

LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ

ING. MARTIN ROUBÍČEK, PH.D.

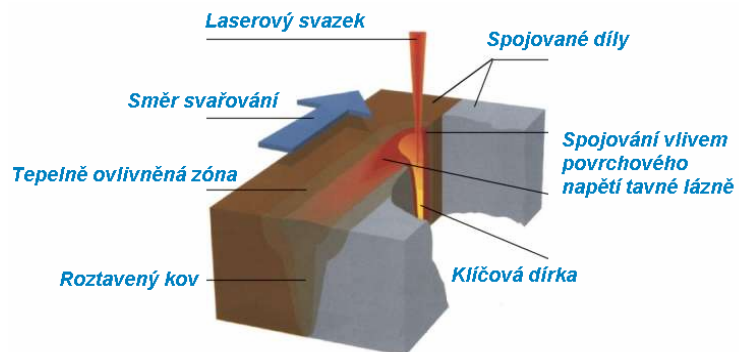
Laserové svařování se vyznačuje vysokými svařovacími rychlostmi, minimálními deformacemi spojovaných dílů a velmi úzkou tepelně ovlivněnou oblastí. Umožňuje řešit širokou řadu svařovacích operací s možností automatizace a robotizace. Jednou z mála nevýhod jsou zatím vysoké investiční náklady spojené s instalací laserového systému, které tuto technologii předurčují pro sériovou výrobu. Hlavními zónami aplikací jsou tedy automobilový průmysl, výroba svařovaných profilů a trubek, tepelných výměníků, hřidelí, ozubených kol, apod. S laserovým svařováním je možné se také setkat tam, kde jsou plně využity jeho technologické přednosti a kde by jiná metoda spojování nebyla technicky možná (výroba chirurgických nástrojů a medicínských komponent, elektronické prvky, ...). Lasery lze aplikovat vedle výrobních operací také v opravárenství (renovace forem apod.).

Vývoj laserů

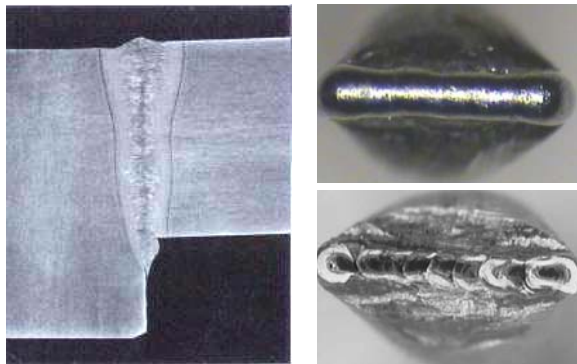
První využití laserového svařování v průmyslovém kontextu se datuje do počátků osmdesátých let 20. století. Od tohoto data se laserové zdroje značně vyvinuly. Pevnolátkové pulzní Nd:YAG lasery dosahující výkonu několika stovek wattů, byly postupně nahrazeny kontinuálními zdroji o maximálních výkonech v řádu 5 kW. Dalším stupněm jsou YAG lasery využívající pro čerpání rezonátoru polovodičové laserové diody místo výbojek. Toto řešení umožňuje zvýšení energetické účinnosti zdrojů a kvality svazků a v důsledku i dosažení efektivnějších provozních podmínek. S ohledem na to, že energetický svazek o vlnové délce 1,064 μm produkovaný YAG lasery lze transportovat optickými vlákny (přinos pro robotizaci), stejně jako ve srovnání s jinými vlnovými délkami dobrá schopnost absorpce kovovými materiály (hliník, měď ...), získává tento typ laserů postupně na oblibě. Pulzní YAG lasery s malým výkonem jsou používány pro vytváření svarů malých rozměrů a pro spojování dílů s extrémní přesností (mikrosvařování). YAG lasery s vysokým výkonem vystupují jako konkurent pro ostatní svářecí postupy s potřebou vysokých rychlostí svařování, hlubokých závarů, malých deformací a podobně.

Dalším typem svařovacích průmyslových laserů využívaným dnes takřka masově také pro tepelné dělení materiálů jsou CO₂ lasery. Tyto lasery pracující na vlnové délce 10,6 μm obecně zahrnují relativně široké rozmezí výkonů, řádově až do 45 kW. Běžné průmyslové výkony CO₂ svařovacích laserů se pohybují kolem 6 - 8 kW, v některých případech až 12 kW. Existují tři základní v praxi používané konstrukční typy: s rychlým axiálním prouděním aktivního prostředí, s příčným prouděním aktivního prostředí (TEA) a SLAB lasery s deskovým aktivním prostředím. Aktivní prostředí je ve všech těchto případech tvořeno třemi základními komponenty: oxidem uhlíčitým, dusíkem a héliem a případně dalšími složkami. Vzhledem k plynné formě aktivního prostředí a možnosti jeho kontinuální obměny v průběhu činnosti laseru lze i při velmi nízké účinnosti CO₂ laserů (cca 10 %) dosáhnout velkých výkonů snadněji než v případě pevnolátkového aktivního prostředí. Transport svazku nelze vzhledem k vlnové délce realizovat pomocí optického vlákna, využívá se odrazných zrcadel.

Další vývoj v oblasti laserových zdrojů směřuje k polovodičovým laserům, které vykazují vyšší účinnost, vhodné vlnové délky, ale velmi špatnou kvalitu svazku, která neumožňuje dosahovat vysokých hustot energie. Tyto skutečnosti polovodičové lasery předurčují pro zpracovávání materiálů s nízkou teplotou tavení (plasty) a tam, kde není potřeba hluboký průvar, ale naopak široká stopa dopadu (navařování). Novou kapitolu dnes začínají psát vláknové lasery, které dosahují velkých hustot energie a vhodné vlnové délky, na své průmyslové rozšíření však ještě čekají. Samostatnou skupinu technologických operací pak tvoří tzv. hybridní procesy, které spojují přednosti laserového svařování s metodami MIG, TIG nebo plazmovým svařováním.



Obrázek 1. Princip laserového svařování



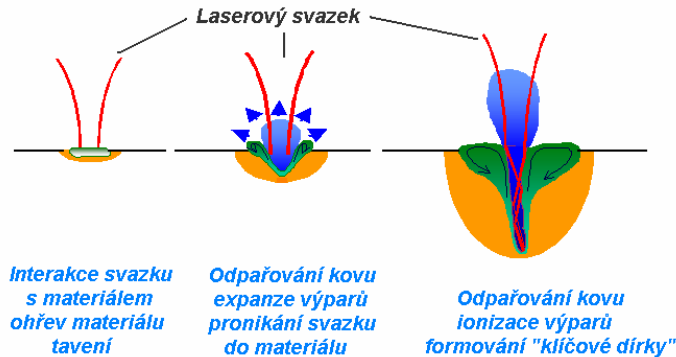
Obrázek 2. Svar metodou „klíčové dířky“ (vlevo), pulzní svar v ochranné atmosféře He (vpravo nahore) a Ar (vpravo dole)

Samostatnou skupinu technologických operací pak tvoří tzv. hybridní procesy, které spojují přednosti laserového svařování s metodami MIG, TIG nebo plazmovým svařováním.

Vytváření svarových spojů

Svarový spoj lze laserem vytvořit v zásadě dvěma způsoby. Pulzním svařováním s nízkou opakovací frekvencí, přičemž mezi jednotlivými pulzy dojde ke ztuhnutí (úplnému nebo částečnému) svarové lázně. Svarová housenka je pak tvořena mnoha za sebou jdoucími a vzájemně se překrývajícími body (obrázek 2). 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.

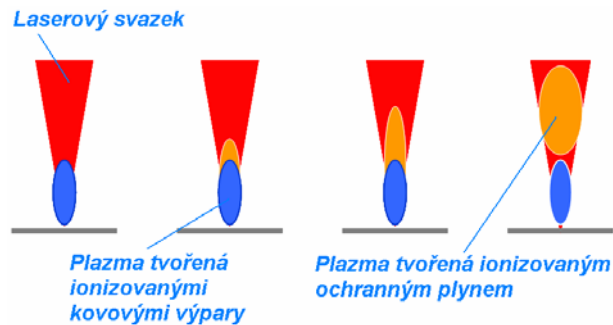
Druhá možnost je založena na využití vysoké hustoty výkonu v dopadové ploše pro vznik tzv. „klíčové dírky“ („key hole“). „Klíčová dírka“ je kapilára naplněná ionizovanými kovovými výparů o vysoké teplotě (obrázek 1). Stěny kapiláry jsou tvořeny roztaveným kovem. Kapilára hraje důležitou úlohu, neboť 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 přidavného materiálu a na jeden průchod a to s plným nebo částečným průvarem (obrázek 2). 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 ochrannou atmosférou.



Obrázek 3. Vznik „klíčové dírky“

dírkou“. Vytvoření kapiláry je doprovázeno ionizací kovových výparů - vznikem plazmatu. 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 závaru.

Laserový svazek dopadá na materiál zaostřen optickým systémem, přičemž poloha ohniska se může nacházet 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 větší hustoty energie dosáhneme. Při určité hodnotě hustoty energie dochází k ionizaci ochranné atmosféry nad povrchem materiálu a vzniku plazmatu ochranného plynu (obrázek 4). Toto plazma pohlcuje podstatnou 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 tedy 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 (vytvzování povrchu, navařování, velké tolerance vzájemné polohy spojovaných dílů, ...).

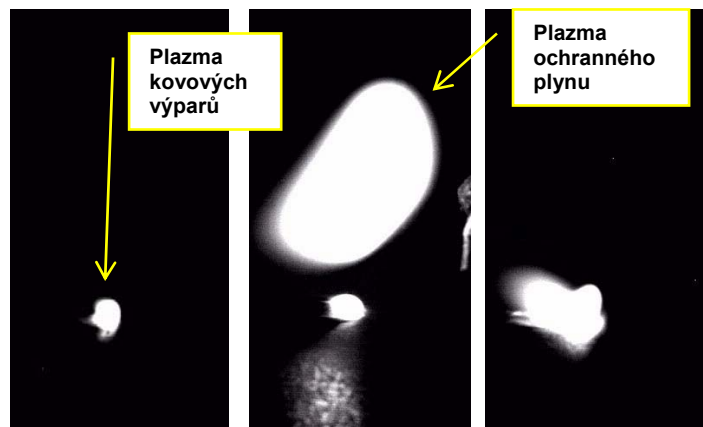


Obrázek 4. Tvorba plazmatu

Plyn				
Hélium	Argon	Dusík	CO ₂	Kyslík
24,5 eV	15,7 eV	15,5 eV	14,4 eV	12,5 eV

Tabulka 1. Ionizační potenciál vybraných plynů

nejdůležitější vlastností ionizační potenciál (energie potřebná ke vzniku iontu daného prvku). Čím vyšší je hodnota ionizačního potenciálu, tím méně plazmatu vzniká. Nízké hodnoty ionizačního potenciálu znamenají snadný vznik plazmatického stavu a velké množství plazmatu. Tabulka 1 ukazuje konkrétní hodnoty ionizačního potenciálu vybraných plynů, které se používají na tvorbu ochranných atmosfér pro laserové svařování. Je zřejmé, že nejméně plazmatu bude vznikat při použití ochranné atmosféry hélia. Obrázek 5 ukazuje snímky tvorby plazmatu při dopadu



Obrázek 5. Tvorba plazmatu snímky, ochranná atmosféra He (vlevo), Ar (uprostřed), N₂ (vpravo)

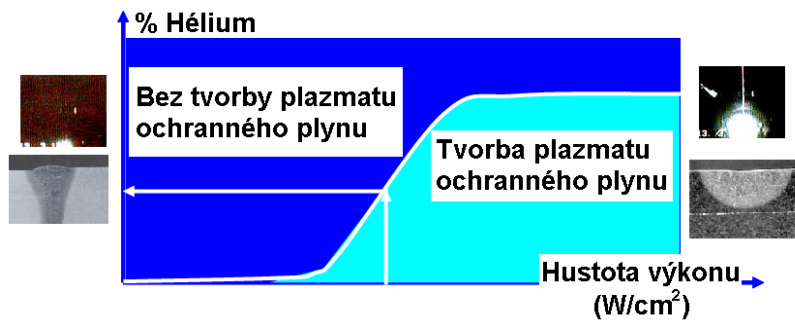
Interakce laserového svazku s materiálem

Po dopadu energetického laserového svazku na materiál se část energie odrazí a část je materiálem absorbována. Absorbovaná energie způsobí intenzivní zahřívání materiálu, přičemž koeficient absorpce s rostoucí teplotou narůstá. Skokových nárůstů pak dosáhne při překročení teplot tavení a odpařování (varu). Jak ukazuje obrázek 3, laserový svazek postupně proniká do materiálu, který je taven a odpařován za vzniku kapiláry – „klíčové

plazmatu ochranného plynu (obrázek 4). Toto plazma pohlcuje podstatnou 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 tedy 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 (vytvzování povrchu, navařování, velké tolerance vzájemné polohy spojovaných dílů, ...). V takových případech pak lze proces doprovázet řízením množství vzniklého plazmatu ochranného plynu. Problematika tvorby plazmatu je tedy jedním ze základních faktorů, které se na laserovém svařování podílejí.

Pro uvedení plynu do plazmatického stavu je jeho

laserového svazku na materiál (svařování 6 kW CO₂ laserem rychlostí 3 m/min s průtokovým množstvím ochranného plynu 10 l/min). Je zřejmé, že při použití hélia vzniká pouze malé množství plazmatu tvořeném ionizovanými kovovými výparry, zatímco při použití argonu lze pozorovat rozsáhlou oblast plazmatu ochranného plynu. V průmyslové praxi se také potvrzuje, že hélium je nejhodnějším ochranným plynem k zamezení vytváření negativního plazmatu, v důsledku



Obrázek 6. Optimalizace složení směsné ochranné atmosféry

čehož lze dosáhnout nejhlubších průvarů při dané rychlosti svařování nebo naopak nejvyšších svařovacích rychlostí při současném splnění požadované hloubky průvaru. Využití hélia je tedy nejčastější. Nevýhodou hélia je jeho vysoká cena a relativně malá specifická hmotnost. Nízká hustota ochranného plynu vyžaduje mnohem větších průtokových množství, neboť hélium ihned po opuštění přívodní trysky intenzivně stoupá vzhůru. Vhodným kompromisem je použití ochranných směsných plynů na bázi He/N₂ nebo He/Ar. Směsné plyny využívají nízké schopnosti ionizace hélia, což kombinují s nižšími náklady na argon nebo dusík s tím, že lze zároveň snížit průtokové množství ochranné atmosféry. Pro každý případ svařování (materiál, výkon, hustota energie, ...) lze nalézt optimální složení směsi dle grafu na obrázku 6. Pro danou hustotu výkonu vždy existuje hranice minimálního množství hélia ve směsi, kdy ještě nedochází k intenzivní tvorbě plazmatu ochranného plynu, ale kdy ještě podstatným způsobem přidání argonu nebo dusíku zlepší výslednou ekonomickou bilanci.

Závěr

Laserové svařování je efektivní metodou spojování kovových konstrukčních materiálů. Výše uvedený příspěvek nabízí pouze jeden z pohledů na tuto moderní technologii. Ve praxi je nutno optimalizovat celý další komplex parametrů ovlivňujících proces tvorby svarového spoje. Parametry spojené s laserovým svazkem: vlnová délka, výkon, kvalita svazku (příčný mód TEM, faktor kvality M² nebo K, ...). Parametry spojené se zaostřením svazku: typ optiky, ohnisková vzdálenost, pozice ohniska vzhledem k povrchu materiálu, ... Parametry spojené s materiálem a uspořádáním spoje: teplota tavení, tepelná vodivost, tepelná kapacita, slučitelnost s plyny, konstrukční uspořádání spoje, příprava svarových ploch, přesnost sestavení v přípravku, ... Přes tuto náročnost se jedná o jednu z nejdynamičtější se rozvíjejících oblastí svařování, která již dnes zasahuje i do běžných oblastí strojírenské výroby.