



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ

LASER WELDING OF PLASTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Eliška Nováková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	Eliška Nováková
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jaroslav Kubíček
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Laserové svařování plastů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařování termoplastů různými metodami je dnes běžná technologická operace. Svařování laserem je však stále málo využíváno a hlavní oblast využití je v automobilovém průmyslu. Zaměření práce je zhodnotit laserový spoj termoplastů z hlediska tvaru a hloubky protavení.

Cíle bakalářské práce:

1. Zhodnotit současný stav svařování termoplastů.
2. Vypracovat literární studii laserových technologií svařování.
3. Vyhodnotit parametry a podmínky procesu, které mají vliv na svařování termoplastů.
4. Provést rozbor svarů a vyhodnotit experiment.

Seznam literatury:

BENKO, Bernard a kol. Laserové technologie, Technická universita, Bratislava 2000, ISBN 80-22-1425-9

LOYDA, Miloslav. ŠPONER, Vlastimil a Ladislav ONDRÁČEK. Svařování termoplastů, 1 vyd. UNO Praha, 2001, ISBN 80-238-6603-6

PILOUS, Václav. Materiály a jejich chování při svařování, 1 vyd. Škoda-welding, Plzeň, 2009

TURŇA, Milan. Speciálne metódy zvarovania, 1 vyd. ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-000097-9

KOUKAL, Jaroslav a KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1 vyd. Zeross, Ostrava 2001, ISBN 80-85771-85-3

AMBROŽ, Oldřich a KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1 vyd. Zeross, Ostrava 2001, ISBN 80-85771-81-0

VEJVODA Stanislav a KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1 vyd. Zeross, Ostrava 1999, ISBN 80-85771-70-5

BARTÁK Jiří a KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1 vyd. Zeross, Ostrava 2000, ISBN 80-85771-72-1

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

NOVÁKOVÁ Eliška: Laserové svařování plastů.

Práce předkládá stručnou charakteristiku metod pro svařování termoplastů. Následuje podrobnější popis laserového svařování termoplastů tzn. popis laseru, rozdělení, typy laserů. Poté jsou uvedeny podmínky a parametry svařování. Experimentální část je zaměřena zejména na vizuální zkoušku svarů na zkušebním vzorku. Vzorek sestává ze dvou druhů materiálů, čirého polymethylmethakrylátu a černého polykarbonátu, které se využívají u výroby světlometů automobilu. Pro svaření byl využit diodový laser určený pro svařování termoplastů. Byly kontrolovány zejména vady viditelné z makroskopicky zvětšených snímků. U zkoušených svarů se nejvíce vyskytovala pórovitost a vzduchové bubliny. V závěru je pak provedeno vyhodnocení experimentu.

Klíčová slova: laser, laserové svařování, svar, termoplast

ABSTRACT

NOVÁKOVÁ Eliška: Laser welding of plastics.

The bachelor presents a brief characteristics of thermoplastics welding methods followed by a more detailed description of laser welding of thermoplastics, i.e. laser description, division and types. Then, conditions and parameters of welding are defined. The experimental part is focused namely on visual welding tests on a test sample. The sample consists of two types of material – pure polymethyl methacrylate and black polycarbonate – which are used in car headlamp production. For welding, a diode laser designed for thermoplastics welding was used. The main target of inspection were flaws that were visible on macroscopically enlarged images. The tested welds mostly showed porosity and air bubbles. Finally, an evaluation of the experiment is conducted.

Keywords: laser, laser welding, weld, thermoplastic

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁKOVÁ, Eliška. *Laserové svařování plastů*. Brno, 2017. 42 s., 1 příloha, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubiček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 25. 5. 2017

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubičkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat rodině a známým za podporu při studiu.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	11
1 SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ [8], [23]	12
1.1 Historie svařování termoplastů [9]	12
1.2 Termoplasty [9], [12], [23]	12
1.3 Metody svařování termoplastů [1], [8]	13
1.3.1 Svařování horkým plynem [1].....	13
1.3.2 Svařování horkým tělesem [1], [8].....	13
1.3.3 Svařování extruderem [1], [8].....	14
1.3.4 Svařování ultrazvukem [1], [8], [23].....	14
1.3.5 Svařování třením [1], [8].....	15
1.3.6 Svařování laserem [8], [23].....	16
2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ [7], [21]	17
2.1 Laser [3], [7], [11]	17
2.2 Historie laseru [3]	19
2.3 Typy laserů [13]	20
2.3.1 CO ₂ laser [3], [5].....	20
2.3.2 Nd: YAG lasery [3], [5], [18].....	21
2.3.3 Vláknový laser [7], [10].....	22
2.3.4 Diodový laser [7], [6].....	23
2.4 Propustné svařování [2], [21]	24
2.5 Výhody a nevýhody laseru [3]	25
3 PARAMETRY A PODMÍNKY SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ	26
3.1 Základní parametry svařování [9]	26
3.2 Podmínky svařování [9]	26
3.2.1 Vlastnosti materiálů [9].....	26
3.2.2 Okolní prostředí [9].....	26
3.2.3 Čistota [9].....	26
3.2.4 Další vlivy stanovující kvalitu svaru [9].....	27
3.3 Svařitelnost materiálů [9], [23]	27
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
4.1 Parametry svařovacího zařízení [3], [5]	28
4.2 Zkušební vzorky	30
4.2.1 Materiály vzorku [1], [15].....	30
4.2.2 Způsoby kontroly svarových spojů [24].....	31

4.2.3 Postup přípravy zkušebních vzorků.....	31
4.3 Vyhodnocení vad vizuální zkouškou	32
5 ZÁVĚRY.....	38

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

ÚVOD [9], [12], [17], [23]

Plasty jsou v současné době důležitou součástí našich životů. Obklopují nás při práci v kancelářích i dílnách, při sportování. Jsou výrazným prvkem automobilového průmyslu. Řadí se mezi nejvýznamnější nekovové konstrukční materiály. Při porovnání s kovy mají vysokou měrnou pevnost, nízkou měrnou hmotnost, nízkou teplotní a elektrickou vodivost, jsou odolné korozi, tlumí vibrace a kmity, mají dobré kluzné vlastnosti, příznivé ceny atd. Druhů plastů je nepřehledné množství a jejich spotřeba a aplikace se rychle zvyšuje.

Používají se v mnoha odvětvích, pro která jsou vyvíjeny nové druhy plastů s ohledem na zvýšenou pevnost, teplotní a chemickou odolnost. Vznik nových materiálů podmiňuje rozvoj nových zpracovatelských technologií, které umožňují výrobu složitějších dílců a polotovarů. V neposlední řadě si to vynutilo pokrok ve spojování plastů technologiemi jako je lepení a svařování. Příklady svařovaných dílů jsou uvedeny na obr. 1. Postupem času byly kladeny větší nároky na kvalitu a efektivitu výroby a začala se vyvíjet nová technologie pro spojování plastů. Jde o laserové svařování, které postupně vytlačilo a nahradilo technologii lepení. Výrazně se tak zlepšila produktivita výroby, finální těsnost ve spoji a snížilo se množství vadných dílů.



Obr. 1 Příklady svařovaných plastových dílů [16], [20], [22]

1 SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ [8], [23]

Svařování plastů je proces, při kterém vzniká nerozebíratelný spoj mezi jednotlivými díly a to za úplného nebo částečného zaniknutí povrchových rozhraní. Svařuje se s přídavným materiálem nebo i bez něj. Vytváření spoje probíhá při styku povrchů, které jsou aktivovány teplem a pomocí tlaku. Pro dosažení pevného spoje je důležitý těsný kontakt povrchů, tak aby se makromolekuly přiblížily na vzdálenost, při níž se projeví makromolekulární síly. Dochází k vzájemnému prolínání mikroobjemů povrchových vrstev. Z toho důvodu musí mít materiál schopnost přejít do tekutého stavu. Tato tavitelnost a reologické vlastnosti se označují jako svařitelnost materiálu a společně určují kvalitu svaru.

Technologie svařování se liší způsobem ohřevu spojovaných povrchů. Teplo se předává buď přímo nosiči tepla (kontaktní svařování), horkým plynem nebo přídavným materiálem (extruzní svařování), přeměnou jiných druhů energie na teplo, například transformací mechanické energie (svařování ultrazvukem, třením) nebo elektrické energie (vysokofrekvenční svařování). S ohledem na pořadí provedení operací při spojování dvou materiálů se technologie odlišují následovně:

- na svařované povrchy je nejprve přiveden tlak a poté teplo,
- svařované povrchy jsou nejdříve zahřívány a poté je na ně přivedený tlak,
- svařované povrchy jsou současně pod tlakem i teplotou (svařování třením).

1.1 Historie svařování termoplastů [9]

Už ve 40. letech 20. století se pro rozvod pitné vody využívaly plasty. Nejrozšířenějším druhem byl Novodur, což je domácí značka pro PVC-U. Později se přidaly další materiály jako polyethyleny (PE-LD, PE-HD), polypropylény (PP) nebo nízkohustotní rozvětvený polyethylen (rPE = Bralen). Hlavním školicím střediskem pro svářeče plastů byla Bratislava.

V Československu nastal největší rozmach aplikací plastů v trubních rozvodech až v 90. letech. Polymerní materiály postupně vytlačovaly stávající kovová potrubí.

1.2 Termoplasty [9], [12], [23]

Termoplast je materiál založený na makromolekulárních látkách tzv. polymerech. Makromolekuly termoplastů jsou lineární, popřípadě rozvětvené, nejsou ale zesíťované. Termoplasty je možné jednoduše vratně tepelně upravovat a zpracovávat. Teplem měknou, ztrácejí tvar a mění se v taveninu, lze je tvářet a tvarovat. V novém tvaru ochlazením tuhnou. Při opakovaném procesu nedochází k zásadním změnám v oblasti mechanicko-fyzikálních vlastností. Při amorfní struktuře termoplastů jsou makromolekuly v poloze navzájem neuspořádané, křehké a tvrdé. U struktury částečně krystalické (semikrystalické) mají makromolekuly polohu částečně uspořádanou, jsou houževnaté a ohebné.

Při vyšších teplotách, zejména v tavenině, mají termoplasty sklon k destrukci termooxidací. I bez přítomnosti kyslíku dochází k tepelnému rozkladu, proto se omezuje doba zahřívání materiálu na technologické minimum.

Svařování termoplastů probíhá ve stavu, kdy je materiál taveninou. V této fázi dochází ke vzájemnému tlaku nahřátých ploch proti sobě. Ve spoji se mísí makromolekuly a následuje pozvolné ochlazení bez urychlování. Vznikne tak poměrně vysoce pevný a nerozebíratelný spoj.

Obecně se plasty dělí dle zpracovatelských vlastností na termoplasty, elastomery a reaktoplasty. Ovšem svařitelné jsou pouze termoplasty tzv. plastomery.

1.3 Metody svařování termoplastů [1], [8]

Většina metod pro svařování plastů vychází ze svařování kovů. V praxi se využívá velké množství technologií a způsobů pro svařování termoplastů. Některé jsou vhodné pouze pro trubky, jiné výhradně pro fólie a další jen desky. Mnoho z nich se používá často, na jiné lze narazit zřídka. Metody se mohou dělit podle způsobu přivádění tepla do svaru, tedy:

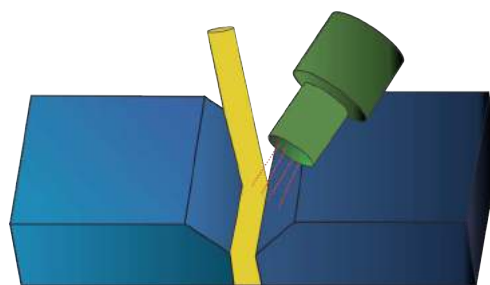
- vedením,
- konvekcí (prouděním),
- třením (vnitřním či vnějším),
- zářením.

V současné době se využívá mnoha způsobů svařování termoplastů. Příklady některých z nich jsou uvedeny v následujících podkapitolách. Přehled dalších metod pro svařování plastů je v příloze č. 1.

1.3.1 Svařování horkým plynem [1]

Svařování horkým plynem je poměrně rozšířené a vhodné téměř u všech termoplastů. Pomocí přídavného materiálu, který se přidává do svaru a je stejného druhu jako základní materiál, se vytváří svarový spoj. Přídavný materiál se ohřívá proudem horkého plynu, stejně jako povrchy svařovaných součástí. Natavený plast je schopen při působení tlaku vytvořit dostatečně pevný svarový spoj. Přídavný materiál bývá ve formě plastového drátu (různého průřezu) a vtlačuje se kolmo ke svařované ploše (ručně nebo mechanicky). U měkkých termoplastů se používají plastové šňůrky přiváděné pomocí přitlačovací kladky, u tlustostěnných materiálů svar tvoří kladené housenky v určitém pořadí ve více vrstvách. Na obr. 2 je znázorněno schéma svařování horkým plynem. Svařovací rychlost je kolem $10\div 60 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Inertním plynem může být dusík, oxid uhličitý nebo pouze vzduch. Svařovací tlak je dán rozměrem přídavného drátu. Pro zlepšení této metody se používají rychlosvařovací nástavce (trysky), které se nasouvají na ústí svařovací pistole. Mají za úkol předehřát přídavný materiál, lze jej potom rychleji vkládat do svarové oblasti. Nevýhoda je, že každý průměr svařovací trubičky potřebuje vlastní nástavec. Proces se díky nástavcům zvětší na dvojnásobek až trojnásobek klasického svařování horkým plynem. Postup je vhodný zejména pro tlustostěnné materiály. Pevnost svaru se pohybuje od 50 do 70 % pevnosti základního materiálu, podle svařovaného materiálu a tvaru svaru.



Obr. 2 Svařování horkým plynem [1]

1.3.2 Svařování horkým tělesem [1], [8]

Svařování horkým tělesem je založeno na styku svařovaných dílů a ohřevu nástrojem při přenosu tepla kondukcí (vedením). Potřebné teplo je generováno většinou s použitím tepelných patron. Aby bylo nejefektivněji předáno teplo, metoda se aplikuje u materiálů, které mají co nejlepší tepelnou vodivost.

Svařovací plochy jsou nahřáty pomocí kontaktního nebo radiačního tepla a poté spojeny tlakem. Převažuje ohřev kontaktní. Jde o vícekrokový proces. Ohřev a následující svaření je časově oddělené. Svařované díly jsou zafixovány do loží a najíždí na elektricky zahřívávané tepelné těleso. V praxi tento proces svařování dělíme na fázi ohřevu, oddálení od tepelného tělesa a spojení svařovaných dílů, což je znázorněno na obr. 3. Nástroj bývá z hliníku, mědi nebo chromované oceli. Tepelné těleso je vytápěno elektricky, popřípadě plynem a pracovní plocha nástroje je opatřena separační látkou proti ulpívání materiálu.

Nejčastějšími typy pro svařování horkým tělesem je kontaktní (oblast běžných teplot – 180 °C až 270 °C), vysokoteplotní (maximálně do 400 °C) a radiční svařování (až do 600 °C, ohřev sáláním). Výhodou je lehce kontrolovatelný a jednoduchý proces, vysoká reprodukovatelnost. Svary vynikají vysokou pevností a nízkým vnitřním pnutím. Lze svařovat rozdílné termoplasty, které mají různé teploty tavení (za pomoci dvou topných těles). Nevýhodou je velký přetok materiálu, dlouhé svařovací časy, ulpívání zbytkového materiálu na topném tělese nebo vysoké náklady na energii.



Obr. 3 Schéma svařování horkým tělesem [1]

1.3.3 Svařování extruderem [1], [8]

Svařování extruderem spočívá ve vytlačování taveniny spojovacího materiálu mezi povrchy spojovaných dílů, které jsou horkým plynem ohřáty na svařovací teplotu. Svařuje se prostřednictvím přídavného materiálu druhově shodného se svařovaným dílem. Ten je kontinuálně vytlačován jako proud taveniny z extrudéru, viz obr. 4. Vytlačovací hubice je buď bez kontaktu se svařovanými povrchy (bezkontaktní extruzní svařování), nebo v kontaktu (kontaktní extruzní svařování).

Vytlačovací stroj má plastikační jednotku, což je vyhřívaný válec se šnekem či pístem, kde dochází k ohřevu přídavného materiálu. K vytlačování přídavného materiálu většinou dochází za pomoci přítlačné botičky (někdy přechování ruční) nebo je přímo ve stroji přítlačný válečkový systém.

Materiálem vstupujícím do extrudéru je plastový granulát nebo plastový drát (pásek), který vystupuje jako dokonale zplastifikovaný a homogenní. Pevnost svarových spojů je vyšší jak u metody svařování horkým vzduchem (90÷95 % pevnosti základního materiálu). Metoda vhodná pro zhotovení svarů u tlustostěnných materiálů jednohousenkovým svarem. Dále pro potrubí, konstrukce z desek nebo například pro opravy dílů z plastu u dopravních prostředků.



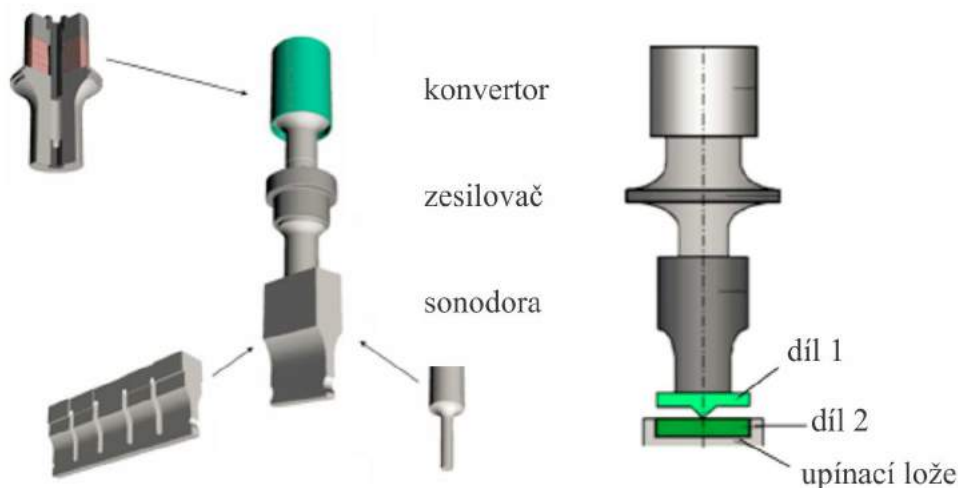
Obr. 4 Extruder [1]

1.3.4 Svařování ultrazvukem [1], [8], [23]

Svařování ultrazvukem lze definovat jako technologický postup, u kterého se tepelná energie potřebná k natažení styčných ploch vytváří přímo ve svařovaném materiálu. Jedná se o přeměnu vysokofrekvenční kmitavé energie na teplo. Princip vychází z kmitání elektrody (sonotrody) v oblasti ultrazvuku. Tyto kmity se přenáší na jednu ze svařovaných součástí. Nejintenzivněji dochází k pohlcování energie v nehomogenitách materiálu, což je rozhraní spojovaných dílů. Proto je vrst v tomto místě největší. Mohou také vznikat příčné vlny způsobující tření povrchu, což vede k ještě rychlejšímu ohřevu. Vzniká měkká vrstva, která sice zmenší koeficient tření mezi povrchy, ale sama intenzivně pohlcuje energii a dochází k mísení materiálu. Ultrazvukové svařování probíhá ve velmi krátkém čase a při nižších teplotách než ostatní svařovací metody. Na obr. 5 jsou naznačeny části ultrazvukové svářečky.

Zdrojem mechanické energie pro kmitavý pohyb je ultrazvukový generátor. Ultrazvukové svařování lze provádět v blízkém poli (kontaktní svařování) nebo v poli vzdáleném

od sonotrody (přenosové svařování). U měkkých materiálů (např. PE, PP, PA, PVC) se používá kontaktní svařování. Přenosové svařování je vhodné pro spojování tvrdých objemných dílců z termoplastů (např. PS, ABS, PMMA, PC) mající nízké tlumení ultrazvukových kmitů. Svarová pevnost závisí na energii kmitů a době jejich působení, na přítlačné síle a čistotě svarových ploch. Výhodou je malá spotřeba energie.



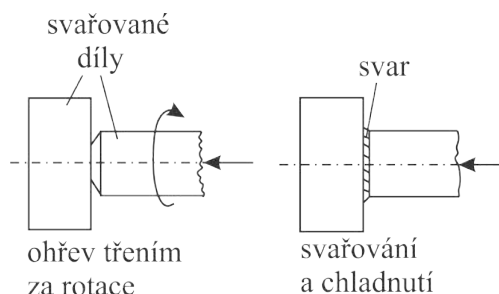
Obr. 5 Ultrazvuková svářečka. [1]

1.3.5 Svařování třením [1], [8]

Svařování třením probíhá za stálého styku spojovaných dílů. Nejčastěji jedna ze součástí rotuje a druhá je v klidu, tím vzniká teplo mezi nimi. Při tomto procesu se jedná o přeměnu mechanické energie v energii tepelnou. Stykové plochy se vlivem tření nataví na svařovací teplotu, materiál přestane rotovat a pod předepsaným tlakem dojde k požadovanému spojení a ochlazení spoje. Kolem svaru se vytvoří jemný otěr (přetok). Svařovací doba je velmi krátká, z důvodu nízké tepelné vodivosti plastů. Svary jsou dostatečně pevné a nepropustné.

Podmínkou je stejná třecí rychlost v celé ploše, aby se zamezilo velkým teplotním rozdílům, a tím způsobenému vnitřnímu pnutí svaru. Spojované součásti by měly být ze stejného materiálu nebo alespoň z materiálů s velmi podobnou teplotou tavení. Vhodné pro všechny termoplasty.

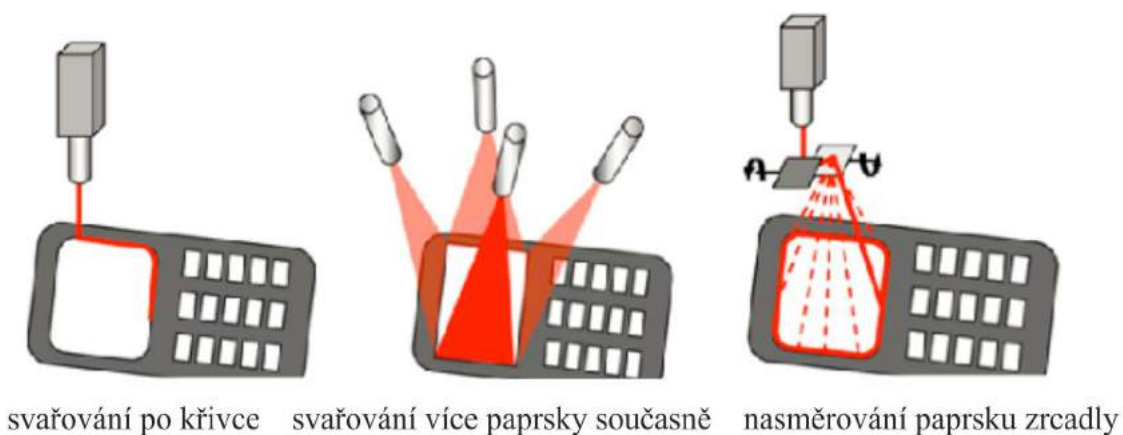
Podle provedení se metoda rozděluje na svařování rotační nebo vibrační. Při rotačním svařování lze použít pouze rotačně symetrické díly, nebo tyto díly přivařovat na rovné plochy, viz. schéma na obr. 6. Hodí se pro tenkostěnné rotační součásti. U vibračního svařování je také využíváno vzájemného tření ovšem oscilacemi (lineární nebo úhlové). Lineární se používají pro úzké a dlouhé díly s poměrem délek stran větším jak 1,5. Úhlové naopak slouží ke spojování kruhových, čtvercových či obdélníkových dílů s poměrem délek stran menším jak 1,5. Vibrační svařování je vhodné pro spojování větších dílů se svarem o ploše přes 100 cm².



Obr. 6 Svařování rotačním třením [1]

1.3.6 Svařování laserem [8], [23]

Svařování laserem je spojování materiálu pomocí paprsku laseru. Ohřev probíhá pomocí přeměny zářivé energie na teplo. Světelný paprsek dosahuje v místě zaostření pouze desetin milimetru. Takto tenký paprsek způsobuje vysokou hodnotu plošné hustoty dopadové energie. Pro zdroj záření se nejčastěji používají molekulární plynové lasery (např. CO₂). Laserové svařování je děleno se na průchozí a konturové (převážně diodový laser). Největší efektivity dosahuje svařování při spojování tenkých materiálů, např. fólií, kdy se dosahuje velkých pracovních rychlostí. Možnosti laserového svařování lze vidět na obr. 7. Podrobněji se technologií svařování plastů pomocí laseru zabývá následující kapitola.



Obr. 7 Možnosti laserového svařování [1]

2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ [7], [21]

Laserové svařování je nekonvenčním způsobem spojování a postupem času nahrazuje ostatní metody svařování. Pro jeho výhodné ekonomické využití je však nutná velkosériová produkce. Nejčastěji se používají CO₂ lasery, Nd:YAG lasery a v současnosti především diodové lasery.

Působením laserového paprsku, který má vysokou plošnou hustotu výkonu, dochází k rychlému místnímu ohřevu, tím pádem se nestíhají uplatňovat mechanismy sálání a vedení tepla. Celý proces svařování probíhá velmi rychle (ohřátí, natavení, spojení, ochlazení součásti), díky tomu je v okolí svaru získána velmi malá tepelně ovlivněná oblast i mnohem menší deformace. S ohledem na hustotu výkonu svazku jsou techniky laserového svařování děleny na kondukční, penetrační a keyhole, které se liší poměrem hloubky ku šířce svaru obr. 8.



Obr. 8 Techniky laserového svařování [7]

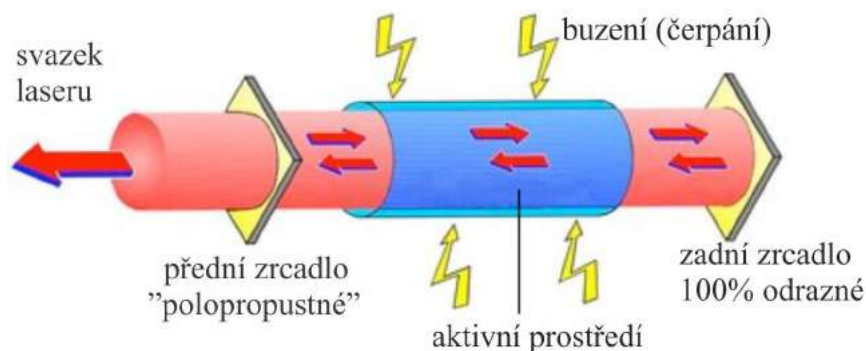
Technologie laserového svařování je svým uspořádáním svařenců (stykové nebo přeplátování) obdobná jako svařování kovů. Odlišná je však svojí podstatou, která spočívá v transparentnosti a absorpci plastů laserového svazku. Ideálním řešením je přeplátování, kdy vrchní díl je transparentní a spodní má absorpční funkci. Více je uvedeno v podkapitole propustné svařování.

2.1 Laser [3], [7], [11]

Název LASER je akronym vytvořený počátečními písmeny anglických slov „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což v překladu znamená „zesilování světla pomocí stimulované emise záření“. Obecně jde o optický zesilovač, který generuje elektromagnetické záření procesem stimulované emise fotonů. Teorií a technikou laserů se zabývá kvantová fyzika a termodynamika.

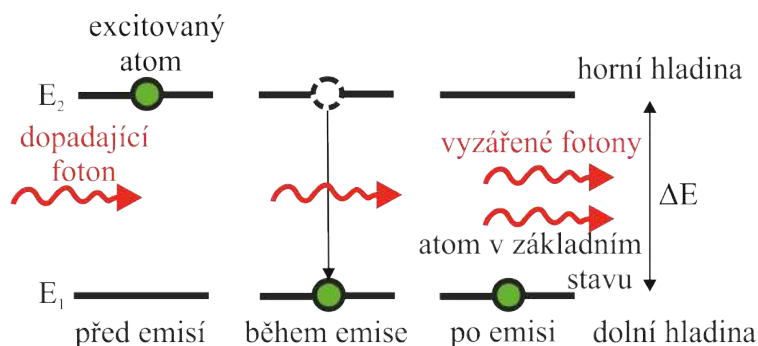
Laser je zdroj speciálního druhu světla, které se v přírodě nenachází. Svazek laseru se nerozsbíhá (je kolimovaný), monochromatický (generované fotony mají shodnou frekvenci, resp. vlnovou délku), je koherentní (generované fotony jsou v tzv. fázi časové i prostorové). Díky těmto vlastnostem nachází uplatnění v celé řadě oborů a rozvoj všech typů laserů je neobyčejně rychlý. V současné době se vyrábí lasery zahrnující širokou část spektra počínaje mikrovlnnou, přes infračervenou, viditelnou, ultrafialovou až rentgenové. Vlnové délky jsou v rozsahu od stovek mikrometrů až po jednotky nanometrů. Od doby svého vzniku se uplatnil například v medicíně, astronomii, chemii, biologii, metrologii, geodézii, spektroskopii, v energetice, ve vojenské technice, automatizaci atd. U průmyslových odvětví se využívá zejména z důvodu možnosti fokusace svazku do bodu a tím dosažení vysoké plošné hustoty energie.

Základem laseru je aktivní prostředí, které musí být nějakým způsobem buzeno (např. elektricky, opticky). Buzením dodáváme do systému energii, která se pomocí procesu stimulované emise projeví v podobě laserového svazku. Zapotřebí je ještě vytvořit tzv. optický rezonátor, který je obvykle tvořen odraznými zrcadly. Obecné schéma je znázorněno na obr. 9.

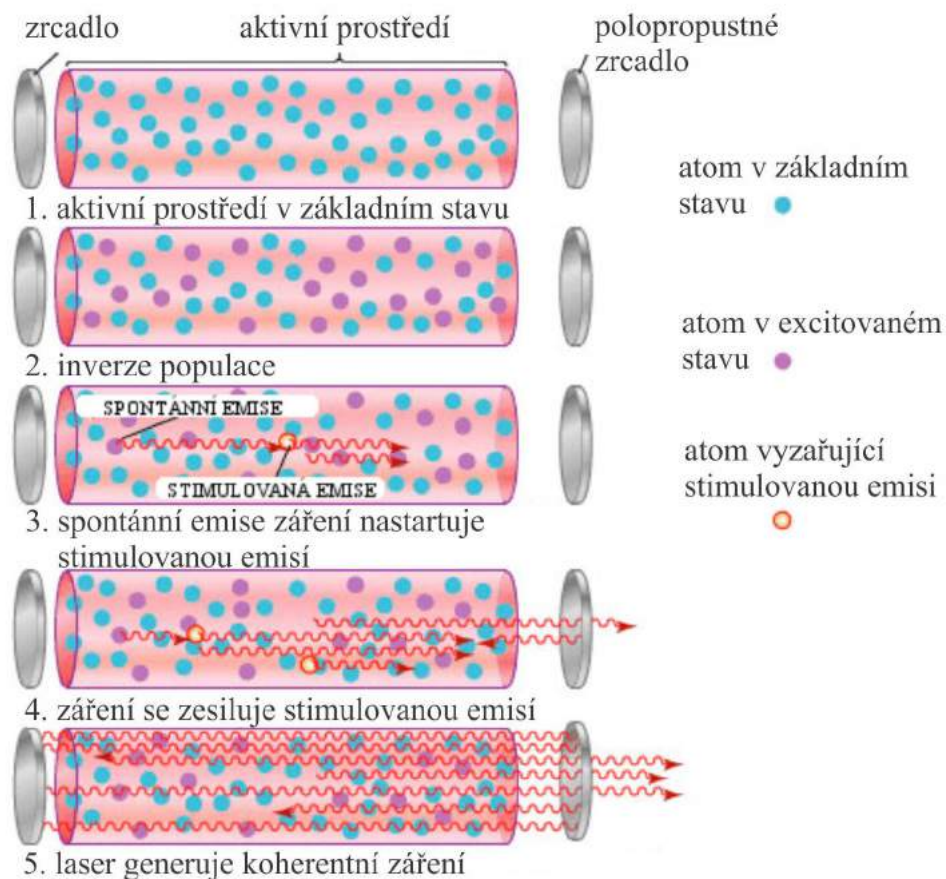


Obr. 9 Obecné schéma laseru [11]

Obecně aktivní prostředí vždy obsahuje element, který se nachází v základním stavu s nižší energií nebo je v excitovaném (vybuzeném) stavu s vyšší energií. Elementem bývá nejčastěji atom nebo to může být například vibrační stav molekuly, chemická vazba atd. Při přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu vyzařuje tento element foton. Zářivý přechod se děje sám od sebe a prostředí má snahu být ve stavu s co nejnižší energií, tzn. mít termodynamickou rovnováhu. Díky buzení tento stav přerušíme a aktivní prostředí je převedeno do excitovaného stavu. To znamená, že většina elementů je ve stavu s vyšší energií. V tuto chvíli se energie dodaná aktivnímu prostředí přemění na laserový svazek, tedy proud fotonů, pomocí stimulované emise obr. 10. Jde vlastně o lavinový efekt, kdy dopadající foton na excitovaný atom zapříčiní jeho přechod z horní energetické hladiny na dolní, přičemž dojde k emisi dalšího fotonu. Fotony tak putují rezonátorem od jednoho zrcadla ke druhému a jejich počet rychle vzrůstá, dochází k uvolnění energie ve formě proudu fotonů obr. 11.



Obr. 10 Proces stimulované emise [11]



Obr. 11 Uvolnění energie ve formě proudu fotonů [11]

Lasery se rozdělují dle různých hledisek:

- dle aktivního prostředí: pevnolátkové, kapalinové, plynové, diodové,
- dle druhu použité energie na buzení aktivního materiálu: optické, elektrické, chemické, termodynamické, s jadrovou energií,
- dle režimu práce: spojitý (kontinuální), pulzní,
- dle vyzařované vlnové délky: infračervené lasery, lasery v oblasti viditelného světla, ultrafialové, rentgenové.

2.2 Historie laseru [3]

Samotná historie laseru je datována od roku 1916, kdy Albert Einstein ve své práci ukázal, že kromě jevů jako jsou spontánní emise a absorpce, musí rovněž existovat stimulovaná emise.

K vytvoření prvního laseru přispěli někteří fyzici (R. Ladenburg, H. Kopferman, V. A. Fabrikant), když se zamýšleli nad možností, jak uměle vytvořit nerovnovážné a energeticky obohacené aktivní prostředí. V roce 1951 ruští fyzici získali patent na vytváření aktivního prostředí v plynovém výboji (V. A. Fabrikant, M. M. Vudynský, F. A. Butajevová).

První principiálně nový zdroj koherentního mikrovlnného záření byl vytvořen roku 1955 a nazýval se maser (což je zkratka Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation = kvantový generátor vysokých frekvencí, který pracuje v oblasti radiových vln na principu vynuceného záření). Autory byli ruští fyzici A. M. Prochorov, N. G. Basov a americký fyzik Ch. Townes, kteří obdrželi i Nobelovu cenu.

Americký fyzik T. Maiman v roce 1960 zkonstruoval první laser. Téhož roku vznikly první plynové a rubínové lasery. Koncem šedesátých let byly vyrobeny první světlovody a začala se využívat vláknová optika.

V Československu byl prvním zkonstruovaným laserem čpavkový laser, a to v Brně roku 1962. Brzy na to vznikly další lasery, např. v roce 1963 první laser s neodymovým sklem a též polovodičový laser. Tvůrcem nejvýkonnějšího plynového laseru (CO₂ laseru) se stal americký fyzik K. Patel (rok 1964).

Pokrok v aplikaci laserů byl podmíněn rychlým rozvojem pevnolátkových a plyných laserů. Obecně rozvoj všech typů laserů byl velmi rychlý. Postupem času se výkony zvětšovaly a velmi rychle narůstala energie impulzních laserů, stejně tak se zkracovaly vlnové délky až do dnešní podoby.

2.3 Typy laserů [13]

Jak už bylo zmíněno lasery se dělí podle různých kritérií. Mezi nejpoužívanější lasery se ale řadí hlavně plynový CO₂ laser, pevnolátkový Nd:YAG laser, vláknový laser nebo diodový laser. Výčet a porovnání nejpoužívanějších typů laserů je v následující tabulce 1.

Tab. 1 Porovnání typů laserů pro svařování plastů [13].

	Nd:YAG	CO ₂	Vláknový	Diodový
Vlnová délka [nm]	1064	10,6	1000÷2100	780÷980
Účinnost* [%]	3	10	20	30
Cena za 100 W	80	20	60	20
Kvalita paprsku**	vysoká	vysoká	vysoká	nízká

* Účinnost je procentní podíl elektrické energie spotřebované laserem.

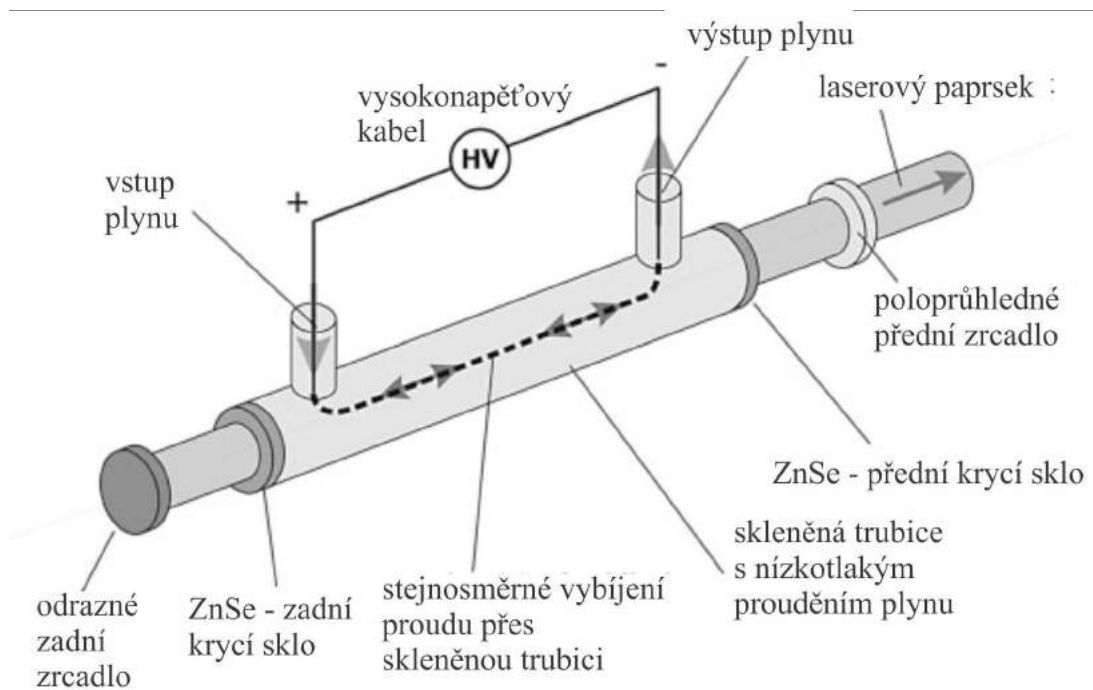
** Kvalita paprsku je schopnost zaměřit paprsek (zfokusovat) do bodu s vysokou hustotou energie.

2.3.1 CO₂ laser [3], [5]

CO₂ lasery patří k nejstarším typům laserů. Řadí se mezi plynové lasery, protože aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů. Prostor je buzen většinou elektricky. Plyny jsou buď statické, nebo mohou proudit a dosahovat tak vyšší efektivity (až dvojnásobku). Po určité době používání laseru je třeba plyn vyměnit, protože dochází ke změně koncentrace plynu a jeho vlastnosti už nejsou optimální. Aktivní prostředí je tvořeno oxidem uhličitým (CO₂ – 10÷20 %), heliem (He) a dusíkem (N₂), vodíkem (H₂) nebo xenonem (Xe). U jednotlivých typů CO₂ laserů se poměry a prvky plynů mohou lišit. Stimulovaná emise nastává pouze v molekulách CO₂. Schéma CO₂ laseru s pomalým průtokem plynu je naznačen na obr. 12.

Hlavními přednostmi CO₂ laserů jsou poměrně velká účinnost (10÷20 %), velký kontinuální výkon (až do desítek kW) a nízké pořizovací náklady vztahující se na jednotku výkonu.

Nevýhodou je velká vlnová délka (10,6 μm), následkem které dochází k velké reflexi paprsku a většímu rozměru stopy zfokusovaného paprsku. Vzhledem k velké vlnové délce neprojde paprsek optickým vláknem a do místa svaru musí být vedeno soustavou zrcadel. S tím je spojená nutnost údržby optiky pro vedení paprsku. Systém musí být chlazen.



Obr. 12 Princip CO₂ laseru s pomalým průtokem [13]

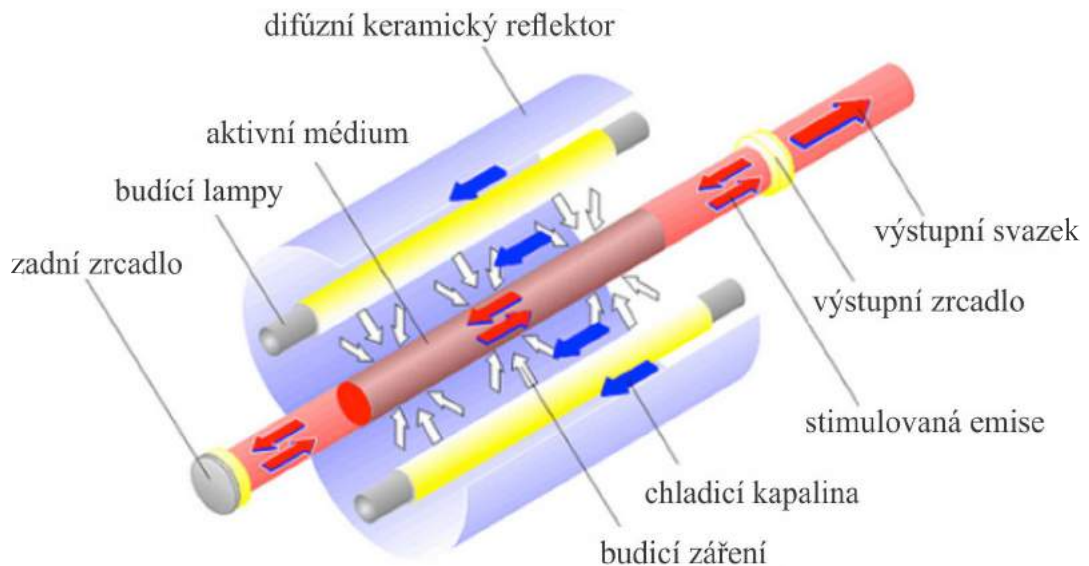
2.3.2 Nd: YAG lasery [3], [5], [18]

Nejrozšířenější pevnolátkový technologický laser na bázi krystalu Nd: YAG. Tento typ zařízení je schopný pulzního a kontinuálního provozu (do 6 kW). U pulzního režimu dosahuje výkonů kolem 10^9 W a při využití kaskádových zesilovačů i vyšších. Při provozu kontinuálním je prostředí buzeno kontinuálně-hořícími kryptonovými výbojkami (nebo diodami). Emituje světlo o vlnové délce $1,06 \mu\text{m}$. Laserové aktivní médium Neodymium je umístěné v pevném krystalu, zhotoveném z Yt-Al granátu, který je zformovaný do podoby válečku. Optické nabuzení v impulzních laserech všeobecně probíhá pomocí kryptonových zábleskových lamp, schéma viz obr. 13, v kontinuálních vysokovýkonných laserech (CW lasers) se používají kryptonové obloukové lampy.

Speciální výkonové prvky umožňují vyrobit impulzním Nd:YAG laserem vysokovýkonný impuls při nízkém průměrném výkonu (více než 15 násobek průměrného výkonu). Například takové lasery mohou pracovat s průměrným výkonem okolo 500 W a špičkové impulsy jsou asi 10 kW. Takto mohou být použité na svařování nebo řezání tlustých materiálů.

V automobilovém a elektronickém průmyslu, zvláště v polovodičích, se zpracovávají obrovská množství komponentů. Na jejich identifikaci se už běžně používá značkování laserovým paprskem. Vhodné jsou právě Nd:YAG lasery. Často složité značení je rychle přenesené (obvykle rychlostí značení víc než 150 znaků za sekundu) centrálním počítačem a vepsané na povrch komponentů, například i vevnitř konstrukce automobilu pomocí vláknové optiky svářecích hlavic.

Výhodou je možnost vedení světelného záření optickým vláknem, což je aplikováno zejména u robotizovaných a automatizovaných pracovišť. Mezi nevýhody Nd:YAG laseru patří vyšší pořizovací cena vztahovaná k hodnotě výkonu, špatná efektivita (velký příkon, nutnost chlazení) a krátká životnost (do 10 000 hodin).



Obr. 13 Lampami buzený Nd:YAG laser [10]

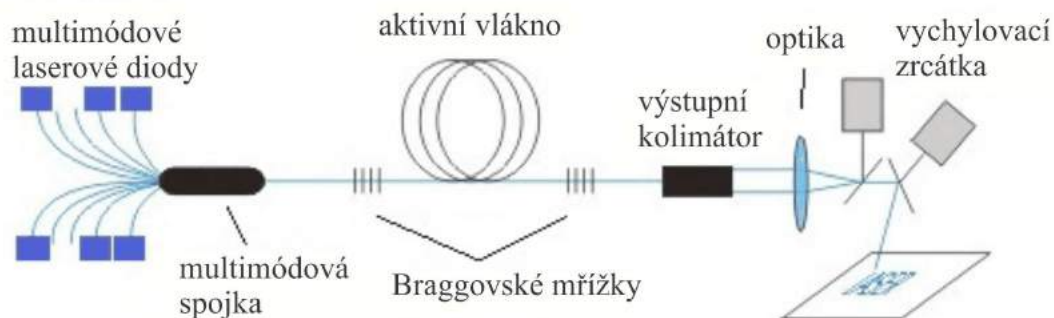
2.3.3 Vláknový laser [7], [10]

Vláknový laser (fibre laser) je nejmodernější a nejperspektivnější typ pevnolátkového laseru. Je schopný pracovat jak v režimu kontinuálním, tak i pulzním s vysokými frekvencemi až 200 kHz.

Aktivním prostředím je křemíkové vlákno, které má průměr jádra několik mikrometrů a délku několik metrů. Prostředí je dopované prvky vzácných zemin, což jsou erbium (Er), ytterbium (Yb) nebo thulium (Tm), které se při výrobě přimísí do jádra ve formě malých částic. Buzení probíhá z diod a je vedeno přes optickou spojku aktivního vlákna. Na optickém vlákne jsou vytvořeny struktury, tzv. Braggovské mřížky, které nahrazují zrcadla. Záření je potom z optického vlákna vyzařováno za pomoci optického kolimátoru viz obr. 14.

Velkou výhodou vláknového laseru je, že při vedení svazku z rezonátoru dalším vláknem nemusí být použito dalších citlivých optických prvků. Svazek je vysoce kvalitní a může se zfokusovat na velmi malý průměr. Maximální výkon jednoho vlákna je zhruba 200 W. Pro dosažení vyšších výkonů se aplikuje kombinace více vláken. Aktivní látka se tolik nezahřívá jako u jiných laserů, a to díky vysoké účinnosti čerpání 70 % až 80 %. Teplo se rozloží po celé délce vlákna, a proto nedochází k poškození nebo poklesu kvality svazku s teplotou. Chlazení probíhá většinou pomocí vzduchu nebo vody. Dalšími výhodami jsou vysoká životnost (až 100 000 hodin), nízké provozní náklady, nenáročnost na údržbu a malé prostorové nároky.

V současnosti jsou nejvýkonnějšími vláknovými lasery ytterbiové, jejichž výkon dosahuje několika desítek kilowatt (erbiové a thuliové lasery dosahují desetkrát nižších výkonů). Využívá se především pro bodové svařování.



Obr. 14 Princip vláknového laseru [10].

2.3.4 Diodový laser [7], [6]

Též nazývaný polovodičový laser je dnes jeden z nejdůležitějších laserových zdrojů pro průmyslové aplikace, k dispozici v širokém rozsahu vlnových délek od UV po IR záření s výkony laseru od mW až po několik kW.

Aktivním prostředím jsou polovodičové materiály jako např. GaAlAs nebo InGaAsP, které mají přímý vliv na vlnové délky laserového záření. Aktivace procesu pro generování laserové emise je provedeno aplikací elektrického proudu do polovodičových diod. Díky tomu má diodový laser vysokou účinnost (do 40 %).

Fabry-Perotův rezonátor se vytvoří z krystalu obsahujícího PN přechod. Krystal je opracován do tvaru hranolu a jeho čelní stěny jsou kolmé na přechod. Z PN přechodu, který má plochu řádově 10^{-6} mm^2 je emitováno záření ve viditelné červené a blízké infračervené oblasti, které se v rovině přechodu a s opakovanými odrazy zesiluje. Schéma laserové diody je zobrazeno na obr. 15. Výkon dosahuje jen několika miliwattů. Spojením řady laserových diod (délka řady několik mm – výkon 5÷20 W) do sloupců (až 600 W) a bloků získáváme laser požadovaného výkonu (až několik kW).

Z rezonátoru vystupující svazek má ve vertikálním i horizontálním směru různý profil idivergenci, viz obr. 16. V kolmé ose na PN přechod dosahuje divergence až 90 stupňů. Z toho důvodu se na stěnu bloku umisťují válcové mikročočky, z kterých už vystupují rovnoběžné svazky. Kvalita laserového paprsku je však mnohem nižší než u jiných laserových zdrojů, proto se používá především tam, kde není požadován úzký svazek a není nutné svazek fokusovat na malou plochu.

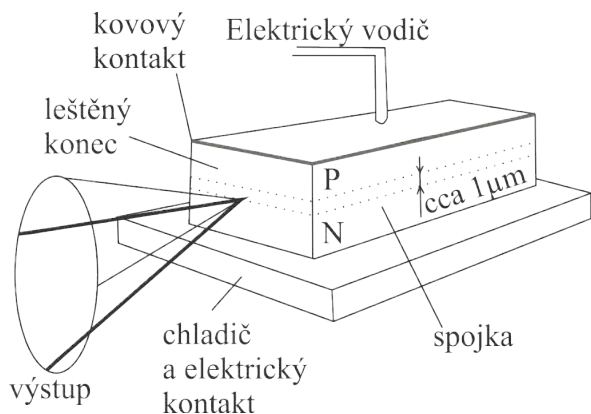
Záření diod může být vedeno pomocí optických vláken. Vlnovou délku určuje koncentrace legujících prvku v polovodiči. Nejčastějším typem je GaAs laser, který generuje záření s vlnovou délkou 808 nm, což se využívá na buzení Nd:YAG laserů. Dále se používají GaN, PbSnSe, AlGaInP, InAsSb lasery atd. Porovnání některých laserových diod je v tabulce 2.

Tab. 2 Porovnání vybraných laserových diod [7].

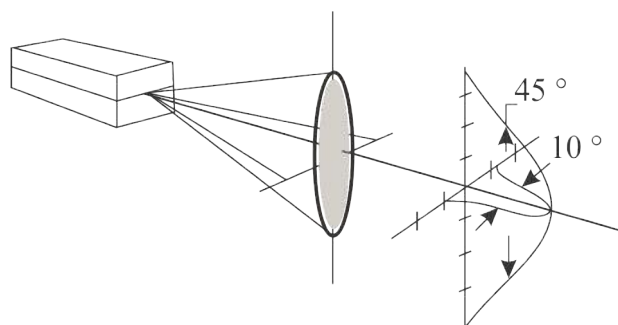
	vlnová délka [nm]	výkon [mW]	typické použití
GaAs	840	5	CD/DVD přehrávače, buzení pevnolátkových laserů
AlGaAs	760	50	laserové tiskárny
GaInAsP	1300	20	vláknové komunikace

Výhodou diodových laserů jsou jejich nízká hmotnost, kompaktnost a hlavně vysoká účinnost. Kompaktní rozměry diodových systémů umožňují umísťování laserů přímo na rameno robota, čehož se využívá při svařování tvarově složitých součástí v automobilovém průmyslu. Odpadá tak problematické vedení záření od zdroje k obrobku.

Díky širokému rozsahu výkonů jsou diodové lasery uplatňovány v různých oborech. Příkladem může být laserové zpracování povrchů, kontrola nečistot a vad při výrobě polovodičů, popisování a svařování, stereolitografie, optické čerpání pevnolátkových laserů, medicínské aplikace, v informačních technologiích pro přenos signálu na velké vzdálenosti přes skleněné vlákno, pro světelné zdroje CD/DVD a Blue Ray přehrávačů, v laserových tiskárnách atd.



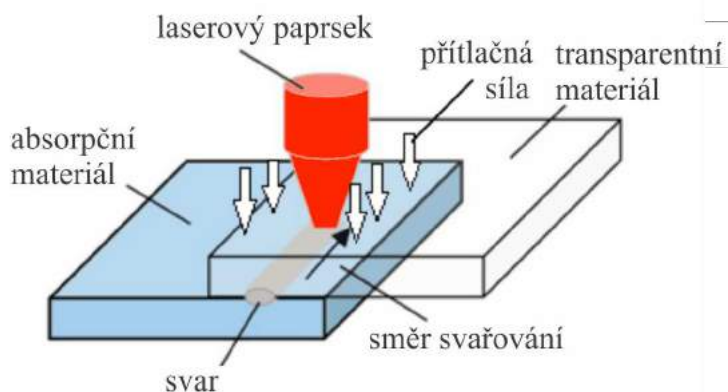
Obr. 15 Schéma laserové diody [7]



Obr. 16 Profil vystupujícího svazku [7]

2.4 Propustné svařování [2], [21]

Propustným nebo také transmisivním svařováním lze spojovat termoplasty s různými absorpčními vlastnostmi. Svařované součásti jsou před svařením v kontaktu, paprsek laseru projde bez reakce transparentním materiálem a je absorbován povrchem spodního dílu, kde dochází k přeměně v teplo potřebné pro natavení. Vedením tepla od spodního dílu se také ohřeje a plastifikuje transparentní díl a při určitém tlaku se obě součásti svaří. Takto vznikající teplo bude pomocí tepelné vodivosti transportováno do hlubších vrstev jak do absorpčního materiálu, tak do transparentního. Přítlačný tlak, který je potřebný k dosažení bezchybné kvality svaru bez deformace obou povrchů, musí být větší než tepelná roztažnost materiálů. Díky možnosti přesného vedení potřebné energie do svaru se nezatěžuje spojovaná oblast, což umožňuje svařovat i díly nacházející se v blízkosti citlivých elektronických prvků. Na druhou stranu se uplatňuje i u metrových délek svaru při jeho plošném i prostorovém průběhu. Schéma propustného svařování je zobrazeno na obr. 17.



Obr. 17 Princip propustného svařování [1]

Postupů provedení propustného svařování je hned několik. Časté je konturové neboli obrysově svařování, u kterého je možné vytvářet sváry prakticky jakékoliv geometrie. Princip spočívá v kopírování pomocí bodového laserového paprsku podél svařovací kontury, která je volně programovatelná. Jde o nejcitlivější metodu s minimální tepelnou zátěží okolí svaru.

Dalším a odlišným způsobem jsou simultánní a kvazi-simultánní postupy, které mají extrémně krátké časy svařování. Simultánním ozářením svaru je proces svařování ukončen přibližně do jedné sekundy. Vzhledem k tomu, že tento způsob vyžaduje speciální upořádání laserových diod s přizpůsobenou optikou je výhodný pouze u sériové výroby. U kvazi-simultánního postupu se fokusovaný laserový paprsek s vyšší energií pohybuje podél linie svaru velmi vysokou rychlostí, kterou dociluje v podstatě současného natavení celé kontury svaru.

Propustné svařování je metodou bezdotykovou s možností prakticky libovolné geometrie svaru. Jak už bylo zmíněno, nedochází k tepelnému ovlivnění okolí svaru a k žádnému mechanickému zatížení, spoje mají vysokou jakost, většinou i pevnost základního materiálu a nejsou pórovité.

2.5 Výhody a nevýhody laseru [3]

V následujícím textu jsou shrnuty výhody a nevýhody technologie svařování laserem.

Všeobecné přednosti laserů ve strojařské výrobě:

- lasery jsou adaptabilní – změna technologie nevyžaduje změnu nástroje,
- provoz je čistý, nevyžaduje se řezná kapalina, je to vlastně bezodpadová technologie,
- laser je nekontaktní nástroj, a proto odpadá pojem přímé opotřebování,
- provoz je tichý (hluboko pod hranici hluku),
- laserový svazek je možné dělit sérií speciálních zrcadel jedno laserové zařízení, více pracovišť,
- dosáhnou vysoké přesnosti laserem ozářené oblasti,
- malá tepelně ovlivněná oblast,
- technologický proces je možné robotizovat a automatizovat a možné zařadit do PVS (pružného výrobního systému),
- toxické látky (např. dělení PVC) je jednoduché odsávat, jiné zplodiny nejsou.

Nevýhody svařování pomocí laseru jsou:

- vysoká pořizovací cena,
- požadavky na kvalifikaci obsluhy,
- bezpečnostní opatření,
- velká energetická náročnost,
- malá účinnost – 10÷15 %.

3 PARAMETRY A PODMÍNKY SVAŘOVÁNÍ TERMOPLATŮ

Jak už bylo zmíněno svařují se pouze termoplasty splňující požadavky na svařitelnost. Reaktoplasty a elastomery není možné svařovat, proto se u nich využívá jiných metod spojování jako např. lepení nebo mechanické postupy spojování. Mechanické spojování se aplikuje také u termoplastů, a to u rozdílných typů plastů nebo mezi přechody plastového a kovového materiálu. Lepit lze jen některé termoplasty.

3.1 Základní parametry svařování [9]

Teplota, tlak a čas jsou hlavními parametry svařování. Vzájemně se musí přizpůsobit a brát zřetel na chemicko-fyzikální vlastnosti plastů, na druh svařovací technologie a podmínky prostředí.

- Teplota – různá podle druhu plastu nebo metody svařování. U materiálu PP má horké těleso při polyfúzním svařování teplotu 250÷270 °C, při svařování na tupo 200÷220 °C, u svařování horkým plynem s přídavným materiálem je plyn v rozmezí teplot 280÷330 °C.
- Tlak – vždy působí na spojovaných plochách svařovaných dílců. U ručních metod je přítlak tvořen ručně svářečem. U strojních postupů je tlak dosažen mechanicky přes tlačné pružiny, soustavou pák, hydraulikou strojů nebo pneumaticky. Při některých metodách svařování je konstrukčně tvořena podpora pro vytvoření tlaku na svařovaných plochách.
- Čas – je ovlivněn metodou svařování a někdy je přesně vymezen. Pro polyfúzní svařování a svařování na tupo je čas přesně dán pro jednotlivé fáze. Na druhou stranu při svařování horkým plynem je čas odvozen od rychlosti svářeče, který ji sám určuje.

3.2 Podmínky svařování [9]

Kvalitu svarových spojů ovlivňují vedle splnění svařovacích parametrů také postup svařování, vlastnosti materiálu a podmínky prostředí.

3.2.1 Vlastnosti materiálů [9]

- Velká tepelná roztažnost plastů – následkem je smršťování při ochlazování. Vnikají tím v oblasti svaru zbytková pnutí, která jsou ještě zesilovaná zbytkovým pnutím způsobeným výrobou polotovaru.
- Malá tepelná vodivost – dostatečná plastifikace svařovaných ploch probíhá v materiálu pomalu. Přizpůsobují se tomu čas ohřevu a nahřívací teploty. Při příliš vysokých teplotách dochází k tepelnému poškození svařovaných povrchů a k dostatečně hluboké plastifikaci nedojde.

3.2.2 Okolní prostředí [9]

Posuzují se podmínky okolního prostředí zvláště při venkovních svařovacích pracích. Uvažuje se teplota, pohyb a vlhkost vzduchu, srážky a působení slunce.

3.2.3 Čistota [9]

Podstatnou složkou je čistota nástrojů, svarových ploch a svařovacích topných elementů. Plochy pro svařování je důležité důkladně očistit a chemicky odmastit. Prostředky k odmaštění nesmí narušit strukturu plastu a nejsou při nominálních teplotách prostředí hydrofobické, aby se vyloučilo ulpívání jejich zbytků ve spoji.

Vhodnou pomůckou k čištění je nebarevný papír, který nepouští vlákna. Textilní materiály jsou nevhodné, jejich použití je však možné pro odstranění hrubých nečistot před dalším

čištěním. Uplatňují se prostředky jako isopropylalkohol, čisticí prostředek Tangit, nebo speciální ubrusky v ochranné fólii. Technický lih není vhodný, jelikož na materiálu zanechává stopy.

3.2.4 Další vlivy stanovující kvalitu svaru [9]

Vlivy mající přímý nebo nepřímý dopad na kvalitu svaru:

- správná volba svařovací metody,
- geometrie svaru s ohledem na druh styku, tloušťku materiálu a svařovací postup,
- mechanická zátěž svarů po svařování,
- konstrukce svaru.

3.3 Svařitelnost materiálů [9], [23]

Zpravidla lze svařovat pouze termoplasty stejného druhu a typu, tzn. mají stejnou chemicko-fyzikální strukturu. Důvodem jsou různé teploty tavení a odlišné tokové vlastnosti materiálu. Existují však výjimky např. svařování PVC-U s PMMA. Svařitelnost dělíme na:

- zaručenou – spojují se stejné druhy a typy materiálů se shodným nebo podobným indexem toku taveniny, např. PE-HD s PE-HD, PP-R s PP-R.
- podmíněnou – spojují se stejné druhy, ale jiné typy materiálu, např. PP-H s PP-R, PE-MD s PE-HD nebo PVC-U s extrudovaným PMMA. Podmínkou vzájemné svařitelnosti je např. potvrzení od výrobce na základě indexu toku, nebo provedenými zkouškami.

Vhodností materiálů ke svařování se zabývá směrnice, která zpracovateli termoplastu nařizuje orientační přezkoušení vzájemné kombinace polotovarů nebo přídavných materiálů. Zkouškami má být zabráněno záměnám materiálů a rozpoznávají se eventuální změny, které mohou být způsobeny dopravou a meziskladováním, stavy vnitřního pnutí vzniklé zpracováním nebo vlivy při provozu, popř. stárnutím. Materiál se kontroluje především před provedením opravných svarů a v případě, že existují pochybnosti o jeho identitě. Sleduje se přítomnost pórů či jemných trhlinek, struktura a zabarvení. Vhodnými pomůckami se seškrábe materiál do hloubky, kde není poškozen, přitom se prokáže hloubka změn ve svařovaném dílci. Je-li poškození hluboko, je žádoucí další kontrola v řezu nebo kontrola pomocí jiných zkoušek (chemicko-fyzikálním rozbořením, ultrazvukem atd.). V tabulce 3 jsou uvedeny příklady vybraných plastů a názorně určena jejich vzájemná svařitelnost, kde 1 – znamená velmi dobře svařitelné, 2 – svařitelné, 3 – podmíněně svařitelné, 4 – nesvařitelné.

Tab. 3 Vzájemná svařitelnost některých vybraných plastů [23].

	PMMA	PVC	PS	ABS	PE-HD	PP
PMMA	1	1	1	1	4	4
PVC	1	1	4	2	4	4
PS	1	4	1	1	3	4
ABS	1	2	1	1	4	4
PE-HD	4	4	3	4	1	2
PP	4	4	4	4	2	1

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato část bakalářské práce obsahuje vyhodnocení vzhledu svaru na vzorcích, které jsou vzorky zkušebními a v této fázi nejsou určeny pro sériovou výrobu, nýbrž jsou ve stádiu testování vyhovujících parametrů a podmínek.

4.1 Parametry svařovacího zařízení [3], [5]

Pro zkoušený vzorek byl použit diodový laser typu LIMO60-F400-DL980-S2050 viz obr. 18. Laser je v hermeticky uzavřeném obale a má vyměnitelná ochranná okna. V tabulce 4 jsou uvedeny technické parametry tohoto laseru.

Tab. 4 Parametry diodového laseru LIMO60-F400-DL980-S2050 [19].

Optické údaje	
CW – jmenovitý výstupní výkon	60 W
Vlnová délka	980 ± 10 nm
Spektrální šířka	5 nm
Posun vlnové délky v závislosti na teplotě vlákna	0,4 nm/K
Teplotní provozní podmínky	
Jmenovitá teplota diody	25 °C
Rozsah provozních teplot	+15÷30 °C
Minimální kapacita chladiče	110 W
Elektrické údaje	
Max. provozní proud na začátku života	80 A
Max. provozní proud na konci života	96 A
Typická prahová hodnota proudu	8 A
Typické provozní napětí	2 V
Typický spád	0,8 W/A
Účinnost	44 %
Vlákno	
Průměr jádra vlákna	400 μm
Numerická clona	0,22
Typ optického konektoru	SMA
Kompaktní skříň	
Rozměry	111x25x37 mm ³
Základní váha	0,35 kg
Teplota okolí	-20÷60 °C
Paprsek	
Výstupní výkon (minimální)	0,7 mW
Vlnová délka	650 nm
Napětí	3,3 V
Proud (maximální)	25 mA

CW = režim spojitě vlny



Obr. 18 Diodový laser LIMO60-F400-DL980-S2050 [19]

Všechny uvedené parametry ovlivňují kvalitu svaru. Jde o výkonové parametry, parametry fokusačního systému i pomocné parametry. Geometrie svaru, tj. hloubka a šířka svaru závisí ve velké míře na všech parametrech laserového svařování. Optimální poměr pro hluboký průvar je poměr hloubky ku šířce, který by měl být daleko větší než jedna. V následujících bodech je stručný popis některých parametrů.

- Výkon laserového paprsku je teplotní parametr vyjadřující vliv laserového paprsku na materiál. U laserové technologie pod výkonem chápeme záření zaměřené do fokusačního systému. Každý druh laseru může mít jinou optimální hodnotu výkonu potřebného na svařování. Výkon laserového záření má vliv na formování svaru a na schopnost protavení.
- Rychlost svařování udává dráhu vykonanou zdrojem ohřevu v dotyku s materiálem za jednotku času. Při konstantním výkonu rychlost svařování charakterizuje množství dodané energie do materiálu. Rychlost svařování ovlivňuje rozložení teploty v materiálu. Také do značné míry ovlivňuje geometrii svaru, strukturu, vlastnosti a chemické složení materiálu v teplem ovlivněné oblasti.
- Parametry fokusačního systému jsou charakterizovány uspořádáním čoček nebo objektivu, průměrem zfokusovaného paprsku, konstrukcí fokusačního systému či divergencí paprsku.
- Divergence paprsku nebo také rozbíhavost je charakterizovaná fokusačním systémem. Výrazně ovlivňuje velikost stopy zfokusovaného paprsku, a tím i hustotu energie v ohnisku. Je cílem používat laser, který má co nejmenší divergenci paprsku.
- Vlnová délka, čím je kratší, tím lze dosáhnout vyšší přesnosti. Je tedy snaha používat lasery, které mají co nejkratší vlnovou délku emitovaného záření.
- Hustota výkonu je významný parametr při svařování jakéhokoliv materiálu. Charakterizuje se působícím výkonem paprsku na plochu.
- Doprovodné parametry (druh ochranného plynu a jeho průtok, dodaná energie vyjádřená na jednotku délky).

4.2 Zkušební vzorky

Pro vyhodnocení svaru byly použity zkušební vzorky zadních světil automobilu, obr. 19. Tyto vzorky jsou ze dvou různých materiálů – transparentního a absorpčního termoplastu. Pro absorpční plast byl použit polykarbonát, který se do výroby dodává jako barvený granulát. Oba díly pro světlomet, využívány pro rozbor svaru, jsou vyráběny na vstřikovacích lisech vstříkáváním roztaveného granulátu do přesných forem. Příklad hodnoceného svaru je na obr. 20.



Obr. 19 Zkušební vzorky



Obr. 20 Příklad hodnoceného svaru

4.2.1 Materiály vzorku [1], [15]

Zkušební vzorek je zhotoven z následujících dvou materiálů.

Polykarbonát (PC)

Dokonale průhledný, amorfni termoplast mající dobré mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v tab. 5. Polykarbonát je pevný, má dobrou tuhost, tvrdost i houževnatost a je odolný vůči lomu. Vyznačuje se dlouhodobou tepelnou stálostí až do 135 °C, velmi dobrými elektroizolačními a dielektrickými vlastnostmi. Řadí se k samozhášivým plastům.

Polykarbonát se díky kvalitním optickým vlastnostem používá u výroby čoček fotoaparátů, pro brýlová skla, střešní i zadní okna automobilů (většinou doplněn tenkou vrstvou methakrylátu, který zvyšuje odolnost proti UV záření). Další využití je u zadních „skel“ reflektorů nebo například u nárazníků a ochranných štítů motocyklů.

Tab. 5 Typické vlastnosti PC [1].

Hustota [g/cm ³]	Teplota zesklenní [°C]	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Navlhavost [%]
1,2	150	2100÷2400	56÷67	0,1÷0,2

Polykarbonát lze vyrábět i jako neprůhledný se stejnými vlastnostmi jako má PC průhledný. K dispozici je ve všech možných barvách a s různými povrchovými úpravami, jako například lakování, pokovování. Velmi dobře se hodí pro obrábění, ohýbání nebo tepelné tvarování.

Polymethylmethakrylát (PMMA)

Známý také jako organické sklo nebo plexisklo užívané v obchodním označení. Jde o amorfni termoplast mající dokonalou propustnost světla (až 92 %). Je to konstrukční plast s částečnou navlhavostí a oproti PC má zhoršené elektroizolační a dielektrické vlastnosti. Vůči silným kyselinám a rozpouštědlům je méně odolný. Mezi klady patří dobrá odolnost proti povětrnostním vlivům a UV záření. Dlouhodobá teplotní odolnost je až 100 °C. Za běžných podmínek je křehký a málo odolný proti rázům. Typické vlastnosti PMMA jsou uvedeny v tab. 6.

PMMA se používá pro optické aplikace, jako jsou například kryty svítidel, skla verand, okna sportovních letadel. V automobilovém průmyslu se z něj vyrábí kryty koncových světel nebo ochranné lišty pro zadní nárazníky. Ve stavebnictví tento druh materiál můžeme použít pro střechy výrobních hal nebo pro protihlukové stěny. Pomocí litého PMMA se též vyrábí vany.

Tab. 6 Typické vlastnosti PMMA [1].

Hustota [g/cm ³]	Teplota zesklenní [°C]	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Navlhavost [%]
1,17÷1,2	110	2700÷3200	50÷77	0,2÷0,4

4.2.2 Způsoby kontroly svarových spojů [24]

Hodnocení svarových spojů lze dělit na destruktivní a nedestruktivní. Mezi destruktivní zkoušky se řadí tahová zkouška, rázová tahová zkouška nebo například zkouška ohybem. Nedestruktivní zkoušky probíhají bez porušení svarových spojů, což znamená, že lze provést bez znehodnocení i na finálním výrobku. Hlavní nedestruktivní zkouškou je kontrola vizuální. Hodnotí se zejména vzhled svaru, výronky taveniny, znatelné praskliny, barevné změny, vzduchové bubliny nebo vruby, viditelné okrajové pásy podél svaru, jež jsou znakem chybně provedeného svaru. Další možností nedestruktivní kontroly je zkoušení rentgenem, ultrazvukem, přetlakem, podtlakem nebo např. vysokým napětím (jiskrová zkouška).

4.2.3 Postup přípravy zkušebních vzorků

Svary byly nejprve nafoceny vcelku přes transparentní vrstvu pomocí stereomikroskopu typu SSM-EE, z kterého byla data exportována do programu DinoCapture 2.0. U každého vzorku se v programu obrýsovala viditelná část svaru a díky uzavřené oblasti software DinoCapture 2.0 vypočítal celkovou plochu spojeného materiálu. Poté se vzorek příčně rozřezal v místech svarů a obrousil jemným brusným kotoučem pod proudem vody. Tyto rozřezané části svaru byly opět vyfoceny, tentokrát z bočního pohledu.

4.3 Vyhodnocení vad vizuální zkouškou

Pro uvedený diodový laser a kombinaci materiálů neprůhledný PC a čirý PMMA byla dodavatelem laseru doporučena geometrie svaru na zkoušeném vzorku. Parametry svaru jsou uvedeny v tabulce 7 a jeho vzhled na obrázku 21. Tento svar se však nemusí shodovat se svary na zkoušeném vzorku.

Tab. 7 Parametry svaru doporučené výrobcem laseru.

Délka svaru	12 ± 1 mm
Šířka	$1,6 \pm 0,2$ mm
Přenos	> 90 %
Pracovní vzdálenost	175 ± 10 mm



Obr. 21 Vzhled svaru doporučený výrobcem

V následujících tabulkách jsou uvedeny rozměry a stručný popis vad ve svarech, které byly hodnoceny vizuální kontrolou. U prvního vzorku svaru (viz. tabulka 8) je vysoká pórovitost hlavně v prostřední části levé strany. Tato vada může být způsobena špatně zvolenou přitlačnou silou, nevhodně nastaveným výkonem a zvoleným svařovacím časem. Velké bubliny v pravé části svaru poukazují opět na nevhodně zvolený výkon nebo čas svařování. V minimálním množství (1 až 2) jsou bubliny ve svaru přípustné a nepovažujeme je za vadu, protože neovlivňují pevnost svaru.

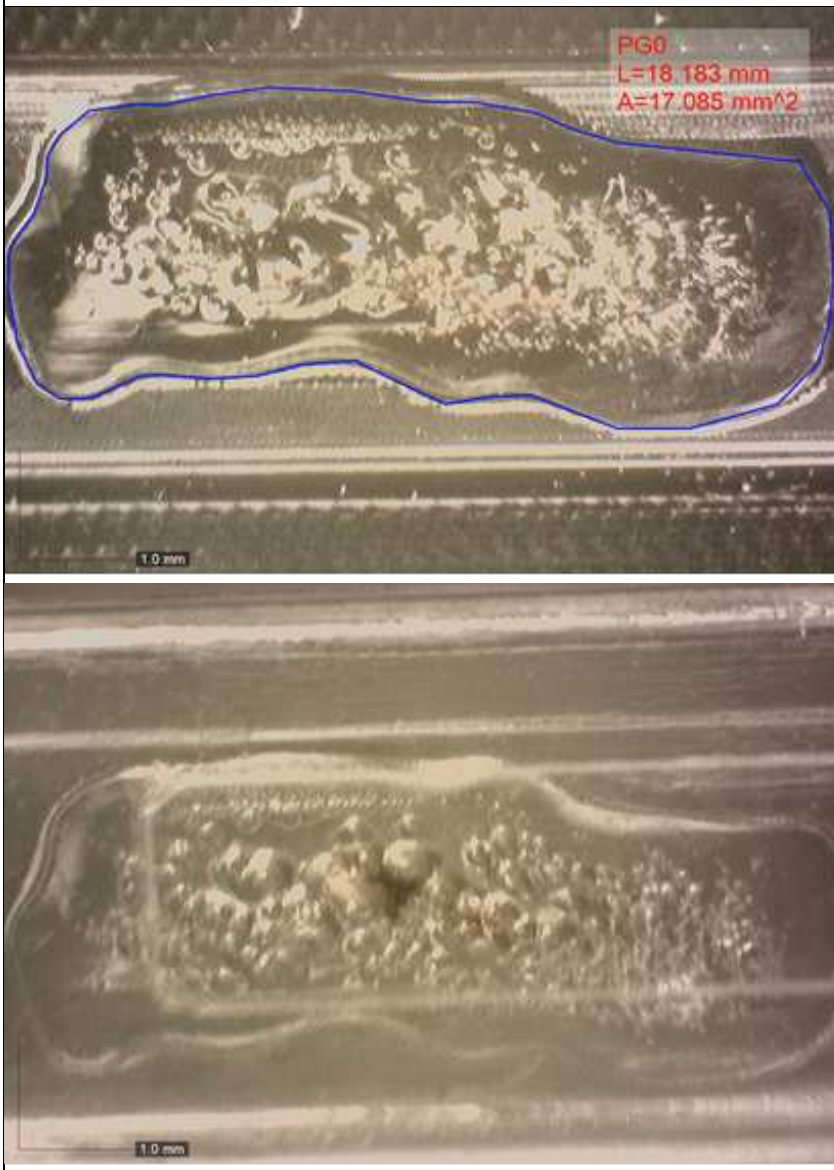
Vzorek svaru č. 2 (tabulka 8) má v levé prostřední části velký výskyt bublin, což opět znamená špatnou volbu svařovacího výkonu a času.

Tab. 8 Vyhodnocení vad svarů č. 1 a č. 2.

1. svar	
<p>Plocha svaru: 21,59 mm² Šířka svaru: 2,549 mm Délka svaru: 8,47 mm</p>	<p>Vady: vysoká pórovitost v levé části, 2 bubliny v pravé části svaru</p>
2. svar	
<p>Plocha svaru: 17,93 mm² Šířka svaru: 2,21 mm Délka svaru: 8,11 mm</p>	<p>Vady: bubliny a pórovitost v levé části svaru, v pravé části svaru příčná trhlina</p>

Svar číslo 3 je zobrazený v tabulce 9 dopadl nejhůře. Pórovitost po celé ploše způsobila, že se materiály důkladně nespojily a součásti byly rozpojeny mírným tlakem ruky. Z tohoto důvodu jsou v tabulce 9 uvedeny dva obrázky. Vrchní obrázek ukazuje část svaru na černém PC, spodní snímek druhou část na transparentním PMMA. Vzniklá pórovitost může být zapříčiněna malým přitlakem při svařování nebo nevhodnou volbou svařovacího výkonu a času. Vzhled odtrhnutých svarů na černém PC je ukázán v příkladech na obr. 22, kde je vidět, že svary nejsou důkladně provařeny, jejich umístění je mimo předem určený vystouplý rámeček.

Tab. 9 Vyhodnocení vad svaru č.3.


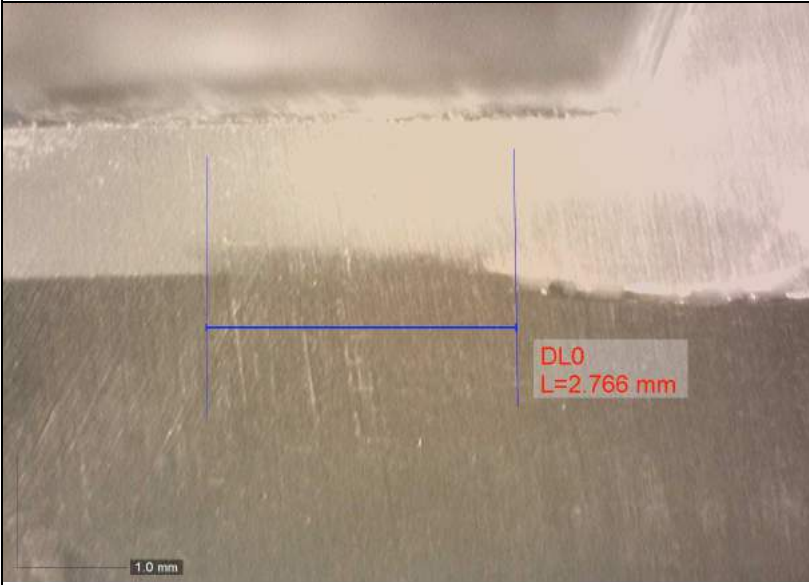
3. svar	
	
<p>Plocha svaru: 18,18 mm² Šířka svaru: 2,43 mm Délka svaru: 7,47 mm</p>	<p>Vady: velká pórovitost po celé ploše, propadlý svar v absorpčním materiálu (PC)</p>



Obr. 22 Vadné vylomené svary

Tabulka 10 zobrazuje snímky průvarů zkoušeného vzorku. Jde tedy o příčně rozříznuté svary. U svaru č. 4 je vidět pórovitost, popřípadě bubliny. Průřez svaru č. 5 má dostatečný průvar a jeví se bez viditelných vad. Je zde i vidět vzájemné promísení materiálů, což zaručuje pevnost.

Tab. 10 vyhodnocení průvaru na svarech č. 4 a č. 5.

4. svar

Šířka svaru: 2,926 mm
5. svar

Šířka svaru: 2,766 mm

Makrosnímky byly vyhotoveny se zvětšením 60x. Při zachycování prvních dvou snímků musel být obraz rozdělen na dvě části, z důvodu dostatečné ostroty a viditelnosti vad.

Vzorky byly svařovány stejným laserem, při stejných svařovacích podmínkách tudíž mají podobné vady. Vzduchové bubliny, které se vyskytovaly u vzorků nejčastěji, jsou důsledkem vnesení nadbytku teplené energie, tedy vysokým výkonem. Další příčinou vad může být nesprávně zvolený svařovací čas a nedostatečná přitlačná síla vytvářená na svařované materiály. Všechny tyto svary byly vyhodnoceny jako vadné a nevyhovující. Pro zlepšení svaru tedy doporučuji zmenšit dodávaný výkon, zkrátit svařovací čas a optimalizovat přitlačnou sílu. Dalším návrhem je zpřesnění fokusace paprsku na místo výstupku, který je svou geometrií určen pro svar. Klíčová je i čistota v místě budoucího svaru. Z předchozích výrobních operací se do tohoto místa může naprášit materiál určený k pokovování ostatních

částí polotovaru. Toho je třeba se vyvarovat a zajistit, aby se do svařované oblasti nedostaly nečistoty.

Nejdůležitější proměnné určující kvalitu svaru jsou však výkon, čas a tlak. Tyto parametry bude nutné měnit a zkoušet na dalších zkušebních vzorcích do doby, než bude dosaženo požadovaného vzhledu svaru jako je ukázáno na obr. 23. Poté se takto nastavený laser bude moci zařadit do sériové výroby.



Obr. 23 Příklad požadovaného vzhledu svaru

5 ZÁVĚRY

Bakalářská práce ve své první části obsahuje stručný popis metod, které se v současné době využívají pro svařování termoplastů. Hlavní zaměření je na technologii laserového svařování plastů a její podrobnější popis. V dnešní době se začínají čím dál více prosazovat lasery diodové, u kterých je hlavní výhodou jejich kompatibilitnost a malá hmotnost, čehož se využívá zejména v automobilovém průmyslu při upevňování laseru na rameno robota. Kvalita laserového paprsku je však mnohem nižší než u ostatních typů laserů.

Experimentální část předkládá analýzu svaru na vzorcích pomocí vizuální kontroly provedené na termoplastickém materiálu. Vzorek byl svařen pomocí diodového laseru, který je přizpůsoben pro svařování plastů. Šlo o svařování průvarem přes transparentní materiál, což znamená, že paprsek laseru prostupoval čirým plastem do místa určeného pro budoucí svar. Pod transparentním materiálem byl nepropustný černý polykarbonát, který je schopný absorbovat energii laseru. Energie paprsku laseru se transformovala v teplo, které natavilo materiál. Poté došlo k vzájemnému spojení, tedy svaření.

Obrazová analýza byla možná díky makroskopickému zvětšení pomocí příslušného stereomikroskopu. Díky tomu byly viditelné vady, které by pouhým okem nebyly zřejmé. Většina vybraných vzorků byla vyhodnocena jako vadná, především z toho důvodu, že šlo o zkušební vzorky, které jsou ve fázi zkoušení pro sériovou výrobu. Vady byly zejména v podobě vzduchových bublin a pórů, což je následkem vysokého výkonu dodávaného do paprsku nebo nevhodně zvoleným svařovacím časem a tlakem. Doporučením je snižovat výkon po 5 W, zkracovat čas po 0,2÷0,3 sekundách a v neposlední řadě zohlednit přítlačnou sílu. A to za předpokladu, že při nižším výkonu a čase nedojde k přehřátí taveniny plastu, tudíž se nebude vytvářet nežádoucí pórovitost. Po úpravách svařovacích parametrů bude možné proces uplatnit v sériové výrobě.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [4]

1. AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. Svitavy: Publi, 2016 [cit. 2017-04-27]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Cover.html>
2. BARTOŠ, Václav. *Optimalizace svařovacích parametrů pro technologii svařování laserem u vybraných termoplastů*. Zlín, 2009. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Libuše Sýkorová.
3. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 8022714259.
4. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
5. KEPPRT, Martin. *Technické aspekty svařování termoplastů laserem*. Ostrava, 2014, 92 s. Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie. Vedoucí práce Ochodek Vladislav.
6. KLEIN, Rolf. *Laser welding of plastics*. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. ISBN 9783527636983.
7. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. ISBN 9788087240656.
8. LENFELD, Petr. Doplnkové technologie pro zpracování plastů. *Technologie II* [online]. Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie, Oddělení tváření kovů a plastů. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm
9. LOYDA, Miloslav. *Svařování termoplastů*. Praha: Uno, 2001. ISBN 8023866036.
10. NOVÁK, Miroslav. Seriál na téma lasery: Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Lao: Lasery a optika* [online]. 2011 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
11. NOVÁK, Miroslav. Seriál na téma lasery: Základní princip laseru a jejich dělení. *Lao: Lasery a optika* [online]. 2011 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
12. SOVA, Miloš a Josef KREBS. *Termoplasty v praxi*. 2001. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. ISBN 8086229157.
13. TROUGHTON, Michael John. *Handbook of plastics joining: a practical guide*. 2nd ed. Cambridge, UK: TWI/The Welding Institute, c2008. ISBN 9780815515814.
14. TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvarania*. Bratislava: Alfa, 1989. ISBN 8005000979.
15. Arla. *Neprůhledný polykarbonát* [online]. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://www.arlaplast.com/cs/products/polycarbonate-opaque/>

16. Leonardo technology vytváří laserové robotické stanice s roboty KUKA. *Technika a trh: průvodce světem průmyslu* [online]. 2015 [cit. 2017-05-07].
Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/komponenty/leonardo-technology-vytvari-laserove-roboticke-stanice-s-roboty-kuka>
17. *Technický týdeník: list podnikavých techniků a technických podnikatelů*. Praha: Bussiness Media CZ, 2017, 65(5). ISSN 00401064.
18. Lasery pro průmysl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. MM publishing, 2008, (7) [cit. 2017-04-30]. ISSN 1212-2572.
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
19. Fiber-Coupled Diode Laser Modules. *Limo: Lissotschenko Mikrooptik* [online]. Německo, 2016 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <https://www.limo.de/en/products-and-solutions/diodenlasermodule/fiber-coupled-diode-lasers>
20. Lintech, s.r.o.: Laserové technologie a průmyslové značení. *Ověřená značka* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.overena-znacka.cz/clanky-lintech-laserove-technologie-a-prumyslove-znaceni.html>
21. Svařování termoplastů laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2003, (10) [cit. 2017-04-27]. ISSN 1212-2572.
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-termoplastu-laserem.html>
22. Nové nafukovací hračky. *Fatra: Plasty pro lepší život* [online]. 2012 [cit. 2017-05-07].
Dostupné z: <http://www.fatra.cz/nove-nafukovaci-hracky/>
23. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 8085771810.
24. Projiskřovací a zkušební přístroje: Zkušební postupy svarových spojů. *TITAN – MULTIPLAST* [online]. [cit. 2017-04-30].
Dostupné z: <https://www.titan-multiplast.cz/produkty/pristroje-pro-kontrolu-svaru-56>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda
ABS	akrylonitril – butadien – styren
Ag	stříbro
Al	hliník
As	arsen
CO ₂	oxid uhličitý
Ga	gallium
H ₂	vodík
He	helium
In	indium
IR	infračervené záření
N	dusík
PA	polyamid
P	fosfor
Pb	olovo
PC	polykarbonát
PE	polyethylen
PE-HD	vysokohustotní (lineární) polyethylen
PE-LD	nízkohustotní (rozvětvený) polyethylen
PE-MD	středněhustotní polyethylen
PMMA	polymethylmetakrylát
PP	polypropylen
PP-H	extrudovaný polypropylen-homopolymer
PP-R	statistický kopolymer polypropylenu
PS	polystyren
PVC	polyvinylchlorid
PVC-U	Neměkčený polyvinylchlorid
rPE	bralen, polymer s rozvětveným řetězcem
Sb	antimon (stibium)
Se	selen
Sn	cín
Tm	thulium
UV	ultrafialové záření
Xe	xenon
Yt	ytterbium

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady svařovaných plastových dílů [16], [20], [22].....	11
Obr. 2 Svařování horkým plynem [1].....	13
Obr. 3 Schéma svařování horkým tělesem [1].....	14
Obr. 4 Extruder [1].....	14
Obr. 5 Ultrazvuková svářečka. [1].....	15
Obr. 6 Svařování rotačním třením [1].....	145
Obr. 7 Možnosti laserového svařování [1].....	16
Obr. 8 Techniky laserového svařování [7].....	147
Obr. 9 Obecné schéma laseru [11].....	18
Obr. 10 Proces stimulované emise [11].....	18
Obr. 11 Uvolnění energie ve formě proudu fotonů [11].....	19
Obr. 12 Princip CO ₂ laseru s pomalým průtokem [13].....	21
Obr. 13 Lampami buzený Nd:YAG laser [10].....	22
Obr. 14 Princip vláknového laseru [10].....	23
Obr. 15 Schéma laserové diody [7].....	24
Obr. 16 Profil vystupujícího svazku [7].....	24
Obr. 17 Princip propustného svařování [1].....	24
Obr. 18 Diodový laser LIMO60-F400-DL980-S2050 [19].....	29
Obr. 19 Zkušební vzorky	30
Obr. 20 Příklad hodnoceného svaru.....	30
Obr. 21 Vzhled svaru doporučený výrobcem	32
Obr. 22 Vadné vylomené svary	35
Obr. 23 Příklad požadovaného vzhledu svaru	37

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání typů laserů pro svařování plastů [13].....	20
Tab. 2 Porovnání vybraných laserových diod [7].....	23
Tab. 3 Vzájemná svařitelnost některých vybraných plastů [23].....	27
Tab. 4 Parametry diodového laseru LIMO60-F400-DL980-S2050 [19].....	28
Tab. 5 Typické vlastnosti PC [1].	31
Tab. 6 Typické vlastnosti PMMA [1].....	31
Tab. 7 Parametry svaru doporučené výrobcem laseru.	32
Tab. 8 Vyhodnocení vad svarů č. 1 a č. 2.....	33
Tab. 9 Vyhodnocení vad svaru č.3.....	34
Tab. 10 vyhodnocení průvaru na svarech č. 4 a č. 5.....	36

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Přehled dalších metod pro svařování plastů [9]
--

PŘÍLOHA 1 Přehled dalších metod pro svařování plastů [9]

Metody svařování plastů		Přídavné materiály	Svařované polotovary	Postup svařování		
				Ruční	Strojní	
Svařování horkým tělesem	Přímé	Na tupo horkým tělesem	Bez přídavných materiálů	Trubky, desky, profily	výjimečně	ano
		Profilové horkým tělesem		Desky, profily	výjimečně	ano
		Ohraňováním horkým tělesem		Desky	výjimečně	ano
		Polyfúzní svařování		Trubky	do průměru 40 mm	Do průměru 110 mm
		Elektrotvarovkou		Trubky	ne	ano
		Horkým klínem		Fólie, profily	výjimečně	ano
		S oddělením svaru		Fólie a tenké desky	výjimečně	ano
	Bezvýronkové	Trubky		ne	ano	
	Nepřímé	Impulsní horkým tělesem		Fólie	ano	ano
		Tepelně kontaktní horkým tělesem		Fólie	ne	ano
Kotoučové		Fólie	ne	ano		
Svařování horkým plynem	Ruční horkým plynem	Drát, tyčinka	Trubky, desky, profily	ano	ne	
	Horkým plynem a rychlotryskou	Drát, tyčinka	Trubky, desky, profily	ano	ne	
	Přeplátovací horkým plynem	Bez přídavných materiálu	Fólie	ano	ano	
	Vytlačovací (extruzní) horkým plynem	Drát, granulát	Trubky, desky, profily	ano	ano	
Ostatní metody svařování plastů	Vytlačovací sáláním	Drát, granulát	Trubky, desky, profily	ano	ano	
	Infračerveným paprskem	Bez přídavných materiálů	Trubky	ne	ano	
	Ultrazvukem		Trubky	ano	ano	
	Třecí svařování		Fólie, desky	ne	ano	
	Vysokofrekvenční		Fólie	ne	ano	
	Laserem		Fólie	ne	ano	