penetration welding and on the effect of welding parameters on the geometry of keyhole (weld). With reference to this issue theories of keyhole creation are described. 2D simulation model that is created in mathematical software Matlab is verified pursuant welding results of non-alloy constructional steel 1.0122 and stainless steel 1.4301. Effect of welding parameters on the geometry of keyhole and on the quality of weld is investigated through the welds in non-alloy steel 1.0122.

Keywords: laser deep welding, keyhole, simulation of welding process

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KŘIVAN, Miloš. *Simulace geometrie key hole v závislosti na svařovacích parametrech při laserovém penetračním svařování*. Brno, 2013. 55 s., 2 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V ..... dne 24. 5. 2013

.....

Podpis

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu RNDr. Liborovi Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Také bych rád poděkoval pracovníkům Ústavu přístrojové techniky Akademie věd ČR za vyhotovení laserových svarů. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat členům své rodiny a přítelkyni, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

Tato práce vznikla za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017).

## OBSAH

**Zadání**

**Abstrakt**

**Bibliografická citace**

**Čestné prohlášení**

**Poděkování**

**Obsah**

<b>ÚVOD</b> .....	9
<b>1 LASER</b> .....	10
1.1 Fyzikální podstata laseru .....	10
1.1.1 CO <sub>2</sub> laser.....	13
1.1.2 Nd:Yag laser.....	14
1.1.3 Diodový laser .....	15
1.1.4 Diskový laser.....	16
1.1.5 Vláknový laser.....	16
1.2 Vlastnosti laserového záření.....	18
1.3 Interakce laserové záření s materiálem.....	20
<b>2 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ</b> .....	22
2.1 Laserové indukční svařování.....	22
2.2 Laserové penetrační svařování.....	23
2.2.1 Svařovací parametry při kontinuálním režimu.....	24
2.2.2 Svařovací parametry při pulzním režimu .....	28
2.3 Remote welding .....	30
2.4 Návrh a příprava svarového spoje.....	30
<b>3 KEYHOLE</b> .....	32
3.1 Fyzikální podstata keyhole.....	32
3.2 Matematický model popisující vznik keyhole .....	33
3.3 Stabilita keyhole.....	36
3.4 Dynamika keyhole .....	38
<b>4 EXPERIMENT</b> .....	41
4.1 Materiálový model.....	41
4.2 Postup svařování a určení vlivu svařovacích parametrů .....	43
<b>5 SIMULACE</b> .....	48
5.1 Matematický model a algoritmus výpočtu .....	49
5.2 Verifikace simulace .....	50
5.3 Zhodnocení simulačního modelu.....	54
<b>6 ZÁVĚR</b> .....	56

**Seznam literatury**

**Seznam symbolů a zkratk**

**Seznam obrázků**

**Seznam tabulek**

**Seznam příloh**

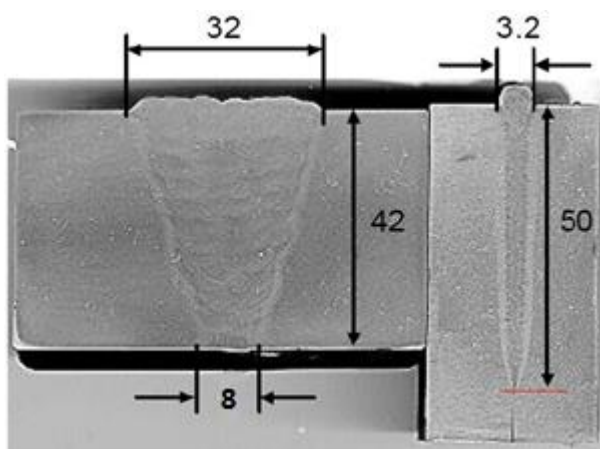


## ÚVOD [28], [29], [40]

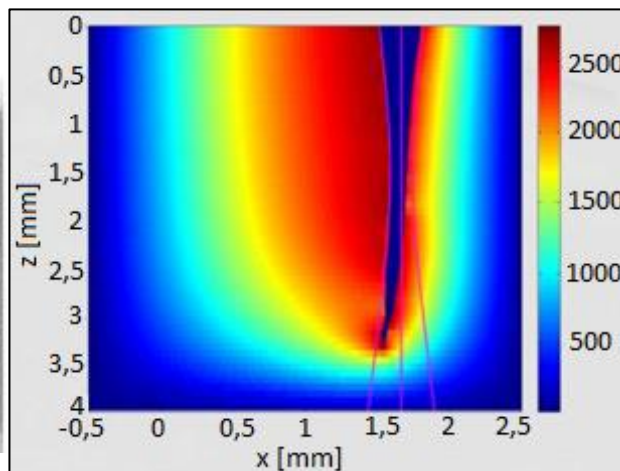
Laserové svařování je jedna z nejmodernějších technologií spojování materiálů. Spoje zhotovené laserem v mnoha aspektech překonávají svary, které byly vytvořeny běžnou technologií (obr. 1). Největší přednosti této technologie jsou úzké a hluboké svary s malou tepelně ovlivněnou oblastí a malými deformacemi. Toho je navíc dosaženo při vysokých rychlostech svařování, které zajišťují vysokou produktivitu výroby. Laserové svařovací pracoviště musí být vždy robotizováno, a proto se využívá především ve velkosériové výrobě jako je automobilový, letecký, lodní nebo drážní průmysl. O růstu uplatnění této technologie svědčí to, že při výrobě VW Golf čtvrté generace se laser použil na 6 m svarů a při výrobě páté generace to bylo již 72 metrů.

I přesto, že laserové svařování je čím dál více využívaná technologie, existuje stále mnoho otázek týkajících se samotného principu, které nebyly dosud zodpovězeny. Experimentálně lze tyto otázky vysvětlit jen stěží, protože se jedná o velice dynamický proces a prozatím neexistuje žádná účinná metoda, která by umožňovala pozorování a vysvětlení dějů uskutečňujících se uvnitř keyhole. Proto jsou velice důležité simulace, kterými lze potvrdit či vyvrátit předpokládané principy a teorie.

Tato diplomová práce se kromě obecného rozboru technologie laserového svařování zabývá vlastnostmi laserového světla a nejpravděpodobnějšími principy a teoriemi vzniku keyhole, které jsou uplatňovány v různých simulačních modelech. V experimentální části byly provedeny průvary v nelegované konstrukční oceli 1.0122 a v korozivzdorné austenitické oceli X5CrNi18-10. Na základě výsledků z experimentu je popsán vliv svařovacích parametrů na hloubku a kvalitu svaru a zároveň byl verifikován simulační model, který byl vytvořen v matematickém softwaru Matlab (obr. 2).



**Obr. 1** Porovnání svaru zhotoveného laserem a klasickou obloukovou metodou [28]



**Obr. 2** Simulace laserového svařování

## 1 LASER [4], [20], [37]

Název *LASER* je akronym pro anglické spojení slov „*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*“, které popisuje základní princip laseru a v překladu znamená „zesílení světla stimulovanou emisí záření“.

Základy teorie vzniku laserového světla byly položeny Albertem Einsteinem v roce 1916, když popsal spontánní a stimulovanou emisi. Na něj pak navázalo mnoho vědců, jejichž výzkumy umožnily americkému fyziku T. H. Maimanovi zkonstruovat v roce 1960 první funkční laser. Jednalo se o rubínový laser (obr. 3), který ovšem mohl pracovat pouze v pulzním režimu. První kontinuální laser sestrojili fyzici N. G. Basov, A. M. Prochorov a Ch. H. Townes, kteří přidáním pomocné energetické hladiny dokázali vytvořit populační inverzi a tím zajistili nepřetržitou emisi laserového záření.

V roce 1976 byl poprvé laser využíván v sériové výrobě. Automobilová firma General Motors používala laser ke svařování ventilů.



Obr. 3 Rubínový laser [20]

### 1.1 Fyzikální podstata laseru [4], [19], [33], [41]

Samotná podstata laseru je založena na faktu, že každý atom nebo molekula se nachází v určitém energetickém stavu a jeho energii lze zvýšit nebo snížit pouze o určité kvantum energie. Velikost tohoto kvanta energie je určena rozdílem mezi energetickými hladinami, ve kterých se atom nebo molekula může nacházet, a odpovídá energii vyzářeného nebo absorbovaného fotonu. To je popsáno Bohrovým vztahem:

$$E_2 - E_1 = h_p \cdot \nu_f \quad (1.1)$$

kde  $E_1$  je energie výchozího kvantového stavu atomu [J],

$E_2$  – energie koncového kvantového stavu atomu [J],

$h_p$  – Planckova konstanta [J·s] ( $h_p=6,62606896 \cdot 10^{-34}$  J·s),

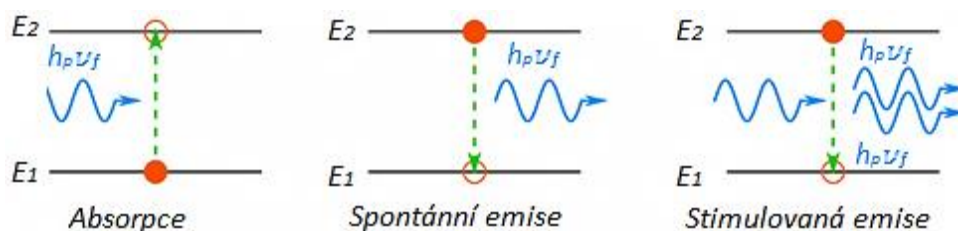
$\nu_f$  – frekvence fotonu [ $s^{-1}$ ].

Základní a nejdůležitější částí každého laseru je aktivní prostředí, jehož atomy jsou pomocí různé energie (optická, chemická, elektrická, tepelná) vybuzeny do excitovaného stavu. Ty potom při svém přechodu zpět do základního stavu vyzařují fotony.

Obecně jsou možné tři základní interakce záření s aktivním prostředím (obr. 4):

- **absorpce** = přechod atomu z energetické hladiny  $E_1$  na energetickou hladinu  $E_2$  umožněný elektromagnetickým zářením o frekvenci  $\nu_f$ . Toto záření předá atomu energii  $h_p \cdot \nu_f$  potřebnou k přechodu. Na metastabilní energetické hladině  $E_2$  může atom setrvat pouze určitou dobu a pak nastává buď spontánní emise, nebo stimulovaná emise.
- **spontánní emise** = samovolný přechod atomu z energetické hladiny  $E_2$  na hladinu  $E_1$ , při kterém atom sníží svou energii vyzářením energie  $h_p \cdot \nu_f$  ve formě fotonu (elektromagnetického záření).
- **stimulovaná emise** = přechod atomu z energetické hladiny  $E_2$  na hladinu  $E_1$ , který je vyvolaný elektromagnetickým zářením o frekvenci  $\nu_f$ . Atom opět snižuje svou energii vyzářením fotonu (elektromagnetického záření) o energii

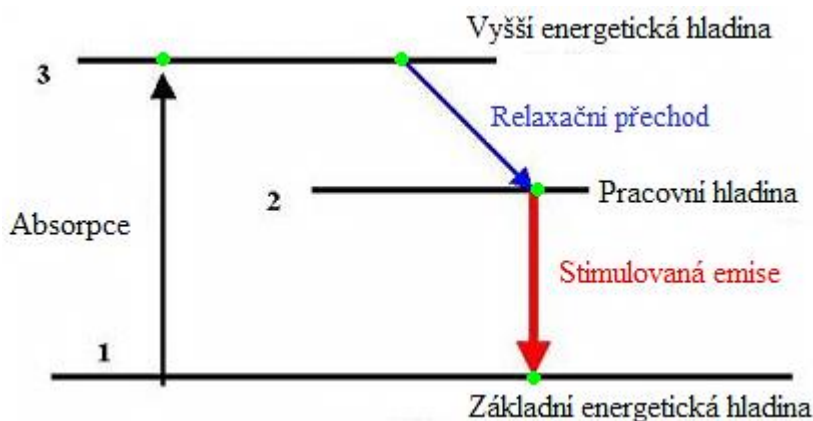
$h_p \cdot \nu_f$ . Vzniklé záření má stejný směr a je ve fázi se zářením budícím. Dochází k jejich skládání a zesílení původního elektromagnetického záření.



Obr. 4 Interakce záření s aktivním prostředím [20]

K zajištění kontinuální stimulované emise je nutné, aby počet atomů na vyšších energetických hladinách byl větší než na nižších energetických hladinách. Tomuto porušení rovnováhy se říká **populační inverze** a nejjednodušeji se jí dosáhne „vytvořením“ třetí, tzv. pracovní hladiny (obr. 5).

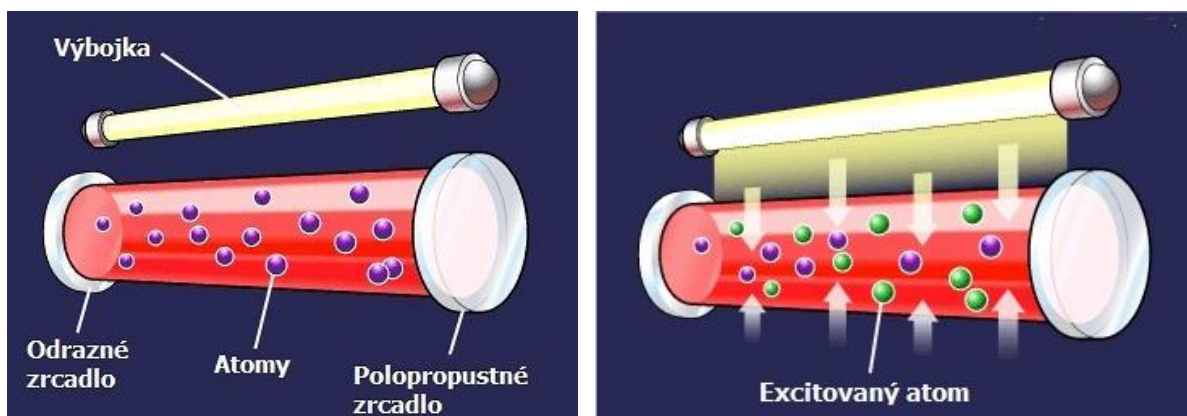
Tento systém je nazýván tříhladinový a existují i systémy vícehladinové. Přechod atomů z vyšší energetické hladiny na pracovní je vyvolán jejich srážkami a probíhá bez vyzáření fotonu. Na této energetické úrovni se atomy udrží poměrně dlouho, takže jejich počet narůstá a poté atom, který při přechodu z vyšší energetické hladiny vyzáří foton (spontánní emise), vyvolá stimulovanou emisi atomů na hladině pracovní.



Obr. 5 Tříhladinový systém [33]

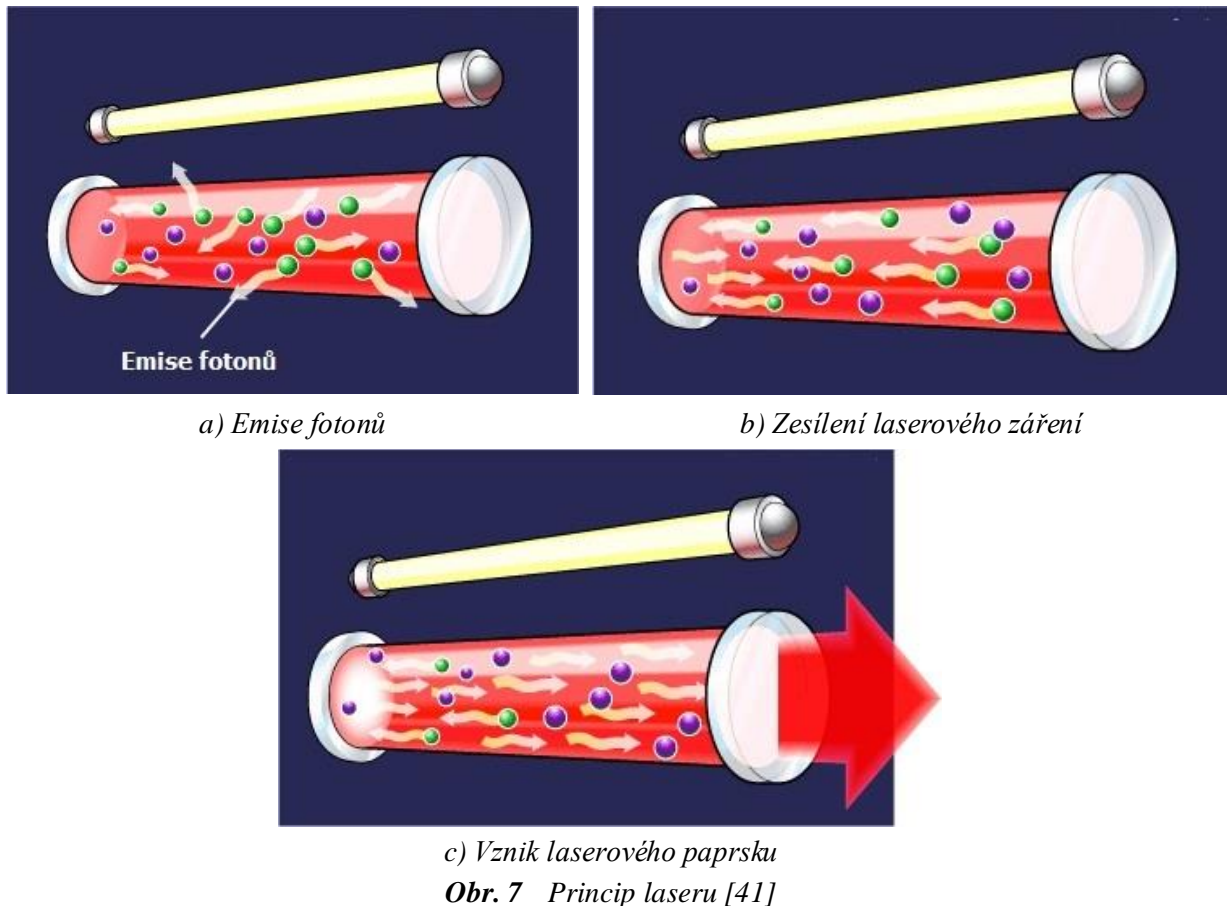
Vznik laserového paprsku je zjednodušeně znázorněn na obr. 6. Aktivní prostředí se nachází

v rezonátoru, který je tvořený odrazným a polopropustným zrcadlem (obr. 6). K vybuzení atomů na vyšší energetickou hladinu se používá zdroj elektromagnetického záření (např. výbojka), který předá atomu potřebnou energii. Vzniká inverzní populace a poté dochází ke spontánní emisi, která nastartuje stimulovanou emisi záření (obr. 7 a).



Obr. 6 Konstrukce rezonátoru (vlevo) a čerpání aktivního prostředí (vpravo)[41]

K zesílení záření dojde díky zpětnému odrazu záření od odrazného nebo od polopropustného zrcadla rezonátoru a vyvolá další stimulovanou emisi fotonů (obr. 7 b). Tím vzniká laserové záření (obr. 7 c).



## 1.1 Průmyslové lasery [4], [20], [26]

Lasery lze obecně klasifikovat do několika kategorií podle různých kritérií. Nejzákladnější dělení průmyslových laserů jsou následující:

- podle použitého aktivního prostředí:
  - **plynové** (např. CO<sub>2</sub> laser),
  - **pevnolátkové** (např. Nd:Yag, Yb:Yag laser, vláknový laser),
  - **diodové**,
  - **kapalinové**.
- podle typu buzení:
  - elektrický výboj,
  - optické čerpání,
  - chemická reakce.
- podle režimu práce:
  - kontinuální,
  - pulzní (velmi krátké pulsy s vysokou frekvencí opakování),
  - impulsní (pulsy s vysokou energií s nízkou frekvencí opakování).

Základní části všech průmyslových laserů jsou optický rezonátor s aktivním prostředím, čerpací zařízení, vedení svazku, chladicí systém, svařovací robot se svařovací hlavou a řídicí počítač.

Optické rezonátory mohou být rovinné s paralelními zrcadly, konfokální, polokoncentrické nebo prstencové. Vzdálenost mezi zrcadly musí být taková, aby v rezonátoru vzniklo stojaté vlnění, a proto se délka rezonátoru určuje především v závislosti na vlnové délce vznikajícího záření. Paprsek vystupující z rezonátoru je upravován v tzv. expanderu, který je tvořen systémem čoček a clon. Jeho úkolem je snížit divergenci záření, čímž se zvýší kvalita svazku a zmenší se jeho průměr. Jednotlivé komponenty se však zahřívají a dochází ke značným energetickým ztrátám. Upravený paprsek je veden do svařovací hlavy pomocí systému zrcadel (CO<sub>2</sub> laser) nebo pomocí optického kabelu (Nd:Yag, vláknový laser). Optické prvky systému jsou nejčastěji vyrobeny z dielektrického skla nebo z leštěných kovů, které nepohlcují dané laserové záření. Jak již bylo zmíněno výše při modifikaci a vedení paprsku dochází k ohřevu jednotlivých optických komponentů a tím se snižuje jejich životnost. Proto součástí každého vysokovýkonného laseru je chladicí systém. Nejčastěji se používá proudící demineralizovaná voda. Svařovací robot a ostatní manipulátory jsou ovládány řídicím počítačem. Jednoduché pohyby se do řídicího programu zapisují v G-kódu, při složitějších pohybech lze využít 3D CAD. V závislosti na technologii, pro kterou je laser určen, je robot vybaven svařovací, řezací nebo kalící hlavou.

### 1.1.1 CO<sub>2</sub> laser [25], [26], [36]

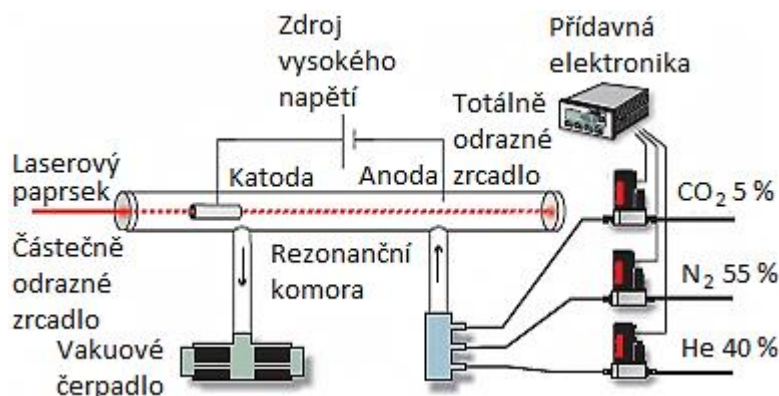
CO<sub>2</sub> laser se řadí mezi plynové lasery a jeho aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů CO<sub>2</sub>, He a N<sub>2</sub>. Optický rezonátor může být buď vzduchotěsně uzavřený, nebo průtočný s axiální (obr. 8) nebo příčnou excitací aktivního prostředí. Buzení se provádí radiofrekvenčně nebo elektrickým výbojem. Vznikající záření má vlnovou délku 10,6 μm a do svařovací hlavy musí být vedeno pomocí systému zrcadel. Tento systém je z hlediska konstrukce velice složitý a vyžaduje častou kalibraci a údržbu. V průmyslu se používají 4 typy CO<sub>2</sub> laseru.

**CO<sub>2</sub> laser s pomalým axiálním prouděním** je nejstarší typ, který k buzení využívá střídavý nebo stejnosměrný elektrický výboj totožného směru jako má výstupní laserové záření. Jejich výkon je do 1 kW a mohou pracovat v pulzním nebo kontinuálním režimu.

**CO<sub>2</sub> laser s rychlým axiálním prouděním** je charakteristický tím, že

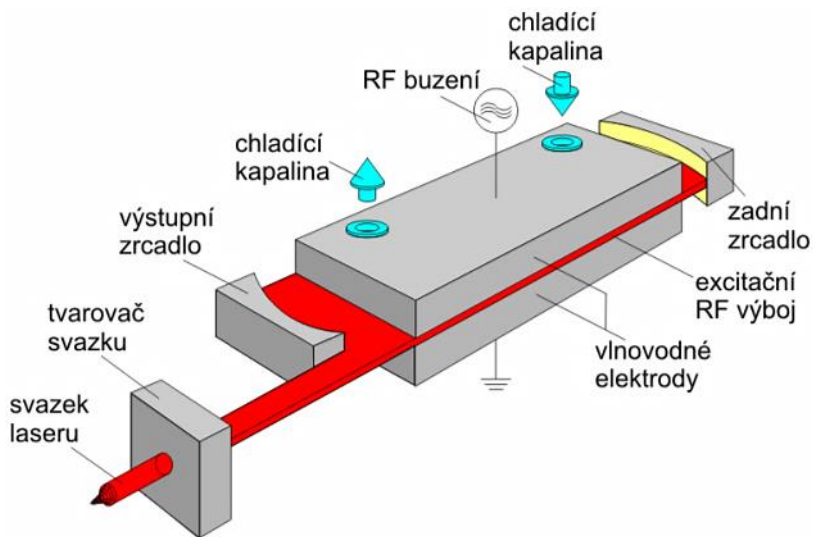
chlazení a regenerace aktivního prostředí probíhá mimo optický rezonátor. K buzení se dříve využíval stejnosměrný elektrický výboj, dnes se však používá radiofrekvenční způsob, který zajišťuje vyšší stabilitu paprsku. Výkon těchto laserů se pohybuje v rozmezí od 500 W do 5000 W a jejich pracovní režim může být kontinuální i pulzní. Využívají se především k řezání.

**CO<sub>2</sub> laser s příčným prouděním** je charakteristický různým směrem pohybu laserového paprsku, plynu i elektrického výboje. Buzení stejnosměrným elektrickým výbojem je špatně ovladatelné, a proto tento laser nemůže pracovat v pulzním režimu. Při použití radiofrekvenční excitace lze buzení ovládat lépe. Výkon příčných laserů se pohybuje od 1 kW do 20 kW. Modová struktura laserového záření není vhodná pro řezání, a proto se používají především pro svařování a tepelné zpracování materiálu.



Obr. 8 Zjednodušené schéma axiálního CO<sub>2</sub> laseru [36]

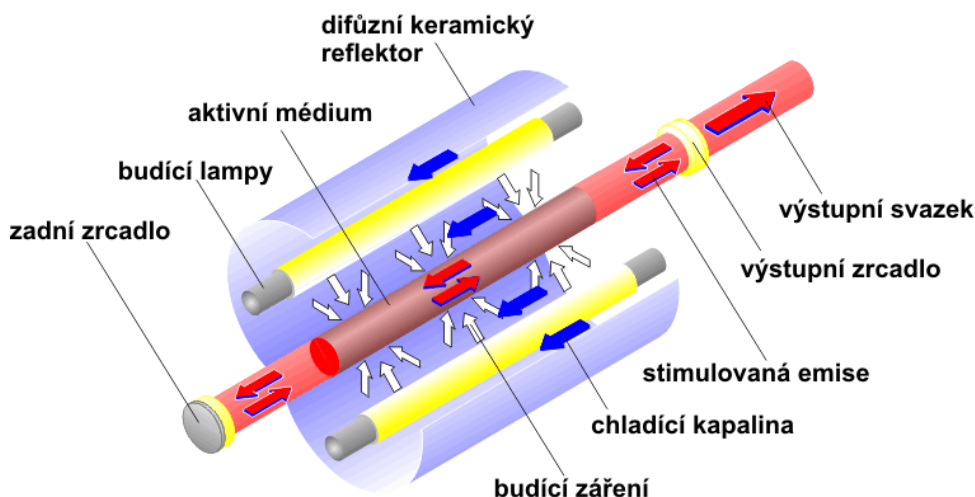
**CO<sub>2</sub> SLAB laser** je nejmodernější typ CO<sub>2</sub> laseru, který se od předchozích generací liší tvarem optického rezonátoru. Díky tomu lze při menších rozměrech laserového zdroje dosáhnout vyššího výkonu než u konvenčních laserů. Konstrukce takového rezonátoru je na obr. 9. Buzení se provádí dvěma rovnoběžnými vlnovými elektrodami, které mohou být součástí optického rezonátoru. Produkují tzv. SLAB (v překladu deska) budící radiofrekvenční vlnění a zároveň slouží k difuznímu chlazení aktivního prostředí. Výstupní laserový paprsek dosahuje vysoké kvality a lze ho fokusovat do ohniska čtyřikrát menšího než u jakéhokoliv laseru. Díky tomu se dosahuje vysoké hustoty výkonu a menší tepelně ovlivněné oblasti. Při pulzním pracovním režimu mohou vznikat vysokofrekvenční pulzy se čtvercovou vlnou, čímž se na materiál působí třikrát vyšším výkonem než při kontinuálním pracovním režimu. Další výhodou těchto laserů je vysoká spolehlivost, dlouhá životnost a nízké provozní náklady.



Obr. 9 CO<sub>2</sub> SLAB laser [26]

### 1.1.2 Nd:Yag laser [25], [26]

Nd:Yag laser je nejstarší pevnolátkový laser používaný v průmyslu. Jeho aktivní prostředí je tvořeno krystalem ytřium aluminium granátů, který je dopovaný ionty neodymu (Nd). Krystal má tvar tyčinky. Jejich velkou výhodou oproti CO<sub>2</sub> laseru je fakt, že generované záření s vlnovou délkou 1,06  $\mu\text{m}$  lze vést do svařovací hlavy pomocí optického vlákna. Optické vlákno je pružné, bezúdržbové a zjednodušuje přenos paprsku.



Obr. 10 Nd:Yag laser buzený výbojkami [26]

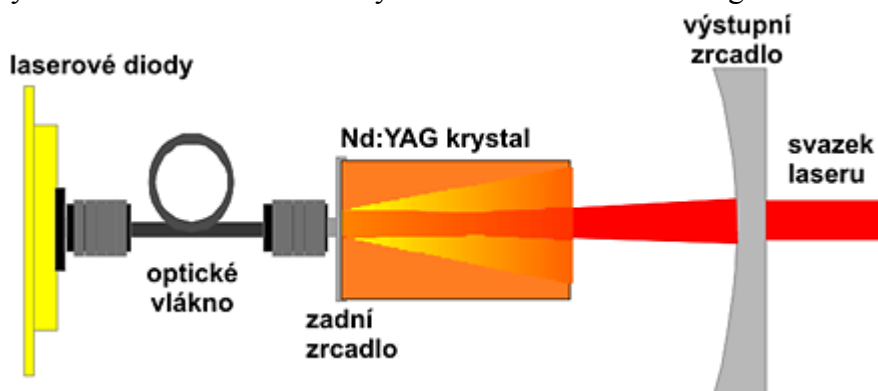
První generace Nd:Yag laseru využívá k buzení kryptonové výbojky (obr. 10) a označují se LPSS (Lamp Pumped Solid State) Nd:Yag lasery. Tyto lasery pracují především v pulzním pracovním režimu, při kterém se dosahuje vysoké energie pulzu (100 J/ms). Toho se využívá při svařování a vrtání ušlechtilých ocelí a slitin, kde je vyžadován hluboký průvar a malá

tepelně ovlivněná oblast. Velkou nevýhodou LPSS Nd:Yag laseru jsou značné energetické ztráty při přeměně elektrické energie na světelnou, kdy se velká část energie výbojky změní na teplo. Při nedostatečném chlazení se krystal může zahřát až na takovou teplotu, kdy dojde k jeho zakřivení, začne se chovat jako čočka a zhoršuje se mod záření. Proto jsou zde vysoké nároky na chlazení. Další nevýhody jsou vysoké provozní náklady a krátká životnost výbojek.

Na základě nevýhod výbojek vznikly Nd:Yag lasery buzené laserovými diodami. Označují se DPSS (Diode Pumped Solid State) Nd:Yag lasery a proti první generaci mají vyšší účinnost přeměny elektrické energie na světelnou. Díky tomu jsou nižší nároky na chlazení a životnost laserových diod je desetkrát vyšší než u kryptonových výbojek. Podle umístění laserových diod rozlišujeme DPSS Nd:Yag lasery se zadním a bočním buzením.

Při použití zadního buzení jsou laserové diody umístěny výhodně mimo optický rezonátor (obr. 11) a budící záření je ke krystalu přiváděno pomocí optického vlákna. Vznikající záření je proti záření generovanému při bočním buzení kvalitnější, ale dosahuje menších výkonů.

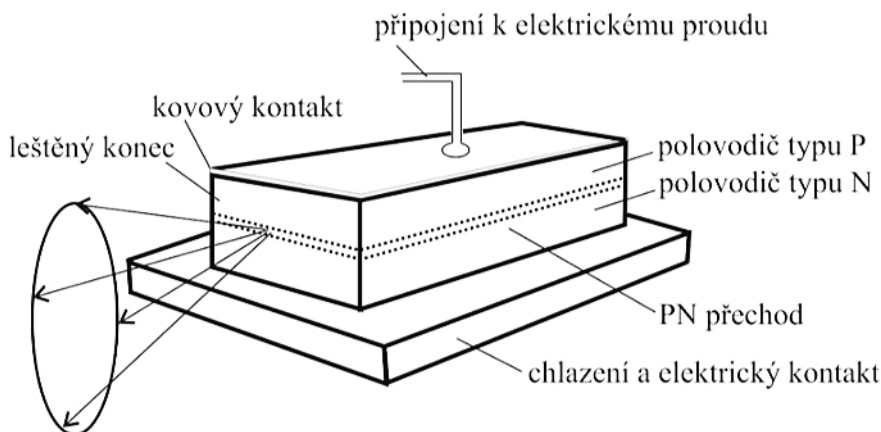
DPSS Nd:Yag lasery pracují v tzv. Q-spínacím režimu, při kterém vznikají velmi krátké pulzy (ns) s výkonem do 100 W. Hlavní využití nachází ve značení a gravírování materiálů.



*Obr. 11 DPSS Nd:Yag laser se zadním buzením [26]*

### 1.1.3 Diodový laser [20], [38]

Diodový laser (laserová dioda) má aktivní prostředí tvořené polovodičem ve tvaru hranolu, který je buzený elektrickým proudem. Jeho hrany musí být kolmé na PN přechod, aby vznikl Fabry-Perotův rezonátor. Nejčastěji se používá GaAs polovodič, z jehož PN přechodu je emitováno záření o vlnové délce 808 nm. Schéma diodového laseru je na obr. 12.



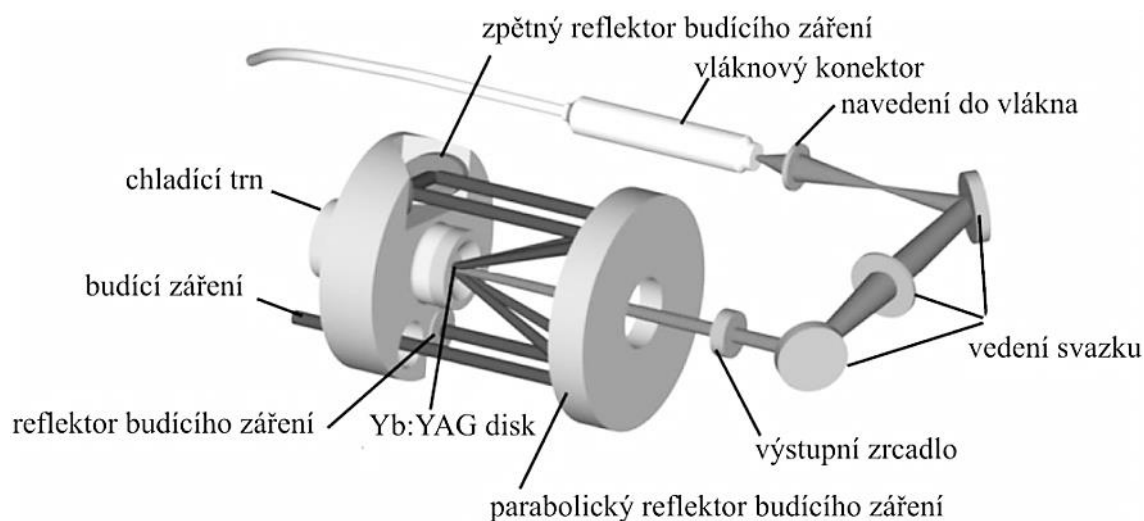
*Obr. 12 Schéma diodového laseru [38]*

Laserové diody se spojují do řad nebo bloků, čímž se nastavuje celkový výstupní výkon. Generovaný laserový svazek má velkou divergenci, která je navíc různá v ose  $x$  a  $y$ .

Ke zlepšení jeho kvality se používají válcové kolimační mikročočky, ale i tak paprsek zdaleka nedosahuje kvality ostatních laserů. Navíc se zvyšujícím se výkonem se jakost svazku zhoršuje. Při výkonu 2 kW dosahuje kvality  $BPP=20$  až  $30 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ , při výkonu 15 kW už je  $BPP=100 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ . Z toho důvodu se laserové diody využívají především tam, kde není na závalu větší průřez paprsku v ohnisku nebo jeho obdélníkový tvar. Proto jsou používány k buzení aktivního prostředí, svařování plastů nebo povrchové úpravy materiálu (povrchové kalení, gravírování).

#### 1.1.4 Diskový laser [9], [20], [26], [38]

Diskový laser má aktivní prostředí tvořené krystalem yttrium aluminium granátu, který je dopovaný ionty ytterbia (Yb:YAG laser). Krystal má tvar válce o průměru do 10 mm, výšce 0,25 mm a generuje záření o vlnové délce  $1,03 \mu\text{m}$ . Oproti Nd:Yag laseru s aktivním prostředím ve tvaru tyčinky má disk výhodu v téměř žádné tepelné deformaci, rovném teplotním profilu a vyšší účinnosti čerpání. Konstrukce laseru je na obr. 13.



*Obr. 13 Schéma diskového laseru [38]*

K chlazení disku aktivního prostředí se používá chladič trn, na kterém je tento disk nasazen. Buzení se provádí pomocí laserových diod, jejichž záření je do rezonátoru přiváděno pomocí optického vlákna. Budícím zářením lze přímo řídit výkon laserového svazku. Další možností řízení výkonu je poskládání několika disků do optické série, čímž dojde ke zvýšení výkonu při zachování kvality svazku. V sérii mohou být zapojeny maximálně čtyři disky o výkonu 4 kW. Maximální dosažitelný výkon je tedy 16 kW. K přenosu výstupního laserového záření se používá optický kabel.

Vývojem diskových laserů se zabývá především německá firma Trumpf, jejíž lasery se používají k vysokorychlostnímu řezání tenkých plechů, klasickému laserovému svařování, hybridnímu svařování a laserovému skenerovému svařování.

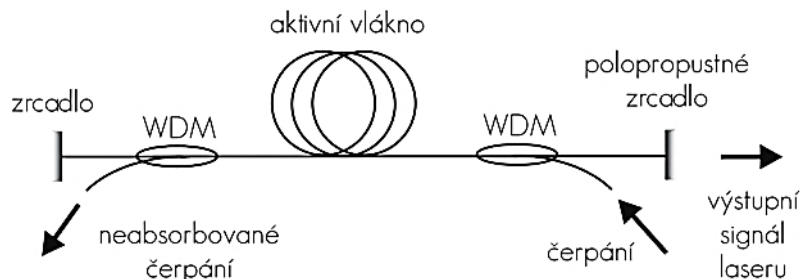
#### 1.1.5 Vlákenný laser [20], [26], [31]

Vlákenný laser je pevnolátkový laser, jehož optický rezonátor je tvořený optickým vláknem s jádrem, které může být dopováno ionty erbia (Er), ytterbia (Yb) nebo thulia (Tm). Při použití erbia má generované záření vlnovou délku  $1,54 \mu\text{m}$  až  $1,62 \mu\text{m}$ , při použití ytterbia  $1,06 \mu\text{m}$  až  $1,12 \mu\text{m}$  a při použití thulia je to  $1,72 \mu\text{m}$  až  $2,00 \mu\text{m}$ . Průměr optického vlákna je několik mikrometrů a jeho délka několik metrů. K buzení se používají laserové diody generující záření o vlnové délce  $0,98 \mu\text{m}$  nebo  $1,48 \mu\text{m}$ .



Optický rezonátor kontinuálního vláknového laseru je zobrazen na obr. 14. Budící záření je vedeno do aktivního vlákna přes vlnově selektivní vazební člen (WDM – Wavelength Division Multiplexer). Druhý WDM člen naopak odvádí neabsorbované záření. Optický rezonátor je tvořen buď zrcadly, nebo navařenými vláknovými braggsovými mřížkami. To jsou periodické mřížky, které propustí pouze záření, jehož vlnová délka není v rezonanci s periodou mřížky.

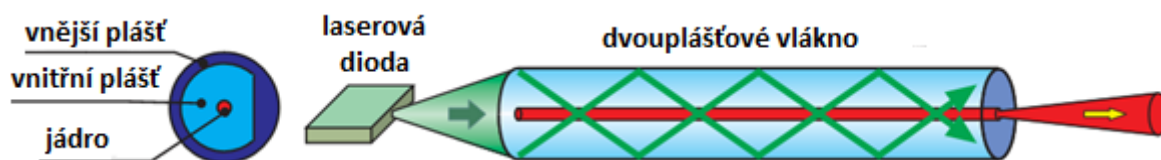
Optické rezonátory pulzních vláknových laserů obsahují navíc prvek, který s určitou frekvencí propouští záření. K tomu se používá optická uzavěrka laserové dutiny, která je řízena externím frekvenčním generátorem. Další možností je použití polarizačního optického izolátoru s natáčením polarizace v rezonátoru.



Obr. 14 Optický rezonátor [31]

Vysokých výkonů vláknových laserů se dosahuje čerpáním aktivního prostředí přes plášť. To umožňuje přeměnit vysoce divergentní budící záření z mnohamodových diod do kvalitního jednomodového výstupního laserového záření s malou rozbíhavostí. Čerpání se provádí buď z boku, kde je budící záření vedeno do vlákna přes určitý difrakční prvek (např. hranol nebo V-zářez ve vlákně), nebo zepředu optického vlákna ve směru jeho osy.

V dnešní době se používají dvouplášťová vlákna zobrazená na obr. 15. Ve středu vlákna je dopované jádro, které obklopeno vnitřním pláštěm s nižším indexem lomu než má jádro. Okolo vnitřního pláště je vnější plášť taktéž s nižším indexem lomu. Vnitřní plášť tedy funguje jako vlnovod pro budící záření, které neustále prochází přes jádro a způsobuje excitaci aktivního prostředí.



Obr. 15 Dvouplášťové optické vlákno [31]

Velice důležitý je tvar průřezu vnitřního pláště, který ovlivňuje absorpci budícího záření podél vlákna. Musí být takový, aby zaručoval tzv. chaotické šíření budícího záření, čímž se zajistí jeho rovnoměrný útlum a maximální absorpce podél celého vlákna. Příklad vhodného tvaru vnitřního pláště je na obr. 15. Kruhový průřez je nejméně vhodný tvar.

Malé rozměry laserového zařízení jsou umožněny menšími požadavky na chlazení, protože je zde vysoká účinnost čerpání (70% až 80%) a teplo se rozloží podél celého vlákna.

Z tabulky 1 vyplývá, že vláknové lasery v mnoha aspektech překonávají ostatní lasery.

Tab. 1 Porovnání svařovacích laserů [9], [20], [26]

Typ laseru	Celková účinnost [%]	Výstupní výkon [kW]	BPP (pro 5 kW) [mm·mrad]	Životnost diod [h]	Provozní náklady [Kč/h]	Údržba
CO <sub>2</sub>	10	20	6	-	520	častá
Nd:Yag	7	6	25	10000	825	častá
Diskový	15	16	2 až 8	25000	760	častá
Vláknový	35	80	<2,5	100000	460	žádná

## 1.2 Vlastnosti laserového záření [1], [3], [4], [11], [13], [15], [20], [21], [35], [40]

Jedinečnost laserového záření a jeho široké uplatnění je dáno jeho vlastnostmi. Oproti běžnému záření je monochromatické, koherentní a směrové (obr. 16).

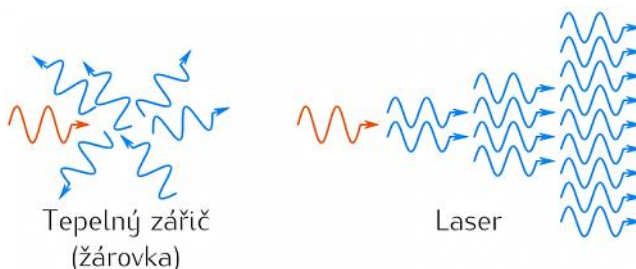
**Monochromaticnost** = všechno emitované záření (fotony) má téměř totožnou vlnovou délku (frekvenci). Díky tomu je laserové světlo jednobarevné.

**Koherence** = všechny fotony se pohybují stejným směrem a jejich fázový rozdíl se s časem nemění.

**Směrovost** = laserové záření má velmi malou rozbíhavost (divergenci). Obecně je směrovost definována prostorovým úhlem. V případě laserového paprsku má prostorový úhel tvar kužele, a proto se směrovost definuje rovinným úhlem divergence (obr. 21):

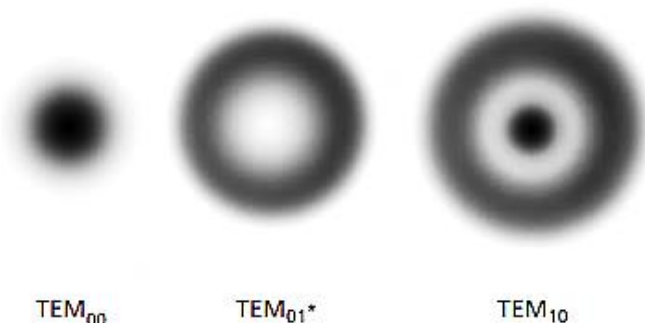
$$\theta = \frac{M^2 \cdot \lambda}{\pi \cdot w_0}, \quad (1.2)$$

kde  $\theta$  – polovina úhlu divergence paprsku [mrad],  
 $M^2$  – faktor modu paprsku [-] (pro TEM<sub>00</sub> je  $M^2 = 1$ ),  
 $\lambda$  – vlnová délka záření [mm],  
 $w_0$  – poloměr pasu paprsku v ohnisku [mm].



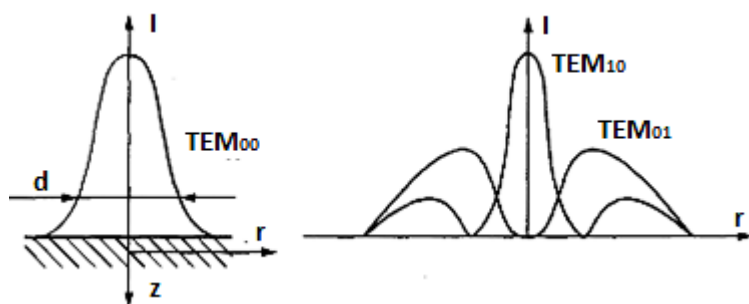
Obr. 16 Porovnání záření žárovky a laseru [20]

**Modová struktura** = charakterizuje rozložení hustoty energie v příčném průřezu laserového paprsku, které je ovlivňováno geometrickou konstrukcí rezonátoru. Jedná se především o vzdálenost zrcadel, jejich průměr a poloměr zakřivení. Modová struktura je popisována tzv. TEM (Transverse Electromagnetic Mode) modem, který popisuje frekvenci elektromagnetického pole v rezonátoru. Udává se buď v kartézských souřadnicích (TEM<sub>mn</sub>), anebo válcových souřadnicích (TEM<sub>pl</sub>). Indexy  $m, n$  určují počet minim v průřezu paprsku ve vertikálním a horizontálním směru, indexy  $p, l$  v radiálním a úhlovém směru. Příčné průřezy paprsků jsou zobrazeny na obr. 17.



Obr. 17 Příčné řezy paprskem TEM mody [11]

indexy  $p, l$  v radiálním a úhlovém směru. Příčné průřezy paprsků jsou zobrazeny na obr. 17.



Obr. 18 Hustota energie  $I$  pro některé druhy módů [40]

V průmyslu se nejčastěji používají lasery s modem TEM<sub>00</sub>, který má Gaussovo rozložení hustoty energie (obr. 18). Při Gaussově rozložení má paprsek malou divergenci, lze ho fokusovat do malého průměru a tím dosáhnout vysoké hustoty energie.

Intenzitu (hustotu energie) laserového záření lze

spočítat z následujícího vzorce:

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot r_z^2}{w_0^2}\right), \quad (1.3)$$

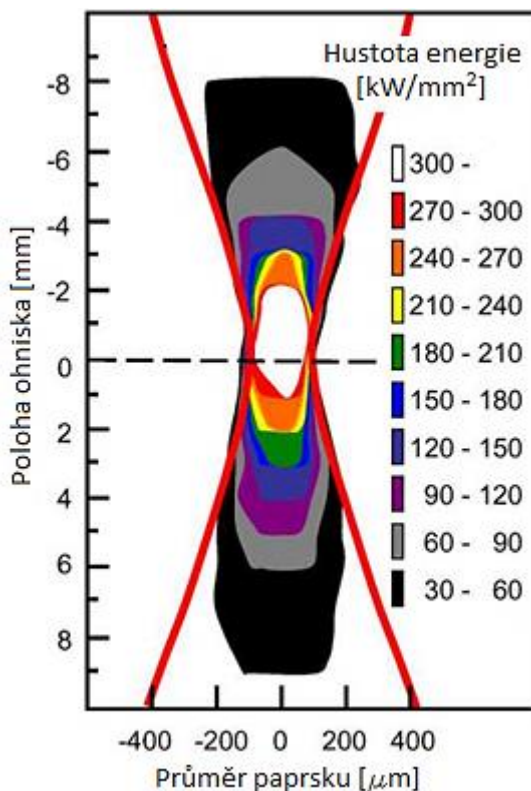
kde  $I$  je intenzita záření [ $\text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$ ],  
 $I_0$  – intenzita záření v ohnisku [ $\text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$ ],  
 $r_z$  – radiální vzdálenost od osy paprsku [mm].

Poloměr pasu paprsku  $w_0$  odpovídá poloměru, na němž se intenzita zmenší na hodnotu  $I_0/e^2$ . Intenzita ve středu paprsku se určí z výkonu paprsku:

$$I_0 = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot w_0^2}, \quad (1.4)$$

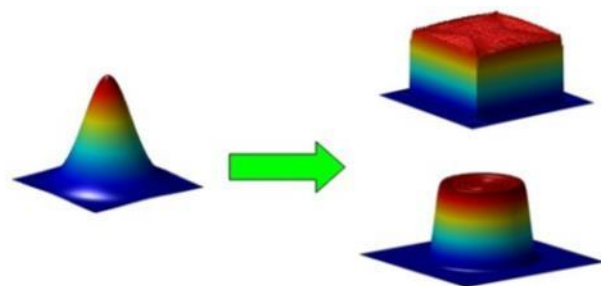
kde  $P$  je výkon laserového paprsku [W].

Rozložení hustoty energie podél osy paprsku je zobrazena na obr. 19. Se zvětšující se vzdáleností od ohniska ve směru osy paprsku se hustota energie zmenšuje.



Obr. 19 Hustota energie v paprsku [15]

Speciálním případem Gausova laserového svazku je tzv. „top hat“ profil (obr. 20), který se používá u  $\text{CO}_2$  laserů. Gaussův laserový paprsek je pomocí speciální konstrukce rezonátoru nebo vhodných difrakčních prvků tvarován do energetických profilů s rovnoměrným rozložením hustoty energie. Průřez profilu je ovlivňován tvarem zrcadel v rezonátoru a jeho konstrukcí. Mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou hustoty energie je ostrý přechod. Díky těmto vlastnostem lze velice přesně a rovnoměrně dávkovat vnesené teplo do zpracovávaného materiálu.



Obr. 20 Gaussův a „top hat“ profil [3]

**Zfokusovatelnost** = díky vysoké koherenci a směrovosti laserového záření lze paprsek zaostřit do velmi malého průměru. Další faktory, které ovlivňují tvar paprsku v ohnisku, jsou vlnová délka záření a parametry fokusační čočky. Průměr paprsku v ohnisku se určí vzorcem:

$$d = \frac{4 \cdot M^2 \cdot f \cdot \lambda}{\pi \cdot d_0}, \quad (1.5)$$

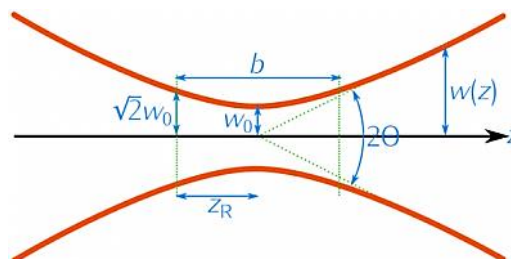
kde  $d$  je průměr paprsku v ohnisku [mm],  
 $f$  – ohnisková délka fokusační čočky [mm],  
 $d_0$  – průměr nefokuso vaného paprsku [mm].

Poloha ohniska se ovšem nenastavuje vždy přímo na povrch materiálu, ale i nad nebo pod povrch. Proto je důležité, znát délku pasu ohniska  $b$  a jeho poloměr v širších částech  $w(z)$ .

Geometrie pásu je zobrazena na obr. 21. Poloměr pasu se spočítá ze vzorce:

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{z \cdot \lambda}{\pi \cdot w_0^2} \right)^2}, \quad (1.6)$$

kde  $w$  je poloměr pasu paprsku [mm],  
 $z$  – osová vzdálenost od ohniska paprsku [mm].



Obr. 21 Geometrie pásu ohniska [20]

Délka pasu  $b$  je rovna dvojnásobku vzdálenosti  $z_R$ , která se nazývá Rayleighova délka. Platí, že  $z_R$  odpovídá vzdálenosti  $z$ , ve které se poloměr pasu  $w(z)$  rovná  $\sqrt{2} \cdot w_0$  (obr. 21). Velikost Rayleighovy délky určí ze vzorce:

$$z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda}, \quad (1.7)$$

kde  $z_R$  je Rayleighova délka [mm].

Z obr. 22 vyplývá, že při použití fokusační čočky s menší ohniskovou vzdáleností dosahuje paprsek užšího a kratšího pasu. Průměr paprsku se však směrem od ohniska rychleji zvětšuje než u čočky s vyšší ohniskovou vzdáleností.

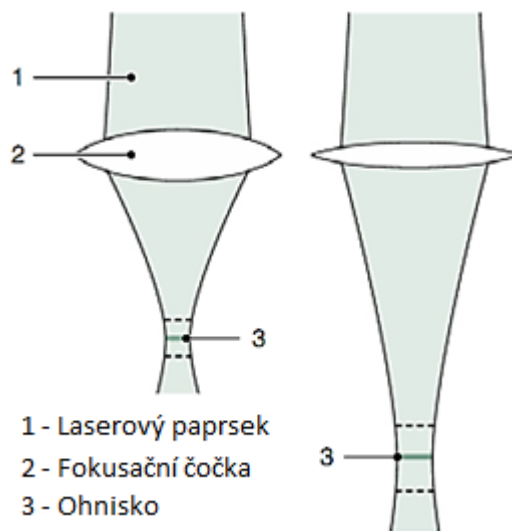
Zfokusovatelnost je také mírou kvality paprsku, která je pro kruhově symetrické záření vyjádřena parametrem BPP (Beam Parametr Product). Ten se určí ze vzorce:

$$BPP = w_0 \cdot \theta, \quad (1.8)$$

kde  $BPP$  má jednotku [mm·mrad].

Z parametru BPP lze pomocí následující rovnice vypočítat faktor modu  $M^2$ :

$$M^2 = \frac{BPP \cdot \pi}{\lambda}. \quad (1.9)$$



Obr. 22 Vliv ohniskové vzdálenosti čočky na fokusaci [21]

### 1.3 Interakce laserové záření s materiálem [4], [7], [32], [40]

Předpokladem natavení materiálu je absorpce laserového záření a jeho přeměna na teplo. U kovových (neprůhledných) materiálů se část záření odrazí a část je absorbována. Výsledná absorpce se určí ze vzorce:

$$A = 1 - R, \quad (1.10)$$

kde  $A$  je absorpce záření [-],

$R$  – odraz záření [-].

Koeficient odrazu pro nízké hodnoty hustoty energie paprsku (do  $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) je závislý především na elektrických vlastnostech materiálu. Výslednou absorpci pro kolmý dopad

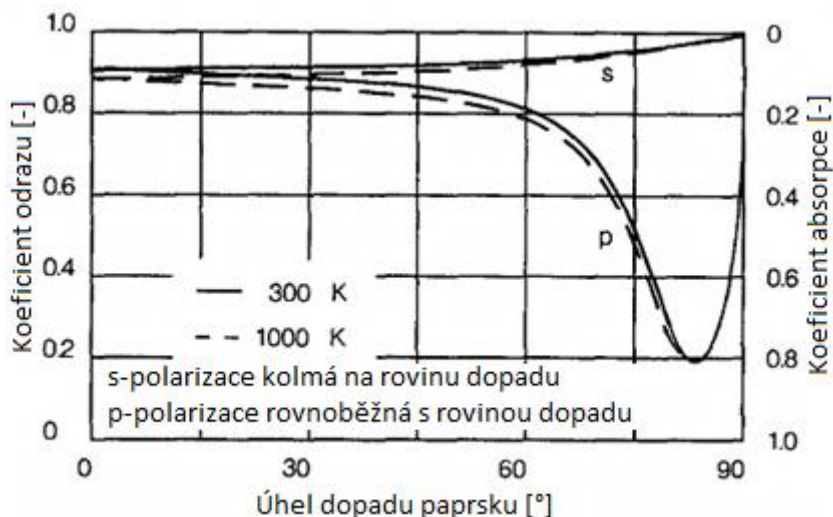
paprsku lze určit pomocí Bramsonovy rovnice, která uvažuje změnu elektrického odporu materiálu v závislosti na teplotě:

$$A(t) = 0,365 \cdot \sqrt{\frac{R_e(t)}{\lambda}} - 0,0667 \cdot \frac{R_e(t)}{\lambda} + 0,006 \cdot \left(\frac{R_e(t)}{\lambda}\right)^{\frac{3}{2}}, \quad (1.11)$$

kde  $A_i(t)$  je absorpční koeficient závislý na teplotě [-],  
 $R_e(t)$  – elektrický odpor závislý na teplotě [ $\Omega$ ].

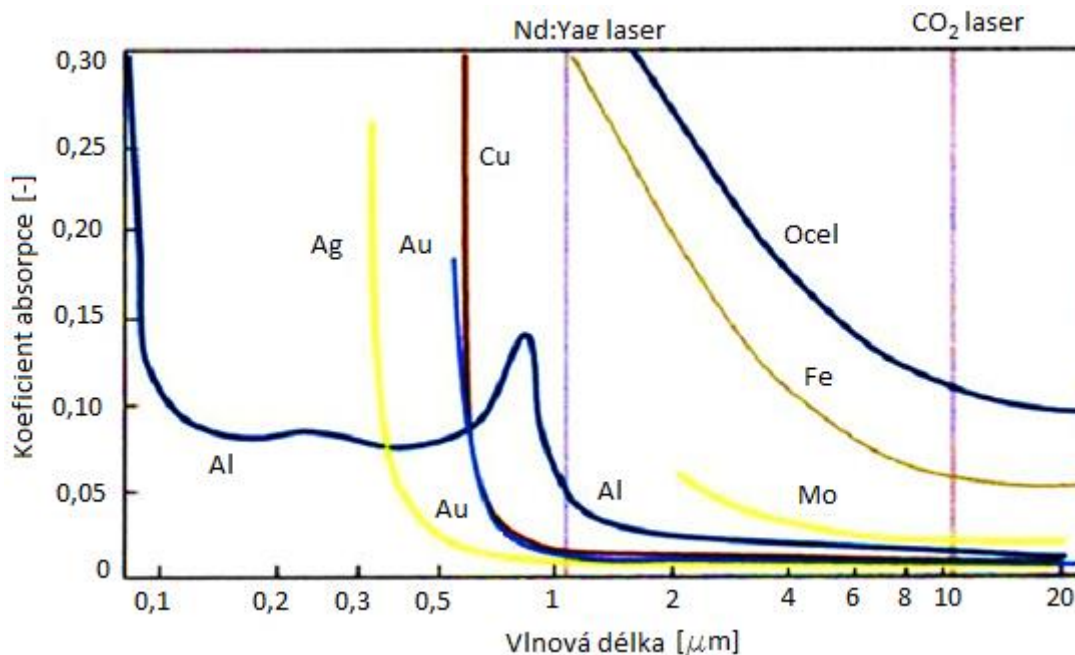
Na odrazivost má také vliv stav povrchu. Heterogenita a drsnost povrchu zvyšují absorpci, naopak při leštěném povrchu je absorpce nízká.

Při vysoké hustotě energie dochází k téměř okamžitému roztavení kovu a skokově klesá odrazivost. S využitím Brewsterova efektu, kdy polarizace záření je rovnoběžná s rovinou dopadu, lze odrazivost ještě zmenšit (obr. 23). Při zvyšující se teplotě se snižuje elektrická vodivost a tím se zvyšuje absorpce.



**Obr. 23** Vliv teploty, úhlu dopadu a polarizace na absorpci laserového záření [40]

Další parametr, který má vliv na absorpci záření, je jeho vlnová délka. Obecně lze říci, že se snižující se vlnovou délkou se zvyšuje absorpce (obr. 24).



**Obr. 24** Závislost absorpce na vlnové délce [32]

## 2 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ [8], [17], [32], [39]

Svařování je velmi stará výrobní technologie používaná již od 3. tisíciletí př. n. l., kdy se ke spojování kovů používalo tzv. kovářské svařování. Od té doby prošlo toto odvětví obrovským vývojem, jehož vrcholem je laserové svařování.

Svařování je definováno jako metalurgický proces, při kterém dochází ke vzniku nerozebíratelného spojení dvou či více dílů materiálů. Podle způsobu dodání aktivační energie, která je potřebná pro vytvoření nových meziatomových vazeb mezi spojovanými díly, rozdělujeme metody svařování do dvou základních skupin:

- metody tavného svařování (termická aktivita),
- metody tlakového svařování (mechanická aktivita).

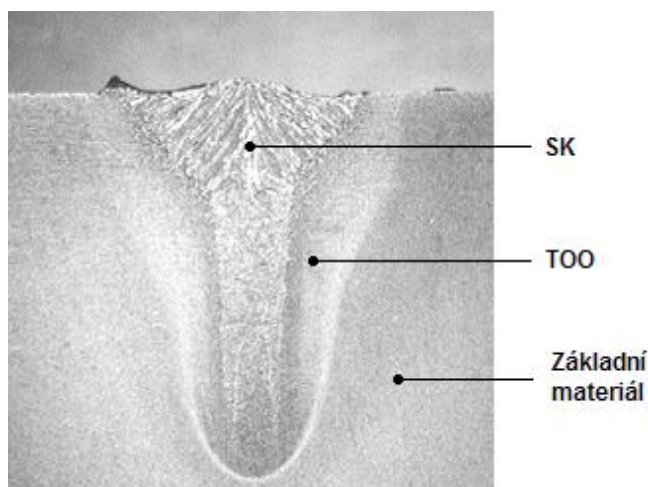
Laserové svařování se řadí mezi metody tavné, jejichž proces je založen na natavení kovu pomocí přivedené tepelné energie a jeho následném ztuhnutí. Ztuhlá oblast, v níž dochází k dendritické krystalizaci, se nazývá svarový kov (SK). Kolem svarového kovu se nachází tepelně ovlivněná oblast (TOO), ve které došlo k mikrostrukturním přeměnám způsobující změny mechanických vlastností (obr. 25).

Obecně rozlišujeme dvě metody laserového svařování:

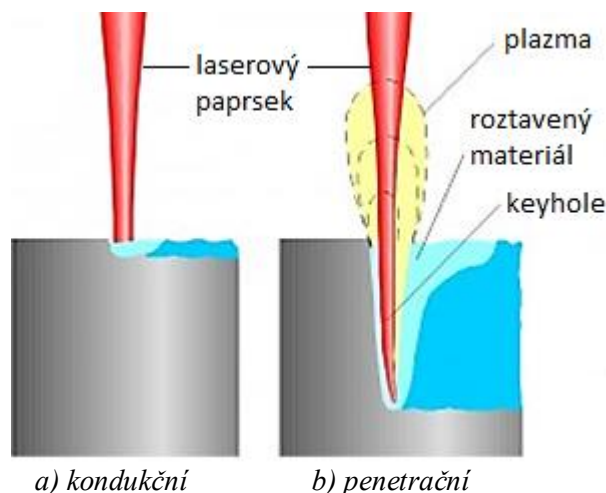
- kondukční svařování,
- penetrační svařování.

Při kondukčním svařování nedochází k porušení povrchu tavné lázně, materiál je ohříván a taven pouze přes mechanismus vedení tepla (obr. 26 a). Hloubka průvaru je velice malá.

Penetrační svařování je charakteristické vznikem paroplynové dutiny = keyhole (obr. 26 b), díky které se dosahuje hlubokého a úzkého svaru.



Obr. 25 Základní části svarového spoje [32]



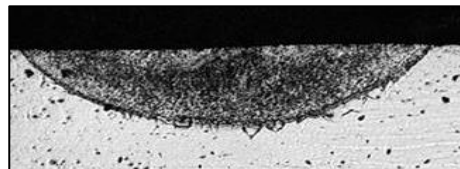
Obr. 26 Metody laserového svařování [17]

### 2.1 Laserové kondukční svařování [6], [7], [23], [40]

Laserové kondukční svařování probíhá při hustotách energie nižších než  $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  a při krátkých interakčních časech. Nízké hustoty energie lze dosáhnout nastavením malého výstupního výkonu laserového svazku, rozostřením paprsku nebo jeho oscilací.

Při dopadu paprsku na povrch materiálu se část energie odrazí a část absorbuje. Pohlčená energie způsobí tavení materiálu na základě kondukce tepla a tavenina postupně zvětšuje svůj objem. To trvá do doby, dokud se teplo přiváděné do materiálu za jednotku času nerovná teplu odvedenému za jednotku času.

Svary vytvořené kondukčním laserovým svařováním jsou charakteristické minimálním převýšením a téměř žádnými propaly. Hloubka svaru nepřesahuje jeho šířku (obr. 27). Proto se kondukční metoda používá převážně pro svařování tenkých plechů, fólií nebo vnějších koutových svarů, kdy dojde k „rozvaření“ spojovaných plechů.



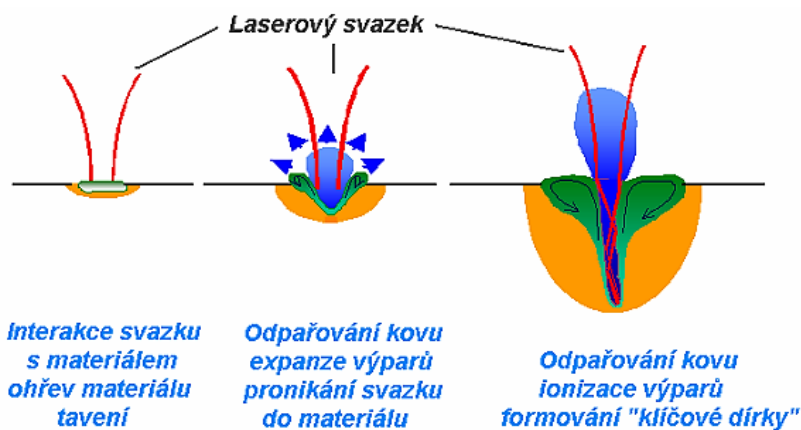
Obr. 27 Kondukční svar [23]

## 2.2 Laserové penetrační svařování [17], [34], [40]

Laserové penetrační svařování se vyznačuje vznikem paroplynové dutiny, která se nazývá anglickým slovem keyhole (v překladu klíčová dírka). Podmínkou pro vznik keyhole je hustota energie vyšší než  $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  a dostatečně dlouhá doba interakce laserového paprsku s materiálem, aby došlo k vypařování materiálu

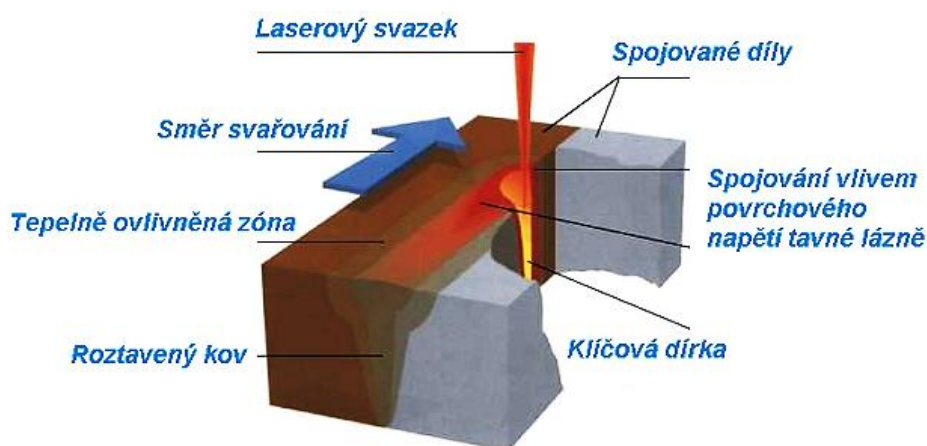
Velice zjednodušeně lze popsat vznik paroplynové dutiny následovně (obr. 28).

Po absorpci energie dochází k rychlému tavení a vypařování materiálu, díky čemuž vzniká na povrchu materiálu dutina. Ta je vyplněna kovovými výparůvypařujícího se kovu, které expandují z dutiny a tím ji udržují otevřenou. Do dutiny dopadá laserový paprsek, který se uvnitř několikrát odrazí, vnáší do ní další energii a tím ji ještě více prohlubuje.



Obr. 28 Vznik keyhole [34]

Stěny keyhole jsou tvořeny taveninou. Vlivem povrchového napětí dochází ke „slévání“ taveniny a uzavírání dutiny za pohybujícím se paprskem (obr. 29). Tavenina velice rychle krystalizuje a vzniká svar. Podrobněji bude vznik keyhole popsán ve třetí kapitole.

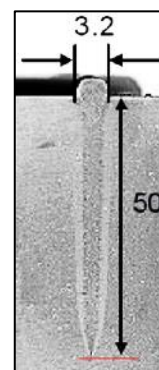


Obr. 29 Princip laserového penetračního svařování [34]

Část energie paprsku je odebrána kovovými výparůvypařování a ochranným plynem, kdy dochází k jejich ionizaci a vzniku plazmatu. Tento doprovodný efekt je nežádoucí, protože plazma pohlcuje část energie a rozostřuje paprsek, čímž se snižuje jeho hustota energie. To má za následek menší hloubku průvaru.

Laserové penetrační svařování má následující přednosti:

- velice úzký a hluboký svar (obr. 30),
- malá tepelně ovlivněná oblast,
- vysoká metalurgická kvalita svaru,
- kvalitní vzhled svaru,
- minimální deformace svařence,
- svařitelnost různorodých materiálů,
- žádný přídavný materiál,
- vysoká produktivita (vysoká svařovací rychlost),
- robotizované svařování.



Obr. 30 Penetrační svar [32]

### 2.2.1 Svařovací parametry při kontinuálním režimu [7], [14], [15], [19], [21], [32], [34], [40]

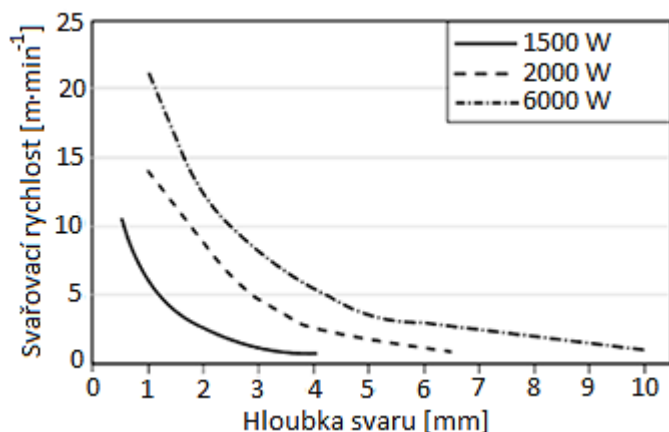
Svařovací parametry a jejich vzájemná kombinace určují výslednou geometrii a kvalitu svaru. Základní svařovací parametry, kterými lze ovlivnit výsledek svařovacího procesu při kontinuálním pracovním režimu jsou:

- svařovací výkon  $P$  [W],
- svařovací rychlost  $v$  [ $mm \cdot s^{-1}$ ],
- poloha ohniska vzhledem k povrchu materiálu  $s$  [mm],
- typ a průtok ochranného plynu.

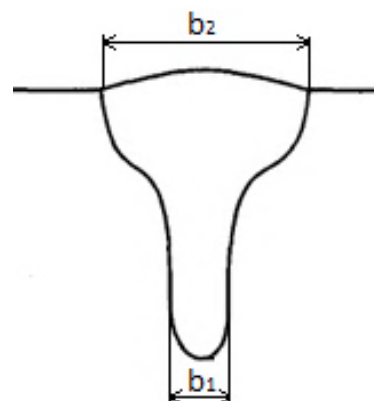
Svařovací výkon je výkon laserového paprsku při vstupu do fokusačního systému. Pro korektní vyjádření vlivu výkonu na svařovací proces je důležité znát mod, divergenci, polarizaci a další vlastnosti laserového svazku. Při kontinuálním pracovním režimu má svařovací výkon po celou dobu svařování konstantní hodnotu.

Svařovací rychlost je definována jako dráha, kterou urazí paprsek za jednotku času. Má největší vliv na produktivitu a ekonomické zhodnocení celého svařovacího procesu. Tento parametr společně se svařovacím výkonem velice výrazně ovlivňují geometrii a kvalitu svaru. Z grafu na obr. 31 je vidět, že čím větší je svařovací rychlost, tím menší hloubky průvaru se dosahuje. Svařovací výkon naopak zvětšuje hloubku průvaru. Rychlost také ovlivňuje šířku svaru. Typický tvar laserového svaru je zobrazen na obr. 32. Bylo experimentálně prokázáno, že vyšší svařovací rychlost zmenšuje šířku vrchní části svaru.

Svařovací výkon a svařovací rychlost určují specifické vnesené teplo do svaru, kterým lze velice přesně popsat tepelné působení laseru na materiál. Množství vneseného tepla do



Obr. 31 Vliv svařovací rychlosti a výkonu na hloubku svaru [21]



Obr. 32 Tvar svaru [40]



svaru lze spočítat následovně:

$$Q_s = \eta \cdot Q_c, \quad (2.1)$$

kde  $Q_s$  je specifické vnesené teplo [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$ ],

$Q_c$  – tepelný příkon (vnesené teplo při 100%-ní účinnosti) [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$ ],

$\eta$  – účinnost přenosu energie do svaru [-].

Tepelný příkon se spočítá ze vztahu:

$$Q_c = \frac{P}{10^{-3} \cdot v}, \quad (2.2)$$

kde  $P$  je svařovací výkon [W],

$v$  – svařovací rychlost [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Stanovení účinnosti přenosu energie do svaru je velice obtížné, protože přenos energie do svaru je ovlivňován mnoha jevy. Jedná se například o absorpci záření v keyhole při vícenásobných odrazech, tepelnou vodivost materiálu, pohlcení energie v plazmovém oblaku a další. Přibližně lze určit účinnost stanovením energie, která je potřebná k natavení daného objemu svarového kovu a podělit energií laserového paprsku. Aby se nemusela složitě počítat energie laserového paprsku, lze energii potřebnou k natavení materiálu přepočítat na výkon a pak do vzorce dosadit výkon laserového paprsku:

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{P_T}{P}, \quad (3.3)$$

kde  $Q_2$  je energie vnesená do svaru [J],

$Q_1$  – energie laserového paprsku [J],

$P_T$  – výkon potřebný k natavení daného objemu svarového kovu [W].

Výkon potřebný k natavení daného objemu svarového kovu lze určit z následujícího vzorce:

$$P_T = \left( \frac{v \cdot u}{\kappa} \right) \cdot \left[ h \cdot \lambda_{th} \cdot \left( T_m - T_0 + \frac{L_t}{c} \right) \right], \quad (3.4)$$

kde  $v$  je rychlost svařování [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$u$  – šířka svaru [m],

$\kappa$  – součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$h$  – hloubka svaru [m],

$\lambda_{th}$  – součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],

$T_m$  – teplota tavení [K],

$T_0$  – počáteční teplota materiálu [K],

$L_t$  – latentní teplo tavení [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ],

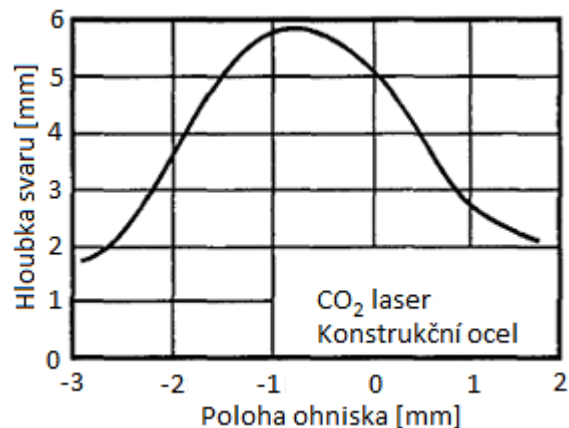
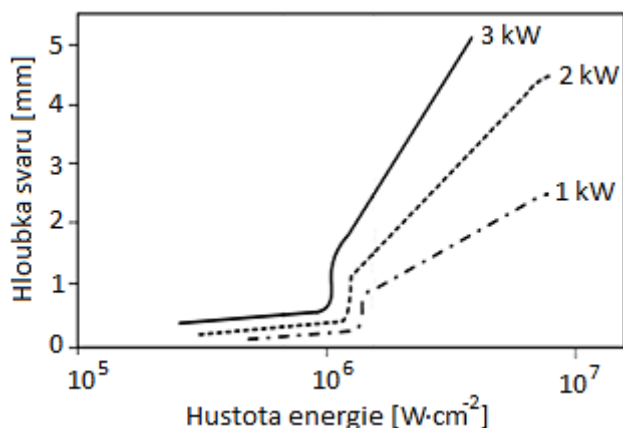
$c$  – měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

Další parametr, který se před svařováním nastavuje, je poloha ohniska vůči povrchu materiálu. Umístováním ohniska nad nebo pod povrch materiálu se zvětšuje stopa dopadajícího paprsku a mění se hustota energie, která působí na materiál.

Hustota energie má zásadní vliv na tepelný účinek laseru na materiál a na základě její hodnoty se svařuje buď kondukčně, nebo penetračně. Jak již bylo zmíněno výše, keyhole vzniká při hustotě energie  $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  a tím se rapidně zvětšuje i hloubka průvaru.

Vliv hustoty energie a na hloubku svaru při různých výkonech laserového svazku je zobrazen na obr. 33.

Nejmenší stopy paprsku na povrchu materiálu a tím i největší hustoty energie se dosahuje při poloze ohniska přesně na povrchu. Z obr. 34 však vyplývá, že největších hloubek

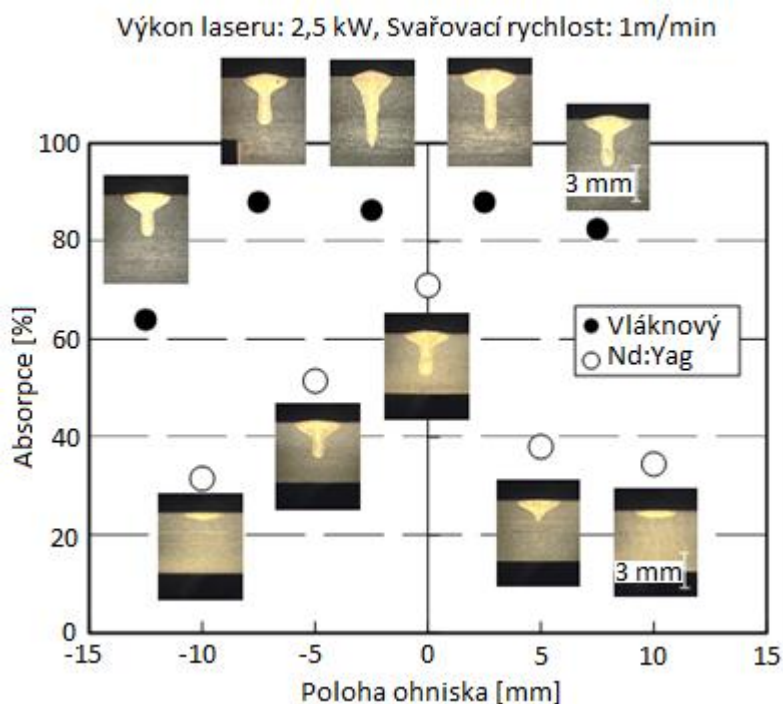


**Obr. 33** Vliv hustoty energie na hloubku svaru [21]      **Obr. 34** Vliv polohy ohniska na hloubku svaru [40]

přůvaru se dosahuje při poloze ohniska těsně pod povrchem materiálu. Velice důležité je přesně nastavovat polohu ohniska při použití fokusační čočky s kratší ohniskovou vzdáleností. Hustota energie podél osy paprsku se mění rychleji než u čoček s delší vlnovou délkou a každé odchylení od požadované polohy má velký vliv na výslednou geometrii svaru.

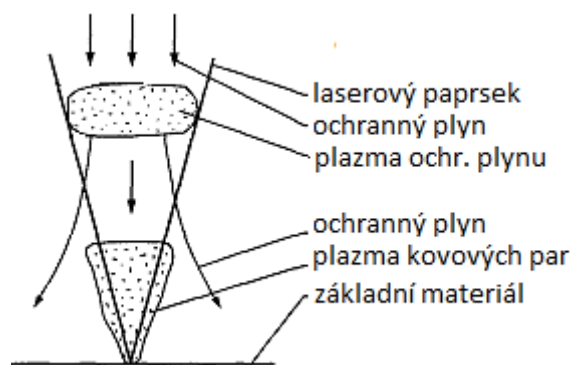
Na obr. 35 je zobrazen vliv polohy ohniska na absorpci a geometrii svaru při svařování vláknovým a Nd:Yag laserem korozivzdorné austenitické oceli X5CrNi18-10. Paprsek vláknového laseru lze zfokusovat do menšího průměru ohniska než u Nd:Yag laseru. V tomto případě byl u vláknového laseru průměr ohniska 200 μm a u Nd:Yag laseru 580 μm. Záporné hodnoty polohy ohniska znamenají jeho umístění pod povrch materiálu. Největší absorpce se dosahuje při poloze ohniska 0 mm nad povrchem, což se projevuje především u širší stopy paprsku (Nd:Yag laser).

Další parametr ovlivňující svařovací proces je ochranný plyn. Jeho základní funkcí je zamezit přístupu vzduchu, oxidaci svaru, vzniku vnitřních vad (póry, bubliny, atd.) a odsunout páry kovů a vylétující taveninu z osy paprsku. Nejčastěji se používá helium, argon, jejich směs a dusík. Jak již bylo zmíněno výše, při určité energii laserového paprsku dochází k ionizaci ochranného plynu a vzniku plazmatu.



**Obr. 35** Vliv polohy ohniska na absorpci [14]

Plazma je ionizovaný plyn složený z kladných iontů a záporných elektronů. Samotné plazma se na venek jeví jako elektricky neutrální. Molekulám plynu se musí dodat disociační energie, aby se disociovaly na atomy a atomům ionizační energie, která způsobí rozložení atomu na kladný iont a záporný elektron. Při laserovém svařování vzniká plazma z ochranného plynu a z kovových výparů (obr. 36).



Obr. 36 Schéma rozložení plazmatu [40]

Každý prvek potřebuje k rozložení atomu na ionty různou ionizační energii (tab. 2). Z tab. 2 vyplývá, že nejlepší ochranný plyn z hlediska vzniku plazmatu je helium, protože má vysokou ionizační energii a vzniká nejméně plazmatu (obr. 37). Díky tomu je útlum energie a rozostření paprsku nejmenší a lze dosáhnout největších hloubek průvaru při dané svařovací rychlosti. Helium však má vysokou tepelnou vodivost a difuzivitu a odvádí velké množství tepla. Vznikající

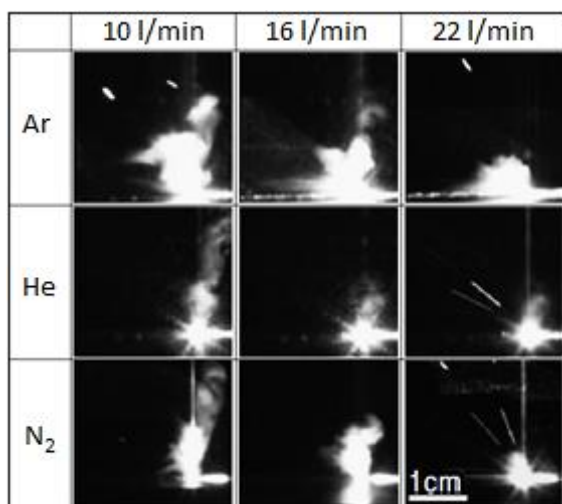
Tab. 2 Ionizační energie různých prvků [34]

Prvek	Helium	Argon	Dusík
Ionizační energie [eV]	24,5	15,7	15,5

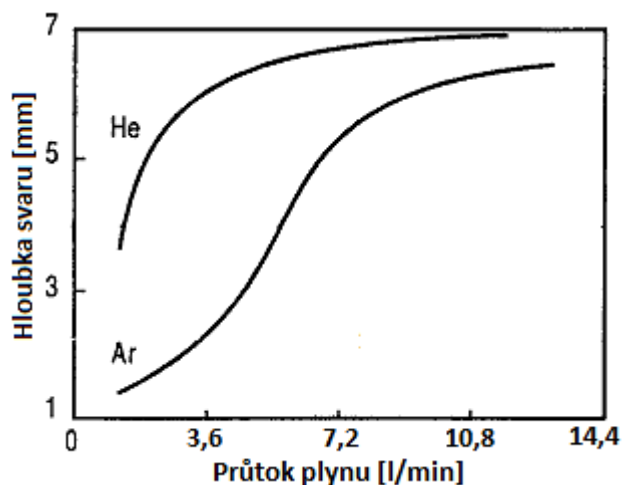
keyhole je úzká, nestabilní a může docházet k neprovaření kořene. Pro dobrý ochranný účinek helia je nutný velký průtok, což však může způsobovat nežádoucí víření a odfukování tavné lázně.

Při použití argonu vzniká plazmatu více (obr. 37), útlum energie a rozostření paprsku je větší. Proto se při svařování plechu dané tloušťky stejným výkonem musí nastavit menší rychlost svařování než při použití helia, aby se dosáhlo stejné hloubky. Výsledný svar je širší, ale má lepší pevnostní charakteristiky.

Množství vznikajícího plazmatu také závisí na výkonu laseru a na průtoku plynu. Čím větší je výkon laseru, tím více plazmatu vzniká. Z obr. 37 je vidět, že při větším průtoku ochranného plynu dochází k odfukování plazmatu. Tomu odpovídá i graf na obr. 38, kde je vidět, že se zvětšujícím se průtokem ochranného plynu se zvětšuje i hloubka svaru.



Obr. 37 Vliv průtoku ochranného plynu na vznik plazmatu [19]



Obr. 38 Vliv průtoku ochranného plynu na hloubku svaru [40]

## 2.2.2 Svařovací parametry při pulzním režimu [10], [21], [40]

Základní svařovací parametry, které mají vliv na výslednou geometrii a kvalitu svaru, jsou:

- energie pulzu  $E [J]$ ,
- maximální výkon pulzu  $P_{max} [W]$ ,
- průměrný výkon pulzu  $P_{pr} [W]$ ,
- délka pulzu  $\tau [ms]$ ,
- poloha ohniska  $s [mm]$ ,
- frekvence pulzů  $\nu [Hz]$ ,
- rychlost svařování  $v [mm \cdot s^{-1}]$ .

Před samotným svařovacím procesem se nastavuje frekvence pulzů, délka pulzu a napětí budících lamp. Tyto parametry určují energii pulzu, která má většinou průběh zobrazený na obr. 39. Průběh energie pulzu je závislý na délce pulzu. Délka pulzu definuje dobu působení laserového paprsku na materiál a nastavuje se v závislosti na druhu svařovaného materiálu a jeho tloušťce. Musí být určena tak, aby při svařování nedošlo k výstřiku svarového kovu.

Z energie pulzu lze vypočítat maximální výkon pulzu:

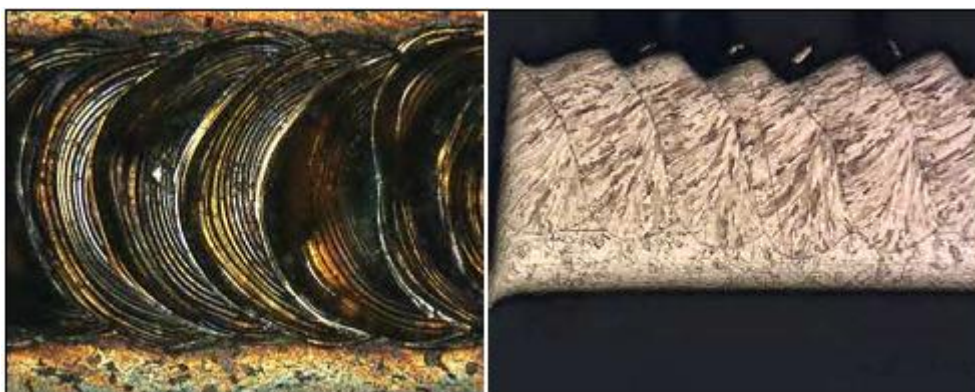
$$P_{max} = \frac{E}{\tau} \quad (3.5)$$

Maximální výkon pulzu určuje intenzitu působení laserového paprsku na materiál pro daný průměr dopadajícího paprsku. Zkrácením délky pulzu se zvětší maximální výkon a zvýší se hloubka průvaru. Podle tloušťky materiálu se pohybuje v rozmezí od 0,2 kW do 5 kW.

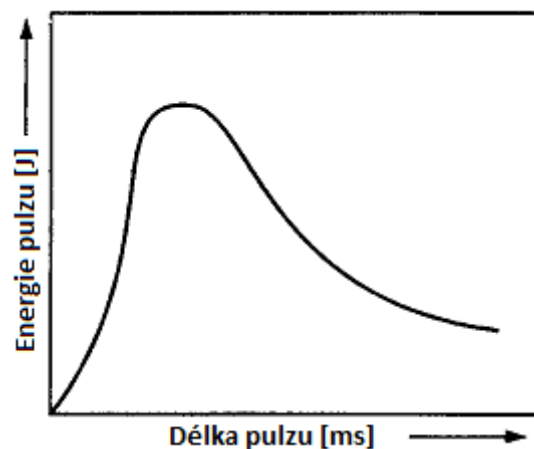
Průměrný výkon ovlivňuje rychlost svařování a lze ho vypočítat z následujícího vzorce:

$$P_{max} = E \cdot \nu \quad (3.6)$$

Při laserovém pulzním svařování se svařuje buď bodově, nebo se jednotlivé svary překrývají = švové svařování (obr. 40). Bodové svařování se používá ke stehování spojovaných součástí, aby při vytváření delších svarů nedocházelo v důsledku rychlých změn teplot k tepelným deformacím.

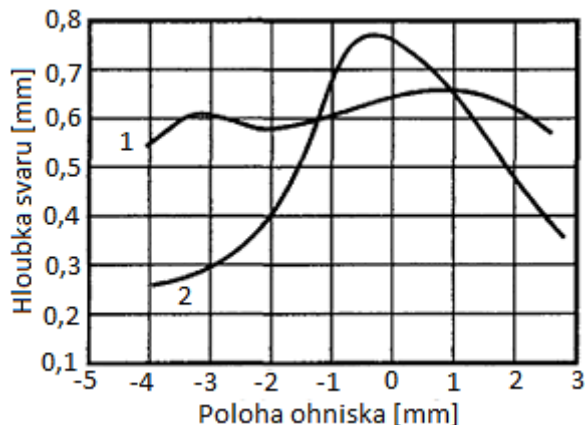
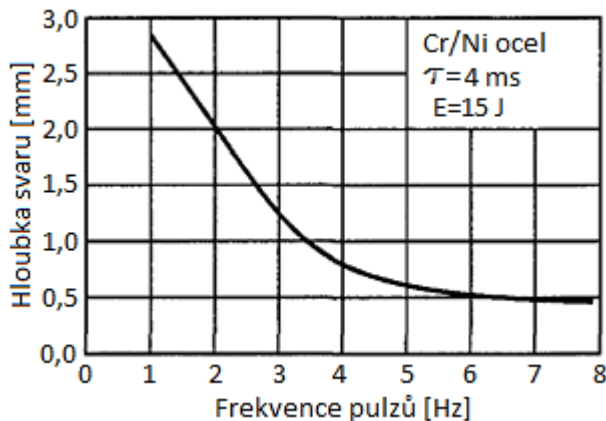


Obr. 40 Pulzní švové svařování [10]



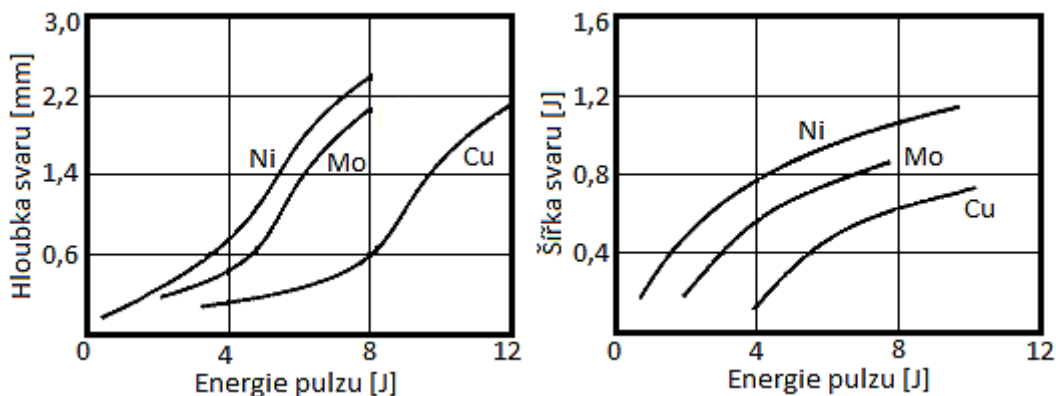
Obr. 39 Průběh energie pulzu [40]

Švové svařování se využívá při vytváření delších svarů. Poměr překrytí svarů je závislý na rychlosti svařování a frekvenci pulzů. Nízká frekvence způsobuje defekty ve svarovém kovu, protože svařování se mění na vrtání. Při příliš vysoké frekvenci je doba působení laseru na materiál moc krátká, nevzniká keyhole a svar se tvoří pouze kontaktní metodou (obr. 41). Výhodou švového svařování proti kontinuálnímu režimu je menší vnesené teplo do materiálu.



**Obr. 41** Vliv frekvence pulzů na hloubku svaru [40]      **Obr. 42** Vliv polohy ohniska na hloubku (1) a šířku (2) svaru [40]

Geometrie svaru je nejvíce ovlivňována energií pulzu, délkou pulzu a polohou ohniska. Nastavení polohy ohniska vzhledem k povrchu materiálu má velký vliv na tepelné působení laserového paprsku na materiál, protože určuje průměr stopy dopadajícího paprsku. Stejně jako u kontinuálního režimu se největších hloubek průvaru dosahuje při poloze ohniska těsně pod povrchem materiálu (obr. 42).



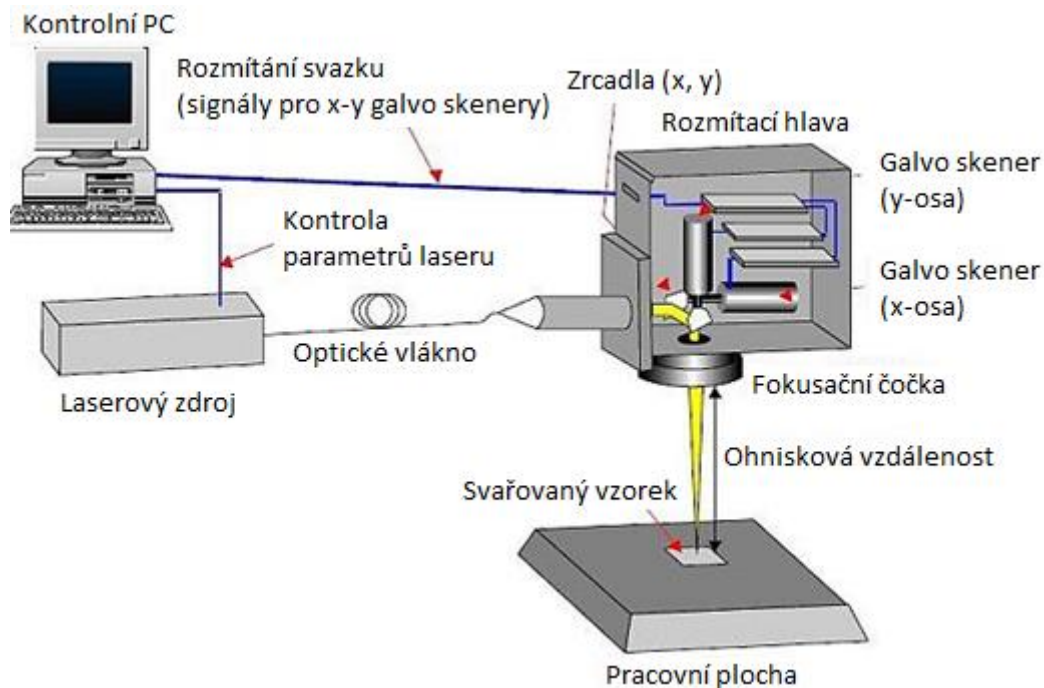
**Obr. 43** Vliv energie pulzu na geometrii svaru [40]

Při svařování materiálů s různými termomechanickými vlastnostmi, kdy budou nastaveny stejné svařovací parametry, bude hloubka a šířka svaru různá, ale jejich průběh v závislosti na energii pulzu bude vždy stejný (obr. 43). V první části závislosti hloubky svaru na energii pulzu je vidět, že hloubka roste pozvolněji a poté dochází k jejímu prudkému zvětšení. Při nízké energii pulzu dochází ke vzniku svaru kontaktní metodou a při vyšší energii už vzniká keyhole zabezpečující větší hloubku provaření.

Délka pulzu kromě geometrie svaru také ovlivňuje celistvost svaru. Společně s dalšími parametry určuje množství vneseného tepla a tím i pevnostní charakteristiky svaru. Při kontaktním režimu se musí délka pulzu nastavit tak, aby bylo zaručeno vedení tepla do požadované hloubky materiálu.

### 2.3 Remote welding [26], [27]

Rychlý vývoj laserového svařování v posledních letech přinesl nový způsob svařování nazývaný remote welding (v překladu dálkové svařování). Laserový paprsek je pomocí procesní rozmitací hlavy fokusován na velkou vzdálenost na povrch svařovaného materiálu. Princip této metody je zobrazen na obr. 44.



Obr. 44 Princip remote welding [27]

Laserový svazek je polohován do požadovaného místa pomocí rozmitacích zrcadel o velice malé hmotnosti, díky čemuž má systém polohování ohromnou dynamiku. Pohyb paprsku je až 100-krát rychlejší než u běžných svařovacích procesů, což umožňuje zmenšit neproduktivní časy a celkovou produktivitu zvýšit až na 90 %. Vysoká dynamika zajišťuje konstantní rychlost svařování i při změnách směru. Další výhodou je schopnost svařování v těžce dostupných místech, kam by nebylo možné se klasickým laserovým svařováním dostat. Rozmitací hlavu lze umístit na robota, což zvýší rozsah polohovatelnosti paprsku.

Realizovatelnost této metody je podmíněna použitím laserového zdroje, který generuje vysoce kvalitní svazek s výkonem několika kW, čímž umožní zaostřit paprsek do velmi malého bodu. Tyto požadavky splňují vláknové a diskové lasery, které jsou také výhodné vedením laserové paprsku do rozmitací hlavy pomocí optického vlákna. Lze použít i pulzní Nd:Yag lasery buzené diodami.

Remote welding se používá především v automobilovém průmyslu ke svařování karosérií, sedadel, dveří a dalších.

### 2.4 Návrh a příprava svarového spoje [6], [22], [42]

Základem každého návrhu svarového spoje je jeho přístupnost. Při klasickém laserovém svařování musí být svar konstruován tak, aby se k němu mohla dostat celá laserová hlava. V případě metody remote welding stačí zajistit přístup pouze pro paprsek.

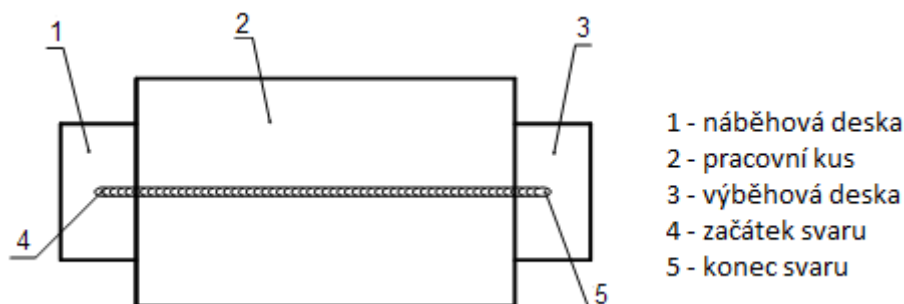
Laserové svařování je vysoce přesná technologie, která vyžaduje velice precizní přípravu a sestavování spojovaných dílů. Proto se používají různé přípravky a upínky, které zajistí přesné uchycení a „samostavitelnost“ spojů. Většinou se svařuje bez přídavného materiálu, a proto mezera mezi natupo svařovanými díly nesmí přesáhnout 25 % průměru stopy dopadajícího paprsku. Tím se zaručí správná fúze svarových ploch a zabrání se vzniku vrubů.

V případě použití přídavného materiálu, který bývá ve formě drátu nebo plnicí kovové vložky, jsou tolerovány větší mezery mezi svařovanými materiály.

Kvalita laserového svaru je také závislá na přesnosti a čistotě svarových ploch, které jsou připravovány strojním obráběním nebo řezáním. Nečistoty na svarových plochách jako jsou mastnota, olej, chladicí kapalina, barva nebo oxidy by měly být odstraněny.

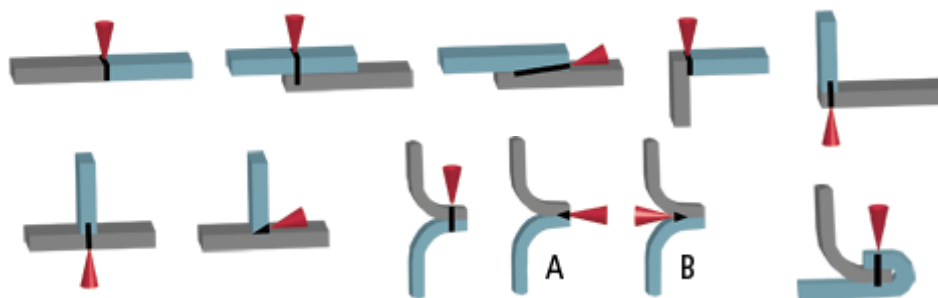
Při svařování plechů s povrchovými úpravami (nauhličení, anodizace, kadmiování, nitridace, fosfátování, galvanizace, atd.) se musí v místě svaru upravená povrchová vrstva odstranit a to nejlépe strojním obráběním.

V případě svařování sestav dílů, kde nemůže být odstraněn začátek a konec svaru z důvodu kráteru, je vhodné použít náběhovou a výběhovou desku (obr. 45). Ty se ke svařovaným dílům připevňují svěrkami nebo svarem a po dokončení jsou odstraněny.



**Obr. 45** Použití náběhové a výběhové desky [6]

Laserovým svařováním lze provádět stejné typy svarů jako běžnými svařovacími metodami – tupé, koutové, T-spoje a další (obr. 46). Kromě těchto svarů se však používá tzv. průvarový svar, který lze vytvořit pouze laserem nebo elektronovým paprskem. Tento svar se používá při přeplátovaných spojích, T-spojích a rohových spojích, kde dojde k provaření obou spojovaných plechů (obr. 46). Takto lze spojovat i více plechů z různých materiálů položených na sobě. Výhodou je, že spodní plech nemusí být provařený přes celou tloušťku, díky čemuž nedojde k poškození jeho povrchu.



**Obr. 46** Základní typy laserových spojů [22]

### 3 KEYHOLE [7], [40]

Fokusováním dopadajícího laserového paprsku do velice malé stopy dochází k lokálnímu ohřevu materiálu, kdy při správně nastavených svařovacích parametrech dochází ke vzniku stabilní keyhole. Parametry zmíněné v předchozí kapitole se volí podle požadavků na výsledný svar a podle vlastností svařovaného materiálu jako jsou tepelná vodivost, teplotní vodivost, tepelná kapacita, odrazivost a další. Tyto materiálové charakteristiky společně s vlastnostmi laserového paprsku ovlivňují formování keyhole, přenos tepla v keyhole a její stabilitu. Samotný proces vzniku a tvorby keyhole není dosud přesně pochopen, ale existují teorie, které jsou za určitých zjednodušujících předpokladů implementovány do simulačních programů a přinášejí shodu s experimentálním ověřením.

#### 3.1 Fyzikální podstata keyhole [7], [13], [24], [43]

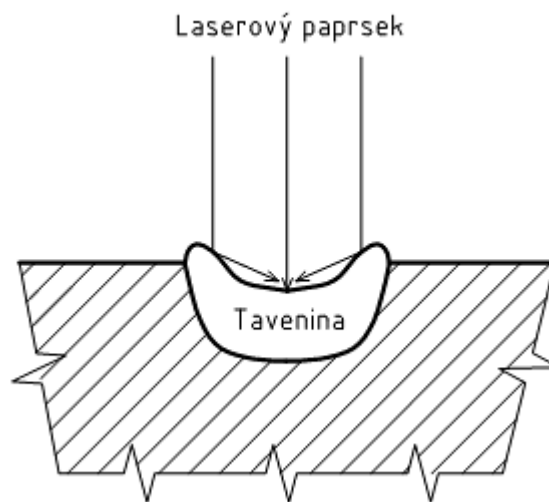
Energie dopadajícího laserového paprsku je absorbována elektrony, které ze stabilního energetického stavu přejdou do stavu se zvýšenou energií o energii fotonu  $h \cdot \nu_f$ . Srážkami s ostatními elektrony a s dalšími fotony zvyšují dále svoji energii. V případě, že odvod tepla je nižší než přívod tepla, projeví se zvyšování energie elektronů ohřevem materiálu.

S narůstající teplotou se zvětšuje i absorpce laserového záření materiálem a na povrchu vzniká tavenina. Působením laserového paprsku se zvyšuje teplota taveniny a po dosažení teploty vypařování dochází k odpařování materiálu. Rychlost vypařování kovu se běžně pohybuje kolem hodnot  $0,01$  až  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , při vysokých hustotách energie paprsku však může dosahovat až rychlosti zvuku v kovech. Unikající páry působí na základě zákona akce a reakce na svarovou lázeň tzv. vypařovacím tlakem, který její povrch „prohýbá“. Prohnutá svarová lázeň „fokusuje“ laserový paprsek do svého středu (obr. 47), čímž se rapidně zvýší přenos energie do taveniny. Vypařování materiálu je intenzivnější, což zvětšuje vypařovací tlak, konkávnost svarové lázně a vzniká keyhole.

Keyhole je vyplněna parami odpařujícího se kovu, plazmatem ochranného plynu a ionizovaných kovových výparů. Uvnitř dutiny dochází k vícenásobným odrazům a energie paprsku je absorbována prostřednictvím Fresnelovy absorpce na stěnách keyhole a inverzní Bremsstrahlung absorpcí v plazmatu.

Fresnelova absorpce je absorpce závislá na úhlu dopadu paprsku. Inverzní Bremsstrahlung absorpce je absorpce energie laserového paprsku elektrony v plazmatu, čímž dochází k útlumu výkonu svazku.

Při svařování lasery, které generují záření s vlnovou délkou  $1 \text{ } \mu\text{m}$ , je dominantním mechanismem přenosu energie v keyhole Fresnelova absorpce, protože koeficient absorpce plazmatu je malý. K jeho zvýšení dojde při svařování laserovým paprskem s delší vlnovou délkou, který je vyzařován  $\text{CO}_2$  laserem. Poté se uplatňují obě dvě metody přenosu tepla a jejich vzájemný poměr je ovlivňován svařovacím výkonem a rychlostí.

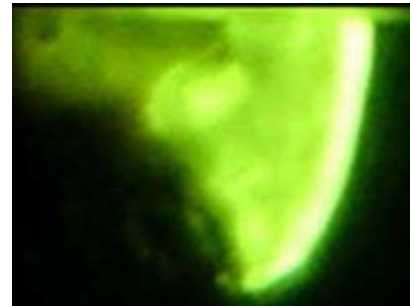


Obr. 47 Průhyb svarové lázně [7]



### 3.2 Matematický model popisující vznik keyhole [7], [13], [30], [43]

Reálná keyhole není symetrická a navíc je zahnutá (obr. 48). Proto se jako ideální postup výpočtu přenosu tepla a geometrie keyhole jeví matematický model profesora Kaplana, kde je geometrie počítána bod po bodu lokálním řešením energetické rovnováhy. Zadní i přední stěna se počítá zvlášť. V každém bodě stěny se porovnává absorbovaná energie laserového paprsku s energií odvedenou do materiálu prostřednictvím vedení tepla nebo proudění.



Obr. 48 Zahnutí keyhole[43]

Ve výpočtech se používá kartézský souřadnicový systém  $(x, y, z)$ , ve kterém má osa  $x$  stejný směr jako rychlost svařování a osa  $z$  směřuje totžně jako osa paprsku. Dále je použit válcový souřadný systém  $(r, \varphi, z)$ , ve kterém souřadnice  $r$  a  $\varphi$  odpovídají  $x$  a  $y$  v kartézském souřadném systému.

Teplotní pole v materiálu pro pohybující se lineární zdroj je popsán rovnicí:

$$T(r, \varphi) = T_0 + \frac{P'}{2\pi\lambda_{th}} K_0(Pe'r) e^{-Pe'r \cos\varphi} \quad (3.1)$$

kde  $T(r, \varphi)$  je teplota v bodě definovaném válcovými souřadnicemi [K],

$P'$  – výkon lineárního zdroje na jednotku hloubky [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ],

$\lambda_{th}$  – součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],

$K_0$  – modifikovaná Besselova funkce druhého druhu a nultého řádu [-],

$Pe'$  – modifikované Péceletovo číslo [ $\text{m}^{-1}$ ].

Péceletovo číslo určuje poměr mezi přenosem tepla vedením a prouděním při konvekci. Pro potřeby výpočtu bylo modifikováno a určí se ze vztahu:

$$Pe' = \frac{v}{2\kappa} \quad (3.2)$$

kde  $v$  je rychlost svařování [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$\kappa$  – součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Přenos tepla vedením je definován Fourierovým zákonem a vypočítá se z rovnice:

$$q = -\lambda_{th} \Delta T \approx -\lambda_{th} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (3.3)$$

kde  $\Delta T \approx \frac{\partial T}{\partial r}$  je změna teploty (gradient teploty) ve směru osy  $r$  [ $\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$ ],

$q$  – hustota tepelného toku [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ].

Gradient teploty se určí parciální derivací rovnice teplotního pole podle souřadnice  $r$ :

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{P'(r, \varphi)}{2\pi\lambda_{th}} Pe' [-K_0(Pe'r) \cos\varphi + K_0'(Pe'r)] e^{-Pe'r \cos\varphi} \quad (3.4)$$

kde  $K_0'$  je derivace Besselovy funkce.

Pro derivaci Besselovy funkce platí vztah:

$$K_0'(x) = -K_1(x) \quad (3.5)$$

kde  $K_1'(x)$  je Besselova funkce druhého druhu a prvního řádu [-].

Dosazením rovnic (3.4) a (3.5) do rovnice (3.3) se dostane upravená rovnice pro výpočet hustoty tepelného toku:

$$q(r, \varphi) = -\lambda_{th} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{P'(r, \varphi)}{2\pi} Pe' [K_0(Pe' r) \cos \varphi + K_1(Pe' r)] e^{-Pe' r \cos \varphi} \quad (3.6)$$

Tato rovnice se dále upraví dosazením výkonu lineárního zdroje na jednotku hloubky vyjádřeného z rovnice (3.1). Při uvažování hraniční podmínky, že na stěně keyhole má tavenina teplotu varu, je hustota tepelného toku vyjádřena rovnicí:

$$q(r, \varphi) = (T_v - T_0) \lambda_{th} Pe' \left[ \cos \varphi + \frac{K_1(Pe' r)}{K_0(Pe' r)} \right], \quad (3.7)$$

kde  $T_v$  je teplota vypařování materiálu [K].

Pro získání hustoty tepelného toku v rovině  $x$ - $z$  se za válcovou souřadnici  $\varphi$  musí dosadit hodnoty  $\varphi=0$  pro přední stěnu a  $\varphi=\pi$  pro zadní stěnu. Potom se hustota tepelného toku pro přední stěnu určí z rovnice:

$$q(x_f) = (T_v - T_0) \lambda_{th} Pe' \left[ 1 + \frac{K_1(Pe' x_f)}{K_0(Pe' x_f)} \right]. \quad (3.8)$$

Pro zadní stěnu má rovnice hustoty tepelného toku tvar:

$$q(x_r) = (T_v - T_0) \lambda_{th} Pe' \left[ -1 + \frac{K_1(Pe' x_r)}{K_0(Pe' x_r)} \right]. \quad (3.9)$$

Vzdálenosti od osy paprsku  $x_r$  a  $x_f$  nebudou stejné. Na přední stěně keyhole bude větší tepelný tok z důvodu protiproudového efektu přenosu tepla prouděním, který je závislý na rychlosti svařování. Na přední stěnu keyhole dopadá velká část laserového paprsku a zadní stěna je formována pouze méně intenzivními částmi paprsku.

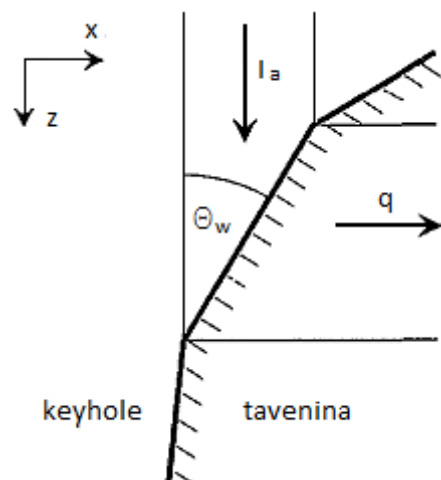
Náklon stěn keyhole v rovině  $x$ - $z$  se určí porovnáním hustoty tepelného toku do stěny keyhole s absorbovanou hustotou energie laserového paprsku (obr. 49). Za předpokladu, že k absorpci energie dochází pouze prostřednictvím Fresnelovy absorpce, určí se úhel sklonu stěny  $\Theta_w$  z následující rovnice:

$$\tan(\Theta_w) = \frac{q}{I_{a,Fr}}, \quad (3.10)$$

kde  $I_{a,Fr}$  je hustota energie absorbovaná Fresnelovou absorpcí [ $W \cdot m^{-2}$ ],

$\Theta_w$  – úhel sklonu stěny [ $^\circ$ ].

Geometrický profil přední stěny keyhole je formován především Fresnelovou absorpcí při prvním dopadu laserového paprsku. Ostatní odrazy mají přibližně stejný efekt na přední i zadní stěnu. Proto je náklon přední keyhole větší než náklon zadní stěny a výsledná keyhole je zahnutá. Inverzní Bremsstrahlung absorpce a vícenásobné odrazy nemají velký vliv na sklon stěn keyhole, ale podílejí se na přenosu tepla do keyhole a ovlivňují její hloubku. Při výpočtu úhlu  $\Theta_w$  lze zavést zjednodušení, že inverzní Bremsstrahlung absorpce a absorpce prostřednictvím vícenásobných odrazů působí pouze v horizontální rovině. Od hustoty tepelného toku do stěny keyhole se tudíž musí odečíst hustoty energie paprsku, které jsou absorbované těmito



Obr. 49 Náklon stěny keyhole [13]

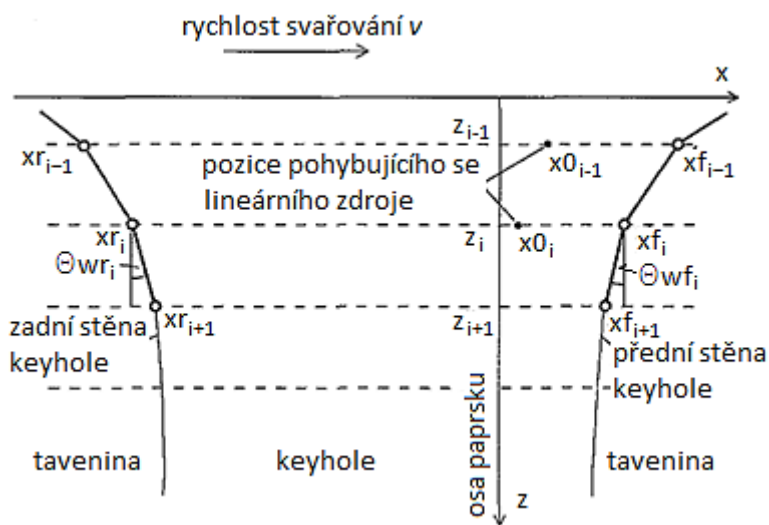
mechanismy. Tím se dodrží předpoklad, že sklon keyhole je ovlivňován pouze první Fresnelovou absorpcí. Úhel sklonu přední stěny se potom vypočítá podle tohoto vzorce:

$$\tan(\Theta_w) = \frac{q - I_{a,iB} - I_{a,mr}}{I_{a,Fr}}, \quad (3.11)$$

kde  $I_{a,iB}$  je hustota energie absorbována prostřednictvím inverzní Bremsstrahlung absorpcí [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ],

$I_{a,mr}$  – hustota energie absorbována vícenásobnými odrazy [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ].

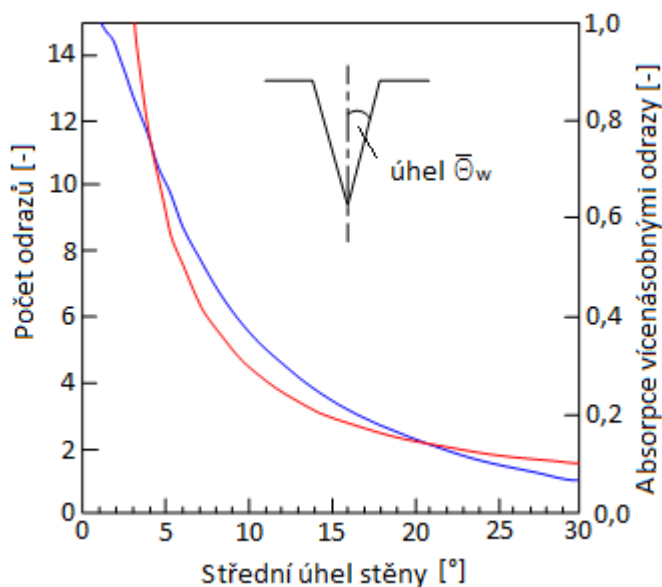
Profil stěny keyhole je počítán bod po bodu od povrchu materiálu dolů postupně po diskretních hodnotách  $z_i$  (obr. 50). Každý úhel stěny určuje hodnotu  $x$  dalšího elementu. Velice důležitá je pozice pohybujícího se lineárního zdroje, která je různá pro každý element, není totožná s osou paprsku a je určena vzdáleností mezi body  $x_f$  a  $x_r$ . Pro jednotlivé vzdálenosti existuje pouze jeden lineární zdroj s výkonem na jednotku hloubky, který definuje pozici  $x_0$  a tepelný tok podle rovnice 3.7. Spočítáním energetické rovnováhy se získá úhel stěn, který určí body přední a zadní stěny.



Obr. 50 Náčes výpočtu geometrie keyhole bod po bodu [13]

Výpočet se musí provádět dvakrát. Poprvé se spočítá profil keyhole za předpokladu uplatnění pouze Fresnelovy absorpce (rovnice 3.10), díky čemuž lze určit plyný stav (množství plazmatu, hustota plazmatu) uvnitř keyhole. Na základě získaného profilu keyhole a plynného stavu lze spočítat počet vícenásobných odrazů a inverzní Bremsstrahlung absorpci. V druhém kole se spočítá profil keyhole se zahrnutím zbylých absorpčních mechanismů (rovnice 3.11). Výpočet je ukončen po protnutí přední i zadní stěny.

Úhel stěny keyhole má velký vliv na počet vícenásobných odrazů. Při zavedení zjednodušení, že keyhole je kužel s vrcholovým úhlem  $2\bar{\Theta}_w$ , se počet odrazů zmenšuje se zvětšujícím se úhlem  $\bar{\Theta}_w$ . Závislost počtu odrazů v keyhole na úhlu sklonu stěny je na obr. 51 znázorněna červenou čarou. Modrá čára popisuje závislost absorpce energie vícenásobnými odrazy na úhlu sklonu stěny a platí, že při větším úhlu se absorpce zmenšuje.



Obr. 51 Vliv úhlu sklonu stěny na vícenásobné odrazy v keyhole [13]

Střední hodnotu počtu odrazů v závislosti na vrcholovém úhlu kužele lze spočítat z následující rovnice:

$$n_{mr} = \frac{\pi/2}{2\Theta_w} = \frac{\pi}{4\Theta_w} \quad (3.12)$$

Počet vícenásobných odrazů je také ovlivňován svařovací rychlostí, kdy větší rychlosti zvyšují úhel stěny a tím snižují počet odrazů (obr. 52). Naopak vyšší svařovací výkon zvětšuje počet vícenásobných odrazů.

### 3.3 Stabilita keyhole [7], [16], [18]

Keyhole je v základním pohledu nestabilní dutina, což je způsobeno vznikem taveniny na stěnách a pohybem keyhole. Za předpokladu stacionární (nepohyblivé) dutiny je její stabilita ovlivňována pouze silami od různých tlaků, které ji formují a způsobují pohyb taveniny. Jedná se o následující tlaky:

- hydrostatický tlak  $p_g$  [MPa],
- tlak povrchové napětí  $p_\sigma$  [MPa],
- vypařovací tlak  $p_v$  [MPa],
- hydrodynamický tlak  $p_h$  [MPa],
- radiační tlak  $p_r$  [MPa].

Vypařovací a radiační tlak se snaží udržet keyhole otevřenou, zatímco hydrodynamický, hydrostatický a povrchové napětí ji uzavírají. Jednotlivé tlaky jsou závislé na hloubce  $z$  a průměru keyhole  $r(z)$ . Ve všech bodech  $(r, z)$  na povrchu keyhole musí platit rovnováha:

$$p_v + p_r = p_\sigma + p_g + p_h \quad (3.13)$$

Hydrostatický a radiační tlak dosahují hodnot  $10^1$  Pa, zatímco tlak povrchového napětí a vypařovací tlak se pohybují okolo  $10^4$  Pa. Hydrodynamický tlak je závislý na rychlosti svařování. Při vysokých rychlostech může nabývat hodnot až  $10^4$  Pa, ale za předpokladu stacionární keyhole se spolu s hydrostatickým a radiačním tlakem zanedbává a rovnice rovnováhy se změni:

$$p_v \approx p_\sigma \quad (3.14)$$

Vypařovací tlak je ovlivňován Knudsenovou vrstvou, která vzniká na vypařovaném povrchu. Jedná se o oblast, kde dochází ke srážkám částic a tím plyn na rozhraní fází dosáhne translační rovnováhy. Knudsenova vrstva způsobuje přerozdělení rychlosti částic do Maxwellova rozdělení, čímž se zmenší míra vypařování. Vypařovací tlak se vypočítá podle vztahu:

$$p_v = \bar{m}(n_g u_g^2 - n_l u_l^2), \quad (3.15)$$

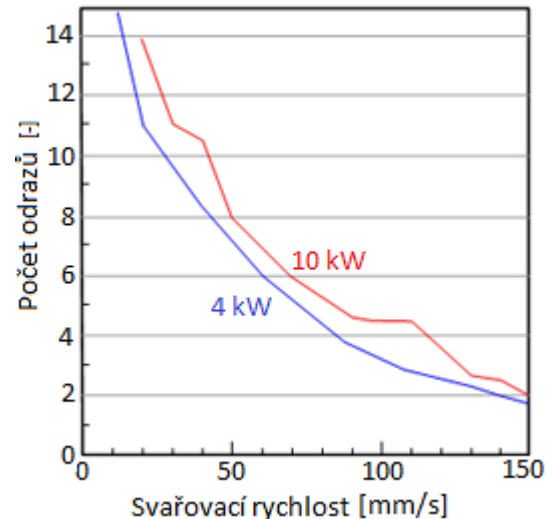
kde  $\bar{m}$  je hmotnost vypařovaných atomů [kg],

$n_g$  – hustota částic na povrchu Knudsenovy vrstvy [ $\text{m}^{-3}$ ],

$n_l$  – hustota částic na povrchu taveniny [ $\text{m}^{-3}$ ],

$u_g$  – rychlost částic v Knudsenově vrstvě [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$u_l$  – rychlost částic v tavenině [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].



Obr. 52 Vliv svařovacích parametrů na počet vícenásobných odrazů [13]

Tlak od povrchového napětí je závislý na geometrii keyhole a vypočítá se vztahem:

$$p_{\sigma} = \sigma \left[ \frac{1}{r_1(z)} + \frac{1}{r_2(z)} \right], \quad (3.16)$$

kde  $\sigma$  je povrchové napětí taveniny [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ],  
 $r_1(z), r_2(z)$  – poloměry keyhole [m].

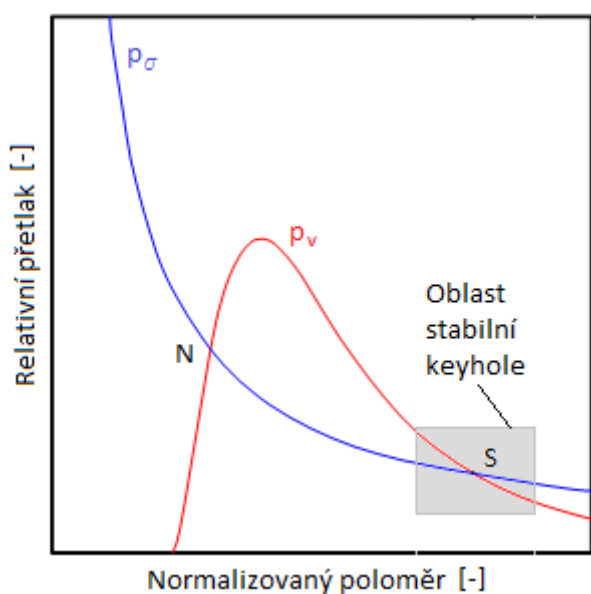
Stabilitu keyhole také ovlivňuje její geometrie, protože vypařovací tlak i tlak od povrchového napětí jsou závislé na tzv. normalizovaném poloměru, což je poměr poloměru keyhole k poloměru laserového paprsku v ohnisku  $a/w_0$ . Dále se zavádí pojem relativní přetlak:

$$p_r = \frac{p + p_0}{p_0}, \quad (3.17)$$

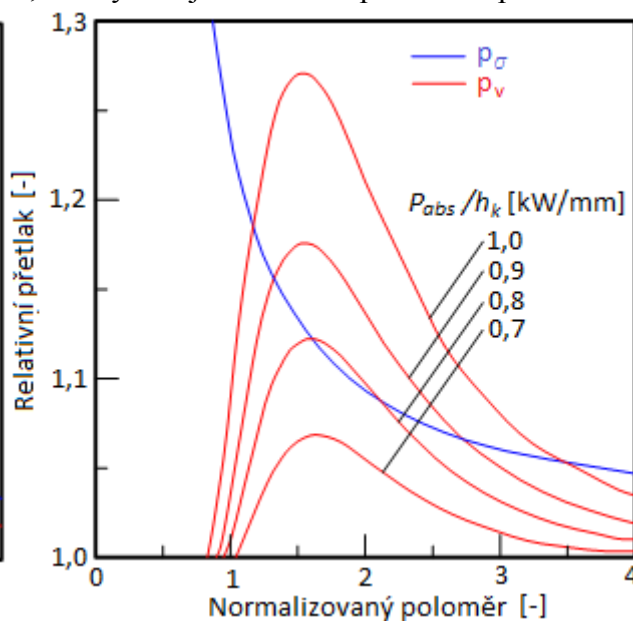
kde  $p_r$  je relativní přetlak [MPa],  
 $p_0$  – tlak okolí [MPa],  
 $p$  – hodnoty tlaku od povrchového napětí nebo vypařování [MPa].

Za předpokladu válcové keyhole byla určena obecná závislost relativního přetlaku na normalizovaném poloměru, která je zobrazená na obr. 53. Dosazením vypařovacího tlaku  $p_v$  (červená křivka) nebo tlaku od povrchového napětí  $p_{\sigma}$  (modrá křivka) za  $p$  ve vztahu (3.17) jsou definované jednotlivé závislosti zobrazené na obr. 53.

Při malém poloměru keyhole je povrchové napětí velké a vypařovací tlak malý. Proto je dutina nestabilní a je uzavírána. Se zvětšováním poloměru se povrchové napětí snižuje a naopak roste vypařovací tlak. V bodě  $N$  nastává nestabilní tlaková rovnováha mezi tlakem vypařovacím a tlakem od povrchového napětí. S dalším přenosem tepla do dutiny se její poloměr zvětšuje a vypařovací tlak stoupá. Za předpokladu Gaussova svazku a dosažení určitého poloměru dopadá paprsek hlouběji do dutiny, stěny jsou méně ohřívány a vypařovací tlak se snižuje. V okolí bodu  $S$  nastává stabilní rovnováha, kde další změny tlaku už nedokáží dostat keyhole z jejího rovnovážného stavu a poloměr osciluje kolem dosažené hodnoty. Na obr. 54 je vidět, že vypařovací tlak se zvyšuje s větším množstvím absorbovaného výkonu na jednotku hloubky  $P_{abs}/h_k$ . To má za následek, že keyhole je stabilní až při větším poloměru.



Obr. 53 Stabilita keyhole [18]

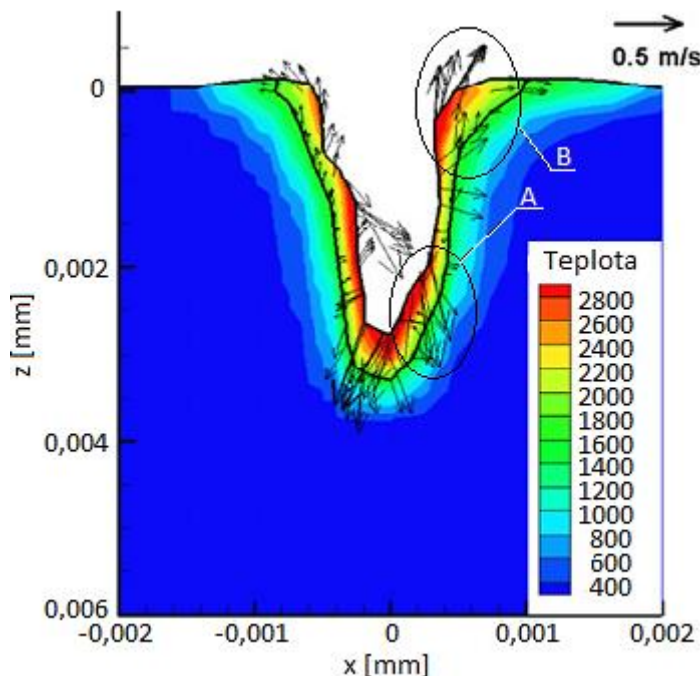


Obr. 54 Vliv výkonu na stabilitu keyhole [18]

### 3.4 Dynamika keyhole [5], [14], [15], [29], [44]

Dynamika taveniny na stěnách keyhole a za ní je ovlivněna svařovacími parametry, šířkou a délkou tavné lázně a samotnými vlastnostmi taveniny (materiálu). Pochopením této problematiky lze zabránit vzniku vnitřních vad.

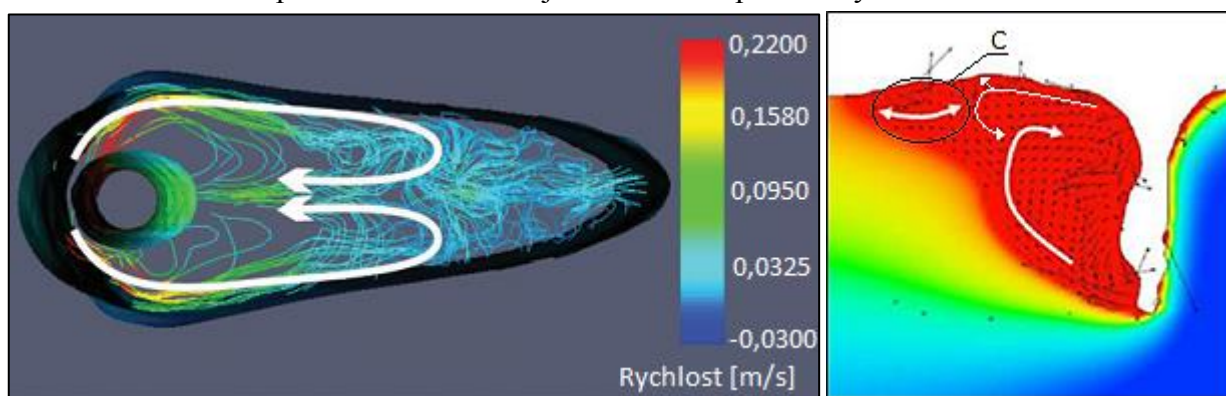
Dopadem laserového paprsku na materiál dochází k ohřevu materiálu a následnému prudkému vypařování. Vzniká tavenina, která je vypařovacím tlakem „vtlačována“ do materiálu a keyhole se prohlubuje. Na obr. 55 je naznačen pohyb taveniny na stěnách dutiny. V místě A dochází k odpařování materiálu a vzniklý vypařovací tlak vytlačuje taveninu v místě B do ústí keyhole. Na základě zákona akce a reakce tento tlak také tlačí taveninu z místa A dolů. K tomuto pohybu také přispívá povrchové napětí, které způsobuje Marangoniho tok taveniny dolů. Proudění taveniny do spodní části keyhole způsobuje další prohloubení, až dojde k oscilaci keyhole, především na přední stěně.



Obr. 55 Tok taveniny v keyhole [44]

Při svařování danou svařovací rychlostí dochází k přesunu taveniny za keyhole. Délka tavné lázně se v horní části postupně prodlužuje v opačném směru, než je směr svařování. Po dosažení určité hodnoty se délka tavné lázně už nemění a zůstává konstantní během celého procesu. Jak je vidět na obr. 56 a), vlivem posuvu keyhole a povrchového napětí dochází v horní části svarové lázně k Marangoniho toku taveniny za keyhole. Na rozhraní taveniny a ztuhlého materiálu (místo C) tavenina narazí na ztuhlý materiál a odraží se zpět (obr. 56 b). Tento odražený tok působí proti podpovrchovému Marangoniho toku, směřuje ho středu (obr. 56 a) a zároveň do spodní části tavné lázně (obr. 56 b). Nebo naopak může zvedat taveninu na povrch svaru (obr. 56 b).

Tavenina, která teče z přední stěny směrem dolů, narazí na konec keyhole, čímž dojde k jejímu usměrnění do prostřední části tavné lázně (z bočního pohledu, obr. 56 b). Zde na sebe narazí horní i spodní tok a tavenina je směřována zpět do keyhole.

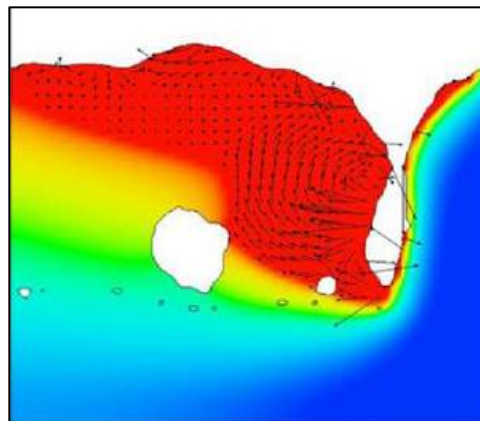


a) horní pohled

b) boční pohled

Obr. 56 Tok taveniny za keyhole [5],[29]

Otáčení horního a spodního toku do středu taveniny směrem ke keyhole má vliv na podélnou geometrii dutiny. Nejširší je vstup do keyhole, ve středu dochází vlivem zmíněného proudění ke zúžení a konec je opět širší (obr. 57). Z tohoto důvodu se keyhole uzavírá nejprve ve středu a ve spodní části vzniká bublina, která putuje do taveniny. V závislosti na svařovacích parametrech bubliny buď uniknou z tavné lázně, nebo zůstanou ve ztuhlém kovu a svar je pórovitý.

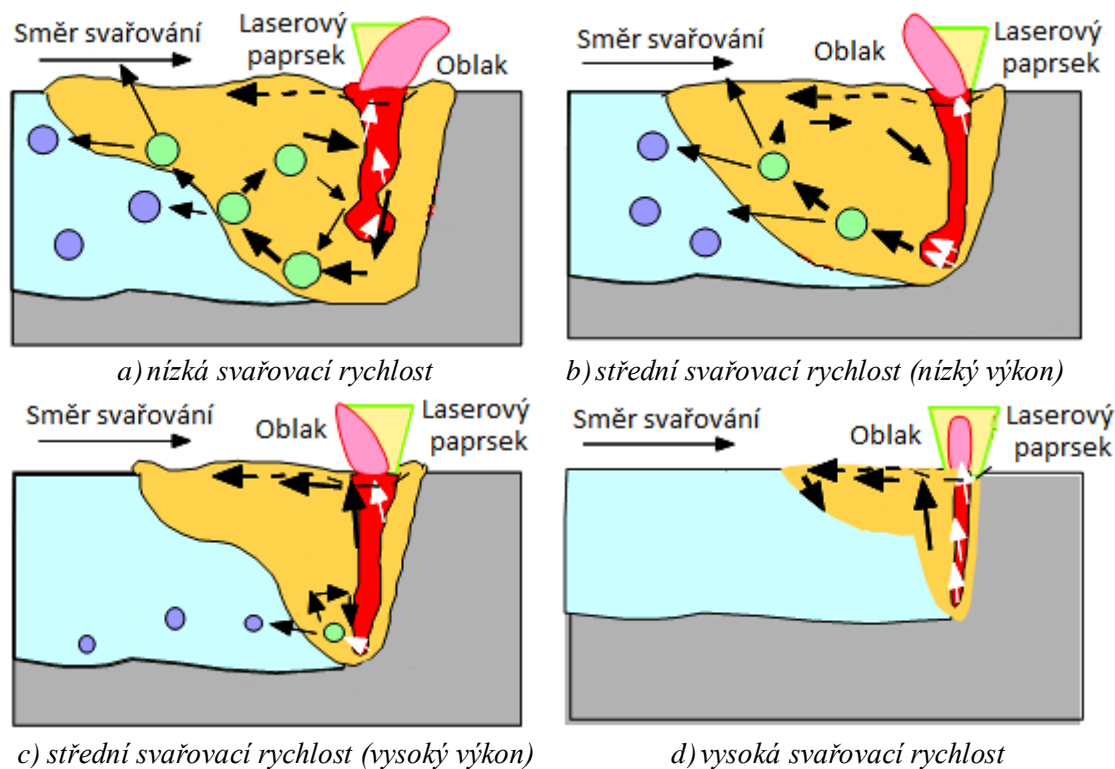


Obr. 57 Geometrie keyhole [5]

Rychlost svařování a svařovací výkon (vnesené teplo) má vliv na množství tavné lázně a její tvar. Tím jsou ovlivňovány i jednotlivé toky taveniny, uzavírání keyhole a pórovitost svaru (obr. 58). Při nízké svařovací rychlosti (obr. 58 a) se nataví velké množství materiálu a vzniká hodně bublin (zelené kolečko), které jsou unášeny taveninou. Všechny bubliny nestihnou uniknout z taveniny a zůstávají ve svaru v podobě pórů (modré kolečko).

Vyšší svařovací rychlost má za následek vznik menšího množství taveniny (obr. 58 b) a bublin, které jsou menší než u nízkých rychlostí. To je způsobeno užší keyhole a mírnějším spodním prouděním taveniny, které se projevuje pouze ve větší hloubce. Ke kolapsu dutiny tedy dochází hlouběji, díky čemuž je uzavíraný prostor menší. Tím pádem vznikají i menší bubliny (obr. 58 c), které se nachází pouze ve spodní části svarové lázně. Menší bubliny z taveniny unikají lépe a pórovitost je menší.

Při vysokých rychlostech už bubliny téměř nevznikají a výsledný svar je bez pórů (obr. 58 d). Spodní část tavné lázně se zkrátí a to způsobí, že tavenina proudí především podél zadní stěny keyhole. Je ovšem logické, že vysoké svařovací rychlosti způsobují menší hloubku průvaru.

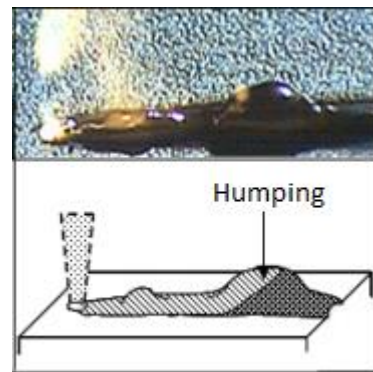


Obr. 58 Vliv svařovacích parametrů na proudění taveniny [14]

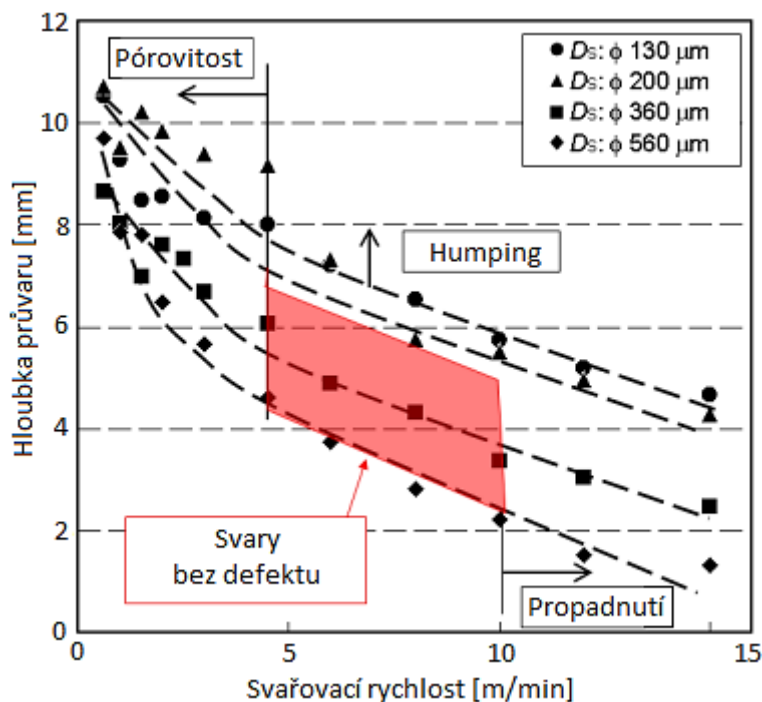
Na výslednou kvalitu i geometrii svarového spoje má vliv i šířka tavné lázně. Čím užší svarová lázeň je, tím větší je povrchové napětí působící na taveninu. Jestliže dojde k vzednutí taveniny na povrchu lázně, které je způsobeno odraženým zpětným tokem z místa C (obr. 56), může vlivem velkého povrchového napětí a působení laserem indukovaného obláčku dojít ke vzniku „humpingu“ (obr. 59).

„Humping“, pórovitost a další vady svarového spoje vznikají v závislosti na vlastnostech materiálu a nastavení svařovacích parametrů a jejich vzájemné kombinaci. Na obr. 60 je zobrazen vliv svařovací rychlosti a průměru stopy dopadajícího paprsku  $D_s$  na zmíněné vady při svařování korozivzdorné oceli X5CrNi18-10 laserovým paprskem o výkonu 6 kW. Průměr stopy paprsku je dán polohou ohniska vzhledem k povrchu materiálu a společně s výkonem má zásadní vliv na hustotu energie.

Při vysokých rychlostech svařování dochází k rozstříku taveniny a následnému propadnutí svaru. Naopak nízké rychlosti jsou nevýhodné z hlediska pórovitosti svarového spoje. Jako ideální se jeví „střední“ rychlosti, ale pouze při větších průměrech stopy dopadajícího paprsku. Malé průměry s vysokou hustotou energie mají za následek intenzivní vypařování, velkou dynamiku taveniny a následný „humping“.



Obr. 59 Humping [15]



Obr. 60 Vliv svařovacích parametrů na kvalitu svaru [15]



## 4 EXPERIMENT

K určení vlivu jednotlivých svařovacích parametrů na hloubku svaru a k verifikaci simulačního programu byl uskutečněn experiment, kdy byly svařovány oceli 1.0122 a 1.4301 dle ČSN EN 10027-2. Svařování bylo provedeno na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd ČR vláknovým laserem IPG YLS-2000 o výkonu 2 kW (obr. 61).



a) Laserový zdroj

b) Svařovací robot s laserovou hlavou

**Obr. 61** Laserové svařovací centrum

### 4.1 Materiálový model [2], [8], [12], [44]

Nelegovaná konstrukční ocel 1.0122 dle ČSN EN 10027-2 (S235 JRC+N dle ČSN EN 10027-1) s obvyklou jakostí má velice dobrou svařitelnost. Používá se na součásti strojů a konstrukcí, které jsou namáhány jak staticky, tak i dynamicky. Pevnostní charakteristiky jsou popsány v atestu v příloze č. 1. Chemické složení oceli je v tab. 3:

**Tab. 3** Chemické složení oceli 1.0122

Prvek	Obsah [%]	Prvek	Obsah [%]	Prvek	Obsah [%]
C	0,140	Cu	0,040	P	0,009
Si	0,010	Mo	0,002	N	0,006
Al	0,035	V	0,001	Cr	0,023
S	0,008	Mn	0,500	Ni	0,014

Pro určení svařitelnosti této oceli z hlediska chemického složení lze použít následující vzorec pro uhlíkový ekvivalent:

$$C_e = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cu}{13} + \frac{\%P}{2} + 0,0024 \cdot t \quad [\text{hm. \%}], \quad (5.1)$$

kde  $t$  je tloušťka materiálu [mm].

Výpočet:

$$C_e = 0,14 + \frac{0,5}{6} + \frac{0,023}{5} + \frac{0,014}{15} + \frac{0,002}{4} + \frac{0,04}{13} + \frac{0,009}{2} + 0,0024 \cdot 10 = 0,261 \text{ hm. \%}$$

Vypočtený uhlíkový ekvivalent  $C_e$  je menší než 0,5, a proto lze provádět svařování bez zvláštních opatření.

Korozivzdorná ocel 1.4301 dle ČSN EN 10027-2 (X5CrNi18-10 dle ČSN EN 10027-1) je legovaná chromem a niklem a má austenitickou matici. Oproti feritickým ocelím má přibližně o 50 % větší tepelnou roztažnost a o 30 % nižší tepelnou vodivost, které způsobují větší deformace a napětí po svařování. Austenitická struktura zajišťuje lepší tažnost a houževnatost.

Svařitelnost chrom-niklové austenitické oceli je ovlivněna především:

- náchylností k tvorbě teplých trhlin;
- precipitací karbidů chromu způsobující mezikrystalovou korozi;
- zkřehnutím ke kterému dochází vznikem  $\sigma$ -fáze (křehká intermetalická sloučenina chromu).

V příloze č. 2 je atest k této korozivzdorné oceli, kde jsou popsány základní vlastnosti tohoto materiálu. Chemické složení oceli 1.4301 je v tab. 4.

**Tab. 4** Chemické složení oceli 1.4301

Prvek	Obsah [%]	Prvek	Obsah [%]
C	0,030	Ni	8,035
Cr	18,090	P	0,031
Mn	1,750	S	0,003
N	0,064	Si	0,391

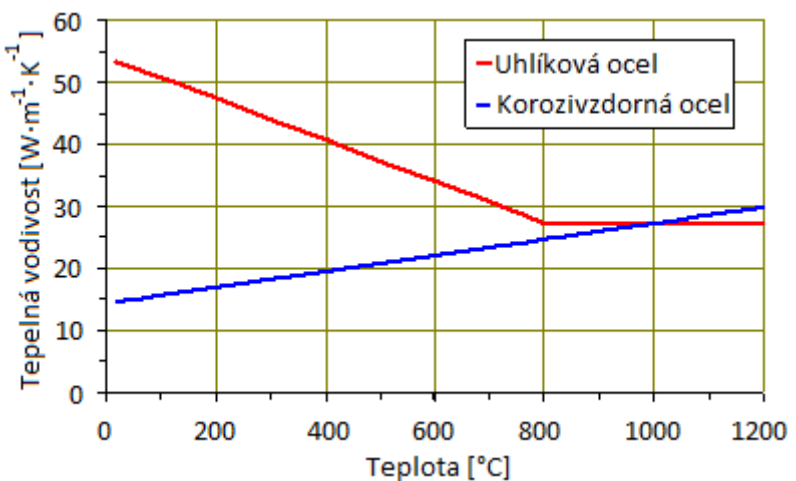
Velkou roli při svařování hraje tepelná vodivost, která ovlivňuje rychlost odvodu tepla. Pokud je tepelná vodivost vysoká a vnesené teplo příliš malé, je odvod tepla velice rychlý a vzniká křehká martenzitická struktura.

Při laserovém svařování má tato vlastnost vliv na formování keyhole a to především u ocelí s nižší tepelnou vodivostí (korozivzdorné oceli). U těchto ocelí dochází k intenzivnímu ohřevu a vypařování materiálu, kvalita svaru je náchylná na přesné nastavení svařovacích parametrů (obr. 56). Při špatně zvolených parametrech může docházet k pórovitosti, „humpingu“ nebo propadu svaru.

Konstrukční nelegovaná ocel má tepelnou vodivost přibližně  $\lambda_{th}=55 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , korozivzdorná austenitická ocel  $\lambda_{th}=16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Z hlediska simulace je problém, že tepelná vodivost není konstantní, ale mění se s teplotou materiálu (obr. 62).

Tepelná vodivost uhlíkové oceli klesá přibližně do teploty 800 °C a pak už zůstává konstantní. Během ohřevu materiálu se tedy pohybuje v rozsahu od  $55 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  do  $27 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Závislost tepelné vodivosti na teplotě u korozivzdorné oceli má naprosto opačný průběh. Se zvyšující se teplotou se zvyšuje i tepelná vodivost a to po celou dobu ohřevu materiálu. Z hodnoty  $16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  při pokojové teplotě se tepelná vodivost může zvýšit až na  $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  při teplotě 1200 °C.



**Obr. 62** Závislost tepelné vodivosti na teplotě [2]

## 4.2 Postup svařování a určení vlivu svařovacích parametrů

Svary určené k ověření vlivu jednotlivých parametrů na geometrii keyhole (především hloubku) a k verifikaci simulace byly u obou ocelí zhotovené v plechu o tloušťce 10 mm, aby bylo zajištěno, že nedojde k úplnému průvaru. Z časových důvodů však byly zhotoveny výbrusy všech svarů pouze u nelegované oceli 1.0122 a u korozivzdorné oceli 1.4301 byl vyhotoven jen výbrus k verifikaci simulace. Jednotlivé svary jsou zobrazené na obr. 63 a základní svařovací parametry jsou v tabulce 5.

Tab. 5 Svařovací parametry

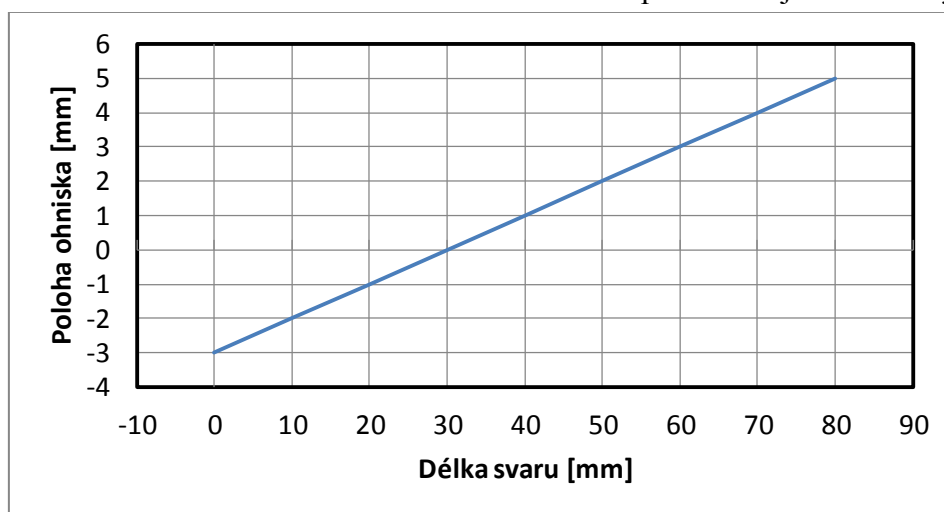
Číslo svaru	Svařovací výkon $P$ [W]	Svařovací rychlost $v$ [ $mm \cdot s^{-1}$ ]
1	2000	10
2	2000	20
3	2000	30
4	1000	10
5	1000	20
6	1000	30

Poloha ohniska se u každého svaru měnila od hodnoty -3 mm nad povrchem materiálu až do +5 mm pod povrchem. Svary byly dlouhé 80 mm a poloha ohniska se měnila ve výše zmíněném intervalu lineárně během procesu svařování (obr. 64). Jako ochranný plyn byl použit argon o průtoku  $Q_p = 12 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Z horního pohledu na povrch svaru lze pozorovat, že především u svarů s číslem 1, 2 a 3, kde byl použit výkon 2 kW, docházelo k humpingu a výstřiku svarové lázně. To bylo způsobené příliš vysokým vneseným teplem, které vyvolalo velkou dynamiku svarové lázně a následné vady svaru. Šířka průvaru se při konstantním svařovacím výkonu zmenšuje s větší svařovací rychlostí. Nejširší je průvar vždy na začátku, protože se ještě nedosáhlo požadované rychlosti a nestihl vzniknout plazmový obláček tlumící laserové záření. Na konci svaru se u všech průvarů objevil koncový kráter.



Obr. 63 Průvary oceli 1.0122



Obr. 64 Závislost polohy ohniska na délce svaru

Hloubky průvaru byly vyhodnocovány pouze od polohy -2 mm do +4 mm. Počáteční poloha ohniska nebyla vyhodnocována, ze stejných důvodů, které způsobují větší šířku svaru a zároveň i větší hloubku. Konečná poloha se nevažovala kvůli vzniku koncového kráteru a nedodržení požadované rychlosti, které bylo způsobené dobrzdováním svařovacího robotu.

Hloubka průvarů byla vyhodnocena na podélných makrovýbrusech, které byly zhotoveny na metalografické pile, ale z časových důvodů nebyly už vyleštěny do vysoké kvality povrchu. K určení hloubky svaru to však stačilo.

Na obr. 65 jsou makrovýbrusy při svařovacím výkonu 2 kW. U všech třech rychlostí docházelo při svařování k humpingu, což způsobilo oscilaci hloubky svaru kolem určité hodnoty. Na makrovýbruse pro svar číslo 2 je vidět, jak při začátku svařování dojde k provaření do mnohem větší hloubky než v ostatních částech svaru, protože se ještě nedosáhlo požadované rychlosti a nevznikl obláček plazmatu.



a) svar číslo 1 ( $P=2 \text{ kW}$ ,  $v=10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )



b) svar číslo 2 ( $P=2 \text{ kW}$ ,  $v=20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )



c) svar číslo 3 ( $P=2 \text{ kW}$ ,  $v=30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

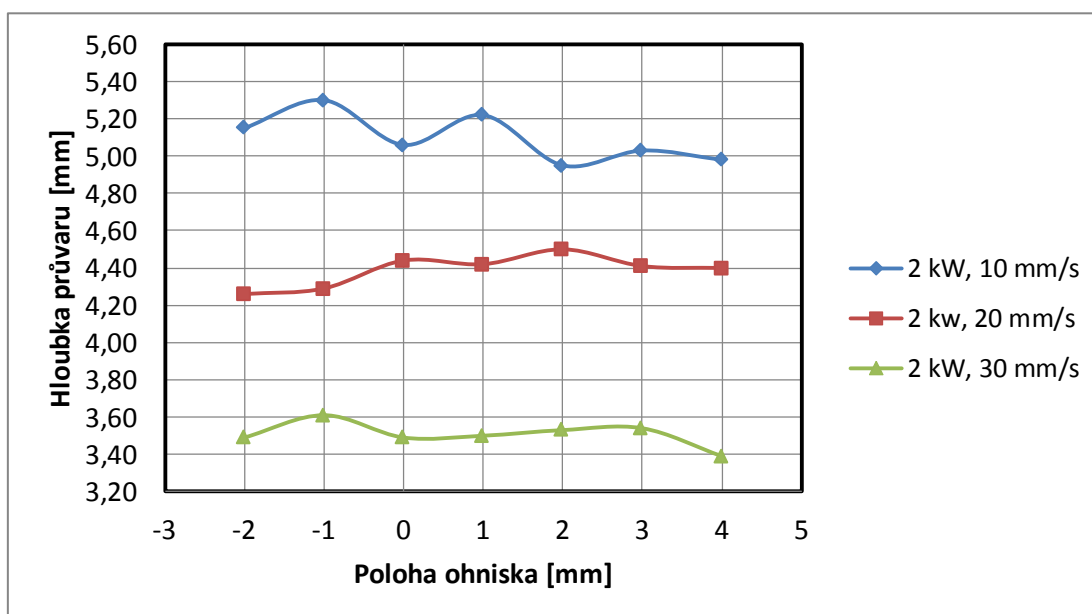
**Obr. 65** Makrovýbrusy průvaru při svařovacím výkonu 2 kW

Dosažené hloubky průvaru jsou zobrazené v tabulce 6.

**Tab. 6** Hloubka průvaru v závislosti na poloze ohniska při svařovacím výkonu 2 kW

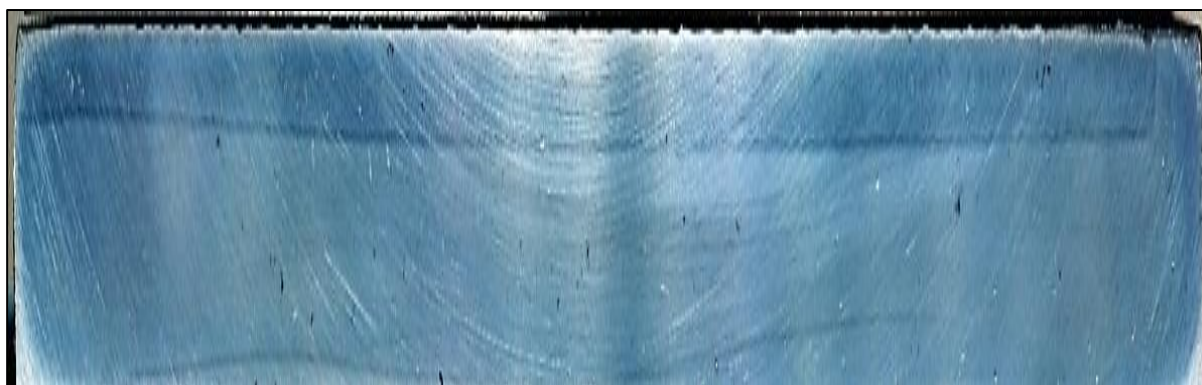
Poloha ohniska [mm]	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
Hloubka průvaru č. 1 [mm]	5,15	5,30	5,06	5,22	4,95	5,03	4,98
Hloubka průvaru č. 2 [mm]	4,26	4,29	4,44	4,42	4,50	4,41	4,40
Hloubka průvaru č. 3 [mm]	3,49	3,61	3,49	3,50	3,53	3,54	3,39

Závislost hloubky provaření na poloze ohniska pro jednotlivé průvary je zobrazena na obr. 66. Zde je velice názorně vidět, že pokud jsou parametry svařovací výkon a svařovací rychlost nastaveny tak, že specifické vnesené teplo je příliš velké, dochází k humpingu a změna polohy ohniska nemá téměř žádný vliv na výslednou hloubku. Proto také průběh těchto závislostí nemá typický tvar, jako při vhodně zvolených parametrech. Čím větší je specifické vnesené teplo (zjednodušeně poměr výkonu a rychlosti svařování), tím více se humping projevuje.



**Obr. 66** Závislost hloubky provaření při svařovacím výkonu 2 kW

Při nastavení svařovacího výkonu na hodnotu 1 kW nedocházelo ani k humpingu ani k výstřiku taveniny. Hloubka průvaru se plynule měnila s polohou ohniska a svary byly z hlediska vad kvalitnější (obr. 67 a 68).



a) svar číslo 4 ( $P=1 \text{ kW}$ ,  $v=10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )

**Obr. 67** Makrovýbrusy průvaru při svařovacím výkonu 1 kW – 1. část



a) svar číslo 5 ( $P=1\text{ kW}$ ,  $v=20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )



b) svar číslo 6 ( $P=1\text{ kW}$ ,  $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

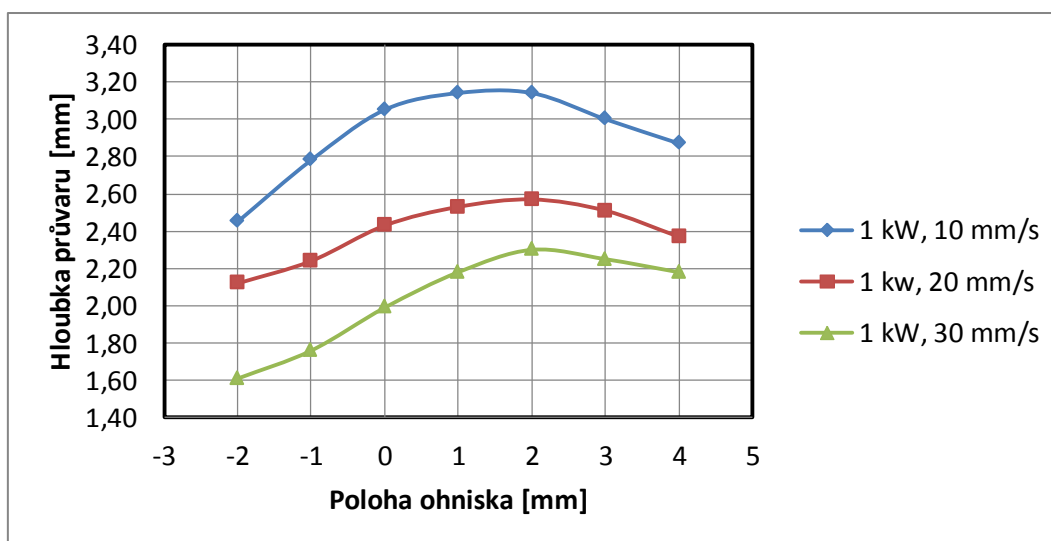
**Obr. 68** Makrovýbrusy průvaru pro svařovací výkon 1 kW – 2. část

Výsledky svařování při jednotlivých svařovacích rychlostech jsou zobrazené v tabulce 7.

**Tab. 7** Hloubka průvaru v závislosti na poloze ohniska při svařovacím výkonu 1 kW

Poloha ohniska [mm]	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
Hloubka průvaru č. 4 [mm]	2,45	2,78	3,05	3,14	3,14	3,0	2,87
Hloubka průvaru č. 5 [mm]	2,12	2,24	2,43	2,53	2,57	2,51	2,37
Hloubka průvaru č. 6 [mm]	1,61	1,76	1,99	2,18	2,30	2,25	2,18

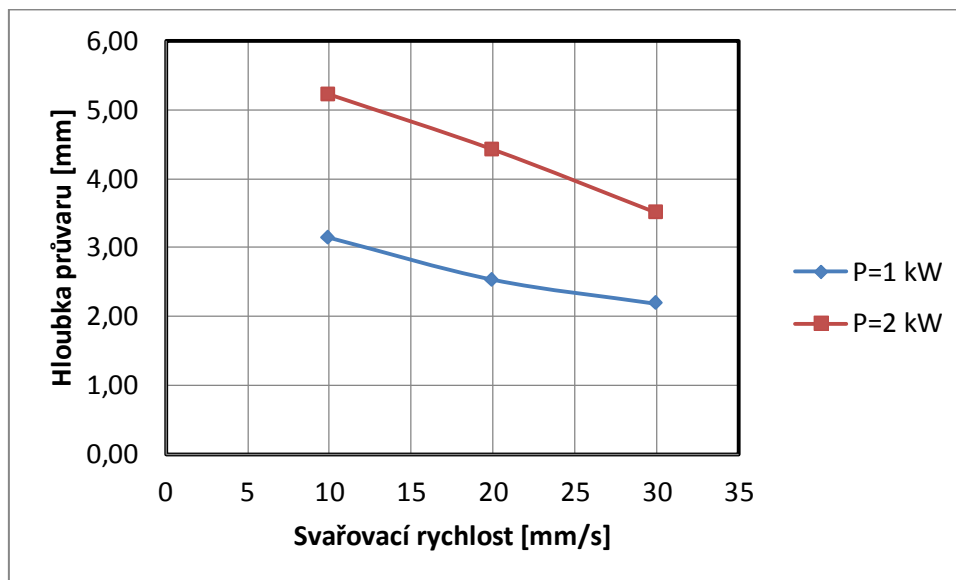
Závislost hloubky provaření na poloze ohniska je zobrazena na obr. 69.



**Obr. 69** Závislost hloubky provaření při svařovacím výkonu 1 kW

Výsledné závislosti hloubky průvaru na poloze ohniska (obr. 69) při svařování výkonem 1 kW mají typický průběh a největších hloubek se dosahuje při poloze ohniska +2 mm pod povrchem materiálu. Obecně lze říci, že hlubších průvarů se dosáhne vždy při polohách ohniska umístěných pod povrchem materiálu než nad povrchem.

I přesto, že při svařovacím výkonu 2 kW docházelo k výstřiku taveniny a k humpingu, vliv rychlosti svařování na hloubku provaření byl téměř stejný jako při výkonu 1 kW, kdy tyto vady nevznikly. Zvyšující se svařovací rychlost snižovala hloubku provaření, jak je zobrazené na obr. 70. Dále lze na tomto grafu vidět, že díky vyššímu výkonu se dosáhlo hlubších průvarů. Jejich kvalita však byla menší než při svařování s nižším výkonem.



**Obr. 70** Vliv svařovací rychlosti a výkonu na hloubku provaření

## 5 SIMULACE [13], [37]

Simulace vzniku keyhole je důležitá z hlediska ověření principiálních teorií jejího vzniku, tvarování a přenosu tepla do materiálu. Dále lze díky ní velice dobře posoudit vliv jednotlivých parametrů na svařovací proces.

Nezákladnější dělení simulací je na 2D a 3D simulace. 3D simulace jsou výhodné z hlediska menšího množství zjednodušujících předpokladů, ale jsou velice náročné na hardwarové vybavení, programování a výpočetní čas. Naopak 2D simulace probíhají rychleji a při správně zvolených zjednodušujících předpokladech lze dosáhnout velice přesných výsledků.

Simulační program použitý v této práci byl vytvořen v matematickém softwaru Matlab, ve kterém lze velice dobře naprogramovat vícenásobné odrazy paprsku v keyhole. Špatně se zde však programuje dynamika kehole a taveniny. Jedná se o 2D simulaci keyhole v osovém podélném řezu svaru se zjednodušujícími předpoklady:

- laserový paprsek má Gaussovo rozložení energie;
- divergence paprsku daná fokusačním optickým systémem je uvažována;
- keyhole je symetrická vzhledem k ose  $x$  ve směru pohybu paprsku;
- útlum energie paprsku se řídí Beer-Lambertovým zákonem;
  - koeficient absorpce plazmatu je konstantní.
- výška obláčku plazmatu se mění s hloubkou keyhole a je jí rovna;
- vícenásobné odrazy jsou řešeny na základě geometrické optiky;
- počet vícenásobných odrazů v keyhole je konstantní;
- absorpce energie na stěnách keyhole probíhá prostřednictvím Fresnelovy absorpce;
- dynamika keyhole je omezena pouze na společný pohyb keyhole s laserovým paprskem;
- tlaky vznikající v keyhole se neuvažují;
- vlastnosti materiálu (především tepelná vodivost) se s teplotou nemění.

Základní vstupující parametry do simulace, kterými lze ovlivnit výslednou geometrii keyhole a které byly nastavovány během verifikace, jsou následující:

- svařovací výkon  $P$  [kW],
- svařovací rychlost  $v$  [m·min<sup>-1</sup>],
- ohnisková délka fokusační čočky  $f$  [mm],
- ohnisková délka kolimační čočky  $f_k$  [mm],
- poloha ohniska vzhledem k povrchu materiálu  $s$  [mm],
- koeficient absorpce plazmatu  $\alpha$  [m<sup>-1</sup>],
- tepelná vodivost materiálu  $\lambda_{th}$  [W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>],
- koeficient roztažení svazku  $b_c$  [-].

Materiál je reprezentován 2D maticí, která tvoří síť nekonečně malých oblastí, dále označovaných jako pixelů. Jednotlivým pixelům jsou přiřazeny vlastnosti těmito materiálovými parametry:

- hustota  $\rho$  [kg·m<sup>-3</sup>],
- měrná tepelná kapacita  $c$  [J·K<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>],
- tepelná vodivost  $\lambda_{th}$  [W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>],
- latentní teplo tavení  $L_t$  [J·kg<sup>-1</sup>],
- latentní teplo vypařování  $L_v$  [J·kg<sup>-1</sup>],
- a úhlově závislý koeficient Fresnelovy absorpce  $\alpha_m$  [m<sup>-1</sup>].



## 5.1 Matematický model a algoritmus výpočtu [13], [37]

Matematický model byl vytvořen na základě Kaplanova matematického modelu, který je uveden v kapitole 3.2 a který byl z důvodu mírně jiných přístupů lehce modifikován.

Laserový paprsek generovaný vláknovým laserem má Gaussovo rozložení energie, které je popsáno modifikovanou rovnicí 1.3:

$$I(r, z) = I_0 \left( \frac{w_0}{w(z)} \right)^2 \exp \left( - \frac{2r^2}{w^2(z)} \right). \quad (5.1)$$

Útlum energie laserového paprsku, který nastává prostřednictvím inverzní Bremsstrahlung absorpce, je definován Beer-Lambertovým zákonem:

$$I(\delta) = I_{\delta 0} \exp(-\alpha \cdot \delta), \quad (5.2)$$

kde  $I_{\delta 0}$  je hustota energie před průchodem plazmatem [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],  
 $\delta$  – tloušťka plazmatu [m],  
 $I_{\delta}$  – hustota energie po průchodu plazmatem o tloušťce  $\delta$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],  
 $\alpha$  – koeficient absorpce plazmatu [ $\text{m}^{-1}$ ].

Při dopadu laserového svazku na povrch svařovaného materiálu se jeho absorpce určí podle již zmíněné rovnice 1.10, která je  $A=I-R$ . V tomto simulačním programu je odrazivost popsána Fresnelovým úhlem a počítána pomocí vztahu:

$$R = \frac{1}{2} \left[ \frac{1 + (1 - \varepsilon \cos \gamma)^2}{1 + (1 + \varepsilon \cos \gamma)^2} + \frac{\varepsilon^2 - 2\varepsilon \cos \gamma + 2 \cos^2 \gamma}{\varepsilon^2 + 2\varepsilon \cos \gamma + 2 \cos^2 \gamma} \right], \quad (5.3)$$

kde  $\gamma$  je úhel mezi dopadajícím paprskem a normálovým vektorem povrchu [ $^\circ$ ],  
 $\varepsilon$  – parametr závislý na typu laseru a elektrických vlastnostech materiálu [-].

Absorbovaná hustota energie představuje tepelný zdroj  $Q(\vec{r}, t)$  v časově závislé rovnici tepla popisující teplotní pole materiálu  $T(\vec{r}, t)$  :

$$\rho C \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \lambda_{th} \nabla^2 T(\vec{r}, t) + Q(\vec{r}, t), \quad (5.4)$$

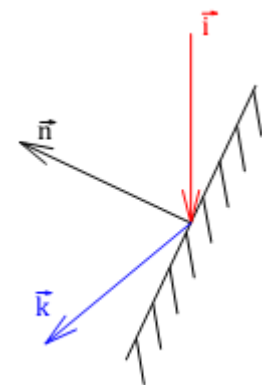
kde  $\rho$  je hustota materiálu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  
 $C$  – tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

Počet vícenásobných odrazů v keyhole je uvažován vždy stejný. Jejich množství bylo stanoveno na hodnotu 12, při níž dojde k absorpci veškeré energie laserového paprsku. Vektor odraženého paprsku je zobrazen na obr. 71 a určí se z rovnice:

$$\vec{k} = \vec{i} + 2(-\vec{i} \cdot \vec{n}) \vec{n}, \quad (5.5)$$

kde  $\vec{k}$  je vektor odraženého paprsku,  
 $\vec{i}$  – vektor dopadajícího paprsku,  
 $\vec{n}$  – normálový vektor stěny keyhole.

Průběh výpočtu lze rozdělit na několik základních částí. Nejprve se vypočítá rozložení energie v paprsku podle rovnice 5.1 a poloměr pasu paprsku podle rovnice 1.6. Intenzita energie je tlumená obláčkem plazmatu na základě Beer-Lambertova zákona a rozostření paprsku je určeno koeficientem roztažení paprsku  $b_c$ . Při dopadu svazku na povrch materiálu se určí Fresnelova absorpce a celkové množství dopadající energie je úměrné integraci intenzity energie podle velikosti pixelu.



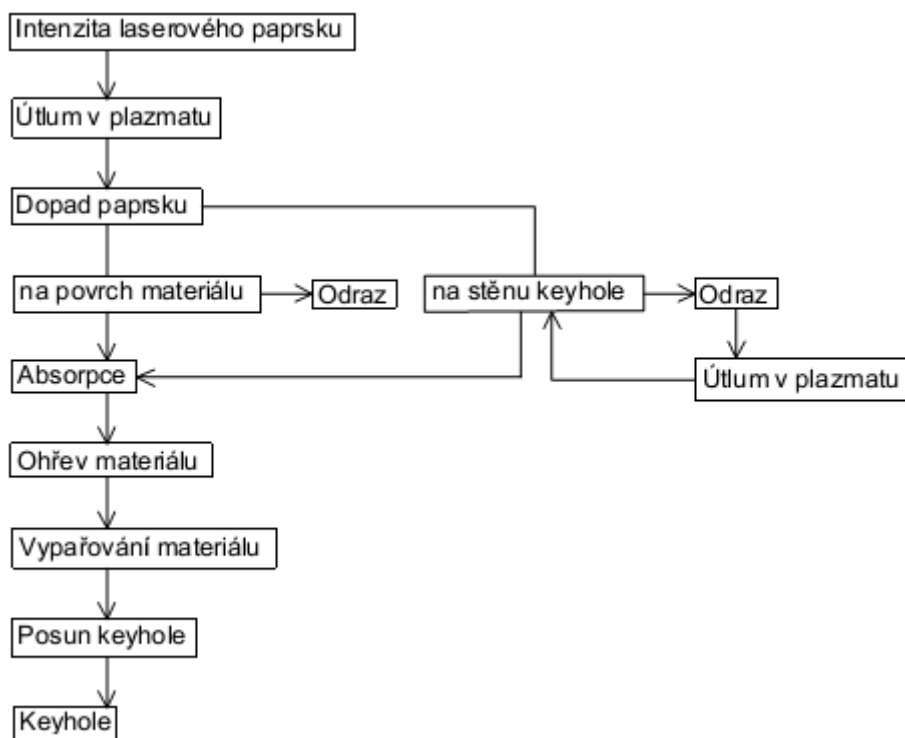
**Obr. 71** Odrážení paprsku

a vzájemnou polohou pasu svazku a pixelu. Normálový vektor je kolmý na stěnu keyhole, která je vytvořena polynomickou interpolací jednotlivých pixelů. Tyto dva směry určují úhel dopadu paprsku, ze kterého lze vypočítat absorbovanou energii podle rovnice 3.10. Energie svazku není všechna absorbována, a proto se paprsek odráží ve směru dle rovnice 5.5 a dochází k vícenásobným odrazům, dokud se neabsorbují veškeré energie paprsku nebo se neodrazí mimo keyhole. Vícenásobné odrazy jsou také tlumeny prostřednictvím inverzní Bremsstrahlung absorpce plazmatu na základě Beer-Lambertova zákona.

Celková energie absorbovaná při prvním dopadu i vícenásobných odrazech definuje teplotní pole. Pokud pixel dosáhne teploty vypařování, je smazán. Neuvažuje se však, že by docházelo k úbytku hmotnosti.

Keyhole se v závislosti na rychlosti svařování „pohybuje“ společně s laserovým paprskem. Pokud paprsek urazí vzdálenost rovnou šířce pixelu, je pixel na povrchu přední stěny přesunut na povrch zadní stěny. Tím je velice jednoduše simulován horizontální tok taveniny kolem keyhole.

Na obr. 72 je znázorněno blokové schéma shmuující zjednodušený postup výpočtu.



Obr. 72 Blokové schéma postupu simulace

## 5.2 Verifikace simulace

Verifikace simulace byla provedena na nelegované konstrukční oceli 1.0122 a korozivzdorné austenitické oceli 1.4301. Použité byly následující svařovací parametry:

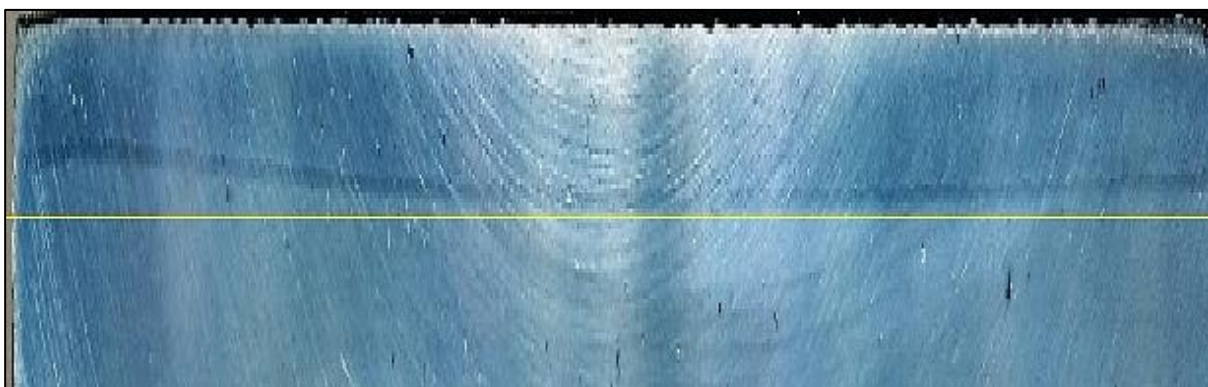
- svařovací výkon  $P=1 \text{ kW}$ ,
- svařovací rychlost  $v=10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- poloha ohniska vzhledem k povrchu materiálu  $s=-3\div+5 \text{ mm}$ ,
- průtok ochranného plynu (argonu)  $Q_p=12 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Při vyhodnocení hloubky provaření byly vynechány krajní polohy  $-3 \text{ mm}$  nad povrchem materiálu a  $+5 \text{ mm}$  pod povrchem a to ze stejných důvodů, které byly zmíněné v kapitole 4.2.

Velkou roli v procesu svařování hraje plazma, které tlumí a rozostřuje laserové záření. Koeficient absorpce však během svařování nebyl nijak změřen a ani v simulačním softwaru nebyl stanoven žádný matematický model pro jeho výpočet, a proto se hledal takový koeficient absorpce, při kterém se dosáhlo největší shody simulace a experimentu. Na základě vědeckých článků se určoval koeficient absorpce plazmatu v rozmezí  $\alpha=200\div350\text{ m}^{-1}$ .

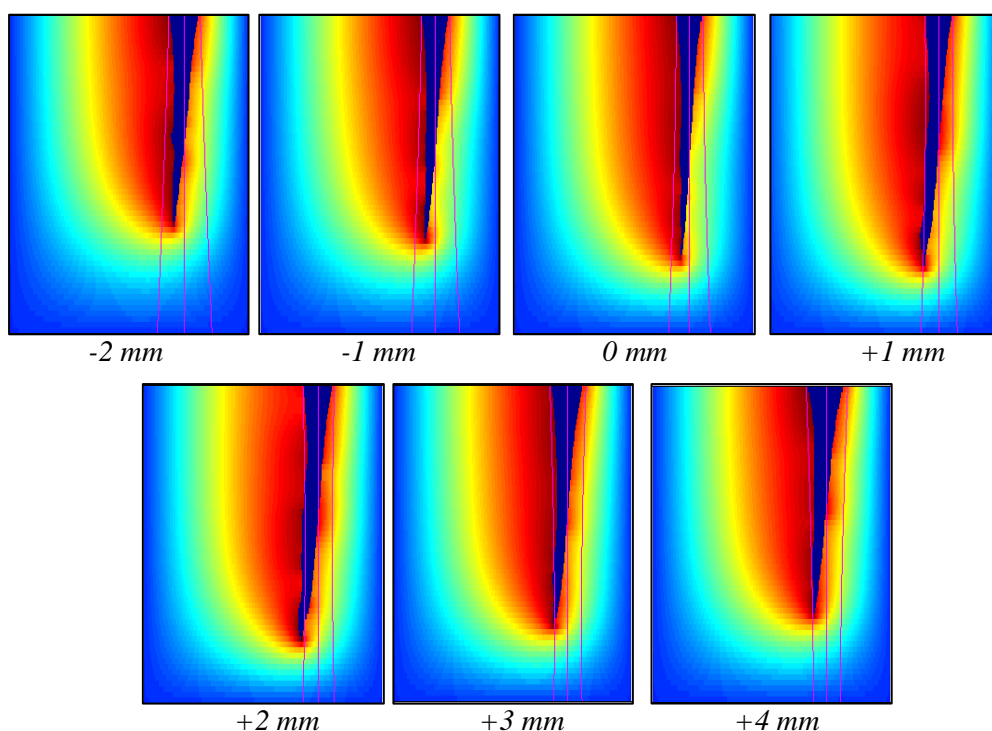
Celkový počet kroků výpočtů pro jedny svařovací parametry (svařovací výkon, svařovací rychlost a jednu polohu ohniska) byl odladěn na 3 miliony, kdy docházelo k ustálení hloubky keyhole a s dalšími kroky výpočtu už se neměnila. Doba tohoto výpočtu byla průměrně kolem 30 hodin.

K vyhodnocení provaření u nelegované konstrukční oceli 1.0122 byl zhotoven podélný makrovýbrus zobrazený na obr. 73. Fotografie byla roztažena ve směru tloušťky materiálu. Při všech polohách ohniska se dosáhlo kvalitního svaru bez vad.



*Obr. 73 Makrovýbrus průvaru nelegované oceli*

V simulačním modelu se uvažovala konstantní tepelná vodivost nelegované oceli  $\lambda_{th}=55\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Koeficient absorpce plazmatu byl odladěn na hodnotu  $\alpha=250\text{ m}^{-1}$ . Simulace probíhala z hlediska simulačního modelu bez větších problémů a vznik keyhole i výsledný tvar lze považovat za reálný. Nasimulované keyhole pro různé polohy ohniska jsou zobrazené na obr. 74.



*Obr. 74 Výsledné nasimulované keyhole*

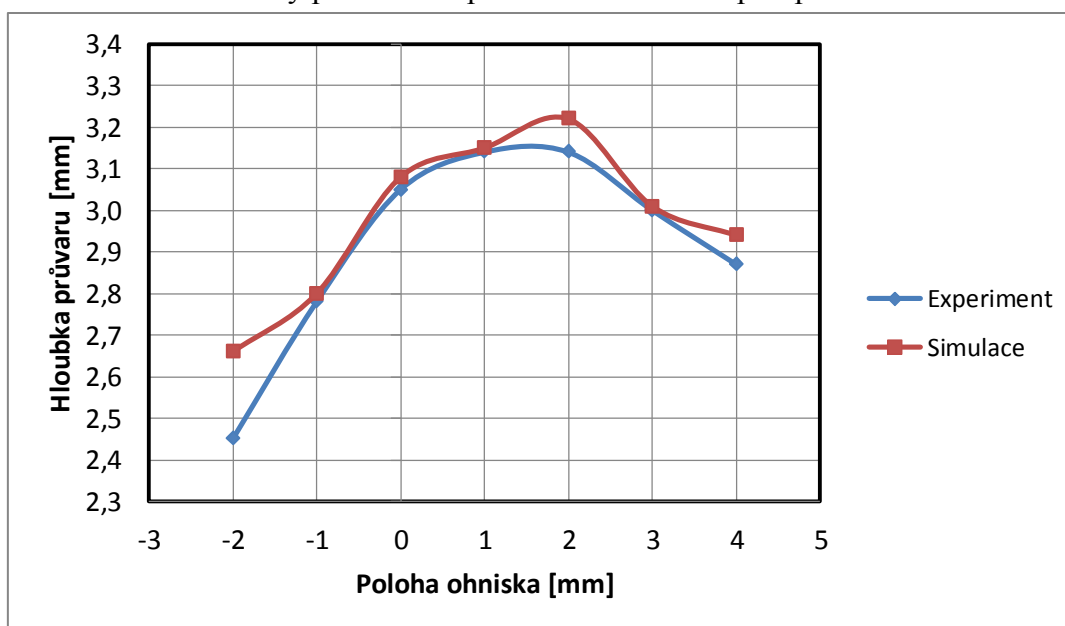
Fialovými čarami je na obrázcích znázorněn laserový paprsek, červenou barvou je označen materiál, který dosáhl teploty tavení. Tmavě modrá barva zobrazuje keyhole. Na jednotlivých obrázcích lze pozorovat, že paprsek dopadá nejprve na přední stěnu, což způsobuje větší náklon přední stěny, který odpovídá realitě.

Dosažené hodnoty hloubek provaření při experimentu a simulaci jsou v tabulce 8.

**Tab. 8** Porovnání dosažených hloubek při experimentu a simulaci u oceli 1.0122

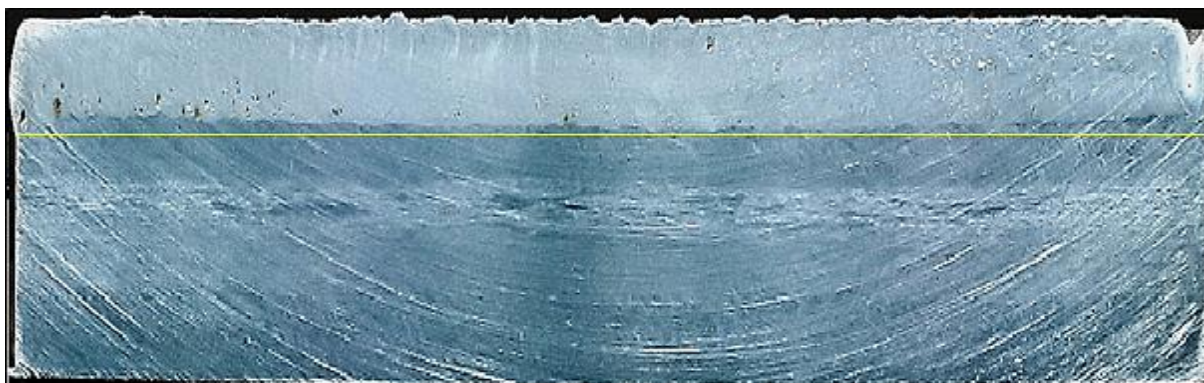
Poloha ohniska [mm]		-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
Hloubka průvaru [mm]	Experiment	2,45	2,78	3,05	3,14	3,14	3,00	2,87
	Simulace	2,66	2,80	3,08	3,15	3,22	3,01	2,94

Na obr. 70 je zobrazeno porovnání dosažených hloubek při simulaci a experimentu. Z grafu vyplývá, že se dosáhlo velké shody, kdy největší rozdíl je přibližně 0,2 mm při poloze ohniska -2 mm. Tvar křivky přibližně odpovídá teoretickému předpokladu.



**Obr. 75** Porovnání dosažených hloubek při experimentu a simulaci u oceli 1.0122

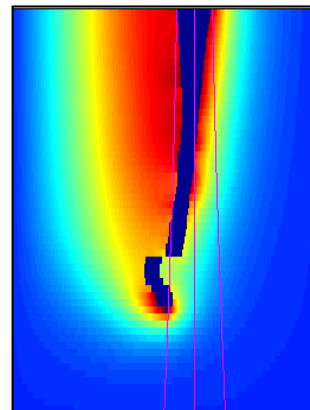
Vyhodnocení hloubky průvaru u korozivzdorné austenitické 1.4301 bylo provedeno na podélném makrovýbrusu zobrazeném na obr. 76. Fotografie byla roztažena ve směru tloušťky materiálu. Na obr. 76 je vidět pórovitost svaru, která nastala především kolem polohy ohniska +2 až +1 mm nad povrchem materiálu. V rozsahu poloh +1 mm až -2 mm došlo k humpingu, což ovlivnilo hloubku provaření.



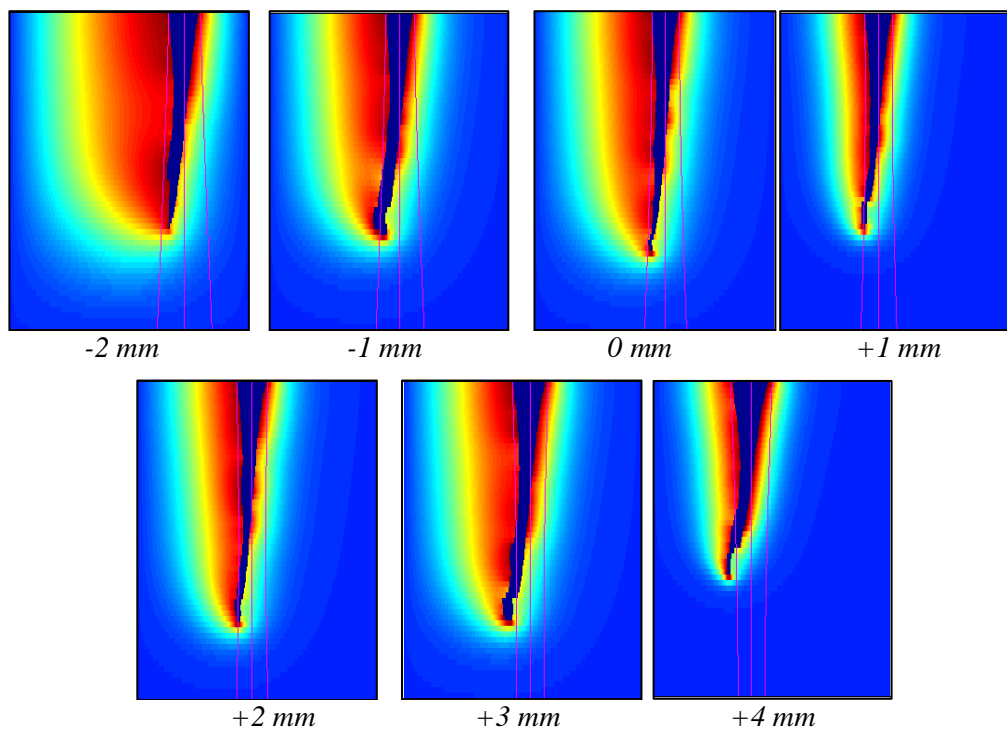
**Obr. 76** Makrovýbrus průvaru korozivzdorné oceli

Při simulaci korozivzdorné austenitické oceli 1.4301 se předpokládalo, že koeficient absorpce bude vyšší z důvodu vzniku většího množství plazmatu, které je způsobené intenzivnějším vypařováním. To je dané nižší tepelnou vodivostí materiálu. V simulačním modelu se uvažovala tepelná vodivost  $\lambda_{th}=16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Po provedení prvních simulací se ukázalo, že i při nejvyšším koeficientu absorpce  $\alpha=350 \text{ m}^{-1}$  se dosahovalo mnohem větších hloubek. Kolem kroku výpočtu 1600000 se však začala oddělovat spodní část keyhole, jak je zobrazené na obr. 77. Růst hloubky dutiny se ale nezastavil a dále pokračoval v oddělené části. Tento jev je dále nazýván kolaps keyhole.

I přesto, že dynamika keyhole a proudění taveniny je v simulačním modelu zahrnuta pouze přenášením pixelů z přední stěny na zadní, lze při velice zjednodušeném pohledu přirovnat tento jev k „zavírání“ keyhole, které je popsáno a zobrazeno na obr. 57 v kapitole dynamika keyhole. Nedojde však k vytvoření bubliny a ukončení růstu hloubku. Pokud se tedy odečetla hloubka v kroku výpočtu těsně před kolapsem keyhole, dosahovalo se ve většině poloh ohniska reálných výsledků.



Výsledné keyhole, které jsou zobrazeny na obr. 78, jsou zachyceny vždy těsně před jejich kolapsem. Pouze při poloze ohniska -2 mm nad povrchem materiálu proběhla simulace bez kolapsu keyhole a její výsledný tvar je zachycen po 3000000 krocích výpočtu.



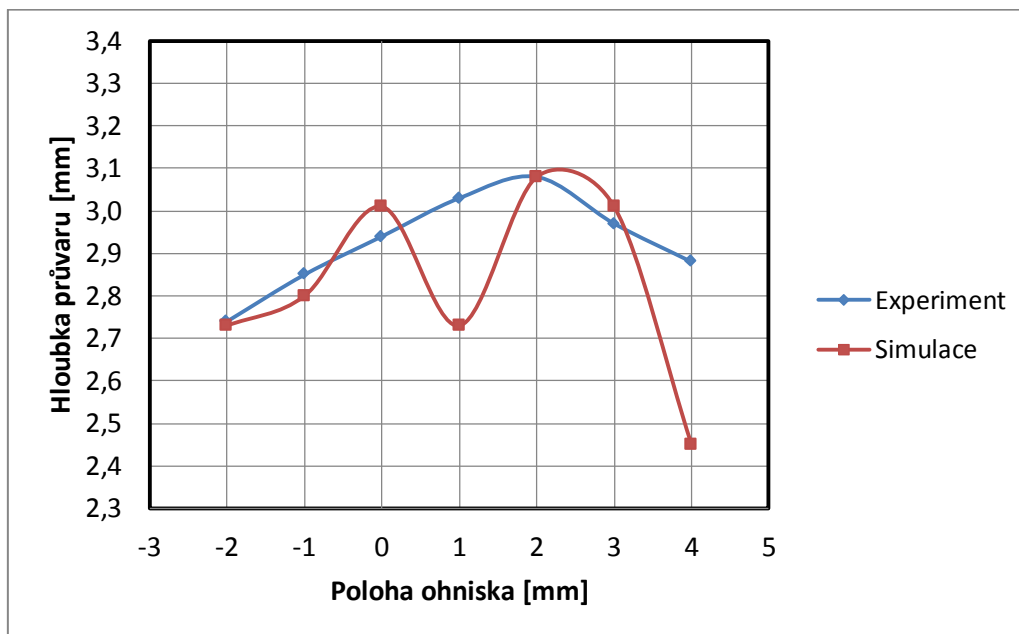
**Obr. 78** Výsledné nasimulované keyhole

Při polohách ohniska +1 mm a +4 mm nad povrchem materiálu došlo ke kolapsu keyhole velice brzo, a proto se také v těchto polohách nejvíce liší dosažené hloubky v experimentu a v simulaci. Tyto výsledky jsou v tabulce 9.

**Tab. 9** Porovnání dosažených hloubek při experimentu a simulaci u oceli 1.4301

Poloha ohniska [mm]		-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
Hloubka průvaru [mm]	Experiment	2,74	2,85	2,94	3,03	3,08	2,97	2,88
	Simulace	2,73	2,80	3,01	2,73	3,08	3,01	2,45

Závislost hloubky průvaru na poloze ohniska pro experiment i simulaci je zobrazena na obr. 79. Na rozdíl od svaru v nelegované oceli, není změna hloubky v závislosti na poloze ohniska tak výrazná (modrá křivka). Tento jev lze přisoudit vzniku humpingu a většího množství plazmatu. Plazma rozostřuje a tlumí laserové záření, což společně s humpingem způsobí mírný průběh závislosti hloubky průvaru na poloze ohniska a menší maximální hloubku provaření než tomu bylo u oceli 1.0122. Na základě nižší tepelné vodivosti korozivzdorné oceli se předpokládalo, že odvod tepla bude pomalejší a dosáhne se větší hloubky provaření.



Obr. 79 Závislost hloubky průvaru na poloze ohniska

Průběh závislosti hloubky keyhole na poloze ohniska pro simulaci je velice ovlivněn výsledky pro polohu +1 mm a +4 mm nad povrchem materiálu, kdy keyhole zkolabovala velice brzo. Její hloubka byla pak velice malá. Kvůli těmto dvěma polohám má výsledná křivka úplně jiný tvar než křivka pro experiment. V ostatních pěti polohách se hloubka paroplynové dutiny přibližovala hloubce provaření při experimentu.

### 5.3 Zhodnocení simulačního modelu

Na základě provedené verifikace simulace lze říci, že zvolením vhodných svařovacích parametrů pro daný materiál, které zaručí vznik kvalitního svaru, poskytuje simulační model dostatečně přesné výsledky. Při svařovacích parametrech  $P=1 \text{ kW}$  a  $v=10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , které byly použity pro svařování nelegované konstrukční oceli 1.0122, se dosáhlo poměrně velké shody. Díky tomu, že svařovací parametry byly vhodně zvolené k tomuto materiálu, nebyla dynamika taveniny příliš velká a nedocházelo k výstřiku taveniny ani k humpingu. Proto nemělo zanedbání dynamiky taveniny v simulačním modelu téměř žádný vliv na výsledek. Výsledná křivka závislosti hloubky keyhole na poloze ohniska měla podobný tvar jako křivka, která byla získána vyhodnocením experimentu, přičemž největší rozdíl mezi dosaženými hloubkami byl 0,2 mm.

Naopak při svařování korozivzdorné austenitické oceli 1.4301 způsobilo výše zmíněné nastavení svařovacích parametrů příliš velké vnesené teplo do svaru, které mělo za následek velkou dynamiku taveniny. To bylo dané mnohem menší tepelnou vodivostí korozivzdorné oceli. Na základě téměř úplného zanedbání dynamiky v simulačním modelu docházelo při simulaci k nereálnému chování a deformacím keyhole. K zajištění schopnosti interpretovat výsledky simulace, byl změněn postup vyhodnocení a bylo dosaženo částečné shody

experimentu a simulace. Tvar výsledná křivky závislosti hloubky keyhole na poloze ohniska však neodpovídal tvaru křivky z experimentu. To bylo hlavně způsobené velkou neshodou při poloze ohniska +1 a +4 mm pod povrchem materiálu.

Simulační model obsahuje určitá zjednodušení a předpoklady, které zhoršují výsledky především při velké dynamice taveniny. Jedná se hlavně tyto zjednodušení a s nimi spojené problémy:

- 2D simulace nedovoluje uplatnit dynamiku taveniny, která musí být v matematickém modelu popsána 3D Navier-Stokesovými rovnicemi. To má za následek deformace keyhole v případě simulace, kdy by mělo vzniknout velké množství taveniny. Navíc nelze uplatnit působení jednotlivých tlaků, které ovlivňují proudění taveniny.
- Vlastnosti materiálu (především tepelná vodivost) je konstantní a s teplotou se nemění. Poté vypočítané teplotní pole v materiálu je nepřesné. Nutno podotknout, že zatím nikdo přesně nepopsal, jak se mění vlastnosti materiálu při teplotách přibližujících se teplotě vypařování;
- Koeficient absorpce plazmatu je v simulačním modelu přímo nastavován a není pro něj vytvořen žádný matematický model, přes který by se počítal. Tento koeficient má velký vliv na výsledek simulace a nelze s jistotou říci, že námi zvolená hodnota je ta správná, nezkresluje výsledek a neodvrací pozornost od jiných problémů. Změřit experimentálně koeficient absorpce plazmatu uvnitř keyhole se však zatím nikomu nepodařilo;

Tato zjednodušení však zkracují výpočetní čas simulací a umožňují je spouštět na běžných počítačích.

Velkou předností tohoto simulačního modelu je počítání drah vícenásobných odrazů paprsku s uvažováním divergence paprsku, která se mění s parametry fokusační optiky. Ve většině dosavadních simulačních modelů je používán pouze rovnoběžný laserový svazek.

## 6 ZÁVĚR

Diplomová práce je koncipována jako teoretický rozbor problematiky vzniku keyhole a vlivu svařovacích parametrů na její geometrii. Jednotlivé teoretické předpoklady formování této paroplynové dutiny byly odzkoušeny na simulačním modelu.

2D simulační model vytvořený v prostředí Matlab představuje relativně jednoduchý nástroj pro ověření správnosti jednotlivých teoretických představ o vzniku keyhole a umožňuje ověřit vliv svařovacích parametrů na její geometrii. K verifikaci simulace byl proveden experiment, kde byla svařována nelegovaná konstrukční ocel 1.0122 a korozivzdorná austenitická ocel 1.4301. Pro oba materiály byly použity stejné svařovací parametry: výkon  $P=1 \text{ kW}$ , rychlost  $v=10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  a poloha ohniska se měnila plynule během svařování  $s=(-3\div+5) \text{ mm}$  (krajní polohy nebyly při vyhodnocení uvažovány).

Verifikace prostřednictvím svařování nelegované oceli ukázala, že výsledky simulace dosahují velké shody s experimentem při vhodně zvolených svařovacích parametrech pro daný materiál. Naopak při svařování korozivzdorné oceli bylo vnesené teplo dané těmito parametry příliš velké, protože tepelná vodivost materiálu je nižší. Vzniklá svarová lázeň měla velkou dynamiku a ve svaru vznikaly vady. V simulačním modelu není dynamika taveniny brána v úvahu, z důvodu nemožnosti použití 3D Navier-Stokesových rovnic popisujících proudění taveniny. Zanedbání změny tepelné vodivosti s teplotou a přímé nastavování koeficientu absorpce plazmatu může taktéž vnášet nepřesnosti do výsledků simulací. Na základě těchto verifikací lze vyvodit závěr, že simulační model je vhodný pouze pro simulace svařování, kdy vzniklá tavenina nemá velkou dynamiku.

Dále byly provedeny svary různými parametry svařování, na kterých byl ověřován vliv jednotlivých parametrů na hloubku průvaru. Bylo zjištěno, že pokud při svařování dojde k humpingu, vliv polohy ohniska je menší nebo téměř žádný než při průvaru bez této vady. Obecně humping zmenšuje hloubku provaření. Vliv svařovacího výkonu a svařovací rychlosti zůstává vždy stejný bez ohledu na vznik humpingu. Výkon hloubku svaru zvětšuje a rychlost ji naopak zmenšuje.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. ALDA, Javier. Laser and Gaussian Beam Propagation and Transformation. In: *Encyclopedia of Optical Engineering* [online]. Marcel Dekker, Inc., 2003 [cit. 2013-01-19]. Dostupné z: [http://147.96.1.15/info/euoptica/org/pagper/jalda/docs/libr/laserandgaussian\\_eoe\\_03.pdf](http://147.96.1.15/info/euoptica/org/pagper/jalda/docs/libr/laserandgaussian_eoe_03.pdf)
2. BAILEY, Colin. One Stop Shop in Structural Fire Engineering. UNIVERSITY OF MANCHESTER. *University of Manchester* [online]. 2005 [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/materialInFire/Steel/StainlessSteel/thermalProperties.htm>
3. Beam shaping in diffractive optics. *HOLOR* [online]. 2013 [cit. 2013-01-19]. Dostupné z: [http://www.holor.co.il/Diffractive\\_Optics\\_Products/Diffractive\\_Beam\\_Shapers/BeamShaper-Tophat.htm](http://www.holor.co.il/Diffractive_Optics_Products/Diffractive_Beam_Shapers/BeamShaper-Tophat.htm)
4. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
5. CHO, Won-Ik, Suck-Joo NA, Claus THOMY a Frank VOLLERTSEN. Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding. In: *Journal of Materials Processing Technology*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2012, s. 262-275. Dostupné z: [http://ac.els-cdn.com/S0924013611002706/1-s2.0-S0924013611002706-main.pdf?\\_tid=7a188694-bd8d-11e2-be0c-00000aacb35e&acdnat=1368642791\\_c1bbdde5e3fec61e2fb5080c4071430](http://ac.els-cdn.com/S0924013611002706/1-s2.0-S0924013611002706-main.pdf?_tid=7a188694-bd8d-11e2-be0c-00000aacb35e&acdnat=1368642791_c1bbdde5e3fec61e2fb5080c4071430)
6. ČSN EN 1011-6. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 6: Laserové svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
7. DULEY, Walter. *Laser Welding*. New York: A Wiley-Interscience publication, 1999. ISBN 0-471-24679-4.
8. FOLDYNA, Václav et al. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd.* Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3.
9. HAVRILLA, David a Rüdiger BROCKMANN. Třetí generace diskových laserů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009, č. 11 [cit. 2013-02-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/treti-generace-diskovych-laseru.html>
10. CHMELÍČKOVÁ, Hana a Hana ŠEBESTOVÁ. Pulsed Laser Welding. In: DUMITRAS, Dan C. *Nd Yag Laser* [online]. 2012 [cit. 2013-03-05]. ISBN 978-953-51-0105-5. Dostupné z: [http://cdn.intechopen.com/pdfs/31438/InTech-Pulsed\\_laser\\_welding.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/31438/InTech-Pulsed_laser_welding.pdf)
11. Introduction to Laser Technology. *CVI Laser Optics Melles Griot* [online]. 2007 [cit. 2013-02-16]. Dostupné z: [http://www.cvimellesgriot.com/products/Documents/TechnicalGuide/Laser\\_Guide.pdf](http://www.cvimellesgriot.com/products/Documents/TechnicalGuide/Laser_Guide.pdf)
12. Jakosti ocelí. *Feromat* [online]. ©2010 [cit. 2013-04-06]. Dostupné z: [http://www.feromat.cz/jakosti\\_oceli](http://www.feromat.cz/jakosti_oceli)

13. KAPLAN, Alexander. A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 1994 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: [http://iopscience.iop.org/0022-3727/27/9/002/pdf/0022-3727\\_27\\_9\\_002.pdf](http://iopscience.iop.org/0022-3727/27/9/002/pdf/0022-3727_27_9_002.pdf)
14. KATAYAMA, Seiji a Yousuke KAWAHITO. Elucidation of phenomena in high-power fiber laser welding and development of prevention procedures of welding defects. In: *Proc. SPIE 7195, Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications, 71951R* [online]. 2009 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=807482>
15. KAWAHITO, Yousuke, Naoyuki MATSUMOTO, Youhei ABE a Seiji KATAYAMA. Relationship of laser absorption to keyhole behavior in high power fiber laser welding of stainless steel and aluminum alloy. In: *Journal of Materials Processing Technology*. Maryland Heights: Elsevier B.V., 2012, s. 1563-1568. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401361100104X>
16. Knudsen layer and liquid-vapor boundary conditions. *Manufacturing Research Laboratory* [online]. 2010 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.mrl.columbia.edu/ntm/level3/ch03/html/l3c03s06.html>
17. KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (2) - svařovací lasery. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 11. 4. 2012, č. 4 [cit. 2013-02-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>
18. KROOS, J, U GRATZKE a G SIMON. Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 1993 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/0022-3727/26/3/021/>
19. KUO, Tsung-Yuan a Yong-Ding LIN. Effects of Different Shielding Gases and Power Waveforms on Penetration Characteristics and Porosity Formation in Laser Welding of Inconel 690 Alloy. In: *Materials Transactions* [online]. 2007 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/48/02/219.pdf>
20. LAPŠANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. *Portál moderní fyziky* [online]. 13. 12. 2010 [cit. 2013-02-09]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
21. Laser processing CO<sub>2</sub> laser. *Trumpf* [online]. 2007 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.trumpf-machines.com/en/about-trumpf/media-center/library/laser-and-laser-processing.html>
22. Laser welding. *ACSYS Lasertechnik* [online]. ©2000-2010 [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: <http://www.acsys.de/en/laserwelding/metalwelding.html>
23. Laser Welding Concept. *College of Engineering, Purdue University* [online]. ©2001 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: [https://engineering.purdue.edu/LAMPL/research\\_welding.html](https://engineering.purdue.edu/LAMPL/research_welding.html)

24. LEE, Jae Y, Sung H KO, Dave F FARSON a Choong D YOO. Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 1993 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/0022-3727/35/13/320/>
25. MINAŘÍK, Václav. Technologické lasery. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. 29.12.2007 [cit. 2013-02-02]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>
26. NOVÁK, Miroslav. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *LAO* [online]. 15.3.2011 [cit. 2013-02-02]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aktualne/clanky-a-zpravy/serial-o-laserech/serial-hlavni-prumyslove-lasery.htm>
27. NOVÁK, Miroslav. Remote welding – svařovací metoda s vysokou produktivitou. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 3. 3. 2010, roč. 2010, č. 3, s. 38 [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/remote-welding-svarovaci-metoda-s-vysokou-produktivitou.html>
28. NĚMEČEK, Stanislav. MATEX PM. Proč jsou svary laserem jiné?. In: *Využití laseru v průmyslu 2011*. Plzeň, 2011.
29. OTTO, Andreas, Holger KOCH, Karl-Heinz LEITZ a Michael SCHMIDT. Numerical Simulations - A Versatile Approach for Better Understanding Dynamics in Laser Material Processing. In: *Lasers in Manufacturing 2011 - Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing*. Mnichov: Elsevier Ltd., 2011, s. 11-20. Dostupné z: [http://ac.els-cdn.com/S1875389211000824/1-s2.0-S1875389211000824-main.pdf?\\_tid=18c832de-bd8a-11e2-aafd-00000aab0f02&acdnat=1368641339\\_b15c4ece35b9bd85a6073adfebb160c1](http://ac.els-cdn.com/S1875389211000824/1-s2.0-S1875389211000824-main.pdf?_tid=18c832de-bd8a-11e2-aafd-00000aab0f02&acdnat=1368641339_b15c4ece35b9bd85a6073adfebb160c1)
30. PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CEREM, 2003. ISBN 80-214 2409-5.
31. PETERKA, Pavel. Vláknové lasery - jasné světlo ze skleněných nitek. *Ústav fotoniky a elektroniky* [online]. 2005 [cit. 2013-02-05]. Dostupné z: <http://www.ufe.cz/~peterka/novehrady/vlaknovelasery.pdf>
32. QUINTINO, L., A. COSTA, R. MIRANDA, D. YAPP, V. KUMAR a C.J. KONG. Welding with high power fiber lasers – A preliminary study. In: *Materials & Design*. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2007, 1231–1237. Dostupné z: [http://ac.els-cdn.com/S0261306906000185/1-s2.0-S0261306906000185-main.pdf?\\_tid=21105606-bd8f-11e2-89c3-00000aab0f01&acdnat=1368643502\\_73bc0014f4b04323955c597a99acde19](http://ac.els-cdn.com/S0261306906000185/1-s2.0-S0261306906000185-main.pdf?_tid=21105606-bd8f-11e2-89c3-00000aab0f01&acdnat=1368643502_73bc0014f4b04323955c597a99acde19)
33. Principles of Laser Action. *World of Lasers* [online]. 2009 [cit. 2013-01-28]. Dostupné z: <http://www.worldoflasers.com/laserprinciples.htm>
34. ROUBÍČEK, Martin. Laserové svařování. *Airliquide* [online]. 16. 9. 2008 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: <http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/laserove-svarovani49120.pdf>

35. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění - 4. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č. 3 [cit. 2013-01-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
36. Svařování vysokovýkonovým laserem. *Pemit* [online]. 2011 [cit. 2013-02-02]. Dostupné z: [http://www.pemit.cz/assets/files/pdf/brooks\\_gp011\\_cz.pdf](http://www.pemit.cz/assets/files/pdf/brooks_gp011_cz.pdf)
37. ŠARBORT, Martin, Libor MRŇA, Šimon ŘEŘUCHA a Petr JEDLIČKA. Dependence of energy distribution in the keyhole on optical parameters of the focusing system in laser welding. In *Conference proceedings ICALEO 2011*. Orlando, FL, USA: Laser Institute of America, 2011. s. 418-426, 9 s. ISBN 978-0-912035-94-9.
38. ŠEBESTOVÁ, Hana. Průmyslové lasery pro svařování. *Portál moderní fyziky* [online]. 2011 [cit. 2013-02-09]. Dostupné z: [http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova\\_prumyslove\\_lasery\\_pro\\_svarovani.pdf](http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_prumyslove_lasery_pro_svarovani.pdf)
39. ŠEBESTOVÁ, Hana. Přehled metod svařování. *Portál moderní fyziky* [online]. 2011 [cit. 2013-02-09]. Dostupné z: [http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/lapsanska\\_prehled\\_metod\\_svarovani.pdf](http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/lapsanska_prehled_metod_svarovani.pdf)
40. TURŇA, Milan a Pavel KOVAČÓCY. *Zváranie laserovým lúčom*. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave, 2003. ISBN 80-227-1921-8.
41. WESCHLER, Matthew. How Lasers Work. *How Stuff Works* [online]. 2003 [cit. 2013-01-18]. Dostupné z: <http://science.howstuffworks.com/laser5.htm>
42. ZATLOUKAL, Petr. Laserové svařování. *Welding.cz* [online]. 2007 [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/svarovani.htm>
43. ZHANG, Yi, SHI a Li-jun LI. Determination of energy coupling to material in laser welding by a novel “sandwich” method. In: *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2012 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632611613769>
44. ZHAO, Haiyan, Wenchong NIU, Bin ZHANG, Yongping LEI, Masaru KODAMA a Takashi ISHIDE. Modelling of keyhole dynamics and porosity formation considering the adaptive keyhole shape and three-phase coupling during deep-penetration laser welding. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 2011 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: [http://iopscience.iop.org/0022-3727/44/48/485302/pdf/0022-3727\\_44\\_48\\_485302.pdf](http://iopscience.iop.org/0022-3727/44/48/485302/pdf/0022-3727_44_48_485302.pdf)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
$A_t$	Absorpční koeficient závislý na teplotě materiálu	[-]
$A$	Absorpce záření	[-]
$a$	Průměr ústí keyhole	[mm]
BPP	Beam parametr produktu	[mm·mrad]
$b$	Délka pasu paprsku	[mm]
$b_c$	Koeficient roztažení svazku	[-]
$C_e$	Uhlíkový ekvivalent	[hm. %]
$c$	Měrná tepelná kapacita	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$d$	Průměr paprsku v ohnisku	[mm]
$d_0$	Průměr nefokusovaného paprsku	[mm]
$E$	Energie pulzu	[J]
$E_1$	Energie výchozího kvantového stavu atomu	[J]
$E_2$	Energie koncového kvantového stavu atomu	[J]
$f$	Ohnisková vzdálenost fokusační čočky	[mm]
$f_k$	Ohnisková délka kolimační čočky	[mm]
$h$	Hloubka svaru	[m]
$h_p$	Planckova konstanta	[J·s]
$I$	Hustota energie = intenzita záření	[W·mm <sup>-2</sup> ]
$I_{a, Fr}$	Hustota energie absorbovaná Fresnelovou absorpcí	[W·m <sup>-2</sup> ]
$I_{a, iB}$	Hustota energie absorbovaná inverzní Bremsstrahlung absorpcí	[W·m <sup>-2</sup> ]
$I_{a, mr}$	Hustota energie absorbovaná vícenásobnými odrazy	[W·m <sup>-2</sup> ]
$I_{\delta 0}$	Hustota energie před průchodem plazmatu	[W·m <sup>-2</sup> ]
$I_{\delta}$	Hustota energie $p_0$ průchodu plazmatem o tloušťce $\delta$	[W·m <sup>-2</sup> ]
$I_0$	Intenzita záření v ohnisku paprsku	[W·mm <sup>-2</sup> ]
$K_0$	Modifikovaná Besselova funkce druhého druhu, nultého řádu	[-]
$K_0'$	Derivace Besselovy funkce	[-]
$K_1$	Besselova funkce druhého druhu, Prvního řádu	[-]
$L_t$	Latentní teplo tavení	[J·kg <sup>-1</sup> ]
$L_v$	Latentní teplo vypařování	[J·kg <sup>-1</sup> ]
$M^2$	Faktor módu paprsku	[-]
$\bar{m}$	Hmotnost vypařovaných atomů	[kg]
$n_g$	Hustota částic na povrchu Knudsenovy vrstvy	[m <sup>-3</sup> ]
$n_l$	Hustota částic na povrchu taveniny	[m <sup>-3</sup> ]
$P$	Svařovací výkon = výkon laserového paprsku	[W]
$P_{max}$	Maximální výkon pulzu	[W]
$P_{pr}$	Průměrný výkon pulzu	[W]
$P_T$	Výkon potřebný k natavení daného objemu svarového kovu	[W]
$P'$	Výkon lineárního zdroje na jednotku hloubky	[W·m <sup>-1</sup> ]
$Pe'$	Modifikované Péceletovo číslo	[m <sup>-1</sup> ]
$p$	Tlak vypařování nebo povrchového napětí	[MPa]
$p_g$	Hydrostatický tlak	[MPa]
$p_{\sigma}$	Tlak povrchového napětí	[MPa]
$p_v$	Vypařovací tlak	[MPa]
$p_h$	Hydrodynamický tlak	[MPa]
$p_r$	Radiační tlak	[MPa]
$p_0$	Tlak okolí	[MPa]
$Q$	Tepelný tok materiálem	[W]
$Q_C$	Tepelný příkon	[kJ·mm <sup>-1</sup> ]

Označení	Legenda	Jednotka
$Q_P$	Průtok ochranného plynu	$[l \cdot \text{min}^{-1}]$
$Q_S$	Specifické vnesené teplo	$[\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$
$q$	Hustota tepelného toku	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
$R$	Odraz záření	[-]
$R_e$	Elektrický odpor závislý na teplotě	$[\Omega]$
$r$	Souřadnice válcového souřadného systému	[-]
$r_z$	Radiální vzdálenost od osy paprsku	[mm]
$r_1, r_2$	Poloměry keyhole v různé hloubce keyhole	[m]
$s$	Poloha ohniska vzhledem k povrchu materiálu	[mm]
$T$	Teplota	[K]
$T_m$	Teplota tavení	[K]
$T_{\max}$	Nejvyšší teplota teplotního cyklu	$[\text{°C}]$
$T_v$	Teplota vypařování materiálu	[K]
$T_0$	Počáteční teplota materiálu	[K]
$u$	Šířka svaru	[mm]
$u_g$	Rychlost částic v Knudsenově vrstvě	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$u_l$	Rychlost částic v tavenině	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$v$	Svařovací rychlost	$[\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$
$w$	Poloměr pasu paprsku	[mm]
$w_0$	Poloměr pasu paprsku v ohnisku	[mm]
$y$	Souřadnice kartézského souřadného systému	[-]
$z$	Souřadnice kartézského souřadného systému	[-]
$z_R$	Rayleighova délka	[mm]
$\alpha$	Koeficient absorpce plazmatu	$[\text{m}^{-1}]$
$\alpha_m$	Úhlově závislý koeficient Fresnelovy absorpce	$[\text{m}^{-1}]$
$\gamma$	Úhel mezi paprskem a normálovým vektorem povrchu	$[\text{°}]$
$\Delta T$	Gradient teploty	$[\text{K} \cdot \text{m}^{-1}]$
$\delta$	Tloušťka plazmatu	[m]
$\varepsilon$	Parametr závislý na laseru a elektrických vlastnostech materiálu	[-]
$\eta$	Účinnost přenosu energie do svaru	[-]
$\Theta_w$	Úhel sklonu stěny	$[\text{°}]$
$\theta$	Polovina úhlu divergence paprsku	[mrad]
$\lambda$	Vlnová délka záření	[mm]
$\lambda_{th}$	Součinitel tepelné vodivosti	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$\nu$	Frekvence pulzů	$[\text{s}^{-1}]$
$\nu_f$	Frekvence fotonů	[Hz]
$\rho$	Hustota materiálu	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\sigma$	Povrchové napětí taveniny	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
$\tau$	Délka pulzu	[ms]
$\varphi$	Souřadnice válcového souřadného systému	[-]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Porovnání svaru zhotoveného laserem a klasickou obloukovou metodou.....	9
Obr. 2	Simulace laserového svařování.....	9
Obr. 3	Rubínový laser .....	10
Obr. 4	Interakce záření s aktivním prostředím .....	11
Obr. 5	Tříhladinový systém .....	11
Obr. 6	Konstrukce rezonátoru (vlevo) a čerpání aktivního prostředí (vpravo) .....	11
Obr. 7	Princip laseru.....	12
Obr. 8	Zjednodušené schéma axiálního CO <sub>2</sub> laseru .....	13
Obr. 9	CO <sub>2</sub> SLAB laser .....	14
Obr. 10	Nd:Yag laser buzený výbojkami.....	14
Obr. 11	DPSS Nd:Yag laser se zadním buzením .....	15
Obr. 12	Schéma diodového laseru.....	15
Obr. 13	Schéma diskového laseru .....	16
Obr. 14	Optický rezonátor .....	17
Obr. 15	Dvouplášťové optické vlákno .....	17
Obr. 16	Porovnání záření žárovky a laseru.....	18
Obr. 17	Příčné řezy paprskem TEM mody .....	18
Obr. 18	Hustota energie I pro některé druhy módů.....	18
Obr. 19	Hustota energie v paprsku .....	19
Obr. 20	Gaussův a „top hat“ profil.....	19
Obr. 21	Geometrie pásu ohniska .....	20
Obr. 22	Vliv ohniskové vzdálenosti čočky na fokusaci.....	20
Obr. 23	Vliv teploty, úhlu dopadu a polarizace na absorpci laserového záření .....	21
Obr. 24	Závislost absorpce na vlnové délce .....	21
Obr. 25	Základní části svarového spoje.....	22
Obr. 26	Metody laserového svařování .....	22
Obr. 27	Kondukční svar .....	23
Obr. 28	Vznik keyhole .....	23
Obr. 29	Princip laserového penetračního svařování.....	23
Obr. 30	Penetrační svar .....	24
Obr. 31	Vliv svařovací rychlosti a výkonu na hloubku svaru .....	24
Obr. 32	Tvar svaru.....	24
Obr. 33	Vliv hustoty energie na hloubku svaru.....	26
Obr. 34	Vliv polohy ohniska na hloubku svaru.....	26
Obr. 35	Vliv polohy ohniska na absorpci .....	26
Obr. 36	Schéma rozložení plazmatu.....	27
Obr. 37	Vliv průtoku ochranného plynu na vznik plazmatu.....	27
Obr. 38	Vliv průtoku ochranného plynu na hloubku svaru .....	27
Obr. 39	Průběh energie pulzu .....	28
Obr. 40	Pulzní švové svařování .....	28
Obr. 43	Vliv energie pulzu na geometrii svaru.....	29
Obr. 41	Vliv frekvence pulzů na hloubku svaru.....	29
Obr. 42	Vliv polohy ohniska na hloubku (1) a šířku (2) svaru.....	29
Obr. 44	Princip remote welding .....	30
Obr. 45	Použití náběhové a výběhové desky .....	31
Obr. 46	Základní typy laserových spojů .....	31
Obr. 47	Průhyb svarové lázně.....	32
Obr. 48	Zahnutí keyhole .....	33
Obr. 49	Náklon stěny keyhole .....	34

Obr. 51	Vliv úhlu sklonu stěny na vícenásobné odrazy v keyhole .....	35
Obr. 50	Nákres výpočtu geometrie keyhole bod po bodu .....	35
Obr. 52	Vliv svařovacích parametrů na počet vícenásobných odrazů .....	36
Obr. 53	Stabilita keyhole .....	37
Obr. 54	Vliv výkonu na stabilitu keyhole .....	37
Obr. 55	Tok taveniny v keyhole .....	38
Obr. 56	Tok taveniny za keyhole .....	38
Obr. 57	Geometrie keyhole .....	39
Obr. 58	Vliv svařovacích parametrů na proudění taveniny .....	39
Obr. 59	Humping.....	40
Obr. 60	Vliv svařovacích parametrů na kvalitu svaru.....	40
Obr. 61	Laserové svařovací centrum.....	41
Obr. 62	Závislost tepelné vodivosti na teplotě .....	42
Obr. 63	Průvary oceli 1.0122.....	43
Obr. 64	Závislost polohy ohniska na délce svaru .....	43
Obr. 65	Makrovýbrusy průvaru při svařovacím výkonu 2 kW .....	44
Obr. 66	Závislost hloubky provaření při svařovacím výkonu 2 kW .....	45
Obr. 67	Makrovýbrusy průvaru při svařovacím výkonu 1 kW – 1. část.....	45
Obr. 68	Makrovýbrusy průvaru pro svařovací výkon 1 kW – 2. část.....	46
Obr. 69	Závislost hloubky provaření při svařovacím výkonu 1 kW .....	46
Obr. 70	Vliv svařovací rychlosti a výkonu na hloubku provaření .....	47
Obr. 71	Odraz paprsku .....	49
Obr. 72	Blokové schéma postupu simulace.....	50
Obr. 73	Makrovýbrus průvaru nelegované oceli .....	51
Obr. 74	Výsledné nasimulované keyhole .....	51
Obr. 75	Porovnání dosažených hloubek při experimentu a simulaci u oceli 1.0122 .....	52
Obr. 76	Makrovýbrus průvaru korozivzdorné oceli.....	52
Obr. 77	Kolaps keyhole.....	53
Obr. 78	Výsledné nasimulované keyhole .....	53
Obr. 79	Závislost hloubky průvaru na poloze ohniska .....	54



## SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Porovnání svařovacích laserů.....	17
Tab. 2	Ionizační energie různých prvků.....	27
Tab. 3	Chemické složení oceli 1.0122.....	41
Tab. 4	Chemické složení oceli 1.4301.....	42
Tab. 5	Svařovací parametry.....	43
Tab. 6	Hloubka průvaru v závislosti na poloze ohniska při výkonu 2 kW.....	45
Tab. 7	Hloubka průvaru v závislosti na poloze ohniska při výkonu 1 kW.....	46
Tab. 8	Porovnání dosažené hloubky při experimentu a simulaci u oceli 1.0122.....	52
Tab. 9	Porovnání dosažené hloubky při experimentu a simulaci u oceli 1.4301.....	53

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha č. 1 Atest oceli 1.0122

Příloha č. 2 Atest oceli 1.4301

**Příloha č. 1** Atest oceli 1.0122


11. 12. 2012 13:08:26  
C-2012-11285

**DENDERA A.S.**  
**KANICE 104**  
**BÍLOVICE NAD SVITAVOU**  
**664 01**

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavila Ferona, a.s. k zakázce č. 365831, s jednoznačným údajem pro přiřazení č. 435970200 na množství 2834 KG. Původní materiál byl přepracován na rozměry uvedené v dodacím listu k výše uvedené zakázce. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a dodaným výrobkem.

---

Inspection certificate according to EN 10 204-3.1

 U.S. Steel Košice, s.r.o. Vstupný areál U.S. Steel 044 54 Košice SLOVAK REPUBLIC	Code:	727PALK2/09C	FERONA Slovakia, a.s.  Bytčická 12 011 45 ŽILINA SLOVAK REPUBLIC
	Works Order No:	KC2A1664	
	Advice No:	12/587377 01	
	Your order:	1208/RIJENN	

METALLURGICAL CERTIFICATE NO: 12/587377 01

Desc. of goods: HEAVY PLATES IN COILS	Size: 10,000 x 1500,0 mm EN 10051/10
Standard: EN 10025-2/04	Net Weight: 19 570 kg
Quality: S235JRC+N      Spec. No: 22114002	

Unit No	Coil No	Heat	Unit No	Coil No	Heat
4359702	4359702	43597			

**M E C H A N I C A L   T E S T   R E S U L T S**


	Coil No 4359702
Min. / Max.	
Tensile streng.-Rm(1) (MPA)	360/510      436
Yield point-ReH(1) (MPA)	235/      282
Elongation A5(1) (%)	24,0/      33,0

Direction: (1)-transversal;

**C H E M I C A L   C O M P O S I T I O N, %**




	Heat No 43597		Heat No 43597
Min. / Max.		Min. / Max.	
C	/0,17      0,14	Mn	/1,40      0,50
Si	/0,03      0,01	P	/0,035      0,009
Al	0,020/      0,035	N	/0,012      0,006
S	/0,035      0,008	Cr	/0,305      0,023
Cu	/0,55      0,04	CEV	/0,350      0,235
Mo	/0,060      0,002	Ni	/0,305      0,014
V	/0,008      0,001		

On the basis of the IAEA recommendation allowed limit of weight-based activity of a heat sample amounts up to 300 Bq/kg.  
The measured weight-based activity of Co60 + Cs137 radionuclide is not higher than 100 Bq/kg.  
Košice: 10.10.2012, 7:31:26 THE MATERIAL IS IN COMPLIANCE WITH ORDER REQUIREMENTS.  
JOZEP ČERVENÁK, AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE  
e-mail: jcervenak@sk.uss.com, tel.: +421-55-6737464      419      P-USM/0063-04/10-01-12      Last Page: 1

  
 06  
 1015 E-30-20300-06



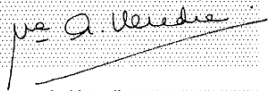
U. S. Steel Košice, s.r.o.      02  
 Vstupný areál U. S. STEEL  
 Odbor Analýzy kvality a špecifikácie  
 Uvoľňovanie výrobkov a Hurdá atesty  
 044 54 Košice

Příloha č. 2 Attest oceli 1.4301 – 1. část

<b>ACERINOX EUROPA</b> FABRICA DEL CAMPO DE SERRALLES MADRID (28030) (660 8483100) TÈLE: (34) - 91 64 42 93 00 FAX: (34) - 91 64 42 93 13 P.O. BOX 83 U.370 060 8483100 (04032)				<b>Abnahmeprüfzeugnis</b> <b>INSPECTION CERTIFICATE</b>			Prüf - Nr. 72 2013 7007 40001 E Inspection No.			
BESTELLER - Customer <b>ITALINOX S.R.O</b>		AUFTRAGS NR. - Order n° <b>TE 143</b>		BESTELLUNG NR. - Your order n° <b>OCP-38/2012</b>			ACCORDING TO EN 10204 3.1 NACH			
PRÜFGEGENSTAND - Article <b>BLECH AUS BAND (SHEET)</b>		WERKSTOFF NR UND LIEFERZUSTAND - Material n° and Condition of Delivery <b>1.4301/1.4307 1D</b>			WERKSTOFF - Normbez Standard - Grade of Material <b>X5 CRNI 18-10/X2CrNi18-9</b>			WERKSBEZ - Marke Grade <b>Acr - 160</b>		
ANFORDERUNGEN - Technical requirements <b>EN 10028-7/TRB 100/AD-2000-MERKBLATT W2/W10 DGRL 97/23/EG (PED) EN-ISO-18286(Thickness Tolerances)</b>		ERSCHELMELZUNGSART - Steelmaking Process <b>A=AOD Verfahren - AOD Process A</b>			KENNZEICHNUNG - Marking <b>Schmelzenummer - N° of coil</b>			ZEICHEN DES LIEFERWERKS - Brand of the manufacturer 		
STAMPEN DES SACHVERSTÄNDIGEN - Inspector's Stamp 										
Pos. Nr. Item N°	Stückzahl Quantity	Abmessung - Dimensions mm				Schmelze Nr Heat N°	Probe Nr Test N°			
41	9	10,000 x 1.000,00 x 2.000,00				B7ZT	03B7ZT			
43	9	10,000 x 1.000,00 x 2.000,00				B7ZT	03B7ZT			
<b>Chemische Analyse - Chemical Composition (%)</b>										
Schmelze Nr Heat N°	C	CR	MN	N	NI	P	S	SI		
Anforderungen Requirements	0,030	17,500 19,500	2,000	0,100	8,000 10,500	0,045	0,015	1,000		
B7ZT	0,030	18,090	1,750	0,064	8,035	0,031	0,003	0,391		
<b>Mechanische Eigenschaften - Mechanical Properties</b> Pr. Temp/T. Temp. 20° C										
Probe Nr Test N°	Prob.-Lage Pos. of Test	Abmessungen des Probestabs Dim. of specimen		Rm N/mm2	Rp 0.2 N/mm2	Rp 1.0 N/mm2	A5 %			
Anforderungen Requirements		Breite x Dicke Width x Thickness mm		520,00 720,00	210,00	250,00	45,00			
03B7ZT	C T	26,000	10,00	624,49	337,87	377,82	55,35			
Besichtigung und Masskontrolle wurden durchgeführt: O.K. Surface and dimensions controlled: O.K. Der Werkstoff ist beständig gegen interkristalline Korrosion gemäss EN ISO 3651-2 The material is resistant to intergranular corrosion test according to EN ISO 3651-2 Spektroskopische Identitätsprüfung: O.K. Spectrometrical Identity test: O.K. Wärmebehandlung: Glühen bei 1050 - 1100 °C Heat treatment: Und Abschrecken mit Luft cooling with air. Die Lieferung entspricht der Bestellung The delivery is in accordance with the order							WERKSACHVERSTÄNDIGER WORK INSPECTOR A: Heredia			
							Palmones, 12 FEBRERO 2013			

FDT0014

Příloha č. 2 Atest oceli 1.4301 – 2. část

<b>ACERINOX EUROPA</b> <small>FABRICA DEL CAMPO DE GERALDORA PALMONES (LOS BARBIDOS) T.FONO. (34) - 956 62 93 00 FAX. (34) - 956 62 93 11 P.O. BOX 82 13390 LOS BARBIDOS (CADIZ)</small>				<b>INSPECTION CERTIFICATE</b> <b>ABNAHMEPRÜFZEUGNIS</b>				<b>3.1</b>			
<b>ACCORDING TO EN 10204</b> <small>SPRACHE</small>		<b>CERTIFICATE N°</b>		<b>72 2013 7007 40002 *</b> <small>VERSION N°</small>							
<b>CUSTOMER</b> <small>CLIENT</small> ITALINOX S.R.O ZDEBRADSKÁ 58/59 251 01 RÍČANY - JAZLOVICE CZECH REPUBLIC		<b>OUR ORDER N°</b> <small>UNSERE AUFTR.</small> TE 143		<b>YOUR ORDER N°</b> <small>IKRE BESTELL.</small> OCP-38/2012		<b>TRADE MARK</b> <small>STAMPF. DES HERSTELL.</small> 		<b>INSPECTOR'S STAMP</b> <small>STAMPF. DES WERKSACHTVERSTÄNDLICH.</small>		<b>STEELMAKING PROCESS</b> <small>HERSTELLUNGSPROZESS</small> A.O.D.	
<b>REQUIREMENTS</b> <small>NORMENBEZUG</small> EN 10088-2:2005 EN-ISO-18286 (Thickness Tolerances) ASTM A240/A480Ed11-ASME Sect.IA SA240/SA480Ed10Addenda2011				<b>INTERGRANULAR CORROSION</b> <small>GRAFANLAGERUNG</small> ASTM-A-262 PRACTICA E		<b>GRADE</b> <small>BEWEISST.</small> Acx 160 Acx 160		<b>FINISH</b> <small>ANBEWEISUNG</small> 1D N°1			
<b>COIL / BOX</b> <small>WICKEL / KISTE</small>		<b>CONTENT</b> <small>INHALT</small>		<b>DIMENSIONS</b> <small>ABMESSUNGEN</small>			<b>MARKS</b> <small>POS.</small>	<b>QUANTITY</b> <small>STÜCKZAHL</small>	<b>TEST N°</b> <small>PROBEN N°</small>		
A6837Z A6838C		03B7ZT C 03B7ZT C		THICKNESS <small>STÜCKE</small> 10,000 10,000	WIDTH <small>BREITEN</small> 1000,00 1000,00	LENGTH <small>LÄNGE</small> 2000,00 2000,00	41 43	9 9	03B7ZT 03B7ZT		
<b>CHEMICAL ANALYSIS / CHEMISCH ZUSAMMENSETZUNG</b>											
<b>HEAT N°</b> <small>SCHMELZE NR.</small>		C	CR	MN	N	NI	P	S	SI		
B7ZT		0,030	18,090	1,750	0,064	8,035	0,031	0,003	0,391		
<b>MECHANICAL PROPERTIES / MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN</b>											
<b>TEST N°</b> <small>PROBEN N°</small>		<b>PROBE TYPE</b> <small>PROBENTYP</small>	<b>Rm</b> <small>N/mm2</small>	<b>Rp 0.2</b> <small>N/mm2</small>	<b>Rp 1.0</b> <small>N/mm2</small>	<b>A5</b> <small>%</small>	<b>HRB</b>	<b>A200</b> <small>%</small>			
03B7ZT		C T	624,49	337,87	377,82	55,35	92,00	53,35			
<b>RE MARKS / BEOBACHTUNGEN</b> The delivery is in accordance with the order Temperatura de hipertemple entre 1050 y 1100 °C. NACE-MR0175/ISO 15156:2003; NACE MR0103:2010 (Chem & Mech only).						<b>SURFACE AND DIMENSIONAL CONTROL</b> <small>ÜBERFLÄCHEN- UND ABMESSUNGSKONTROLLE</small> SATISFACTORY OHNE BEANSTANDUNG					
						<b>WORK INSPECTOR</b> <small>WERKSACHTVERSTÄNDLICH</small>  A. Heredia					
						Palmones, 12 FEBRERO 2013					

EDT0009