

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta

(Katedra materiálu a strojírenské technologie)

Využití svařování laserem v automobilovém průmyslu

bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Vypracoval: Vojtěch Bezvoda

PRAHA 2011

Vysoká škola: Česká zemědělská univerzita v Praze	Fakulta: Technická
Katedra: materiálu a strojírenské technologie	Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Vojtěch Bezvoda**

Studijní obor: Silniční a městská automobilová doprava

Název práce: Využití svařování laserem v automobilovém průmyslu

Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

- shromáždit literární poznatky o svařování laserem

Osnova práce:

1. Úvod.
2. Podstata, výhody a nevýhody svařování laserem.
3. Využití svařování laserem v automobilovém průmyslu.
4. Závěr.

Metodika práce:

- současný stav řešeného problému (literární rešerše),
- závěry a přínos práce.

Rozsah práce: 30 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Seznam doporučené odborné literatury:


- BERNASOVÁ, E.: Svařování. Praha, NTL, 1987, 199 s.
HRIVŇÁK, I.: Zvaritenosť oceli. Bratislava, Alfa, 1979, 235 s.
KOUKAL, J. – ZMYDLENÝ, T.: Svařování. Ostrava, V3B, 2005, 133 s.
NARENDRA, B. – SANDIP, P.: Laser fabrication and machining of materials. New York, Springer, 2008, 558 s.
ROUBÍČEK, M.: Technologické aplikace laserů pro mikrosvařování a řezání. ČVUT, Strojní fakulta, 2001, 101 S.
STEE, W, M.: Laser material processing. London, Springer, 2003, 408 s.
ŠORŠOROV, M. CH. – ČERNYŠOVA, T. A. – KRASOVSIJ, A. I.: Ispytanija metallov na svarivajemosť. Moskva, Metallurgija, 1972, 240 s.
ŽÁK, J. – NOVÁK, M.: Teorie svařování. Brno, VUT, 1988, 142 s.
Časopisy: Strojírenská technologie, MM Průmyslové spektrum, TM Svařování – dělení-spojování materiálů, Technik
Firemní literatura: katalogy, prospekty

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 30. 11. 2008


Termín odevzdání bakalářské práce: 30. 4. 2010

prodlouženo do června 2011 *nd*


prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

vedoucí katedry




prof. Ing. Jiří Klíma, CSc.

děkan

V Praze dne 8.12.2008

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma „Využití svařování laserem v automobilovém průmyslu“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Hraběte, Ph.D. a použil jen literaturu a podkladové materiály, které uvádím v příloženém seznamu literatury.

V Praze dne 6. 4. 2011

Bezvoda Vojtěch

Abstrakt: Cílem této bakalářské práce bylo shromáždit literární poznatky o metodě svařování laserem a jeho využití v automobilovém průmyslu.

V kapitole první je popsáno, co je to svařování laserem, jeho základní vlastnosti, výhody a nevýhody, typy svařovaných průmyslových laserů a jiné technologické aplikace laserů. Další kapitola specifikuje obecně svařování laserem v automobilovém průmyslu. Zabývá se svařováním laserem automobilových karoserií, kde je i zmíněno svařování hliníkových karoserií. Práce se také zabývá svařováním LaserHybridem a jeho využití v automobilovém průmyslu. Dále je zmíněno i svařování laserem plastů a kamerová kontrola svařování laserem.

Klíčová slova: svařování, laser, LaserHybrid, karoserie

Laser welding utilization in automotive field

Summary: The aim of bachelor thesis was review collected literature about method of laser welding and its applications in automobile industry.

The first chapter explains what is a laser welding process and his basic characteristics, advantages and disadvantages, types of industrial laser welding and other technological applications of lasers. The next chapter specifies general laser welding in the automobile industry. Bachelor thesis deals with laser welding of car bodies, which is also mentioned welding aluminum body. Bachelor thesis also deals with welding LaserHybrid and its use in automobile industry. This chapter is mentioned as laser welding of plastics and camera control of laser welding.

Key words: welding, laser LaserHybrid, body

OBSAH

1. ÚVOD	1
2. PODSTATA, VÝHODY A NEVÝHODY SVAŘOVÁNÍ LASEREM	2
2.1 VZNIK LASEROVÉHO ZÁŘENÍ	2
2.2 VLASTNOSTI LASEROVÉHO ZÁŘENÍ	2
2.2.1 FOKUSACE.....	2
2.2.2 INTERAKCE LASEROVÉHO SVAZKU S MATERIÁLEM.....	3
2.3 VLASTNÍ METODA	4
2.3.1 PULZNÍ SVAŘOVÁNÍ S NÍZKOU OPAKOVACÍ FREKVENCÍ.....	6
2.3.2. VYUŽITÍ VYSOKÉ HUSTOTY VÝKONU V DOPADOVÉ PLOŠE PRO VZNIK tzv. „KLÍČOVÉ DÍRKY“.....	6
2.4. TYPY SVAŘOVANÝCH PRŮMYSLOVÝCH LASERŮ	7
2.4.1 PLYNOVÉ CO ₂ LASERY.....	9
2.4.2 PEVNOLÁTKOVÉ Nd : YAG LASERY.....	10
2.4.3 POLOVODIČOVÉ LASERY.....	12
2.5 VÝHODY SVAŘOVÁNÍ LASEREM	12
2.6 NEVÝHODY SVAŘOVÁNÍ LASEREM	13
2.7 PLYNY PRO SVAŘOVÁNÍ LASEREM	13
2.8 TYPY SVARŮ	14
2.9 PŘÍPRAVA SVAROVÉHO SPOJE PŘI SVAŘOVÁNÍ LASEREM	14
2.10 JINÉ TECHNOLOGICKÉ APLIKACE LASERŮ	15
2.10.1 ŘEZÁNÍ LASEREM.....	15
2.10.2 VRTÁNÍ LASEREM.....	16
2.10.3 ZNAČENÍ, ZNAČKOVÁNÍ A POPIS LASEREM.....	17
2.10.4 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ LASEREM.....	17
2.10.5 GRAVÍROVÁNÍ (MIKROFRÉZOVNÍ) LASEREM.....	17
3. VYUŽITÍ SVAŘOVÁNÍ LASEREM V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	18
3.1 SVAŘOVÁNÍ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	18
3.1.1 ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ - BODOVÉ.....	18
3.1.1.1 ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ MATIC.....	19
3.1.2 METODA MIG/MAG.....	19
3.1.3 METODA SVAŘOVÁNÍ TIG (WIG).....	20

3.2 SVAŘOVÁNÍ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU LASEREM.....	20
3.2.1 SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM.....	20
3.2.1.1 VÝHODY SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM	22
3.2.1.2 NEVÝHODY SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM.....	23
3.2.1.3 SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	23
3.2.1.3.1 SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM AUDI A4.....	23
3.2.1.3.2 SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM AUDI A8.....	24
3.2.1.4 SVAŘOVACÍ HLAVA PRO SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM	25
3.2.2 SVAŘOVÁNÍ POLOTOVARŮ LASEREM V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	26
3.2.2.1 SVAŘOVÁNÍ KAROSERÍ LASEREM.....	27
3.2.2.2 SVAŘOVÁNÍ HLINÍKOVÉ KAROSERIE LASEREM.....	28
3.2.3 SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ LASEREM V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	29
3.2.4 KONTROLA LASEROVÉHO SVARU KAMEROVÝM SENZOREM ..	30
3.2.4.1 KAMEROVÉ SLEDOVÁNÍ PŘI SVAŘOVÁNÍ STŘECHY AUTOMOBILU LASEREM.....	31
4. ZÁVĚR.....	32
5. POUŽITÁ LITERATURA.....	33

1. ÚVOD

Svařování zaujímá v průmyslu stále významnější místo. Ve strojírenství je třetí hlavní technologií po obrábění a tváření. Výrazně se podílí na produktivitě strojírenské výroby a zasahuje významným způsobem nejen do vlastní výroby, ale i do konstrukce téměř všech strojírenských výrobků.

V dnešním automobilovém průmyslu představuje svařování jednu z hlavních technologií při výrobě automobilu. Také lze svařováním renovovat opotřeбенé strojní součásti a opravovat havarované díly. Svařování v automobilovém průmyslu se nejčastěji používá při výrobě karosérií, ale i podvozkových dílů. Na začátku automobilového průmyslu se jednalo o kusovou výrobu, proto se svařování provádělo ručně. Zavedení sériové výroby znamenalo nástup automatizace. Se zlepšováním výroby automobilů, se zdokonalují i svařovací procesy a nastupují nové technologie svařování. V automobilovém průmyslu se využívají různé metody svařování (např. odporové svařování – bodové, metoda MIG/MAG, metoda TIG (WIG), svařování laserem a další). Není jediného výrobce na světě, který by při výrobě automobilů nepoužíval technologii svařování.

V poslední době doznává velkého rozvoje svařování laserem. Je to sice mladá technologie svařování, používána od 60. let minulého století, ale nachází stále většího uplatnění a to nejen v automobilovém průmyslu. Využívá se jak ve strojírenské výrobě, tak i ve vojenském průmyslu, elektrotechnické výrobě, ale i k výrobě zdravotnické techniky.

V automobilovém průmyslu se svařování laserem využívá čím dál více. Laserem svařované polotovary jsou lehké (redukuje hmotnost bez snížení pevnosti), usnadňují normalizaci komponentů. Umožňují i úsporu nákladů a času při výrobě nářadí anebo spojování nestejnorodých materiálů s různou tloušťkou, povrchovou úpravou či rozdílnými fyzikálními vlastnostmi. Svařování laserem se nejvíce využívá při svařování karosérií automobilů. Dokonce i hliníkových karosérií, u kterých ze začátku při svařování laserem docházelo k výskytu pórů v kořenu svaru, které snižovaly jeho pevnost. Dále se využívá pro svařování motorových a podvozkových dílů, ale dokonce i pro svařování plastů v automobilovém průmyslu. Svařování laserem poskytuje ve srovnání s klasickými svařovacími procesy nejen vyšší kvalitu procesu, ale je vhodnou metodou i pro velkosériovou výrobu u robotických pracovišť. Dnes už svařování laserem používají skoro všechny světové automobilky, kvůli jeho výhodám. Proto bude mít v budoucnu ještě většího využití. V dnešní době má nevýhodu vysoké ceny, ale výrobci stále nacházejí nové metody svařování laserem (např.: svařování LaserHybridem).

2. PODSTATA, VÝHODY A NEVÝHODY SVAŘOVÁNÍ LASEREM

2.1 VZNIK LASEROVÉHO ZÁŘENÍ

Laser představuje zkratku sestavenou z počátečních písmen anglického sousloví Light Amplification by Emission of Radiation. V českém překladu toto sousloví znamená „zesílení světla stimulovanou emisí záření“.

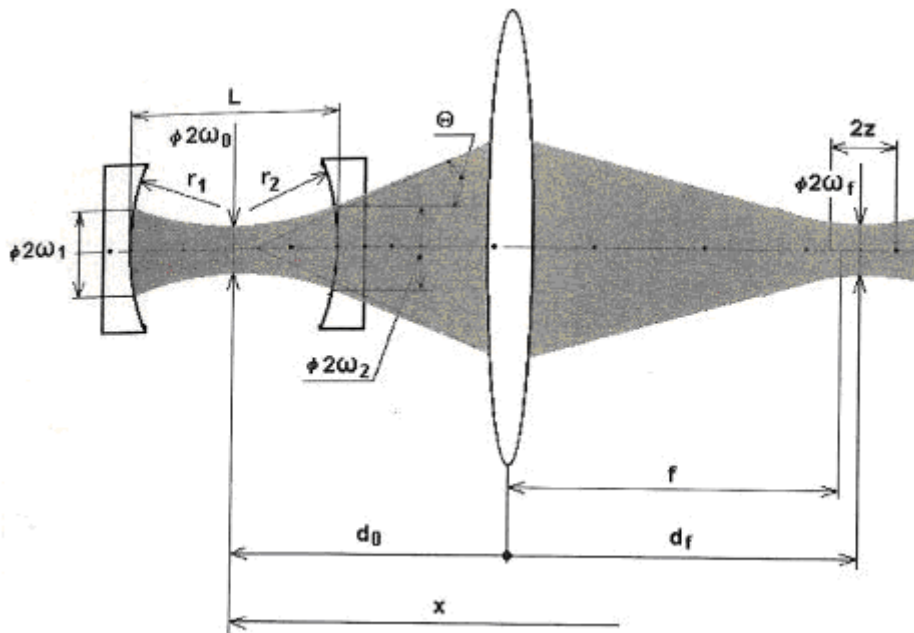
Historie laseru sahá do první poloviny 20. století. V této době M. Planck, N. Bohr a A. Einstein formulovali svoje zákony z oblasti kvantové fyziky. Návrh laseru byl představen až v roce 1954. Ch. H. Townes v roce 1958 zveřejnil první projekt laseru a 15. 5. 1960 spatřil svět nový typ záření generovaného laserem v aktivním prostředí syntetického rubínu. Od této doby dochází ke značnému rozšíření laseru až do dneška. S postupným objevováním nových a zlepšování stávajících laserových systémů lze předpokládat, že v budoucích letech bude rozvoj laserových systémů pokračovat. V dnešní době se laser využívá v mnoha oblastech (např. lékařství, výrobních technologiích, elektrotechniky, komunikace, metrologii, astronomii, armádních systémech, automobilů, počítačů). [3, 4, 6]

2.2 VLASTNOSTI LASEROVÉHO ZÁŘENÍ

Laserové záření je elektromagnetické vlnění optického typu, které se liší od jiných typů elektromagnetického záření svými vlastnostmi. V konstrukci laseru se podařilo vytvořit podmínky, ve kterých se ve vhodném aktivním prostředí potlačí spontánní emise na úkor emise stimulované. Toto záření je pak koherentní, monochromatické, které se šíří jedním směrem a je schopné interference. Jeho divergence je velmi malá při zachování vysoké spektrální hustoty záření. Při použití optického zařízení, je možné energii laserového záření koncentrovat do malého bodu pomocí jeho koherentnosti. Hustota výkonu v dopadové ploše se pohybuje mezi $10^8 - 10^9 \text{ W.cm}^{-1}$. Tyto hodnoty jsou mnohem vyšší než u jiných záření. Energie laserového záření je schopna po dopadu na materiál, roztavit nebo i odpařit ho.

2.2.1 FOKUSACE

Zaostření (fokusace) je základní vlastností laserového záření a je také rozhodující pro většinu jeho aplikací. Je jedním z kritérií zařazení technologické možnosti laseru. Minimální rozměr svaru a maximální možnou zpracovávanou tloušťku určuje velikost stopy dopadu, hloubka ostrosti a hustota výkonu (Obr. 1).



Obr. 1 Fokusace svazku laseru [3]

ω_1, ω_2 ... poloměry svazku na zrcadlech rezonátoru

ω_0 ... minimální poloměr svazku uvnitř rezonátoru

ω_f ... minimální poloměr fokusovaného svazku

r_1, r_2 ... poloměry zakřivení zrcadel rezonátoru

L ... vzdálenost mezi zrcadly rezonátoru

f ... ohnisková vzdálenost čočky

d_0 ... vzdálenost mezi čočkou a místem nejmenšího poloměru v dutině rezonátoru

d_f ... vzdálenost mezi čočkou a místem nejmenšího poloměru zfokusovaného svazku

x ... vzdálenost daného místa od místa nejmenšího poloměru v dutině rezonátoru

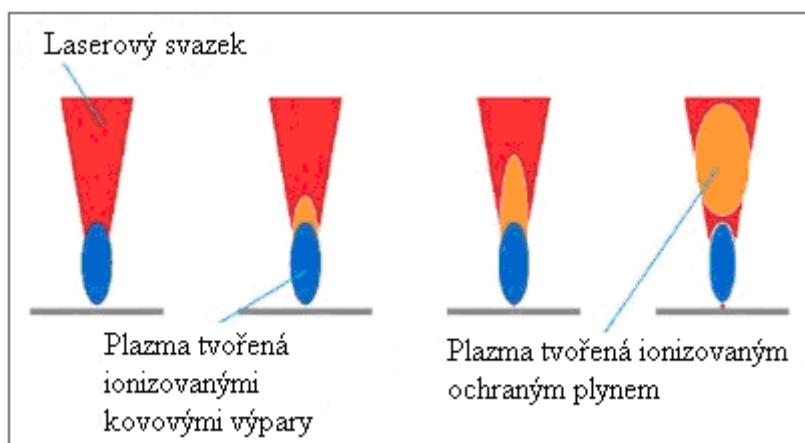
$2z$... hloubka ostrosti

Θ ... divergence vystupujícího svazku

2.2.2 INTERAKCE LASEROVÉHO SVAZKU S MATERIÁLEM

Po dopadu energetického laserového svazku na materiál se část energie odrazí a část materiál absorbuje. Absorbovaná energie způsobí jeho intenzivní zahřívání, přičemž koeficient absorpce s rostoucí teplotou narůstá. Skokových nárůstů pak dosáhneme při překročení teplot tavení a odpařování (varu). Laserový svazek postupně proniká do materiálu, který je taven a odpařován za vzniku kapiláry – klíčové dírky. Vytvoření kapiláry doprovází ionizace kovových výparů – vznik plazmatu (obr. 2). Plazma je ionizovaným skupenstvím hmoty, elektricky neutrálním, dosahujícím vysokých teplot. Tento typ plazmatu, který je při laserovém svařování vždy přítomen, pohlcuje pouze malé množství energie laserového svazku a nevyvolává tak znatelné změny šířky a hloubky svaru.

Laserový svazek, zaostřený optickým systémem, dopadá na materiál, přičemž poloha ohniska může být nad povrchem svařovaného dílu, na jeho povrchu nebo pod povrchem materiálu. Čím menší je průměr dopadajícího svazku (nejmenší je v ohnisku) a čím větší je jeho výkon, tím vyšší hustoty energie dosáhneme. Při určité hodnotě hustoty energie dochází k ionizaci ochranné atmosféry nad povrchem materiálu a vzniku plazmatu ochranného plynu. Tato plazma pohlcuje část energie laserového svazku v závislosti na hustotě energie, typu ochranného plynu a jeho množství (průtoku). Energie potřebná na vznik plazmatu a spotřebovaná absorpcí plazmatem, se pak nedostane do materiálu a chybí při tvorbě klíčové dírky. V takovém případě je závar širší na povrchu, ale mnohem méně proniklý do hloubky materiálu. Je-li cílem získat maximální hloubku závaru při dané svařovací rychlosti, je přítomnost plazmatu ochranného plynu negativní. V některých výjimečných případech však není hlavním kritériem hloubka závaru (vytvřování povrchu, navařování). Tehdy lze proces doprovázet řízením množství vzniklého plazmatu ochranného plynu. Problematika tvorby plazmatu je tedy ze základních faktorů, které se na laserovém svařování podílejí. [3, 4]



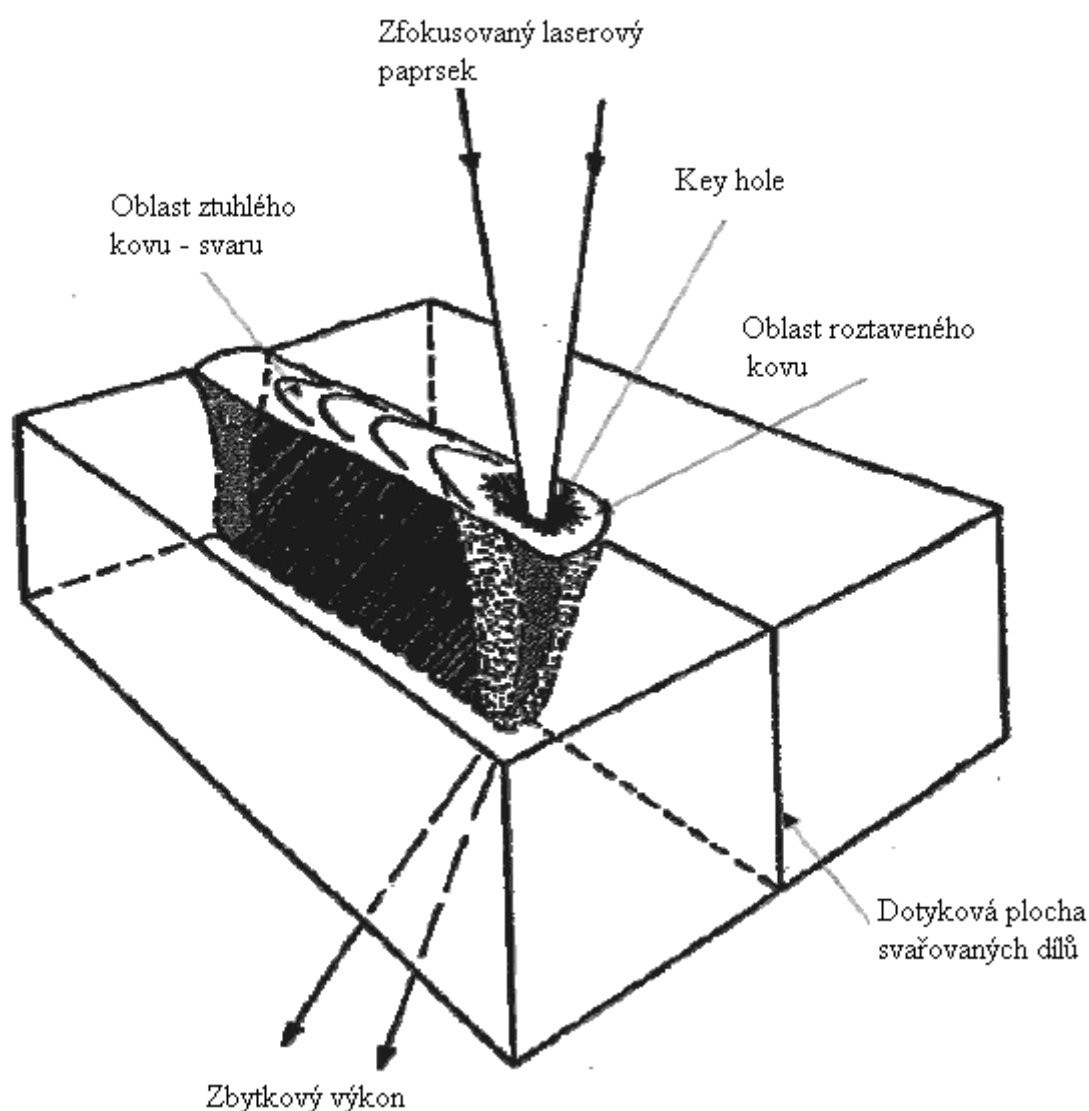
Obr. 2 Tvorba plazmatu [4]

Aby plyn mohl být uveden do plazmatického stavu, je jeho nejdůležitější vlastností ionizační potenciál (energie potřebná ke vzniku iontu daného prvku). Čím větší je hodnota ionizačního potenciálu, tím méně plazmatu vzniká. Nízké hodnoty ionizačního potenciálu znamenají snadný vznik plazmatického stavu a velké množství plazmatu. [3, 4]

2.3 VLASTNÍ METODA

Výkonový laser poskytuje prakticky rovnoběžný svazek, který lze pomocí vhodných optických elementů (duté zrcadlo, spojná čočka) jednoduše zaostřit do velmi malé oblasti – bodu (řádově desítky mikrometru). V ohnisku je dosažena velmi vysoká koncentrace

výkonu – až $10^{12} \text{ W.cm}^{-2}$. Rychlost ohřevu materiálu v místě dopadu fotonů je mnohonásobně vyšší než odvod tepla do okolí, dochází k lokálnímu ohřevu dané oblasti do teploty varu a při vhodném zkombinování svařovacích parametrů (výkon laseru, svařovací rychlost) dochází k efektu tzv. „klíčové dírky“. Přehřátý materiál se okamžitě odpaří (až do elektricky vodivého plazmatu) a vzniká dutina, jejíž stěny jsou tvořeny tenkou vrstvou taveniny, která při pohybu laserového paprsku uzavírá svarovou lázeň gradientem povrchového napětí. [4, 5]



Obr. 3 Princip laserového svařování [5]

Tavenina za dutinou rychle krystalizuje a vzniká svar. Kvůli tomuto efektu může laserový paprsek vytvářet svary s dobrým poměrem mezi šířkou a hloubkou v porovnání s ostatními metodami. Do oblasti svaru se přivádí ochranná atmosféra pro zabránění oxidace a

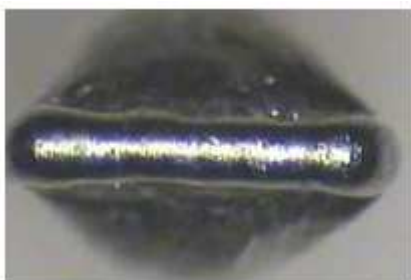
pórovitosti místa svaru, přičemž volba ochranného plynu (Ar, He,...) může mít vliv na geometrii svaru.

Tab.1 Srovnání s ostatními metodami svařování [5]

Metoda	Hustota energie [W.cm ⁻²]	Hloubka průvaru [mm]	šířka/hloubka svaru	Svařovací rychlost [m.min ⁻¹]
Laser	10 ⁷ - 10 ⁹	25	0.1 – 0.5	až 10 m/min
Plamen	10 ³	3	3	0.01
El.oblouk	10 ⁴	4	2	0,5 - 3
Plasma	10 ⁶	až 12	1	0,5 - 5
El. paprsek	10 ⁸	200	0,03	0,5 - 5

2.3.1 PULZNÍ SVAŘOVÁNÍ S NÍZKOU OPAKOVACÍ FREKVENCÍ

Mezi jednotlivými pulzy dojde ztuhnutí (úplnému nebo částečnému) svarové lázně. Svarová housenka je pak tvořena mnoha za sebou jdoucími a vzájemně se překrývajícími body (obr. 5). Tímto způsobem se vytváří svarové spoje zejména na menších tloušťkách materiálu, v malosériové a kusové výrobě, při svařování obtížně svařitelných materiálů a tam kde nelze z důvodu konstrukčního uspořádání svařovaných dílů efektivně použít jinou metodu. [4]

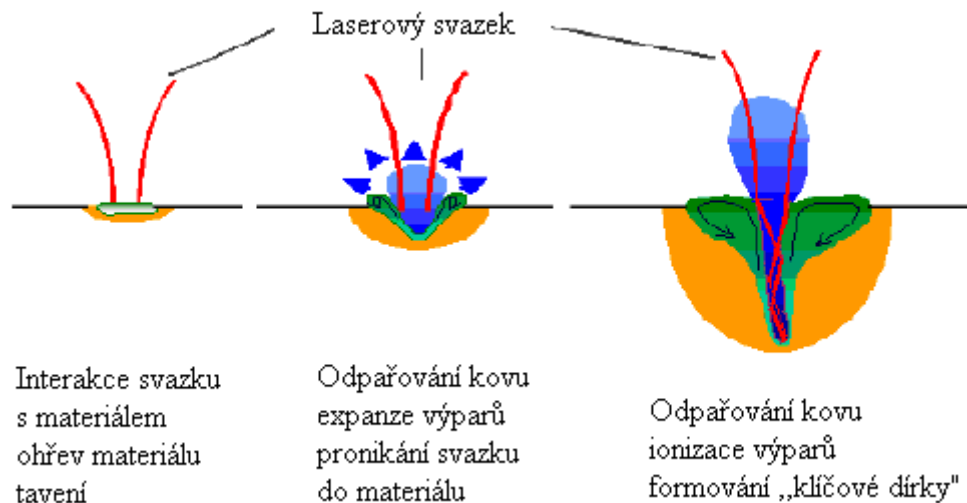


Obr. 4 Plzní svar v ochranné atmosféře He [4] Obr. 5 Plzní svar v ochranné atmosféře Ar [4]

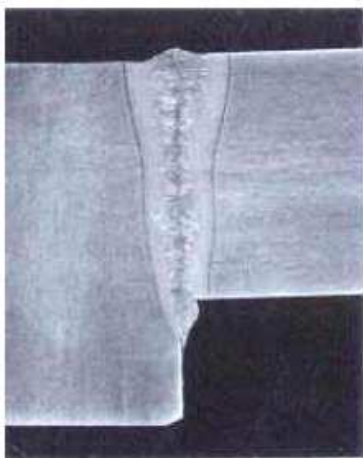
2.3.2. VYUŽITÍ VYSOKÉ HUSTOTY VÝKONU V DOPADOVÉ PLOŠE PRO VZNIK tzv. „KLÍČOVÉ DÍRKY“

„Klíčová díрка“ (obr. 6) je kapilára naplněná ionizovanými kovovými výpary o vysoké teplotě. Stěny kapiláry jsou tvořeny roztaveným kovem. Kapilára hraje důležitou úlohu, neboť umožňuje přenášet energii přímo dovnitř materiálu podél svarových ploch. Jamka je přesunována 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 (obr. 7). Ekonomický přínos této metody je zřejmý. Snadná kontrola průvaru společně s úzkou tepelně ovlivněnou oblastí zajišťují vysokou kvalitu svarového spoje. Tento způsob svařování je umožněn díky automatizaci svařovacího procesu. Tavná lázeň je v obou případech svařování chráněna před nepříznivými účinky okolí ochranou atmosférou. [3, 4]



Obr. 6 Vznik „klíčové dírky“ [4]



Obr. 7 Svar metodou „klíčové dírky“ [4]

2.4. TYPY SVAŘOVANÝCH PRŮMYSLOVÝCH LASERŮ

Volba konkrétního laseru se odvíjí od základních požadavků:

-Výkon laserového záření: Z hlediska technologických aplikací je rozhodující především optický výkon laseru. Předpokládá se, že jeho hodnota by měla ležet mezi 1-30 kW středního výkonu v kontinuálním režimu.

- Vlnová délka záření: Vlnová délka laserového záření je v přímém vztahu s přesností laserového obrábění – čím je kratší, tím vyšší přesnosti lze dosáhnout, přičemž tato přesnost je nepřímo úměrná kvadrátu vlnové délky. Je tedy jasné, že je snaha používat lasery s co nejkratší vlnovou délkou emitovaného záření.

- Divergence laserového svazku: Divergence, neboli rozbíhavost laserového svazku ovlivňuje to, jak dobře laserový svazek fokusovat optickým systémem. Kvalitní jednomódové laserové zařízení lze zfokusovat do bodu srovnatelného s vlnovou délkou záření. U mnohamódového svazku je při použití stejné optiky minimální rozměr bodu mnohonásobně větší. Snažíme se používat laser s co nejmenší divergencí svazku.

- Možnost přenosu záření optickým vláknem: Velkou výhodou laserového systému je, pokud lze záření na místo aplikace dopravit prostřednictvím optického vlákna. Zvyšuje se tím flexibilita laseru a rozšiřuje se využití možných aplikací.

- Mobilita: Rozměry, hmotnost laseru a jeho energetická náročnost by měly umožnit jeho snadnou transportovatelnost do místa určení.

- Provozní náklady: Náklady na pořízení, provoz, údržbu a inovaci laserového zařízení by měly být co nejnižší.

- Účinnost laserového systému: Jedno z hlavních ekonomických hledisek použitelnosti laseru hned vedle pořizovací ceny a nákladů na údržbu. Zdrojem energie bývá elektrický proud. Takže je snaha používat takové lasery, které mají vysoký poměr elektrického napájecího výkonu k výkonu užitečného laserového zařízení. Předpokládá se, že rozumné minimum je přibližně 20 %.

- Robustnost, spolehlivost a stabilita laseru: Nezbytnou podmínkou laseru je jeho vysoká spolehlivost a odolnost vůči vnějším vlivům, jako jsou otřesy, prach, vlhkost a změny teploty. Laser musí pracovat spolehlivě v širokém rozsahu pracovních podmínek a v případě poruchy musí být bezpečně odstaven.

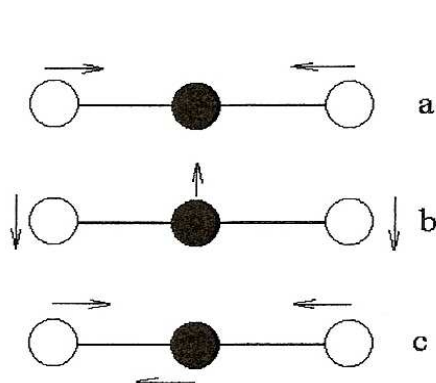
- Ekologické a bezpečnostní faktory: Musí splňovat mnoho bezpečnostních a ekologických kritérií. Lasery obecně přispívají ke zlepšení ekologických podmínek provozu. Na druhou

stranu je ale laserové zařízení v mnoha případech značně nebezpečné lidskému zdraví (především zraku).

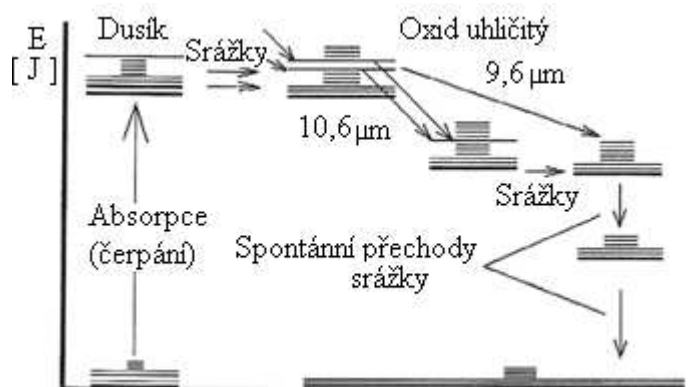
V dnešní době jsou dostupné tři typy laserů a to plynové CO₂ lasery, pevnolátkové Nd : YAG lasery, polovodičové lasery. [1, 3, 6, 7, 10, 18]

2.4.1 PLYNOVÉ CO₂ LASERY

CO₂ laser je plynový laser, jehož aktivní prostředí tvoří molekuly oxidu uhličitého (CO₂) buzené doutnavým elektrickým výbojem, kdy na jeden atom uhlíku jsou lineárně navázány dva atomy kyslíku. Energetický stav molekuly je závislý na rotaci a vibraci jednotlivých atomů a celé molekuly. Atomy mohou vykonávat tři základní kmitavé pohyby (obr. 8) : symetrické roztahování (a), ohýbání (b), asymetrické roztahování (c). Kromě těchto základních kmitů jsou možné ještě kmity na vyšších harmonických kmity vznikající kombinací (skládáním nebo rozdílem) kmitů základních. Důsledkem je široké spektrum vyzařovaných frekvencí molekuly oxidu uhličitého.



Obr. 8 Schéma kmitání molekuly CO₂ [3]



Obr. 9 Energetické schéma CO₂ laseru [3]

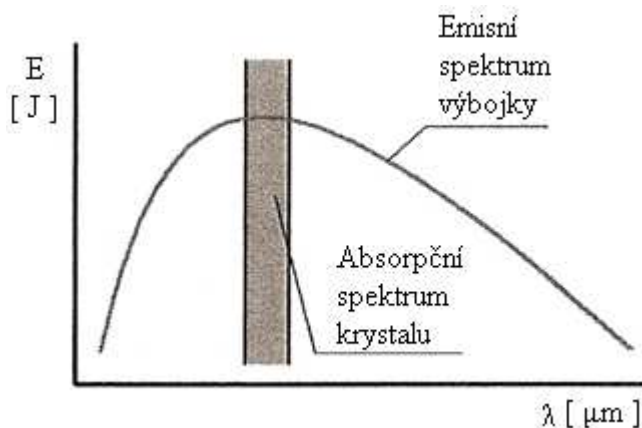
Záření generované tímto typem laseru spadá do vzdálené infračervené oblasti (nejčastěji je generovaná vlnová délka 1,06 μm). CO₂ lasery se vyznačují relativně vysokou účinností 8 – 10 %. V současné době pouze CO₂ laser dosahuje požadovaného rozsahu výstupních výkonů 1 – 30 kW a proto patří mezi nejrozšířenější lasery vůbec. Nízkovýkonové typy se vyznačují malými rozměry a velkou životností (jejich výstupní výkony bývají až v řádu 10 W). Výkony desítek až stovek wattů se generují systémy s několika metry dlouhými, vodou chlazenými trubicemi, ve kterých proudí aktivní plyn. Výkony až desítek kilowattů se pak získávají ve velkoobjemových systémech, kde výboj i průtok plynu mají směr kolmý

k ose rezonátoru. Krom vysokého výkonu a značné účinnosti vyniká CO₂ laser ještě dobrou kvalitou laserového svazku.

Ostatní vlastnosti jsou již spíše negativního rázu. Vlnová délka CO₂ laseru 1,06 μm, nehledě k tomu že neprochází optickými vlákny a laserové zařízení je nutno do místa určení dopravit systémem zrcadel, příliš nehodí pro přesné obrábění. Vzhledem k malé objemové hustotě výkonu CO₂ laseru vychází vysokovýkonové laserové systémy velmi velké a hmotné a zařízení není prakticky mobilní. Je také závislé na přívodu chladicí vody a na dodávce pracovní plynové směsi, která krom oxidu uhličitého obsahuje také dusík a nákladné helium. Vzhledem ke složitosti a provozní náročnosti vyžaduje takové zařízení nepřetržitou kontrolu a údržbu. Přes tyto nedostatky nemá díky dosahovaným maximálním výkonům CO₂ lasery komerčně dostupnou konkurenci a udržuje si své místo především v oblastech, jako je sváření a řezání kovových plechů značných tloušťek. [1 ,3, 6, 7]

2.4.2 PEVNOLÁTKOVÉ Nd : YAG LASERY

Nd : YAG laser je pevnolátkový iontový laser, jehož aktivním prostředím je opticky čerpaný Nd : YAG krystal (itrium-aluminium granát dopovaný neodymem Nd³⁺). Nd : YAG laser je dnes nejčastěji používaným pevnolátkovým laserem. Generuje za pokojové teploty v impulsním i kontinuálním režimu na vlnové délce 1064 nm, případně s menší účinností i na vlnové délce 1320 nm. Metodami nelineární optiky lze dosáhnout generace záření na vlnové délce 532 nm (druhá harmonická frekvence SHG), případně 355 nebo 266 nm (třetí a čtvrtá harmonická frekvence). Nd : YAG laser dosahuje na vlnové délce 1064 nm v kontinuálním režimu (CW) maximálního výkonu od stovek do tisíců wattů, v impulsním režimu se dosahuje energie pulzů do desítek joulů.

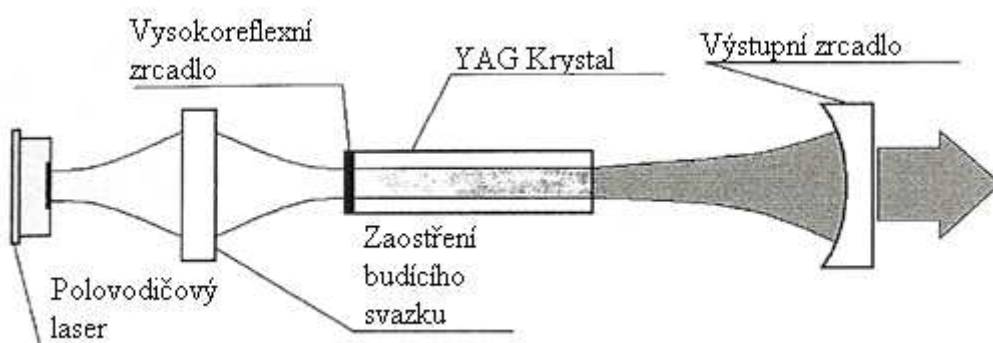


Obr. 10 Využití vyzařování výbojky v Nd : YAG [3]

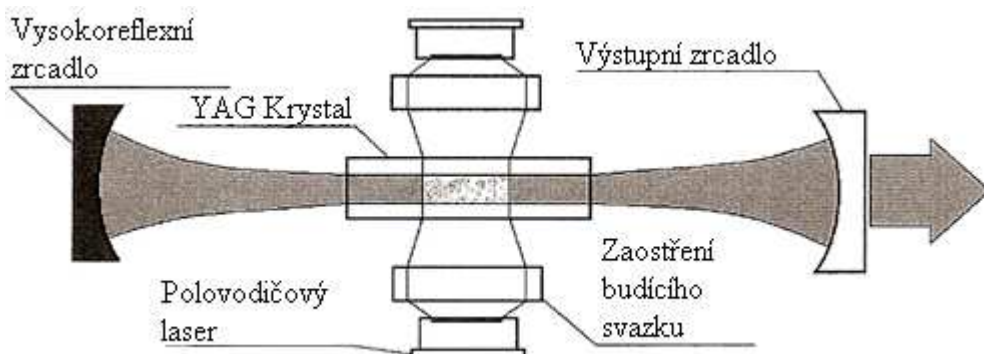
Nd : YAG laser má širokou oblast použití (laserové obrábění, laserový popis, vrtání, sváření). Jeho hlavní výhoda spočívá ve vlastnostech použitého aktivního prostředí – krystalická látka je velmi stabilní, vyniká vysokou hustotou energie a akumulací schopností, umožňuje generovat krátké vysokovýkonové pulsy.

Konstrukce pevnolátkových laserů je v porovnání s plynovými lasery podstatně kompaktnější. Údržba se omezuje na výměnu čerpacích výbojek. Příznivá je i kratší vlnová délka v porovnání s CO₂ laserem.

Záření Nd : YAG laseru lze snadno přenášet optickými vlákny na vzdálenosti několika desítek metrů. Nevýhodou naproti tomu je relativně nižší účinnost 2 – 3 %, značný elektrický příkon výkonových systémů (až 200 kW) a s tím spojená nutnost vodního chlazení systému. Uvedené nedostatky se již dnes pokouší několik výrobců nahrazením výbojkového čerpání čerpáním polovodičovými diodami. Takové systémy vynikají vysokou účinností (15 – 20 %), řádově nižší spotřebou elektrické energie a chladicí vody. Nad jinými lasery vynikají kompaktností a nízkou hmotností. Nevýhodou je však vysoká cena vysokovýkonových polovodičových laserových diod. [3, 6, 7, 10]



Obr.11 Schéma Nd : YAG laseru podélně [3]

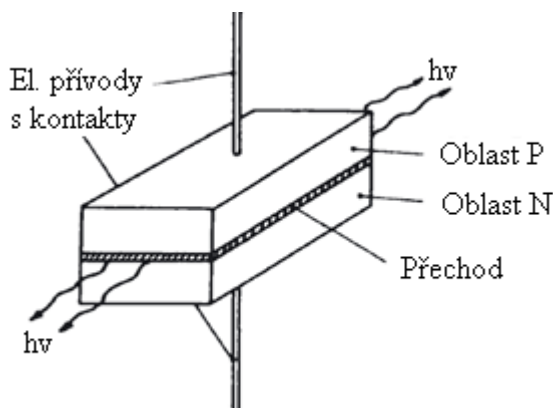


Obr.12 Schéma Nd : YAG laseru příčně buzeného laserovou diodou [3]

2.4.3 POLOVODIČOVÉ LASERY

Polovodičové lasery jsou dnes vůbec nejrozšířenější lasery. Často se pro ně používá označení laserová dioda. Od ostatních laserů se liší tím, že nepracují s přechodem elektronů mezi diskrétními hladinami, ale vyskytují se u nich elektronové přechody mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče (obr. 13). Polovodičové lasery mají velmi malé rozměry, to má za následek větší divergenci výstupního svazku oproti jiným laserům. Jsou velmi citlivé na změnu teploty.

Laserový paprsek polovodičového laseru lze snadno modulovat změnou budícího elektrického proudu. Polovodičové lasery se vyznačují vysokou účinností (až 50 %). Pracují jak v kontinuálním tak pulsním režimu a mohou dosahovat relativně vysokých výstupních výkonů při velmi kompaktním uspořádání. Tyto lasery mají největší uplatnění v telekomunikacích a ve výpočetní technice. Dnes se jich také stále více používá pro čerpání pevnolátkových laserů a tak vznikají vysoce výkonné miniaturní a flexibilní laserové generátory. [3, 6, 7, 10, 18]



Obr. 13 Nejjednodušší konstrukce polovodičového laseru [18]

2.5 VÝHODY SVAŘOVÁNÍ LASEREM

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

- Lehce dosažitelný úzký 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. Proto je laserové svařování vhodné pro automatizaci.

- Laserové svařování probíhá na vzduchu bez použití vakua pouze se speciální přídavnou atmosférou.
- Nedochozí k žádnému znečišťování svaru materiálem elektrod.
- Laserový paprsek může lokálně svařovat i na místech těžko dostupných, kde by to bylo jinými způsoby svařování obtížné. [5, 10, 17]

2.6 NEVÝHODY SVAŘOVÁNÍ LASEREM

Mezi hlavní nevýhody laserového svařování patří:

- Nedostatek mobility, někdy nedostatek flexibility.
- Vysoké pořizovací náklady na zařízení.
- Některé materiály obsahující prchavé příměsi (mosazi, galvanická ocel, magnetické slitiny a zinek) nejsou vhodné pro svařování laserem.
- U velkých tloušťek materiálů při svařování může dojít k poškození svarových ploch.
- Nízká překlenutelnost mezer. [5, 9]

2.7 PLYNY PRO SVAŘOVÁNÍ LASEREM

Plyny pro svařování laserem se používají jako ochranná atmosféra při svařování a povrchových úpravách materiálu prováděných laserem. Svarová lázeň nebo natavený povrch materiálu musí být chráněn před účinky okolního vzduchu.

Při svařování CO₂ lasery o vysokých výkonů je nutné omezovat tvorbu plazmového mraku vznikajícího nad místem průniku laserového paprsku do materiálu. Pro svařování CO₂ laserem se používají ochranné plyny jako helium nebo směsi plynů helium/argon. Helium se používá navíc jako plyn k potlačení tvorby plazmového mraku. Argon naopak podporuje vznik plazmatu, a proto by se neměl používat jako ochranný plyn pro svařování CO₂ laserem o výkonu nad 3 kW. Směs plynů helium/argon je doporučována při svařování hliníku a jeho slitin. U některých aplikací se používají směsi argon/kyslík nebo argon/CO₂. Při svařování vysoko výkonovými lasery zajišťují směsi s heliem vysoké svařovací rychlosti s dobrou kvalitou svaru.

Při svařování Nd : YAG laserem se nejčastěji používá argon, ačkoli při použití dusíku a CO₂ se také dosahuje dobrých výsledků. Helia není nutné používat, navíc pro důkladnou ochranu je nutné zajistit vyšší průtok plynu (pro takto lehký plyn ve srovnání s argonem), což způsobuje víření a odfukování svarové lázně.

U diodových laserů lze pomocí vhodných ochranných plynů zvýšit rychlost svařování, popř. svařovanou tloušťku.

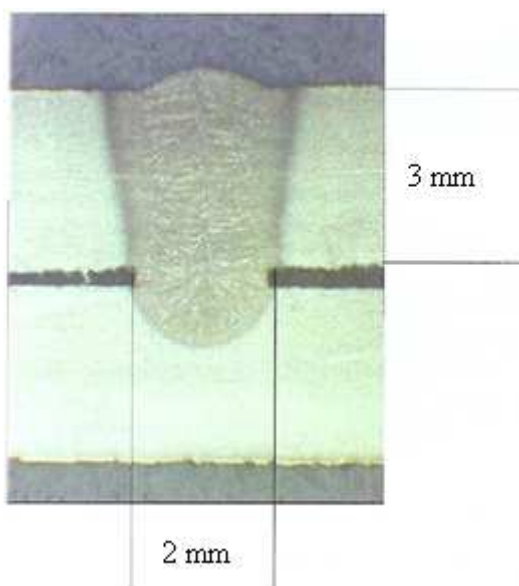
Spotřeba plynů pro svařování laserem se pohybuje od 20 do 120 l.h⁻¹. Pro průměrného uživatele to představuje přibližně 350 m³.rok⁻¹. Helium a argon laserové čistoty se dodává v láhvích a svazcích láhví v závislosti na jejich a spotřebě a frekvenci závozu. [1, 2, 19]

2.8 TYPY SVARŮ

Laserový svařování lze vytvářet prakticky všechny základní typy svarů, jaké se vytvářejí i ostatními technologiemi (koutové, natupo, bodové a apod.). obecně svařování probíhá bez přídavného materiálu. Velkou výhodou je vysoká štíhlost svaru a malé ovlivnění okolí svářecím teplem (tudíž i malé deformace svařence).

Existuje jeden typ svaru, který je možno provést dobře pouze dvěma metodami – laserem a elektronovým svazkem. Je to svařování přeplátováním materiálu, kdy laser je schopen provařit dva i více materiálů položených nad sebe. Přitom typ a tloušťky materiálů mohou být rozdílné. Navíc lze dosáhnout toho, že průvar nepronikne spodním materiálem zcela ale jen do poloviny, takže spodní strana je povrchově nedotčená (obr 14).

[1, 2, 5]



Obr. 14 Laserový průvarkový svar [5]

2.9 PŘÍPRAVA SVAROVÉHO SPOJE PŘI SVAŘOVÁNÍ LASEREM

Správné sestavení svarového spoje je při svařování laserem velmi důležitým faktorem. Laser je velice přesný nástroj vyžadující poměrně vysokou úroveň přípravy. Typická šířka stopy při svařování vysokovýkonovým laserem je 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. [1, 11, 17]

2.10 JINÉ TECHNOLOGICKÉ APLIKACE LASERŮ

2.10.1 ŘEZÁNÍ LASEREM

Řezání je stěžejní aplikací pro vysoko výkonové lasery používané v průmyslové výrobě. Řezání laserem je ideální technologií dělení kovů, ale i nekovových materiálů různých tvarů především z tenkých plechů s nesrovnatelnou výrobní produktivitou s obdivuhodnou kvalitou.

Výhodou dílů řezaných laserem je jejich možné použití jako finálních výrobků nebo polotovarů bez dalších povrchových úprav nebo dokončovacích operací ve smyslu úprav řezaných hran (kalibrace otvorů a tvarů, zabrušování, odstraňování ostrých hran a ořepů). Kvůli těmto výhodám dávají přednost této technologii výrobci v kovozpracujícím průmyslu, výrobci prototypových dílů a sestav v automobilovém průmyslu.

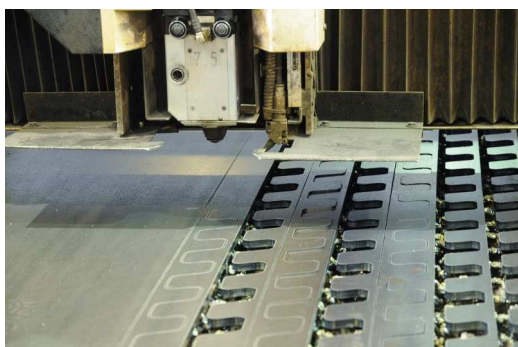
Laserový paprsek vycházející z rezonátoru laseru je pomocí speciální čočky zaostřen na povrch materiálu, který se nastavuje a řezacím plynem přiváděným koaxiální dýzou se tavenina vyfukuje. Pro řezání kovů se používá jako řezných plynů kyslíku nebo dusíku. Pro řezání nekovových materiálů se používá sublimačního řezání, kdy je materiál zaostřeným laserovým paprskem přímo odpařen.

V závislosti na druhu materiálu o požadované kvalitě řezu volíme řezací plyn kyslík nebo dusík. Kyslík chemicky reaguje s řezným materiálem a zajišťuje tak vyšší řezné rychlosti ve srovnání s dusíkem. Přednostně se používá kyslíku pro řezání nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, kde čistota kyslíku silně ovlivňuje maximální řeznou rychlost.

Pro řezání vysokolegovaných ocelí, hliníku a jeho slitin se přednostně používá dusíku. Hlavně při řezání korozivzdorných ocelí a hliníkových slitin kyslíkem se dosahuje velmi špatných výsledků ve smyslu ztráty korozní odolnosti materiálu a vysoké drsnosti povrchu a ořepy na spodní hraně řezu při řezání hliníkových slitin. Pro tyto materiály se používá

přednostně dusíku jako řezného plynu za účelem dosažení korozivzdornosti řezné hrany, řezů bez otřepů s velmi nízkou drsností. Na čistotu dusíku jsou kladeny vysoké požadavky, především na podíl zbytkového kyslíku a vlhkosti.

Velmi reaktivní kovy jako titan nebo zirkonium musí být chráněny před účinky kyslíku a dusíku (popř. vzduchu). Tyto materiály se dají řezat pouze za asistence vysoce čistého argonu. [10, 12, 20, 21]



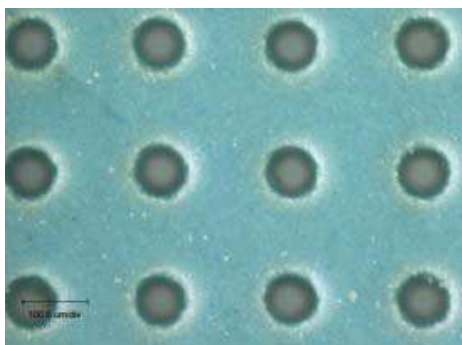
Obr. 15 Řezání laserem [21]

2.10.2 VRTÁNÍ LASEREM

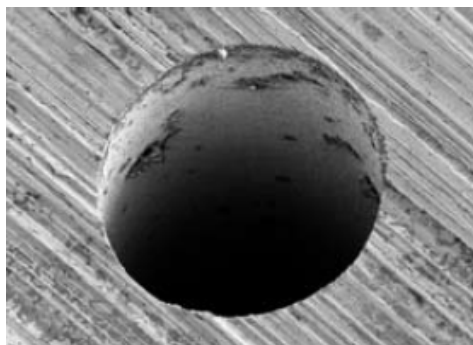
Pro vrtání laserem platí, že čím je díra delší, tím více se odchyluje tvar díry od geometrie, což je způsobeno rozdělením energie paprsku. Předností laserového vrtání je vytváření malých otvorů a to i v místech, kde je to pomocí jiných metod obtížné nebo nemožné. Díry mohou být kruhové i tvarové. Délka vrtané díry může být až 50 mm. Vrtat lze kovy, plasty, dřevo, papír, sklo, textilie, keramiku. Tato technologie se používá pro vrtání vstříkovacích trysek, lopatek proudových motorů a další. [10]

Pro vrtání se používají:

- CO₂ lasery – Vyřezávání kruhových i tvarových otvorů. Nejmenší průměr vyřezávaného otvoru je 5 mm a nejmenší průměr vrtané díry je 0,2 mm.
- Nd : YAG lasery – Vrtání děr o menším průměru. Nejmenší průměr vrtané díry je 0,025 mm.



Obr. 16 Díry vrtané do keramické pásky [20]



Obr. 17 Díra v oceli [20]

2.10.3 ZNAČENÍ, ZNAČKOVÁNÍ A POPIS LASEREM

Laserem na povrchu materiálu s vysokou přesností vytváří stálý, mechanicky odolný a velmi kontrastní popis. Laserem je možné označovat všechny materiály, jako oceli (kalené i nekalené), mosaz, titan, bronz, hliník a jeho slitiny, zlato, keramiku, plasty, sklo, gumu, papír, kůži atd. Popisovaný povrch může být broušený, pískovaný, lakovaný, černěný, smaltovaný, opatřený povrchem chromu apod. Laserem lze popisovat rovinné, válcové i jiné plochy i na málo přístupných místech.[10]

Pro popisování se používají:

- Nd : YAG lasery – Vstupní výkon 50 W.
- CO₂ lasery.

2.10.4 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ LASEREM

Tepelné zpracování laserem je charakterizováno krátkou dobou ohřevu a malým objemem ohřátého materiálu. Metody tepelného zpracování jsou založeny na ohřevu materiálu (žhánání, kalení, popouštění apod.) Používá se kontinuálních CO₂ laserů o výkonu několika tisíc wattů. 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. [10]

2.10.5 GRAVÍROVÁNÍ (MIKROFRÉZOVÁNÍ) LASEREM

Gravírování se používá pro vytváření jednoduchých i velmi složitých reliéfů, hlavně do kalených ocelí, keramických materiálů, dřeva, gumy. 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 gravitování do kovových a keramických materiálů se používají hlavně Nd : YAG lasery. Pro gravírování do dřeva a gumy jsou vhodné CO₂ lasery. [10]



Obr. 18 Gravírování laserem ve 3D [10]

3. VYUŽITÍ SVAŘOVÁNÍ LASEREM V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

3.1 SVAŘOVÁNÍ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

Ve druhé polovině 20. století dochází k masivní výrobě automobilů. Dochází také k rozvoji technologií potřebných k jejich výrobě. Mezi ně samozřejmě patří i svařování. V počátcích rozvoje automobilového průmyslu se jednalo o kusovou výrobu, proto se při výrobě automobilů používalo ruční svařování. Zavedení sériové výroby přináší do tohoto oboru nástup automatizace. První kdo začal sériově vyrábět automobily, byl Henry Ford. Jednalo se o výrobu vozu Ford T v roce 1913. V Evropě se zavádí sériová výroba až po druhé světové válce. Se zavedením výroby samonosných karoserií dochází k rozvoji v oblasti svařování a nástup nových technologií svařování v automobilovém průmyslu. Velký rozmach v automobilovém průmyslu zažívá svařování laserem, hlavně kvůli svým výhodám. Ale i přesto se v automobilovém průmyslu používají i jiné metody svařování.

3.1.1 ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ – BODOVÉ

Se sériovou výrobou samonosných karoserií nastal problém spojování plechových výlisků, které mají určitou rozměrovou přesnost. Při mechanizování spojovacích činností se ukázalo, že jednou z nejvýhodnějších technologií je odporové svařování, které umožňuje v určité míře kompenzaci některých nepřesností při výrobě dílů. Dokonalé svařovací přípravky a středofrekvenční svařovací kleště upevněné na robotech, v kombinaci s dlouhoživotnostními svařovacími elektrodami, to je současná špičková svařovací technologie, kterou využívají všechny automobilky.

Snaha o používání velmi pevných materiálů vede k použití materiálů s vyšším obsahem uhlíku, až na samé hranici svařitelnosti a někdy i nad ní. Dotování takových ocelových plechů legurami (např. hliníku), vede následně k obrovskému zpevnění a bodování takových plechů se stává technicky obtížné. Je pak často nutné kombinovat svařovací parametry z oblasti tvrdého i měkkého svařování pro dosažení požadovaných parametrů bodových spojů.[8]



Obr. 19 Robotizované pracoviště s bodovým svařováním [8]

3.1.1.1 ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ MATIC

Někdy je nutné některé díly karoserií a podvozků spojovat rozebíratelně. Konstrukce karoserií i podvozkových skupin zajišťuje možnost použití šroubových spojů tak, že na příslušných místech jsou již v předchozích operacích připraveny matice. Jsou používány buď matice odporově přivařené napevno, nebo matice ve speciálních klecích proti pootočení v místech, kde portikus má toleranci polohy desetiny milimetru. Samotné odporové přivařování matic vyžaduje výkonové svařovací zdroje s výkonem nad 10 kA s možností programového ovládání celého svařovacího cyklu. Problémem může být polohování svařenců při bodování matic, kdy i malé zvětšování zatížení magnetického okna stroje výrazně ovlivňuje jeho výkon na elektrodách. [8]

3.1.2 METODA MIG/MAG

Tato metoda je dobře mechanizovatelná. Proto byla při přechodu na vysoceproduktivní mechanizovanou a postupně i robotizovanou výrobu nejdokonaleji prozkoumána. Při podrobném rozboru vlastností této metody lze dojít k závěru, že při dodržení všech podmínek svařování, tj. velmi přesných svařovacích přípravků, dostatečně přesných vstupních dílů, dodržení všech svařovacích parametrů, správných svařovacích poloh a trajektorií pohybů svařovacího hořáku, je opakovatelnost jakostních svarů velmi vysoká. [8]

3.1.3 METODA SVAŘOVÁNÍ TIG (WIG)

Metoda TIG byla v automobilovém průmyslu dlouho opomíjená. Důvodem je poměrně malý tepelný výkon. A protože při sériové výrobě čas jsou peníze, nebylo pro tuto metodu využití. Se zaváděním robotizovaného pájení pozinkovaných dílů se objevil problém oprav takových spojů při výrobě. Při náběhu nové výroby, při seřizování svařování, ale i během rutinní výroby je potřebné mít k dispozici systém, který je schopen alespoň následně opravit vady v pájených spojích a ve svarech.

Ukázalo se, že právě pro spoje pájené mosazí je metoda TIG jediná použitelná. Další použití se našlo při odstraňování povrchových pórů na svarech ocelových materiálů následně určených pro pozinkování. [8]

3.2 SVAŘOVÁNÍ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU LASEREM

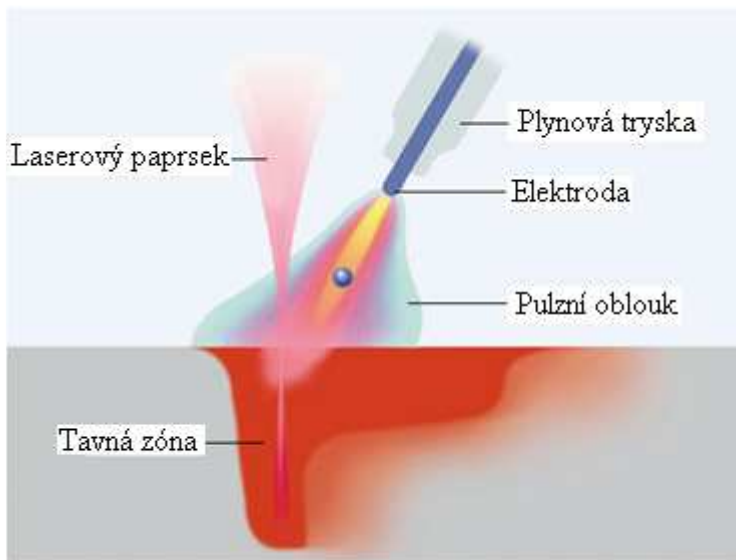
Svařování laserem poskytuje ve srovnání s klasickými svařovacími procesy nejen vyšší kvalitu procesu, ale je vhodnou metodou i pro velkosériovou výrobu u robotických pracovišť. Dnes tuto metodu používají všechny špičkové automobilky, ať už při svařování karoserií nebo různých motorových a podvozkových dílů.

3.2.1 SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM

Svařování LaserHybridem je kombinace svařování pevnolátkovým Nd- YAG laserem s jinou obloukovou technologií.

Kombinace: - Laser – TIG metoda
- Laser – MIG/MAG
- Laser – Plazmové svařování

Metoda Laser – MIG/MAG obloukové svařování v ochranných plynech tavící se elektrodou je z kombinace obloukových metod nejvíce propracována a používaná. Vlastní tvorba svaru je založená na tavení svarového spoje laserem a podávání přídatného drátu taveného většinou impulsním přenosem kovu do tavné lázně (obr. 20). [14, 22]



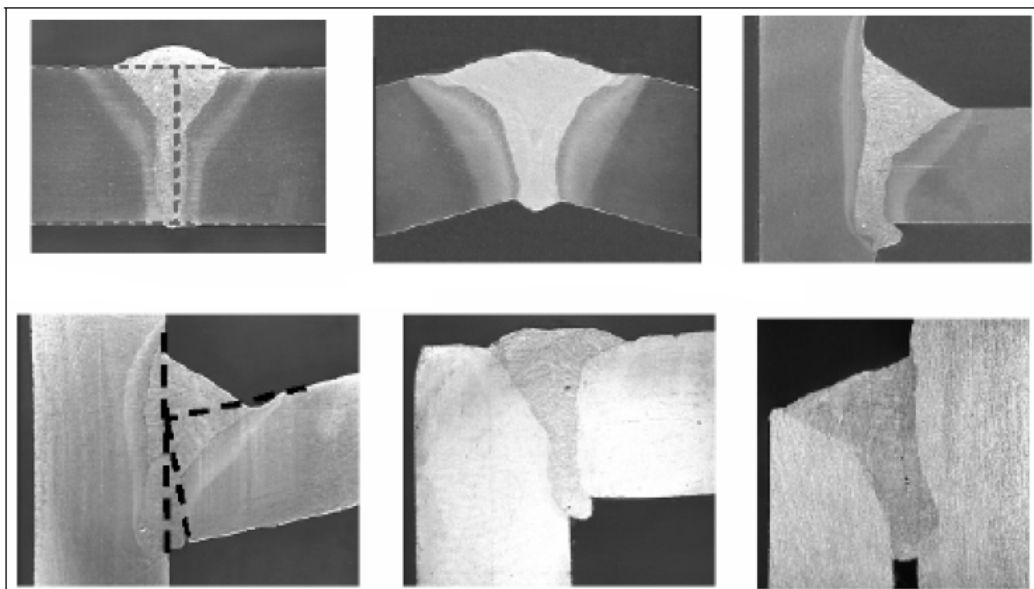
Obr. 20 Princip svařování LaserHybridem [14]

Při svařování tloušťek materiálu nad 5 mm se doporučuje upravit svarovou plochu se zakosením asi 5° . Celá svarová plocha je rovnoměrně ohřátá, když svazek laserového záření předává energii při odrazech od stěny úkosu. Tloušťky materiálu nad 15 mm jde LaserHybridem také svařovat (obr. 21). Tavenina spolehlivě vyplní kapiláru úkosu a horní část svaru je doplněna svarovým kovem z drátové elektrody. Celý svar je velmi kompaktní i při velkých tloušťkách na 15 mm. Na obr. je svar uhlíkové oceli S 355NL tl. 15 mm, 6° úkos V svar, CO₂ laser 15,5 kW, MIG metoda s pulsním přenosem kovu drátové elektrody G3Si1 v ochranné směsi plynu Ar + He, rychlost svařování $1,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Svar se vyznačuje vysokou vnitřní čistotou, malou tepelně ovlivněnou oblastí a minimálními deformacemi. Rychlost svařování u hliníkové slitiny tloušťky 3 mm může dosáhnout až $9 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a zajišťuje minimální vnesené teplo svaru. Výhoda je také úspora přídavného materiálu o přibližně jednu polovinu ve srovnání s klasickým svařováním a zlepšená přemístitelnost mezer i při vysokých rychlostech svařování. Svary se vyznačují vysokou pevností a velmi dobrou povrchovou kresbou. [5, 14, 22]



Obr. 21 Svar laser hybridem tloušťka 15 mm [5]

Svařováním LaseHybridem je možno použít provařování tupých svarů, ale také koutových (obr. 22). Hloubka závaru u koutových svarů je větší než u klasické technologie MIG/MAG. Hoření oblouku a podávání materiálu může být orientováno před nebo za místo ohřevu laserem. Jednotlivé uspořádání se projeví ve tvaru svarové lázně i tepelně ovlivněné oblasti. [5]



Obr. 22 Typy svarových spojů [5]

Proces svařování LaserHybridem se v automobilovém průmyslu využívá pro spojování hliníkových konstrukcí, hlavně karoserií automobilů. Lze svařovat vysokolegované i nelegované povlakované oceli.

Ačkoli energetická cena laserového svařování je vyšší než u MAG svařování bylo potvrzeno, že zvýšený svařovací výkon, vyloučení sekundárních operací rovnání a redukované množství svarového kovu vyvážilo náklady na svařování i nižší celkové náklady.

Soustava laserového paprsku a MIG/MAG systému musí dodržovat přesnou geometrii působení tepelných zdrojů tak, aby vnesené teplo bylo co nejmenší. Při velkém vzdálení ohnisek narůstá vnesené teplo. V opačném případě dochází k nekontrolovatelnému přehřívání svarové lázně, tvorbě pórů a vzniku nestabilních materiálových struktur jak ve svaru, tak i v přechodovém pásmu. Geometrie je dána konstrukcí svařovací hlavy. [22]

3.2.1.1 VÝHODY SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM

- Stabilizaci procesu střídavým působením elektrického oblouku a laserového paprsku,
- čímž je umožněno téměř bezrozstříkové 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. [5, 9, 14]

3.2.1.2 NEVÝHODY SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM

- Vysoké investiční náklady spojené s instalací zařízení, které předurčují technologii pouze pro sériovou výrobu.
- Nízká mobilita a flexibilita zařízení. [5, 9]

3.2.1.3 SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

Svařování LaserHybridem v automobilovém průmyslu dnes využívají skoro všechny světové automobilky. První kdo se začal zabývat svařováním LaserHybridem byla automobilka Audi. S pomocí firmy Fronius pracovali společně na novém svařovacím postupu. Díky tomu dosáhlo svařování LaserHybridem praktického využití v automobilovém průmyslu.

3.2.1.3.1 SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM AUDI A4



Obr. 23 Audi A4 [23]

Od roku 2007 se dveře Audi A4 svařují skenerovou optikou a diskovým laserem s výkonem 4 kW. Firma Trumpf Laser vyvinula diskový laser o výkonu 8 kW (obr. 24). K tomuto rozsahu výkonu laseru vyvinula i skenerovou optiku. Rychlé zrcadlové pohyby

skenerové optiky nahrazují obvyklé polohovací časy robotů a podstatně snižují procesní dobu. V porovnání s odporovým bodovým svařováním, u kterého se může provést přibližně 0,5 svařovacích bodů za sekundu, umožní laserové skenerové svařování typicky tři až čtyři svary za sekundu. Čtyři svařovací buňky vyrábějí pomocí této nové technologie denně 1800 dveří. Každé skenerové zařízení je opatřeno jedním laserem TruDisk 4002 od firmy Trumpf. Výstupní výkon 4 kW na zpracovaném kusu se generuje ze dvou disků. Systém propojení laserů a robotů umožňuje libovolně mezi sebou spojovat lasery a roboty. Zajišťuje tak použitelnost samotného svařovacího zařízení i při případném výpadku jednoho laseru. Z toho plyne lepší využití zdroje laserového paprsku a tím význačné zvýšení hospodárnosti.

[5, 9, 22, 23]



Obr. 24 Robot Trumpf PFO 33 [22]

3.2.1.3.2 SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM AUDI A8



Obr. 25 Audi A8 [24]

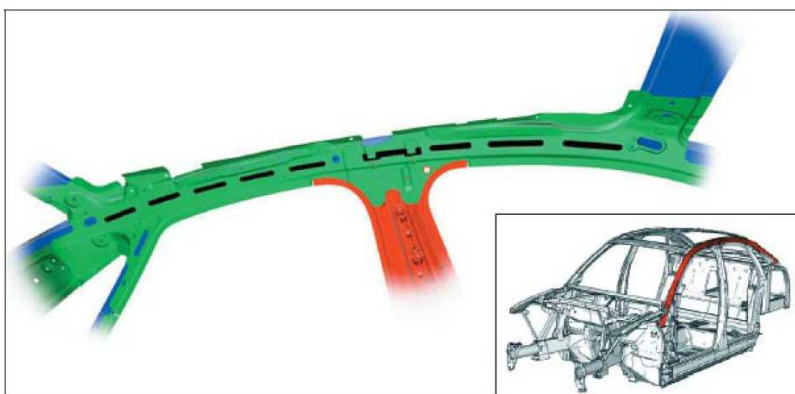
Vývoj vysokovýkonových svařovacích postupů byl v centru pro výzkum hliníku integrován do výrobní koncepce nového projektu vozu Audi A8 hybridní svařovací proces. Zvyšuje se provozní spolehlivost a schopnost překlenovat spáry v porovnání s technologií laserového svařování s přídavným materiálem. To má za následek zvýšení kvality svarů. Zvyšuje se svařovací rychlost a hloubka svaru v porovnání s konvečním MIG – svařováním.

Pro napojování různých plechových dílů na lisovaný profil se používá hybridní svařování. Celkem bylo na jednom vozidle provedeno 65 svarů s cekovou délkou spáry 5 m. Délka jednotlivých svarů se pohybovala od 30 do 260 mm.

Při párování materiálů o velké tloušťce (2 až 4 mm) bylo možné zvýšením svařovací rychlosti snížit energetické zatížení této součásti v porovnání s prostým laserovým svářením. To se projevilo na minimu snížené tepelné deformace celé konstrukční podskupiny. Byla zvýšená spolehlivost pracovního procesu i kvalita svarového spoje. Projevila se i zlepšení přemístitelnosti spár mezi spojovanými díly. [5, 9, 22, 23]

Parametry svařovacího procesu:

- Výkon laseru $P_L = 3,8 \text{ kW}$
- Svařovací rychlost $v_s = 3,6 \text{ m.min}^{-1}$
- Rychlost drátu $v_d = 4,5 \text{ m.min}^{-1}$



Obr. 27 Svarová skupina střešního rámu na boční straně vozu Audi A8 [22]

3.2.1.4 SVAŘOVACÍ HLAVA PRO SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM

Svařovací hlava pro svařování LaserHybridem je většinou nesena svařovacím robotem.

Optickým kabelem nebo soustavou zrcadel je do svařovací hlavy přiveden paprsek. MIG/MAG hořák je synchronizovaně napájen ze svařovacího zdroje MIG/MAG. Svařovací hlavou od firmy Fronius (Obr. 28) bylo dosaženo svařovací rychlosti až 9 m.min^{-1} . Svařovací hlava se může otočit až o 180° .



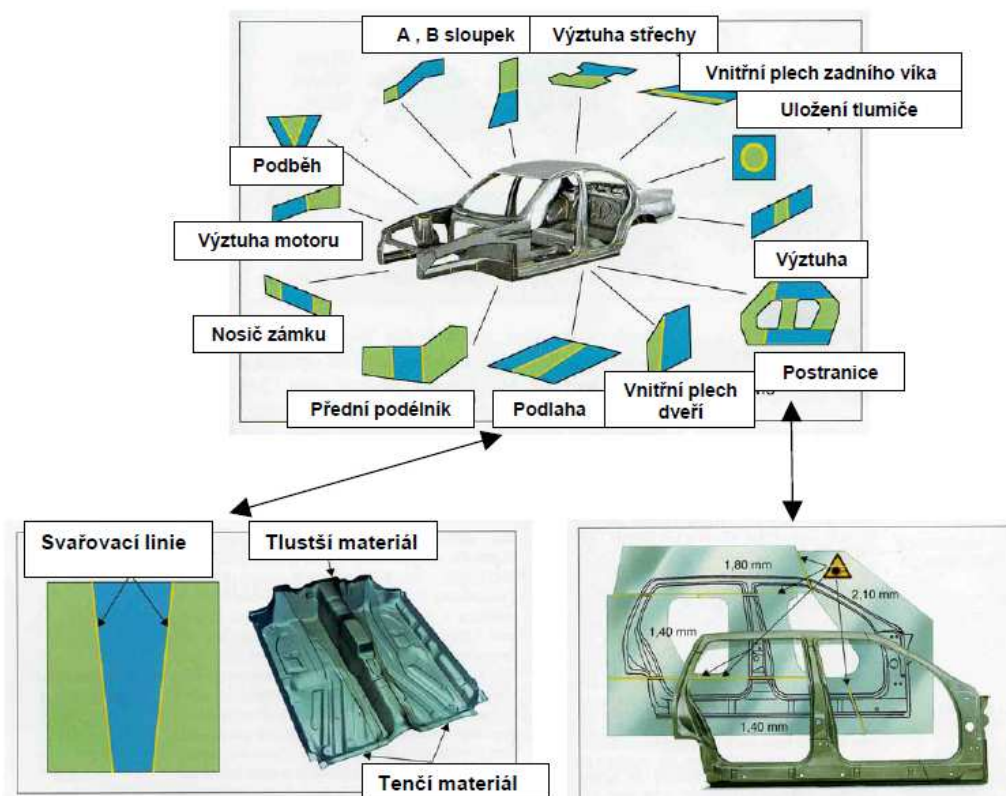
Obr. 28 Svařovací hlava [14]

Tryska Gross-Jet je navržena tak, aby docházelo ke zvýšení rychlosti při jejím výstupu. Dosáhne se tak nadzvukového proudění a to umožňuje lepší odklon rozstříků. Aby proud vzduch vystupující z trysky nezasahoval do oblasti určené ke svařování, odsává se do výfukového kanálu, což má za následek stále čistý pracovní prostor. Svařovací hořák je vybaven dvoukruhovým systémem chlazení a je dimenzován na proud 250 A při 100 % dovoleném zatížení a 4 kW výkonu laserového zdroje. [14, 22]

3.2.2 SVAŘOVÁNÍ POLOTOVARŮ LASEREM V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

Středem zájmu automobilových výrobců jsou laserem svařované polotovary, protože jsou lehké (redukuje hmotnost bez snížení pevnosti), usnadňují normalizaci komponentů. Umožňují i úsporu nákladů a času při výrobě nářadí anebo spojování nesterodných materiálů s různou tloušťkou, povrchovou úpravou či rozdílnými fyzikálními vlastnostmi. Podle názoru odborníků lze 350 výlisků současné karoserie snížit o 20 % v případě, nahradíme-li je laserově svařovanými polotovary. Uvádí se, že průkopníky v používání technologie výroby polotovarů „šitých“ na míru (Obr. 29) jsou společnosti americké „velké trojky“. Dosud nevyčerpaný inovační potenciál ocelových výrobků dokládá především studie projektu ULSAB (Ultra light Steel Auto Body). Přihlásilo se k němu 35 předních oceláren celého světa v roce 1994. Jeho nositelem byla firma Porsche Engineering Services Inc. i. USA a při vyhodnocení projektu v roce 1998 bylo možno vykázat na srovnatelných skeletech karosérií 25 % hmotnostní úsporu. Na tento projekt nyní navazují jeho další varianty ULSAC (Ultra Light Steel Auto Closure) pro odnímatelné části karosérie, ULSAS (Ultra Light Steel

Auto Structure) pro podvozkové díly a vlastní pokračování projektu ULSAB-AVC (Advanced Vehicle Concept) pro vývoj vozidel od roku 2004.



Obr. 29 Technologie výroby polotovarů karoserie „šitých“ na míru [27]

Dosavadní užívání převážně pevnolátkových Nd : YAG laserů pro svařování, s jejich předností oproti plynovým CO₂ laserům v možnosti vedení paprsku vláknovou optikou a tedy i vhodnější přizpůsobivostí pro laserové systémy a robotizovaná pracoviště, ovlivní pravděpodobně další intenzivní rozvoj výkonových diodových laserů. Ty oproti stávajícím vynikají nejen menšími rozměry, ale i vysokou účinností a životností, přičemž pro řadu technologií působí příznivě i pravoúhlý průřez jejich výstupního paprsku. [25, 28]

3.2.2.1 SVAŘOVÁNÍ KAROSERÍÍ LASEREM

Skelet karosérie je podle projektu ULSAB z 90 % tvořen z vysokopevnostních ocelí nejrůznějších druhů, které při srovnatelné tuhosti dovolují menší tloušťky plechů. Přínosem je i vývoj technologií, známých pod označením Tailored Blanks, kde jde o vytváření dílů karosérie z laserem svařených přístřihů plechů nestejně tloušťky a optimálního materiálového složení i užívání sendvičových plechů s mezivrstvou polypropylenu. Oproti průměrné hmotnosti karosérie středního vozidla (271 kg) byl výsledkem projektu ULSAB skelet o hmotnosti 203 kg. [25, 28]

3.2.2.2 SVAŘOVÁNÍ HLINÍKOVÉ KAROSERIE LASEREM

Zvýšenému zájmu o hliník v automobilovém průmyslu odpovídá i velikost jeho produkce, která se odhaduje na 20 mil. t ročně. Většinou nevystupuje hliník v čisté podobě, ale ve slitinách s Mn, Si, Cu a Zn. Mezi slitinami hliníku nacházejí uplatnění především kombinace Al-Si, Al-Cu a Al-Mg, kde pro svou dobrou slévatelnost jsou zatím nejvhodnější tzv. siluminy, slitiny hliníku s křemíkem. Z nich se tlakovým litím vyrábějí například bloky spalovacích motorů, písty, hlavy válců, disky kol, vrtule nebo různé kryty čerpadel, elektromotorů a podobných dílů. Vakuové tlakové odlévání dovoluje výrobu tenkostěnných odlitků. Produkty z hliníku a jeho slitin mohou být však i v provedení pásů, plechů, výkovků nebo výlisků. Velice úspěšnou novinkou, a to zvláště pro stavbu automobilových karosérií, je vypěněný hliník. Jeho výzkum v brémském Fraunhofer Institutu IFAM, kde se pracuje i na vývoji speciálních pěnových struktur AlMgSiCu a AlSi, ukázal, že takový sendvič dobře snáší značné deformace, aniž by došlo k porušení jeho struktury.

Určité problémy vyvstávaly zpočátku při svařování hliníku a jeho slitin laserem, kdy se tato metoda začala používat k dosažení vyšších svařovacích rychlostí oproti klasickým způsobům MIG a WIG. menší tepelné ovlivnění okolní zóny svaru a možnost řízení hustoty energie vnášené do svaru. Při svařování plynovým CO₂ laserem docházelo k výskytu pórů v kořenu svaru, které snižovaly jeho pevnost. Podle prací, vykonaných Institutem für Strahlwerkzeuge stuttgartské univerzity, lze tento problém odstranit náhradou plynových laserů lasery pevnolátkovými Nd:YAG s kvalitnějším vyzařováním na kratší vlnové délce nebo tandemovým svařováním, a to i u CO₂ laserů.

Pro stavbu karosérií se užívají převážně dva typy hliníkových slitin. Slitina AlMg s nižší pevností, ale dobrou tažností, vhodná spíše pro vnitřní části karosérie a tvrditelná slitina AlMgSi s vyšší pevností pro části vnější. Snad nejdál v praktickém uplatnění hliníkových karosérií jsou u firmy AUDI. Zde oba typy "hliníkových" vozidel (A8 i A2) dosahují až 40 % nižší hmotnosti než srovnatelné ocelové karosérie. Oba typy vozidel mají hliníkovou rámovou karosérii Spáče Práme ASI7, kde se hliníkové plechy povrchu karosérie integrují do rámu z lisovaných hliníkových profilů a litých uzlů. Zatímco ještě u A8 bylo na spojování hliníkových dílů uplatněno 500 bodových svarů způsobem MIG, pak u vývojově mladšího typu A2 byla zvolena technologie švového svařování. Z celkové délky svarů 48 m u jednoho vozidla připadá 30 m na svařování laserem a zbylých 18 m na svařování způsobem MIG. Pro svařování laserem bylo do robotizovaných pracovišť zvoleno 12 pevnolátkových Nd:YAG

laserů typu HL 3006 D pro kontinuální provoz o výkonu 3 kW od firmy HAAS Laser. Ten umožňuje rozdělení a rozvod paprsku od jednoho laseru až na 6 paralelně pracujících míst.

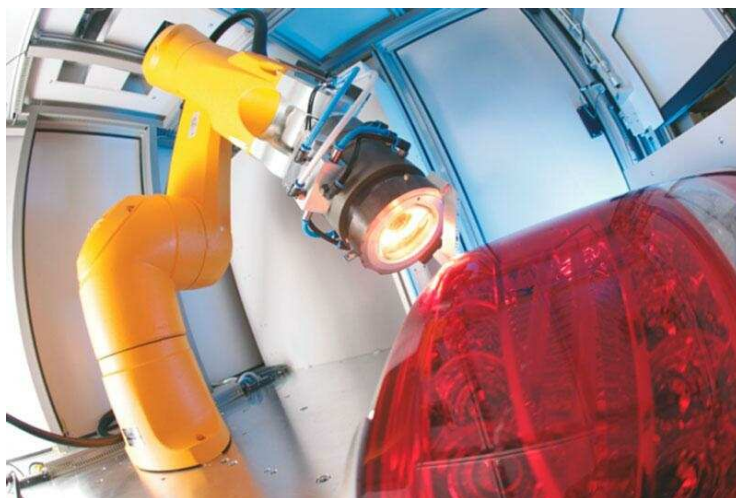
Svařování laserem probíhá pod ochranou argonu, stejně jako je tomu u zbylých 18 m svarů metodou MIG. Způsob MIG, který byl u karosérie pro A8 jediným způsobem pro hodové svařování, se u karosérie pro A2 (která bodové svary nezná) používá u švových svarů. A to tam, kde jde o potřebu většího provaření nebo jen o krátké svary. Z celkem 88 agregátů pro technologii MIG pracuje 48 na 80 % úkolů ve spojení s kloubovými roboty, ostatní mají řízení manuální. Rychlost svařování způsobem MIG ($0,8$ až $1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-2}$) je výrazně nižší než rychlost svařování laserem, kde se dosahuje 2.5 až $6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-2}$. Horní hranice rychlosti pro svařování laserem není přitom dána omezením laserové technologie, ale spíše pomalejší pohybovou kinetikou mechanických částí robotů. U obou způsobů svařování, laserem i MIG, se jako přídatný materiál používá drát ve složení AlSi 12. [25]

3.2.3 SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ LASEREM V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

Laserové svařování plastů v automobilovém průmyslu patří mezi velmi bezpečné, spolehlivé a také hospodárné metody.

Svařování laserem, které se kromě jiného vyznačuje už z pouhého laického pohledu naprosto neporušeným povrchem spojovaných dílů. Bezdotykové svařování termoplastů a termoplastických elastomerů laserem, které patří mezi nové, ale dynamicky se rozvíjející laserové průmyslové technologie, je svým uspořádáním svařenců – přeplátováním nebo stykovým – obdobné jako svařování kovů. Naprosto odlišné je ale svou podstatou, spočívající na transparentnosti a absorpci plastů vůči laserovému paprsku. Ideálním řešením je v tomto směru způsob přeplátování, kde vrchní svařovaný díl je vůči laserovému paprsku transparentní a spodní absorbující. Paprsek laseru, který je zaostřen do spáry mezi spojovanými díly, projde bez jakékoliv reakce transparentním plastem a v místě spáry je absorbován povrchem spodního dílu za vzniku teploty, potřebné pro jeho natavení, odpovídající stupni absorpce, druhu použitého laseru a tedy i rozdílné fokusaci paprsku. Sdílením tepla se od spodního dílu v mžikovém intervalu nataví i povrchová vrstva transparentního materiálu a za určitého tlaku dojde ke svaření obou dílů. Přítlačný tlak, který musí být větší, než je tepelná roztažnost materiálů, je potřebný pro dosažení bezchybné kvality svaru, bez jakékoliv deformace povrchů obou svařovaných částí. Vzhledem k možnosti přesného přivedení potřebné energie do svaru se nikterak tepelně nezatěžuje okolí spojované zóny. To umožňuje svařovat i díly, které se nacházejí v bezprostřední blízkosti

citlivých elektronických prvků, ale na druhou stranu dává i možnost makrosvařování při metrových délkách svaru, a to nejen při jeho plošném, ale i prostorovém průběhu.[15, 16]

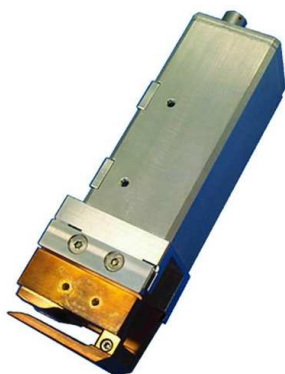


Obr. 30 Svařování platů laserem v automobilovém průmyslu [15]

3.2.4 KONTROLA LASEROVÉHO SVARU KAMEROVÝM SENZOREM

Laserem je možné svařovat za vysoké rychlosti bodové, švové i další svary prakticky u všech kovových materiálů, z nichž každý má do jisté míry svá odlišná specifikace. Respektování těchto odlišností je prvotním předpokladem pro vytvoření jakostního spoje bez trhlinek, vměstků a pórů. Už z toho důvodu zavádí většina uživatelů laserových svařovacích systémů průběžnou kontrolu procesu svařování, včetně kontroly geometrie svaru.

K nejlepším způsobům kontroly patří metody využívající analýzu taveniny svaru přes IR senzory s CCD nebo CMOS kamerovým systémem a on-line řízením svařovacího procesu. Z obrazu kamery vedle plošných parametrů svaru lze vyhodnotit i hloubku průvaru, pórovitost svaru, možné trhlinky nebo jiné defekty a na základě jejich vyhodnocení programově upravit další postup svařování. [13]



Obr. 31 Senzor pro kontrolu svaru s CCD kamerou [13]

3.2.4.1 KAMEROVÉ SLEDOVÁNÍ PŘI SVAŘOVÁNÍ STŘECHY AUTOMOBILU LASEREM

Dalším příkladem vyspělých technologií, používaných v automobilové výrobě, jsou i dvě svařovací centra, kde se kompletují střechy vozů. Kamerový systém nejprve přesně zaměří polohu střechy vůči karoserii. Dva laserové svařovací automaty, každý o výkonu 4 kW, potom přesně svaří střechu s bočními panely. Svařování laserovým paprskem má oproti konvenčnímu bodovému svařování řadu výhod. Především laserové svary už nevyžadují žádnou dodatečnou úpravu a do prostorové konstrukce střechy není nutné dělat žádné technologické otvory pro kleště bodových svářecích automatů, které samozřejmě snižují pevnost celé konstrukce. Také další využití laserů dokumentuje špičkovou technologickou úroveň výroby v závodě Opel Rüsselsheim. Do různých míst procesu výroby je začleněno pět přizpůsobivých monitorovacích stanic, kde se vznikající vozy přesně proměřují za pomoci laserových čidel a výsledky se porovnávají v elektronickém projekčním systému se zadanými hodnotami. Laserový paprsek si "osahá" celou řadu přesně definovaných bodů karoserie, jako jsou např. některé příruby, díry pro šrouby nebo technologické otvory. Odražený paprsek je přitom systémem zrcadel promítnut na speciální snímače a elektronický projekční systém potom rozpozná s přesností jedné desetiny milimetru případné odchylky od předem zadaných parametrů. Pokud některý díl nebo celá karoserie nevyhoví požadovaným standardům na přesnost, výrobní linka se zastaví a rozběhne se teprve po identifikaci a vyřešení problému. Další výhodou této metody je to, že slouží jako velmi efektivní systém včasného varování pro tým řízení a kontroly kvality výroby. Zadané a naměřené hodnoty jsou totiž v průběhu výroby neustále porovnávány, a pokud se určitý díl nebo celá karoserie některým rozměrem nebezpečně blíží ke hranici tolerance, může tým na výrobní lince udělat včas potřebné kroky, jimiž se předejde výrobě vadného dílu či vozu. Z výrobní linky míří karoserie do lakovny. Ještě před konečným nanášením vrchní barvy je karoserie ošetřována celou řadou primárních laků, plnidel, vosků a protikorozních nátěrů. Díky této komplexní péči může Opel na všechny verze modelové řady Vectra poskytovat dvanáctiletou záruku proti prorezivění karoserie. [26]

4. ZÁVĚR

Cílem práce bylo shromáždění literárních poznatků o svařování laserem a využití v automobilovém průmyslu. Přibližuje nahlédnout do problematiky svařovaných spojů. Svařování laserem je technologická metoda, která bude v budoucnosti stále více využívána.

V první části se práce zabývá obecnou definicí svařování laserem. Popisuje základní vlastnosti, vlastní metodu, výhody a nevýhody sváření laserem. Dále se zaměřuje na různé typy průmyslových laserů a na jejich využití. Na konci této kapitoly se zaměřuje na jiné průmyslové využití laseru (např. řezání, vrtání, značení, tepelné zpracování, gravitování).

Hlavní úkol práce byl, se zaměřit na svařování laserem v automobilovém průmyslu. Využití svařování laserem v automobilovém průmyslu je v této práci nejvíce zohledněno ke svařování karoserií vozů. Zaměřuje se i na svařování karoserií z hliníku. Dále se však svařování laserem využívá u motorových a podvozkových dílů. Svařování laserem čeká veliké využití v budoucnosti a to díky jeho lepším vlastnostem oproti jiným metodám, které jsou v práci také vypsány (např.: odporové svařování – bodové, metoda MIG/MAG, metoda TIG). Dále se zabývá dalším specifickým využitím v automobilovém průmyslu a to zejména svařováním LaserHybridem. Jedná se o kombinaci pevnolátkového laseru s jinou obloukovou technologií svařování. Popisuje používání tohoto svařování v automobilce Audi, která první začala tuto technologii používat a to u svých modelových vozů A4 a A8. Na konci této kapitoly se ještě zabývá kontrolou svařování laserem a to hlavně kamerovou kontrolou svařování laserem střechy automobilu.

Metoda svařování laserem bude v budoucnosti stále více využívána a to nejen v automobilovém průmyslu. Dobré vlastnosti této metody jí zaručují velké uplatnění. V dnešní době je sice tato metoda finančně náročnější než jiné využívané metody svařování. Přesto nachází stále větší využití. Všechny světové automobilky se snaží vylepšovat své výrobní technologie, proto vymýšlejí stále lepší metody spojování materiálů a mezi ně právě patří svařování laserem.

5. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BERNASOVÁ, E.: Svařování. Praha,NTL, 1987, 199 s
- [2] KOUKAL, J – ZMÝDLENÝ, T.: Svařování. Ostrava, V3B, 2005, 133s.
- [3] ROUBÍČEK, M.: Technologické aplikace laserů pro mikrosvařování a řezání. ČVUT, Strojní fakulta, 2001, 101 s.
- [4] ROUBÍČEK, M.: Laserové svařování, [online]
URL: < <http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/laserove-svarovani49120.pdf>.>
[cit. 2011 – 01 – 31]
- [5] KUBÍČEK, J – MARŇA, L.: Technické aspekty svařování laserem.[online]
URL:<http://www.svarak.cz/f/svarak/p/PDF%20%C4%8D1%C3%A1nky/PDF_%C4%8Cesky/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD%20laserem.pdf > [cit. 2011 – 02 – 01]
- [6] ŠULC, J.: Lasery a jejich aplikace, [online]
URL:< <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>> [cit. 2011 – 02 – 01]
- [7] ŠULC, J.: Průmyslové aplikace laserových systémů, [online]
URL:< <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>> [cit. 2011 – 02 – 02]
- [8] TICHÝ, J.: Svařování v automobilovém průmyslu, [online]
URL:<http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Sva%C5%99.v.Automob_2_2007.pdf>
[cit. 2011 – 02 – 04]
- [9] TEPLÝ, J.: Analýza svařování laserhybridem, VUT Brno, [online]
URL:<http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28219> [cit. 2011 – 02 – 05]
- [10] ŘASA, J – JINDROVÁ, R.: Lasery, laserové technologie a stroje s laserem, [online]
URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>>
[cit. 2011 – 02 – 02]
- [11] Laserové zpracování tenkých ocelových plechů, [online]
URL:<<http://dp.bajaja.net/06.html#6-B>> [cit. 2011 – 02 – 06]
- [12] Řezání laserem, [online]
URL:<http://www.lindegas.cz/international/web/lg/cz/like351gcz.nsf/docbyalias/ind_mv_lascut> [cit. 2011 – 02 – 10]
- [13] Kontrola laserového svaru kamerovým senzorem, [online]
URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/kontrola-laseroveho-svaru-kamerovym-senzorem>> [cit. 2011 – 03 – 15]
- [14] Svařování LaserHybrid, [online]

- URL:< <http://www.safework.cz/svarovani-laserhybrid/>> [cit. 2011 – 03 – 01]
- [15] Časopis T+T Technika a trh, LPKF – laserové svařování plastů s oceněním, [online]
URL:<http://www.technikaatrh.cz/index.php?sec=rubrika&id_rubrika=42>
[cit. 2011 – 03 – 26]
- [16] Svařování termoplastů laserem, [online]
URL:<<http://www.plastnet.cz/ArticleDetail.asp?nBranchID=30&nArtID=112&nPage=5>>
[cit. 2011 – 03 – 26]
- [17] ZATLOUKAL, P.: Laser ve strojírenství, [online]
URL:<<http://www.welding.cz/laser/svarovani.htm>> [cit. 2011 – 02 – 10]
- [18] Polovodičový laser, [online]
URL:<<http://www.phzsics.mff.cuni.cz>> [cit. 2011 – 02 – 08]
- [19] Plyny pro svařování laserem, [online]
URL:<http://www.lindegas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_laser7> [cit. 2011 – 02 – 12]
- [20] Řezání laserem, [online]
URL:<http://www.lindegas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_lascut> [cit. 2011 – 02 – 13]
- [21] Řezání laserem, [online]
URL:< <http://www.laser-tech.cz/rezani-laserem/>> [cit. 2011 – 02 – 13]
- [22] Svařování Laser-Hybridem, [online]
URL:< <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-04.pdf>> [cit. 2011 – 03 – 16]
- [23] Audi A4, [online]
URL:<<http://audi-cars-pictures1.blogspot.com/2009/10/audi-a4.html>> [cit. 2011 – 03 – 20]
- [24] Audi A8, [online]
URL:<<http://audi-cars-pictures1.blogspot.com/2009/10/audi-a8.html>> [cit. 2011 – 03 – 20]
- [25] 30 metrů laserových svarů, [online]
URL:<<http://www.petrol.cz/noviny/clanek.asp?id=2032>> [cit. 2011 – 03 – 27]
- [26] Pohled do nitra moderní automobilky, [online]
URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/pohled-do-nitra-moderni-automobilky>>
[cit. 2011 – 03 – 20]
- [27] MERTENS, A.: Tailored Blanks. Augsburg, VMI, 2003, 71s
- [28] NARENDRA, B. – SANDIP, P.: Laser fabrication and machining of materials. New York, Springer, 2008, 551 s.