

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



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

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# **ANALÝZA SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM**

ANALYSIS OF WELDING BY LASERHYBRID PROCESS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**JAN TEPLÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. PETR KOVÁŘ**

BRNO 2010



## **ABSTRAKT**

TEPLÝ Jan: **Analýza svařování LaserHybridem**

---

Projekt je vypracovaný pro základní analýzu hybridního svařování, které kombinuje laserové svařování s jinými metodami svařování, a to především s technologií MIG a MAG. Jsou zde tedy prezentovány kromě svařování LaserHybridem také tyto metody, které svařování LaserHybridem vytvářejí. Je zde porovnáváno jejich svarové provedení, ekonomické aspekty, využitelnost ve strojírenství a především jejich výhody a nevýhody.

Svařování poměrně novou a nyní nepříliš rozšířenou metodou LaserHybridem je velice efektivní především ke spojování různých karosářských dílů, a to hlavně pro jeho zmenšení tavné lázně, dokonalejší překlenutelnosti mezer a také z ekonomického hlediska ke snížení výrobních časů.

Klíčová slova: Laser, MIG, MAG, MSG, LaserHybrid

## **ABSTRACT**

TEPLÝ Jan: **Analysis of welding by LaserHybrid process**

---

The project is elaborated for the basic analysis of hybrid welding that combines laser welding with other welding methods, especially with the MIG and MAG technologies. Besides the Laserhybrid process the methods, of which this Laserhybrid welding is composed, are also presented here. These methods are compared considering the aspects: firstly their advantages or disadvantages, followed by the welding performance, the economic aspect or the application in mechanical engineering.

The welding using the relatively new and so far not much widely used Laserhybrid method is very efficient especially for the weld jointing of various bodywork parts. Respectively, this method is efficient for its smaller molten pool, better gap bridging and also for its economic aspect to reduce production times.

Keywords: Laser, MIG, MAG, MSG, LaserHybrid process

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

TEPLÝ, J. *Analýza svařování LaserHybridem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Kovář.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 10.5.2010

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Petru Kovářovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

## OBSAH

<b>Zadání</b>	
<b>Abstrakt</b>	
<b>Bibliografická citace</b>	
<b>Čestné prohlášení</b>	
<b>Poděkování</b>	
<b>Obsah</b>	
	Str.
<b>1. Úvod</b> .....	10
<b>2. Rozdělení svařování LaserHybridem</b> .....	11
<b>3. Laser</b> .....	12
<b>3.1 Pojem laser</b> .....	12
<b>3.2 Dělení a třídění laserů</b> .....	13
3.2.1 Podle aktivního prostředí .....	13
3.2.2 Podle způsobu činnosti .....	15
<b>3.3 Lasery Nd: YAG a CO<sub>2</sub></b> .....	15
<b>3.4 Laserové zpracování materiálů</b> .....	16
3.4.1 Laserové technologie .....	17
<b>3.5 Laserové svařování</b> .....	19
3.5.1 Tvorba svarových spojů .....	19
3.5.2 Příprava svarového spoje při laserovém svařování .....	21
3.5.3 Výhody a nevýhody laserového svařování .....	22
3.5.4 Typické aplikace technologie svařování materiálů laserem .....	22
<b>4. Svařování metodami MIG a MAG</b> .....	23
<b>4.1 Základní informace o svařování</b> .....	23
4.1.1 Svařovací zdroje .....	23
4.1.2 Ochranné plyny .....	25
4.1.3 Přídavné materiály pro svařování metodou MIG/MAG .....	26
4.1.4 Výhody a nevýhody svařování MIG/MAG .....	27
<b>5. LaserHybrid</b> .....	28
<b>5.1 Proces svařování</b> .....	28
<b>5.2 Porovnání řezů svarů</b> .....	28
<b>5.3 Svařovací hlavy</b> .....	31
5.3.1 Geometrie svařování .....	33
<b>5.4 LaserHybrid + Tandem</b> .....	34
<b>5.5 Aplikace ve výrobě</b> .....	35
5.5.1 Použití v automobilovém průmyslu .....	36
5.5.2 Další využití svařování LaserHybridem v průmyslu .....	38
<b>5.6 Výhody a nevýhody svařování LaserHybridem</b> .....	40
<b>6. Závěr</b> .....	41
<b>Seznam použitých zdrojů</b>	
<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b>	

## **1. Úvod**

Svařování jakožto „nerozebiratelné“ spojování dvou součástí se zdá být probádanou oblastí, kde už nelze mnoho vymýšlet, ale opak je pravdou. Stále se hledají nové metody svařování, které by usnadňovaly a ulehčovaly výrobu spojování materiálů.

Požadavky na vysokou produktivitu svařování či pájení, ale i jejich vysokou jakost spojují vyvolávají i snahu za účelem omezení lidského faktoru při svařování.

Možnost mechanizovaného a hlavně robotizovaného svařování umožňuje realizaci takových metod svařování, které jsou pro ručního svářeče dlouhodobě obtížně proveditelné, nebo i nemožné. Proto jsou vyvíjeny i speciální nové metody svařování určené pouze robotům. Jednou z nich je i metoda LaserHybrid.

Podnět k vývoji postupu LaserHybrid dal rovněž výrobce automobilů, a sice Audi Neckarsulm v roce 1998. Audi již mělo mnohé zkušenosti s laserem a společně s experty firmy Fronius pracovalo na novém svařovacím procesu. Již o rok později probíhal vývoj nové velkoprostorové limuzíny u VW. Pro potřebné pokusy byl v objektu podniku Fronius instalován institutem ve Fraunhoferu mobilní laser o výkonu 4 kW. Pokusy splnily beze zbytku všechna očekávání, a tak dospěl postup LaserHybrid do stadia praktického využití.

Rozhodujícími přednostmi hybridního svařování v kombinaci laserového svařování a MSG svařování jsou vysoká svařovací rychlost, hloubka závaru a dobrá překlenutelnost mezery.

Srovnává se zde spojování laserových technologií s konvenčními dnes běžně používanými typy a to především s technologií MIG a MAG. Jsou zde uváděny nejen technologické a technické faktory, ale také ekonomické.

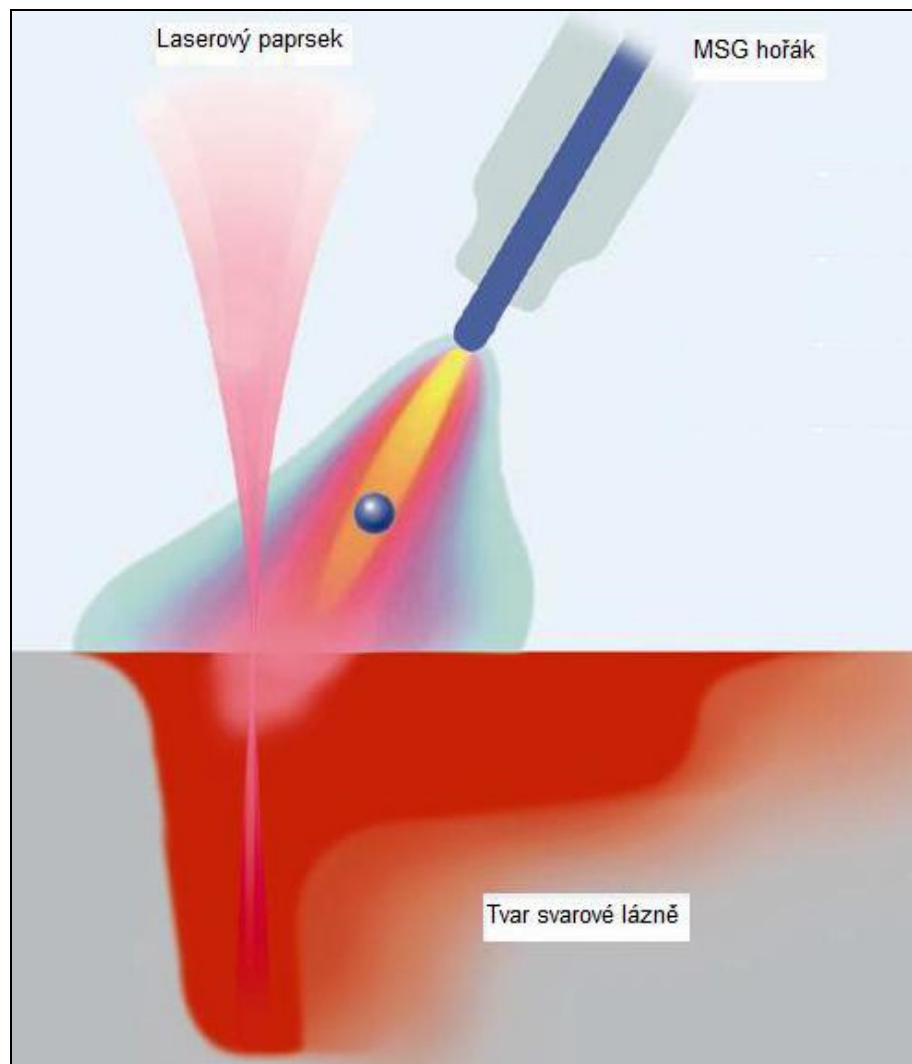


## 2. Rozdělení svařování LaserHybridem

### Laser + MSG (TIG, ...) = LaserHybrid

Jak název napovídá, jedná se o jakési hybridní spojení metody svařování laserovým paprskem nejčastěji pevnolátkovým - Nd: YAG a klasického svařování nejčastěji MIG/MAG v ochranné atmosféře, ale i jiných technologiích svařování. V zásadě jsou známy tyto kombinace:

- laser – TIG
- laser – MIG/MAG
- laser – plazmové svařování



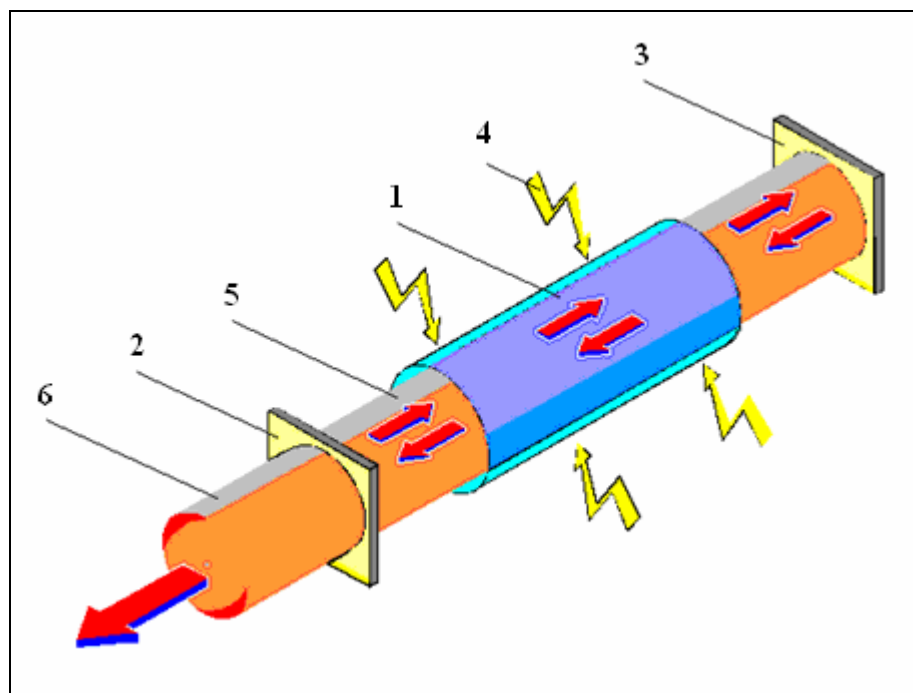
Obr. 1 Schéma metody LaserHybrid [8]

### 3. Laser [7], [8], [10]

#### 3.1 Pojem laser

Základem objevení laseru byla nejabstraktnější část fyziky – kvantová mechanika. Zákony kvantové mechaniky jsou pro většinu lidské populace nesrozumitelné a nepochopitelné. Přesto podle jejích zákonů vzniklo něco tak mimořádně užitečného a praktického, že se s tím setkal téměř každý z nás. Jak revoluční myšlenka laseru byla, o tom svědčí vzpomínky jednoho z objevitelů laseru – C.H. Townese, uveřejněné v jeho článku v *International Journal of Modern Physics B*. Jak autor uvádí, dokonce i největší autority ve fyzice se k myšlence laseru stavěly s nečekanou nedůvěrou, nebo dokonce odmítavě. Za objev laseru, který je tak významný, že jej lze srovnávat s největšími objevy v historii lidstva, se v roce 1964 podělil americký fyzik Charles Hard Townes o Nobelovu cenu se dvěma ruskými fyziky, Nikolajem Gennadijevičem Bassovem a Alexandrem Nikolajevičem Prochorovem.

Laser je zkratka pro *light amplification by stimulated emission*. Světelné vlny jsou totiž zesilovány v procesu stimulace atomů nebo molekul, které mají přebytečnou energii, již mohou vyslat v podobě fotonů stejné frekvence a fáze, jako má světelná vlna. Maser, značící *microvave amplification by stimulated emission*, byl prvním zařízením tohoto druhu a je pouze poněkud uměle oddělován od laseru. Elektromagnetické vlny delší než 1mm se nazývají mikrovlny, zatímco vlny, které jsou kratší 13krát než vlnová délka jednoho záření, se nazývaly „gasers,..“ Základní principy pro fungování stimulovaného zesilování jsou v podstatě tytéž v celém rozsahu elektromagnetického spektra, avšak lasery, poskytující infračervené záření, viditelné světlo a ultrafialové záření, jsou dosud nejvíce používány a nejlépe známy [7].



**Obr. 2** Princip laseru: 1 Aktivní prostředí, 2 Výstupní zrcadlo, 3 Zadní zrcadlo, 4 Záření, 5 Stimulované záření, 6 Laserový svazek [23]

## **3.2 Dělení a třídění laserů**

V průběhu několika let se vytvořila celá škála laserů, lišících se typem aktivního materiálu, funkčním mechanismem, výkonem stimulovaného záření, účinností, provozními podmínkami a také velkým počtem vlnových délek. Typickou vlastností těchto zdrojů je dokonalá koherence, monochromaticnost a nepatrná divergence vystupujícího světelného svazku.

### **3.2.1 Podle aktivního prostředí**

Podle aktivního prostředí rozlišujeme tři základní typy laserů - plynové, pevnolátkové a polovodičové (známější jako laserové diody).

#### **A) Plynové lasery**

Aktivní prostředí plynového laseru je v plynné fázi, tyto lasery pracují v kontinuálním i pulzním režimu. Do této skupiny patří helium - neonový laser, měděný laser, jódový laser, argonový laser, helium - kadmiový laser, vodíkový laser, dusíkový laser, excimerové lasery a CO<sub>2</sub> lasery. Z uvedených laserů se helium - neonový laser používá např. v měřicí technice. V technologii opracování materiálů se používají především CO<sub>2</sub> lasery (obr. 4) pro řezání a svařování a excimerové lasery pro popisování, mikroobrábění keramických materiálů, obrábění diamantu, čištění povrchů strojních součástí a vrtání děr od průměru 10 μm [8].

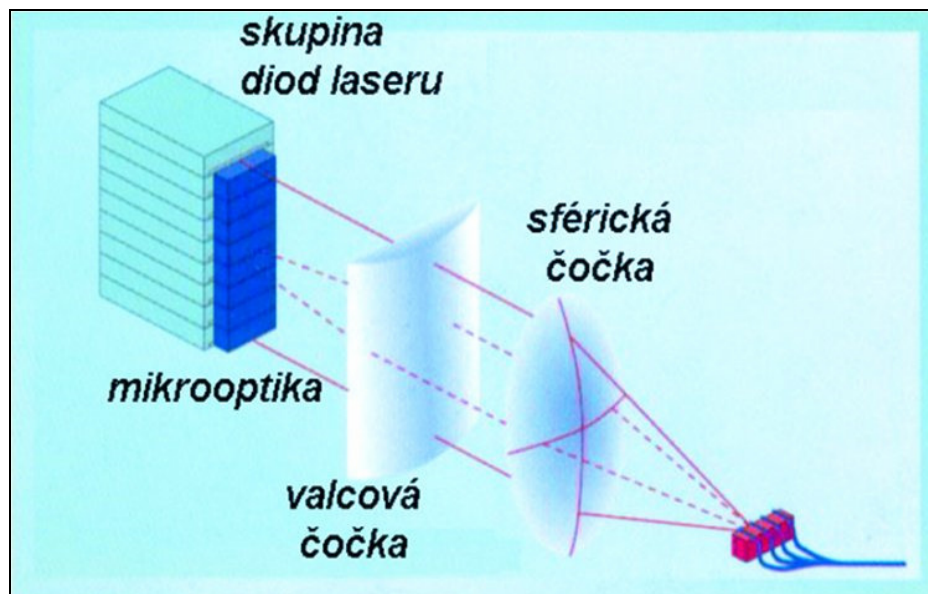
#### **B) Pevnolátkové lasery**

Aktivním prostředím v pevnolátkovém laseru je pevná opticky propustná látka - krystaly, oxidy, granáty, alumináty, fluoridy, oxysulfidy, fosfáty, silikáty, tungstáty, molybdáty, vanadáty, beryláty, sklo a keramika. Do této skupiny patří rubínový laser, neodymový laser, Nd: YAG laser, Nd: YLF laser, Er: YAG laser a Ho/CTH: YAG laser. Dnes nejvíce používaným typem pevnolátkového laseru je Nd: YAG laser (obr. 5). Laser pracuje jak v pulzním, tak kontinuálním režimu. Paprsek pevnolátkových laserů má vlnovou délku 1,06 nm. Je vhodný pro vrtání, sváření, řezání a popisování. V lékařství se používá kontinuální Nd: YAG laser jako skalpel v chirurgii a pulzní Nd: YAG laser v oční mikrochirurgii. Dále se používá v radarové technice a ve spektroskopii [8].

#### **C) Polovodičové lasery**

Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou být injektovány. Hlavní předností polovodičových laserů je jejich kompaktnost, velká účinnost (až 50 %), možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a pomocí výběru aktivního prostředí generace záření různých vlnových délek. Typickými představiteli polovodičových laserů jsou: polovodičový laser buzený svazkem elektronů a injekční polovodičový laser, kde je buzení prováděno elektrickým polem. Polovodičové lasery mohou mít výstupní výkon 30 W až 6 kW. U vysoce výkonných diodových laserů má vystupující paprsek tvar obdélníkové plochy. Laser o výstupním výkonu 150 W má po zaostření rozměr stopy 0,6 x 1,2 mm. Lze jej však zaostřit i na 1,3 x 1,3 mm nebo na stopu ve tvaru kruhu o

průměru 1,5 mm. Polovodičové lasery (obr. 3) se používají především pro svařování, tepelné zpracování a nanášení povlaků [8].



Obr. 3 Konstrukce polovodičového laseru [8]

#### D) Lasery pracující na principu kovových par

V průmyslu se používají také lasery pracující na principu kovových par vzácných prvků. Jde např. o lasery pracující na principu Cu par. Produkují záření o výstupním výkonu 120 W, o vlnové délce 510,6 a 578,2 nm, frekvence pulzů je 30 kHz, délka pulzu 20 až 50 ns, špičkový výkon v pulzu nad 100 kW. Typické aplikace použití laserů pracujících na principu kovových par jsou: vrtání děr o průměru 50 až 200  $\mu\text{m}$ , řezání fólií, křemíkových desek a vytváření hustých mřížek. Drsnost stěn vyvrtané díry je 1 až 2  $\mu\text{m}$ , rychlost vrtání velká a tepelné ovlivnění okolního materiálu díry malé [8].

#### E) Nové druhy laserů

Prudký rozvoj zaznamenávají diodami čerpané pevnolátkové lasery. Jsou to především Nd: YAG lasery, u nichž jsou pro čerpání energie z krystalu dosud používané výbojky nahrazeny laserovými diodami, příp. diodovými lasery. Výhodami těchto laserů jsou vyšší účinnost, menší spotřeba elektrické energie, menší celkové rozměry, delší trvanlivost diod oproti výbojkám (životnost diod je cca 10 000 hodin) a menší provozní náklady. Dalším vývojovým stadiem diodami čerpaných pevnolátkových laserů jsou kotoučové lasery.

U tohoto typu laserů je krystal, používaný dosud ve tvaru válce nebo desky, nahrazen kotoučem o tloušťce 0,3 mm a průměru 7 mm. Kotouč lze vyrobit z krystalu Yb: YAG, čímž se oproti krystalu z Nd: YAG zvýší účinnost čerpání ze 76 % na 91 %. Současné výkony kotoučových laserů jsou do 350 W. Kotoučové lasery mají možnost dobrého zaostření paprsku, pracují v kontinuálním i pulzním režimu s délkou pulzu v rozsahu femtosekund. Konstrukce laseru je kompaktní. V poslední době se začínají v technologii používat vláknové lasery s výstupním výkonem 2 až 30 W a vlnovou délkou záření 1,06  $\mu\text{m}$ . Používají se pro značení, popisování, vrtání mikrootvorů, mikrořezání a svařování [8].

### **3.2.2 Podle způsobu činnosti**

#### **A) Impulsní lasery**

Impulsní lasery jsou zdrojem mohutných světelných záblesků, trvajících někdy jen stomiliontinu sekundy.

#### **B) Kontinuální lasery (spojité)**

Získání kontinuálního provozu laseru s tuhou fází s optickým vybuzením je velmi náročné. Způsobuje to nevyhnutelnost používat dostatečně silný kontinuální zdroj budícího světla a je třeba odvádět velké množství tepla, které v laseru vzniká.

U laserů rozeznáváme tři základní parametry. Tím prvním je vlnová délka (udávaná v nanometrech). Vlnová délka určuje, v jaké části spektra se bude laserový paprsek pohybovat. Vlnová délka je navíc důležitá i pro velikost stopy laseru. Podle vlnové délky se také dělí lasery na termální (IR), u kterých je vlnová délka vyšší než 630 nm, lasery pracující ve viditelném světle (380 - 630 nm) a lasery pracující v UV oblasti (pod 380 nm). Dalšími dvěma parametry určujícími kvalitu laseru jsou pak výkon a v neposlední řadě životnost.

### **3.3 Lasery Nd: YAG a CO<sub>2</sub>**

V průmyslové výrobě jsou v podstatě užívány především dva základní typy laseru ke zpracování materiálů - CO<sub>2</sub> laser (obr. 4) a Nd: YAG laser (obr. 5). Nd: YAG laser je pevnolátkový laser, přičemž médium tvoří krystal z yttrio - hlinitého granátu dotovaného neodymem (chemický symbol - Nd). CO<sub>2</sub> laser je typem plynového laseru, ve kterém je aktivním médiem oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>).

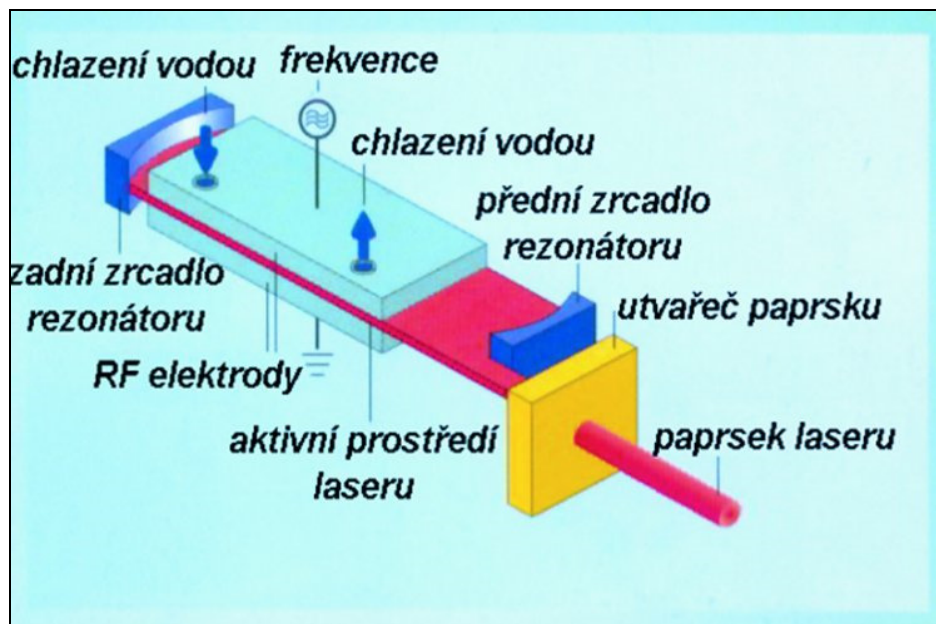
Nd: YAG lasery nabízí výstup o výkonu až 5 kW ke svařování, značení, vrtání, atd. Jednou z výhod radiace Nd: YAG laseru je potenciál přenosu laserového paprsku na optická vlákna, což mohou jednoduše zabezpečit roboti.

CO<sub>2</sub> lasery nabízí mnohem vyšší stupeň výkonu - do 50 kW. Systémy s výkonem přibližně do 4 kW jsou běžně užívány u řezání laserem s fokusačními čočkami. Protože čočky nevydrží vyšší výkony laserového paprsku, používají se na řezání, svařování a povrchové opracovávání vodou chlazená zrcadla.

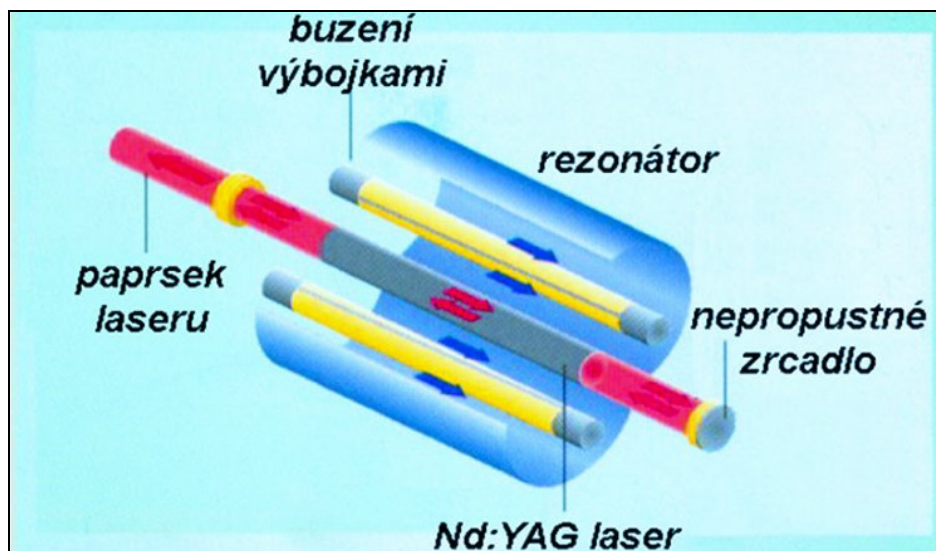
U CO<sub>2</sub> laseru je proces generování laserového paprsku založen na plynech CO<sub>2</sub>, dusíku a heliu. Tyto plyny musí být často a pravidelně obnovovány, musí splňovat velmi přísné požadavky na kvalitu vlastního CO<sub>2</sub> plynu a také zásobovacího systému tohoto plynu.

Oba typy laseru generují světlo v infračerveném pásmu spektra, což znamená, že jejich laserové paprsky jsou lidskému oku neviditelné. Obsluha proto musí dbát na patřičná preventivní opatření a používat především bezpečnostní brýle. Pracovníci musí být chráněni kryty stroje. Při výměně obrobků se laser pravidelně přepíná do režimu s nízkým výkonem a viditelným spektrem.

Kvantum jiných typů laserů dokáže produkovat širokou škálu vlnových délek, která pokrývá celé spektrum od infračervené přes viditelné světlo po ultrafialové pásmo. Všechny nabízejí jisté výhody pro různé aplikace.



Obr. 4 Princip CO<sub>2</sub> laseru [8]



Obr. 5 Princip Nd: YAG laseru [8]

### 3.4 Laserové zpracování materiálů

Ve zpracování materiálů se laser využívá jako nositel intenzivní radiční energie, usměrněné na zpracovaný objekt. Energetický účinek laseru na materiály závisí na fyzikálních

vlastnostech materiálů a na parametrech laseru, samozřejmě, významně ho ovlivňuje čas interakce laseru s materiálem.

Většina laserových technologických procesů je založená na tepelném účinku laseru na neprůhledná prostředí. Absorbovaná energie laseru se odevzdá tepelným kmitem mřížky pevné látky, zvětší se tím střední kinetické energie atomů a nebo molekul látky, tj. zvýší se teplota látky, látka se zahřívá. Teplota látky se v této interakci zvyšuje s dobou trvání interakce laserového paprsku s látkou. Už i na základě této zjednodušené představy o mechanismu ohřevu látek je možné vysvětlit aplikace laseru v technologických procesech.

### **3.4.1 Laserové technologie**

Nasazení laserů a laserových technologií přináší novou dimenzi do průmyslové výroby, což koresponduje se stále rostoucími požadavky na zvyšování její kvality a efektivity.

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

- zpracování plechů - řezání, svařování, vrtání a ohýbání,
- obrábění - řezání drážek, obrábění dutin, vrtání, obrábění s předehřevem, popisování, dělení třísek, odhroťování, soustružení, frézování a mikrofrézování,
- tepelné zpracování - kalení, žíhání, popouštění, zpevnění s natavením, amorfizace povrchu a rázové zpevnění,
- povrchové úpravy - nanášení různých druhů povlaků a sycení povrchu legujícími prvky, leštění povrchů, vytváření textur,
- technologie Rapid Prototyping,
- měření - délek, tvaru, polohy obrobku, počítání počtu vyrobených kusů, měření jakosti povrchu,
- renovace opotřebovaných součástí a nástrojů - navařování,
- vyvažování součástí - úběr materiálu součástí v předem daném místě,
- měření stavu napjatosti součástí - holografie,
- dálkové řízení strojů,
- měření stavu opotřebení činné části nástroje,
- analýza chemického složení materiálů,
- vytváření textů na nedabovaných filmech,
- vytváření dekorací na a ve skleněných předmětech,
- renovace starých uměleckých děl - čištění,
- výzkum termojaderné fúze vyvolané laserem.

Nejpoužívanější laserové metody v průmyslu jsou:

#### **A) Řezání laserem**

Nejpoužívanější lasery v tomto oboru jsou kontinuální CO<sub>2</sub> lasery se středním výkonem do 15 kW, kterými je možné řezat konstrukční oceli do tloušťky až 20 mm, korozivzdorné oceli do tloušťky 10 mm a slitiny hliníku do tloušťky 5 mm. Pro přesnější řezy s menší šířkou řezné spáry se používají Nd: YAG lasery o výkonu 100 až 1000 W, kterými lze řezat konstrukční oceli do tloušťky 6 mm, korozivzdorné oceli do tloušťky 3 mm a slitiny hliníku do tloušťky 2 mm. Laserem lze řezat např. titan, oceli s nízkým obsahem uhlíku a korozivzdorné oceli [8].

## **B) Svařování laserem**

Laserem je možné svařovat jinými metodami obtížně svařitelné materiály, jako titan a jeho slitiny, hliníkové slitiny (např. dnes v letectví a kosmonautice používanou slitinu hliníku a lithia), sendvičových hliníkových konstrukcí, niob, zlato apod. Ke svařování se používají Nd: YAG a CO<sub>2</sub> lasery. Svařování ve srovnání s dalšími aplikacemi vyžaduje menší intenzitu záření optického svazku a větší délku laserového pulzu [8].

## **C) Vrtání laserem**

Pro vrtání laserem platí, že čím je díra delší, tím více se odchyluje tvar díry od geometrie, což je způsobeno rozdělením energie paprsku. Předností laserového vrtání je vytváření malých otvorů a to i v místech, kde je to pomocí jiných metod obtížné nebo nemožné. Díry mohou být kruhové i tvarové. Délka vrtané díry může být až 50 mm. Vrtat lze kovy, plasty, textilie, dřevo, sklo, papír, keramiku a jiné přírodní materiály. Tato technologie se používá pro vrtání kamenů do hodinek, filtrů, vstřikovacích trysek, lopatek proudových motorů apod. [8].

Pro vrtání se používají:

- CO<sub>2</sub> lasery - vyřezávání (kruhových i tvarových) otvorů, nejmenší průměr vyřezávaného otvoru je 5 mm, nejmenší průměr vrtané díry je 0,2 mm,
- Nd: YAG lasery - vrtání děr o menším průměru, nejmenší průměr vrtané díry je 0,025 mm,
- excimerové lasery - vrtání děr do keramiky.

## **D) Značení, značkování a popis laserem**

Laser na povrchu materiálu s vysokou přesností vytváří stálý, mechanicky odolný a velmi kontrastní popis. Laserem je možné označovat všechny materiály, jako kalené i nekalené oceli a litiny, titan, mosaz, bronz, hliník a jeho slitiny, slinutý karbid, zlato, keramiku, plasty, dřevo, sklo, gumu, papír, kůži atd. Popisovaný povrch může být broušený, pískovaný, lakovaný, černěný, smaltovaný, opatřený povlakem chromu apod. Laserem lze popisovat rovinné, válcové i jinak zakřivené plochy, a to i na málo přístupných místech. Pro popisování se používají především Nd: YAG lasery o výstupním výkonu 50 W, dále CO<sub>2</sub> lasery a excimerové lasery. Nově se pro popisování používají lasery vláknové [8].

## **E) Tepelné zpracování**

Tepelné zpracování materiálů laserem je charakterizováno krátkou dobou ohřevu a malým objemem ohřátého materiálu. Metody tepelného zpracování jsou založeny na ohřevu materiálu - žíhání, kalení a popouštění, tavení materiálu povrchu součásti - tepelné zpevnění s natavením a amorfizace povrchu, odpařování materiálu - rázové zpevnění založené na mechanismu vypařování. Zpravidla se používá kontinuálních CO<sub>2</sub> laserů o výkonu několika tisíc wattů. Velmi výhodné je použití vysoce výkonových diodových laserů, které mají obdélníkovou stopu paprsku na opracovávaném materiálu. Kalit lze vnější plochy, ale také např. drážku v díře, vnitřní dosedací plochy apod. [8].

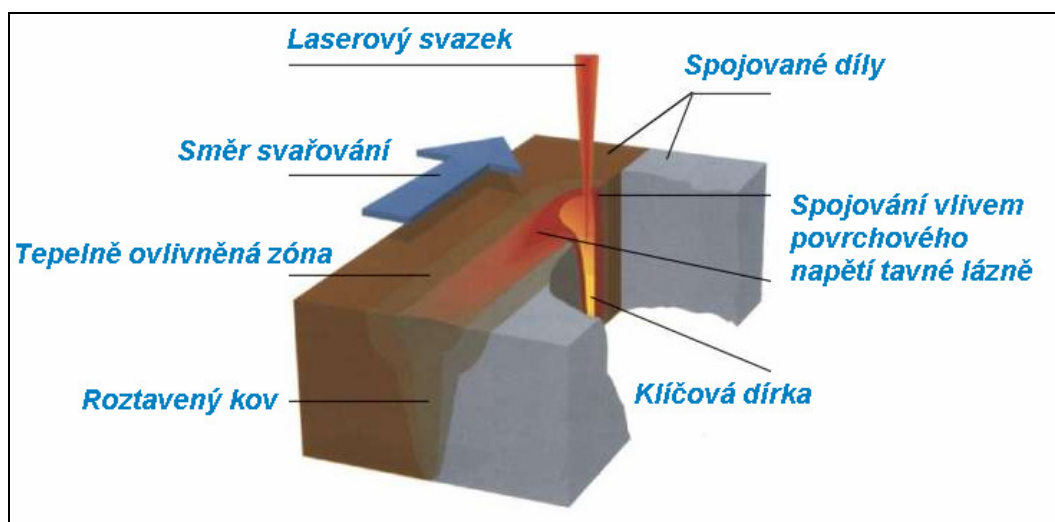


## F) Gravírování (mikrofrézování) laserem

Gravírování se používá pro vytváření jednoduchých i velmi složitých reliéfů, především do kalených ocelí (např. do forem pro stříkání plastů a zápustek), keramických materiálů, dřeva, gumy apod. Podstatou metody je odpařování materiálu v místě, kde působí paprsek laseru. Gravírování může být v rovině, v několika různých hloubkách nebo lze vytvářet prostorové reliéfy. Pro gravírování do kovových a keramických materiálů se používají především Nd:YAG lasery, pro gravírování do dřeva a gumy jsou vhodné CO<sub>2</sub> lasery [8].

## 3.5 Laserové svařování

Technologické lasery jsou ideálně vhodné pro širokou škálu různých úkolů v oblasti svařování. Jejich výkon se nejčastěji pohybuje v rozmezí 0,5 - 9 kW a vystupující laserový paprsek je možné zfokusovat na průměr 0,5 mm a menší, což představuje ideální nástroj pro svařování (obr. 6).



Obr. 6 Princip laserového svařování [10]

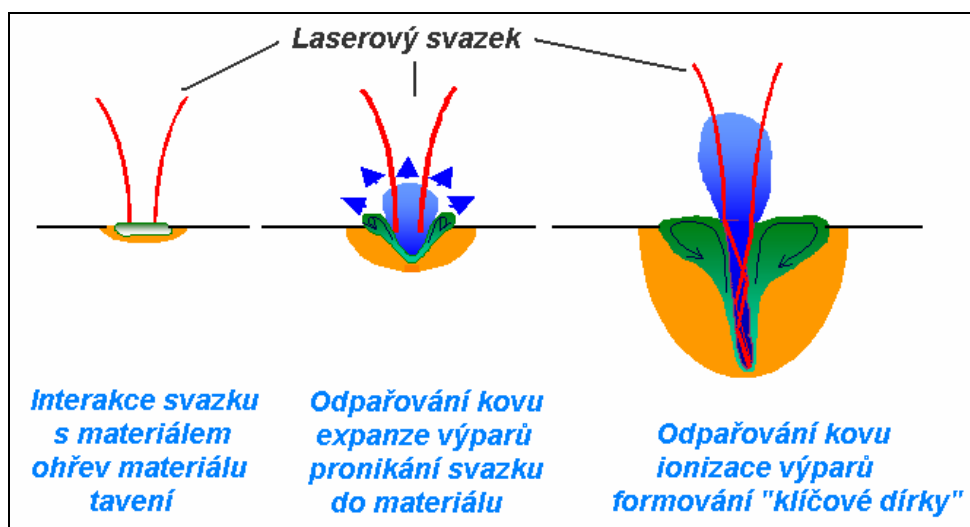
### 3.5.1 Tvorba svarových spojů

Svarový spoj lze laserem vytvořit v zásadě dvěma způsoby:

A) Pulzním svařováním s nízkou opakovací frekvencí, přičemž mezi jednotlivými pulzy ztuhne (úplně nebo částečně) svarová lázeň. Svarovou housenku pak tvoří mnoho za sebou jdoucích a vzájemně se překrývajících se bodů. Tak se vytváří svarové spoje zejména na menších tloušťkách materiálu, v malosériové a kusové výrobě, při spojování obtížně svařitelných materiálů a tam, kde nelze kvůli konstrukčnímu uspořádání svařovaných dílů efektivně použít jinou metodu.

B) Druhá možnost je založena na využití vysoké hustoty výkonu v dopadové ploše pro vznik tzv. klíčové dírky (key hole) obr. 7. Jde o kapiláru naplněnou ionizovanými kovovými výpary

o vysoké teplotě. Stěny kapiláry tvoří roztavený kov. Kapilára hraje důležitou úlohu, neboť umožňuje přenášet energii přímo dovnitř materiálu podél svarových ploch. Jamka je přesouvána mezi díly určenými ke spojení rychlostí svařování. Při posuvu svazku ve směru svařování dochází vlivem povrchového napětí roztaveného kovu k opětovnému spojení svarového kovu za „klíčovou dírkou“. Tento efekt umožňuje svařování tupých svarů různých tloušťek bez úpravy svarových ploch, bez přídavného materiálu a na jeden průchod – a to s plným, nebo částečným průvarem. Ekonomický přínos této metody je zřejmý. Snadná kontrola průvaru společně s úzkou tepelně ovlivněnou oblastí zajišťují vysokou kvalitu svarového spoje. Tento způsob svařování umožňuje automatizaci svařovacího procesu. Tavná lázeň je v obou případech chráněna před nepříznivými účinky okolí ochrannou atmosférou [10].



**Obr. 7** Vznik klíčové dírky [10]

Při tavném svařování je pro vytvoření svarového spoje velmi důležitý minimální energetický vstup. Čím nižší je energie vstupující do technologického procesu, tím menším deformacím svar podléhá. Laser je schopen dodávat vstupující energii ve velmi zfokusované formě, což umožňuje vytvořit hluboký a úzký svar s minimálním tepelně ovlivněným pásmem. Navíc, protože objem roztavené oceli je velmi malý, je možno pracovat i při větších tloušťkách bez přídavného materiálu.

Svařování v jedné vrstvě je možné u materiálů do tloušťky až 12 mm, a to mnohem rychleji než konvenčními metodami.

Vysoká kvalita a reprodukovatelnost svaru je zaručena programovým ovládním manipulátoru i vlastního laseru. Většinu materiálů svařitelných běžnými metodami je možno svařovat i laserem, často mnohem rychleji a s lepšími výsledky. Díky velice malému tepelně ovlivněnému pásmu kolem svaru je v některých případech možné svařovat i materiály, které je velice problematické svařovat konvenčními metodami.

Vynikajícím materiálem pro svařování laserem jsou nerezavějící oceli, kde se dosahují homogenní svary bez pórů, dále nízkouhlíkaté oceli s obsahem uhlíku do 0,3% bez výrazných znečišťujících příměsí a s nízkým obsahem síry. Vhodnými materiály pro laserové svařování jsou i méně obvykle používané materiály, jako titanové, zirkonové a chromniklové slitiny a

některé slitiny s relativně nízkou elektrickou vodivostí bez prchavých příměsí. Kovy jako hliník nebo měď nejsou příliš vhodné z důvodu vysoké reflexivity povrchu vůči CO<sub>2</sub> záření a vyžadují proto použití speciální postup a velkou opatrnost. Oceli s vysokým obsahem uhlíku nebo materiály obsahující vměstky (např. mnohé vysokolegované slitiny) jsou svařitelné speciálními svařovacími technologickými postupy a musí být podrobeny tepelnému zpracování před nebo po svařování. Materiály obsahující prchavé příměsí nejsou velmi vhodné pro svařování laserem. Typickým příkladem těchto materiálů jsou mosazi, galvanická ocel, magnetické slitiny a zinek.

Zfokusaný laserový paprsek je schopen roztavit a částečně i odpařit zpracovávaný materiál. Při tomto procesu se na povrchu materiálu vytvoří dutina vyplněná parami kovů o vysokém tlaku a roztaveným materiálem, který je s parami kovu v rovnovážném stavu. Tato dutina funguje jako výborný absorbér laserové energie. Protože tvar této dutiny je hluboký a úzký, zanechává laser hluboký a úzký svar.

Tavná lázeň se chrání před oxidací ochrannou atmosférou, složenou obvykle z dusíku, argonu, oxidu uhličitého nebo helia. Kontrola procesu svařování je zabezpečována ovládním výkonu laseru a regulací svařovací rychlosti. Šířku svaru lze ovlivňovat změnou parametrů dopadajícího laserového paprsku pomocí fokusační optiky nebo změnou vzdálenosti svarku od laserové hlavy [9].

### **3.5.2 Příprava svarového spoje při laserovém svařování**

Správné sestavení svarového spoje je při laserovém svařování velmi důležitým faktorem. Laser je velice přesný nástroj vyžadující poměrně vysokou úroveň přípravy. Typická šířka stopy při svařování vysoko - výkonovým laserem je asi 1 mm a mezera pro svařování by neměla překročit 25 % šířky této stopy. Jen tak je zajištěna správná fúze svarových ploch. U většiny laserových svarů se nepoužívá přídavný materiál, proto musí být mezery mezi plochami svaru velice úzké (max. 0,2 mm), jinak mohou vznikat vruby.

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

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

Při svařování laserem je možné použít také přídavný materiál, a to buď ve formě drátu přidávaného do svaru nebo plnicí kovové vložky. V tomto případě je možno tolerovat větší mezery mezi stěnami budoucího svaru. Přídavným materiálem je možno i ovlivnit chemické složení svaru a zvýšit např. svařitelnost vysokouhlíkových ocelí [9].

### **3.5.3 Výhody a nevýhody laserového svařování**

Laserové svařování má oproti jiným metodám celou řadu předností. Mezi nejdůležitější patří:

- + lehce dosažitelný úzký a hluboký svar u širokého spektra materiálů,
- + efektivní hluboké svary mohou být provedené u materiálů o tloušťce až 12 mm,
- + laserové svařování probíhá s velmi malým vstupem energie na jednotku délky, výsledkem čehož jsou malé deformace, malé zbytkové vnitřní pnutí vzniklé svařováním a malé tepelně ovlivněné pásmo,
- + vysoká produktivita práce technologického procesu,
- + setrvačnost laserového paprsku je velmi malá, laserové svařování je proto vhodné pro automatizaci,
- + laserové svařování probíhá na vzduchu bez použití vakua pouze se speciální inertní přídavnou atmosférou,
- + nedochází k žádnému znečištění svaru materiálem elektrod,
- + laserový paprsek může lokálně svařovat i na místech těžko dostupných, kde by to bylo jinými způsoby svařování obtížné.

Mezi hlavní nevýhody laserového svařování patří:

- nedostatek mobility, někdy nedostatek flexibility,
- vysoké pořizovací náklady na zařízení,
- některé materiály, jako jsou mosazi, galvanická ocel, magnetické slitiny a zinek obsahující prchavé příměsi nejsou vhodné pro svařování laserem,
- u velkých tloušťek materiálů při svařování může dojít k poškození svarových ploch,
- nízká překlenutelnost mezer.

### **3.5.4 Typické aplikace technologie svařování materiálů laserem**

Obecně se dá říci, že technologie svařování materiálů laserem je vhodná tam, kde je nutné zrealizovat velmi náročné svary z hlediska kvalitativního a z hlediska sériové a hromadné výroby při požadavku automatizace tohoto procesu.

Hlavním odbytištěm uvedené technologie budou tedy:

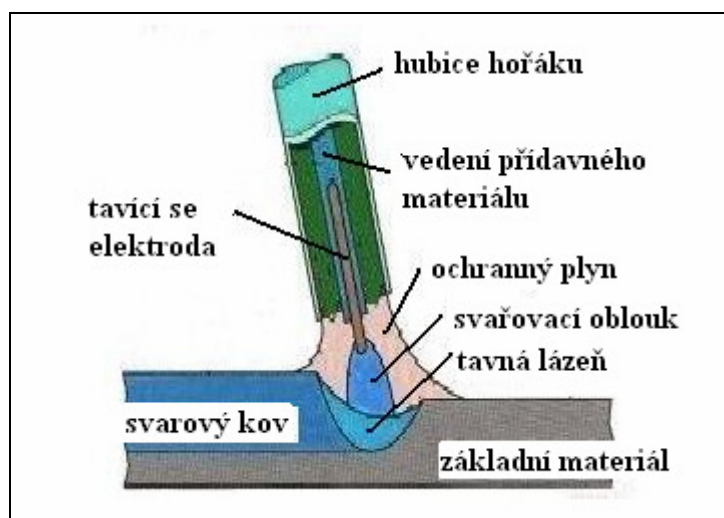
- strojírenská výroba, zvláště pak výroba automobilů,
- zbrojní výroba,
- elektrotechnická výroba,
- výroba zdravotnické techniky.

## 4. Svařování metodami MIG a MAG [4], [11]

Jedná se o obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře (GMAW) nebo bez ochranné atmosféry (s tavidlem s vlastním ochranným plynem), které se dělí na svařování tavící se elektrodou v ochraně inertního plynu MIG (*Metal Inert Gas*) a svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu MAG (*Metal Active Gas*). Svařování MIG/MAG se také souhrnně nazývá jako svařování MSG (*Metal Shielding Gas* = svařování kovů v ochranném plynu).

Svařování metodou MIG/MAG je založeno na hoření oblouku mezi tavící se elektrodou a základním materiálem v ochranné atmosféře inertního nebo aktivního plynu.

Do místa svařování je trvale dodáván přídavný materiál (tavící se elektroda) pomocí kladek umístěných v podavači. Speciálním hořákem se současně dodává i ochranný plyn (nebo směs plynů), jehož úkolem je ochrana tavné lázně, oblouku a nejbližší okolní plochy před atmosférickou oxidací. Používá se na svařování uhlíkových ocelí, nerezů, hliníku (a jeho slitin) i speciálních kovů (nikl, měď a jejich slitiny). Pokud je součástí svařovacího zařízení nádoba s ochranným plynem (inertním plynem nebo směsí plynů) spolu s podavačem přídavného materiálu, jedná se o svářečku v ochranné atmosféře (MIG nebo MAG). Nepřítomnost nádoby s ochranným plynem, spolu s použitím plněné elektrody identifikuje svářečku bez ochranné atmosféry – tzv. metoda FLUX. V takovém případě je ochranný plyn získáván z tavidla v jádru plněné elektrody [11].



Obr. 8 Princip svařování MSG [24]

### 4.1 Základní informace o svařování

#### 4.1.1 Svařovací zdroje

Účelem zdroje je dodávat do místa svaru materiál speciálním hořákem a dále udržovat elektrický oblouk mezi přídavným materiálem a svařovaným materiálem. Na rozdíl od MMA (*Manual Metal Arc Welding* = ruční obloukové svařování) a TIG (*Tungsten Inert Gas* =

svařování wolframovou elektrodou) zdrojů, kde je pouze jeden regulovatelný parametr (svařovací proud), jsou na MIG/MAG zdrojích (obr. 9) dva regulátory: jeden na regulaci intenzity oblouku svařovacího proudu a druhý na regulaci rychlosti posuvu drátu.



Obr. 9 Svařovací zdroj [11]

Zdroje dělíme do dvou kategorií:

### A) Stejnoseměrné zdroje

Jsou nejobvyklejší, poskytují vysoce stabilní oblouk také díky konstantnímu přísunu přídavného materiálu. Umožňují částečnou flexibilitu volbou napětí a rychlosti posuvu přídavného materiálu. Lze je využít jak pro svařování s velmi krátkou dobou (*short arc*), tak i pro dlouhotrvající plynulé svary (*spray arc*).

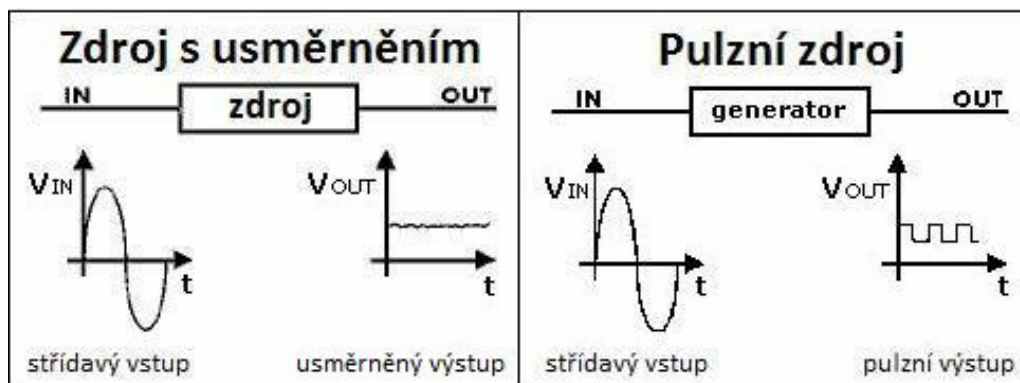
### B) Pulzní zdroje

U těchto zdrojů obsluha nereguluje úroveň napětí, ale proud. Ten není konstantní, ale je upravován řadou impulzů (proto „pulzní“). Účelem pulzů je zesílit schopnost odkapávání přídavného materiálu. Velmi důležitá je přesná synchronizace rychlosti posuvu přídavného materiálu a pulzů. Oba regulátory se používají tedy současně. Dnešní trend je sjednocovat obě funkce do jednoho ovládacího prvku.

Použití rozdílného připojení k pólům zdroje umožňuje svařování dvěma způsoby:

- **stejnoseměrné s přímou polaritou** - takto označujeme připojení, kde elektroda je připojena na záporný pól svařovacího zdroje. Tento způsob se používá při svařování plněnou elektrodou s tavidlem (metoda FLUX). U tohoto připojení se zmenšuje hloubka závaru, stejně tak šířka housenky a převýšení roste. U použití plné elektrody se tvoří na konci stabilní a rozměrná kapka, která se projevuje zvýšeným rozstříkáním svarového kovu. Užívá se při navařování.

- **stejnoseměrné s nepřímou polaritou** - takto označujeme připojení, kde je elektroda připojena na kladný pól svařovacího zdroje. Při tomto zapojení se tvar průřezu vyznačuje zvýšenou hloubkou závaru, malým převýšením a relativně širší housenkou. Jedná se o nejčastější zapojení [4].



Obr. 10 Závislost napětí na čase u zdroje s usměrněním a pulzního zdroje [11]

#### 4.1.2 Ochranné plyny

Smyslem plynů je ochrana tavné lázně před vlivy okolí - vzdušné vlhkosti a nečistotám, a to vytěsněním atmosférického vzduchu (který způsobuje oxidaci a nitridaci svařového kovu) plynem. Dělíme je do dvou kategorií: inertní (argon, helium a jejich směs) a aktivní (CO<sub>2</sub> a směsi argon/kyslík nebo argon/CO<sub>2</sub>). Ve směsích je nejobvyklejší poměr 80 % Ar / 20 % CO<sub>2</sub> pro uhlíkové oceli. Pro svařování nerezů by obsah argonu ve směsi s kyslíkem nebo CO<sub>2</sub> neměl být nižší než 98 % [11].

Tab. 1 Standartní dvousložkové plyny pro metodu MAG firmy AIR PRODUCTS spol. s r.o. [12]

Materiál	Druh plynu	Složení		Vlastnosti
Uhlíkové konstrukční oceli	Euromix M21	Ar	82%	Univerzální plyn, vhodný pro svařování různých sil materiálu s dostatečným průvarem a kvalitou povrchu svaru.
		CO <sub>2</sub>	18%	
Korozivzdorné oceli	Euromix M13	Ar	98%	Pro svařování středních a větších tloušťek materiálu, velmi dobrá kvalita svaru s minimálním rozstříkáním.
		O <sub>2</sub>	2%	

**Tab. 2** Třísložkové plyny dodávány v lahvích 200 bar firmy AIR PRODUCTS spol. s r.o. [12]

Materiál	Druh plynu	Složení		Vlastnosti
Uhlíkové konstrukční oceli	Weldap 5	Ar	93%	Třísložková směs argonu CO <sub>2</sub> a kyslíku. Specialista na tenké plechy s minimálním rozstříkem a nízkým vneseným teplem.
		CO <sub>2</sub>	5%	
		O <sub>2</sub>	2%	
	Weldap 15	Ar	83%	Třísložková směs argonu CO <sub>2</sub> a kyslíku. Plyn určený pro všechny síly materiálu, vyznačující se zvýšenou rychlostí svařování, sníženým rozstříkem, zvýšenou tepelnou energií a dokonalým průvarem.
		CO <sub>2</sub>	15%	
		O <sub>2</sub>	2%	

Ochranné plyny svým složením a množstvím ovlivňují řadu svařovacích charakteristik mezi které patří:

- způsob přenosu svarového kovu obloukem,
- hloubka závaru a profil svaru,
- množství rozstříku,
- rychlost svařování,
- stabilita elektrického oblouku.

#### 4.1.3 Přídavné materiály pro svařování metodou MIG/MAG

Dělíme je podle chemického složení a podle struktury jádra (plné elektrody a plněné elektrody). Pozornost musí být věnována vlhkosti na povrchu elektrody, která způsobuje pórovitost a trhliny ve svaru a také navinutí elektrody na cívce. Nepravidelný návin způsobuje nestabilní podávání a sváření. Plná elektroda má obvykle stejné složení jako svařovaný materiál, s chemickými příměsmi pro čištění materiálu při sváření. Nejobvyklejší průměry jsou v rozmezí 0,6 - 1,6 mm. Plněná elektroda s ochranným plynem má jádro vyplněné granulami tavidla, jehož funkce je stejná jakou má obal u obalovaných elektrod. Tavidlo tvoří rutilové, basické, kyselé, případně fluoridové struskotvorné přísady nebo jejich kombinace. Plněná elektroda ve srovnání s plnou elektrodou má větší schopnost udržet stabilní oblouk [4].

Dalšími důvody použití plněných elektrod jsou:

- bezpečné natavení svarových ploch,
- hladký povrch,
- bezvrubé přechody,
- bezroštrikový kapkový nebo sprchový přenos,
- nízká náchylnost ke tvorbě trhlin,
- velmi dobré mechanické vlastnosti svarů,
- možnost legování,
- dobré svařování v polohách.



#### **4.1.4 Výhody a nevýhody svařování MIG/MAG**

Hlavními přednostmi svařování MIG/MAG jsou:

- + svařování ve všech polohách od tloušťky materiálu 0,8 mm,
- + minimální tvorba strusky,
- + přímá vizuální kontrola oblouku a svarové lázně,
- + vysoká efektivita, úspory nedopalků tzv. nekonečným drátem,
- + snadný start oblouku bez nárazu svařovací elektrody do svařence,
- + velmi dobrý profil svaru a hluboký závar,
- + malá tepelně ovlivněná oblast především u vysokých rychlostí svařování,
- + vysoká proudová hustota,
- + vysoký výkon odtavení,
- + široký proudový rozsah pro jeden průměr elektrody,
- + stabilní plynová ochrana v různých variantách umožňující diferencované typy přenosu kovu v oblouku a ovlivnění mechanických vlastností svarů,
- + nízká pórovitost,
- + malý nebo žádný rozstřík kovu elektrody,
- + snadná aplikace metody u robotizovaných a mechanizovaných systémů svařování.

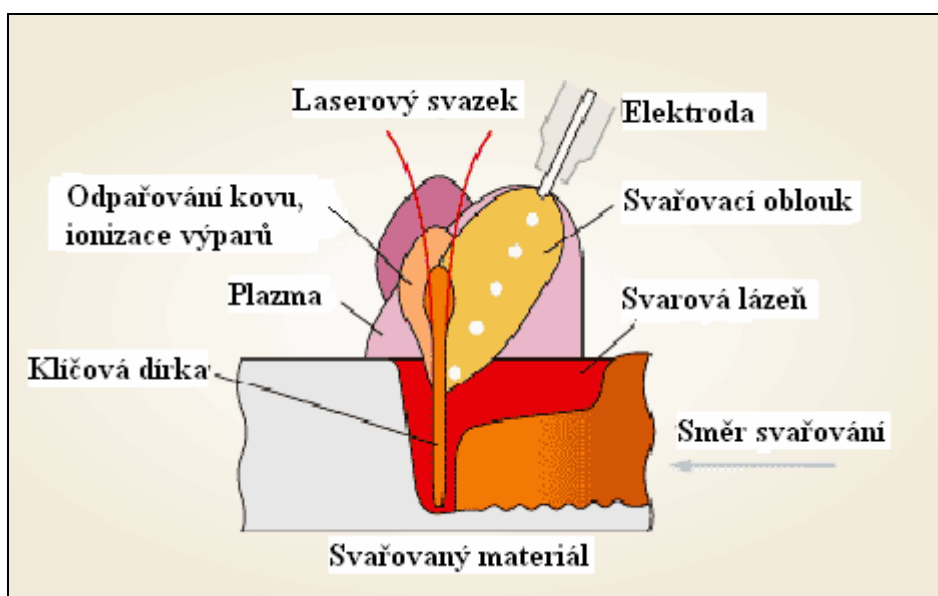
Nevýhody svařování MIG/MAG:

- vyšší deformace základního materiálu a snížení pevnosti v teplem ovlivněné zóně oproti laserovému svařování,
- oproti svařování metodou TIG nelze přerušovat přísun přídavného materiálu a tím ovlivňovat svarovou lázeň, která určuje vlastnosti svarového spoje,
- nelze svařovat bez přídavného materiálu lemový spoj jako u metody TIG.

## 5. LaserHybrid [14], [15], [22]

### 5.1 Proces svařování

LaserHybrid je poměrně nová metoda svařování a pájení a má velice racionální základ. Využívá totiž velice hlubokého, dobře regulovatelného závaru laserového paprsku s relativně velkým objemem odtaveného materiálu při svařování a pájení metodou MSG. Klasické laserové svařování sice zajistí velmi vysokou svařovací rychlost, avšak v důsledku malého průměru ohniska vykazuje nízkou překlenutelnost mezer. U svařování MSG je naopak překlenutelnost mezer velmi dobrá, ale MSG nedosahuje potřebné rychlosti. Obě metody a jejich výhody spojuje LaserHybrid. V podstatě jde o to, že laserový paprsek jakoby „jede“ těsně před hořákem MSG a natavuje materiál. Následně dochází k přísunu přídatného materiálu a vlastního svařování klasickou metodou MSG.



Obr. 11 Popis LaserHybrid – spojení laserového a MSG svařování [25]

U procesu LaserHybrid se potřeba drahé laserové energie omezuje téměř výhradně na tzv. hlubkozávarový efekt, který dovoluje spojovat i silné plechy. Zbývající část energetické potřeby kryje cenově příznivější MIG/MAG proces. Jelikož oba tyto dílčí pracovní postupy soustřeďují svoji energii na jednu procesní zónu, zvětšuje se tedy oproti použití jen jednoho postupu velmi značně hloubka závaru i rychlost [14].

Pomocí metody LaserHybrid lze svařovat hliník, ocel, pozinkovanou ocel a ušlechtilé oceli.

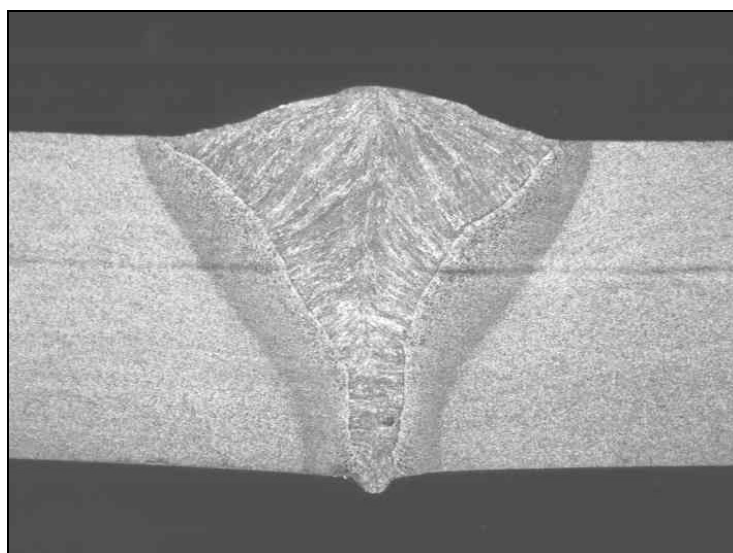
### 5.2 Porovnání řezů svarů

Porovnání příčných řezů svarů při uvedených parametrech má velmi zajímavé vlastnosti a tvary vznikajícího závaru při svarech na tupo. Proláklý povrch svaru při laseru a masivní svar při metodě MSG (MIG) vytvoří při společném působení jako LaserHybrid velice pohledný

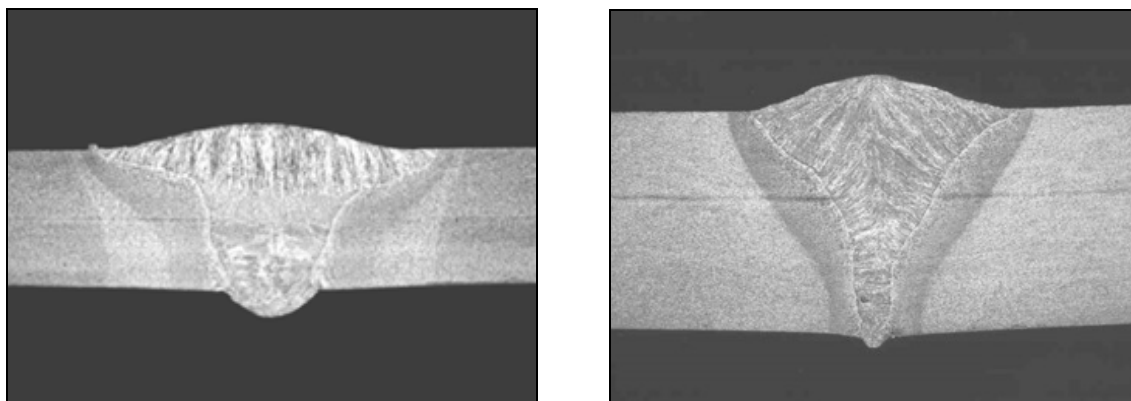
svar s minimálním převýšením s výrazně sníženým množstvím vneseného tepla (obr. 12) do základního materiálu. Další výhodou je významné zvýšení rychlosti svařování [14].

	Laser s přidavným tavidlem	Laser	LaserHybrid
Rychlost svařování	0.75 m/min	1 m/min	2.5 m/min
Energie za jednotku délky	324 kJ/m	220 kJ/m	175 kJ/m
Průřez svaru	14,9 mm <sup>2</sup>	13,1 mm <sup>2</sup>	10,2 mm <sup>2</sup>
Výkonnost	40,3 mm <sup>3</sup> /kJ	43,2 mm <sup>3</sup> /kJ	58,7 mm <sup>3</sup> /kJ

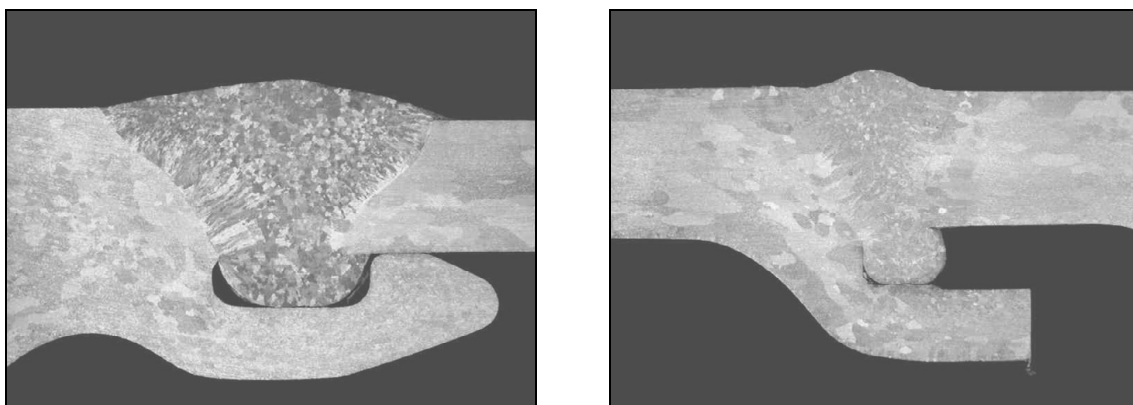
**Obr. 12** Porovnání vneseného tepla a dalších parametrů u svařování laserem s přidavným tavidlem, samostatným laserem a LaserHybridem [22]



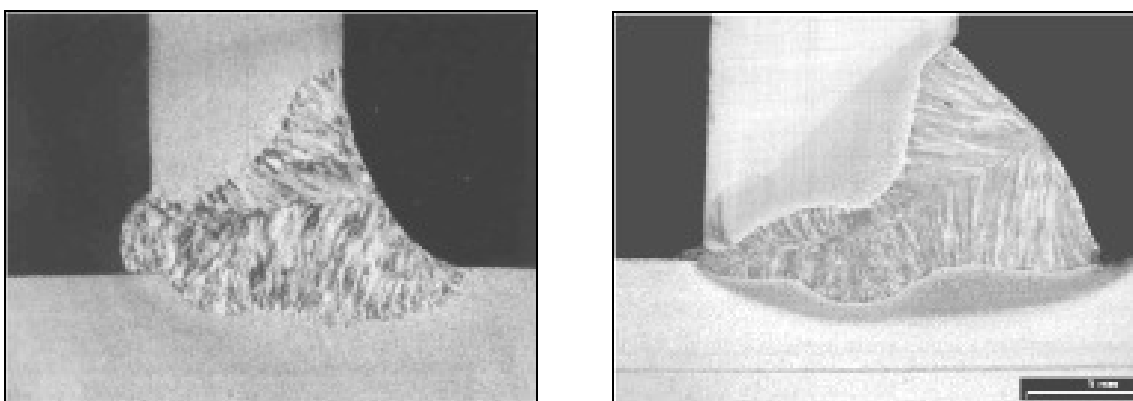
**Obr. 13** Snímek makrostruktury svaru metodou LaserHybrid [16]



**Obr. 14** Porovnání snímků makrostruktury svaru metodou MAG (vlevo) za svařovacího času 0,12 m/min a LaserHybrid (vpravo) za svařovacího času 0,8 m/min [16]



**Obr. 15** Porovnání snímků makrostruktury svaru metodou MIG (vlevo) za svařovacího času 0,7 m/min a LaserHybrid (vpravo) za svařovacího času 1,8 m/min [16]



**Obr. 16** Porovnání snímků makrostruktury svaru T-spoje metodou MIG (vlevo) za svařovacího času 0,24 m/min a LaserHybrid (vpravo) za svařovacího času 1,0 m/min [16]



**Obr. 17** Makrostruktura přeplátovaného spoje Al provedeného LaserHybridem - Řez koutovým svarem na přeplátovaném materiálu Al tl. 30 a 8 mm velmi dobře dokumentuje jak lze při správném seřízení dokonale spojit i velmi masivní materiály pouhým jednovrstvým svarem [14]

### 5.3 Svařovací hlavy

Jádrem svařovacího systému LaserHybrid je kompaktní hlava LaserHybrid (obr. 18) s integrovaným svařovacím hořákem MIG/MAG a vestavěnou laserovou optikou. Napojení této hlavy na běžný průmyslový robot je zajištěné prostřednictvím robotového uchycení. Toto uchycení umožňuje flexibilní uspořádání hlavy LaserHybrid tak, aby se dostala i do obtížně dostupných míst svařovaného dílu. Svařovací elektrodu je možno nastavit do jakéhokoliv směru vůči laserovému paprsku s efektem přesného přizpůsobení spojovacího procesu v závislosti na typu přípravy svaru, výkonu, druhu a složení elektrody a účelu spoje.



**Obr. 18** Svařovací hlava firmy Fronius [15]

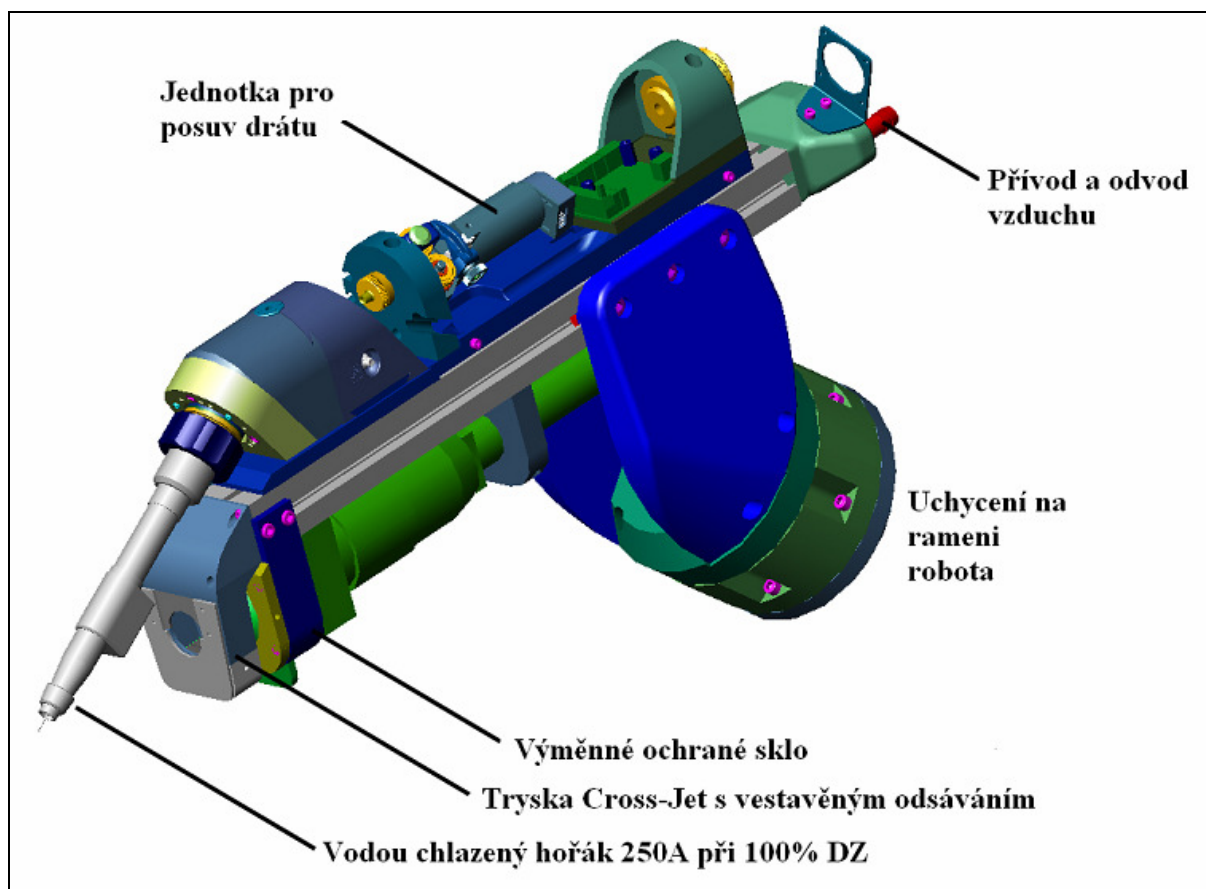
Aby bylo možné chránit laserovou optiku před poškozením vyžadují případně vzniklé rozstříky instalaci odrazného ochranného skla. Aby zůstalo samotné ochranné sklo nepoškozené, čisté a průchodné pro laser, je hlava LaserHybrid vybavená tak zvanou Cross-Jet jednotkou. Proud vzduchu zde odvádí při nadzvukové rychlosti svarové odstříky mimořádně efektivně do odsávacího kanálu. Také proud vzduchu je předtím, než se dostane do oblasti svaru, odsáván, aby nenarušoval působení ochranného plynu. Mimoto zůstává pracovní komora bez nečistot a svarového kouře. Integrovaný svařovací hořák MIG/MAG je vybavený dvouokruhovým chladicím systémem a odebírá svařovací proud z plně digitalizovaného invertorového svařovacího zdroje, který rovněž řídí příslušný podavač přídavného materiálu. U výkonu laseru je v současné době standardem 4000 W, přičemž se objevují aplikace s výkonem 6000 W [15].

Tab. 3 Technické údaje svařovací hlavy na obr. 18 [15]

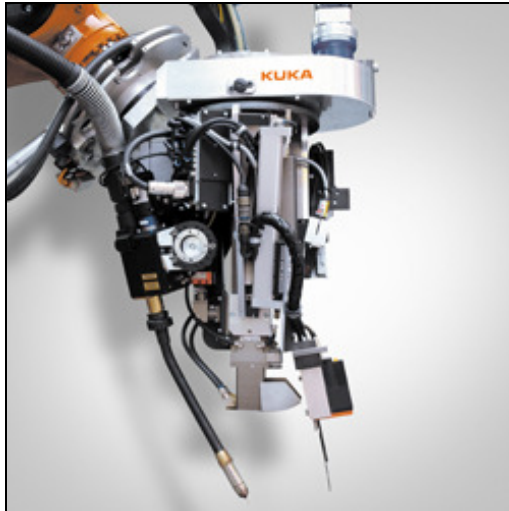
Hmotnost (bez optiky) kg	19
Hmotnost (bez optiky) lb	41.89
Rozměry d x š x v mm	769,5/59/415,7
Rozměry d x š x v in.	30.30/6.26/16.37
Doba zapnutí při 10 min/40 °C (104 ° F)	100 % DZ - 250 A
Výkon laseru	4 kW
Certifikace	CE
Certifikace bezpečnostní třídy	S

**Základní materiály pro svařování:** Stavební oceli, oceli CrNi feritické/austenitické, duplexní oceli, hliníkové materiály, hořčíkové materiály, zvláštní materiály, pozinkované plechy.

**Doporučené oblasti použití:** Výroba zařízení, zásobníků, strojní a ocelářský průmysl, automobilový a dodavatelský průmysl, letecký a kosmický průmysl, výroba kolejových vozidel.



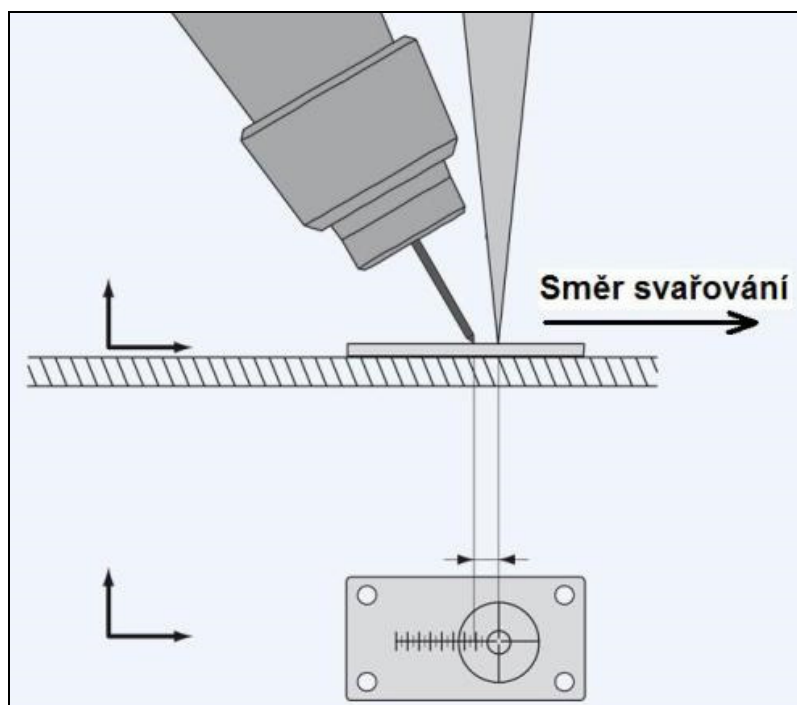
Obr. 19 Popis svařovací hlavy [20]



**Obr. 20** Svařovací hlava vyvinutá firmou KUKA Systems GmbH (vlevo) [26] a svařovací hlava od firmy Carl Cloos Schweisstechnik GmbH (vpravo) [16]

### 5.3.1 Geometrie svařování

Soustava laserového paprsku a MSG systému musí dodržovat poměrně přesnou geometrii (obr. 21) působením tepelných zdrojů tak, aby vnesené teplo bylo minimalizované. Pokud se ohniska příliš vzdálí narůstá vnesené teplo, pokud se příliš přiblíží dochází k nekontrolovatelnému přehřívání svarové lázně, tvorbě pórů a vzniku nestabilních materiálových struktur ve svaru i v přechodovém pásmu. Geometrie je dána konstrukcí svařovací hlavy [14].



Obr. 21 Geometrie paprsku, vzdálenost ohnisek laseru a MSG [14]

## 5.4 LaserHybrid + Tandem

Svařování LaserHybrid + Tandem je automatizovaný vysoce výkonný svařovací proces, který kombinuje proces LaserHybrid s tandemovým svařováním. Společné vedení laserového paprsku třemi oblouky otevírá zcela nové dimenze spojování kovových materiálů velkých tloušťek: vysoká rychlost svařování při současně dobré překlenutelnosti mezer a dobrých metalurgických vlastnostech.

Předbíhající proces LaserHybrid s jedním obloukem vytváří velmi malou tepelnou zónu, kterou ovlivňuje poměrem hloubky navaření a šířkou svaru. Dobíhající tandemový svařovací proces má podstatně nižší energetickou hustotu a je charakteristický vysokým výkonem odtavení. Ocelové plechy o tloušťce např. 8 mm tak lze svařovat se zvýšenou rychlostí [15].

**Základní materiály pro svařování:** Stavební oceli, oceli CrNi feritické/austenitické, duplexní oceli, hliníkové materiály.

**Doporučené oblasti použití:** Výroba zařízení, zásobníků, strojní a ocelářský průmysl, automobilový a dodavatelský průmysl, výroba kolejových vozidel.





Obr. 22 Kombinovaná svařovací hlava - LaserHybrid + Tandem firmy Fronius [15]

Tab. 4 Technické údaje LaserHybrid + Tandem (obr. 22) [15]

Hmotnost (bez optiky) kg	25
Hmotnost (bez optiky) lb	55.12
Rozměry d x š x v mm	769,5/79/780
Rozměry d x š x v in.	30.30/3.11/30.71
Doba zapnutí při 10 min/40 °C (104° F)	60 % DZ - 350 A
Výkon laseru	4 kW
Certifikace	CE
Certifikace bezpečnostní třídy	S

## 5.5 Aplikace ve výrobě

Svařování LaserHybrid se ideálně hodí pro aplikace ve spojení s průmyslovými roboty, protože potenciál tohoto vysokovýkonného svařování se dá využít pouze při automatizovaných aplikacích a flexibilitu této kompaktní svařovací hlavy může využít jen robot. Přes vysokou cenu laseru se tento postup ukazuje jako mimořádně konkurenceschopný. Bylo provedeno porovnání hospodárnosti procesu LaserHybrid se svařováním MIG/MAG při spojování plechů síly 2 mm. Proces LaserHybrid při něm dosáhnul šestinásobku rychlosti procesu MIG/MAG a spokojil se ve stejné době s třetinovým průtokem plynu. Vztaheno na délku svaru se tedy spotřeba plynu omezuje dokonce na osmnáctinu. Nízká potřeba tepla ze strany MIG/MAG procesu také znamená, že se odtavuje menší množství elektrody. Převýšení svaru výrazně mizí a vzniká žádaný tvar svaru se značně nižším vyklenutím. Zejména u koutových svarů se docílí v důsledku hlubšího závaru vyšší pevnosti, než na příklad při laserovém svařování bez přídavného MIG/MAG procesu. Alternativně je možno tímto způsobem snížit objem svarového spoje. Oba tyto efekty, tj. nižší vyklenutí a optimalizovaný

závar mohou kromě toho přispět k výraznému snížení spotřeby přídavného materiálu. Při zakalkulování všech uvedených faktorů vycházejí náklady na metr svaru u svařování LaserHybridem na 1,2 Euro a v případě svařování MIG/MAG na 1,8 Euro.

Pokud se ukazuje jako hospodárnější provádět svary s mnohem větší překlenutelností výhradně postupem MIG/MAG, pak naopak se při menších překlenutelnostech naplno uplatní bonus vyšší rychlosti a produktivity získaný asistencí laserového postupu. Velké ekonomické přednosti procesu LaserHybrid se projevují při překlenutelnosti mezer v rozmezí 0,3 až 0,5 mm. V této oblasti se zvyšuje svařovací výkon oproti čistému svařování MIG/MAG až o čtyřnásobek, na 6 metrů za minutu. Změnou poměru laseru a MIG/MAG složky je možno přizpůsobit tento proces různorodým požadavkům. Tak je například účelné, při velkém podílu širších překlenutelností ve spoji, laser přechodně vypnout [15].

Praktické příklady nejčastějšího využití technologie LaserHybrid:

- strojírenské výrobě (automobily),
- ve vojenském průmyslu,
- elektronické výrobě,
- k výrobě zdravotnické techniky.

### **5.5.1 Použití v automobilovém průmyslu**

#### **Audi A4**



**Obr. 23** Audi A4 [18]

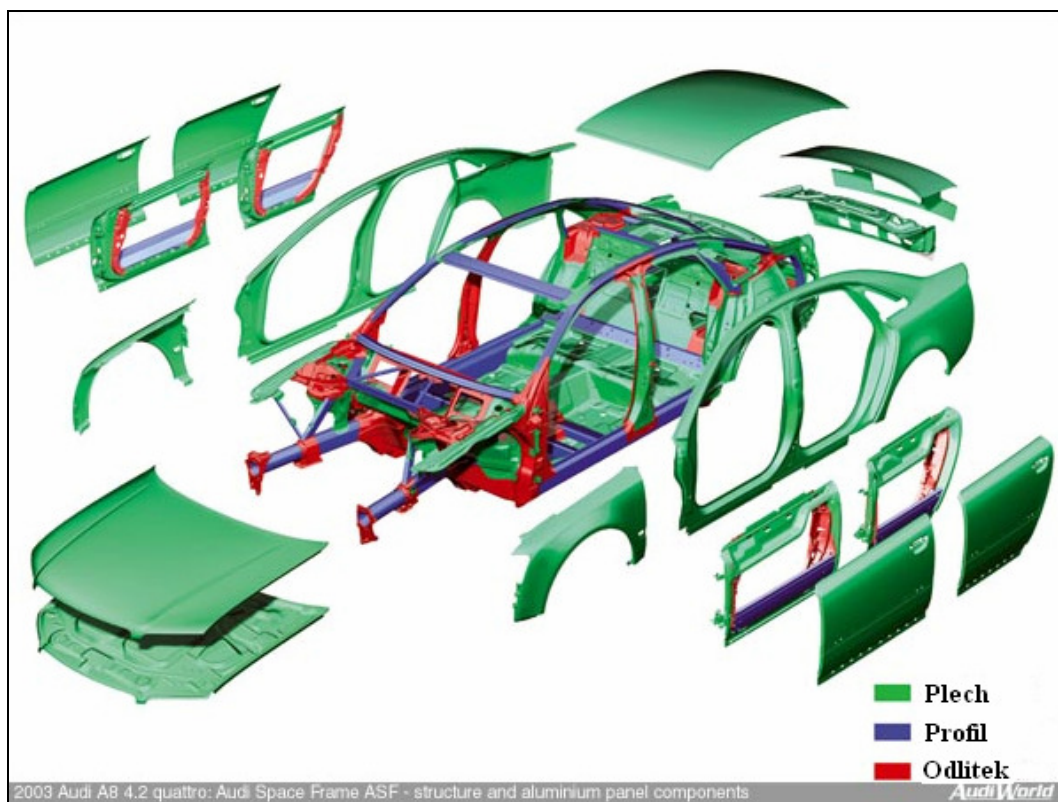
Odborníci Audi vyvinuli předběžnou úpravu jednotlivých součástí za podpory laseru, která zajišťuje vysokou kvalitu svarů i přes existující pozinkování. Jako nářadí slouží impulzový Nd: YAG laser od firmy Trumpf. Již v roce 2005 uplatnil koncern VW v pilotním projektu výroby Passatu postup a systémové komponenty laserového skenerového svařování pro sériovou výrobu. Již zde bylo dosaženo vysoké použitelnosti systémových komponentů a prokázána zlepšená hospodárnost postupu. Nyní i Audi důsledně implementuje postup skenerového svařování do sériové výroby. Již od začátku roku 2007 se dveře následovníka Audi A4 svařují skenerovou optikou a diskovým laserem s výkonem 4 kW z firmy Trumpf. Čtyři svařovací buňky vyrábějí denně 1800 dveří pomocí této nové technologie. Každé skenerové zařízení je opatřeno jedním laserem TruDisk 4002 od firmy Trumpf. Jedná se o nejnovější generaci diskových laserů. Výstupní výkon 4 kW na zpracovávaném kusu se generuje pouze ze dvou disků. I v Audi sází na výhody Trumpf Laser Network (TLN). Tento

systém propojení laserů a robotů umožňuje libovolně mezi sebou spojovat lasery a roboty, takže je zajištěna použitelnost samotného svařovacího zařízení i při případném výpadku jednoho laseru [17].



**Obr. 24** Trumpf PFO 33 (Programovatelná Fokusační Optika) – první robotem řízená skenerová optika, která byla nasazená v sériové výrobě německých automobilek ke svařování součástí karoserií [17]

## Audi A8



**Obr. 25** Složení součástí karosérie Audi A8 [21]

V rámci vývoje vysokovýkonných svařovacích postupů byl v centru pro výzkum hliníku integrován do výrobní koncepce nového projektu vozu Audi A8 hybridní svařovací proces. Hybridní svařování se zde používá pro napojování různých plechových dílů na lisovaný profil. Celkem bylo na jednom vozidle provedeno 65 svarů s celkovou délkou spáry cca 5 m. Délka jednotlivých svarů se pohybovala od 30 do 260 mm.

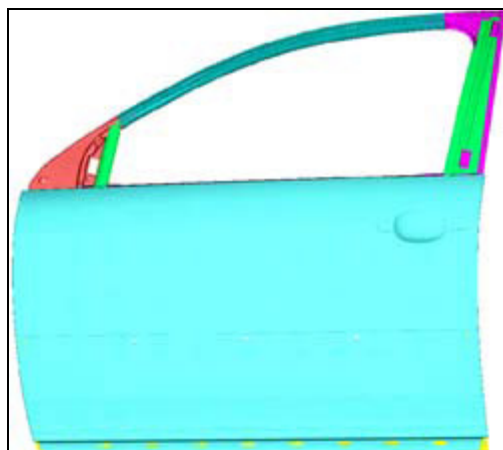
Při párování materiálů o velké tloušťce (2 až 4 mm) bylo (v porovnání s prostým laserovým svařováním) možné zvýšením svařovací rychlosti snížit energetické zatížení této součásti. To se projevilo na minimum snížené tepelné deformace celé konstrukční podskupiny. Byla zvýšena spolehlivost pracovního procesu i kvalita svarového spoje. Projevila se i zlepšená překlenutelnost spár mezi spojovanými díly [19].

#### **Parametry svařovacího procesu :**

- výkon laseru  $P_L = 3,8$  kW,
- rychlost svařování  $v_s = 3,6$  m/min,
- rychlost posuvu drátu  $v_d = 4,5$  m/min.

LaserHybrid je aplikován spolu s MIG svařováním a laserovým svařováním i ke svařování dveří VW Phaeton, kde jedny dveře zahrnují sedm MIG svarů, jedenáct laserových svarů a 48 LaserHybridových svarů. Sedm MIG spojů tvoří 380 mm, jedenáct laserových spojů tvoří 1030 mm a 48 hybridních spojů tvoří celkem 3570 mm dlouhý svar.

Svařování LaserHybrid se používá pro svařování lisovaných profilů, odlitků a plechů z hliníku v modelu Phaeton [20].



**Obr. 26** LaserHybridem svařované dveře Phaeton z VW [20]

#### **5.5.2 Další využití svařování LaserHybridem v průmyslu**

Výroba osobních vagonů pro kolejovou dopravu je v dnešní době orientována především na využití hliníkových slitin (obr. 27). Hlavním motivem je úspora hmotnosti při dostatečné pevnosti vytvrditelných hliníkových slitin na bázi AlMgSi. Životnost AL skříně je 40 let a dá se velmi snadno rekonstruovat, což bývá u skříní ocelových s ohledem na korozi značně

složité. Hmotnost Al skříně 10,5 tuny oproti až 14 tunám skříně ocelové. Vzhledem k rozměrům stavby vagonu je pro přípravu obkladových panelů, podlahy i střechy využíváno svařování MIG, převážně v mechanizované podobě.

Ve firmě ČKD Vagonka Ostrava jsou technologií MIG na automatizovaných pracovištích svařovány hliníkové profily délky až 27 m. Je využíváno i MIG tandemové svařování, které výrazně zvyšuje rychlost svařování a snižuje tepelné zatížení místa svařování. Přesto je oblast svaru vlivem tepelného ovlivnění místem s výrazným poklesem mechanických vlastností vytvrzené hliníkové slitiny a deformace svařence př. svařování podlahy skříně vagonu z Al slitin.

Dalším příkladem je zkouška svařování střechy nákladního vagonu z podobných vytlačovaných hliníkových profilů ze slitiny AlMgSi0,7. Svar byl proveden Nd: YAG laserem o výkonu 4 kW elektrodou AlSi12 impulsním MIG procesem o výkonu 3,65kW.

Mimo několikanásobnému zvýšení rychlosti svařování byl celkový tepelný příkon do svaru zredukován o 85%, což výrazně přispělo k významnému zmenšení deformací zkroucením [22].



**Obr. 27** Skříň osobního vagonu z hliníkové slitiny [22]

Dalším uplatněním svařování LaserHybridem je také v loděnicích ke spojování lodních konstrukcí (obr. 28), kde se svařují podobné tloušťky i rozměry jako při stavbě kolejových vozidel. Na stavbě lodních konstrukcí je nutno svařit mnoho kilometrů svarů o vysoké kvalitě a relativně tlustých materiálech. V loděnicích J. L. Meyer GmbH v Německu bylo nasazeno svařování LasereHybridem na plechu tl. 15 mm na panelech pro sekce lodních trupů a bočních stěn o rozměrech až 20 x 20 m. Při svařování metodou MAG bylo široké tepelné ovlivněné pásmo a velký průřez svarové housenky důvodem výrazné deformace a smrštění panelů. Následné rovnání a vyvařování velkých mezer svarových úkosů zvyšovali náklady na stavbu. V roce 1999 zavedli automatickou svařovací linku s laserovým hybridní svařováním na výrobu palubních panelů a bočních stěn tupých i koutových svarů.

Aplikací LaserHybridu je tepelné zatížení značně redukováno a pokles pevnosti svarového spoje je lokalizován jen na úzký pás kolem svaru [22].



**Obr. 28** Svařování koutového a tupého svaru při výrobě panelů lodních trupů v loděnicích J. L. Meyer GmbH [22]

## 5.6 Výhody a nevýhody svařování LaserHybridem

Spojením procesů MIG/MAG a laserového svařování dojde k následujícím synergickým efektům:

- + stabilizaci procesu střídavým působením elektrického oblouku a laserového paprsku, čímž je umožněno téměř bezroztřikové svařování,
- + dokonalejší překlenutelnosti mezer,
- + zmenšení tavné lázně, která vyžaduje nižší přísun tepla, čímž dojde ke zmenšení tepelně ovlivněné zóny. Pro obrobek to znamená snížení tepelné deformace a snížení času potřebného k dodatečnému opracování,
- + úspora přídavného materiálu,
- + zvětšení hloubky závaru především u koutových svarů,
- + svary se vyznačují vysokou pevností a velmi dobrou povrchovou kresbou,
- + zkrácení výrobních časů.

Hlavními nevýhodami této metody zůstávají především:

- vysoké investiční náklady spojené s instalací zařízení, které předurčují technologii pouze pro sériovou výrobu,
- nízká mobilita a flexibilita zařízení.

## 6. Závěr

V devadesátých letech minulého století a první polovině tohoto desetiletí prodělala technologie laserového svařování poměrně dynamický vývoj – zčásti díky vývoji výkonnějších a nových typů laserů, zčásti též díky širšímu používání nových moderních materiálů, které jsou jinými metodami těžko svařitelné. Laserové svařování je již běžnou součástí mnoha tuzemských strojírenských podniků, ve kterých plní především automatizované spojování nejrůznějších dílů a materiálů, kde je potřeba vysoké rychlosti svařování, přístupnost k obtížným místům a nízké tepelné ovlivnění materiálu. Laserové svařování se tedy stalo v mnoha případech nenahraditelné, i když je po ekonomické stránce poměrně drahou záležitostí.

Svařování pomocí technologií MAG a MIG je již velmi rozšířené, a to jak u velkých firem, kde je využíváno již dlouhou řadu let, tak se i stalo součástí běžného opravárenství svařováním. Shrnutě tyto metody (MSG) nahradily svou kvalitou provedení svaru, hlubokým závarem a také bezstruskovým svařováním ruční obloukovou metodu svařování.

Metoda LaserHybrid tedy ve velké míře spojuje výhody laserového a MSG svařování. Ačkoliv je tato metoda v počátcích má ohromný příslib do strojírenského průmyslu jako prostředek ke zlepšení kvality svarů, zkrácení výrobních časů a dosažení celkové úspory nákladů vynaložených ke svařování.

LaserHybrid je zajímavý zejména pro ty obory, kde se investiční náklady v důsledku vysokého počtu kusů součástí s velkým podílem svářečské práce, rychle amortizují. Za zmínku stojí především automobilový průmysl a jeho subdodavatelé, ale například také výrobci zásobníků, rour a potrubních vedení. Postup LaserHybrid se hodí pro široké spektrum materiálů a síly plechu. Pro velký počet aplikací na hliník se ukazuje LaserHybrid jako výhodný především tam, kde jsou výrobní tolerance pro laserové svařování příliš velké a náklady na přípravu svaru příliš vysoké. Obdobně příznivě se jeví relativně nízké tepelné zatížení procesu LaserHybrid. Jednak nevykazují zejména vysokopevnostní materiály téměř žádné ztráty pevnosti a jednak zabezpečují nízké tepelné deformace vysokou přesnost svařených dílů.

Výsledným efektem celého souhrnu předností je zvýšená konkurenceschopnost a mnohostrannost procesu LaserHybrid, která odkrývá další aplikace spojovací techniky. Velké šance jsou vidět zejména tam, kde velká překlenutelnost mezer buď nepřipouští nebo připouští, ale jen s odpovídajícími náklady, použití výlučně laserového svařování. Úspora na výkonu laseru snižuje investiční náklady. Nově otevřené aplikační oblasti a optimalizovaný výkon zvyšují produktivitu. Synergické efekty zvyšují efektivitu procesu. Tím vším dokazuje proces LaserHybrid rozšíření hranic tohoto nového termického spojovacího postupu ve směru hospodárnosti, kvality svaru a provozní spolehlivosti.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DVOŘÁK, M., a kol. *Technologie II*. 2vyd. . Brno : CERM, 7/2004. 237 s. ISBN 80-214-2683-7.
- [2] BLAŠČÍK, F., a kol. *Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvárania*. 1vyd. Bratislava : ALFA, 1988. 830 s. ISBN 063-563-87.
- [3] KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1vyd. Ostrava : Zeross, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
- [4] KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie svařování a zařízení*. 1vyd. Ostrava : Zeross, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
- [5] KOLEKTIV AUTORŮ. . *Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení*. 1vyd. Ostrava : Zeross, 1999. 249 s. ISBN 80-85771-70-5.
- [6] KOLEKTIV AUTORŮ. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. 1vyd. Ostrava : Zeross, 2000. 214 s. ISBN 80-85771-72-1.
- [7] Laser – co to je a jak se to stalo . *FCC Public s. r. o.* [online]. 2004, 01, [cit. 2010-02-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz>>.
- [8] Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 17. července 2006, 7, [cit. 2010-04-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>>.
- [9] *Welding.cz* [online]. 10/05/2007 [cit. 2010-03-30]. Laserové svařování. Dostupné z WWW: <<http://www.welding.cz/laser/svarovani.htm>>.
- [10] Laserové svařování - ekonomika a kvalita. *Časopis KONSTRUKCE* [online]. 2006, 2, [cit. 2010-02-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita>>. ISSN 1803-8433.
- [11] *Toolscomp.cz* [online]. 16.6.2009 [cit. 2010-03-26]. Pohled do technologie svařování - MIG-MAG. Dostupné z WWW: <<http://www.toolscomp.cz/technologie/pohled-do-technologie-svarovani-mig-mag/>>.
- [12] *Svařování a tepelné dělení - AIR PRODUCTS spol. s.r.o* [online]. 2010 [cit. 2010-03-10]. Plyny pro svařování . Dostupné z WWW: <[http://www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/MIG\\_MAG.htm](http://www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/MIG_MAG.htm)>.
- [13] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování . Svařák.cz* [online]. 27.10.2006, [cit. 2010-04-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.svarak.cz/f/svarak>>.
- [14] *SVARINFO.cz : Svařování prakticky a s nadhledem* [online]. 12. 05. 2009 [cit. 2010-03-12]. Nové metody svařování: LASERHYBRID. Dostupné z WWW: <<http://www.svarbazar.cz>>.



- [15] *FRONIUS Česká republika s.r.o.* [online]. 2006-10-06 [cit. 2010-03-20]. LaserHybrid. Dostupné z WWW: <<http://www.fronius.com>>.
- [16] *MSG-Laser-Hybrid Welding Process* [online]. 2009 [cit. 2010-03-20]. CLOOS schweisstechnik. Dostupné z WWW: <<http://www.cloos.com.cn>>.
- [17] *Www.carmotor.cz* [online]. 09.05.2008 [cit. 2010-03-20]. Laserové skenerové svařování dveří nového Audi A4. Dostupné z WWW: <<http://www.carmotor.cz/magazin>>.
- [18] *Seznam.cz* [online]. 2010 [cit. 2010-04-06]. Seznam Obrázky . Dostupné z WWW: <[www.autovse.ru/pic/a/audi.a4.jpg](http://www.autovse.ru/pic/a/audi.a4.jpg)>.
- [19] 1 Svařování Laser-Hybridem. - [online]. 2010, [cit. 2010-04-06]. Dostupný z WWW: <<http://homen.vsb.cz>>.
- [20] Staufer, H.; Rührnöbl, M.; Miessbacher, G. LaserHybrid Welding and LaserBrazing: State of the Art in Technology and Practice by the Examples of the Audi A8 and VW-Phaeton. *Fronius International GmbH, Wels - Austria* [online]. [cit. 2010-04-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.fronius.com>>
- [21] *The new Audi A8* [online]. 2010 [cit. 2010-04-07]. The New Audi A8: A New Sporting Dimension in the Luxury Segment. Dostupné z WWW: <<http://www.audiworld.com/news>>.
- [22] KUBÍČEK, Jaroslav; MRŇA, Libor. Technické aspekty svařování laserem. *Svařák.cz* [online]. 14.3.2008, [cit. 2010-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.svarak.cz/f/svarak>>.
- [23] Lasery. *ČVUT, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2010-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady>>.
- [24] *Welding Procedures and Techniques* [online]. 2007 [cit. 2010-04-16]. MIG Welding. Dostupné z WWW: <<http://www.weldingengineer.com>>.
- [25] Hybrid welding for the automotive industry. *OptoIQ* [online]. Feb 1,2003, [cit. 2010-04-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.optoiq.com>>.
- [26] *Kuka Systems* [online]. 2010 [cit. 2010-04-16]. Hybrid Welding Technology. Dostupné z WWW: <[http://www.kuka-systems.com/en/branches/technologies/exhibition\\_hybrid/](http://www.kuka-systems.com/en/branches/technologies/exhibition_hybrid/)>.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
$U_s$	Svařovací napětí	[V]
$I_s$	Svařovací proud	[A]
$I_p$	Proudová hustota	[A.mm <sup>-2</sup> ]
$\varnothing d$	Průměr elektrody	[mm]
$t$	Tloušťka plechu	[mm]
$P_n$	Výkon navaření	[kg.h <sup>-1</sup> ]
$v_d$	Rychlost posuvu drátu	[m.min <sup>-1</sup> ]
$v_s$	Rychlost svařování	[m.min <sup>-1</sup> ]
$S_{op}$	Spotřeba ochranného plynu	[l.min <sup>-1</sup> ]
$f_s$	Frekvence svařování	[Hz]
$E_s$	Energie za jednotku délky	[kJ.m <sup>-1</sup> ]
$S_s$	Průřez svaru	[mm <sup>2</sup> ]
$P_s$	Výkonnost svařování	[mm <sup>3</sup> .kJ <sup>-1</sup> ]
$P_L$	Výkon laseru	[kW]