



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Technologie laserového dělení trubek

Laser cutting of tubes

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

David STEHLÍK

Studijní program: Teoretický základ strojího inženýrství

Studijní obor: Bez oboru

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stehlík** Jméno: **David** Osobní číslo: **474820**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Technologie laserového dělení trubek

Název bakalářské práce anglicky:

Laser cutting of tubes

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše v oblasti technologie dělení trubek
- 2) Možnosti využití laserů pro dělení
- 3) Typy laserů vhodných pro řezání materiálu
- 4) Technicko-ekonomické srovnání laserového dělení a konvenčních metod dělení trubek

Seznam doporučené literatury:

- 1) POWELL, John. CO₂ laser cutting. 2nd ed. New York: Springer, 1998. ISBN 9781852330477.
- 2) DENKER, Boris a Eugene SHKLOVSKY, ed. Handbook of solid-state lasers: materials, systems and applications. Oxford: Woodhead Publishing, 2013. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials. ISBN 978-0-85709-272-4.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**


Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Zdeněk Pitrmuc
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

23. 6. 2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci s názvem „Technologie laserového dělení trubek“ vypracoval samostatně s použitím podkladů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne

.....

Poděkování

Děkuji Ing. Zdeňku Pitrmucovi za vedení této práce, věnovaný čas a cenné připomínky.

Anotační list

Jméno autora: David Stehlík
Název: Technologie laserového dělení trubek
Název anglicky: Laser cutting of tubes
Rok: 2020
Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor: Bez oboru
Ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Bibliografické údaje: Počet stran: 46
Počet obrázků: 22
Počet tabulek: 21

Klíčová slova: Laser, laserové řezání, profilovací linka, trubky

Keywords: Laser, laser cutting, roll forming line, tubes

Anotace: Práce se zabývá technologií laserového řezání v aplikaci pro dělení trubek v profilovacích linkách. Popisuje typy laserů vhodných pro tuto aplikaci a principy jejich fungování. Technologii laserového řezání dále porovnává s konvenčními technologiemi dělení trubek z hlediska nákladů na provoz.

Annotation: The thesis focuses on laser cutting technology in the application of tube cutting in roll forming lines. It describes types of lasers suitable for this application and principles of their operation. It also compares laser cutting technology with conventional methods of tube cutting in terms of costs of operation.

Obsah

1.	Úvod.....	8
2.	Konvenční metody dělení trubek.....	9
2.1.	Dělení pilovým kotoučem	9
2.2.	Dělení pásovou pilou.....	10
2.3.	Střih s odpadem	12
2.3.1.	Dvouosý střih s odpadem.....	12
2.4.	Bezodpadový střih	13
3.	Fyzikální princip laseru.....	14
4.	Typy laserů používaných pro řezání.....	16
4.1.	Plynové lasery	16
4.1.1.	CO ₂ lasery	16
4.2.	Pevnolátkové lasery	18
4.2.1.	Tyčový Nd:YAG laser.....	19
4.2.2.	Diskový laser.....	20
4.2.3.	Vláknový laser	21
4.3.	Polovodičové lasery	21
4.3.1.	Přímý diodový laser (DDL)	22
5.	Laserové řezání.....	24
5.1.	Metody laserového řezání	24
5.1.1.	Oxidační řezání.....	24
5.1.2.	Tavné řezání	25
5.1.3.	Sublimační řezání	26
5.2.	Laserový řezací stroj.....	26
5.2.1.	Zdroj laseru	26
5.2.2.	Procesní (řezací) hlava laseru	26
5.2.3.	Vedení laserového paprsku.....	27
5.2.4.	Chladicí jednotka	27
5.2.5.	Mechanismus zajišťující pohyb	27
6.	Rozbor současného stavu	29
7.	Technicko-ekonomické srovnání laserového dělení a konvenčních metod dělení trubek	31
7.1.	Stanovení parametrů trubky pro potřeby technicko-ekonomického srovnání metod dělení trubek.....	31
7.2.	Vstupní parametry výroby pro potřeby technicko-ekonomického srovnání metod dělení trubek	31
7.3.	Srovnání metod dělení trubek z hlediska investičních nákladů	32
7.4.	Srovnání metod dělení trubek z hlediska provozních nákladů	32
7.4.1.	Rozpad nákladů na provoz jednotky dělení pilovým kotoučem.....	32
7.4.2.	Rozpad nákladů na provoz jednotky dělení dvouosým stříhem.....	35
7.4.3.	Rozpad nákladů na provoz jednotky orbitálního dělení laserem	36

7.4.4. Shrnutí srovnání metod dělení trubek z hlediska provozních nákladů	38
8. Závěr	41
Použité zdroje.....	42
Seznam obrázků	45
Seznam tabulek	46

1. Úvod

Využívání laserového paprsku pro dělení je v porovnání s ostatními metodami dělení materiálu mladá technologie, která je však díky rychlému vývoji v této oblasti a s tím spojeným zlevňováním využívána stále častěji v celé řadě různých aplikací.

První laser sestrojil fyzik Theodore Maiman v roce 1960, tehdy ještě bez jasné vize o praktickém využití této nové technologie [1]. Aplikace v různých oborech lidské činnosti na sebe však nenechaly dlouho čekat. V oblasti řezání a vrtání byl laser poprvé využit v roce 1965 firmou Western Electric při výrobě diamantových průvleků. O dva roky později německý vědec Peter Houldcroft poprvé použil CO₂ laser pro řezání ocelového plechu [2]. Od té doby je laser pro dělení materiálu hojně používán, a to zejména pro svou vysokou produktivitu a dobrou kvalitu řezu i při vysokých řezných rychlostech.

Mezi další způsoby použití laseru v průmyslu patří svařování, gravírování, čištění či ablace. V poslední době se laser používá také v oblasti aditivních technologií pro kovový 3D tisk [3].

V této práci se zabývám technologií laserového řezání, a to konkrétně v aplikaci pro dělení trubek ve výrobních linkách. Tato aplikace je specifická v tom, že je třeba dělit trubku rovnou během její výroby (za chodu linky). K tomu se používá princip letmého dělení, kde je dělicí jednotka umístěna na vozíku s pojezdem. Při každém dělicím cyklu se nejdříve rychlost vozíku synchronizuje s rychlostí vyráběné trubky, pro zajištění konstantní vzájemné polohy. Následuje samotný dělicí proces, po kterém se vozík vrací zpět do výchozí polohy. Tam čeká, než se vyrobí požadovaná délka trubky a zahájí se další dělicí cyklus.

Práce se skládá z několika částí. V první, rešeršní části, popisuji konvenční metody dělení, které se pro tuto aplikaci standardně používají. Podrobněji se pak věnuji technologii laserového řezání jako jednou z možných alternativ ke konvenčním metodám. Popisuji princip a jednotlivé metody laserového řezání, typy laserů, které jsou pro řezání materiálu použitelné, principy jejich fungování a zhodnocuji výhody a nevýhody jejich použití.

Následuje technicko-ekonomická část práce, ve které technologii laserového dělení trubek porovnávám s konvenčními technologiemi dělení materiálu, a to z hlediska nákladů na pořízení a provoz takové technologie. Primárním cílem této práce je pak zhodnotit, zda může být použití technologie laserového dělení pro tuto konkrétní aplikaci ekonomicky přínosné.

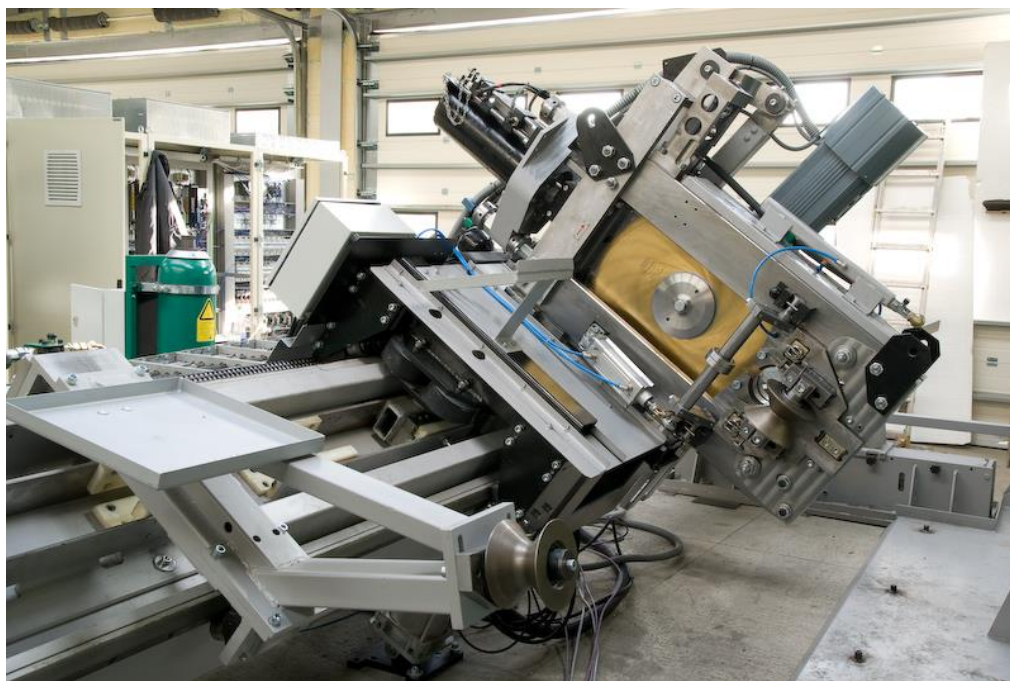
2. Konvenční metody dělení trubek

Konvenční metody dělení trubek jsou založeny na mechanickém působení nástroje na stěnu trubky. Trubky se dělí buď třískově, nebo beztřískově. Mezi třískové způsoby dělení patří zejména řezání pilou, a to buď v podobě pilového kotouče, nebo pásové pily. Beztřískové dělení je v oblasti dělení trubek reprezentováno stříhem, a to buď odpadovým, nebo bezodpadovým [4].

Technologie vhodná pro danou aplikaci se volí na základě parametrů dělené trubky (materiál, rozměry trubky a tloušťka stěny), požadavků na kvalitu hrany a požadované produktivity.

2.1. Dělení pilovým kotoučem

Dělení pilovým kotoučem je jednou z nejuniverzálnějších a nejrozšířenějších metod dělení trubek v linkách [5]. Jde o metodu třískového dělení. Po synchronizaci rychlosti linky s rychlostí vozíku letmého dělení začne rotující pilový kotouč konat příslušný pohyb. Zuby pilového kotouče odebírají třísky ze stěny trubky, dokud nedojde k úplnému oddělení trubky. Vozík se pak vrací zpět do výchozí polohy. Příklad jednotky letmého dělení pilovým kotoučem je na obrázku 1.

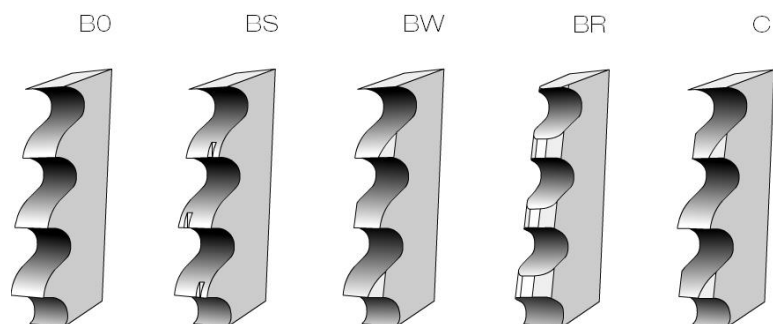


Obrázek 1: Jednotka letmého dělení kotoučovou pilou

Pilový kotouč může být celistvý – v takovém případě je celý vyrobený z nástrojové nebo rychlořezné oceli, nebo segmentový, jenž má ocelové tělo, na které se pomocí nýtů připevňují segmenty se zuby z rychlořezné oceli [6].

Rozlišuje se několik typů tvaru zubů pilových kotoučů, které se volí podle požadované aplikace a řezaného materiálu. Tvary použitelné pro řezání trubek jsou uvedeny na obrázku 2. Pro řezání nerezových trubek se obvykle používají kotouče s tvarem zubu B0 nebo BW. Zuby BW jsou opatřeny lamačem třísky, který způsobí rozlomení třísky na dvě části, a usnadňuje tak odvod třísky z místa řezu. To je vhodné zejména pro trubky s větší tloušťkou stěny (nad 3 mm). Úhel čela γ a úhel hřbetu α se volí v závislosti na řezaném materiálu, pro řezání nerezové oceli bývá $\gamma = 16^\circ - 18^\circ$ a $\alpha = 6^\circ - 8^\circ$ [7].

Zejména pro dělení nerezových trubek je také možné použít speciální kotouče s břitovými destičkami ze slinutého karbidu [6]. Ty zajišťují vyšší produktivitu a lepší kvalitu hrany trubky po řezu. Nevýhodou je jejich vyšší cena.



Obrázek 2: Tvarů zubů pilových kotoučů pro dělení trubek [7]

Pomocí pilového kotouče je možné dělit trubky velkého rozsahu průměru i tloušťek stěny. Obecně je touto metodou možné dělit tlustostěnné i tenkostěnné trubky, při zajištění dostatečné ostrosti řezného kotouče i s poměrně dobrou kvalitou hrany. V porovnání s pásovou pilou má také řezání kotoučem kratší časy řezu díky vyšší řezné rychlosti, a tedy možnosti větších přísuvů [8]. V porovnání se stříhem je ale časově náročnější.

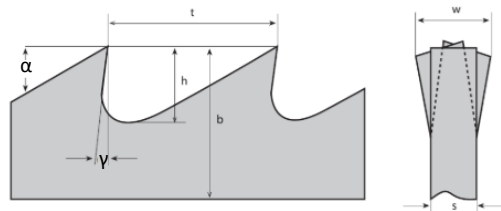
Mezi nevýhody této metody patří zejména potřeba časté výměny a broušení nástroje, což je spojené s odstávkou linky. V porovnání s pásovou pilou se používá širší nástroj, což může způsobovat materiálové ztráty. To bývá problém zejména při dělení na krátké finální délky přímo v lince. Při procesu řezání také vznikají třísky, které mohou ulpívat na stěně a poškrábat ji, což může být v mnoha aplikacích nepříjemné.

2.2. Dělení pásovou pilou

Metoda dělení trubek pásovou pilou je principiálně velmi podobná metodě dělení pilovým kotoučem, proto pro ni platí i podobné výhody a nevýhody. Rotační pohyb pilového kotouče je v tomto případě nahrazen přímočarým pohybem pásové pily. Pilový pás je napnut mezi dva kotouče, přes které probíhá nekonečné odvíjení. Pro dělení trubek se obvykle používá bimetalový pás. Ten je svařený z pásu z konstrukční oceli a pásu z rychlořezné oceli, ve kterém jsou vyfrézovány zuby. Pro řezání tvrdých materiálů je také možné použít pás s pájenými zuby ze slinutého karbidu [9].

Základní geometrické charakteristiky pilového pásu jsou patrné z obrázku 3. Pilový pás je kromě šířky, tloušťky a výšky charakterizován také šířkou rozvodu. Ta bývá větší než tloušťka samotného pásu. Díky tomu je prořez materiálu větší než tloušťka pásu, čímž se zamezuje nadměrnému tření na bocích pásu [10].

- b = šířka pásu
- s = tloušťka pásu
- h = výška zubu
- t = rozteč zubu
- γ = úhel čela
- α = úhel hřbetu
- w = šířka rozvodu



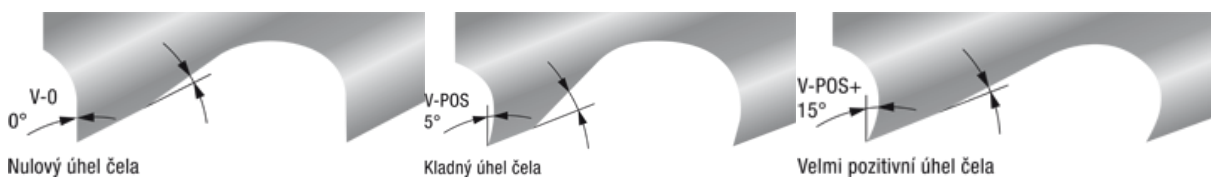
Obrázek 3: Geometrické charakteristiky pilového pásu [10]

Další charakteristikou pásu je rozteč zubů. Ta se však obvykle udává v převrácené hodnotě TPI (teeth per inch), která udává počet zubů pásu na palec (25,4 mm). Rozteč může být buď konstantní, nebo variabilní. V případě variabilní rozteče se periodicky opakuje skupina několika zubů, v rámci jedné skupiny je rozteč mezi jednotlivými zuby různá. Variabilní ozubení se značí dvěma čísly s lomítkem, kde jedno číslo vyjadřuje minimální a druhé maximální rozteč zubů ve skupině. Variabilní rozteč omezuje vibrace

vznikající během dělicího procesu. Při řezání trubek se rozteč zubů volí podle průměru dělené trubky a tloušťky stěny. Pro standardní trubky s tloušťkou stěny do 3 mm a průměru do 100 mm je vhodný pás s variabilní roztečí 10/14 TPI [10].

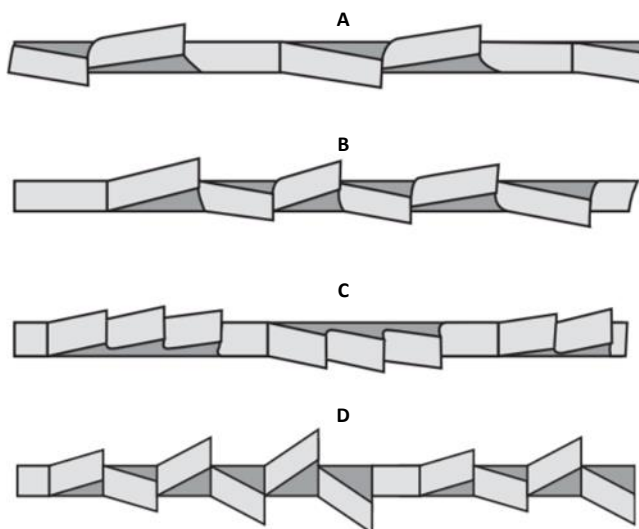
Úhel čela je další důležitou charakteristikou pilového pásu. Standardní je úhel nulový, který je vhodný pro řezání běžných druhů ocelí. Uplatňuje se u pásů s konstantní i variabilní roztečí, a to i pro jemnou rozteč vhodnou pro dělení tenkostěnných trubek (až 18 TPI pro konstantní a 14/10 TPI pro variabilní) [11].

Variabilní ozubení s velmi pozitivním úhlem čela (15° , V-POS+) je zase vhodné pro houževnaté materiály, oceli tvořící dlouhou třísku a nerezové oceli. To je ale dostupné pouze v hrubých roztečích (max. 3/4 TPI) [11]. Pro dělení nerezových tenkostěnných trubek by tak patrně bylo vhodné použít kompromisní řešení ve formě zubu s mírně kladným úhlem čela (5° , V-POS), který je dostupný v rozteči až 8/11 TPI.



Obrázek 4: Úhly čela pilového pásu [11]

Další charakteristikou pásu je druh rozvodu, jehož nejběžnější varianty jsou uvedeny na obrázku 5. Rozvod označený A je standardní, používá se na pásích s konstantní roztečí menší než 10 TPI. Rozvod B je variabilní, ten se standardně používá u pásů s variabilní roztečí. Vlnitý rozvod označený C je vhodný pro pásy s velmi jemnou roztečí, který se používá i pro dělení tenkostěnných trubek. Poslední možností je variabilní progresivní rozvod D, v němž se šířka rozvodu v jedné skupině zubů postupně mění [10].



Obrázek 5: Druhy rozvodu pilového pásu [10]

I dělení pilovým pásem je třísková metoda dělení, úběr materiálu je však v porovnání s pilovým kotoučem menší díky nižší tloušťce pilového pásu (obvykle 0,9 - 1,6 mm). Pilovým pásem je navíc možné řezat trubky až do průměru cca 1000 mm [8].

Nevýhodou je obvykle nižší rychlost přísuvu oproti pilovému kotouči a s tím spojená nižší produktivita tohoto řešení. Vhodné profily je sice pomocí pásové pily možné dělit ve svazku, což obecně produktivitu zvyšuje, to ale při aplikaci na letmé dělení ve výrobní lince není použitelné, protože se při každém cyklu

dělí pouze jedna trubka. Výměna pásu je složitější, odstávka linky v případě otupení nástroje tak bývá delší. Řez také bývá méně kvalitní, je u něj větší riziko vzniku otřepů a nutnosti jejich odstranění při následné operaci [8].

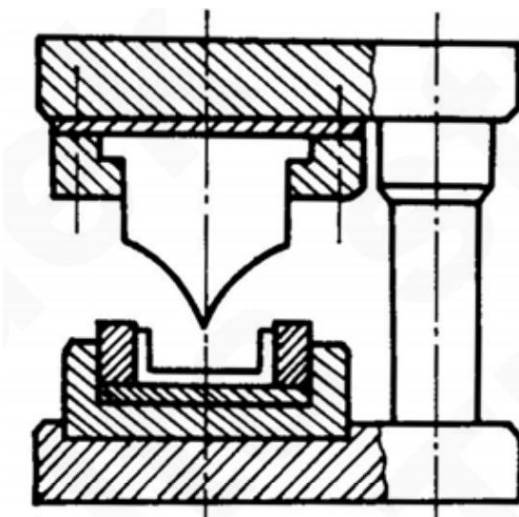
2.3. Střih s odpadem

Při stříhání trubek v lince se obvykle používá metoda stříhu s odpadem. Střížným nástrojem je v tomto případě klínový nůž se špičkou uprostřed (obrázek 6). Při procesu stříhu musí být trubka pevně upnuta do střížnice tak, aby se při tlaku nože na stěnu zamezilo deformaci trubky. Špička nože se nejprve vtlačí do stěny trubky a samotný stříh pak probíhá po obou stranách trubky zároveň. Tím se docílí rovnoměrného rozložení tlaku střížného nástroje a omezí se deformace stěny trubky. Při odpadovém stříhání vzniká odpad v podobě špony, jejíž šířka odpovídá tloušťce nože, a bývá cca 1,2-2,2x tloušťky stěny [4].

Výhodou stříhu je zejména jeho vysoká produktivita (obecně až 120 stříhů za minutu, pro aplikaci letmého dělení max. cca 20 stříhů za minutu), nejvyšší ze všech porovnávaných konvenčních metod dělení trubek. V případě odpadového stříhání je další výhodou vysoká kvalita střížné hrany bez otřepů. Pevné upnutí trubky ve střížnici také přesně definuje místo stříhu a díky tomu lze dodržet délkové tolerance v řádech desetin milimetru [5].

I střížné nástroje je třeba brousit, frekvence broušení však bývá nižší (nůž vydrží až 100 000 stříhů), nástroj je navíc možné přebrousit mnohokrát za sebou. Nevýhodou stříhání je, že pro každý rozměr je třeba používat speciální střížnici, která musí pevně obepínat stříhanou trubku, proto jde obecně o metodu vhodnou spíše pro velkosériovou výrobu [4]. Tou ale výroba trubek bezesporu je.

Stříh je navíc vhodný pouze pro trubky s průměrem cca 3–150 mm a tloušťkou stěny 0,5-5 mm [5]. U menších tlouštěk stěny by docházelo vlivem tlaku nástroje k deformaci trubky, u větších by nůž obtížně pronikal stěnou trubky.



Obrázek 6: Nůž pro stříh s odpadem [4]

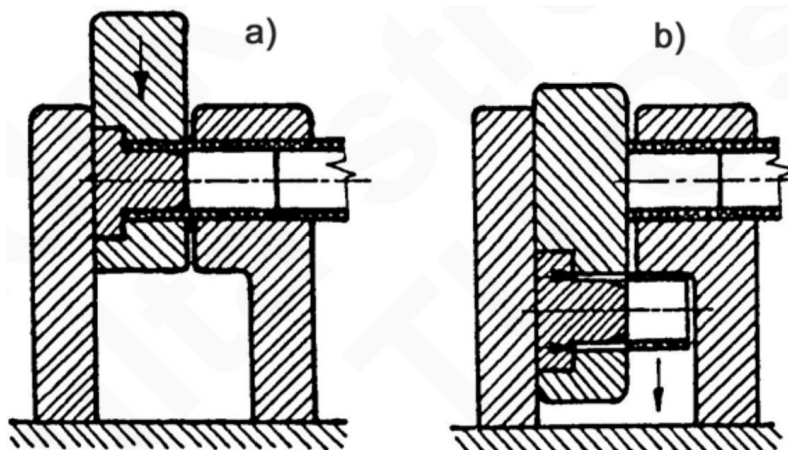
2.3.1. Dvouosý stříh s odpadem

Za účelem omezení deformace stěny trubky během stříhu se často používá takzvaný dvouosý stříh. V tomto případě se ke stříhu použijí dva samostatné nože, pohybující se ve dvou navzájem kolmých osách. V první fázi pomocný nůž odebere vrchní část stěny trubky, čímž usnadní počáteční proniknutí stěnou trubky pro špičku hlavního nože [4]. Tím se omezuje deformace stěny trubky, zlepšuje kvalita hrany po stříhu a zároveň výrazně prodlužuje životnost hlavního nože. Nevýhodou je lehce prodloužená doba dělicího procesu.

2.4. Bezodpadový stříh

Další možností stříhání trubek je stříh bezodpadový. V tomto případě se trubka v místě požadovaného stříhu upne mezi dvě střížnice – stacionární a posuvnou. Radiálním pohybem pohyblivé střížnice následně dojde k ustřížení trubky, jak je patrné z obrázku 7. Aby během procesu nedocházelo k deformaci trubky, bývá obvykle její vnitřek vyplněn posuvným trnem [4].

Jelikož však při tomto procesu nevzniká špona, nebývá ustřížená hrana zdaleka tak kvalitní jako v případě odpadového stříhu [5]. Z tohoto důvodu není metoda příliš vhodná pro dělení v aplikacích, kde je důležitá kvalita konce trubky.



Obrázek 7: Schéma bezodpadového stříhu [4]

3. Fyzikální princip laseru

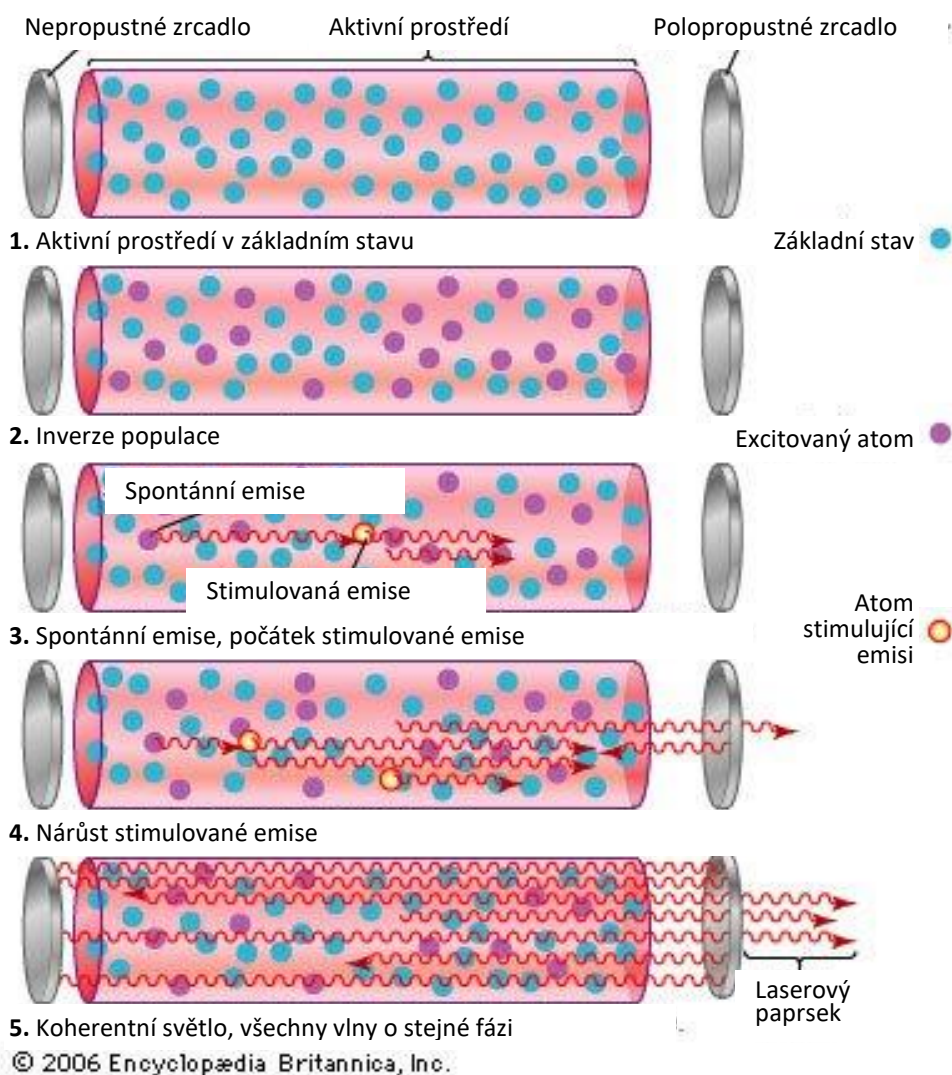
Základem každého laseru je látka, která má oddělené energetické hladiny elektronů. Tato látka se nazývá aktivní prostředí laseru. Může jí být v principu látka pevného, kapalného i plynného skupenství, kapalně lasery se ale používají jen velmi zřídka. V aktivním prostředí dochází ke vzniku laserového záření, a to na základě principu stimulované emise [12].

Pro zahájení emise laserového záření je nejdříve do aktivního prostředí potřeba přivést budící energii. Ta je přiváděna budícím zdrojem a může mít různé formy, nejčastěji jde o průchod elektrického proudu nebo ozáření jasným světlem. Když budící záření dopadne na elektron molekuly aktivní látky, předá mu část energie, čímž ho excituje na vyšší energetickou hladinu. Elektron má však obecně sklon držet se v hladině co nejnižší energetické náročnosti, proto se za normálních okolností prakticky ihned vrací na nižší energetickou hladinu a při návratu emituje přebytečnou energii ve formě elektromagnetického záření (fotonu). Tento princip se nazývá spontánní emise záření, a tímto způsobem emitovaný foton tvoří úplný základ laserového paprsku [12].

Budící záření přiváděné do aktivního prostředí však způsobuje, že většina elektronů je v něm udržována v excitovaném stavu (na vyšší energetické hladině). Tomuto stavu se říká inverze populace. Pokud emitovaný foton projde kolem elektronu v excitovaném stavu, způsobí, že elektron přeskočí zpět na nižší energetickou hladinu a emituje přitom foton ve stejném směru a o stejné vlnové délce a fázi, jako měl foton, který tuto změnu způsobil. V tomto případě jde již o stimulovanou emisi záření [12].

Takto generované záření je ale velmi slabé a je potřeba ho zesílit. K tomu slouží dvojice zrcadel kolmých na osu trubice s aktivním prostředím, umístěných na obou koncích této trubice. Jedno z nich je nepropustné, druhé je polopropustné s odrazivostí obvykle 99,9 %. Tato optická soustava se nazývá rezonátor [13].

Záření se může v principu emitovat v libovolném směru, ale fotony emitované ve směru jiném než rovnoběžném s osou rezonátoru rychle opustí aktivní prostředí a zaniknou dřív, než nabudou dostatečnou intenzitu. Naopak fotony emitované ve směru osy rezonátoru se odráží mezi zrcadly, opakovaně procházejí aktivním prostředím a strhávají tak s sebou další fotony. Díky tomu vzniká koherentní, nerozbíhavý, monochromatický svazek, což jsou jedinečné vlastnosti záření charakteristické pro laserový paprsek [14]. Ten po nabrání intenzity „prorazí“ polopropustné zrcadlo a je dále veden optickou soustavou až do místa požadované aplikace [13]. Popsaný proces vzniku laserového paprsku je graficky znázorněn na obrázku 8.



Obrázek 8: Princip vzniku laserového paprsku [12]

Rozlišují se dva základní režimy vysílání laserového paprsku, a to režim kontinuální (CW – Continuous Wave) a režim pulzní. V kontinuálním režimu laser emituje záření o konstantní intenzitě a má proto konstantní, na čas nezávislý vyzařovací výkon. Oproti tomu v případě pulzního režimu je laserový paprsek generován v periodicky se opakujících pulzech. Doba trvání těchto pulzů se pohybuje obvykle v řádech milisekund až nanosekund (10^{-3} - 10^{-9} s). V tomto extrémně krátkém časovém úseku laserový paprsek „přenes“ energii akumulovanou od minulého pulzu. Díky tomu dosahuje řádově vyšších špičkových výkonů než laser v CW režimu, mezi pulzy je ale okamžitý výkon nulový. Špičkový výkon pulzního laseru charakterizuje energie přenesená jedním pulzem za dobu trvání tohoto pulzu. Pro porovnání s kontinuálními lasery je třeba stanovit průměrný výkon jako celkovou přenesenou energii za celkový čas [15].

4. Typy laserů používaných pro řezání

Pro řezání materiálu se v současné době používá velké množství typů laserů (viz. tabulka 1), které se liší použitou aktivní látkou, geometrií aktivního prostředí, způsobem buzení či vlnovou délkou generovaného laserového záření.

Tabulka 1: Přehled laserů dostupných pro řezání materiálu [16]

Kategorie	Typ laseru	Vlnová délka [nm]	Buzení	Efektivita	Výkon
Plynový	CO ₂ Laser	10 600	Radio-frekvenční	~10 %	až 5 kW
			Elektrický výboj	~25 %	až 20 kW
Pevnolátkový	Tyčový Nd:YAG laser	1 064	Výbojky/laserové diody	~7 %	až 6 kW
	Diskový laser	1 030	Laserové diody	~15 %	až 16 kW
	Vláknový laser	1 070	Laserové diody	~30 %	až 80 kW
Polovodičový	Diodový laser	970	Elektrický proud	~60 %	až 10 kW

4.1. Plynové lasery

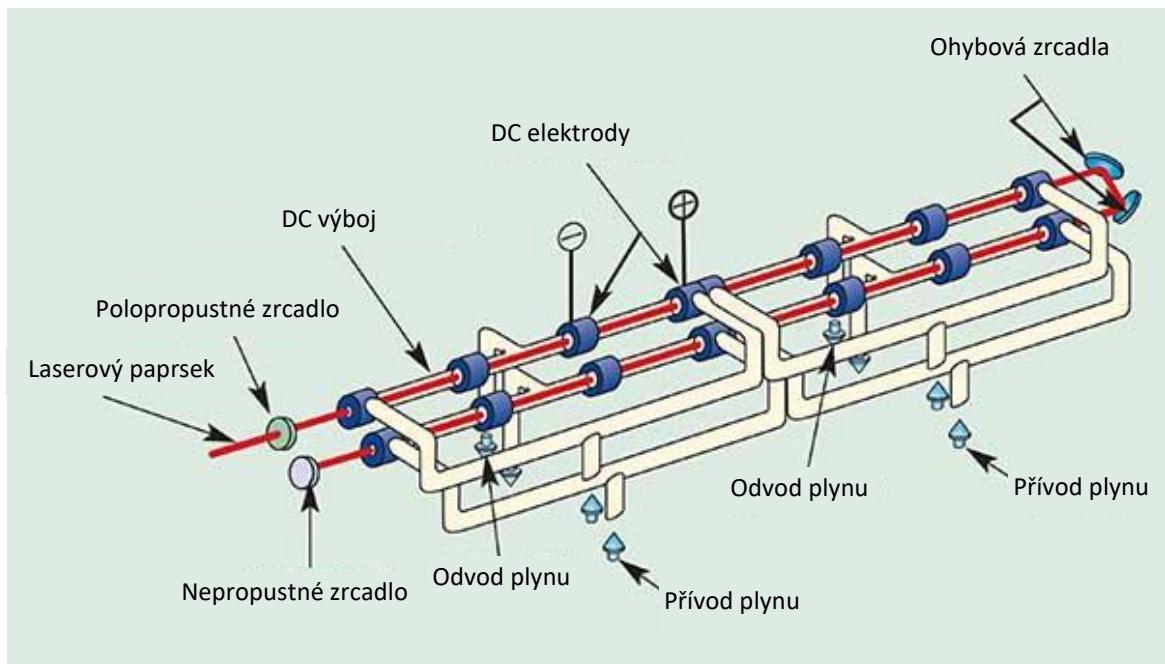
Základem každého plynového laseru je trubice, ve které se nachází plyn tvořící aktivní prostředí. Použitý aktivní plyn významně ovlivňuje vlnovou délku výstupního laserového záření. Dostupné plynové lasery pokrývají všechny oblasti elektromagnetického spektra – od dusíkového laseru s vlnovou délkou typicky 337,1 nm (ultrafialové záření) přes lasery argonové, kryptonové a xenonové s mnoha dostupnými vlnovými délkami napříč celým viditelným spektrem. V průmyslu, zejména pro řezání a svařování, je ale zdaleka nejrozšířenější CO₂ laser s vlnovou délkou 10,6 μm (10 600 nm, infračervené záření).

4.1.1. CO₂ lasery

V průmyslu se z plynových laserů nejčastěji používá CO₂ laser, ve kterém aktivní prostředí tvoří směs oxidu uhličitého, dusíku a hélia [16]. Účinnost CO₂ laseru bývá cca 10-25 %, zbytek přivedené energie se přemění převážně na teplo. Pro zajištění stabilních parametrů laserového svazku je potřeba udržovat teplotu aktivního prostředí konstantní, a soustavu je proto nutné chladit.

Existují dva základní druhy CO₂ laserů, které se liší principem buzení aktivního prostředí. Mohou to být buď lasery buzené elektrickým výbojem (DC excited), nebo lasery buzené radio-frekvenčně (RF excited), nazývané obvykle Slab lasery [17]. Od principu buzení se odvíjí odlišná konstrukce, výkon, kvalita laserového paprsku i princip chlazení těchto laserů.

V případě DC buzeného laseru jsou molekuly aktivního plynu excitovány vysokonapětovým stejnosměrným výbojem mezi dvěma elektrodami. Rezonátor obvykle tvoří trubice s kruhovým průřezem o délce 0,5 m až 1 m a průměru 10-20 mm. Pro vyšší výkony se standardně používá několik trubic za sebou, propojených do optické soustavy [16]. Chlazení DC laseru bývá zajištěno průtočnou konstrukcí laseru, díky které plyn kontinuálně proudí do trubice rezonátoru a chladí se vodou v průtokovém tepelném výměníku mimo rezonátor. K pohonu aktivního plynu soustavou slouží turbína nebo ventilátor [18]. Konstrukce tohoto laseru je znázorněna na obrázku 9.

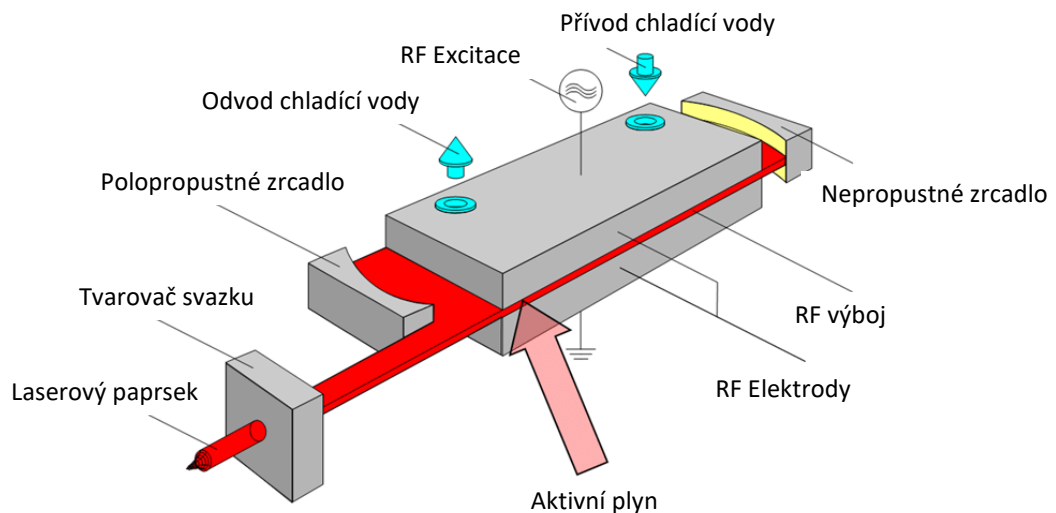


Obrázek 9: Konstrukce průtočného CO₂ laseru buzeného stejnosměrným výbojem [18]

Průtočné DC buzené lasery bývají vhodné pro aplikace vyžadující vysoký výkon (tyto typy laseru dosahují výkonu až 80 kW), jsou tedy vhodné především pro řezání materiálů s velkou tloušťkou stěny. Jejich nevýhodou jsou velké rozměry celého zařízení a s tím spojená zástavbová plocha ve výrobní hale. Další nevýhodou je oproti Slab laseru výrazná spotřeba aktivního plynu [16], kterou je třeba brát v úvahu při ekonomických kalkulacích.

Ve Slab laseru se aktivní plyn budí radio-frekvenčně. Rezonátor v tomto případě tvoří štěrbinu mezi dvěma velkoplošnými, vodou chlazenými měděnými elektrodami, připojenými k radio-frekvenčnímu generátoru [16]. Mezi těmito elektrodami je aktivní plyn uzavřen a nedochází zde k jeho proudění. Chlazení aktivního plynu pak probíhá na principu difuze. Konstrukce Slab laseru je patrná z obrázku 10.

Slab laser má řádově nižší spotřebu aktivního plynu, který stačí pouze jednou za čas vyměnit. Konstrukce Slab laseru je jednodušší a méně prostorově náročná. Paprsek Slab laseru je také stabilnější a koncentrovanější, vytváří proto užší a kvalitnější řez [18]. Slab lasery však nedosahují takových výkonů jako DC lasery. Existují i konfigurace tohoto typu laseru s výkonem cca 5 kW, běžně se ale na trhu vyskytují RF lasery s výkonem řádově stovek wattů, které jsou vhodné spíše pro řezání nekovových materiálů.



Obrázek 10: Konstrukce RF buzeného Slab laseru [19]

Oba zmíněné typy CO₂ laseru generují infračervený laserový paprsek o vlnové délce typicky 10 600 nm. To může být výhoda i nevýhoda. Výhodou je, že laser s takovou vlnovou délkou je schopen řezat materiály až do tloušťky cca 50 mm, což je o mnoho více než zvládnou ostatní typy laserů s kratší vlnovou délkou. Nevýhodou je, že paprsek s takovou vlnovou délkou není možné vést optickým vláknem a obvykle se do místa řezu přenáší pomocí soustavy seřiditelných zrcátek [13]. To znesnadňuje jeho použití zejména v těch aplikacích, kde je obrobek stacionární a řezný pohyb je realizován procesní hlavou laseru. Existují i aplikace umístění procesní hlavy CO₂ laseru na robotické rameno, v takovém případě je paprsek CO₂ laseru veden „hadicí“ s vysokou odrazivostí vnitřní stěny. Takové vedení ale bývá problematické a obvykle se využívá jenom v případech, kde není možné použít laser s kratší vlnovou délkou, jehož vedení je realizováno optickým vláknem [13].

4.2. Pevnolátkové lasery

Pevnolátkové lasery jsou lasery, v nichž aktivní prostředí tvoří pevná látka. Použitá látka ovlivňuje vlnovou délku výsledného laserového paprsku. První pevnolátkový laser používal jako aktivní prostředí monokrystal rubínu a produkoval záření o vlnové délce 694,3 nm (tedy ještě ve viditelném spektru). Další používanou látkou je titanem dopovaný safír s vlnovou délkou 670-1070 nm. Oba tyto lasery se ale používají zejména v aplikacích vědeckého výzkumu [20].

V průmyslu, zejména pro řezání materiálu, jsou z pevnolátkových laserů nejvíce rozšířené ty s aktivním prostředím ve formě umělého krystalu yttrito-hlinitého granátu (Y₃Al₅O₁₂), dopovaného ionty Neodymu (Nd), případně Ytterbia (Yb) (zkráceně Nd:YAG, případně Yb:YAG). Tyto lasery generují paprsek s vlnovou délkou obvykle 1030-1070 nm, v závislosti na použitém aktivním prostředí a jeho geometrii. Výhodou těchto laserů je, že je lze používat jak v pulzním, tak i v kontinuálním (CW) režimu [21].

Vlnové délky v rozsahu 1030-1070 nm, charakteristické pro tyto lasery, jsou výhodné zejména proto, že laserový paprsek s touto vlnovou délkou je možné vést optickým vláknem [22]. Díky tomu se zjednodušuje přenos paprsku z laseru do procesní hlavy a tyto druhy laseru je možné výhodně použít v aplikacích, kde je řezný pohyb konán procesní hlavou laseru (tedy i v případě orbitálního dělení trubek) [16].

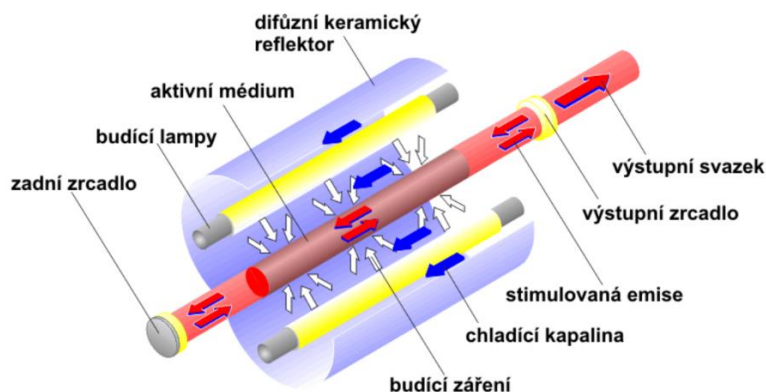
Jednotlivé druhy v průmyslu používaných pevnolátkových laserů se liší geometrií aktivního prostředí, která dává každému z nich své specifické vlastnosti. V průmyslu nejdéle používaný je tyčový Nd:YAG laser (obvykle nazývaný prostě Nd:YAG laser), ve kterém je aktivní prostředí ve formě tyče o průměru 3-10 mm a délce 50-200 mm. V diskovém laseru je aktivní prostředí ve formě tenkého disku s tloušťkou

řádově v desetinách milimetru, vláknový laser využívá dlouhé a tenké optické vlákno (délka řádově v metrech, průměr 50-300 μm) [21].

4.2.1. Tyčový Nd:YAG laser

Tyčový Nd:YAG laser je z pevnolátkových laserů v průmyslu používaný nejdéle. Aktivní prostředí ve formě tyče může být buzeno buď výbojkami (takové lasery se nazývají LPSS – Lamp Pumped Solid State), nebo laserovými diodami (nazývané DPSS – Diode Pumped Solid State) [21].

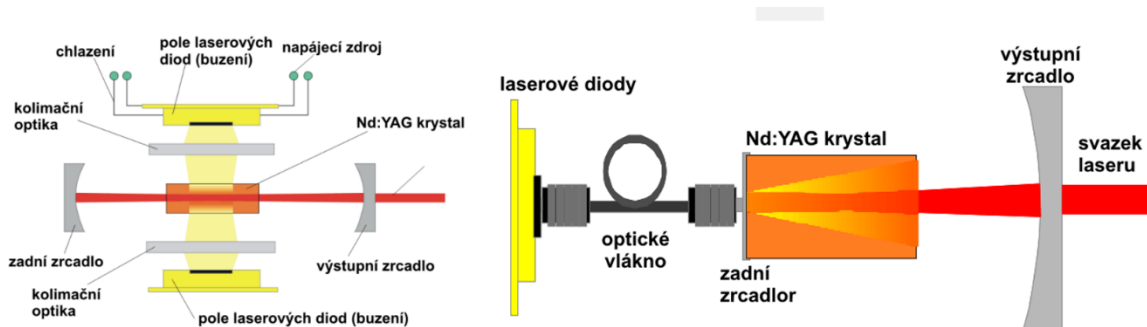
U LPSS laserů je aktivní prostředí buzeno pomocí výbojek (lamp), umístěných rovnoběžně s osou rezonátoru – viz obrázek 11. LPSS lasery mají obecně nižší účinnost a je nezbytné je chladit vodou. Lamps mají také v porovnání s laserovými diodami přibližně 4x nižší životnost, frekvence servisu tedy bývá vyšší. Nižší pořizovací náklady LPSS laseru tak mohou být převáženy vysokými náklady na provoz.



Obrázek 11: Schéma tyčového LPSS Nd:YAG laseru [21]

Oproti tomu DPSS lasery mají obecně vyšší účinnost přeměny energie, díky tomu u nižších výkonových řad odpadá nutnost vodního chlazení. Laserovou diodou buzený laserový svazek bývá koherentnější a stabilnější [15].

U DPSS laseru rozlišujeme ještě dva typy buzení, a to podle uspořádání rezonátoru. V případě bočního buzení je podobně jako u LPSS laseru pole laserových diod umístěno rovnoběžně s osou rezonátoru. Budící záření je do aktivního prostředí vedeno přímo z pole laserových diod, přes kolimační optiku. Další možností je buzení zadní (end-pumped), při kterém je budící záření do aktivního prostředí přivedeno ze směru osy rezonátoru, a to obvykle optickým vláknem. Díky tomu mohou být diody umístěny mimo rezonátor, což zjednodušuje jejich případný servis a výměnu. Schéma obou variant buzení DPSS laseru jsou znázorněna na obrázku 12. Zadní buzení zajišťuje vyšší kvalitu laserového svazku, laser pak ale nedosahuje takových výkonů jako při bočním buzení [21].

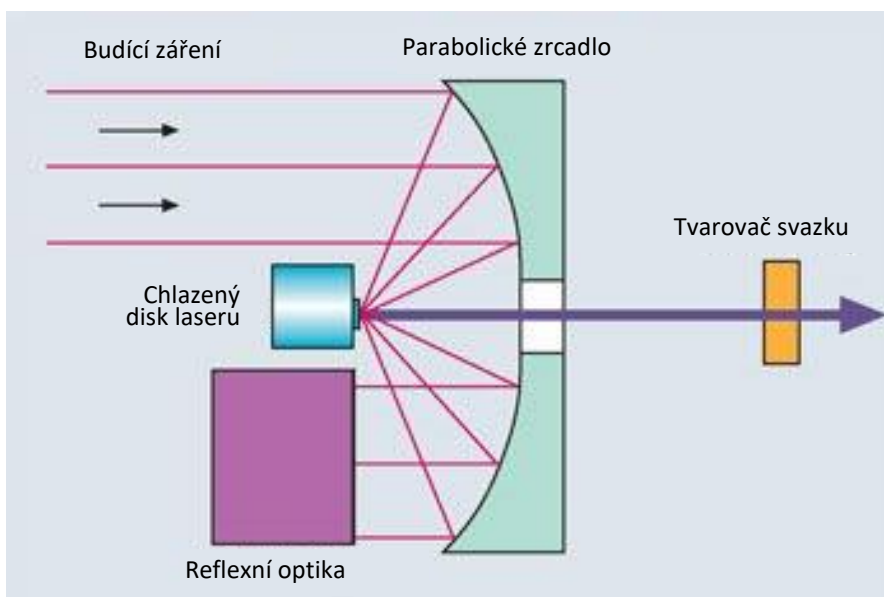


Obrázek 12: Konstrukce DPSS Nd:YAG laseru s bočním (levý) a zadním (pravý) buzením [21]

Všechny zmíněné typy tyčových Nd:YAG laserů však mají jednu nevýhodu, a to nerovnoměrné chlazení aktivního prostředí. Celý průměr tyče se neochlazuje stejně a vlivem toho dochází k nerovnoměrnému rozložení teploty aktivního prostředí. To může při dlouhodobém provozu vést k deformacím aktivního prostředí. I nepatrná deformace přitom může významně ovlivnit kvalitu výstupního laserového svazku. To vedlo výrobce k vyvinutí laserů, ve kterých má aktivní prostředí větší poměr plochy povrchu ku objemu (diskové, vláknové lasery). Díky tomu se aktivní prostředí ochlazuje rovnoměrněji, což zásadně zvyšuje jejich životnost v porovnání s tyčovými lasery [16]. Proto tyto lasery ve stále větší míře nahrazují „klasické“ tyčové Nd:YAG lasery v průmyslových aplikacích.

4.2.2. Diskový laser

Aktivní prostředí diskového laseru tvoří tenký disk krystalu Yb:YAG, případně Nd:YAG. Budící záření, generované laserovými diodami, je přivedeno do dutiny diskového laseru, a to obvykle pomocí optického vlákna. Budící záření se v dutině odráží mezi soustavou zrcadel. Z jedné strany dutiny je zrcadlo parabolické, které dopadající budící záření odráží na disk s aktivním prostředím. Za ním se nachází reflexní vrstva a chladicí soustava. Část dopadajícího budícího záření se absorbuje, většina se ale odrazí zpět směrem k parabolickému zrcadlu. Proto je nutná ještě soustava odrazových zrcadel na straně disku, které takto odražené paprsky vrací směrem k parabolickému zrcadlu a následně zpět do aktivního prostředí. Zde se budící záření koncentruje a stimuluje emisi laserového svazku, který se následně vede přes výstupní zrcadlo a optické vlákno až do místa požadované aplikace [23]. Tento princip je graficky znázorněn na obrázku 13.



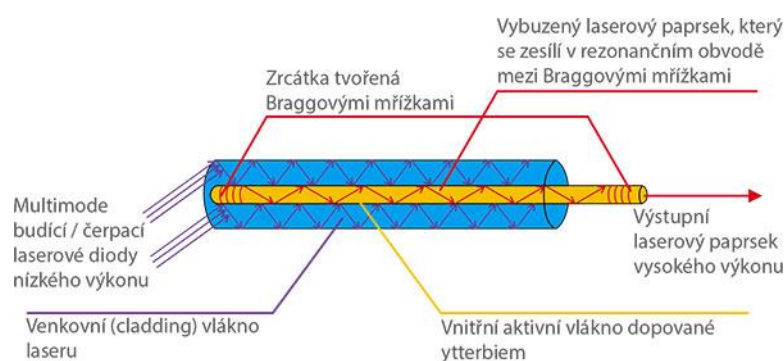
Obrázek 13: Princip vzniku laserového svazku v diskovém laseru [24]

Výhod takové konstrukce je několik. Malá tloušťka disku (100 až 200 μm) usnadňuje chlazení aktivního prostředí. V důsledku toho zde nedochází k deformacím a disk generuje stabilní a koherentní paprsek [16]. V porovnání s tyčovým laserem má také diskový laser vyšší účinnost, ale životnosti a účinnosti vláknového laseru nedosahuje [21].

Další výhodou je snadná regulace výkonu laserového paprsku – jednoduše se nastaví ozářená plocha disku a v souladu s tím se upraví výkon budících diod. Závislost mezi výkonem laseru a budícím výkonem je lineární, kvalitativní parametry výstupního laserového paprsku se úpravou výkonu nemění. Jednotlivé dutiny diskových laserů je pak možné vnější soustavou propojovat do rezonátorů a díky tomu výkon dále navyšovat [23]. Jedinou zřejmou nevýhodou oproti tyčovým Nd:YAG laserům je pak vyšší pořizovací cena.

4.2.3. Vláknový laser

Zatímco v případě výše zmíněných pevnolátkových laserů se optické vlákno používá pouze pro vedení laserového paprsku ze zdroje do procesní hlavy, v případě vláknového laseru zde laserové záření přímo vzniká. K tomu je zapotřebí speciální optické vlákno, obvykle čtvercového, hexagonálního nebo obdélníkového průřezu. To se skládá z vnitřního a venkovního vlákna. Aktivní prostředí tvoří vnitřní část optického vlákna, vyrobeného z krystalu dopovaného prvky lanthanoidů (obvykle ytterbium, případně neodým, erbium, praseodym). Vnější jádro pak slouží k rozvedení budícího záření do aktivního prostředí. Budící záření se odráží mezi stěnami vlákna a při srážce budícího fotonu s atomy aktivního prvku dochází k excitaci elektronů a následné stimulované emisi laserového svazku ve směru osy vlákna [25]. Tento princip je znázorněn na obrázku 14.



Obrázek 14: Princip vláknového laseru [26]

Funkce polopropustného a propustného zrcadla, která používají klasické Nd:YAG lasery k zesílení laserového záření, jsou v případě vláknového laseru nahrazena Braggovou mřížkou umístěnou na obou koncích aktivního laserového vlákna. Jde o strukturu vyrytou do optického vlákna, která propouští jen záření s určitou vlnovou délkou, zbytek odráží zpět a zastává tak rezonanční funkci zrcadel. Tím dochází k zesílení laserového paprsku a ke vzniku koherentního laserového svazku [26].

Výkon vláknového laseru je závislý na délce aktivního vlákna, přičemž jedno aktivní vlákno může mít délku několika metrů a dosahovat výkonu až 500 W. Výkon se dá dále regulovat počtem použitých budících diod, případně je možné skládat výstupní laserové záření z několika samostatných aktivních vláken, čímž je možné dosáhnout celkového výkonu až 80 kW [16].

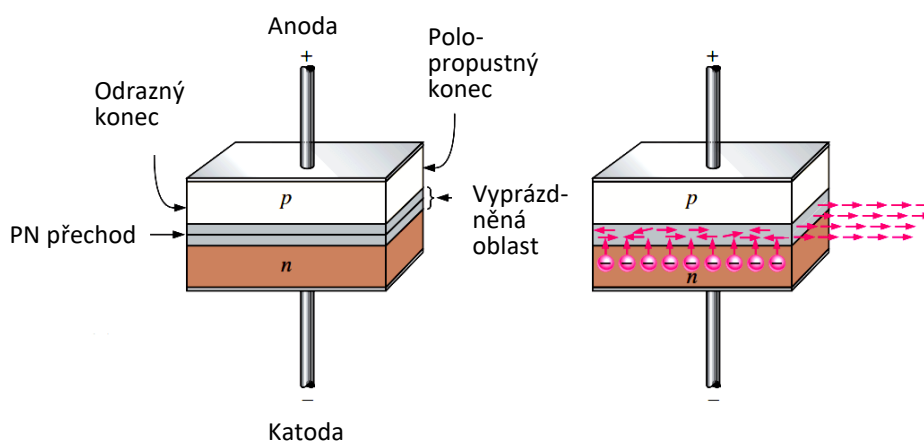
Konstrukce vláknového laseru nabízí několik zásadních výhod usnadňujících použití tohoto laseru pro řezání materiálu. První z nich je již zmíněná modulární konstrukce laseru, díky které je možné jednoduše nastavovat výkon laseru. Další výhodou je, že velmi tenké optické vlákno má vysoký poměr plochy k objemu, což významně usnadňuje odvádění tepla z aktivního prostředí. Vláknový laser má také ve srovnání s klasickými pevnolátkovými lasery několikanásobně delší životnost a vyšší účinnost [26].

I z důvodu nízké hmotnosti vlákna je celá soustava laseru velmi kompaktní a je ji možno umístit přímo v blízkosti řezací hlavy, například na robotickém rameni. Vláknový laser generuje velmi kvalitní paprsek a dá se s ním dosahovat vysokých řezných rychlostí.

4.3. Polovodičové lasery

V případě polovodičových laserů tvoří aktivní prostředí takzvaný PN přechod – rozhraní polovodiče typu N, který má přebytek valenčních elektronů, a polovodiče typu P, který má přebytek kladných děr [27]. K buzení aktivního prostředí se pak používá průchod elektrického proudu, který přebytečné valenční elektrony polovodiče N rekombinuje s přebytečnými dírami polovodiče P. Při každé takové rekombinaci dochází k uvolnění určitého kvanta energie ve formě fotonu [28].

Pokud přes PN přechod teče nízký proud, dochází ke generování spontánního záření s nahodilou fází, šířícího se všemi směry. Tohoto principu využívá například LED dioda. Pokud ale proud tekoucí přes PN přechod zvyšujeme, začnou generované fotony stimulovat další a další rekombinace. Při překročení určité hodnoty prahového proudu dojde k přechodu z režimu spontánní emise do režimu stimulované emise a dioda začne emitovat koherentní svazek laserového záření [28]. Tento princip vzniku laserového záření v laserové diodě je znázorněn na obrázku 15.



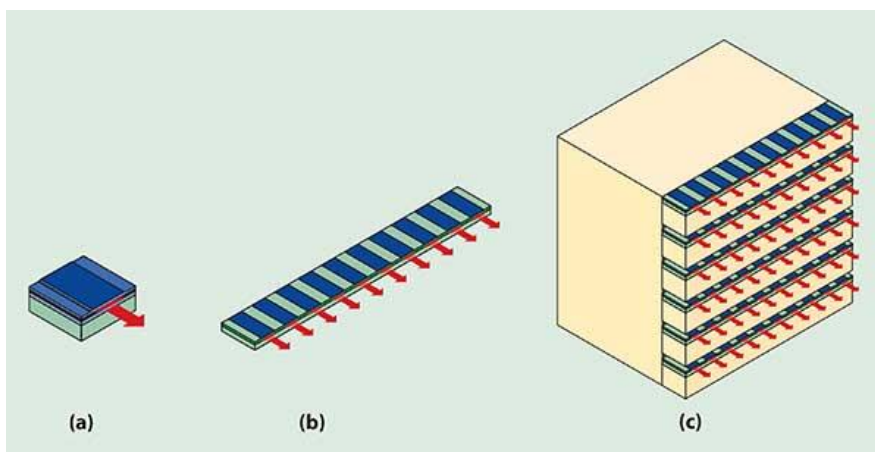
Obrázek 15: Princip vzniku laserového záření v laserové diodě [29]

Rezonátor polovodičového laseru tvoří dvojice zrcadel, případně je jejich funkce nahrazena krystaly odštípnutými v krystalografických rovinách. Jedna laserová dioda generuje velmi slabé laserové záření o výkonu řádově v mW.

4.3.1. Přímý diodový laser (DDL)

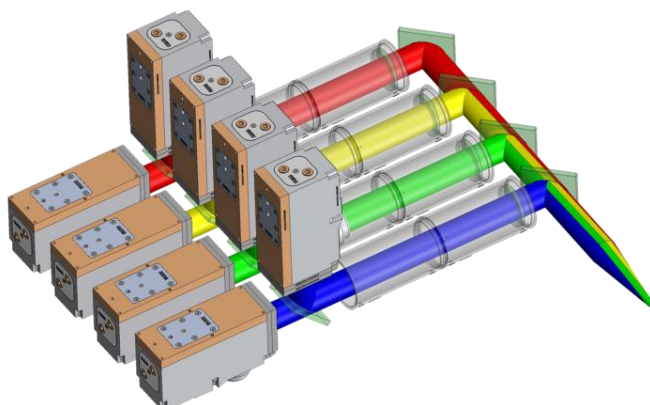
O laserových diodách jsem se zmiňoval již v předchozích kapitolách jako o jednom z možných zdrojů budícího záření používaných u pevnolátkových laserů. V případě DDL laseru jsou ale diody používány přímo ke generování výstupního laserového paprsku, který se přenáší rovnou do místa požadované aplikace (z toho zkratka DDL – Direct Diode Laser). Díky tomu mají diodové lasery vysokou účinnost (až 60 %), jelikož laserové záření je buzeno přímo průchodem elektrického proudu, bez nutnosti použití mezičlánku ve formě zdroje budícího záření. Díky malým rozměrům diod a jednoduchosti celé soustavy má zařízení kompaktní rozměry, laserové diody jsou navíc jednoduše vyměnitelné [16].

Kvůli nízkému výkonu diod je pro reálné průmyslové použití potřeba opticky spojit záření z tisíců laserových diod. Princip optického spojování záření je znázorněn na obrázku 16. Diody se za tímto účelem skládají do řad, čímž se dosahuje výkonu řádově ve watttech, řady se dále spojují do sloupců, čímž se dosáhne výkonu řádově ve stovkách wattů [30].



Obrázek 16: Spojování laserových diod (a) do řad (b) a sloupců (c) [31]

Pokud je pro danou aplikaci vyžadován ještě vyšší výkon, je možné ještě opticky spojit záření z několika takových bloků, přičemž každý z bloků může generovat záření o jiné vlnové délce [30]. Tento princip je znázorněn na obrázku 17.



Obrázek 17: Optické spojení laserového záření z několika bloků diodového laseru [16]

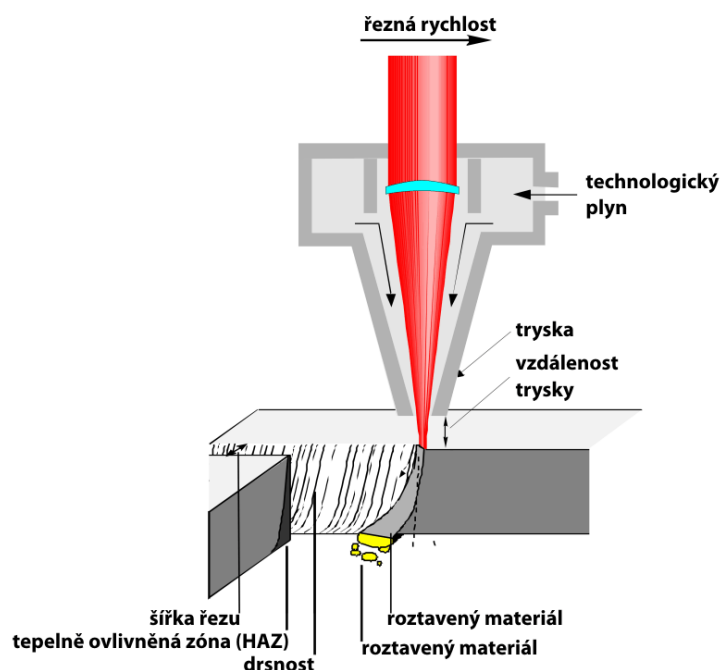
Laserovými diodami generovaný paprsek je však obtížně fokusovatelný, a obecně se dá říct, že laserový svazek generovaný tímto laserem nedosahuje kvality paprsku pevnolátkových typů laserů. Ještě donedávna proto platilo, že je diodový laser průmyslově použitelný pouze v aplikacích vyžadujících nižší výkon (např. pájení, zpracování plastů), případně tam, kde není nutné paprsek fokusovat do malého bodu (navařování, povrchové kalení) [32].

V posledních několika letech však v tomto směru došlo k významnému pokroku a začínají se objevovat i diodové lasery s vysokým výkonem, určené pro řezání kovových materiálů. Studie naznačují, že při řezání materiálu s větší tloušťkou stěny je možné s DDL laserem dosáhnout srovnatelných, nebo dokonce vyšších řezných rychlostí, a i lepší kvality řezné hrany než při použití vláknového laseru [33].

V kombinaci s vysokou efektivitou a kompaktní, jednoduchou a potenciálně i levnou konstrukcí DDL laseru se dá předpokládat, že budou tyto lasery v dohledné době konkurovat aplikacím v současné době vyhrazeným pro pevnolátkové a CO₂ lasery. Již nyní existují první stroje využívající tento typ laseru a tento trend bude s velkou pravděpodobností nadále pokračovat.

5. Laserové řezání

Laserové řezání je založeno na principu absorpce laserového záření. Řezaný materiál absorbuje fotony dopadajícího laserového záření, jejichž energie se po dopadu přeměňuje na teplo. Tímto způsobem se řezaný materiál nataví, případně rovnou sublimuje. Tlakem asistenčního plynu je natavený materiál vyfouknut a vzájemným pohybem procesní hlavy laseru a obrobku vzniká tímto způsobem řezná mezera [34]. Tento princip znázorňuje obrázek 18.



Obrázek 18: Princip laserového řezání [35]

Řezaný materiál není schopný absorbovat 100 % dopadajícího laserového záření, část je vždy na povrchu odražena. Parametr odrazivosti závisí na typu řezaného materiálu i vlnové délce laserového záření. Pro běžné oceli bez povrchových úprav je odrazivost až 93 % pro CO₂ lasery (vlnová délka 10 600 nm) a cca 75 % pro Nd:YAG lasery (vlnová délka 1 060 nm). Ale ve chvíli, kdy se nataví vrchní vrstva materiálu, absorpce vzroste až na 50 % a proces tavení se tím výrazně urychlí [34].

5.1. Metody laserového řezání

Podle převažujícího fyzikálního principu vzniku řezné mezery rozlišujeme tři základní metody laserového řezání. Mezi tyto metody patří:

- Oxidační řezání
- Tavné řezání
- Sublimační řezání

V praxi se většinou projevuje kombinace všech těchto fyzikálních principů, metoda řezání se však nazývá podle principu, který v dané aplikaci dominuje [36]. Každá z těchto metod nachází v průmyslu své uplatnění, a to v závislosti na požadované aplikaci. Volí se podle typu materiálu, jeho tloušťky, požadované řezné rychlosti a kvality řezu.

5.1.1. Oxidační řezání

Při oxidačním řezání se jako řezný plyn používá kyslík, který je do řezné mezery vyfukován pod tlakem do 6 bar [37]. Princip této metody řezání je obdobný jako při řezání autogenem. Energie laserového paprsku nejdříve zahřeje a nataví materiál. Velká část nataveného materiálu je pak za asistence

přiváděného kyslíku zapálena a shoří, produkty hoření jsou spolu se zbytky nataveného materiálu tlakem plynu vyfouknuty pryč z řezné mezery. Díky tomu, že se kyslík aktivně podílí na hoření materiálu, je většina nataveného materiálu spálena a jen menší část je třeba vyfouknout z mezery [36]. Řezný plyn proto může být do místa řezu dopravován pod nižším tlakem než v případě tavného řezání a jeho spotřeba je tak nižší.

Hoření je exotermická reakce, při které se uvolňuje velké množství tepla. Takto uvolněné teplo přispívá k natavení dalšího materiálu, což celý proces tavení výrazně urychluje. Díky tomu se oxidačním řezáním dosahuje obecně vyšších řezných rychlostí než ostatními metodami a zároveň je tuto metodu možné použít pro řezání plechu o velké tloušťce stěny. Standardně se tato metoda používá pro řezání nelegovaných a nízkolegovaných ocelí [35].

Nevýhodou je větší tepelně ovlivněná zóna, jelikož teplo generované hořením se ve větší míře šíří do základního materiálu. Dalším problémem může být kvalita řezné hrany, protože při hoření řezná hrana oxiduje. Vrstva oxidu pak zvyšuje drsnost a obecně zhoršuje kvalitu řezné hrany. Na spodní hraně řezné mezery také mohou ulpívat těžko odstranitelné otřepy [16].

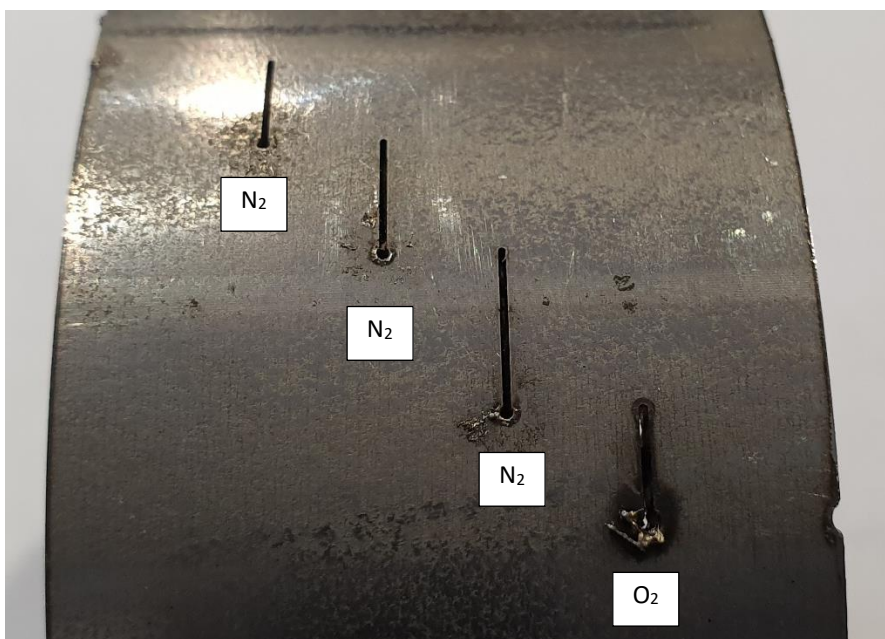
5.1.2. Tavné řezání

Jako asistenční plyn při tavném řezání slouží obvykle dusík, případně argon. Jde o inertní plyny, které (na rozdíl od kyslíku používaného u oxidačního řezání) hoření materiálu zabraňují. Materiál je v tomto případě nataven laserovým paprskem a následně tlakem asistenčního plynu vyfouknut z řezné mezery [36].

Protože je ale v tomto případě nutné vyfouknout celý objem nataveného materiálu, musí být tlak plynu větší (až 20 bar). S tím samozřejmě roste i jeho spotřeba. Energie dodávaná laserem také není podpořena teplem uvolněným při hoření, jako v případě oxidačního řezání, a je proto zapotřebí používat lasery o vyšších výkonech, nebo počítat s nižší řeznou rychlostí než v případě řezání oxidačního [37].

Tavné řezání však poskytuje řadu výhod, zejména co se týče kvality řezu. Protože nedochází k hoření materiálu, bývá řez užší (odstraňuje se pouze materiál nacházející se přímo v místě dopadu laserového paprsku), stejně tak je menší i tepelně ovlivněná oblast. Inertní plyn chrání řeznou mezeru před tvorbou oxidů a zajišťuje proto kvalitnější, kovově lesklý řez s nižší drsností. Během tohoto způsobu řezání nevznikají otřepy, případně pouze otřepy jehlicovitého tvaru, které jsou výrazně jednodušeji odstranitelné. Tato metoda se standardně používá pro řezání vysokolegovaných (nerezových) ocelí a neželezných kovů [36].

Experimentální porovnání řezu zhotoveného oxidačním a tavným řezáním je patrné z obrázku 19.



Obrázek 19: Porovnání řezu zhotoveného oxidačním (O_2) a tavným (N_2) řezáním na trubce $\varnothing 80 \times 3,0$

5.1.3. Sublimační řezání

Při sublimačním řezání materiál neprochází kapalnou fází, ale rovnou se přeměňuje na plyn. Toho je možné dosáhnout jen za poměrně specifických řezných podmínek a s vhodnými materiály. Obvykle se k tomuto účelu používá pulzní režim laseru, který přenáší vysoký špičkový výkon v krátké době trvání. Do místa řezu se tak ve velmi krátkém čase přenese velké množství energie, což způsobí sublimaci materiálu, bez přechodu přes kapalnou fázi [37].

Sublimační řezání vyžaduje velký výkon laseru i při nízkých řezných rychlostech, na druhou stranu ale zajišťuje nejkvalitnější řez. Páry vysublimovaného materiálu v řezné mezeře vytváří vysoký tlak, který z řezné mezery odstraní jakýkoliv natavený materiál. Díky tomu stačí nízký tlak asistenčního plynu (1 až 3 bar), který pouze chrání řezné hrany před oxidací. V rámci řezání kovových materiálů se využívá pro obzvláště jemné řezání, např. pro zdravotnický průmysl. Pro běžné aplikace řezání kovových materiálů ale není metoda vhodná z důvodu velmi nízké produktivity. Další možností použití je řezání materiálů, které se odpařují již při malé dodané energii (např. PVC fólie, textilie), nebo materiálů, které se taví nemohou (dřevo, keramika, kompozity) [36].

5.2. Laserový řezací stroj

Aby byl laser v praxi použitelný pro řezání materiálu, je třeba ho implementovat do řezacího stroje. V průběhu let vzniklo nepřeberné množství různých variant laserových řezacích strojů, od jednoduchých stolních plotrů po výkonná pětiosá obráběcí centra schopná řezat díly prakticky libovolného tvaru. Základní součásti každého řezacího stroje ale zůstávají stejné.

5.2.1. Zdroj laseru

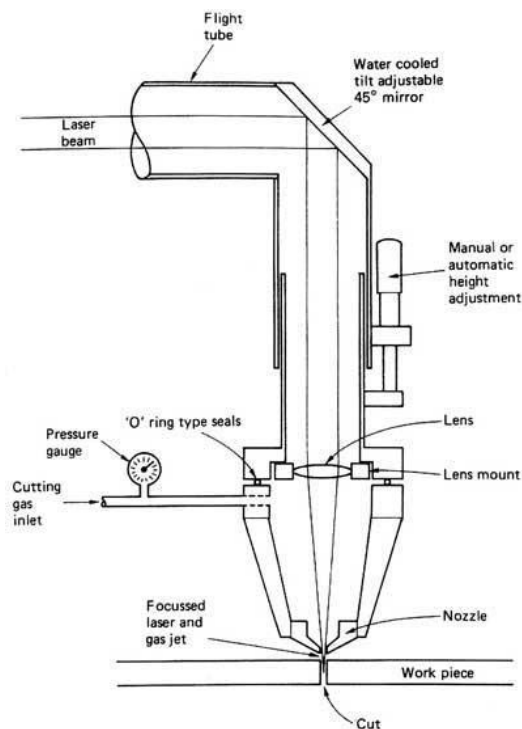
Jednotlivé varianty laserových zdrojů byly detailně popsány v kapitole 5. Může se jednat o zdroj CO_2 , Nd:YAG, diskového, vláknového, či diodového laseru o výkonu potřebném pro danou aplikaci.

5.2.2. Procesní (řezací) hlava laseru

V procesní hlavě dochází k fokusaci laserového paprsku do místa řezu. K tomuto účelu slouží konvexní optická čočka, umístěná uvnitř procesní hlavy. Další důležitou součástí procesní hlavy je tryska, kterou se do místa řezu pod tlakem vyfukuje asistenční plyn (obvykle kyslík nebo dusík, případně stlačený vzduch nebo argon). Laserový paprsek se do místa řezu fokusuje středem trysky, čímž se zajistí

rovnoměrná distribuce asistenčního plynu do místa řezu. Schematicky je procesní hlava znázorněna na obrázku 20.

Aby bylo možné laserový paprsek fokusovat do požadované hloubky v materiálu, bývá procesní hlava výškově nastavitelná. Výška se nastavuje buď manuálně, nebo automaticky. K automatickému nastavování se obvykle používá kapacitní senzor, který během řezného procesu kontinuálně sleduje vzdálenost procesní hlavy od řezaného materiálu. Elektronický systém pak informace z čidla vyhodnocuje a výšku hlavy automaticky nastavuje tak, aby se udržovala požadovaná vzdálenost.



Obrázek 20: Schéma procesní řezací hlavy laseru [38]

5.2.3. Vedení laserového paprsku

Vedení slouží k přenosu laserového paprsku z laserového zdroje do procesní hlavy. Pro lasery s velkou vlnovou délkou (CO₂ lasery) k tomuto účelu slouží soustava seřiditelných odrazových zrcadel, mezi kterými se paprsek přenáší po přímkách. Takový princip přenosu je ale vyhovující pouze pro aplikace, ve kterých je procesní hlava stacionární, případně tam, kde se hlava pohybuje pouze v jedné rovině v navzájem kolmých osách X a Y [13].

Naopak v případě laserů s kratší vlnovou délkou (pevnotávkové) je vedení paprsku realizováno pomocí optického vlákna. To umožňuje pohyb hlavy prakticky libovolným směrem a také její natáčení.

5.2.4. Chladicí jednotka

Chladicí jednotka zajišťuje chlazení laserového zdroje a zpravidla i procesní hlavy. Chlazení může probíhat buď vzduchem, nebo v případě vyšších výkonů vodním okruhem.

5.2.5. Mechanismus zajišťující pohyb

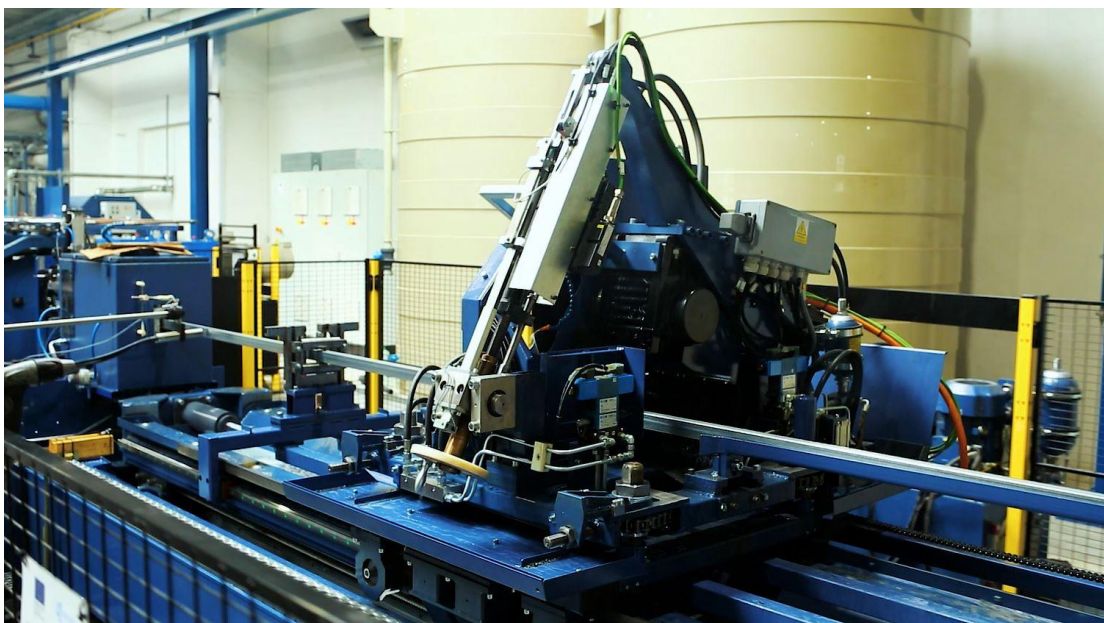
Každý laserový řezací stroj musí být vybaven mechanismem zajišťujícím vzájemný pohyb řezací hlavy a řezaného materiálu. Pohybovat se může jak procesní hlava nad řezaným materiálem (například v případě laserových řezacích plotrů pro řezání plechů), tak i řezaný materiál pod stacionární řezací hlavou, což je princip zařízení běžně používaného pro řezání trubek – trubkového laseru.

V případě zařízení vyvinuté firmou Attl se trubka pohybuje konstantní rychlostí přímočarým pohybem a laser umístěný na rotační ose provádí řez orbitálním pohybem okolo trubky.

6. Rozbor současného stavu

Požadavek na zpracování problematiky laserového dělení trubek vzešel z firmy Attl a spol., která se zabývá vývojem a stavbou profilovacích a svařovacích linek na výrobu profilů a trubek. Pro dělení vyráběných trubek firma v současné době používá zejména konvenční technologie dělení materiálu. V závislosti na typu vyráběné trubky jde o odpadový dvouosý stříh nebo řezání pomocí pilového kotouče, výjimečně pak pomocí pásové pily [39].

Pro dělení trubek přímo ve svařovací lince bez nutnosti jejího zastavení se používá princip letného dělení. Vozík s dělicím nástrojem je v tomto případě umístěn na samostatném pojezdu – viz obrázek 21. Při procesu dělení se nejdříve pomocí servomotoru s hřebenovým nebo řetězovým převodem, případně pomocí lineárního motoru synchronizuje rychlost dělicí jednotky s rychlostí linky pro zajištění konstantní vzájemné polohy. Následuje samotný proces dělení, poté se dělicí jednotka vrací zpět do výchozí polohy.



Obrázek 21: Pojezd vozíku letného dělení s kotoučovou pilou

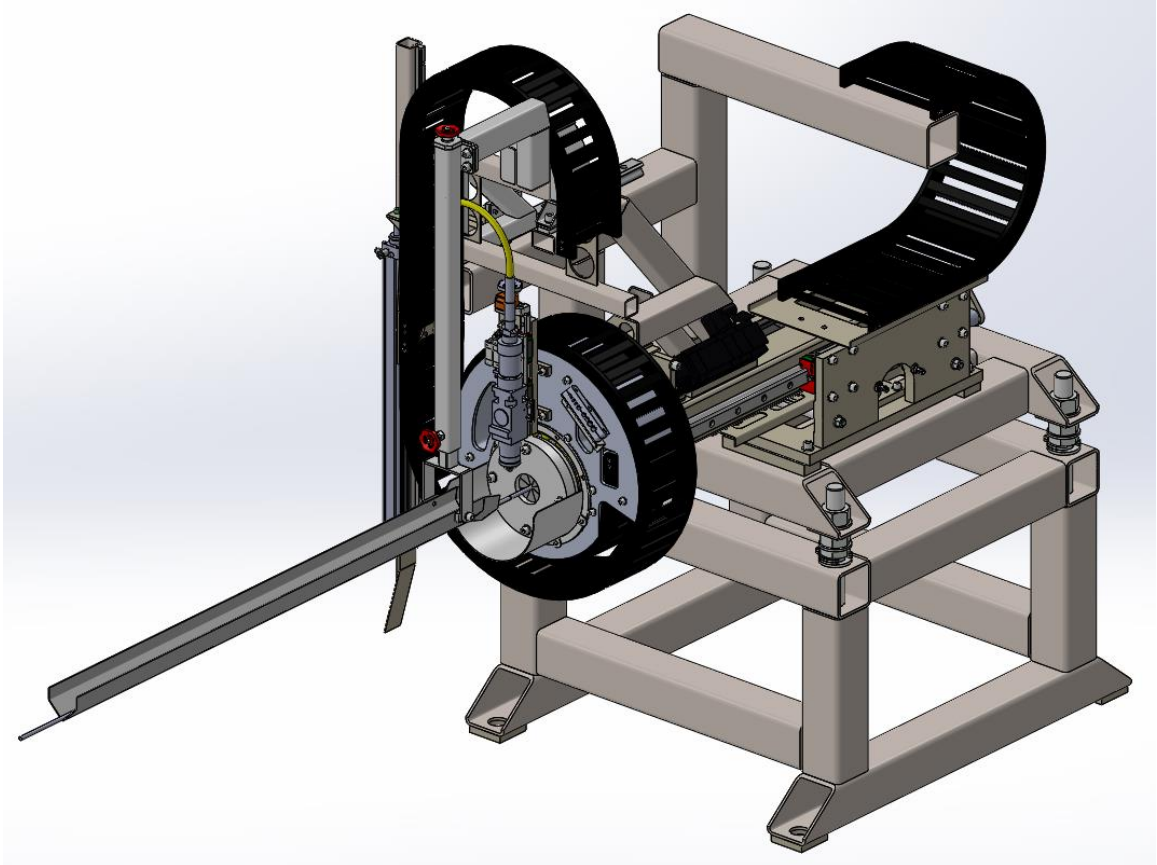
Současné metody dělení se však pro některé konkrétní aplikace jeví jako nedostatečné. Zejména v případě tenkostěnných trubek s tloušťkou stěny 0,1-0,2 mm dochází vlivem tlaku dělicího nástroje k nežádoucí deformaci hran konců trubky. To může mít za následek nedodržení požadované tolerance, v krajním případě může dojít ke zborcení stěny trubky.

Při stříhu i řezání mohou vznikat otřepy, které bývá zpravidla nutné následnými operacemi odstranit pro dosažení požadované kvality a odpovídající geometrie konce trubky. Tato operace nezřídko vyžaduje samostatný stroj a operátora, v důsledku toho však dochází ke zvyšování výrobních nákladů.

Na kvalitu konce trubky po stříhu i řezání má výrazný vliv stav opotřebení dělicího nástroje, proto je nezbytné ho v pravidelných intervalech vyměňovat a brousit. Nutnost výměny nástroje si vyžaduje pravidelné odstávky linky, snižuje její celkovou kapacitu a v konečném důsledku opět navyšuje výrobní náklady.

Výše zmíněné problémy při letném dělení by chtěla firma Attl odstranit pomocí technologie laserového dělení. To se sice již v praxi pro řezání trubek používá, obvykle však pouze u samostatně stojících strojů, kde trubka upnutá ve vřetení koná hlavní rotační pohyb a procesní hlava laseru je stacionární, případně koná pouze pohyb přísvuný [40].

V případě zapojení laserového dělení přímo do profilovací linky ale není rotační pohyb trubky možný, jelikož trubka se vyrábí kontinuálně z pásky, což neumožňuje její rotaci. Pro tuto aplikaci byl ve firmě Attl vyvinut princip orbitálního dělení, při kterém se rotační pohyb přenesse z trubky na procesní řezací hlavu laseru. Hlava laseru tak provede řez orbitálním pohybem kolem trubky, která v tu chvíli koná přímočarý pohyb daný rychlostí linky. Konstrukce orbitální laserové děličky pro rychlost linky do 6 m/min je patrná z obrázku 22.



Obrázek 22: Jednotka orbitálního laserového dělení pro rychlost linky do 6 m/min

7. Technicko-ekonomické srovnání laserového dělení a konvenčních metod dělení trubek

Pro implementaci laserového dělení trubek do výrobní linky existuje několik různých motivací. První z nich je případ, kdy je použití konvenčních metod dělení nevhodné, případně velmi problematické. Typickým případem jsou tenkostěnné nerezové trubky s tloušťkou stěny do 0,2 mm, které by se při konvenčních metodách dělení deformovaly, případně by oddělení mohlo probíhat jen velmi pomalu, čas dělení by byl příliš dlouhý a nedostačoval by výrobní rychlosti linky. V takovém případě je výhodnost použití laserového dělení poměrně jednoznačná.

Dalším případem je výroba trubek, které sice jsou konvenčními metodami dělitelné, ale kvalita konce trubky po dělení není dostatečná a při použití konvenční metody je zapotřebí následná operace pro zlepšení kvality konce trubky. V takovém případě bude rozhodovat, zda bude konec trubky po laserovém dělení natolik kvalitní, že odbourá potřebu následné operace. Zároveň však musí být laserová dělička ekonomicky výhodnější než konvenční dělení v kombinaci s následnou operací.

Poslední možností je případ, kdy je dělení trubek konvenčními metodami zvládnutelné i bez následných operací. Aby se v takovém případě vyplatilo investovat do laserové děličky, musely by být buď pořizovací náklady na jednotku laserového letmého dělení nižší než náklady na konvenční metodu, anebo by laserová jednotka musela mít výrazně nižší náklady na provoz a tím šetřit výrobní náklady natolik, aby měla počáteční investice přijatelnou dobu návratnosti.

V této kapitole se budu věnovat porovnání zmíněných metod dělení z hlediska investičních a provozních nákladů. Orbitální laserové dělení budu porovnávat se dvěma nejběžnějšími metodami dělení trubek, a to konkrétně s dělením pilovým kotoučem a dvouosým odpadovým stříhem.

7.1. Stanovení parametrů trubky pro potřeby technicko-ekonomického srovnání metod dělení trubek

Parametry vyráběné trubky mohou významně ovlivnit výběr metody dělení vhodné pro danou aplikaci.

Pro potřeby prvotního ekonomického srovnání bude vhodné zvolit referenční trubku, kterou je z technologického hlediska možné dělit jak pilovým kotoučem, tak i pomocí dvouosého stříhu nebo pomocí laserového řezání. Bude vhodné zvolit trubku běžnou, a přibližně uprostřed běžně vyráběného rozsahu průměrů a tloušťky stěny tak, aby závěry této práce byly s jistou mírou rizika aplikovatelné na co nejširší rozsah sortimentu trubek.

Na základě těchto podmínek pro potřeby porovnání volím parametry trubky dle tabulky 2.

Tabulka 2: Parametry trubky uvažované pro potřeby technicko-ekonomického porovnání metod dělení trubek

Vnější průměr trubky	Ø 38	mm
Tloušťka stěny trubky	2	mm
Materiál trubky	1.4301	W.Nr.
Výrobní délka trubky	6	m

7.2. Vstupní parametry výroby pro potřeby technicko-ekonomického srovnání metod dělení trubek

Vstupní parametry výroby bude také vhodné zvolit co nejběžnější, aby byly závěry práce aplikovatelné na nejčastěji se vyskytující linky.

Pro svařování trubek ve svařovacích linkách se běžně používá vysokofrekvenčního indukčního svařování, se kterým je možné pro běžné jakosti oceli dosahovat svařovací rychlosti až 120 m/min. Provozní svařovací rychlost pro nerezové oceli bývá přibližně poloviční, v následujících kalkulacích proto budu předpokládat rychlost 60 m/min. Při uvažování výrobních délek 6 m tedy letmé dělení za minutu absolvuje 10 dělicích cyklů. Předpokládané základní parametry výroby jsou shrnuty v tabulce 3.

Tabulka 3: Parametry výroby uvažované pro potřeby technicko-ekonomického srovnání metod dělení trubek

Provozní výrobní svařovací rychlost linky	60	m/min
Počet dělicích cyklů za minutu při v = 60 m/min	10	dělicích cyklů/min
Doba trvání jednoho dělicího cyklu	6	s
Provoz linky na 2 směny	16	h/den
Koeficient využitelnosti linky	0,8	-
Počet dělicích cyklů za den (provoz linky na 2 směny - 16 h/den)	7 680	-
Počet dělicích cyklů za rok (provoz linky 300 dní/rok)	2 304 000	dělicích cyklů/rok
Cena za spotřebu 1 kWh elektrické energie	3,8	CZK/kWh

7.3. Srovnání metod dělení trubek z hlediska investičních nákladů

Jednotka letmého dělení dvouosým stříhem i pilovým kotoučem byla již ve firmě Attl do podobných linek několikrát implementována, investiční náklady proto vychází z ceny, za kterou byly tyto jednotky nabízené. Pro jednotku orbitálního laserového dělení se počítá s použitím vláknového laserového zdroje RAYCUS o výkonu 1500 W, v konfiguraci s procesní řezací hlavou od firmy HSG a chladicí jednotkou CWFL-1500, která zajišťuje chlazení zdroje laseru i procesní hlavy. Cena za tuto konfiguraci laseru je podle nabídky dodavatele 800 000 CZK. Cena za mechaniku této jednotky byla stanovena na 1 200 000 CZK a cena za elektrické vybavení, řízení a odladění rezného procesu činí 500 000 CZK. Porovnání investičních nákladů vyplývá z tabulky 4.

Tabulka 4: Srovnání investičních nákladů na jednotky letmého dělení

	Dělení pilovým kotoučem	Dělení dvouosým odpadovým stříhem	Orbitální laserové dělení
Cena	3 150 000 CZK	2 950 000 CZK	2 500 000 CZK

7.4. Srovnání metod dělení trubek z hlediska provozních nákladů

Náklady na provoz jednotky letmého dělení lze rozdělit do několika nejvýznamnějších kategorií, a to bez ohledu na to, zda se jedná o dělení pilovým kotoučem, dvouosým stříhem, nebo pomocí laserového řezání. Tyto základní kategorie jsou:

- Náklady na spotřebu elektrické energie dělicí jednotky
- Náklady na broušení a výměnu nástrojů, servis
- Náklady na reznou kapalinu nebo asistenční plyn
- Ztráty z důvodu odstávky linky (ušlý zisk)

Tyto náklady budou v následujících podkapitolách vyčíslovat pro jednotlivé uvažované metody dělení. Protože se každý z těchto nákladů projevuje s jinou frekvencí, budu pro potřeby porovnání veškeré tyto náklady rozpočítávat na 1 dělicí cyklus.

7.4.1. Rozpad nákladů na provoz jednotky dělení pilovým kotoučem

Příkon pojezdu vozíku jednotky dělení pilovým kotoučem je 40 kW a příkon kotoučové pily 15 kW. Pro uvažovanou rychlost výroby bude vozík v provozu 5,5 s z 6s cyklu, zbývající 0,5 s bude vozík stacionární

v základní poloze, tedy nebude spotřebovávat elektrickou energii. Kotoučová pila bude v provozu stále, přičemž 4 s z každého cyklu bude motor odebírat maximum energie (při řezání), během rozjezdu vozíku a návratu do výchozí polohy nebude pila v záběru, a příkon se tak sníží přibližně na 30 %. Dále je třeba počítat se spotřebou energie hydraulickým agregátem o příkonu 3 kW, který zajišťuje přísuv pilového kotouče do řezu. Ten je v provozu 4 s z každého cyklu. Výpočet spotřeby energie na jeden dělicí cyklus je patrný z následující tabulky 5.

Tabulka 5: Náklady na spotřebu elektrické energie jednotky dělení pilovým kotoučem

Spotřeba elektrické energie		
Příkon pojezdu vozíku	40	kW
Čas provozu vozíku z 1 dělicího cyklu	5,5	s
Čas provozu vozíku za den (2 směny)	11,7	h/den
Spotřeba elektrické energie na provoz vozíku za den	469,3	kWh/den
Cena za den provozu vozíku	1783	CZK/den
Cena za spotřebu elektrické energie vozíku na 1 dělicí cyklus	0,232	CZK/dělicí cyklus
Příkon kotoučové pily při dělení	15	kW
Čas provozu dělicí jednotky na plný výkon (při dělení) z 1 dělicího cyklu	4	s
Čas provozu dělicí jednotky na plný výkon (při dělení) za den (2 směny)	8,53	h/den
Čas provozu dělicí jednotky na 30 % výkon (mimo dělení) z 1 dělicího cyklu	2	s
Čas provozu dělicí jednotky na 30 % výkon (mimo dělení) za den (2 směny)	4,27	h/den
Spotřeba elektrické energie na provoz pilové jednotky za den	147,2	kWh/den
Cena za den provozu pilové dělicí jednotky	559,36	CZK/den
Cena za spotřebu elektrické energie dělicí jednotky na 1 dělicí cyklus	0,073	CZK/dělicí cyklus
Příkon hydraulického agregátu	3	kW
Čas provozu hydraulického agregátu z 1 dělicího cyklu	4	s
Čas provozu hydraulického agregátu za den (2 směny)	8,5	h/den
Spotřeba elektrické energie na provoz hydraulického agregátu za den	25,6	kWh/den
Cena za den provozu hydraulického agregátu	97,28	CZK/den
Cena za spotřebu elektrické energie hydraulického agregátu na 1 dělicí cyklus	0,013	CZK/den
Celková cena za spotřebu energie na 1 dělicí cyklus	0,318	CZK/dělicí cyklus

Průměrná trvanlivost pilového kotouče činí 12 000 dělicích cyklů. Pilový kotouč je možné přibližně 25x přebrousit, poté je třeba ho vyměnit za nový. Životnost nástroje je tedy přibližně 300 000 dělicích cyklů. Cena nového kotouče je 7 500 CZK a cena jednoho broušení je odhadnuta na 600 CZK. Náklady na výměnu a broušení pilového kotouče rozpočítané na 1 dělicí cyklus vyjadřuje následující tabulka 6.

Tabulka 6: Náklady na broušení a výměnu nástroje jednotky dělení pilovým kotoučem

Broušení a výměna nástroje		
Cena 1 kotouče	7 500	CZK
Životnost kotouče (frekvence výměny kotouče za nový)	300 000	dělicích cyklů
Cena za výměnu kotouče rozpočítaná na 1 dělicí cyklus	0,025	CZK/dělicí cyklus
Cena broušení kotouče	600	CZK
Trvanlivost kotouče (frekvence broušení kotouče)	12 000	dělicích cyklů
Cena za broušení kotouče rozpočítaná na 1 dělicí cyklus	0,050	CZK/dělicí cyklus
Celková cena za broušení a výměnu nástrojů rozpočítaná na 1 dělicí cyklus	0,075	CZK/dělicí cyklus

Objem okruhu zajišťujícího chlazení a mazání pily je 600 l. Do okruhu se používá emulze o koncentraci 8 %, 1 litr koncentráту stojí 200 CZK. V tomto okruhu řezná kapalina kontinuálně proudí, ale přibližně 2x za rok je třeba ji vyměnit. Tyto náklady jsou vyjádřené v tabulce 7.

Tabulka 7: Náklady na spotřebu řezné kapaliny jednotky dělení pilovým kotoučem

Spotřeba řezné kapaliny		
Cena 1 litru řezné kapaliny	200	CZK/l
Objem okruhu řezné kapaliny	600	l
Koncentrace řezné kapaliny v okruhu	8 %	-
Frekvence výměny řezné kapaliny	2	za rok
Spotřeba řezné kapaliny za rok	96	l/rok
Cena za řeznou kapalinu za rok	19 200	CZK
Cena za řeznou kapalinu na 1 dělicí cyklus	0,008	CZK/dělicí cyklus

Během dne (dvou směn) dochází v průměru ke 1,2 odstávkám linky, způsobenými potřebou vyměnit opotřeбенý řezný kotouč za nový, případně seřídít dělicí jednotku. Náklady na samotné broušení a pořízení nového nástroje byly již analyzovány v tabulce 6, dále je ale potřeba počítat se ztrátami, které taková odstávka linky způsobí. Ze zkušeností firmy Attl vyplývá, že 1 odstávka linky pro výměnu kotouče trvá přibližně 20 minut, z jednoho dne tak průměrně 24 minut. Za tu dobu by linka vyrobila 1 152 m trubky (i při započítání koeficientu využitelnosti $k=0,8$). Zisk z prodeje 1 m trubky je průměrně 1,4 CZK, z čehož vyplývá, že pokud by k odstávce linky pro výměnu nástroje nedocházelo, mohla by firma vydělat o 1 612 CZK za den více. Tento „ušlý zisk“ je rozpočítán na 1 dělicí cyklus v tabulce 8.

Tabulka 8: Ztráty z odstávky linky pro výměnu nástroje a seřízení jednotky dělení pilovým kotoučem

Ztráta z odstávky linky pro výměnu nástroje, seřízení		
Počet odstávek linky během dne pro výměnu nástroje, seřízení	1,2	-
Průměrná doba trvání jedné odstávky	20	min
Průměrná doba odstávky za den	24	min
Nevyrobená délka trubky z důvodu odstávky linky za den	1152	m
Průměrný zisk z prodeje 1 m trubky	1,4	CZK/m
Ztráta z odstávky linky pro výměnu nástroje	1612	CZK/den
Ztráta z odstávky linky pro výměnu nástroje rozpočítaný na 1 dělicí cyklus	0,210	CZK/dělicí cyklus

Součet celkových provozních nákladů na 1 dělicí cyklus jednotky dělení pilovým kotoučem pak vyjadřuje následující tabulka 9.

Tabulka 9: Součet celkových provozních nákladů na 1 dělicí cyklus jednotky dělení pilovým kotoučem

Celkové náklady na 1 dělicí cyklus		
Celková cena za spotřebu energie na 1 dělicí cyklus	0,318	CZK/dělicí cyklus
Celková cena za broušení a výměnu nástrojů rozpočítaná na 1 dělicí cyklus	0,075	CZK/dělicí cyklus
Cena za řeznou kapalinu na 1 dělicí cyklus	0,008	CZK/dělicí cyklus
Ztráta z odstávky linky pro výměnu nástroje rozpočítaný na 1 dělicí cyklus	0,210	CZK/dělicí cyklus
Celkem	0,611	CZK/dělicí cyklus

7.4.2. Rozpad nákladů na provoz jednotky dělení dvouosým stříhem

Pojezd vozíku dvouosého odpadového stříhu má příkon 40 kW a je v provozu 5,5 s z 6s cyklu, stejně jako vozík v případě dělení pilovým kotoučem. Do nákladů na spotřebu elektrické energie dále vstupuje spotřeba energie hydraulického agregátu střižné jednotky. Příkon agregátu je 11 kW a je v provozu 2 s z každého dělicího cyklu. Tyto náklady jsou vyjádřeny v tabulce 10.

Tabulka 10: Náklady na spotřebu elektrické energie jednotky dělení dvouosým stříhem

Spotřeba elektrické energie		
Příkon pojezdu vozíku	40	kW
Čas provozu vozíku z 1 dělicího cyklu	5,5	s
Čas provozu vozíku za den	11,7	h/den
Spotřeba elektrické energie na provoz vozíku	469,3	kWh/den
Cena za den provozu vozíku	1783,5	CZK
Cena za spotřebu elektrické energie vozíku na 1 dělicí cyklus	0,232	CZK/dělicí cyklus
Příkon hydraulického agregátu střižné jednotky	11	kW
Čas provozu hydraulického agregátu střižné jednotky z 1 dělicího cyklu	2	s
Čas provozu dělicí jednotky za den	4,27	h/den
Spotřeba elektrické energie hydraulického agregátu střižné jednotky	46,9	kWh/den
Cena za den provozu střižné jednotky	178,3	CZK/den
Cena za spotřebu elektrické energie hydraulické jednotky na 1 dělicí cyklus	0,023	CZK/dělicí cyklus
Celková cena za spotřebu elektrické energie na 1 dělicí cyklus	0,255	CZK/dělicí cyklus

V případě stříhu je nutné vzít v potaz jak broušení a výměnu střižného nože, tak i broušení a výměnu střižnice – oba tyto nástroje se podílejí na procesu stříhu. Trvanlivost nože je přibližně 16 000 dělicích cyklů (stříhů), nuž je možné přebrousit přibližně 20x, frekvence výměny nože za nový je tedy přibližně 320 000 dělicích cyklů. Cena nože je 5 500 CZK, cena jednoho broušení nože i střižnice je odhadována na 200 CZK. Cena nové střižnice je 25 000 CZK, ale její trvanlivost i životnost je vyšší – frekvence broušení je 60 000 dělicích cyklů, frekvence výměny střižnice za novou pak cca 1 000 000 dělicích cyklů. I v tomto případě jsou všechny náklady přepočítány na 1 dělicí cyklus, jak je patrné z tabulky 11.

Tabulka 11: Náklady na broušení a výměnu nástroje jednotky dělení dvouosým stříhem

Broušení a výměna nástroje		
Cena 1 nože	5500	CZK
Frekvence výměny nože za nový	320 000	dělicích cyklů
Cena za výměnu nože rozpočítaná na 1 dělicí cyklus	0,017	CZK/dělicí cyklus
Cena broušení nože	200	CZK
Frekvence broušení nože	16 000	dělicích cyklů
Cena za broušení nože rozpočítaná na 1 dělicí cyklus	0,013	CZK/dělicí cyklus
Cena 1 střižnice	25000	CZK
Frekvence výměny střižnice za novou	1 000 000	dělicích cyklů
Cena za výměnu střižnice rozpočítaná na 1 dělicí cyklus	0,025	CZK/dělicí cyklus
Cena za broušení střižnice	200	CZK
Frekvence broušení střižnice	60 000	dělicích cyklů
Cena za broušení střižnice rozpočítaná na 1 dělicí cyklus	0,003	CZK/dělicí cyklus
Celková cena za broušení a výměnu nástrojů rozpočítaná na 1 dělicí cyklus	0,058	CZK/dělicí cyklus

Ve spotřebě řezné kapaliny není mezi dělením stříhem a pilový kotoučem velký rozdíl – i v případě stříhu je objem okruhu 600 l a emulze o koncentraci 8 % se vyměňuje 2x za rok. Tyto náklady jsou vyjádřeny v tabulce 12.

Tabulka 12: Náklady na spotřebu řezné kapaliny jednotky dělení dvouosým stříhem

Spotřeba řezné kapaliny		
Cena 1 litru řezné kapaliny	200	CZK/l
Objem okruhu řezné kapaliny	600	l
Koncentrace řezné kapaliny v okruhu	8%	-
Frekvence výměny řezné kapaliny	2	za rok
Spotřeba řezné kapaliny za rok	96	l/rok
Cena za řeznou kapalinu za rok	19 200	CZK
Cena za řeznou kapalinu na 1 dělicí cyklus	0,008	CZK/dělicí cyklus

Oproti tomu ve ztrátách z odstávky linky pro výměnu nástroje je rozdíl znatelný. Z důvodu delší trvanlivosti nože dochází k odstávce průměrně 1x za 2 dny, tedy 0,5 odstávky za den. Výměna nože je navíc jednodušší, zabere v průměru 10 minut. Tyto ztráty rozpočítané na 1 dělicí cyklus shrnuje tabulka 13.

Tabulka 13: Ztráty z odstávky linky pro výměnu nástroje a seřízení jednotky dělení dvouosým stříhem

Ztráta z odstávky linky pro výměnu nástroje, seřízení		
Počet odstávek linky během dne pro výměnu nástroje	0,5	-
Průměrná doba trvání jedné odstávky	10	min
Průměrná doba odstávky za den	5	min/den
Nevyrobená délka trubky z důvodu odstávky linky za den	300	m
Průměrný zisk z prodeje 1 m trubky	1,4	CZK
Ušlý zisk z odstávky linky pro výměnu nástroje	420	CZK
Ušlý zisk z odstávky linky pro výměnu nástroje rozpočítaný na 1 dělicí cyklus	0,055	CZK/dělicí cyklus

Součet výše rozebraných celkových provozních nákladů na 1 dělicí cyklus pak shrnuje tabulka 14.

Tabulka 14: Součet celkových provozních nákladů na 1 dělicí cyklus jednotky dělení pilovým kotoučem

Celkové náklady na 1 dělicí cyklus		
Celková cena za spotřebu energie na 1 dělicí cyklus	0,255	CZK/dělicí cyklus
Celková cena za broušení a výměnu nástrojů rozpočítaná na 1 dělicí cyklus	0,058	CZK/dělicí cyklus
Cena za řeznou kapalinu na 1 dělicí cyklus	0,008	CZK/dělicí cyklus
Ztráta z odstávky linky pro výměnu nástroje rozpočítaný na 1 dělicí cyklus	0,055	CZK/dělicí cyklus
Celkem	0,376	CZK/dělicí cyklus

7.4.3. Rozpad nákladů na provoz jednotky orbitálního dělení laserem

V případě jednotky orbitálního laserového dělení je příkon pojezdu výrazně nižší než pro dříve zmíněné metody, a to konkrétně 11 kW. To je způsobeno zejména nízkou hmotnostní procesní hlavou, s čímž je spojena nižší kinetická energie, kterou je nutno jednotce dodat na rozjezd, brždění i návrat vozíku. Vozík je v provozu 5,5 s z 6s cyklu, shodně jako v případě ostatních metod. Příkon laserového zdroje je uvažován 4 kW, příkon servomotoru rotujícího procesní hlavou 5 kW a počítá se s provozem laseru po

dobu 2 s z každého cyklu. Dále je třeba ještě brát v potaz chladicí jednotku, která má příkon 2,2 kW, a je v provozu po celou dobu cyklu. Náklady na elektrickou energii spotřebovanou během 1 cyklu orbitálního dělení laserem vyjadřuje tabulka 15.

Tabulka 15: Náklady na spotřebu elektrické energie jednotky orbitálního dělení laserem

Spotřeba elektrické energie		
Příkon pojezdu vozíku	11	kW
Čas provozu vozíku z 1 dělicího cyklu	5,5	s
Čas provozu vozíku za den	11,73	h/den
Spotřeba elektrické energie na provoz vozíku	129,0667	kWh/den
Cena za den provozu vozíku	490,4533	CZK
Cena za spotřebu elektrické energie vozíku na 1 dělicí cyklus	0,064	CZK/dělicí cyklus
Příkon laseru a servomotoru procesní hlavy	9	kW
Čas provozu laseru z 1 dělicího cyklu	2	s
Čas provozu laseru za den	3,84	h/den
Spotřeba elektrické energie na provoz laseru	34,56	kWh/den
Cena za den provozu laseru	131,328	CZK/den
Cena za spotřebu elektrické energie laseru a servomotoru na 1 dělicí cyklus	0,017	CZK/dělicí cyklus
Příkon chladicí jednotky laseru	2,2	kW
Čas provozu chladicí jednotky z 1 dělicího cyklu	6	s
Čas provozu chladicí jednotky za den	13	h/den
Cena za den provozu chladicí jednotky	107	CZK/den
Cena za spotřebu elektrické energie chladicí jednotky na 1 dělicí cyklus	0,014	CZK/dělicí cyklus
Celková cena za spotřebu energie na 1 dělicí cyklus	0,095	CZK/dělicí cyklus

V případě laserového řezání se nepoužívají žádné nástroje, které by bylo potřeba vyměňovat či brousit. Je však třeba uvažovat s pravidelným údržbovým servisem laseru, a to konkrétně jednou ročně. Takový servis trvá standardně 5 hodin, s hodinovou servisní sazbou 800 CZK/hod. Při tomto servisu dojde k výměně opotřebovaných dílů laseru, jejichž cena bývá přibližně 30 000 CZK. Tyto náklady, přepočítané na 1 dělicí cyklus, jsou shrnuty v následující tabulce 16.

Tabulka 16: Náklady na servis a náhradní díly jednotky orbitálního dělení laserem

Servis a náhradní díly		
Cena servisu	800	CZK/hod
Frekvence servisu	1	za rok
Doba trvání servisu	5	hod
Cena za servis laseru	4 000	CZK/rok
Cena za náhradní díly	30 000	CZK/rok
Celková cena za servis a náhradní díly laseru rozpočítaná na 1 dělicí cyklus	0,015	CZK/dělicí cyklus

Při laserovém řezání není potřeba používat řeznou kapalinu, projevuje se tu ale jiný náklad, a to spotřeba asistenčního plynu – dusíku. Ze zkoušek vyplývá, že spotřeba plynu je přibližně 2 l na jeden dělicí cyklus. Dusík o čistotě 4.0 se ve firmě Attl nakupuje za 23,2 CZK/m³. Přepočet této ceny na 1 dělicí cyklus je patrný z tabulky 17.

Tabulka 17: Náklady na spotřebu asistenčního plynu jednotky orbitálního dělení laserem

Spotřeba asistenčního plynu		
Cena asistenčního plynu N ₂ v čistotě 4.0	23,2	CZK/m ³
Spotřeba asistenčního plynu na 1 řez	2	l/dělicí cyklus
Cena za asistenční plyn na 1 dělicí cyklus	0,046	CZK/dělicí cyklus

V případě laserového řezání se aktivně nepoužívají žádné nástroje podléhající opotřebením, přesto je třeba laser jednou za čas odstavit, zejména za účelem vyčištění optiky řezací hlavy. Taková odstávka se provádí 1x za pět dní a trvá přibližně 20 minut. Dále do ztrát z odstávky zahrnují čas na pravidelný údržbový servis laseru 1x ročně v době trvání 6 hodin (5 hodin samotný servis + 1 hodina příprava a opětovné spuštění). Přepočet ztrát způsobených těmito odstávkami na 1 dělicí cyklus je patrný z tabulky 18.

Tabulka 18: Ztráty z odstávky linky na čištění optiky a servis laseru jednotky orbitálního laserového dělení

Ztráty z odstávky linky na čištění optiky a servis laseru		
Počet odstávek linky během dne pro čištění optiky laseru	0,2	-
Průměrná doba trvání jedné odstávky pro čištění optiky laseru	20	min
Průměrná doba odstávky za den pro čištění optiky laseru	4	min/den
Nevyrobená délka trubky z důvodu odstávky linky za den	240	m
Průměrný zisk z prodeje 1 m trubky	1,4	CZK
Ušlý zisk z odstávky linky pro čištění optiky za den	336	CZK
Ušlý zisk z odstávky linky pro čištění optiky na 1 dělicí cyklus	0,044	CZK/dělicí cyklus
Průměrná doba trvání jedné odstávky na servis	6	hod
Frekvence odstávky linky na servis laseru	1	ročně
Nevyrobená délka trubky z důvodu odstávky linky na servis laseru	21600	m/rok
Průměrný zisk z prodeje 1 m trubky	1,4	CZK
Ušlý zisk z odstávky linky pro servis laseru na 1 dělicí cyklus	0,002	CZK/dělicí cyklus
Celkový ušlý zisk z odstávky linky rozpočítaný na 1 dělicí cyklus	0,046	CZK/dělicí cyklus

Součet nákladů na 1 dělicí cyklus jednotky orbitálního laserového dělení pak shrnuje tabulka 19.

Tabulka 19: Součet celkových provozních nákladů na 1 dělicí cyklus jednotky dělení pilovým kotoučem

Celkové náklady na 1 dělicí cyklus		
Celková cena za spotřebu energie na 1 dělicí cyklus	0,095	CZK/dělicí cyklus
Celková cena za servis a náhradní díly laseru rozpočítaná na 1 dělicí cyklus	0,015	CZK/dělicí cyklus
Cena za asistenční plyn na 1 dělicí cyklus	0,046	CZK/dělicí cyklus
Ztráta z odstávky linky pro výměnu nástroje rozpočítaný na 1 dělicí cyklus	0,046	CZK/dělicí cyklus
Celkem	0,202	CZK/dělicí cyklus

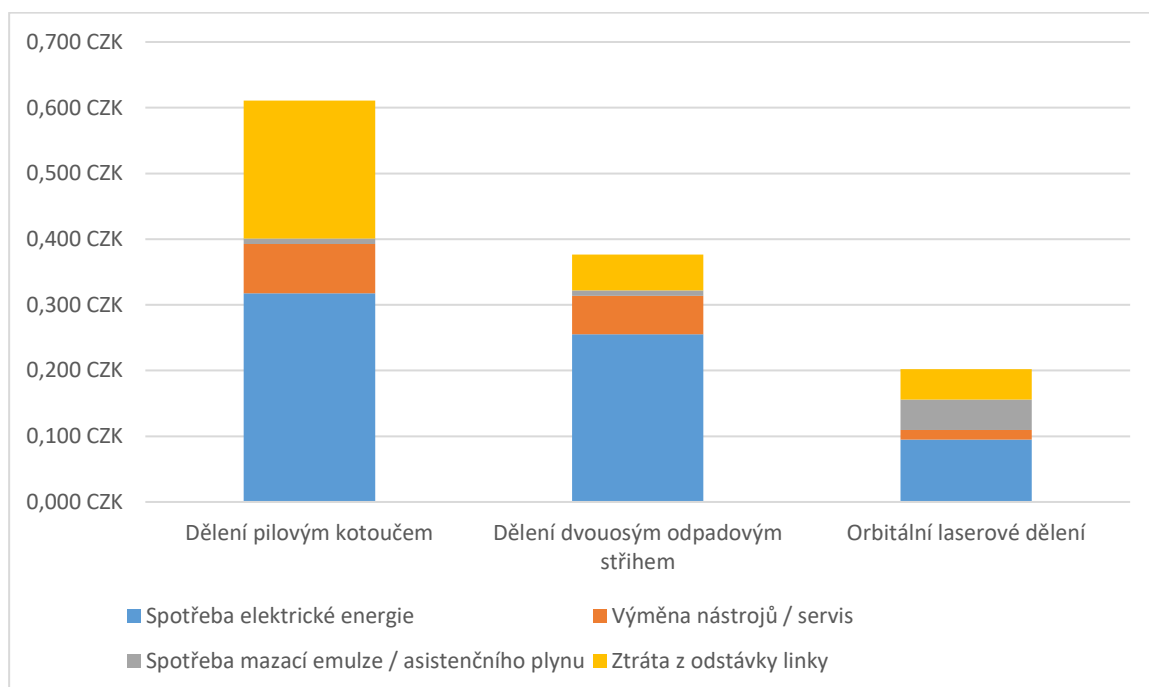
7.4.4. Shrnutí srovnání metod dělení trubek z hlediska provozních nákladů

Následující tabulka 20 a graf 1 shrnují v předchozích kapitolách podrobně rozebrané náklady na 1 cyklus dělení pilovým kotoučem, dvouosým odpadovým stříhem a orbitálním laserovým dělením.

Tabulka 20: Porovnání metod dělení z hlediska nákladů na 1 dělicí cyklus

	Dělení pilovým kotoučem	Dělení dvouosým odpadovým stříhem	Orbitální laserové dělení
Spotřeba elektrické energie	0,318 CZK	0,255 CZK	0,095 CZK
Výměna nástrojů / servis	0,075 CZK	0,058 CZK	0,015 CZK
Spotřeba řezné kapaliny / asistenčního plynu	0,008 CZK	0,008 CZK	0,046 CZK
Ztráta z odstávky linky	0,210 CZK	0,055 CZK	0,046 CZK
Celkem	0,611 CZK	0,376 CZK	0,202 CZK

Graf 1: Porovnání metod dělení z hlediska nákladů na 1 dělicí cyklus

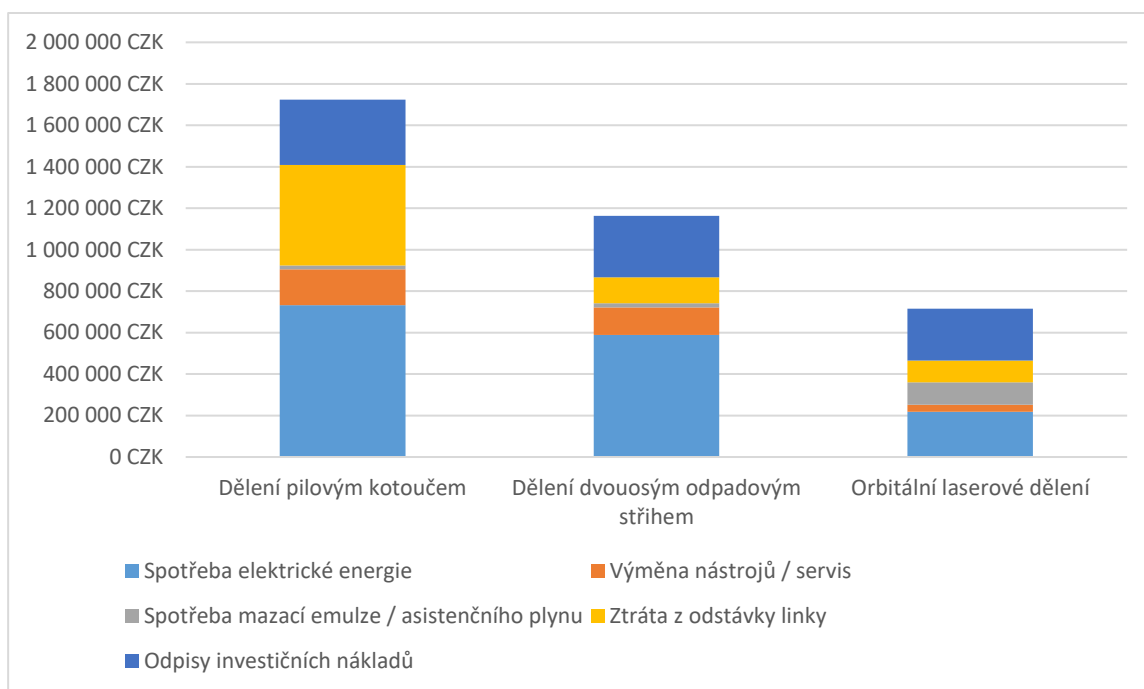


Pro lepší představu uvádím ještě tabulku 21 a graf 2, ve kterých jsou tyto náklady přepočítány na roční provoz. Do této tabulky jsou také zahrnuty odpisy investičních nákladů na jednotlivé dělicí jednotky, přičemž se počítá s odpisem této technologie po dobu 10 let.

Tabulka 21: Porovnání metod dělení z hlediska nákladů na roční provoz, včetně odpisu investičních nákladů

	Dělení pilovým kotoučem	Dělení dvouosým odpadovým stříhem	Orbitální laserové dělení
Spotřeba elektrické energie	732 032 CZK	588 544 CZK	218 637 CZK
Výměna nástrojů / servis	172 800 CZK	133 680 CZK	34 000 CZK
Spotřeba řezné kapaliny / asistenčního plynu	19 200 CZK	19 200 CZK	106 906 CZK
Ztráta z odstávky linky	483 840 CZK	126 000 CZK	105 840 CZK
Odpisy investičních nákladů	315 000 CZK	295 000 CZK	250 000 CZK
Celkem	1 722 872 CZK	1 162 424 CZK	715 382 CZK

Graf 2: Porovnání metod dělení z hlediska nákladů na roční provoz, včetně odpisu investičních nákladů



Ačkoliv musela být řada parametrů všech uvažovaných metod dělení odhadnuta, což do kalkulace vnáší jistou míru nejistoty, je výhodnost použití laserového dělení z hlediska nákladů na provoz poměrně zřejmá.

Laserové dělení má potenciál šetřit provozní náklady na dělení trubek ve výrobních linkách, a to přibližně o 40 % oproti nákladům na dělení dvouosým stříhem, a až o 60 % oproti nákladům na dělení pilovým kotoučem.

Tato úspora spočívá zejména ve výrazně nižší spotřebě elektrické energie této jednotky a ušetření nákladů na broušení a výměnu nástrojů používaných při konvenčních metodách dělení trubek. Díky eliminaci nástrojů náchylných na opotřebení má jednotka orbitálního laserového dělení také potenciál vyšší stability provozu. Nepřímo tak šetří náklady způsobené odstávkami linky pro výměnu a údržbu těchto nástrojů.

O něco nižší jsou i investiční náklady na pořízení této technologie, započítané do kalkulace nákladů na provoz prostřednictvím ročních odpisů. To se může zdát paradoxní, protože investice do laserového zdroje je v porovnání s kotoučovou pilou nebo střížnou jednotkou na první pohled vysoká. Díky nízké hmotnosti procesní hlavy laseru se však výrazně ušetří náklady na pohonu vozíku i rotace procesní hlavy, odpadá navíc náklad na hydraulický agregát a okruh řezné kapaliny.

Jedinou nevýhodou jednotky orbitálního laserového dělení se tak zdají být náklady na spotřebu asistenčního plynu, která je v porovnání se spotřebou řezné kapaliny nákladnější. Zvýšení nákladů v této kategorii je však převáženo náklady ušetřenými v ostatních sledovaných kategoriích.

8. Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval technologií laserového dělení trubek a porovnáním této metody s konvenčními metodami dělení trubek ve výrobních linkách.

V rešeršní části práce jsem nejdříve nastínil konvenční metody, které se k dělení trubek v linkách v současné době standardně používají.

V dalších částech jsem se detailněji zabýval technologií laserového řezání, jako možnou alternativou ke konvenčním metodám dělení trubek v linkách. Popsal jsem typy laserů, které se k řezání materiálu používají a zhodnotil jsem výhody a nevýhody jejich použití, zejména ve vztahu k aplikaci pro orbitální dělení trubek v linkách.

Jako nejvhodnější pro tuto aplikaci se na základě dostupných informací ukázal být vláknový laser. S použitím zdroje vláknového laseru jsem tedy uvažoval i v následující technicko-ekonomické části.

V této části jsem porovnával náklady na provoz uvažovaných jednotek letmého dělení trubek v linkách. Laserové dělení jsem porovnával se dvěma nejběžnějšími konvenčními metodami dělení, konkrétně s dělením pilovým kotoučem a dvousým odpadovým stříhem.

Náklady na provoz jsem rozdělil do 4 kategorií, v nichž jsem pro každou z uvažovaných metod dělení vyčíslal náklady na provoz takové dělicí jednotky. Pro potřeby porovnání jsem každý z nákladů rozpočítával na 1 dělicí cyklus, následně jsem tyto náklady pro lepší představu přepočítal na roční provoz jednotky při dvousměnném provozu. Do nákladů na roční provoz jsem zahrnul i odpisy investičních nákladů.

Z technicko-ekonomického srovnání vyplynulo, že jednotka orbitálního laserové dělení trubek má v porovnání s konvenčními metodami dělení znatelně nižší náklady na provoz, a je tak konkurenceschopnou alternativou ke konvenčním metodám dělení trubek v linkách.

Použité zdroje

- [1] TOWNES, Charles. The first laser. *A Century of Nature: Twenty-One Discoveries that Changed Science and the World* [online]. the University of Chicago Press, 2003 [cit. 2020-03-23]. ISBN 0-226-28415-8. Dostupné z: https://www.press.uchicago.edu/Misc/Chicago/284158_townes.html
- [2] HILTON, Paul. In the beginning ... [the history of laser cutting]. *TWI* [online]. Scottsdale, Arizona, USA, 2002 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/in-the-beginning-the-history-of-laser-cutting-october-2002>
- [3] *Laser Processing Applications* [online]. SPI Lasers [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.spilasers.com/laser-processing-applications/>
- [4] ČADA, Radek. *Technologie I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1507-7.
- [5] BANISH, Alec. Selecting a tube cutting process: Methods and applications, pros and cons. *The Fabricator* [online]. 2004 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/tubepipefabrication/selecting-a-tube-cutting-process>
- [6] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-718-3207-3.
- [7] Katalog PILOVÉ KOTOUČE, KOTOUČOVÉ NOŽE, FRÉZY. *GSP - High Tech Saws* [online]. Zborovice: GSP - High Tech Saws, s.r.o., 2013 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://www.gspzborovice.cz/Ke-stazeni/>
- [8] TRUCKLY, Frank. Band saw or circular cold saw?. *The Fabricator* [online]. 2009 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/sawing/band-saw-or-circular-cold-saw>
- [9] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 2. část*. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, 2004.
- [10] *Geometrické charakteristiky pilového pásu* [online]. Pilana Metal [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.pilanametal.cz/geometricke-charakteristiky.html>
- [11] *Pilové Pásky* [online]. Pilous [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.pilous.cz/metal/pilove-pasy>
- [12] HECHT, Jeff. Laser: Fundamental Principles. *Encyclopædia Britannica* [online]. Encyclopædia Britannica, inc., 2020 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/laser/Fundamental-principles>
- [13] *Princip CO2 laseru* [online]. Leonardo technology [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>
- [14] Introduction to Laser Technology. *Melles Griot* [online]. Melles Griot [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/Lasers.pdf>
- [15] OŠKERA, Jakub. *Femtosekundové lasery a jejich aplikace* [online]. Brno, 2016 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=129472. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [16] PODANÝ, Petr. *Optimalizace technologie laserového dělení trubek se čtvercovým průřezem* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=174474. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

- [17] *Types of CO2 Lasers* [online]. CTR Lasers [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://www.ctrlasers.co.uk/types-of-co2-lasers>
- [18] FRAUENPREISS, Thorsten. CO2 Lasers: The Industrial Workhorse. *Photonics* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: https://www.photonics.com/Articles/COSUB2_SUB_Lasers_The_Industrial_Workhorse/a25155
- [19] SCHÜTTLER, Jens. 3D Modeling of a Planar Discharge in a CO2 Laser Using a Multilevel Approach. *Researchgate* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/310147275_3D_Modeling_of_a_Planar_Discharge_in_a_CO2_Laser_Using_a_Multilevel_Approach
- [20] ABRAMCZYK, Halina. Lasers. *Introduction to Laser Spectroscopy* [online]. Elsevier, 2005, , 59-106 [cit. 2020-03-24]. DOI: 10.1016/B978-044451662-6/50005-8. ISBN 9780444516626. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444516626500058>
- [21] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *LAO - průmyslové systémy* [online]. 2013 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [22] POWELL, J. a A. KAPLAN. *Laser Cutting: From First Principles to the State of Art* [online]. In: . 2004 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <http://laserexp.co.uk/wp-content/uploads/2012/10/LASER-CUTTING-FROM-FIRST-PRINCIPLES-TO-THE-STATE-OF-THE-ART.pdf>
- [23] PASCHOTTA, Rüdiger. Thin-disk Lasers. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. RP Photonics [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/thin_disk_lasers.html
- [24] MANN, Kurt. Disk Lasers Enable Application Advancements. *Photonics Spectra* [online]. 2004 [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=17863>
- [25] Fiber lasers: The state of the art. *Laser Focus World* [online]. 2012 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/test-measurement/spectroscopy/article/16549567/fiber-lasers-fiber-lasers-the-state-of-the-art>
- [26] *Princip vláknového - FIBER LASERU* [online]. Leonardo technology [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
- [27] Semiconductor: The P-N Junction. *Encyclopædia Britannica* [online]. Encyclopædia Britannica, inc., 2019 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/semiconductor/The-p-n-junction>
- [28] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody: Část 1 - Princip funkce laserových diod. *Elektrorevue* [online]. 2001, (34) [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
- [29] *Laser Diode Working Principle* [online]. Engineering Tutorial [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://engineeringtutorial.com/laser-diode-working-principle/>
- [30] NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM Spektrum* [online]. 2012 [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
- [31] *Semiconductor Lasers: An Overview of Commercial Devices* [online]. Photonics [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: https://www.photonics.com/Articles/Semiconductor_Lasers_An_Overview_of_Commercial/a25099

- [32] Laser Material Processing in Industrial Production. *Laserline* [online]. Mülheim-Kärlich [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/laser-material-processing/>
- [33] VILLARREAL SAUCEDO, Francisco. Direct diode vs. other laser systems used in laser cutting. *Industrial Laser Solutions* [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/cutting/article/16485637/direct-diode-vs-other-laser-systems-used-in-laser-cutting>
- [34] BELFORTE, D.A. Laser Cutting. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* [online]. 2. vydání. Elsevier, 2001, s. 4399-4402 [cit. 2020-06-13]. DOI: 10.1016/B0-08-043152-6/00770-1. ISBN 9780080431529. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B0080431526007701>
- [35] KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ ŘEZÁNÍ (LASER CUTTING). *LAO - průmyslové systémy* [online]. 2013 [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [36] KAŠPAR, Jan. Laserové řezání: volba a vlastnosti asistenčních plynů. *Technický týdeník* [online]. 2014 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/laserove-rezani-volba-a-vlastnosti-asistencnich-plynu_28272.html
- [37] *Laserové řezání jako bezkontaktní proces oddělování* [online]. Trumpf [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/
- [38] *Laser Cutting* [online]. Industrialin [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://industrialin.com/laser-cutting>
- [39] *Katalog produktů: Válcovací linky a jejich komponenty* [online]. 3. vydání. Praha: Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: https://www.attl.cz/dokumenty/kompletni_katalog-cz.pdf
- [40] *Laser tube cutting machines* [online]. Trumpf [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/en_INT/products/machines-systems/laser-tube-cutting-machines/

Seznam obrázků

Obrázek 1: Jednotka letmého dělení kotoučovou pilou.....	9
Obrázek 2: Tvary zubů pilových kotoučů pro dělení trubek [7].....	10
Obrázek 3: Geometrické charakteristiky pilového pásu [10]	10
Obrázek 4: Úhly čela pilového pásu [11]	11
Obrázek 5: Druhy rozvodu pilového pásu [10]	11
Obrázek 6: Nůž pro stříh s odpadem [4].....	12
Obrázek 7: Schéma bezodpadového stříhu [4].....	13
Obrázek 8: Princip vzniku laserového paprsku [12].....	15
Obrázek 9: Konstrukce průtočného CO ₂ laseru buzeného stejnosměrným výbojem [18]	17
Obrázek 10: Konstrukce RF buzeného Slab laseru [19]	18
Obrázek 11: Schéma tyčového LPSS Nd:YAG laseru [21].....	19
Obrázek 12: Konstrukce DPSS Nd:YAG laseru s bočním (levý) a zadním (pravý) buzením [21]	19
Obrázek 13: Princip vzniku laserového svazku v diskovém laseru [24]	20
Obrázek 14: Princip vláknového laseru [26]	21
Obrázek 15: Princip vzniku laserového záření v laserové diodě [29]	22
Obrázek 16: Spojování laserových diod (a) do řad (b) a sloupců (c) [31]	23
Obrázek 17: Optické spojení laserového záření z několika bloků diodového laseru [16]	23
Obrázek 18: Princip laserového řezání [35].....	24
Obrázek 19: Porovnání řezu zhotoveného oxidačním (O ₂) a tavným (N ₂) řezáním na trubce Ø80x3,0	26
Obrázek 20: Schéma procesní řezací hlavy laseru [38]	27
Obrázek 21: Pojezd vozíku letmého dělení s kotoučovou pilou	29
Obrázek 22: Jednotka orbitálního laserového dělení pro rychlost linky do 6 m/min	30

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled laserů dostupných pro řezání materiálu.....	16
Tabulka 2: Parametry trubky uvažované pro potřeby technicko-ekonomického porovnání metod dělení trubek .	31
Tabulka 3: Parametry výroby uvažované pro potřeby technicko-ekonomického srovnání metod dělení trubek ...	32
Tabulka 4: Srovnání investičních nákladů na jednotky letmého dělení.....	32
Tabulka 5: Náklady na spotřebu elektrické energie jednotky dělení pilovým kotoučem.....	33
Tabulka 6: Náklady na broušení a výměnu nástroje jednotky dělení pilovým kotoučem	33
Tabulka 7: Náklady na spotřebu řezné kapaliny jednotky dělení pilovým kotoučem	34
Tabulka 8: Ztráty z odstávky linky pro výměnu nástroje a seřízení jednotky dělení pilovým kotoučem	34
Tabulka 9: Součet celkových provozních nákladů na 1 dělicí cyklus jednotky dělení pilovým kotoučem	34
Tabulka 10: Náklady na spotřebu elektrické energie jednotky dělení dvouosým stříhem	35
Tabulka 11: Náklady na broušení a výměnu nástroje jednotky dělení dvouosým stříhem	35
Tabulka 12: Náklady na spotřebu řezné kapaliny jednotky dělení dvouosým stříhem	36
Tabulka 13: Ztráty z odstávky linky pro výměnu nástroje a seřízení jednotky dělení dvouosým stříhem	36
Tabulka 14: Součet celkových provozních nákladů na 1 dělicí cyklus jednotky dělení pilovým kotoučem.....	36
Tabulka 15: Náklady na spotřebu elektrické energie jednotky orbitálního dělení laserem	37
Tabulka 16: Náklady na servis a náhradní díly jednotky orbitálního dělení laserem	37
Tabulka 17: Náklady na spotřebu asistenčního plynu jednotky orbitálního dělení laserem	38
Tabulka 18: Ztráty z odstávky linky na čištění optiky a servis laseru jednotky orbitálního laserového dělení.....	38
Tabulka 19: Součet celkových provozních nákladů na 1 dělicí cyklus jednotky dělení pilovým kotoučem.....	38
Tabulka 20: Porovnání metod dělení z hlediska nákladů na 1 dělicí cyklus	39
Tabulka 21: Porovnání metod dělení z hlediska nákladů na roční provoz, včetně odpisu investičních nákladů	39