



Zemědělská
fakulta
Faculty
of Agriculture

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Katedra zemědělské dopravní a manipulační techniky

Bakalářská práce

Nekonvenční metody dělní materiálu

Autor práce: Vojtěch Sufčák

Vedoucí práce: Mgr. Tomáš Zoubek

České Budějovice

2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

ABSTRAKT

Sufčák Vojtěch: Nekonenční metody dělení materiálu.

Bakalářská práce se zabývá nekonvenčními metodami dělení materiálu, zmíněné jsou také konvenční metody. V práci jsou popsány nekonvenční metody dělení materiálu, mezi které patří, řezání laserem, řezání plazmou, řezání kyslíkem, řezání vodním paprskem, řezání paprskem elektronů a řezání ultrazvukem. V práci jsou také uvedeny některé konvenční metody, například stříhání, upichování a řezání. Bakalářská práce byla vytvořena a zpracována s využitím české a zahraniční odborné literatury.

Klíčová slova: laser, plazma, kyslík, vodní paprsek, paprsek elektronů, ultrazvuk, řezání

ABSTRACT

Sufčák Vojtěch: Unconventional methods of material cutting.

Bachelor thesis contains information about unconventional methods of material cutting, there are also mentioned conventional methods. There are described unconventional methods of material cutting, such as laser cutting, plasma cutting, oxygen cutting, water jet cutting, electron beam cutting and ultrasound cutting. There are some conventional methods too, e.g. cutting-off, slicing and milling. Theoretical section contains literary recherche, which is based on Czech and foreign bibliography.

Keywords: laser, plasma, oxygen, water jet, electron beam, ultrasound, cutting

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Mgr. Tomáši Zoubkovi za jeho cenné rady a věcné připomínky, které mi během psaní práce poskytl. Především bych chtěl ale poděkovat za jeho trpělivost a čas, který této práci věnoval.

Obsah

Úvod.....	6
1 Konvenční metody dělení materiálu	7
1.1 Stříhání	7
1.2 Upichování	8
1.3 Řezání.....	9
2 Nekonvenční metody dělení materiálu.....	11
3 Řezání laserem	12
3.1 Postup řezání laserem.....	12
3.2 Metody řezání laserem	14
3.2.1 Sublimační řezání.....	14
3.2.2 Tavné řezání	15
3.2.3 Oxidační řezání	15
3.3 Typy laserů.....	15
3.3.1 Pevnolátkové lasery	15
3.3.2 Kapalinové lasery	16
3.3.3 Plynové lasery	17
3.3.4 Polovodičové lasery	18
4 Řezání plazmou.....	19
4.1 Technologická zařízení	22
4.2 Metody řezání plazmou.....	23
5 Řezání kyslíkem.....	26
6 Řezání vodním paprskem.....	29
6.1 Automatizované dělení materiálu	32
7 Řezání paprskem elektronů	34
8 Řezání ultrazvukem.....	36
8.1 Metody spojování materiálu ultrazvukem.....	38
Závěr	39
Zdroje	40
Seznam obrázků	47
Seznam tabulek	49
Seznam použitých zkratk.....	50

Úvod

V praxi se nejběžněji používají tradiční neboli konvenční způsoby dělení materiálu. Jde o způsoby, které mají dlouhou historii svého využití a které prošly dlouhým vývojem a optimalizací. K tradičním způsobům dělení materiálu jsou řazeny stříhání, lámání, sekání, upichování a řezání.

V 50. letech 20. století byly vyvinuty nekonvenční metody dělení materiálu. Ve srovnání s konvenčními metodami dělení materiálu, které jsou levnější, než nastupující nekonvenční způsoby dělení materiálu, využívají moderní nekonvenční metody dělení materiálu nové technologie vykazující vyšší přesnost a čistotu oddělených ploch.

Nekonvenční metody dělení materiálu jsou značným přínosem především pro strojírenství, které dokáže v maximální míře využít přednosti nové technologie dělení materiálu, jako například vyšší přesnost, vyšší kvalitu řezu či zrychlení výrobního procesu.

Z hlediska zaměření a cíle bakalářské práce s názvem nekonvenční metody dělení materiálu se první kapitola zabývá konvenčními metodami dělení materiálu (stříhání, upichování, řezání). V následujících kapitolách se bakalářská práce zaměřuje na nekonvenční metody dělení materiálu. Zabývá se řezáním laserem, řezáním plazmou, řezáním kyslíkem, řezáním vodním paprskem, řezáním paprskem elektronů a řezáním ultrazvukem.

1 Konvenční metody dělení materiálu

Zpravidla mezi ně řadí třískové obrábění, ale jsou i výjimky. Při úběru dochází k přímému styku nástroje s obráběným materiálem. Konvenční metody používají technologie silového působení na obráběný materiál. Tyto metody se rozdělují na dělení materiálu řezáním, upichováním, lámáním, sekáním a stříháním. Jednotlivé metody nejsou tak nákladné a využívají se běžně v praxi. Konvenční metody jsou předchůdcem nákladnějších nekonvenčních metod (Lenfeld, 2021; Stříhání, 2021; Bartoš, 2021; Voharek, 2021).

1.1 Stříhání

Stříhání odděluje tenký materiál, většinou plochý. Ručními nůzkami se dá stříhat ocel, která má maximálně tloušťku 1 mm, u hliníku do tloušťky 1,2 mm. Větší tloušťky plechů se z pravidla stříhají pákovými nůzkami. Nedochozí ke vzniku třísky. Dva nože, které se pohybují proti sobě, že oba klínové břity nožů po sobě kloužou od sebe, oddělují materiál. Mezi noži nesmí být mezera, neboť by nedocházelo ke stříhání materiálu, docházelo by k ohýbání. Při stříhání musí být materiál kolmo k nožům.

Stříhání se rozdělují na ruční a strojní. Pro ruční stříhání se používají nůžky, které jsou složené ze dvou čepelí. Obě čepele bývají hladké a těsně k sobě přiléhají. Používají se do tloušťky plechu 1,5 mm. Síla se přenáší pákami. Podle stříhu se řídí výběr nůžek.

Velké pákové nůžky se používají do tloušťky plechu 6 mm (obrázek 1.1). Používají se pro stříhání drátů či plechů. Strojní stříhání slouží k dělení materiálu, které nejsou ploché. Lze řezat materiály kruhové, čtvercové a obdélníkové. Jejich univerzálnost je doplněna i o zařízení pro stříhání plochého materiálu. Maximální střižná síla je 16 000 kN. Strojní stříhání má široké uplatnění, kde přesnost a kvalita postačuje pro další zpracování materiálu. Hlavní uplatnění je pro stříhání profilů. Výhody a nevýhody jsou uvedeny v tabulce 1.1 (Vzdělání pro život^c, 2021; Bartoš, 2021; Voharek, 2021).



Obrázek 1.1: Pákové nůžky na plech (Mall.cz, 2021)

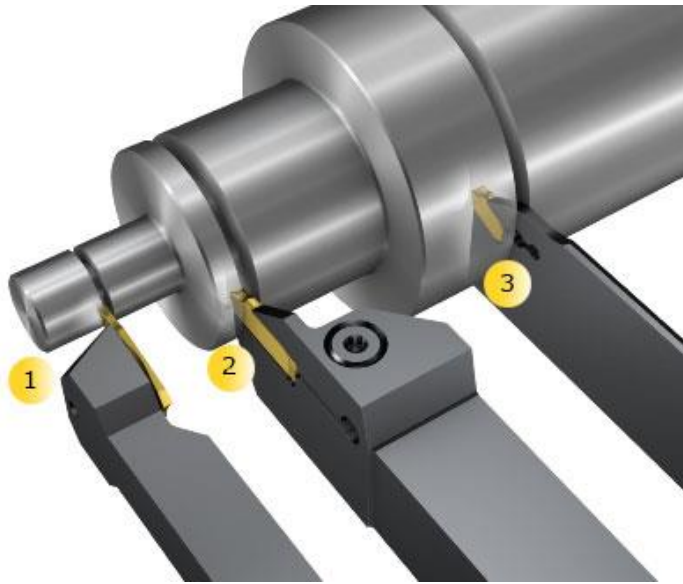
Tabulka 1.1: Výhody a nevýhody stříhání

Výhody	Nevýhody
nízká pořizovací cena	deformace materiálu po stříhu
snadná výměna nožů	při častém používání dochází k otupení
rychlé oddělení tenkých materiálů	nelze dělit velmi tlusté materiály

1.2 Upichování

Při upichování dochází k oddělení části obrobku od upnuté části. Pro upichování se používají upichovací břity, které se označují jako mělké upichování, upichování se středními hloubkami řezu a upichování s velkými hloubkami řezu (obrázek 1.2).

Nástroje se dále dělí na jednostranné, ale i oboustranné. Vnější i vnitřní lůžko mají stejné pro upnutí, díky tomu je použití jednoduché a účelné. Pro jednotlivé materiály jsou odpovídající utvářeče. Ocelové třísky se při středních a vysokých posuvech lámou, nedochází k dotýkání boků zápichu a velmi snadno odcházejí. Výhody a nevýhody jsou uvedeny v tabulce 1.2 (Sandvik, 2021; Dvořák, 2021; Iscar, 2021; Techmagazín.cz, 2021; Tejkalová, 2021).



Obrázek 1.2: Upichování: 1. Mělké upichování, 2. Upichování se středními hloubkami řezu, 3. Upichování s velkými hloubkami řezu (Sandvik, 2021)

Tabulka 1.2. Výhody a nevýhody upichování

Výhody	Nevýhody
jednoduché upnutí nožů	průřez zeslabuje drážka a obrobky v těchto místech praskají
vysoká přesnost souosí	po opracování vzniká odpad
kvalitní opracování materiálu	nebezpečí zachycení obsluhy
	nelze obrábět otvory

1.3. Řezání

Řezání je způsob dělení materiálu. Při úběru materiálu dochází k vytváření třísek. Nástrojem pro řezání kovů je pilka na kov. Ocelový pásek je pilový list s jednostranným nebo oboustranným ozubením (obrázek 1.3). Zuby mají tvar trojúhelníku. Jsou střídavě vyhnuty do stran a mohou být širší. Silnější, než pilový list je drážka, která vzniká řezáním. Je to z toho důvodu, aby pilový list nezadíral. Ve směru řezu se vkládá pilový list do drážky. Výhody a nevýhody řezání jsou uvedeny v tabulce 1.3 (Studentské.cz, 2021; Vzdělání pro život^b, 2021; Lupták a Šmarda, 2016)



Obrázek 1.3: Oboustranný pilový list (Nodo-shop.cz, 2021)

Tabulka 1.3: Výhody a nevýhody řezání

Výhody	Nevýhody
nízké pořizovací náklady	snadné opotřebení
snadná výměna rezného listu	při řezání se tvoří odpad
snadné uchycení pilového listu do pilky	řezaný materiál se musí upevnit, aby nepružil

2 Nekonvenční metody dělení materiálu

Mezi nekonvenční metody obrábění řadíme metody, které jsou svým charakterem atypické. Zpravidla mezi ně nepatří metody třískového obrábění. Při úběru materiálu nedochází k přímému styku nástroje s obráběným materiálem.

V dnešní době se nekonvenční metody stále vyvíjejí, jsou zdokonalovány a zaváděny do průmyslu. Do těchto metod téměř nezasahuje lidský faktor, protože se jedná o stroje, které dělí materiál. Stroje jsou naprogramovatelné, jsou schopny vyrobit velmi přesné a tvarově složité materiály. Nákup těchto strojů je finančně velmi náročný a každý si musí nejdříve spočítat, zda se mu zavedení nové technologie vyplatí. Na druhou stranu je produktivita a bezpečnost práce s nekonvenčními metodami velmi vysoká.

Nekonvenční metodou lze obrábět velmi tvrdé a pevné materiály. U těchto metod je velmi vysoká energetická náročnost, na materiál působí minimální řezné síly. Tyto metody se dělí na paprskové, elektroerozivní, elektrochemické a chemické. Do jednotlivých metod lze zařadit plazmové řezání, řezání laserem, řezání kyslíkem, řezání vodním paprskem, řezání paprskem elektronů, řezání ultrazvukem, drátové elektroerozivní řezání a leptání. Jednotlivé zastoupení metod v praxi lze jen odhadovat

Na pomyslnou první příčku na základě dat prodejců a potřeb podniků lze zařadit laserové technologie. V praxi se již řadu let laserové technologie využívají v mnoha odvětvích. Všechny nekonvenční metody jsou velmi nákladné. Na trhu je nejvíce zastoupena plazma, poté laser a na třetím místě je vodní paprsek. (Pro srovnání: cenová relace se pohybuje od 1 500 000 Kč – 17 000 000 Kč, např. pořizovací cena plazmy se pohybuje od 1 500 000 Kč – 1 900 000 Kč, vodního paprsku 2 500 000 Kč – 3 500 000 Kč a laseru 13 000 000 Kč – 17 000 000 Kč) Tyto metody jsou velmi nákladné z důvodu špičkové kvality a velké přesnosti dělení materiálu (Kocman a Prokop, 2005; Dillinger, 2019; Ptáček et al., 2002; Ptáček et al., 2003; Slaný, Dvořáková, a Dvořák, 2021).

3 Řezání laserem

Řezání laserem je nejužívanější způsob technického využití laseru. Laserem lze řezat téměř všechny materiály. Vysoká koncentrace energie umožňuje dělit všechny technické materiály bez ohledu na jejich tepelné, fyzikální a chemické vlastnosti. Soustředěný laserový svazek fotonů při dopadu na materiál ohřeje místo kontaktu na teplotu varu, přičemž je okolní materiál nastaven v úzké zóně. Řezání se používá pro vysokolegované oceli, měď, hliník, nikl a jejich slitiny i nekovové materiály jako je keramika, plexisklo a dřevo. Řezné rychlosti jsou velmi vysoké, pro ocel $0,6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a pro plastové fólie $90 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Tímto způsobem lze provádět rovinné i prostorové řezy. Předností je, velmi vysoká přesnost, která je $0,05 \text{ mm}$.

Laser je zdroj úzkého svazku monochromatického záření (světelného nebo infračerveného), pracující na principu stimulované emise. Je to kvantový generátor koherentního záření. Různé typy laserů vysílají záření s vlnovou délkou 100 nm až $773\,000 \text{ nm}$ (viditelné světlo je v rozpětí 400 nm až 700 nm). Rozlišují se polovodičové lasery, lasery v pevné fázi, plynové lasery a kapalinové lasery.

K opracování a řezání materiálu se používá buď pevnolátkový laser s výkonem až 1 kW , jehož paprsek lze přenášet soustavou zrcadel, nebo plynový laser s CO_2 s desetkrát větší vlnovou délkou, jehož paprsek nelze běžně opticky přenášet, s výkonem až 15 kW . Paprsky jsou soustředěny na velmi malou plošku s výkonovou hustotou až $10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ při impulzním provozu. Materiál se při tom vypařuje a je odfukován inertním plynem. Podle způsobu řezání se rozlišuje řezání a spalovací řezání (Dillinger, 2019; Bystronic.cz, 2021; Trumpf.com, 2021; Profilaser.eu, 2021; Šplíchal, 2021).

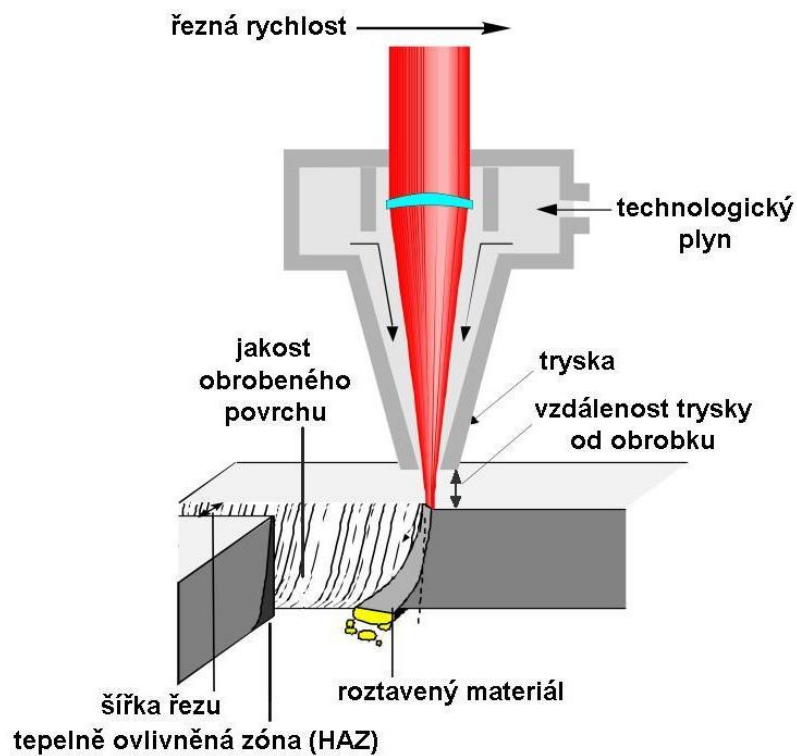
3.1 Postup řezání laserem

Při tavném laserovém řezání je laserovým paprskem roztavená látka vyfukována z řezu inertním plynem, většinou dusíkem nebo argonem (obrázek 3.1). Tento postup je vhodný hlavně pro řezání kovů, které mají teplotu tání nižší než teplotu vzplanutí, tj. pro řezání vysoce legovaných ocelí a hliníkových slitin, polovodičových materiálů, plastů a jiných hořlavých látek a keramických materiálů.

Při spalovacím laserovém řezání zahřívá laserový paprsek látku na zápalnou teplotu. Látka se spaluje v proudu přiváděného kyslíku, který zároveň vyfukuje vznikající oxidy. Pomocí laserových řezacích zařízení s vodním chlazením je možné řezat díly citlivé na poškození teplem, např. křemíkové destičky s hotovými

integrovanými obvody. Kromě toho může být řezací hlavice s chlazením ve větší vzdálenosti od materiálu než nechlazená hlavice, a proto může být použita k provádění trojdimenzionálních řezů.

Přednostní řezání laserovým paprskem je hladký řez, jak je patrné z obrázku 3.2. Ušetří se tím dodatečné opracování řezných ploch. Laserovým paprskem lze vyřezávat velmi malé otvory a složité tvarované díly. Při laserovém řezání je však nutno dbát i na bezpečnostní opatření. Výhody a nevýhody laserového řezání jsou uvedeny v tabulce 3.1. Jednou z nejzákladnějších předností při řezání laserovým paprskem je odsávání vzniklého kouře a dráždivých plynů (Dillinger, 2019; Trumpf.com, 2021; Profilaser.eu, 2021; Šplíchal, 2021; Kořán, 2021).



Obrázek 3.1: Tavné řezání laserovým paprskem (Kořán, 2021)



Obrázek 3.2: Výrobky vyřezané laserem (Dillinger, 2019)

Tabulka 3.1: Výhody a nevýhody řezání laserem

Výhody	Nevýhody
lze řezat všechny technické materiály	velká energetická náročnost
velmi vysoké rezní rychlosti (metry až desítky metrů za minutu)	vysoká cena zařízení
tloušťka řezu oceli až 40 milimetrů	použitelnost pro menší tloušťky
přesnost řezu materiálu je vysoká přibližně 0,05 až 0,1 milimetru na jeden metr	nízká účinnost

3.2 Metody řezání laserem

Rozlišujeme tři základní typy řezání laserem, a to sublimační, tavné a oxidační. Každá metoda je specifická, podle způsobu řezání.

3.2.1 Sublimační řezání

Při sublimačním řezání materiál v místě řezu sublimuje a pevná látka se mění na plyn. Jako procesní plyn slouží dusík, argon či helium. Helium při tlaku 1–3 bary. Sublimační řezání má vysoké požadavky na výkon laseru, neboť je materiál v místě řezu odstraňován převážně odpařováním v důsledku vysoké intenzity záření laseru. Při řezání laserem sublimační metodou se generuje velké množství tepla. Tato metoda se používá především pro řezání velmi tvrdých materiálu a je vhodná i pro řezání tenkých plechů (Řasa, Pokorný a Gabriel, 2005; Trumpf.com, 2021; Dillinger, 2019).

3.2.2 Tavné řezání

Při používání metody tavného řezání se materiál v místě řezu nataví a tavenina je odfukovaná proudem inertního plynu. Jako procesní plyn slouží dusík či vzduch. Na rozdíl od sublimačního řezání je nižší účinnost a velmi nízká rychlost při řezání tavnou metodou. Tato metoda je vhodná pro řezání kovových materiálů s nižší teplotou tavení, vysokolegované oceli, či pro nekovy. Mezi materiály, které jsou řezány touto metodou patří mosaz, nerezové oceli, pozink, hliník (Řasa a Kerečaninová, 2021; Lascam.cz, 2021; Ptáček et al., 2003).

3.2.3 Oxidační řezání

Při laserovém řezání oxidační metodou slouží jako procesní plyn kyslík, který zajistí lokální zvýšení teploty v oblasti řezu, protože podporuje hoření. Na rozdíl od tavné metody řezání je při řezání oxidační metodou velmi vysoká teplota v místě řezu. V porovnání s tavnou metodou jsou při oxidačním řezání vyšší rezné rychlosti. Tato metoda má horší kvalitu řezu, na rozdíl od sublimační metody řezání. Je možné snižovat tlak plynu a výkonu, neboť je vytvořena větší tepelná plocha řezu, ze které již nemá plyn prostor unikat do okolí. Díky tomu dochází k podstatné úspoře procesních plynů. Tato metoda se používá pro řezání nízkolegované oceli, či pro materiály větší tloušťky. Dále se používá pro materiály, které jsou charakteristické vysokou tepelnou vodivostí, jako je černá ocel či měď (Profilaser.eu, 2021; Ptáček et al, 2002; Šplíchal, 2021).

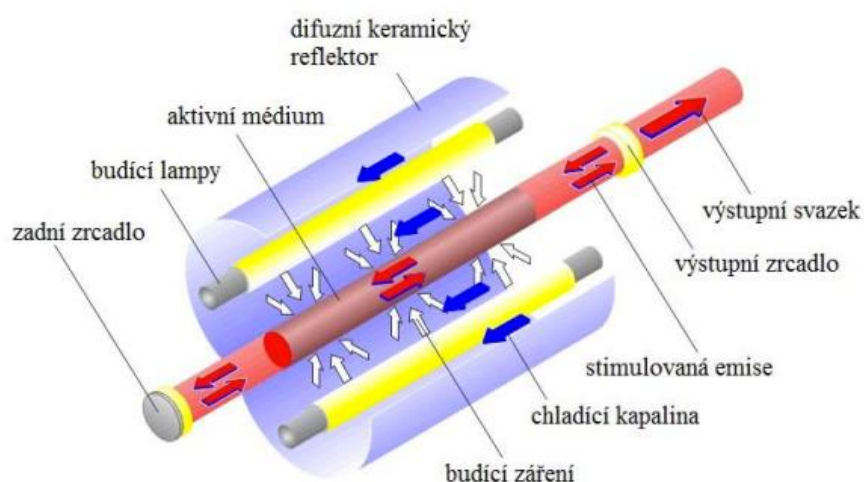
3.3 Typy laserů

Lasery lze dělit podle mnoha kritérií, například dle skupenství aktivního prostředí, vlnové délky, typu excitace, počtu energetických hladin, režimu práce, použití v průmyslu, výkonu, tvaru paprsku či jejich počtu nebo dle typu laserové hlavy. Nejběžněji používaným rozdělením laserů je jejich dělení dle skupenství aktivního prostředí. Podle něj se rozdělují na pevnolátkové, kapalinové, plynové a polovodičové (Lt.cz, 2021; Kusala, 2004; Oshiro, 2021).

3.3.1 Pevnolátkové lasery

První fungující laser na světě byl rubínový laser, který je typickým zástupcem pevnolátkových laserů. Nepoužívá tmavě červené barvy, používá růžové barvy a stále používá krystal syntetického rubínu. Polovodičové velkoplošné diody či xenonové výbojky se často používají pro vybuzení. V impulzním režimu zpravidla pracuje tento

laser, kde vyzáří výkon řádově miliony wattů v miliontině sekundy. Za velmi krátkou dobu jde o velký výkon. Výkony laserů 8 W až 30 W jsou pro značící účely. Pro takto vysoké výkony laseru je nutné mít chlazení, nejpoužívanější je vodní chlazení. Pevnolátkový rubínový laser, který se již v dnešní době moc nepoužívá, našel náhradu v polovodičových laserech, známých jako vláknové lasery. V praxi se nejčastěji setkáme se zástupcem pevnolátkových laserů Nd:YAG (obrázek 3.3), tento typ má velmi široké využití díky možnosti vedení pomocí vlákna. Používá se na řezání, vrtání, svařování, ale lze ho využít i jako skalpel při velmi jemných chirurgických operacích (Lt.cz, 2021; Narran.cz, 2021; Lascam.cz, 2021; Hospimed, 2021).



Obrázek 3.3: Konstrukce Nd:YAG laseru (Lascam.cz, 2021)

3.3.2 Kapalinové lasery

Mají velmi značné využití ve spektrometrii, protože se dají přeladovat na jiné vlnové délky. Roztoky organických barviv jsou využívány jako aktivní prostředí kapalinového laseru. Tyto typy laserů se dají nastavit od 300 nm do 1500 nm vlnové délky, a to je jejich značná výhoda. Různá barviva zde slouží jako aktivní prostředí, např. Rhodanim 6G, Rhodamin B, Alizarin a další, rozpouštěné například v destilované vodě či lihu.

Pokrokovou myšlenkou bylo využití rozpustnosti barviv ve skle, čímž vznikly skleněné lasery. K jejich buzení lze využít jiného laseru. Nejčastěji je k tomuto využíván dusíkový laser, který generuje záření v oblasti UV.

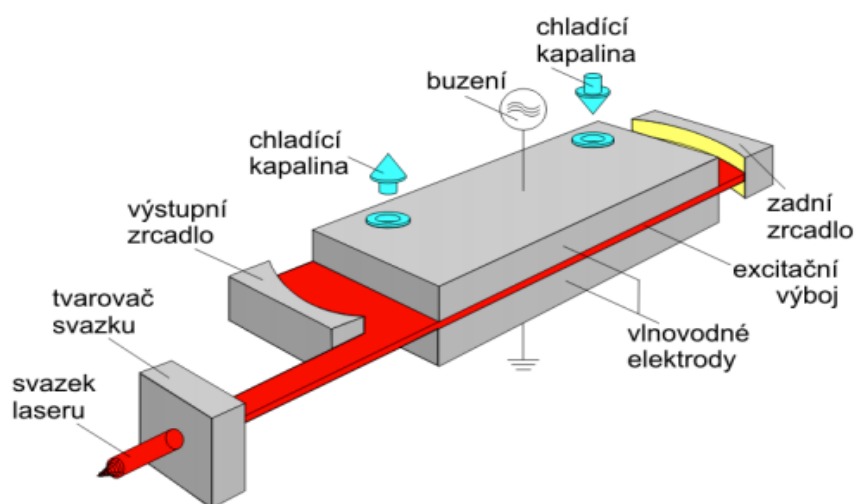
Z výbojky lze také využít světlo. V případě buzení výbojkou se podobně jako pevnolátkové lasery umisťují do odrazné dutiny, rezonátoru. Tento typ laseru

v průmyslové oblasti není příliš rozšířen z důvodu degradace aktivního prostředí kvůli vnesenému teplu a světlu při buzení (Lt.cz, 2021; Lascam.cz, 2021; Narran.cz, 2021).

3.3.3 Plynové lasery

Plynové lasery existují v několika různých provedeních, například CO₂ a CO, Excimerové, Iontové, Helium Neon, N₂. K jejich buzení se používá vysokonapěťový doutnavý výboj. I zde však existují výjimky, např. Argonový laser, ten se budí elektrickým proudem s malým napětím. V trubici jsou velké proudové intenzity a opotřebovávají se, proto musejí být elektrody tohoto laseru velmi odolné. U téměř všech plynových laserů je energie neexcitovaných atomům předávána elektrickým proudem.

Velmi rozšířené jsou CO₂ lasery (obrázek 3.4), které se využívají pro vrtání, řezání či značení. Jako aktivní prostředí slouží směs plynů v trubici tohoto laseru, a to CO₂, He a N podle užití v různých poměrech. Aktivní prostředí se velmi zahřívá, proto musí být trubice z křemíkového skla. Je nezbytné chlazení, ke kterému se používá se voda, olej, či různé jiné roztoky. Vzduchové chlazení je možné použít pro malé výkony do 100 W. Při použití řešení s průtokem CO₂ plynu se skleněná trubka zahřívá méně. Existuje velké množství plynových laserů, pro všeobecný přehled a pro příklad lze uvést laser dusíkový, jódový, argonový a mnoho dalších (Lt.cz, 2021; Lascam.cz, 2021; Navrátil et al, 2005; Yamazaki, 2015).



Obrázek 3.4: Konstrukce plynového CO₂ laseru (Lascam.cz, 2021)

3.3.4 Polovodičové lasery

Tyto lasery lze dělit podle buzení, na lasery s elektronovým svazkem či buzené elektrickým proudem. Aktivní prostředí polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivní částicemi nerovnovážné elektrony a díry, lze injektovat volné nosiče náboje. Vyznačují se kompaktností a velkou účinností, která dosahuje až 50 %. Spektrální přeladění v širokém pásmu je také předností. Rozbíhavost paprsku, a to hlavně na teplotě aktivního polovodičového materiálu, je nevýhodou. Hlavní představitel je diodový laser, buzený svazkem elektronů, kde aktivní prostředí je tvořeno blokem polovodičů. Obdélníkové plochy jsou výstupním paprskem diodových laserů. GaAs polovodičový laser je nejznámější (Lt.cz, 2021; Narran.cz, 2021; Mrňa, 2021).

4 Řezání plazmou

Plazmovým hořákem je možné řezat legované oceli a neželezné kovy. Oproti řezání laserem, je při řezání širší řezná spára (obrázek 4.1). U těchto kovů mají vznikající oxidy vyšší teplotu tání. Kov se tedy roztéká při nahřívání dříve, než může být spalován plamenem, proto je nelze řezat kyslíkovým plamenem.

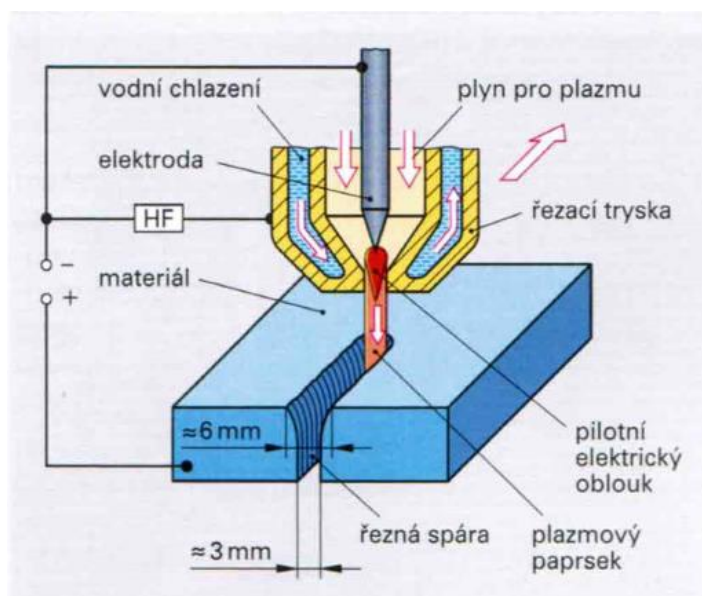
Plazma je žhavý ionizovaný plyn. Plazma působí tak rychle, že není třeba předehřívání, které by roztavilo materiál. Mezi wolframovou elektrodou a řezací tryskou se nejprve zapálí pilotní elektrický oblouk (obrázek 4.2) Přiváděný řezací plyn se při průchodu elektrickým obloukem mění v plazmu a jeho pohyb k materiálu je urychlován elektrickým polem, vytvořeným elektrickým napětím, připojeným mezi wolframovou elektrodou a řezaný materiál. Jakmile dopadne paprsek plazmatu na materiál, přeskočí elektrický oblouk na materiál a pilotní oblouk může být vypnut. Paprsek plazmatu teploty přibližně 30 000 °C taví a okamžitě odpařuje materiál v místě dopadu, aniž by se tavil materiál v okolí. Při řezání nekovových, tj. elektricky nevodivých materiálů, nemůže být mezi wolframovou elektrodou a materiálem elektrický oblouk, proto musí mít hořák další elektrodu k udržování elektrického oblouku.

Řezání plazmovým hořákem je tak rychlé, že nestačí nastavit větší okolí řezu. Šířka řezu je blíže hořáku větší, protože energie plazmového paprsku ubývá se vzdáleností od průchodu elektrickým obloukem (obrázek 4.3). Plazmovým hořákem se řezou hlavně legované oceli a neželezné kovy. Při řezání legované oceli vznikají velmi vysoké teploty dosahující až 60 000 °C. Při řezání plazmou se dosahuje velmi vysoké rychlosti. Nejvýše lze řezat materiály do tloušťky 250 mm. Výhody a nevýhody řezání laserem jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Při plazmovém řezání je však nutno dbát i na bezpečnostní opatření. Velká rychlost plazmového paprsku způsobuje velký hluk, který může být snížen proudem vody nebo řezáním ve vodní lázni (obrázek 4.4). Vysoká teplota plazmy je také příčinou vzniku ozonu a oxidů dusíku, tj. zdraví škodlivých plynů, které je třeba odsávat. Intenzivní ultrafialové záření musí být zachyceno krytem nebo ochrannými brýlemi (Dillinger, 2019; Shinkmann.cz, 2021; Cncstroje.cz, 2021; Siad.com, 2021).



Obrázek 4.1: Výrobky vyřezávané plazmou (Plasmacam.com, 2021)



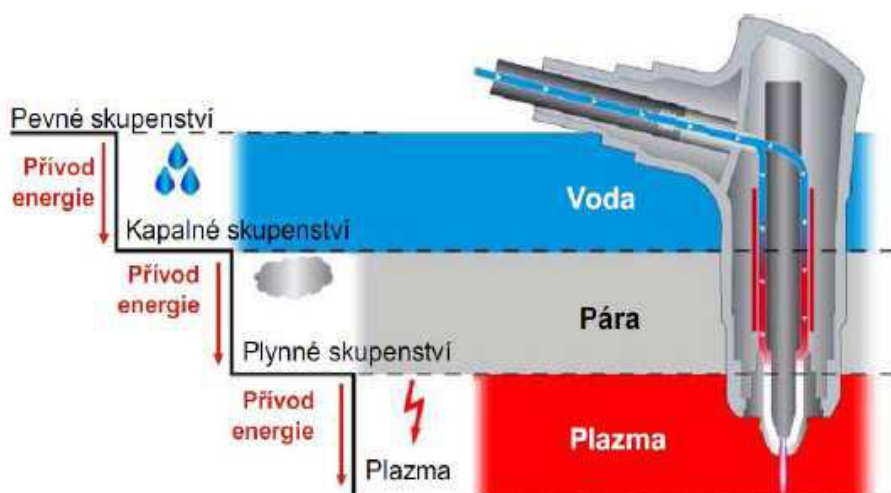
Obrázek 4.2: Řezání plazmovým hořákem (Dillinger, 2019)

Tloušťka plechu v mm	Způsob řezání materiálu		
	řezání kyslíkovým plamenem	řezání paprskem plazmatu	řezání laserovým paprskem
1			
2			
3			
5			
8			

Obrázek 4.3: Tvary řezu při různých způsobech řezání (Dillinger, 2019)

Tabulka 4.1: Výhody a nevýhody řezání plazmou (Shinkmann.cz, 2021)

Výhody	Nevýhody
vyšší řezání než u řezání kyslíkem pro tenké a střední tloušťky	úhel řezné strany je větší než u řezání kyslíkem
menší deformace (snížení vneseného tepla do materiálu)	velký vývin dýmů, par kovů, ozónu a oxidů dusíku
možnost řezání všech kovových materiálů	vysoká hladina hluku od 80 až 100 dB
snadná automatizace a mechanizace	intenzivní UV záření
minimální vliv kvality povrchu řezaných materiálů	vysoké pořizovací náklady



Obrázek 4.4: Plazmový řezací systém (Dostál, 2016)

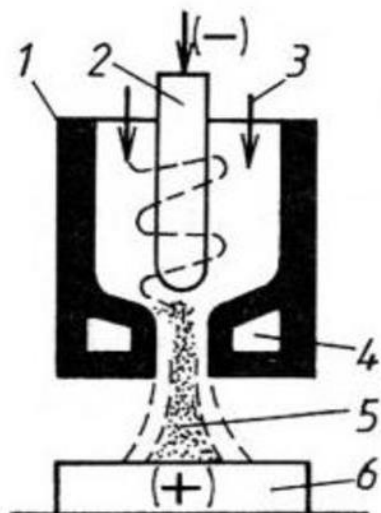
4.1 Technologická zařízení

Technologická zařízení se rozdělují na zařízení s plynovou stabilizací plazmového hořáku a s vodní stabilizací plazmového hořáku. Plazmový hořák je poměrně citlivé zařízení, které je potřeba udržovat v čistotě a s nepoškozenými vnitřními komponenty, jinak plazma nefunguje.

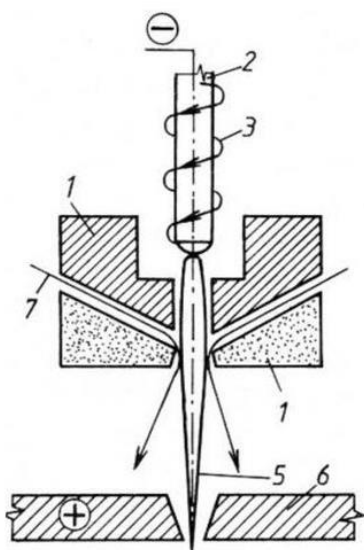
Plynová stabilizace s transferovým obloukem je založena na tom, že mezi obráběným materiálem a vnitřní elektrodou umístěnou v hořáku hoří elektrický oblouk (obrázek 4.5). Používá se pro opracování elektricky vodivých materiálů, například pro řezání neželezných povlaků a ocelí.

Plynová stabilizace s netransferovým obloukem je operace, kde mezi vnitřní elektrodou umístěnou v hořáku a výstupní tryskou, která tvoří anodu, hoří elektrický oblouk. Používá se pro obrábění elektricky nevodivých materiálů a k nanášení povlaků.

U vodní stabilizace plazmového hořáku je řezací tryska plazmového hořáku opatřena přídatnými kanálky, jimiž se voda přivádí do plazmového hořáku (obrázek 4.6). Takovéto hořáky se používají pro řezání ocelí a neželezných kovů a k nanášení povlaků. Snižuje se hlučnost, vliv UV záření a prašnost na obsluhu díky možnosti řezat pod vodou (Řasa a Kerečaninová, 2021; Ptáček et al., 2003; Ptáček et al., 2002; Fabrice, 2021; Řasa et al., 2005).



Obrázek 4.6: Hořák s plynovou stabilizací s transferovým obloukem: 1. Těleso hořáku, 2. Katoda, 3. Přívod plynu (argon), 4. Chlazení hořáku, 5. Paprsek plazmatu, 6. Obrobek, 7. Přívod vody (Fabrice, 2021)



Obrázek 4.6: Plazmový hořák s vodní stabilizací: 1. Těleso hořáku, 2. Katoda, 3. Přívod plynu (argon), 4. Chlazení hořáku, 5. Paprsek plazmatu, 6. Obrobek (Fabrice, 2021)

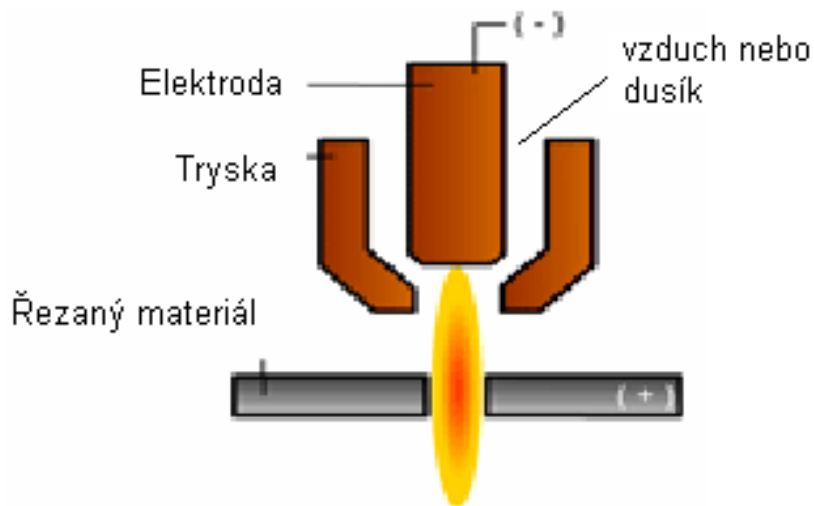
4.2 Metody řezání plazmou

Řezání plazmou se rozděluje na konvenční, dvou plyné a stíněné vodou.

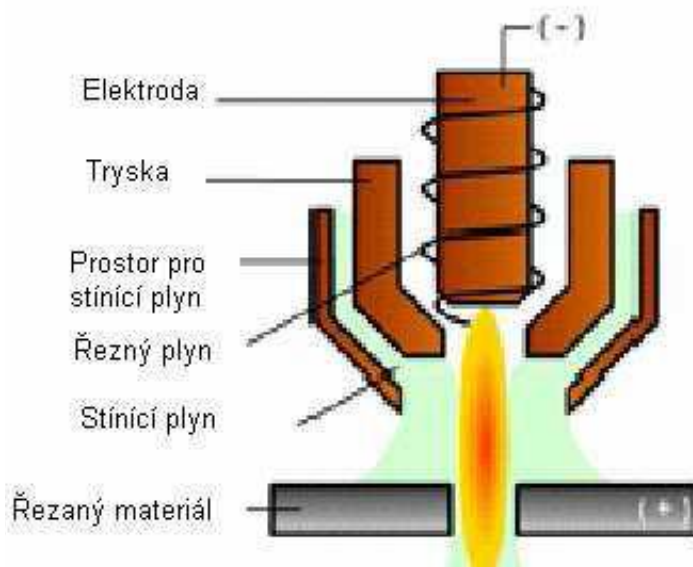
Při konvenční metodě řezání se používá jeden plyn, tento plyn je kyslík nebo dusík (obrázek 4.7). Konvenční metoda se využívá pro ruční řezání uhlíkových ocelí do 40 mm tloušťky.

Při dvou plynné metodě řezání se používá jeden plyn plazmový a druhý ochranný (obrázek 4.8). Jedná se o strojní řezání a díky tomu se tato metoda vyznačuje přesnějšími řezy. Při této metodě ochranný plyn usměrňuje plazmový proud.

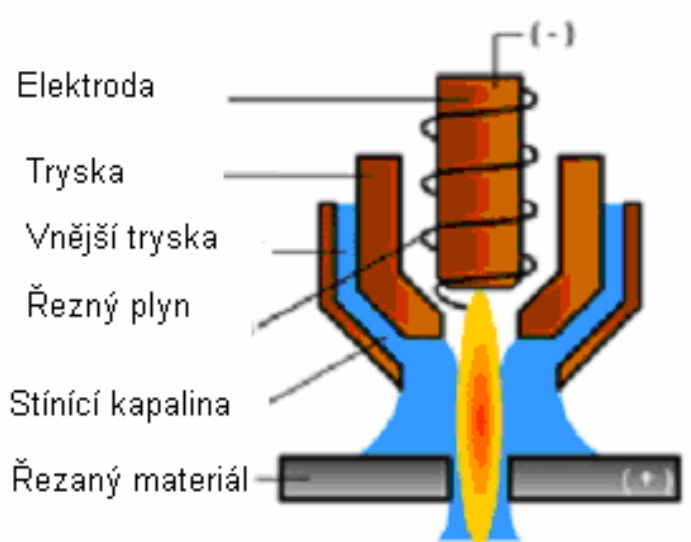
Při metodě stíněné vodou ochlazuje povrch proudu plazmy voda a tím se tepelná energie soustřeďuje do osy (obrázek 4.9). Jedná se o strojní řezání (Palma, 2021; Ptáček et al., 2003; Ptáček et al., 2002).



Obrázek 4.7: Konvenční metoda řezání (Mudra, 2013)



Obrázek 4.8: Dvou plynná metoda řezání (Mudra, 2013)



Obrázek 4.9: Metoda řezání stíněná vodou (Mudra, 2013)

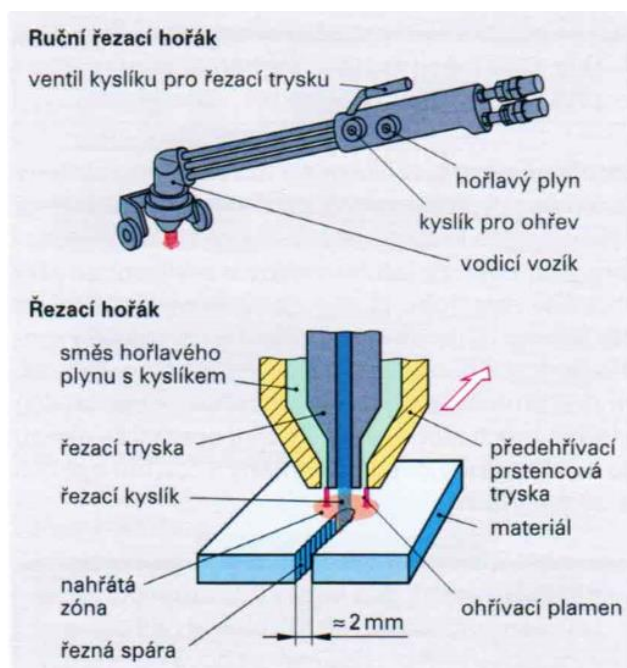
5 Řezání kyslíkem

Materiál se v místě řezu buď odpařuje, odtavuje nebo vyhořívá. Z místa řezu jsou zplodiny vyfukovány proudem tlakového plynu. Na použité metodě řezání a nastavených parametrech je závislá kvalita řezné plochy. Materiál vyhořívá v proudě kyslíku, místo řezu se předehřívá směsným plynem (kyslík + acetylén nebo vodík nebo propan butan). Řezat kyslíkem lze stejně i ručně. Řezat lze jen takové kovy, které mají teplotu nižší než teplotu tavení, musí mít teplotu tavení strusky nižší než teplotu tavení kovu, při hoření kovu vyvinou dostatečné množství tepla k tomu, aby oxidační reakce mohla samovolně pobíhat, Kyslík musí mít čistotu alespoň 99,3 %. Řezat lze nízkouhlíkové oceli tloušťek o 300 mm, speciálními hořáky a s předehřevem v celé tloušťce až 1 metr. Ostatní typy ocelí do 500 mm s předehřevem.

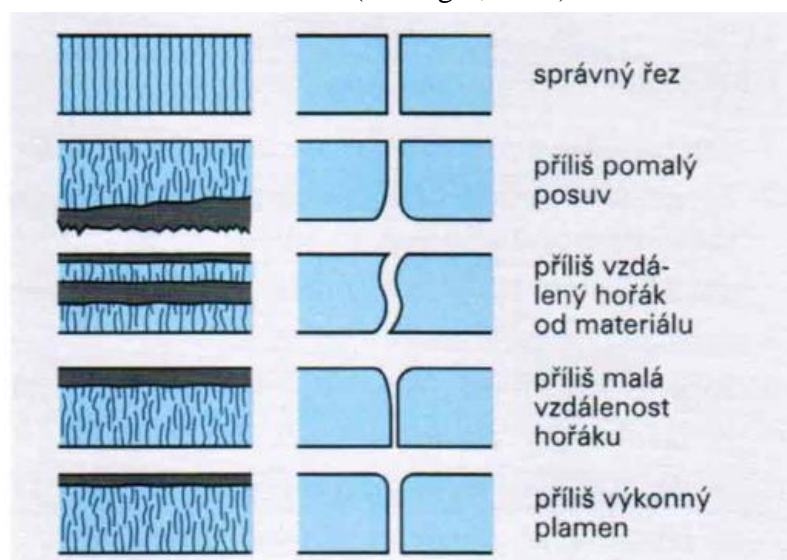
Nelegované a nízkolegované oceli hoří v čistém kyslíku při překonání teploty vzplanutí, která je kolem 1 200 °C, tedy pod teplotou tání železa 1 535 °C. Tato okolnost je podmínkou žárového řezání. Řezací hořák pracuje na principu tepelné a řezací trysky. Plamen tvořený spalováním hořlavého plynu, většinou acetylénu nebo propanu, ohřeje nejdříve materiál na teplotu hoření, pak je zvětšen přívod kyslíku a přebytečný kyslík spaluje řezaný materiál. Vznikající oxidy železa a kapky roztaveného železa jsou vyfukovány z řezu proudem plynů. Při posuvu hořáku vzniká v materiálu řezná spára (obrázek 5.1).

Při správné rychlosti posuvu řezacího hořáku vzniká kolmo rýhovaný zářez (obrázek 5.2). Šikmé rýhování stěn řezu svědčí o příliš velké rychlosti posuvu hořáku. Usazuje-li se v dolních hranách řezu struska, je rychlost řezání příliš malá. Drsnost plochy řezu je srovnatelná s povrchem po mechanické pile nebo hoblovce a závisí na vzdálenosti řezacího materiálu, průměru řezací trysky, tlaku kyslíku nebo rychlosti posuvu hořáku. Řezání svazku plechů plamenem je možné, pokud řez začíná na okraji a pokud jsou plechy těsně staženy k sobě.

Řezání kyslíkovým plamenem je možné i pod vodou. Kyslíkovým plamenem je možné propalovat otvory do keramických materiálů, např. do betonu, až do hloubky 4 m, pomocí dlouhých prášku v kyslíkovém plameni. Neřezané kovy jako hliník, měď, chróm, nikl, mangan aj. nelze řezat plamenem, protože mají zápalnou teplotu vyšší než bod tavení. Výhody a nevýhody řezání kyslíkem jsou uvedeny v tabulce 5.1 (Dillinger, 2019; Kašpar, 2021; Technickytydenik.cz, 2021; Ptáček et al., 2003; Ptáček et al., 2002).



Obrázek 5.1: Řezací hořák (Dillinger, 2019)



Obrázek 5.2: Vady při řezání oceli kyslíkovým plamenem (Dillinger, 2019)

Tabulka 5.1: Výhody a nevýhody řezání kyslíkem

Výhody	Nevýhody
velmi velké řezné rychlosti	možnost řezat pouze určitou škálu materiálu
nízká pořizovací cena	velká tepelně ovlivněná oblast
nejmenší provozní náklady	největší úkos ze všech tepelných metod dělení materiálu
dokáže řezat velké tloušťky materiálu	špatná jakost řezných ran

Jednotlivé druhy řezání kyslíkem se dělí na ruční a strojní řezání.

Na ruční řezání se používají speciální hořáky s přídavnou hubicí pro přívod čistého kyslíku. Toto řezání je méně přesné. Z toho důvodu se využívá k dělení materiálu, kde nejsou velké nároky na přesnost řezu, např. k vypalování tvarů z tabulí plechu, opravy potrubí, kolejnic či dělení materiálu na šrotištích. Nejběžnější užití je v kusové výrobě k dělení profilů.

Při strojním řezání využívají starší typy systém kopírování podle šablony. Skoro vždy jsou číslicově řízené ve dvou osách, mají řízené zapalování a zhašení plamene. Pálící stroje mohou mít jeden nebo i více hořáků, vypalují více identických tvarů najednou. Strojní řezání se využívá pro přípravu polotovarů z plechů, trubek a profilů (Vzdělání pro život^a, 2021; Kašpar, 2019; SOU Slaný, 2021).

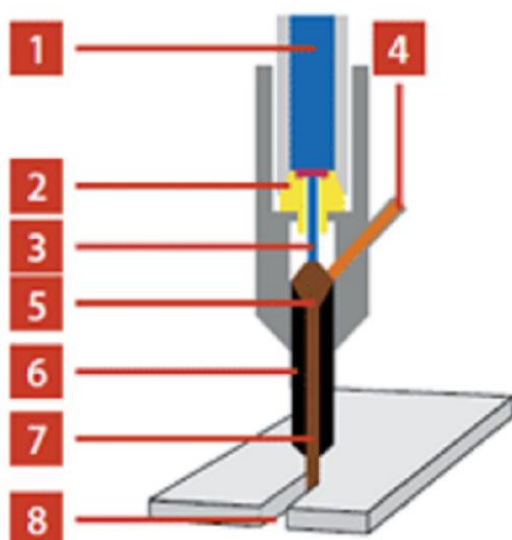
6 Řezání vodním paprskem

Řezání vodním paprskem je vyspělá technologie, díky které lze řezat velmi přesné tvary, tapisérie či dětské skládačky. Dělí se jím měkké materiály nebo doplňky bytové architektury. Vodní paprsek tryskající rychlostí až $15\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ narušuje povrch materiálu. Mechanické působení může být zesíleno přidáním např. jemného křemenného písku (obrázek 6.1). Výhody a nevýhody řezání vodním paprskem jsou shrnuty v tabulce 6.1.

Při řezání vodním paprskem se voda stlačuje na tlak 400 MPa a vede se do řezací hlavy, ve které se mísí s abrazivem a pak se přes trysku průměru 0,1 mm až 0,5 mm vystřikuje v úzkém paprsku ven. Řez je třeba začít od kraje nebo z počátečního otvoru. Rychlost řezu je závislá na tvrdosti a viskozitě materiálu, jakož i na požadované kvalitě řezu. Při požadavku hladkého a přesného řezu se pracuje s menší, asi 25% rychlostí posuvu. Řezání pomocí vodního paprsku je velmi hlučné a dosahuje 80 až 100 dB. Hluk lze podstatně ztlumit řezáním pod vodou. Rychlost vodního paprsku při řezání je až třikrát větší než rychlost zvuku.

Řezání vodním paprskem se provádí převážně na číslicově řízených řezacích strojích, vybavených výměnnými řezacími hlavami. Jednotce číslicového řízení se zadávají parametry řezání, jako rychlost posuvu, vzdálenost hlavy od materiálu a dále technologické parametry podle plynu (obrázek 6.2), napětí a proudu.

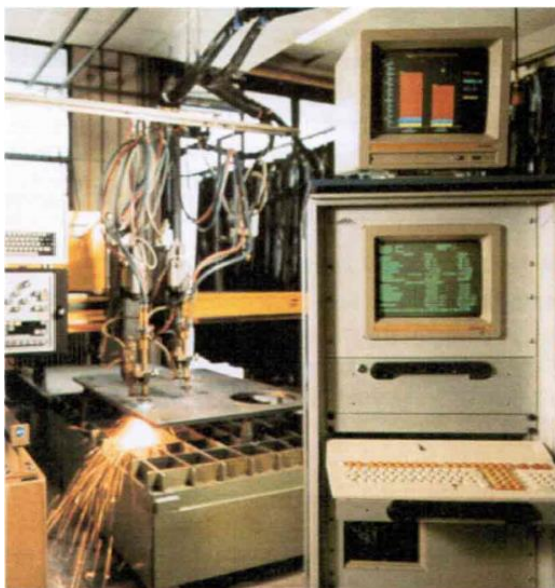
Kvůli úsporám materiálu jsou díly nejprve pomocí PC uspořádány na ploše tabule plechu tak, aby byl materiál optimálně využitý (obrázek 6.3). Na potrubí se provádějí řezy ve tvaru prostorových křivek tak, aby pak mohly být trubky svařeny pod požadovanými úhly. Prostorový řez vyžaduje prostorové vedení a naklápění řezací hlavy podobně jako při následném sváření pomocí průmyslového robotu (obrázek 6.4) (Dillinger, 2019; Bystronic.cz, 2021; Ptáček et al., 2003; Ptáček et al., 2002; Fiutsro.eu, 2021).



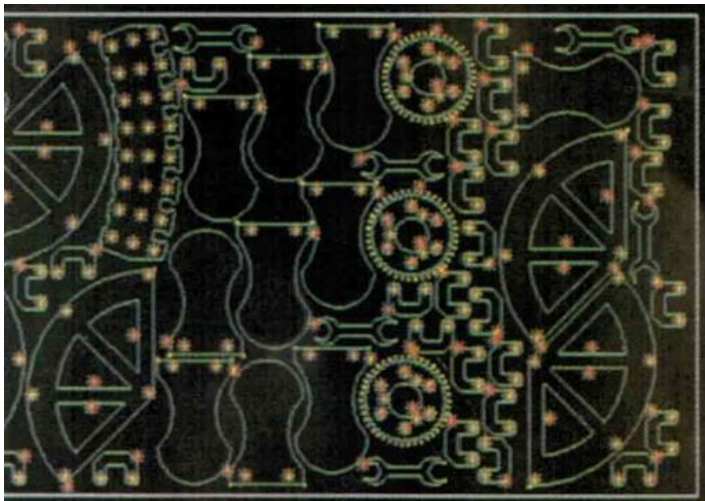
Obrázek 6.1: Princip řezání vodním paprskem: 1. voda pod tlakem, 2. vodní tryska, 3. vodní paprsek, 4. přívod abraziva (bez tlaku), 5. směšovací komora (sací prostor), 6. abrazivní tryska (usměrňovací trubice), 7. vodní paprsek s abrazivem, 8. štěrbina řezu (Rezani-cnc.cz, 2021)

Tabulka 6.1: Výhody a nevýhody řezání vodním paprskem (Gumex.cz, 2021)

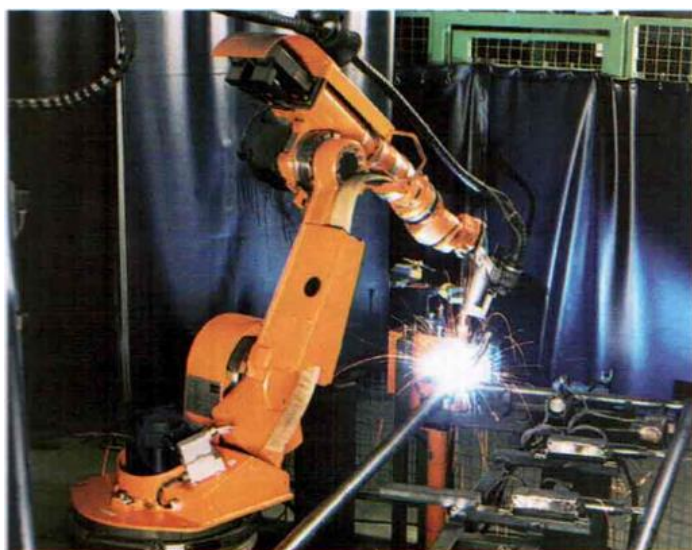
Výhody	Nevýhody
řez bez okují, zbarvení a mikrotrhlin	delší doba vysoušení u nasákavých materiálů
schopnost zaručit vysokou přesnost řezu	může dojít ke změně barvy u některých materiálů
nenamáhá tepelně řezaný materiál	nelze zabránit kontaktu řezného materiálu s vodou
univerzálnost pro použití druhu a tloušťky materiálu	
lze řezat i velmi těžko obrobitelné materiály	
nevzniká nadbytečný odpad ani škodlivé výpary či plyny	



Obrázek 6.2: NC stroj pro řezání kyslíkovým plamenem (Dillinger, 2019)



Obrázek 6.3: Uspořádání vyřezávaných dílů (řezný plán) (Dillinger, 2019)



Obrázek 6.4: Ochranné mříže při svařování průmyslovým robotem (Dillinger, 2019)

6.1 Automatizované dělení materiálu

V dílenském prostředí se zavádí automatizace procesu a zavádění průmyslových robotů. V této technologii se osvědčilo například používání portálových robotů (obrázek 6.5).

V terénních podmínkách je situace jiná. Metoda řezání vodním paprskem se používá i u řady nebezpečných prací, například pro řezání munice (obrázek 6.7), využívá se i dálkové ovládání. Je celá řada způsobů, jak likvidovat nepotřebnou munici. Lze ji delaborovat a některé komponenty znovu využít. Dá se spalovat či likvidovat řízeným výbuchem.

U každého druhu munice je jiná efektivita likvidace, ať se jedná o leteckou municí či miny. Pásový robot Teodor má přehlednou kameru, je navíc vybavený i rentgenovou kontrolou munice, doplněná o mobilní tlakový vodní agregát. Sám si vozí municí na svém pásovém podvozku, v jiné verzi na přívěsu za ním (Šmíd, 2021; Žáček, 2021; Marek, 2021).



Obrázek 6.5: Kompaktní sestava robotu Teodor (Šmíd, 2021)



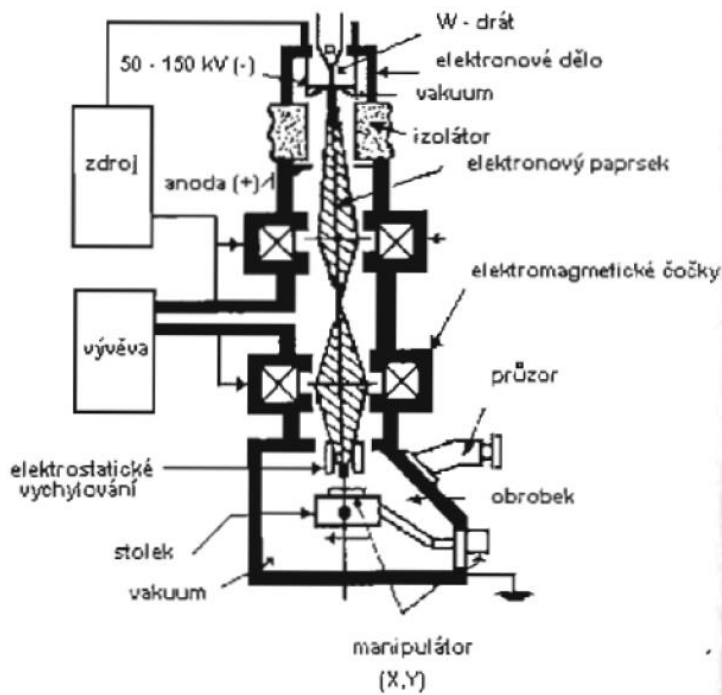
Obrázek 6.6: Řez těla munice dálkově ovládaným manipulátorem v dílenských podmínkách (Šmíd, 2021)

7 Řezání paprskem elektronů

Řezání paprskem elektronů je proces, který přeměňuje kinetickou energii na tepelnou. Tantalový nebo wolframový drát je zdrojem elektronů, vysílá svazek paprsků elektronů a je zahřátý na 2 500 °C. Je usměrněn magnetickou čočkou a urychlován anodou na velmi malou plochu materiálu (obrázek 7.1). Značnou rychlostí se částičky vypařujícího se materiálu pohybují ven. Materiál se odpaří a roztaví v místě dopadu. K úběru materiálu dojde opakováním procesu.

Obrobitelnost materiálu nezávisí na mechanických vlastnostech, ale je dána fyzikálními vlastnostmi. Elektronový paprsek se používá pro opracování těžko obrobitelných materiálů, jako žárovevých ocelí, austenitických ocelí, křemíku, tantalu, wolframu a speciálních slitin do letectví. Velmi špatně se pomocí paprsku elektronů obrábějí materiály, jako mosaz, bronz a hořčík. Výhody a nevýhody řezání paprskem elektronů jsou představeny v tabulce 7.1.

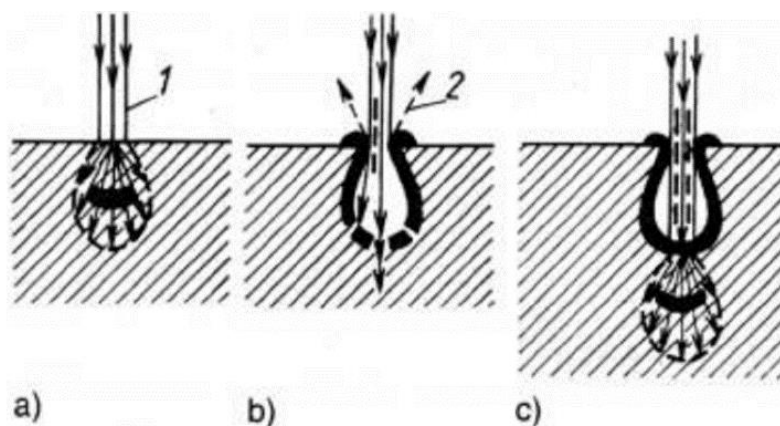
Při řezání paprskem elektronů se rozlišují dva druhy pracovních režimů. Prvním druhem je pulzní režim. Pulzní režim je nejběžněji používaným způsobem řezání svazkem elektronů. Přesného opracování materiálu se při jeho využití dosáhne pomocí odpařování materiálu v podobě plynulých erupcí (obrázek 7.2). Naproti tomu u druhého a méně často využívaného typu, kontinuálního, se materiál odpařuje plynule (Vondráček, 2021; Řasa a Kerečaninová, 2021; Netme.cz, 2021; Bodycote.com, 2021; Gestová, 2021).



Obrázek 7.1: Zařízení pro řezání paprskem elektronů (Vondráček, 2021)

Tabulka 7.1: Výhody a nevýhody řezání paprskem elektronů (Bodycote.com, 2021)

Výhody	Nevýhody
minimální deformace	vysoké náklady
vysoká rychlost svařování	obrábění musí probíhat ve vakuu
svařování kovů s rozdílnou teplotou tavení	velká spotřeba energie
úzká tavná zóna	obrobek musí být podložen dalším materiálem
možnost obrábět nejtvrďší materiály	



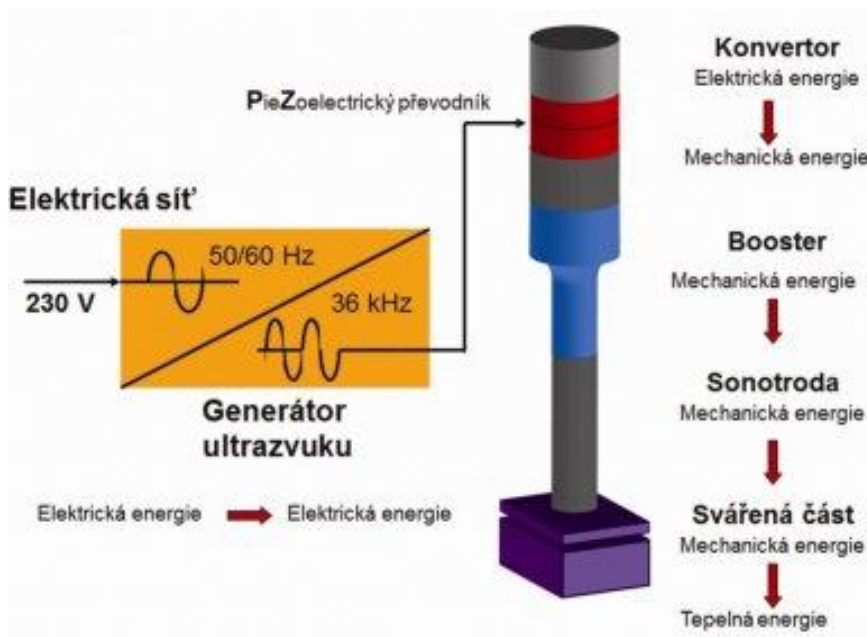
Obrázek 7.2: Princip řezání paprskem elektronů: 1. elektronový paprsek, 2. páry odpařeného kovu, a) elektrony vstoupí do materiálu, b) v materiálu dojde k erupčnímu odpařování, c) elektrony opakovaně vstoupí do materiálu (Žanta a Janoušek, 2021)

8 Řezání ultrazvukem

Ultrazvukové řezání zahrnuje všechna dělení spojených dílu a všechny druhy řezání. Kvůli vysoké frekvenci lze docílit snížení přítlaku na řezanou část. Tím lze dosáhnout čistého řezu. V praxi se lze setkat s procesy, které jsou řezání se zatavováním a samotné řezání (obrázek 8.1). Na textilní materiály, fólie a vlněné výrobky se využívá metoda řezání se zatavováním. Pro pevné materiály, potraviny se používá řezání ultrazvukové. Současně s řezáním dochází k zatavení hran materiálu. Kvůli zataveným hranám u materiálu nehrozí vypárání a hladké, zkosené hrany zabraňují hromadění materiálu při navíjení. Při řezání dvou a více vrstev se vrstvy vzájemně spojují. Vlastnostmi materiálu a geometrií spoje je určena pevnost spoje. Mnoha faktory je ovlivněna rychlost, jakou lze tkaninu řezat. Mezi parametry patří hmotnost materiálu a jeho tloušťka, složení materiálu a geometrie řezacího kotouče.

Bez uvolnění částic a s minimálním odporem provádí čepel nože vibrující ultrazvukovou frekvencí rychlý a přesný řez. Při řezání sýrů, pekařských výrobků, tyčinek snižuje studená rezná sonotroda odpor rezného procesu, tím se čistí od přilepených zbytků výrobku. Nedochozí k deformaci výrobku a výsledkem jsou hladké hrany. Výhody a nevýhody řezání ultrazvukem znázorňuje tabulka 8.1.

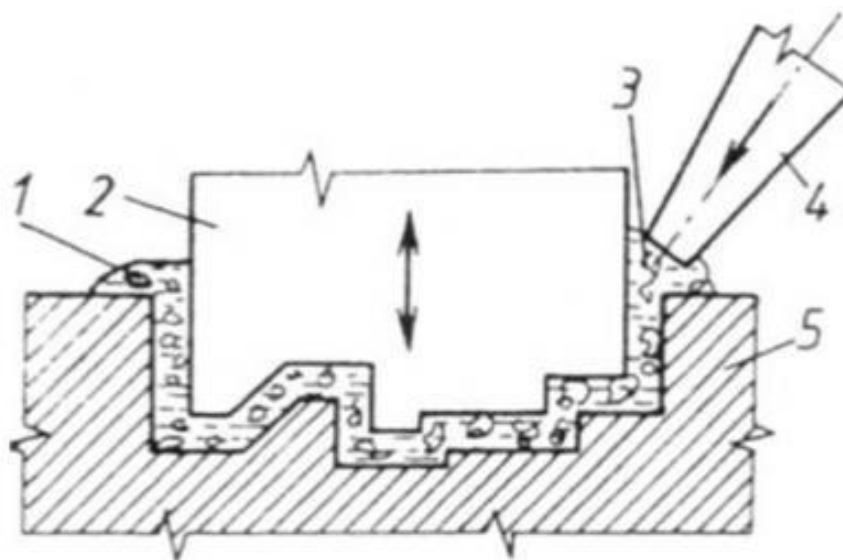
Zrna abrazivního materiálu jsou přiváděna mezi obráběný povrch a nástroj, který kmitá kolmo k obráběnému povrchu kmity o frekvenci 18 až 25 kHz. Zrna jsou nástrojem přitlačována řízenou stálou silou na obráběný povrch, čímž dochází k překopírování tvaru činné části nástroje do obrobku (obrázek 8.2). Nástroj může vykonávat ještě přímočarý posuvný pohyb nebo kombinaci obou pohybů (Palma, 2021; Dukane.eu, 2021; Wiretech.cz, 2021; Wartec.cz, 2021; Belančík, 2021).



Obrázek 8.1: Spojování a řezání ultrazvukem (Palma, 2021)

Tabulka 8.1: Výhody a nevýhody řezání ultrazvukem (Belančík, 2021)

Výhody	Nevýhody
snížení prostojů díky čištění	nelze obrábět plastické materiály
nedochází k deformaci materiálu	nízká produktivita
žádný přísun tepla do výrobku	delší vysoušení u nasákových materiálů
vysoká kvalita řezu	řezný nástroj musí být vyroben z korozivního materiálu
vysoká přesnost a opakovatelnost	



Obrázek 8.2: Princip řezání ultrazvukem: 1. kapalina, 2. nástroj, 3. brousící zrna, 4. přívod brousících zrn z kapaliny, 5. obrobek (Řasa, Pokorný a Gabriel, 2005)

8.1 Metody spojování materiálu ultrazvukem

Díky teplu, které vzniká z vysokofrekvenčních mechanických kmitů, dochází ke svaření pomocí ultrazvuku. Na vysokofrekvenční mechanický pohyb se musí přeměnit elektrická energie. Přítlačná síla spolu s pohybem vytváří teplo na rozhraní spojovaných součástí. Materiál z počátku taje a po tuhnutí tvoří molekulový svar mezi částmi.

Na materiál, který musí být svařen částmi plochy k sobě, aplikujeme bodové svařování. Hrot sonotroda pronikne skrze vrchní část do spodní části. Na kontaktní místo plochy je dodáno teplo. Ve tvaru zvonku zformuje výstupek vytlačený plast, který vyteče nahoru. Nezměněná zůstává spodní strana zadní části.

Ultrazvukově vsazený do termoplastů mohou být silné šrouby či součástky opatřeny závitem prostřednictvím vrutování kovových částí. Vysoká tuhost a stabilita vsazených částí musí být zaručena.

Řezání a svařování obalových materiálů s tolerancí dvou mikronů se používá k rychlému a přesnému stlačení vrstev, kde jsou nastaveny sonotroda a lůžko. Energie mezi vrstvami je vytvořena pohybem fólií mezi nástroji. Vzniká intermolekulární tření. Nové konstelace vznikají a vazby mezi molekulami jsou přerušeny. Svary hned po svaření chladnou a mají vysokou pevnost (Řasa, Pokorný a Gabriel, 2005; Lpm.cz, 2021; Ausperger, 2016).

Závěr

Cílem práce bylo popsat jednotlivé nekonvenční metody dělení materiálu. Práce prokázala, že jsou tyto moderní metody využívány ve strojírenství. Práce neopomněla posoudit výhody, ale i nevýhody konvenčních a nekonvenčních metod dělení materiálu.

Každé řezání má jiný proces, kterým se materiál dělí. Z jednotlivých metod je však patrné, že největší zastoupení dělení materiálu má řezání laserem. Jednotlivé metody se používají na různé druhy materiálu, rozhoduje tloušťka, ale i velikost materiálu. Vodním paprskem pak lze dělit všechny druhy materiálu. Plazmou lze dělit pouze některé materiály, jako jsou ocel, nerez ocel a hliník. Laserem lze především řezat stejné materiály jako plazmu.

Nejnákladnější metodou dělení materiálu je řezání laserem. Při porovnání konvenčních a nekonvenčních metod dělení materiálu se jako finančně náročnější ukazuje dělení nekonvenčními technologiemi řezání. V dnešní době nenalezneme vyspělejší technologie dělení materiálu než nekonvenční metody dělení materiálu.

Zdroje

Ausperger, A., 2016. *Technologie spracování plastů* [online]. [cit. 6.2.2021]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/13.html>

Bartoš, L., 2021. Stříhání kovů. In: *Zpracování kovů a opravárenství* [online]. ELUC. [cit. 6.2.2021]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1857>

Belančík, F., 2013. *Ultrazvukové svařování a dělení termoplastů od firmy Belson* [online]. [cit. 6.2.2021]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/ultrazvukove-svarovani-a-deleni-termoplastu-od-firmy-belson.html/c/1531/>

Bodycote.com, 2021. *Svařování elektronovým paprskem* [online]. [cit. 28.2.2021]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/spojovani-kovu/svarovani-elektronovym-paprskem/>

Bystronic.cz, 2020. *Profesionální řezání: Jaké jsou rozdíly mezi laserem a vodním paprskem?* [online]. [cit. 25.2.2021]. Dostupné z: <https://www.bystronic.cz/cs/blog/2020/Profesion-ln-ez-n-Jak-jsou-rozd-ly-mezi-laserem-a-vodn-m-paprskem.php>

Cncstroje.cz, 2021. *Plazma* [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <https://www.cncstroje.cz/plazma>

Dillinger, J., 2019. *Moderní strojírenství pro školu a praxi*. Praha: Europa Sobotáles. ISBN: 978-3-8085-1150-3

Dostál, L., 2016. *Plazmový řezací systém TransCut 300* [online] [cit. 3.2.2021]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6540326-Plazmovy-rezaci-system-transcut-300.html>

Dukane.eu, 2021. *Textil a folie* [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <http://www.dukane.eu/cz/svarovani-a-krajeni/textilni-prumysl>

Dvořák, R., 2002. Upichování, zapichování a soustružení ve všech směrech. In: *Obráběcí stroje a technologie*, [online]. MM průmyslové spektrum, č. 4. [cit. 22.2.2021]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/upichovani-zapichovani-a-soustruzeni-ve-vsech-smerech.html>

Fabrice, L., 2021. *Plazma ve strojírenství* [online]. [cit. 27.2.2021]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/14456533/>

Fiutsro.eu, 2021. *Řezání materiálu Hořice* [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <http://www.fiutsro.eu>

Gestová, M., 2012. *Speciální metody obrábění* [online]. [cit. 26.2.2021]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/ZAV2-Speciální-metody-obrábění-UT.pdf>

Gumex.cz, 2021. *Řezání vodním paprskem* [online]. [cit. 26.2.2021]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/sluzby/profily-a-vyroba-tesneni-75/rezani-vodnim-paprskem-46>

Hospimed, 2021. *CO2 a Thulium lasery* [online]. [cit. 7.2.2021]. Dostupné z: <https://medicina.hospimed.cz/obory/lasery/>

Iscar, 2019. Produktivní upichování s nástroji TANG-GRIP. In: *Obráběcí stroje a jejich příslušenství*. [online]. Technický týdeník. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/obrabeci-stroje-a-jejich-prislusenstvi/produktivni-upichovani-s-nastroji-tang-grip_47258.html

Kašpar, J., 2019. *Autogenní technologie a jejich praktické využití* [online]. [cit. 22.2.2021]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/svarovani-a-deleni-materialu/autogenni-technologie-a-jejich-prakticke-vyuziti-258>

Kašpar, J., 2011. Tepelné dělení materiálu kyslíkem. In: *Spojování a dělení materiálu*. [online]. MM průmyslové spektrum, č. 4. [cit. 28.2.2021]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tepelne-deleni-materialu-kyslikem>

Kocman, K., Prokop, J., 2005. *Technologické obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-214-3068-0.

Kořán, P., 2013. *Historický vývoj laserového řezání* [online]. [cit. 24.2.2021]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery--laserove-rezani-laser-cutting-129>

KUSALA, J., 2004. *Lasery kolem nás* [online]. [cit. 2.3.2021]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/obsah.htm>

Lascam.cz, 2015. *Rozdělení laserů* [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>

Lascam.cz, 2017. *Základní rozdělení laserového řezání* [online]. [cit. 21.2.2021]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/zakladni-rozdeleni-laseroveho-rezani/>

Lenfeld, L., 2021. Technologie plošného tváření – stříhání. In: *Technologie II*. [online]. Liberec: Technická univerzita. [cit. 20.2.2021]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/06.htm#061

Lpm.cz, 2021. *Soustředěná energie spojování ultrazvukem* [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <https://www.lpm.cz/cs/spojovani-ultrazvukem>

Lt.cz, 2021. *Možně dělení typů laserů* [online]. [cit. 26.2.2021]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>

Lupták, L., Šmarda, L., 2016 Učební text pro obor instalatér 1. ročník. Střední škola polytechnická, Brno. ISBN 978-80-88058-26-7.

Mall.cz, 2021. *Pákové nůžky na plech* [online]. [cit. 20.2.2021]. Dostupné z: <https://www.mall.cz/nuzky-noze-pilky/shumee-pakove-nuzky-na-plech-200-mm-modre-100019134157?tab=parameters>

Marek, P., 2018. Trendy v automatizaci u pohledu dodavatele robotů. In: *Digitalizace výrobních a firemních procesů*. [online]. MM průmyslové spektrum, č. 3. [cit. 22.2.2021]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-automatizaci-z-pohledu-dodavatele-robotu>

Metaweld.cz, 2021. *Plazmové řezání – Jak vybrat plazmovou řezačku* [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <https://www.metaweld.cz/plazmove-rezani-jak-vybrat-plazmovou-rezacku/>

Mrňa, L., 2021. Brno. *Využití výkonových laserů ve strojírenské praxi svařování, dělení a další technologie* [online] [cit. 2.3.2021]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2012/F5900/um/prezen/mrna_dendero.txt

Mudra, O., 2013. *Naklápěcí řezací hlava při plazmovém obrábění*. Brno [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30308549.pdf>

Narran.cz, 2021. *Laserové řezání* [online]. [cit. 25.2.2021]. Dostupné z: <https://narran.cz/aplikace-laseru/laserove-rezani>

Navrátil, L., Rosina, J. et al., 2005 *Medicínská biofyzika*. Praha: Grada Publishing, ISBN 978-80-247-1152-2

Netme.cz, 2021. *Elektronový paprsek* [online]. [cit. 7.2.2021]. Dostupné z: <http://netme.cz/cs/electron-beam/>

Nodo-shop.cz, 2021. *Oboustranný pilový list* [online]. [cit. 22.2.2021]. Dostupné z: <https://www.nodo-shop.cz/pilky/pilove-platky-na-kov-oboustranne-300-mm-baleni-3-ks>

Oshiro, T., 2021. *Laser v medicíně* [online]. [cit. 25.2.2021]. Dostupné z: <http://www.therapy.cz/fyzikalni-parametry-laseru.php>

Palma, A., 2013. Spojování a řezání ultrazvukem. In: *Technologie tváření materiálu*. [online]. MM průmyslové spektrum, č. 4. [cit. 28.2.2021]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/spojovani-a-rezani-ultrazvukem>

Plasmacam.com, 2004. *Geometric Shapes products* [online]. [cit. 20.2.2021]. Dostupný z: <http://www.plasmacam.com/geometric.php>

Profilaser.eu, 2021. *Řezací lasery* [online]. [cit. 26.2.2021]. Dostupné z: <https://www.profilaser.eu/rezaci-lasery/>

Ptáček, L. et al., 2002. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN: 80-7204-283-1

Ptáček, L. et al., 2003. *Nauka o materiálu I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN: 80-7204-248-3

Rezani-cnc.cz, 2021. *Princip řezání vodním paprskem* [online]. [cit. 24.2.2021]. Dostupné z: <http://www.rezani-cnc.cz/princip-rezani-vodnim-paprskem.html>

Řasa, J., 2008. Kerečanicinová, Z. Nekonvenční metody obrábění. In: *Měření ve strojírenské výrobě*. [online]. MM průmyslové spektrum, č. 6. [cit. 28.2.2021]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2>

Řasa, J., 2008. Kerečanicinová, Z. Nekonvenční metody obrábění. In: *Stroje a technologie třískového obrábění*. [online]. MM průmyslové spektrum, č. 5. [cit.

28.2.2021]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>

Řasa, J., Kerečaninová, Z., 2008. Nekonvenční metody obrábění. In: *Technologie tváření, spojování a dělení materiálu*. [online]. MM průmyslové spektrum, č. 8. [cit. 28.2.2021]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil>

Řasa, J., Pokorný, P., Gabriel, V., 2005. *Strojírenská technologie 3. 2. díl*. 2. vyd. Praha: Scientia, ISBN 80-718-3336-3.

Sandvik. C. 2021. *Upichování* [online]. [cit. 21.2.2021]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/parting-grooving/pages/parting-off.aspx>

Shinkmann.cz, 2021. *Plazmové řezání, řezání plazmou, plazmové zdroje, plasma* [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/plazma>

Siad.com, 2021. *Řezání plazmou* [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <https://www.siad.com/cs/odvetvi/svarovani-a-rezani/pouziti/rezani-plazmatem>

Slaný, M., Dvořáková, J., Dvořák, J., 2015. *Nekonvenční technologie obrábění* [online]. TECHMAGAZÍN. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/2332>

SOU Slaný, 2021. *Řezání kyslíkem a plazmou* [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <http://zak.iss-slany.cz/?id=260&action=detail&presenter=Material>

Studentské.cz, 2021. *Řezání* [online]. Strojírenství. [cit. 28.2.2021]. Dostupné z: <https://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/ezn.html>

Šmíd, J. 2009. Aplikace řezání vodním paprskem. In: *Pohony a jejich průmyslové aplikace* [online]. MM průmyslové spektrum, č. 11. [cit. 6.2.2021]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-rezani-vodnim-paprskem>

Šplíchal, J., 2020. *Dělení materiálů laserovým paprskem je stále na vzestupu zájmu* [online]. [cit. 28.2.2021]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/svarovani-a-deleni-materialu/deleni-materialu-laserovym-paprskem-je-stale-na-vzestupu-zajmu-591>

Techmagazín.cz, 2016. *Chlazení přímo na břit „DirectCooling“* [online]. TECHMAGAZÍN. [cit. 26.2.2021]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/45949>

Technickytydenik.cz, 2014. *Tepelné dělení materiálu kyslíkem – porovnání s ostatními metodami a praktické aplikace.* [online]. Technický týdeník. [cit. 28.2.2021]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/tepelne-deleni-materialu-kyslikem-porovnani-s-ostatnimi-metodami-a-prakticke-aplikace_25452.html

Tejkalová. A., 2013. *Nástroje a strategie použití pro upichování a zapichování,* [online]. SECO. In: Industryeu.cz. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: https://www.industry-eu.cz/novinky-a-clanky/nastroje-a-strategie-pouziti-pro-upichovani-a-zapichovani_13278

Trumpf.com, 2010. *Sublimační řezání* [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/laserove-rezani/sublimacni-rezani/

Voharek, L., 2021. *Technologie – Dělení materiálu (řezání)* [online]. [cit. 21.2.2021]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11325058/>

Vondráček, F., 2021. *Metody obrábění* [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/TE2BP_MTK2/um/7_8_metody_obrabeni.pdf

Vzdělání pro život^a, 2021. *Plamenové řezání kyslíkem* [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.com/2011/03/3121-plamenove-rezani-kyslikem.html>

Vzdělání pro život^b, 2021. *Řezání.* [online] [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.com/2011/03/3153-rezani.html>

Vzdělání pro život^c, 2021. *Stříhání.* [online] [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.com/2011/03/3851-strihani.html>

Wartec.cz, 2021. *Ultrazvukové ruční řezací jednotky* [online]. [cit. 23.2.2021]. Dostupné z: <https://wartec.cz/ultrazvukove-rezani/>

Wiretech.cz, 2021. *Ultrazvukové řezání* [online]. [cit. 21.2.2021]. Dostupné z: <https://www.wiretech.cz/c/ultrazvukova-technologie/ultrazvukove-rezani>

Yamazaki, M., 2015. *Typy laserového řezání* [online] [cit. 2.3.2021]. Dostupné z: <https://www.mazakeu.cz/blog/typy-laserového-řezání-plechů/>

Žáček, M., 2018. *Průmyslové roboty: Jaké jsou jejich druhy* [online]. [cit. 21.2.2021]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/prumyslove-roboty-jake-jsou-jejich-druhy/>

Žanta, J., Janoušek, J., 2021. *Nekonvenční technologie obrábění* [online]. [cit. 22.2.2021]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/1918448/>

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Pákové nůžky na plech (Mall.cz, 2021)	8
Obrázek 1.2: Upichování (Sandvik, 2021)	9
Obrázek 1.3: Oboustranný pilový list (Nodo-shop.cz, 2021).....	10
Obrázek 3.1: Tavné řezání laserovým paprskem (Korář, 2013)	13
Obrázek 3.2 Výrobky vyřezané laserem (Dillinger, 2019).....	14
Obrázek 3.3: Konstrukce Nd:YAG laseru (Lascam, 2021).....	16
Obrázek 3.4: Konstrukce plynového CO ₂ laseru (Lascam, 2021).....	17
Obrázek 4.1: Výrobky vyřezané plazmou (Plasmacam.cz, 2021).....	20
Obrázek 4.2: Řezání plazmovým hořákem (Dillinger, 2019).....	20
Obrázek 4.3: Tvary řezu při různých způsobech řezání (Dillinger, 2019).....	21
Obrázek 4.4: Plazmový řezací systém (Dostál 2016).....	21
Obrázek 4.5: Hořák s plynovou stabilizací s transferovým obloukem (Fabrice, 2021).....	23
Obrázek 4.6: Plazmový hořák s vodní stabilizací (Fabrice, 2021).....	23
Obrázek 4.7: Konvenční metoda řezání (Mudra, 2013).....	24
Obrázek 4.8: Dvou plyná metoda řezání (Mudra, 2013).....	24
Obrázek 4.9: Metoda řezání stíněná vodou (Mudra, 2013).....	25
Obrázek 5.1: Řezací hořák (Dillinger, 2019).....	27
Obrázek 5.2: Vady při řezání oceli kyslíkovým plamenem (Dillinger, 2019).....	27
Obrázek 6.1: Princip řezání vodním paprskem (Rezani-cnc.cz, 2021).....	30
Obrázek 6.2: NC stroj pro řezání kyslíkovým plamenem (Dillinger, 2019).....	31
Obrázek 6.3: Uspořádání vyřezávaných dílů (řezný plán) (Dillinger, 2019).....	31
Obrázek 6.4: Ochranné mříže při svařování průmyslovým robotem (Dillinger, 2019).....	31

Obrázek 6.5: Kompaktní sestava robotu Teodor (Šmíd, 2021).....	32
Obrázek 6.6: Řez munice dálkově ovládaným manipulátorem v dílenských podmínkách (Šmíd, 2021).....	33
Obrázek 7.1: Zařízení pro řezání paprskem elektronů (Vondráček, 2021).....	35
Obrázek 7.2 Princip řezání paprskem elektronů (Žanta a Janoušek, 2021).....	35
Obrázek 8.1: Spojování a řezání ultrazvukem (Palma, 2021).....	37
Obrázek 8.2: Princip řezání ultrazvukem (Řasa, Pokorný a Gabriel, 2005).....	37

Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Výhody a nevýhody stříhání.....	8
Tabulka 1.2: Výhody a nevýhody upichování.....	9
Tabulka 1.3: Výhody a nevýhody řezání.....	10
Tabulka 3.1: Výhody a nevýhody řezání laserem.....	14
Tabulka 4.1: Výhody a nevýhody řezání plazmou (Shinkmann.cz, 2021).....	19
Tabulka 5.1: Výhody a nevýhody řezání kyslíkem.....	25
Tabulka 6.1: Výhody a nevýhody řezání vodním paprskem (Gumex.cz, 2021)	28
Tabulka 7.1: Výhody a nevýhody řezání paprskem elektronů (Bodycote.com, 2021)	33
Tabulka 8.1: Výhody a nevýhody řezání ultrazvukem (Belančík, 2013).....	35

Seznam použitých zkratk

CO₂ – oxid uhličitý

m·min⁻¹ – metr za minutu

nm – nanometr

mm – milimetr

Kw – kilowatt

W·cm⁻² – watt na centimetr krychlový

W – watt

°C – stupeň Celsia

m – metr

MPa – megapaskal

kN – kilonewton

UV záření – ultrafialové záření

dB – decibel