



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ KYSLÍKU NEBO DUSÍKU JAKO ŘEZNÉHO MÉDIA PŘI LASEROVÉM ŘEZÁNÍ

TECHNICAL AND ECONOMIC EVALUATION OF THE USE OF OXYGEN OR NITROGEN AS
THE CUTTING MEDIUM DURING LASER CUTTING OF SHEET METAL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Petr KRÁLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Kateřina MOURALOVÁ

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Králík

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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

Technicko-ekonomické zhodnocení použití kyslíku nebo dusíku jako řezného média při laserovém řezání plechů.

v anglickém jazyce:

Technical and economic evaluation of the use of oxygen or nitrogen as the cutting medium during laser cutting of sheet metal.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zadaný strojírenský podnik se zabývá řezáním plošných součástí z plechu pomocí laserové technologie. Sortiment výrobků je velmi široký a jedná se převážně o kusovou výrobu. Vybavení podniku umožňuje použití dvou řezných médií, kyslíku a dusíku. Úkolem je porovnat náklady na využití těchto médií a produktivitu strojů při zachování požadované kvality výrobků.

Cíle bakalářské práce:

Cílem je zjistit ekonomicky nejvýhodnější rozložení výroby podle použitého řezného média s důrazem na kvalitu výrobků.

Seznam odborné literatury:

1. BARCAL, Jaroslav. Nekonenční metody obrábění, Skriptum FSI ČVUT, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.
2. KOČMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav, J. Technologie obrábění. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270s. ISBN 80-214-1996-2.
3. MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie, 1.vyd. Košice: Vienaľa, 2000. 275s. ISBN 80-7099-430-4.
4. BENKO, Bernard; FODEREK, Peter; KOSEČEK, Miroslav; BIELAK, Róbert. Laserové technológie, 1.vyd., Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.
5. OBERG, Erik; JONES, Franklin D; HORTON, Holbrook L; RYFFEL, Henry H. Machinery's hand-book. 25th Edition. New York: Industrial Press Inc., 1996. 2547 s. ISBN 0 8311-2595-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kateřina Mouralová

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 6.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

KRÁLÍK Petr: Technicko-ekonomické zhodnocení použití kyslíku nebo dusíku jako řezného média při laserovém řezání plechů.

Práce se zabývá otázkou, zda se strojírenskému podniku při vypalování součástí pomocí laseru vyplatí používat tavnou metodu řezání nebo metodu oxidační doplněnou o zařízení Lissmac SBM-M 1500 B2 určené k čištění oxidické vrstvy z plochy řezu. Nejdříve byly spočteny náklady na provoz čistícího stroje umístěného v prostředí nepřetržité výroby. Poté bylo provedeno shromáždění dat za jeden výrobní měsíc a z těchto dat byla pomocí tlaku a průřezu trysky spočtena možná úspora peněz za procesní plyn. Dále byla spočtena úspora za elektřinu a nárůst výrobní kapacity díky vyšší řezné rychlosti dosahované při oxidačním řezání. Ze získaných dat byl vytvořen graf doby návratnosti investice pro 100 %, 50 % a 0 % využití nově vzniklé kapacity. Nakonec byla doporučena opatření pro dosažení co nejvyššího výnos z investice.

Klíčová slova

laser, procesní plyn, tavné řezání, oxidační řezání

ABSTRACT

KRÁLÍK Petr: Technical and economic evaluation of the use of oxygen or nitrogen as the cutting medium during laser cutting of sheet metal.

This thesis deals with a production issue for an engineering company - the optimal method for laser cutting. The options considered are the fusing method of cutting or the oxidising method, utilising the Lissmac SBM-M 1500 B2 equipment - designated for cleaning the oxidising a layer from the incision area. Initially, the cost of machine maintenance was calculated within a continuous production environment. Data was collected from a single month's production and the potential savings for the processional gas were calculated through the pressure and flow values. In addition, electricity savings and the increased production capacity were calculated due to the higher cutting speed achieved by oxidizing cutting. From the gained data, a graph was created of the investment recovery time for 100%, 50% and 0% of the new created capacity use. Finally, measures for the highest profit from the investment were recommended.

Key words

laser, process gas, fusion cutting, oxidizing cutting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRÁLÍK, Petr. *Technicko-ekonomické zhodnocení použití kyslíku nebo dusíku jako řezného média při laserovém řezání plechů*. Brno, 2012. 30 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Kateřina Mouralová.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V dne 15.5.2012

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji paní Ing. Kateřině Mouralové za benevolentní přístup, podporu a ochotu vyjít vstříc při zpracování bakalářské práce a panu Petru Filípkovi za odborné rady a pomoc.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	8
1 Teoretická část	9
1.1 Historie	9
1.2 Princip	10
1.3 Rozdělení dle aktivního prostředí	11
1.3.1 Plynové lasery	11
1.3.2 Pevnolátkové lasery	13
1.4 Využití laseru	15
1.4.1 Řezání laserem.....	15
1.4.2 Svařování laserem	16
1.4.3 Vrtání laserem	16
1.4.4 Gravírování	17
1.5 Proces řezání	17
1.5.1 Tavné řezání	17
1.5.2 Oxidační řezání.....	18
1.5.3 Sublimační řezání	18
1.5.4 Řezání s podporou vzduchu.....	18
2 Praktická část	19
2.1 Současný stav	19
2.2 Čistící stroj Lissmac SBM-M B2	20
2.2.1 Náklady na provoz SBM-M 1500 B2.....	21
2.3 Tavné vs. oxidační řezání.....	22
2.3.1 Spotřeba plynu	23
2.3.2 Výrobní kapacita	25
2.4 Finanční úspory	26
2.4.1 Náklady na plyny.....	26
2.4.2 Úspora elektřiny	27
2.4.3 Zisk z nárůstu kapacity	27
2.5 návratnost	28
2.6 Požadavky na změnu technologie	29
2.7 Doporučení	29
ZÁVĚR	30

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů

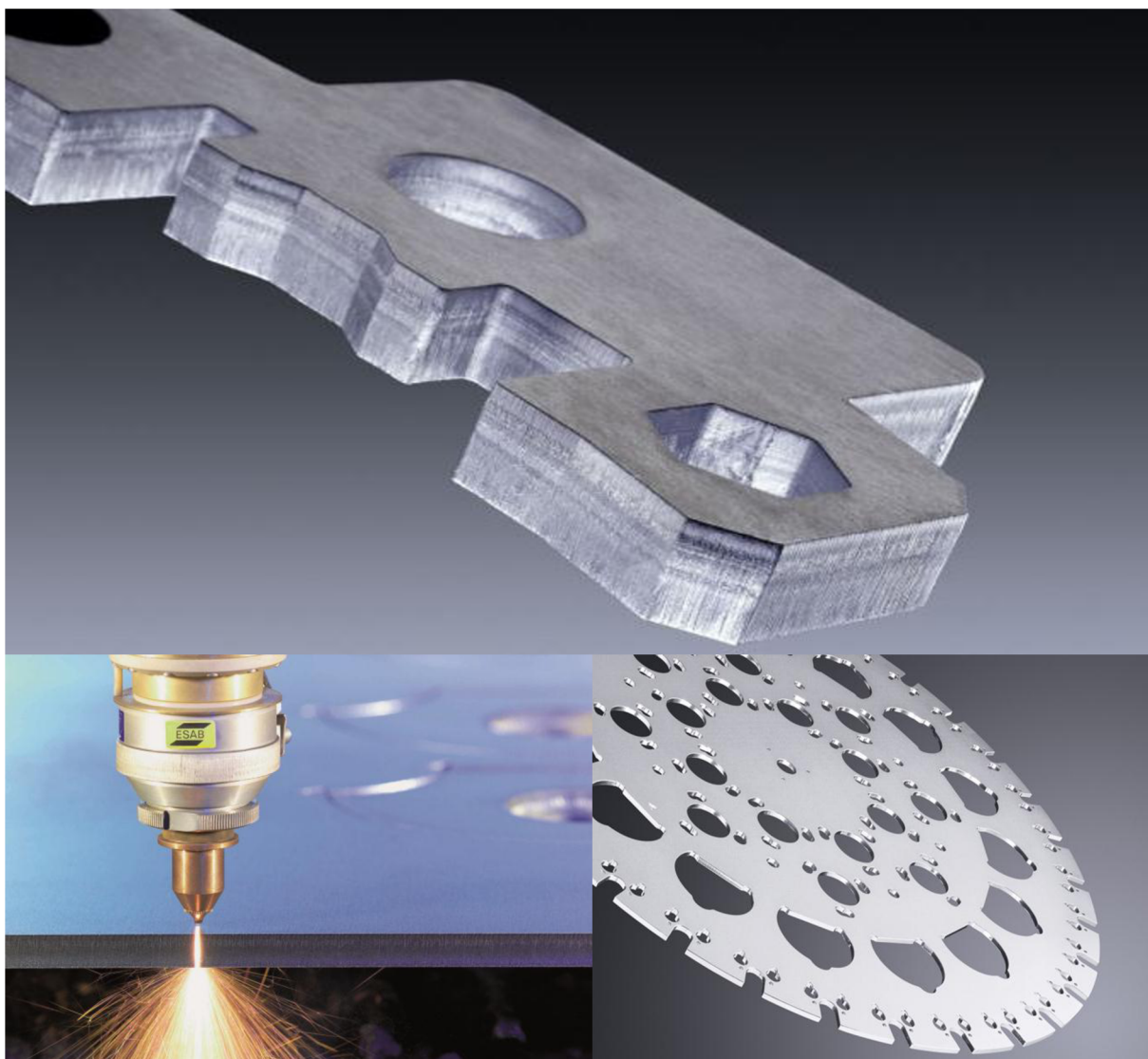
Seznam příloh

Přílohy

ÚVOD

Technologie laserového řezání patří do skupiny nekonvenčních metod obrábění. U těchto metod nedochází k přímému kontaktu mezi nástrojem a obrobkem, ale je využíváno fyzikálních principů a zákonitostí o erozi materiálu. Použití metody laserového řezání je opodstatněno tam, kde je nutno obrábět těžko obrobitelné materiály anebo tam, kde se z hlediska technického nebo ekonomického nevyplatí použít klasické metody dělení materiálu. Použití laseru můžeme společně s příkladem výrobku a vzhledu řezné hrany vidět na obr.1. ^{1,2,7}

Laserové dělení materiálu můžeme společně s plasmovým řezáním a kyslíkovým řezáním zařadit také jako tepelné dělení materiálu. Oproti dalším dvěma zmíněným metodám je laser přesnější a jím vytvořená řezná spára je menší a kvalitnější. Kvalita řezné spáry u laseru závisí mimo jiné na použitém pracovním plynu. Při tavném řezání je využit inertní plyn, který s materiálem nereaguje a má ho pouze odvézt z místa řezu. Při řezání oxidačním se používá nejčastěji kyslík, pomocí kterého je materiál spalován. Obě metody mají své výhody a nevýhody a vhodná volba pracovního plynu může velmi významně zasáhnout do ekonomické stránky procesu.



Obr.1 Ukázka práce řezné hlavy, výrobku a řezné plochy. ^{17,18}

1 Teoretická část

V teoretické části bude obecně popsána technologie laserů, její rozdělení a využití jednotlivých koncepcí.

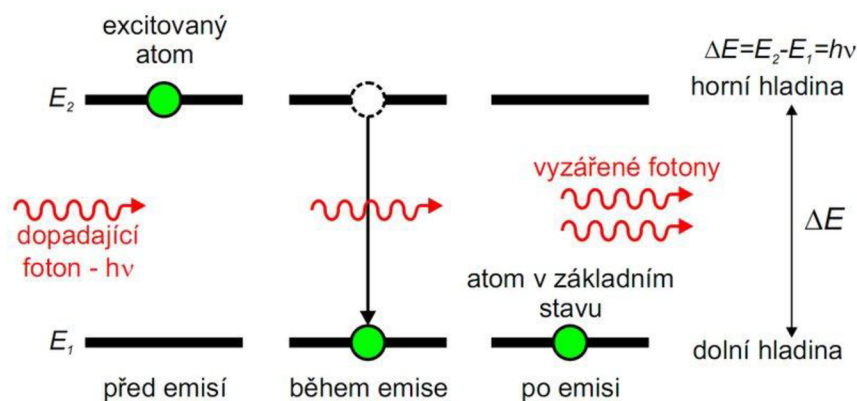
1.1 Historie

Název laseru vznikl z prvních písmen anglických slov popisujících jeho funkci: light amplification by stimulated emission of radiation, což je možné přeložit jako zesílení světla pomocí stimulované emise záření.³

V 17. Století se anglickému vědci Isaacu Newtonovi podařilo rozložit bílé světlo pomocí skleněného hranolu na celé spektrum barev a dokázat tak, že se bílé světlo skládá z více barev. Newton se domníval, že světlo je částicového charakteru a dokázal tuto teorii podložit vysvětlením všech jeho vlastností. Ale Newtonův současník Christian Huyghes viděl podstatu světla ve vlnění. Že měli pravdu oba, dokázal v 19. Století Thomas Young svými pokusy s ohybem a interferencí světla. Na přelomu padesátých a šedesátých let 19. století dokázal svými výpočty James Clark Maxwell, že světlo není nic jiného, než elektromagnetické vlnění. V roce 1900 prohlásil Max Planck, že energie vycházející ze zářícího tělesa neproudí spojitě, ale je vysílána po kvantech. Dospěl také k závěru, že kvantum je přímo úměrné vlnové délce záření. Tím se stal zakladatelem kvantové teorie. Další významnou osobností v historii laseru byl Albert Einstein, který v roce 1917 poukázal na to, že kromě samovolné emise a absorpce světla musí existovat ještě stimulovaná emise. 22 let poté, v roce 1939, přišel ruský fyzik V.A. Fabrikant s možností zesílení elektromagnetického záření procházejícího prostředím pomocí stimulované emise. Tento vědec si v roce 1951 společně s M.M. Vudynským a F.A. Bautajevovou patentoval metodu zesilování ultrafialového, viditelného a infračerveného záření tím, že záření prostupuje prostředím s nerovnovážným stavem, to je takový stav, při kterém je upřednostněno obsazení horních energetických stavů atomů. V roce 1952 přednášeli sovětské fyzikové N.G. Basov a A.M. Prochorov o molekulárním svazkovém generátoru, MASERu, pracujícím se svazkem molekulárního čpavku. První maser byl sestaven Charlesem Townesem, J.P. Gordonem a H.J. Zeigerem v roce 1953. V roce 1964 obdrželi Charles Townes, Nikolaj Basov a Alexandr Prochorov Nobelovu cenu za fyziku za zásadní výzkum v oboru kvantové elektroniky, který směřoval ke konstrukci oscilátorů a zesilovačů založených na principu laserů a maserů. V roce 1960 byl předveden první funkční rubínový laser, který vyrobil Theodore H. Maiman v USA. Ve stejném roce se také povedlo sestrojít první vodíkový maser. První polovodičový laser byl sestaven v roce 1962. Nevýhodou tohoto laseru bylo, že musel být chlazen tekutým dusíkem. Polovodičový laser pracující při pokojové teplotě byl sestrojen až roku 1971. V roce 1964 byl sestrojen první výkonný laser s oxidem uhličitým jako aktivní látkou. Vlnová délka tohoto laseru byla 1060nm. V téže roce J.F. Geusic a R.G. Smith sestrojili první Nd:YAG laser. Od té doby se lasery neustále zdokonalují a nacházejí uplatnění v průmyslu, lékařství a mnoha dalších oborech.^{4,8,9}

1.2 Princip

Laserový paprsek je tvořen koherentním elektromagnetickým zářením, které je charakteristické tím, že všechny fotony mají stejnou frekvenci a tudíž i stejnou vlnovou délku. Paprsek je vytvářen pomocí stimulované emise fotonů, která je vyvolána stimulující vlnou vyslanou do aktivního prostředí. Vlna v aktivním prostředí vynutí přechod elektronů z vyšších atomových hladin do nižších a přebytečná energie je vyzářena ve formě fotonu. Tím je dosažené zesílení původního záření. Znázornění stimulované emise je na obr. 2.^{1,2,11}



Obr. 2 Znázornění stimulované emise¹⁹

Rozdíl energie elektronu ve vyšší hladině a v nižší hladině je nejmenší množství energie, které může atom získat nebo o které může přijít. Tomuto množství se říká kvantum.⁴

Zařízení používané k zesílení záření se nazývá rezonátor. Rezonátor se skládá ze dvou zrcadel, mezi kterými je aktivní prostředí. Jedno zrcadlo je zcela odrazivé a druhé je polopropustné. Fotony vyzářené stimulovanou emisí pomáhají vyvolat další stimulovanou emisi a to až do doby, kdy záření dosáhne určité intenzity a projde přes polopropustné zrcadlo. Po vyzáření paprsku se atomy aktivního prostředí vrátí do základního energetického stavu a po vybuzení, např. pomocí výbojky, se děj opakuje.^{2,12}

Vlnová délka vycházejícího záření je dána použitým aktivním prostředím, které bývá nejčastěji tvořeno směsicí plynů, ovšem použít lze také pevné prostředí, například rubín. Přehled vlnových délek je zobrazen v tabulce 1.

Tab. 1 Vlnové délky dle aktivního prostředí¹²

aktivní prostředí	vlnová délka [nm]	záření
argon - fluor	193	UV
krypton - fluor	248	UV
xenon - chlor	308	UV
helium - kadmium	325, 442	UV, viditelné
argon	488, 514	viditelné
rubín	694	viditelné
Nd:YAG	532, 1060	viditelné, IČ
helium - neon	543, 633, 1150, 3390	viditelné, IČ
polovodičové diody	630 - 1600	viditelné, IČ
CO ₂	9600, 10600	IČ

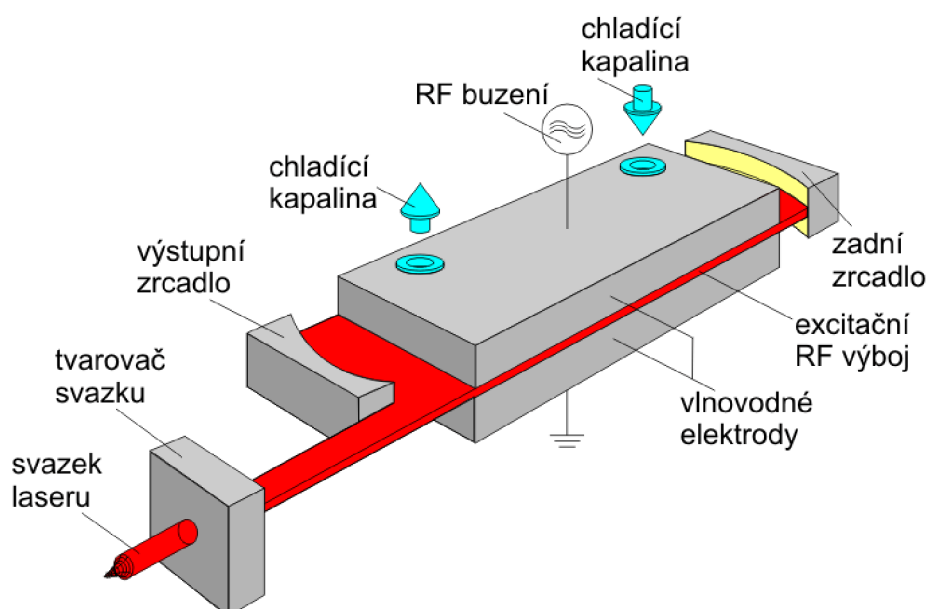
1.3 Rozdělení dle aktivního prostředí

Princip všech laserů je stejný, ale v konstrukci jednotlivých druhů laserů jsou podstatné rozdíly. Lasery se dají dělit mimo jiné například podle použitého aktivního prostředí, které může být plynné, pevné, kapalně nebo polovodičové.

1.3.1 Plynové lasery

Plynové lasery využívají plynného aktivního prostředí, které je buzeno elektrickým výbojem, chemickou reakcí, rychlou expanzí plynů atd. Výhodou těchto laserů je poměrně vysoká účinnost, dobrá homogenita paprsku a jeho nízká rozbíhavost. Příkladem plynových laserů je například CO₂ laser, helium - neonový laser, dusíkový, argonový nebo excimerový laser.^{3,13}

CO₂ laser – Aktivní prostředí je tvořeno oxidem uhličitým, který reaguje s dusíkem a heliem. Tyto plyny je třeba neustále doplňovat, neboť se spotřebovávají. Zcela zásadní je vysoká čistota dodávaných plynů, protože i malá nečistota by mohla poškodit optiku rezonátoru. Oxid uhličitý se dostává do nabuzeného stavu pomocí elektrického nebo vysokofrekvenčního výboje. Aby molekula vyzářila foton, je třeba, aby prošla třemi energetickými stavy. U oxidu uhličitého se jen málo molekul dostane do excitovaného stavu, a proto je do rezonátoru přiváděn také dusík, jehož atomy kolidují s molekulami CO₂ a tím se dosáhne většího počtu excitovaných molekul. Dalším plynem, který je třeba do rezonátoru dodávat je helium, které má za úkol přenášet teplo z aktivního prostředí do stěn rezonátoru a tím umožní molekulám aktivního plynu návrat do klidového stavu, aby mohly být znovu excitované. CO₂ laser vytváří paprsek o vlnové délce infračerveného světla a není tedy pro lidské oko viditelný. Jeho výkon dosahuje až 50kW a je třeba ho chladit nejčastěji vodou. Znárodnění rezonátoru CO₂ laseru je na obrázku 3.^{3,11}



Obr. 3 Znárodnění rezonátoru CO₂ laseru²⁰

CO₂ laser je jediný typ laseru, který dokáže nabídnout výkonovou škálu od 1W až do 50kW. Právě díky této vlastnosti se jedná o nejrozšířenější druh laserového zařízení. Účinnost tohoto typu laseru je poměrně velká a pohybuje se okolo 10 až 15 %. Další výhodou je dobrá kvalita laserového svazku, ale tím výčet výhod končí a následují negativa. Záření o vlnové délce 10600 nm, které CO₂ laser generuje, není schopné procházet optickými vlákny a je třeba ho do místa řezu dopravovat soustavou zrcadel, což se příliš nehodí pro přesné obrábění. Další nevýhodou jsou velké rozměry a hmotnost laserů velkých výkonů, které se ve strojírenském průmyslu používají, a nutnost neustálého přívodu nových procesních plynů a chlazení. Kvůli tomu nemohou být lasery využívající oxid uhličitý mobilní a vyžadují neustálou údržbu. I přes tato negativa však nemá tento druh laserů v průmyslu konkurenci a to hlavně díky vysokým výkonům, kterých jsou schopny dosáhnout.^{2,4,8,14,15}

Podle toku procesních plynů můžeme rozlišit několik konstrukčních uspořádání rezonátorů.

CO₂ laser s pomalým axiálním prouděním – je to nejstarší typ laseru s pomalým prouděním plynu v rezonátoru. Excitace plynu aktivního prostředí je dosažena pomocí elektrického výboje, který má totožný směr s osou rezonátoru. Získaný výkon činí přibližně 50 W na jeden metr délky trubice rezonátoru. To je poměrně málo. Tyto lasery se používají k vysoce jakostnímu řezání tenkých plechů.^{2,3,16}

CO₂ laser s rychlým axiálním prouděním – plyny v rezonátoru tohoto laseru proudí vysokou rychlostí ve stejném směru jako je osa rezonátoru. Chlazení rezonátorových plynů je zajištěno mimo rezonátor. Dnes je používáno převážně RF buzení, které zajišťuje vyšší stabilitu paprsku než buzení stejnosměrné. Výkon takto uspořádaných rezonátorů bývá 500 až 1000 W na metr délky trubice rezonátoru. Tyto lasery jsou používány především k řezání plechů různých tloušťek.^{2,3,16}

CO₂ laser s rychlým radiálním prouděním – tento typ laseru je charakterizován rozdílnými směry proudění plynu, výboje a paprsku. Tyto lasery dosahují poměrně velkých výkonů na metr délky trubice, ale jejich módová struktura není dobrá a proto se příliš nehodí k dělení plechů. Tyto lasery nacházejí nejčastěji uplatnění při svařování a tepelném zpracování kovových materiálů. Obvyklé je buzení stejnosměrným výbojem. Dnes však již existují i systémy buzené vysokofrekvenčními výboji, které jsou mnohem lépe říditelné.^{2,3,16}

Helium - neonový laser – Aktivní prostředí je tvořeno směsí helia a neonu. Buzení atomů helia do excitovaného stavu je zajištěno pomocí výbojky. Vybuzené atomy poté předají energii atomům neonu a přitom vyžáří foton. Tyto lasery nemají moc velký výkon, ale jejich výhodou je malá rozbíhavost paprsku.^{3,10}

Excimerové lasery – Aktivní prostředí tohoto laseru je tvořeno takzvanými excimerovými molekulami. Tyto molekuly jsou zvláštní tím, že mohou existovat jen ve vybuzeném stavu a při návratu do základního stavu se rozpadnou na jednotlivé atomy. Tyto atomy se sloučí do molekul opět ve chvíli, kdy jsou vystaveny svazku elektronů o vysoké energii. K vytvoření excimerových molekul jsou nejčastěji využívány atomy halogenů a vzácných plynů. Výhoda excimerových laserů je především v dobré fokusaci a krátkých impulzech. To je předurčuje pro využití zejména v jemné práci, jako je

popisování, vrtání otvorů, lékařství anebo jemná elektronika. Rozdělení excimerových laserů a některé jejich vlastnosti jsou v tabulce 2.^{2,3,8,12}

Tab. 2 Rozdělení excimerových laserů⁸

plyn	F ₂	ArF	KrCl	KrF	XeCl	XeF
vlnová délka [nm]	157	193	222	249	308	351
energie impulsu [mJ]	12	1000	25	1500	1000	400
průměrný výkon [W]	1	100	2-3	200	100	50
frekvence impulzů [Hz]	100	250	200	500	250	200
délka impulzů [ns]	6	8-14	4-9	12-16	8-40	8-18

1.3.2 Pevnolátkové lasery

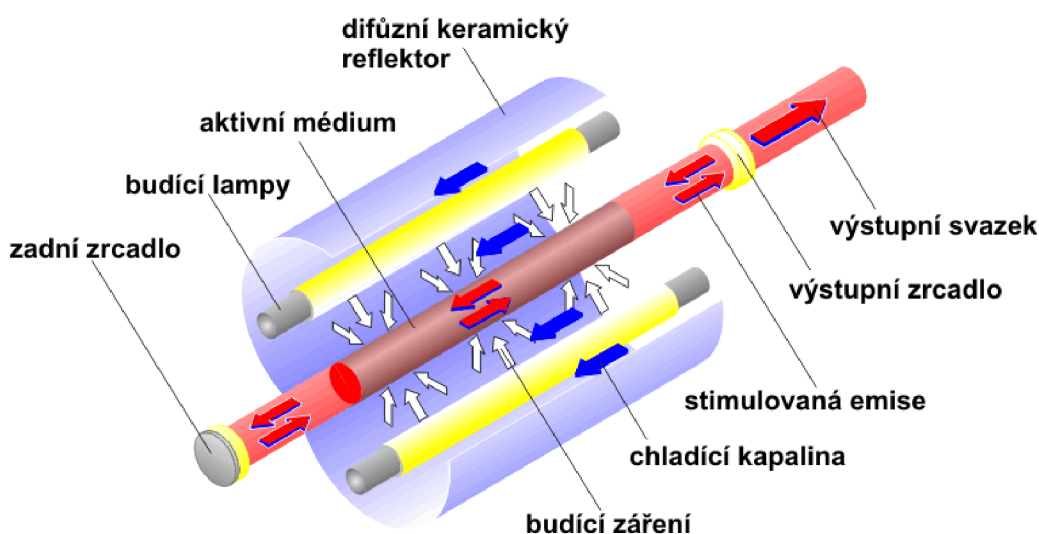
Mezi pevnolátkové lasery lze zařadit všechny lasery, jejichž aktivní prostředí je tvořeno pevnou krystalickou nebo amorfni látkou. Nejčastěji je to sklo, krystaly, oxidy nebo keramika. Tato pevná látka obvykle obsahuje ionty vzácných zemin, popřípadě další prvky, které jsou potom zdrojem stimulovaného záření.^{6,14,16}

Mezi tyto lasery můžeme zařadit například rubínové lasery, Nd:YAG a nebo také vláknové lasery.

Nd:YAG laser – Jako aktivní prostředí v rezonátorech těchto laserů je použit yttrium aluminium granat (yttriohlinitý granát) dopovaný ionty neodymu. K buzení se používají výbojky anebo vysoce výkonné diody. Vlnová délka produkovaného záření je 1060 nm, přičemž v kontinuálním režimu jsou použitelné výkony do 6 kW a v pulsním režimu až do řádu gigawattů. Poměrně malá účinnost (jen do 5 %) bohužel zapříčiňuje generování velkého množství tepla a tedy i nutnost rozměrného a těžkého chladicího systému. Při vysokých výkonech může být teplo takové, že způsobí deformaci krystalu aktivního prostředí, čímž dojde k rozostření módu laseru. Výkonné lasery se proto používají téměř výhradně ke svařování. Méně výkonné lasery se potom používají ke spékání materiálů, vrtání, nebo gravírování. V pulsním režimu se tyto lasery používají také v oční chirurgii. Velkou výhodou těchto laserů je možnost vedení paprsku pomocí optického vlákna, díky čemuž je laser vhodný pro použití společně se svařovacími roboty. Pomocí vlákna se dá také napojit více systémů dohromady a zvýšit tak výkon energetického svazku.^{2,3,11,15,16}

Ve srovnání s CO₂ lasery mají Nd:YAG lasery nižší výkon a nižší účinnost, ale jejich údržba je jednodušší, protože se omezuje pouze na výměnu výbojek. V poslední době jsou výbojky nahrazovány vysoce výkonnými diodami, pomocí kterých tyto systémy dosahují až třikrát většího výkonu, menší spotřeby elektrické energie a tedy i nižších provozních nákladů. Vysoká cena těchto diod bohužel brzdí jejich rozšiřování.^{4,16}

Konstrukčně je dutina rezonátoru Nd:YAG laserů uspořádána většinou do kruhového tvaru, pro zajištění odrazení maximálního množství světla z výbojek do aktivního prostředí. Tato dutina bývá zpravidla pro zvýšení odrazivosti pokovena. Uspořádání rezonátoru je zobrazeno na obrázku 4.^{6,14,16}



Obr. 4 Uspořádání rezonátoru Nd:YAG laseru ²⁰

Rubínový laser – Je to nejstarší typ laseru, který byl už v šedesátých letech využíván k vrtání otvorů do diamantů a podobných tvrdých materiálů. Aktivní prostředí tohoto laseru je tvořeno krystalem Al_2O_3 s příměsí chromu. Rubínový laser je tříhladinový a k jeho aktivaci je zapotřebí přecerpat alespoň polovinu iontů Cr^3 do excitovaného stavu, což vyžaduje značnou energii. Buzení je zajištěno pomocí světelných výbojek. Záření emitované pomocí rubínového prostředí má vlnovou délku 694 nm a je produkováno v pulzním režimu. Dnes je nahrazován jinými pevnolátkovými lasery a v průmyslu se s ním setkáme už jen výjimečně. ^{2,8,11}

Vláknový laser – Na rozdíl od ostatních druhů laserů, kde laserové záření vzniká v aktivním prostředí a paprsek je až poté odváděn vlákem nebo soustavou zrcadel, u tohoto laseru vzniká laserový paprsek přímo v optickém vlákně. Vláknko je dotováno prvky vzácných zemin (nejčastěji ytterbium, erbium a neodym) a je buzeno pomocí nízko výkonných polovodičových LED diod. Zrcadla používaná u klasických rezonátorů jsou zde nahrazena periodickými Braggovskými mřížkami. Emitované záření má stejnou délku jako záření Nd:YAG laseru, tedy 1060 nm. Účinnost vláknových laserů dosahuje až 25% čímž výrazně překonává pevnolátkové Nd:YAG lasery i CO_2 lasery. Válcový tvar vlákna umožňuje velmi dobrý odvod tepla a chlazení může být výrazně menší a lehčí. Další výhodou je možnost paralelního spojování jednotlivých vláken, čímž je možné zvyšovat výkon až na desítky kilowattů. V průmyslu jsou dnes ovšem běžnější vláknové lasery o výkonu stovek wattů, používané k popisování, gravírování a vrtání otvorů. Výkonnější lasery se používají k řezání tenkých plechů. Módová charakteristika a kvalita paprsku je velmi dobrá a umožňuje vytvářet vysoce jakostní řezy. ^{4,5}

Díky dobré účinnosti, vysoké spolehlivosti, malým nárokům na údržbu, kompaktnosti a nízké hmotnosti mohou tyto lasery brzy začít vytlačovat klasické CO_2 a Nd:YAG lasery. ⁴

Polovodičový laser – Jedná se o laser, jehož aktivní prostředí je tvořeno blokem polovodičového materiálu. K buzení se využívá fotonů, elektrického pole anebo nejčastěji paprsku elektronů. Tento paprsek prochází polovodičovým materiálem a iniciuje přechody z pásma valenčního do pásma vodivostního. Výhodou těchto laserů je jejich vysoká účinnost sahající i nad 30%, nízké provozní náklady, vysoká životnost a možnost řízení výstupního výkonu pomocí velikosti procházejícího proudu. Výstupní výkon se běžně pohybuje ve stovkách wattů, ale v sestavě je možno dosáhnout až několika kilowattů. Nevýhodou je velká rozbíhavost emitovaného paprsku a velká závislost na teplotě polovodiče. Vlnová délka generovaného záření se pohybuje okolo 800 – 900 nm.^{2,3,11}

Využití nacházejí polovodičové lasery při řezání a svařování kovových fólií a plastů. Výkonnější sestavy lze použít k pájení natvrdo a povrchovým úpravám. Svoje uplatnění nacházejí tyto lasery také ve stomatologii.^{2,11}

1.4 Využití laseru

Laser dnes nachází použití téměř v celém průmyslu, protože zvládá úkony, které jsou pomocí konvenčních technologií jen velmi těžko zvládnutelné, nebo úplně nezvládnutelné. Ohledy, ve kterých laser vyniká a které mohou vést ke zvolení použití právě laserové technologie, jsou: malá tepelně ovlivněná oblast, vysoká jakost odvedené práce, vysoká variabilita, schopnost obrábět těžko obrobitelné materiály, vysoká přesnost a velká výkonová hustota.

Výběr druhu laseru pro určitou aplikaci je dán vlastnostmi laserového zařízení. Mezi klíčové vlastnosti patří výkon a výkonová hustota.

Výkon je definován jako energie emitovaná formou laserového záření za jednotku času. Výkonová hustota udává vyzařovaný výkon na jednotku plochy, například pokud je šířka fotonového svazku o čtvercovém průřezu jen 0,2 mm a laser má výkon 1000 W, pak je výkonová hustota 25000 W na mm².⁶

Například výkonová hustota využívaná pro řezání plechu CO₂ laserem bývá okolo 100000 W×mm⁻², ale výkonová hustota pro kalení je pouze několik stovek až tisíc wattů na milimetr čtverečný. Naopak délka impulzu pro kalení je několikanásobně delší oproti impulzu řezného laseru.^{2,11}

1.4.1 Řezání laserem

K řezání materiálů se využívá laserový paprsek s vysokou hustotou energie zaostřený na velmi malou plochu. V místě dopadu materiálu dojde k ohřevu materiálu a ten je poté odfouknut, spálen anebo se v důsledku tepla odpaří. Metoda odstranění materiálu z místa řezu závisí na zvoleném asistenčním plynu (viz kapitola 1.5).²

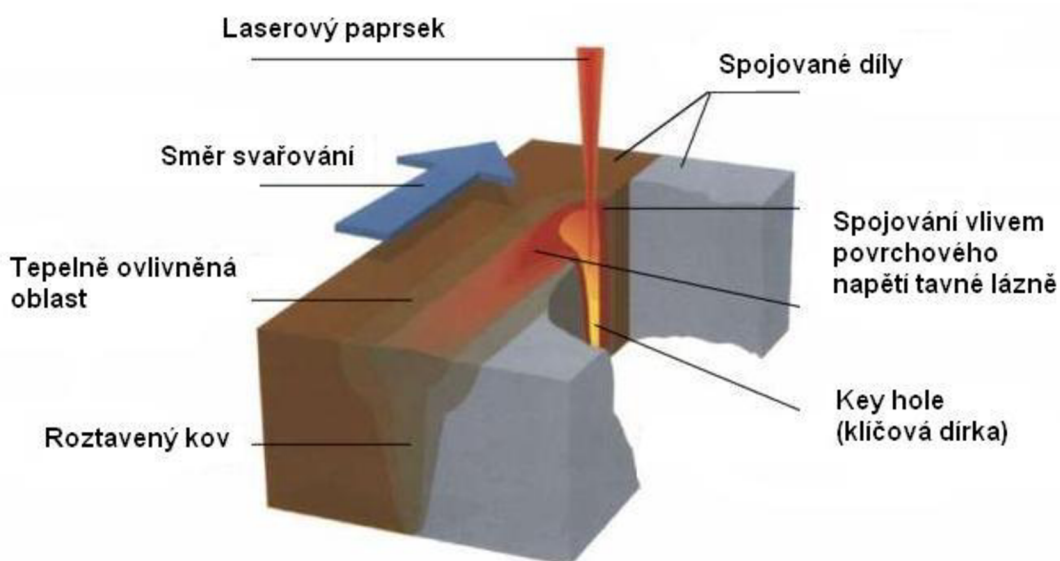
Největší uplatnění v průmyslu nachází laser při řezání obyčejné oceli. Při této operaci se nejčastěji používají CO₂ lasery o výkonu do 7 kW, které jsou schopné řezat konstrukční oceli do tloušťky 25 mm, nerezové oceli do tloušťky 25 mm a hliníkové slitiny do tloušťky 15 mm.

Při řezání neželezných kovů jako je hliník, měď nebo titan platí určitá omezení. Neželezné materiály mají větší sklon k tvorbě otřepů a oxidaci, což snižuje efektivitu řezného procesu. Při řezání reaktivních materiálů jako je titan, je třeba použití inertního plynu, například argonu, který zabrání reakci mezi materiálem a okolím.^{2,6}

Pomocí laseru lze řezat běžné materiály za účelem lepší řezné plochy, rychlejší práce anebo vytvoření složitého tvaru. Lze také řezat materiály běžnými způsoby jen těžko dělitelné. Rychlost a kvalita řezu přitom nezávisí na mechanických vlastnostech, jako je tvrdost nebo pevnost, ale na tepelných a optických vlastnostech materiálu.

1.4.2 Svařování laserem

Při svařování je laserový paprsek zaostřen do ohniska, kde vlivem vysoké koncentrace energie dochází k natavení materiálu a jeho svaření. Ke svařování se nejčastěji používají lasery typu CO₂ a Nd:YAG. Na rozdíl od řezání se zde využívá menšího výkonu, ale používá se vyšší délky pulsu. Nepoužívá se žádný přídavný materiál a mohou se svařovat všechny běžně svařitelné materiály. Výhodou laserového svařování je velká hloubka provaření, vysoká kvalita svaru, malá tepelně ovlivněná oblast a vysoká přesnost svaru. Průběh svařování je znázorněn na obrázku 5.^{3,11}



Obr. 5 Laserové svařování²

1.4.3 Vrtání laserem

Při vrtání pomocí laseru dochází v místě dopadu paprsku k odpařování materiálu. Aby se předešlo zavaření otvoru, je třeba využívat pulzního chodu stroje s dobou pulsu kratší než 1 ms. Samotné vyvrtávání může probíhat pomocí jednoho pulzu, opakovaných pulzů anebo kruhového vyřezávání. Vyvrtávaný otvor může mít hloubku až 50 mm a může mít průměr i jen pouhých 0,025 mm.^{2,11}

Vrtání pomocí laseru se používá tam, kde je to konvenčními způsoby velmi obtížné anebo nemožné. Například vrtání do keramiky, skla nebo drahých kamenů. Pomocí laseru se vyvrtávají také otvory do vstřikovačů nebo lopatek motorů proudových letounů.^{2,11}

1.4.4 Gravírování

Gravírování je značení a popisování dílců bez chemických nebo mechanických zásahů. V principu se jedná o změnu barvy a struktury popisovaného materiálu, čímž lze dosáhnout kvalitního, kontrastního, ostrého a mechanicky odolného značení. Gravírovat lze většinu materiálů a to dokonce i s pískovaným, smaltovaným, chromovaným nebo jinak upraveným povrchem. Hloubku progravírování lze volit změnou parametrů.^{3,11}

Další aplikace laseru - leštění

- tepelné zpracování povrchů
- nanášení povlaků
- měření a zaměřování
- medicína

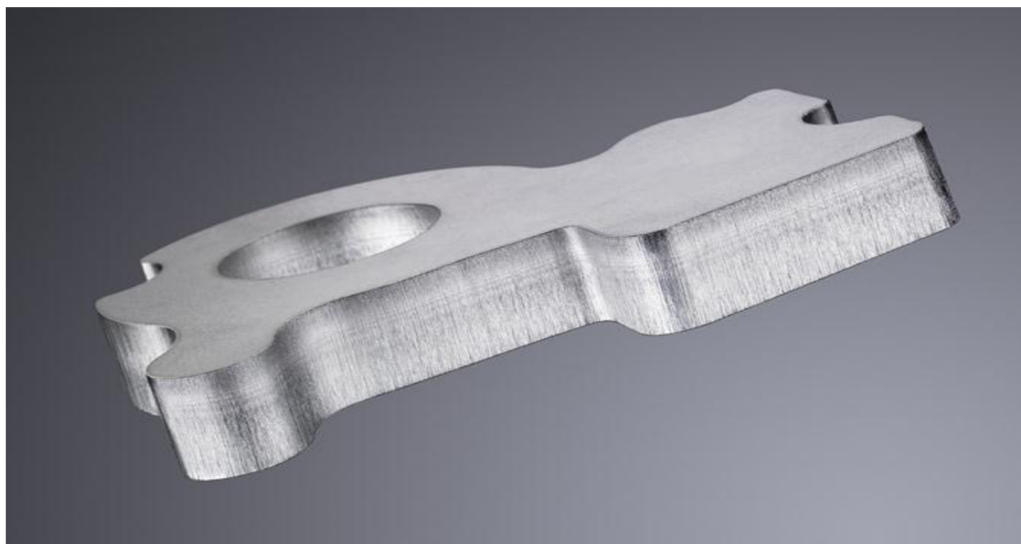
1.5 Proces řezání

Samotný řezný proces můžeme rozdělit do několika druhů podle způsobu odstraňování materiálu z místa řezu. K odstranění materiálu napomáhají asistenční plyny. Řezný proces může být tavný, oxidační, sublimační anebo s podporou vzduchu.

1.5.1 Tavné řezání

Při tavném řezání dochází k lokálnímu natavení řezaného materiálu a vzniklá tavenina je z místa řezu odváděna pomocí chemicky čistého inertního plynu, který se na samotné procesu tavení nepodílí. Jako inertní plyn se nejčastěji používá dusík. Touto metodou je dosahováno nižších řezných rychlostí, ale vzniklá plocha řezu je velice kvalitní, s nízkou drsností a bez oxidického povlaku. Tato metoda se využívá u neželezných kovů, kvalitních nerezových materiálů a dílců, u nichž není plánováno další dokončovací obrábění. Kvalitní řeznou hranu vyrobenou tavným řezáním můžeme vidět na obrázku 6.^{2,3}

Při řezání reaktivních materiálů, jako je titan je třeba použít plyn, který zabrání jeho reakci s kyslíkem nebo dusíkem. K tomuto účelu se používá argon. Všechny asistenční plyny je nutné používat ve vysoké čistotě, alespoň 99,999%. Při tavném řezání je plyn vyfukován pod tlakem 1 – 2 MPa, což je přibližně pětkrát vyšší tlak, než při řezání oxidačním.³



Obr. 6 Plocha řezu při tavném řezání¹⁷

1.5.2 Oxidační řezání

Při oxidačním způsobu řezání je místo inertního plynu použit aktivní plyn kyslík. Kyslík je foukán do místa řezu, kde reaguje s uhlíkem v oceli v exotermické reakci a podílí se tak na natavování dalšího materiálu. Tento způsob umožňuje použití větších řezných rychlostí, ale zanechává na plochách řezu tenkou oxidickou vrstvou, která může v případě lakování dílců zapříčinit olupování barvy. Další nevýhody jsou širší řezná spára, větší drsnost plochy řezu a větší tepelně ovlivněná oblast. Řeznou plochu po oxidačním řezání lze vidět na obrázku 7.^{2,3}

Kyslík je do místa řezu foukán pod tlakem 5 barů pro tloušťky materiálu do 3 mm, pro tloušťky od 3 do 10 mm je tlak okolo 1 baru a při řezání silnějších materiálů se používá i menší tlak. Čistota použitého kyslíku bývá 99,95%.³

Oxidační řezání není příliš vhodné pro zhotovování přesných geometrických tvarů a děr malých průměrů. Určité optimalizace lze ale dosáhnout použitím pulzního režimu laseru, kdy nedochází k exotermické reakci a materiál se mezi jednotlivými pulzy ochlazuje.³



Obr. 7 Řezná hrana oxidického řezání²¹

1.5.3 Sublimační řezání

Při této metodě dochází k odpařování materiálu pomocí paprsku s vysokou hustotou energie. Vzniklé páry jsou odváděny z místa řezu pomocí inertního plynu. Vzniká úzký a kvalitní řez. Nevýhodou je u materiálů s tekutou fází omezení tloušťky řezaného materiálu maximálně na hodnotu průměru řezného paprsku. V případě silnějších materiálů může dojít ke kondenzaci par na řezných hranách a k zavaření materiálu. Z tohoto důvodu je tato metoda vhodná pouze pro nekovové materiály anebo tenké kovové fólie. V dnešní době není příliš často využívána.³

1.5.4 Řezání s podporou vzduchu

Jedná se o kombinaci tavného a oxidačního řezání, která má výhodu především v levném a snadno dostupném asistenčním plynu. Nevýhodou je však nižší kvalita řezu a omezení tloušťky řezaného materiálu.²

2 Praktická část

Praktická část práce se bude zabývat otázkou, zda se nejmenovanému strojírenskému podniku (dále jen podniku) vyplatí při vypalování dílců laserem používat jako procesní plyn dusík, pomocí kterého lze dosáhnout vyšší kvality řezné plochy, anebo se vyplatí používat kyslík, který dokáže zvýšit řeznou rychlost stroje, ale zanechává na řezné ploše zoxidovanou vrstvu. Tato vrstva pak může způsobit opadávání barvy po nalakování.

2.1 Současný stav

V dnešní době nejspíš už žádný velký podnik nevyrábí složitá zařízení sám, ale specializuje se jen na určitou část svých výrobků a ostatní dílčí části si nechává dodávat od subdodavatelů. Takovým subdodavatelem pro mnoho velkých podniků je i zde řešený podnik, který se zabývá výrobou částí zařízení z plechu. Charakter výroby je především kusový a je nutné k němu takto přistupovat. Z toho vyplývá, že pro tento podnik je jakákoli automatizace jen obtížně implementovatelná, zmetkovitost je vysoká a náklady a i výsledná cena jsou také poměrně vysoké. Výhodou jsou obrovské možnosti výroby, která je schopná dodat téměř jakýkoli výrobek z plechu.

První operací při výrobě drtivé většiny dílců bývá vypálení laserem z tabule plechu. Podnik používá 4 lasery od firmy Bystronic, konkrétně Bystar 3015 s CO₂ rezonátorem o výkonu 3000 wattů, Bystar 3015 s CO₂ rezonátorem o výkonu 6000 wattů, BySpeed 3015 s CO₂ rezonátorem o výkonu 4400 wattů a Bysprint 3015 s CO₂ rezonátorem o výkonu 3000 wattů.

Rozložení Výroby je následující:

- Konstrukční ocel do tloušťky 4 mm – Bysprint 3000 W
- Konstrukční ocel především 4 mm – Bystar 3000 W
- Konstrukční ocel nad 4 mm a nerezová ocel nad 12 mm – Bystar 6000 W
- Nerezové oceli a hliníkové slitiny – BySpeed 4400 W

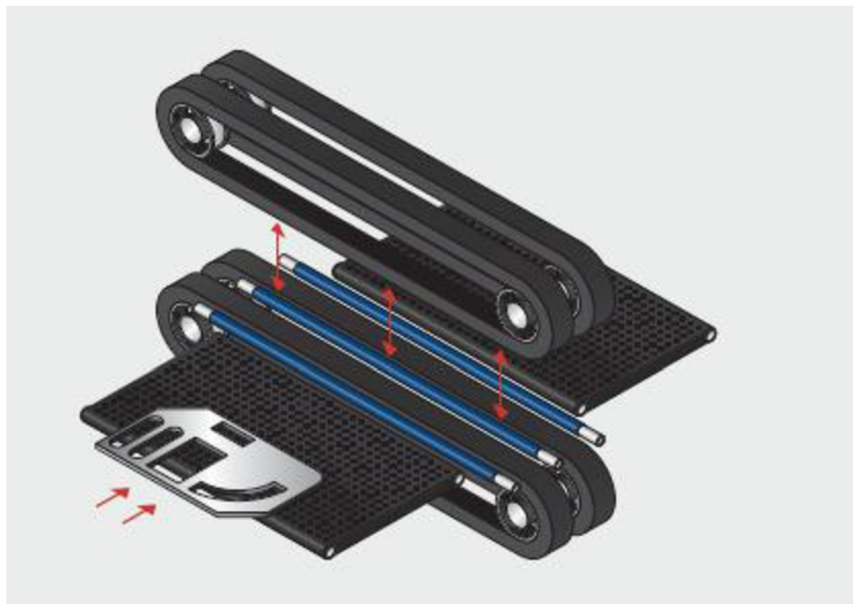
U neželezných kovů je použití dusíku při vypalování samozřejmostí, ale nerezové oceli a konstrukční oceli lze řezat i za použití kyslíku, tedy tavným i oxidačním způsobem, jak je popsáno v kapitole 1.5. U nerezových dílců většinou záleží na vzhledu a kvalitě zpracování a proto je u nich používán tavný způsob řezání a jeho použití je plánováno i do budoucna. Laser BySpeed tedy je možné z řešení vypustit, neboť jeho se žádná uvažovaná změna nedotkne. Konstrukční ocel je pálena až do tloušťky 12 mm také za pomoci tavného řezání, vyjma dílců, u kterých to není z technologických důvodů možné. Pro konstrukční ocel nad 12 mm se používá oxidační řezání.

Stroje pracují v nepřetržitém provozu a jsou obsluhovány třemi pracovníky, kteří se starají o načítání řezných plánů, seřízení řezné sekvence, navážení materiálu a odebírání hotových dílců z roštů.

Ačkoli dokáže podnik pomocí těchto čtyř strojů vyrobit skutečně velké množství dílců, poptávka se zvětšuje a dosavadní kapacita strojů přestává stačit. Z tohoto důvodu jsou hledána řešení jak zvýšit kapacitu při zachování nebo snížení finanční náročnosti procesu pálení a oddálit tak nutnost nákupu dalšího stroje.

2.2 Čistící stroj Lissmac SBM-M B2

Čistící stroj SBM-M B2 je zařízení určené k odstraňování oxidického povlaku, který vzniká na ploše řezu při vyřezávání součástí oxidačním způsobem pomocí laseru nebo plazmy. Stroj se skládá z tuhého ocelového rámu, v němž jsou umístěny 4 protiběžné čisticí pásy, podávací a odebírací pás. Každý pás je poháněn vlastním elektromotorem a je samostatně seřiditelný. Umístění pásů nad i pod součástí zajišťuje jeho očištění z obou stran



při jednom průchodu strojem. Toto rozmístění s sebou ale také nese určitá omezení z hlediska velikosti součástí. Protože součást nejede po jednom souvislém pásu, ale po dvou, které jsou řazené za sebou a mezi kterými je dvojice spodních čisticích pásů, musí být dlouhá alespoň 150 mm, aby dosáhla bezpečně z jednoho pásu na druhý. Zobrazení sestavení stroje je zobrazeno na obrázku 8.

Obr. 8 Znárodnění sestavení stroje²²

Technické parametry jsou zobrazeny v tabulce 3.

Tab. 3 Parametry stroje Lissmac SBM-M B2¹⁹

Typ:	SBM-M 1000 B2	SBM-M 1500 B2
Zavedení materiálu:	automaticky	automaticky
Maximální šířka obrobku:	1000 mm	1500 mm
Tloušťka obrobku:	20 mm	20 mm
Rychlost posuvu:	0 – 4 m/min	0 – 4 m/min
Nastavení tloušťky obrobku:	ručně	ručně
Úroveň akustického hluku:	82 dB (A)	82 dB (A)
Odběr proudu brusný motor:	4 x 6,8 A	4 x 6,8 A
Odběr proudu motor posuvu:	1,3 A	1,3 A
Hmotnost:	1550 kg	1760 kg
Celkový příkon:	19,6 kW	19,6 kW

Protože podnik vyřezává součásti z tabulí formátu až 3000 x 1500 mm, bude dále uvažován jen typ SBM-M 1500 B2, který dokáže čistit součásti o šířce až 1500 mm.

2.2.1 Náklady na provoz SBM-M 1500 B2

Nejdůležitějším parametrem z hlediska ekonomie stroje je životnost čistících pásů a náklady na obsluhu stroje. Vzhledem k tomu, že se jedná o proces kartáčování velkého množství rozličných dílců, není možné přesně určit životnost čistícího pásu, ale výrobce uvádí teoretickou hodnotu 300 – 500 hodin práce. Pro naše účely tedy bude počítáno se střední hodnotu, která činí 400 hodin.

Po opotřebování čistících segmentů na pásu není třeba měnit pás celý, ale stačí pouze vyměnit čistící segmenty, které jsou na pás připevněny. Stroj SBM-M 1500 B2 má 4 pásy, každý se 114 segmenty. To je dohromady 456 segmentů.

Cenová nabídka od obchodního zástupce nabízejícího stroje Lissmac je následující:

- SBM-M 1500 B2 59990 EUR
- Brusný segment 1,95 EUR
- Instalace a zaškolení obsluhy 1500 EUR

Náklady na čistící segmenty lze spočítat takto:

$$N_U = \frac{(d_m \cdot H)}{T_P} \cdot P_S \cdot N_S \cdot K_E \quad [Kč] \quad (2.1)$$

$$N_U = \frac{(31 \cdot 24)}{400} \cdot 456 \cdot 1,95 \cdot 24,9$$

$$N_U = 41182 \text{ Kč}$$

Kde: N_U jsou náklady na segmenty čistícího pásu

d_m je počet dní v uvažovaném měsíci

H je počet hodin v jednom dni

T_P je životnost segmentů na čistícím pásu

P_S je počet segmentů na pásech

N_S je cena za jeden segment

K_E je uvažovaný kurs eura vůči koruně

Stroj bude pracovat v nepřetržitém provozu a k jeho obsluze je zapotřebí dvou pracovníků. Jeden pracovník bude dílce do stroje vkládat, zatímco druhý je bude odebírat. U velkých dílců je toto nutnost. U malých dílců lze uvažovat s plechovým skluzem, který si může podnik sám poměrně levně vyrobit, avšak hrozí, že dílce sjíždějící skluzem do jednoho místa se při narážení na sebe odřou, nebo se poškodí jejich hrany. Z tohoto důvodu je vhodnější použít obsluhu dvěma zaměstnanci. Náklady na obsluhu lze spočítat takto:

$$N_O = S_s \cdot P_P \cdot M_z + S_V \cdot M_z \quad [Kč] \quad (2.2)$$

$$N_O = 3 \cdot 2 \cdot 20000 + 2 \cdot 20000$$

$$N_O = 160000 \text{ Kč}$$

Kde: N_O jsou náklady na obsluhu stroje

S_s je směnnost

P_P je počet zaměstnanců nutných k obsluze na jedné směně

M_z je uvažovaná mzda pro jednoho zaměstnance

S_V je počet pracovníků víkendové směny

Stroj je poháněn pomocí šesti motorů, které mají dohromady příkon 19,6 kW. Náklady na elektrickou energii pro tento stroj lze spočítat takto:

$$N_{EL} = d_m \cdot H \cdot Q \cdot C_{El} \quad [Kč] \quad (2.3)$$

$$N_{EL} = 31 \cdot 24 \cdot 19,6 \cdot 2,53$$

$$N_{EL} = 36893 \text{ Kč}$$

Kde: N_{EL} jsou náklady na elektřinu pro stroj
 Q je příkon stroje
 C_{El} je cena za 1 kWh elektrické energie

Z výpočtů je zřejmé, že největší položkou jsou mzdy zaměstnanců. Tuto položku je bohužel velmi těžké redukovat tak, aby to nebylo na úkor pracovníků. Náklady na mzdy zaměstnanců tak tvoří téměř dvě třetiny nákladů na provoz stroje. Celkové náklady lze spočítat takto:

$$N_C = N_U + N_O + N_{EL} \quad [Kč] \quad (2.4)$$

$$N_C = 41182 + 160000 + 36893$$

$$N_C = 238075 \text{ Kč}$$

Kde: N_C jsou celkové náklady na měsíční provoz stroje

2.3 Tavné vs. oxidační řezání

Laserové řezací stroje dosahují při tavném řezání jiných rychlostí než při řezání oxidačním a i náklady na jejich provoz jsou při obou metodách rozdílné. Základním podkladem pro ekonomické výpočty jsou řezné parametry stroje udávané výrobcem. Získaná data, znázorněná v tabulce 4 a tabulce 5, pochází z programu BySoft 6 dodávaného výrobcem laserových strojů, firmou Bystronic. Výrobce uvádí, že skutečné řezné parametry se mohou lišit až o 30% v závislosti na stavu stroje, jeho nastavení a jakosti materiálu.

Tab. 4 Parametry oxidačního řezání

Tloušťka plechu [mm]	Tlak plynu [kPa]	Řezací výkon [W]	Průměr trysky [mm]
1	400	900	1
1,5	400	900	1
2	400	1050	1
2,5	400	960	1
3	400	1140	1
4	60	1650	1
5	50	4000	1,2
6	50	4200	1,2
8	50	5200	1,2
10	50	5500	1,7
12	50	5500	1,7

Tab. 5 Parametry tavného řezání

Tloušťka plechu [mm]	Tlak plynu [kPa]	Řezací výkon [W]	Průměr trysky [mm]
1	1200	2700	1,5
1,5	1200	2550	1,5
2	1200	2700	1,5
2,5	1300	3000	1,5
3	1300	3000	1,7
4	1200	3000	2
5	1700	5500	2,5
6	1800	5300	3
8	1800	6000	3
10	1800	6000	3,5
12	1700	6000	3,5

Z tabulek 4 a 5 je na první pohled patrné, že při tavném řezání bude kvůli výrazně většímu tlaku i většímu průměru trysky výrazně větší spotřeba plynu. Také je patrné, že díky nižšímu výkonu rezonátoru při oxidačním řezání bude nižší namáhání čočky a zrcadel. Výhoda nižšího použitého výkonu spočívá také v nižším vývinu tepla rezonátoru a tudíž v lepším chlazení.

2.3.1 Spotřeba plynu

Z parametrů uvedených v tabulkách 4 a 5 můžeme vypočítat spotřebu plynu při jednotlivých způsobech řezání. Protože plyn je dodáván v tekutém stavu a účtován po kilogramech a na stroji je uveden pouze tlak plynu, je nutné průtok plynu spočítat. Nejdříve je třeba zjistit hustotu plynu při jednotlivých tlacích. To lze provést pomocí molárního množství jednoho kilogramu plynu a stavové rovnice ideálního plynu. Poté je třeba spočítat rychlost proudění pomocí bernoulliho rovnice a nakonec spotřebu plynu za čas. Názorný výpočet pro řezání plechu tloušťky 1 mm oxidačním způsobem:

Nejprve je třeba vypočítat molární množství 1 kg kyslíku:

$$n = \frac{m}{M} \quad [mol] \quad (3.1)$$

$$n = \frac{1000}{31,9988}$$

$$n = 31,2512 mol$$

Kde: n je molární množství
 m je uvažovaná hmotnost v gramech
 M je molární hmotnost molekuly plynu

Dále je možné pomocí stavové rovnice ideálního plynu vypočítat objem jednoho kilogramu plynu při řezném tlaku:

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{p_c} \quad [m^3] \quad (3.2)$$

$$V = \frac{31,2512 \cdot 8,3145 \cdot 293,15}{501325}$$

$$V = 0,1519 m^3$$

Kde: V je objem
 R je molární plynová konstanta
 T je teplota v kelvinech
 p_c je celkový tlak působící na plyn

Ze získaného objemu můžeme nyní spočítat hustotu plynu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (3.3)$$

$$\rho = \frac{1}{0,1519}$$

$$\rho = 6,5832 kg \cdot m^{-3}$$

Kde: ρ je hustota plynu při daném tlaku

Po spočítání hustoty plynu je možné využít bernoulliho rovnici a spočítat rychlost proudění plynu z trysky:

$$p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad [Pa] \quad (3.4)$$

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{p}{\rho}}$$

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{400000}{6,5832}}$$

$$v = 348,6 m \cdot s^{-1}$$

Kde: p je tlak plynu
 v je rychlost proudění plynu

Nyní je třeba spočítat průřez trysky:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad [mm^2] \quad (3.5)$$

$$S = \frac{\pi \cdot 1^2}{4}$$

$$S = 0,7854 mm^2$$

Kde: S je průřez trysky
 D je průměr trysky

Když je známá rychlost proudění plynu na výstupu trysky i výstupní průřez trysky, je možné spočítat spotřebu plynu:

$$C_G = \rho \cdot 60 \cdot v \cdot S \cdot 10^{-6} \quad [kg \cdot min^{-1}] \quad (3.6)$$

$$C_G = 6,5832 \cdot 60 \cdot 348,6 \cdot 0,7854 \cdot 10^{-6}$$

$$C_G = 0,1081 kg \cdot min^{-1}$$

Kde: C_G je spotřeba plynu

Stejným způsobem je možné spočítat spotřebu plynu z řezných parametrů pro ostatní tloušťky řezaných plechů. Výsledné hodnoty jsou v tabulce 6.

Tab. 6 Spotřeba plynu při daných řezných parametrech

Tloušťka plechu [mm]	1	1,5	2	2,5	3	4
Spotřeba O ₂ [kg.min ⁻¹]	0,1081	0,1081	0,1081	0,1081	0,1081	0,0238
Spotřeba N ₂ [kg.min ⁻¹]	0,6789	0,6789	0,6789	0,7333	0,9419	1,207
Tloušťka plechu [mm]	5	6	8	10	12	
Spotřeba O ₂ [kg.min ⁻¹]	0,0302	0,0302	0,0302	0,0607	0,0607	
Spotřeba N ₂ [kg.min ⁻¹]	2,641	4,0204	5,4722	5,4722	5,1763	

2.3.2 Výrobní kapacita

Velkou předností oxidačního řezání je vyšší řezná rychlost. To umožňuje větší výrobní kapacity než řezání tavné. Pro výpočet rozdílu kapacity byla sesbírána data z řezání všech plánů za měsíc březen roku 2012. Všechny tyto plány byly řezané za pomoci tavného řezání. Z programu BySoft 6 byl zjištěn rozdíl rychlostí při řezání tavném a oxidačním. Po procentuálním vyjádření rozdílu lze stanovit možné navýšení kapacity. Ve výpočtu vznikne nepřesnost kvůli neznámé době zakládání nových tabulí plechu, době vyjímání hotových výpalků a kvůli odlišným skutečným řezným parametrům. Výrobce přednastavené parametry spolu s procentuálním vyjádřením rozdílu jsou v tabulce 7.

Tab. 7 Rozdíl rychlostí oxidačního a tavného řezání

Tloušťka plechu [mm]	Řezná rychlost při oxidačním řezání [mm.min ⁻¹]	Řezná rychlost při tavném řezání [mm.min ⁻¹]	Rozdíl [%]
1	8000	8000	0
1,5	7000	6500	7,69
2	5900	6000	-1,67
2,5	5000	4900	2,04
3	4000	3500	14,29
4	2800	2400	16,67
5	3800	3300	15,15
6	3400	2800	21,43
8	2900	1900	52,63
10	2400	1350	77,78
12	2000	700	185,71

Z tabulky 7 je vidět, že oxidační řezání je výrazně rychlejší především u tlustých materiálů. U tenkých materiálů do 2,5 mm není rozdíl rychlostí nijak významný. Skutečně používané řezné parametry jsou většinou výrazně nižší a závisí na jakosti materiálu, stavu stroje a zkušenostech obsluhy stroje.

V tabulce 8 jsou uvedené součty časů řezání jednotlivých tlouštěk plechů za měsíc březen 2012. Pomocí procentuálního rozdílu z tabulky 7 je nyní možné dopočítat teoretickou dobu řezání za pomoci oxidačního řezání a vyčíslit teoretickou úsporu času. Výsledná data jsou uvedena také v tabulce 8.

Tab. 8 Data za březen 2012 s teoretickou úsporou času

Tloušťka plechu [mm]	Doba řezání tavným způsobem [hhh:mm]	Teoretická doba řezání oxidačním způsobem [hhhh:mm]	Teoretická úspora času [hhh:mm]
1	47:43	47:43	0
1,5	27:12	25:15	1:53
2	68:22	69:31	-1:09
2,5	9:05	8:54	0:11
3	217:26	190:15	27:11
4	608:17	521:22	86:55
5	116:47	101:25	15:22
6	54:28	44:51	9:37
8	46:10	30:15	15:55
10	26:17	14:47	11:30
12	0:24	0:08	0:16
Součet:	1222:11	1054:26	167:45

2.4 Finanční úspory

Po vyčíslení spotřeby plynu a časového rozdílu v řezání je možné přejít k samotné finanční stránce problému a vyčíslit rozdíl nákladů na vypálení řezných plánů z března 2012 pomocí tavného řezání a pomocí oxidačního řezání. Nejprve je vhodné spočítat náklady na procesní plyn pro stanovenou dobu tavného řezání a poté náklady na plyn při spočtené teoretické době řezání oxidačním způsobem. Očekávání jsou taková, že samotná úspora výdajů za procesní plyn by měla pokrýt náklady na provoz čistícího stroje Lissmac.

Dalším benefitem oxidačního řezání je vyšší řezná rychlost. Tím vznikne prostor pro navýšení výrobní kapacity, které přinese další zisk ze zakázek, které bude možné vypálit navíc.

2.4.1 Náklady na plyny

Pro výpočet nákladů na plyn je nutné spočítat spotřebu plynu na vyřezání všech plánů z uvažovaného souboru. To se provede vynásobením celkové doby řezání každé tloušťky plechu v minutách příslušným údajem o spotřebě plynu a cenou za kilogram tohoto plynu. Zde je vzorový výpočet pro řezání plechů tloušťky 1 mm tavným způsobem:

$$C_c = t_p \cdot C_G \cdot P_G \quad [Kč] \quad (4.1)$$

$$C_c = 2863 \cdot 0,6789 \cdot 3,40$$

$$C_c = 6608,5 \text{ Kč}$$

Kde: C_c je celková cena plynu na vypálení plánů v dané tloušťce
 t_p je celkový čas pálení plechů dané tloušťky
 P_G je cena za 1 kg procesního plynu

Obdobným způsobem lze stanovit náklady na plyn pro všechny tloušťky materiálu při tavném i oxidačním řezání. Cena 1 kg kyslíku je 4,35 Kč. Výsledky a celkový součet ceny jsou uvedeny v tabulce 9.

Tab.9 Náklady na plyn při tavném i oxidačním řezání za březen 2012

Tloušťka plechu [mm]	Doba řezání tavným způsobem [hh:mm]	Cena za plyn [Kč]	Teoretická doba řezání oxidačním způsobem [hh:mm]	Cena za plyn [Kč]
1	47:43	6608,5	47:43	1346,3
1,5	27:12	3767,1	25:15	712,4
2	68:22	9468,5	69:31	1961,4
2,5	9:05	1358,8	8:54	251,1
3	217:26	41779,3	190:15	5367,7
4	608:17	149776,4	521:22	3238,6
5	116:47	62918,7	101:25	799,4
6	54:28	44671,5	44:51	353,5
8	46:10	51537,2	30:15	238,4
10	26:17	29340,8	14:47	234,2
12	0:24	422,4	0:08	2,1
Celkem:		401649,2		14505,1

Z tabulky 9 je jasné patrné, že přechod od technologie tavného řezání na technologii oxidačního řezání přinese velkou úsporu peněz za řezné plyny. Tato úspora činí 387144,1 Kč.

2.4.2 Úspora elektřiny

CO₂ lasery jsou stroje s poměrně značným odběrem elektrické energie. Pokud jsou schopné pomocí oxidačního řezání zrychlit svou práci a uspořit tak přes 167 normohodin práce, bude i jejich spotřeba elektřiny menší o zmíněných 167 normohodin. Protože úspora normohodin se dělí mezi tři stroje s příkony 54, 54 a 78 kW, bude počítáno s aritmetickým průměrem těchto hodnot. Výpočet úspory nákladů na elektrickou energii je následující:

$$U_{El} = H_N \cdot Q \cdot C_{El} \quad [Kč] \quad (4.2)$$

$$U_{El} = 167,75 \cdot 62 \cdot 2,53$$

$$U_{El} = 26313,3 \text{ Kč}$$

Kde: U_{El} je úspora nákladů na elektřinu

2.4.3 Zisk z nárůstu kapacity

Nahrazení tavného způsobu řezání oxidačním způsobem může teoreticky přinést přes 167 normohodin kapacity navíc. Tato kapacita znamená další zisk, jehož velikost závisí především na schopnosti zaplnit kapacitu novými zakázkami. V případě nezaplnění může přinést alespoň záložní kapacitu pro případ poruchy některého z laserů.

Většina zaměstnanců výrobního úseku je placená hodinovou mzdou, z čehož vyplývá, že rychlejší práce strojů se nákladů na výplaty nedotkne. Výpočet zisku bude sestávat

z vynásobení ušetřených normohodin částkou, která se skládá z částky, kterou podnik zákazníkům účtuje za hodinu provozu laseru, z nákladů na elektřinu a z nákladů na procesní plyny, které lze určit pomocí váženého průměru ze spotřeby za měsíc březen 2012. Tento vážený průměr činí $0,0527 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$. Částka účtovaná za hodinu řezání je 2290 Kč.

$$Z_n = H_N \cdot (N_Z - C_G \cdot P_G - Q \cdot C_{El}) \quad [\text{Kč}] \quad (4.3)$$

$$Z_n = 167,75 \cdot (2290 - 60 \cdot 0,0527 \cdot 4,35 - 62 \cdot 2,53)$$

$$Z_n = 355526,8 \text{ Kč}$$

Kde: Z_n je zisk z nově získané kapacity

2.5 Návratnost

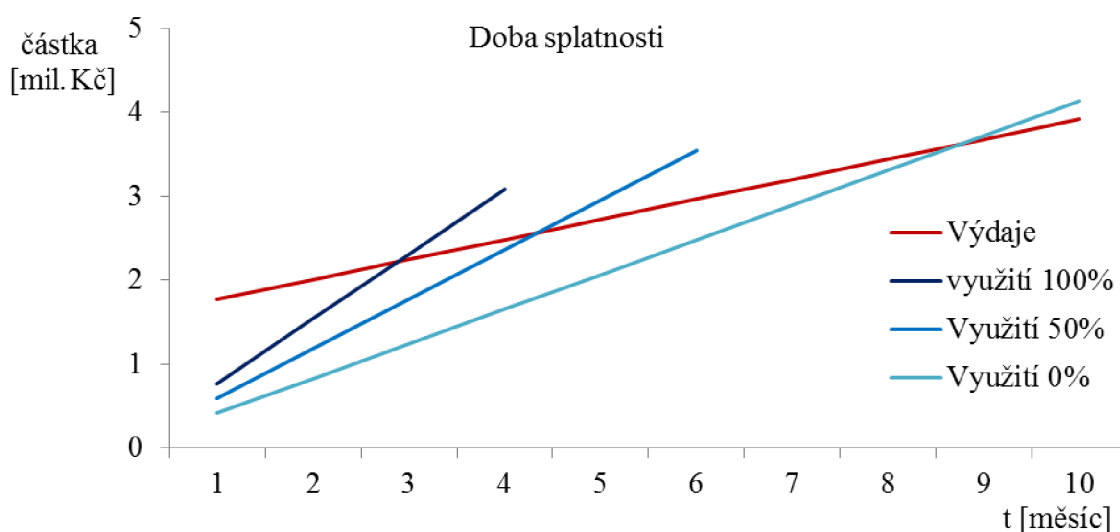
Předpokladem každé investice je její budoucí návratnost. Čím kratší je doba návratnosti, tím lepší investice to je. Nutností je, aby náklady na údržbu a provoz nově pořizovaného stroje byly nižší než zisk, kterého je touto investicí dosaženo. Rozdíl mezi náklady na provoz a ziskem potom určuje dobu návratnosti.

Náklady na pořízení čistícího stroje Lissmac SBM-M 1500 B2 jsou 59990 EUR. Instalace stroje a zaškolení obsluhy stojí 1500 EUR. To je dohromady 61490 EUR. Podle uvažovaného kurzu 24,9 Kč/EUR je to částka 1531101 Kč.

Další náklady jsou náklady provozní, mezi které patří výdaje na údržbu stroje, výdaje na elektřinu a mzdy zaměstnanců. Celkové provozní náklady činí 238075 Kč.

Zisk pocházející z této investice tvoří úspora za procesní plyn, která by za měsíc březen 2012 mohla činit 387144,1 Kč, úspora za elektřinu ve výši 26313,3 Kč a zisk z nově získané kapacity, závislý na jejím využití, až 355526,8 Kč.

Podle výše vypsanych údajů lze sestavit graf s křivkami návratnosti:



Z grafu je možné vidět, že pokud bude skladba a množství výroby podobné jako v březnu roku 2012, lze očekávat návratnost investice do přechodu na technologii oxidačního pálení spojenou s čištěním dílců pomocí stroje Lissmac do jednoho roku. Pokud se podaří zaplnit nově vzniklé kapacity alespoň na 50%, návratnost investice se zkrátí na méně než 5 měsíců, a pokud se podaří vzniklou kapacitu využít beze zbytku, návratnost investice bude asi 3 měsíce.

2.6 Požadavky na změnu technologie

Změna technologie laserového řezání z tavného na oxidační naštěstí není příliš složitá, a protože podnik i v současné době v některých případech oxidační technologii využívá, není třeba pořizovat dodatečné vybavení, nebo zajišťovat zaškolování obsluhy laseru. Tato změna s sebou ale krátkodobě ponese zvýšené nároky na programátory laseru, kteří budou muset u všech již naprogramovaných dílců provést změnu technologie. Práce přibude také technologovi, který bude muset rozlišovat mezi dílci, které mohou být očištěné strojem Lissmac, a dílci, které nejsou kvůli příliš malým rozměrům vhodné k čištění na tomto stroji.

2.7 Doporučení

Po zvážení ekonomických aspektů přechodu na oxidační řezání lze tuto metodu doporučit jako finančně výhodnější.

Z technologického hlediska zde vyvstává problém rozlišování dílců, protože stroj Lissmac SBM-M 1500 B2 nedokáže čistit dílce kratší než 150 mm. U menších dílců je nutné rozlišovat, zda je u nich oxidická vrstva na řezné ploše akceptovatelná například z důvodu svařování po celém obvodu, případně zda tuto vrstvu akceptuje zákazník. U dílců menších než 150 mm, u kterých je nutné dosáhnout čisté řezné plochy, bude nutné zachovat technologii řezání tavným způsobem.

Rozlišování dílců na dílce, které je nutné čistit, a dílce, které není nutné čistit je vhodné i z ekonomického hlediska, neboť každý neočištěný dílec oddaluje výměnu brusných segmentů na pásech čistícího stroje a šetří elektrickou energii.

Další výhodou oxidačního způsobu řezání je potřeba nižšího výstupního výkonu rezonátoru, což je patrné z tabulek 4 a 5 a je to příznivé jednak z hlediska spotřeby elektrické energie, tak hlavně z hlediska namáhání a chlazení strojů, které jsou na teplotu okolí citlivé. Nižší tepelné namáhání stroje se pravděpodobně také projeví na životnosti optické soustavy a zejména čoček, které slouží k zaostřování paprsku.

Změnu technologie lze po zvážení technologických i ekonomických aspektů doporučit.

ZÁVĚR

Strojírenský podnik, který se zabývá zakázkovou výrobou z plechu, na jejímž počátku je vyřezávání tvarů z tabule plechu pomocí laseru, uvažuje nad změnou metody vyřezávání dílců z tavného způsobu na způsob oxidační.

Byly popsány podmínky výroby, která probíhá pomocí 4 CO₂ laserů značky Bystronic, z čehož se uvažované řešení vztahuje pouze na tři stroje. Na čtvrtém stroji se řezou výhradně nerezové anebo nezelezné materiály, u kterých je zachování tavného způsobu řezání nutností. Byl představen stroj Lissmac SBM-M 1500 B2, který slouží k očištění oxidické vrstvy vznikající na řezné hraně při oxidačním řezání. Po představení byly zjištěny náklady na měsíční provoz tohoto stroje, které činí 238075 Kč.

Změna metody s sebou má přinést především finanční úspory a zvýšení kapacity. Oba předpoklady se potvrdily. Byla sebrána data o řezných plánech za měsíc březen 2012 a bylo zjištěno, že oxidační metodou bylo teoreticky možné uspořit 167 normohodin a 45 normominut kapacity. Při využití nově vzniklé kapacity na 100% by bylo možné zvýšit zisk podniku o 355526 Kč. Zároveň bylo spočteno, že při oxidačním řezání je mnohem menší spotřeba plynu a za měsíc březen na něm bylo možné ušetřit 387144 Kč. Další úspory se dají očekávat z hlediska výdajů za elektrickou energii, protože při oxidačním řezání je nižší požadovaný výkon rezonátoru. Nižší požadovaný výkon s sebou nese benefity ve formě snazšího uchlazení strojů a zvýšení životnosti optiky stroje, která je méně tepelně namáhána.

Použitím stroje Lissmac SBM-M 1500 B2 u dílců, které jsou vyřezány oxidační metodou, lze dosáhnout velmi podobné řezné hrany, jako u dílců které jsou vyřezány metodou tavnou. Fotografie vzorového dílce očištěného právě na tomto stroji je možné nalézt v příloze.

Byl sestaven graf doby návratnosti investice do stroje Lissmac a bylo zjištěno, že za podmínek podobné skladby výroby jako v měsíci březnu 2012 a při dodržení řezných parametrů stanovených výrobcem je doba návratnosti asi 3 měsíce v případě, že se podaří nově vzniklou kapacitu využít na 100%. Při využití nové kapacity na 50% se doba návratnosti prodlouží na méně než 5 měsíců a při nulovém využití vzniklé kapacity se doba návratnosti protáhne na dobu asi 9 měsíců. Je ovšem nutno mít na paměti, že skutečné řezné parametry se mohou od těch doporučených výrobcem značně lišit. To může vést k prodloužení nebo ke zkrácení doby návratnosti investice.

Stroj Lissmac má omezení, jenž spočívá v neschopnosti čištění dílců, které jsou kratší než 150 mm. Tyto dílce je třeba dělit na ty, u kterých oxidická vrstva nevadí, protože budou po celém obvodu svařované, a na dílce u kterých tato vrstva být nesmí. Dílce, u kterých tato vrstva být nesmí, musí být dále páleny tavným způsobem. Toto dělení je vhodné zavést u všech dílců, čímž bude dosaženo zefektivnění práce a snížení nákladů.

Seznam použitých zdrojů

- 1 PÍŠKA, Miroslav et al. *Speciální technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80- 214-4025-8.
- 2 INDRA, Jaroslav. *Nekonvenční technologie laserového řezání*. Brno, 2011. 61 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace>
- 3 KOLKOP, David. *Technologie řezání laserem*. Brno, 2010. 64 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace>
- 4 KRAMOLIŠ, Lukáš. *Laserové řezání s podporou vzduchu*. Brno, 2010. 129 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí diplomové práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace>
- 5 PETERKA, Pavel. *Vláknové lasery - jasné světlo ze skleněných nitek*. [online]. 2006 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.ufe.cz/~peterka/novehrady/vlaknovelasery.pdf>
- 6 POPELA, Martin. *Nasazení laserové technologie v podmínkách zakázkové výroby*. Brno, 2009. 72 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
- 7 ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *Nekonvenční metody obrábění 4. díl. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007-07-19, č. 4, [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- 8 BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technologie*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
- 9 LASERART. *Historie laseru*. [online]. 11. 5. 2010 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: http://www.laserart.wbs.cz/Historie_laseru.html
- 10 *Laser a princip jeho činnosti* [online]. 2009 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_u315.pdf
- 11 ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *Nekonvenční metody obrábění 5. díl. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008-03-19, č. 5, [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-5-dil.html>
- 12 KUSALA, Jaroslav. *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm>
- 13 KUSALA, Jaroslav . *Jak funguje laser* [online]. 2004 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
- 14 ŠULC, Jan. *Průmyslové aplikace laserových systémů* [online]. 2004-07-13 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
- 15 ŠMÍD, Jirí. *Lasery pro průmysl. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008-07-09, č. 7, [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>

- 16 MINAŘÍK, Václav. *Technologické lasery* [online]. 2007-12-29 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>
- 17 Trumpf Česká Republika. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/obrabeci-stroje/produkty/rezani-2d-laserem/inovacni-technologie/flyline.html>
- 18 Esab cutting systems. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: http://www.esab-cutting.net/index.php?id=125&no_cache=1
- 19 LaO: Základní princip laseru a jejich dělení. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/serial-princip-a-typy-laseru.htm>
- 20 LaO: Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aktualne/clanky-a-zpravy/serial-o-laserech/serial-hlavni-prumyslove-lasery.htm>
- 21 KVF Quad Corporation: Laser Oxide Removal. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.kvfquad.com/services/laser-oxide-removal/>
- 22 Rafela: Gratowarki. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: http://www.rafela.com.pl/16_0,16,628,SBM_M_B2___USUWANIE_TLENK%C3%99W,detal_oferta.html

Seznam použitých symbolů

Označení	Legenda	Jednotka
C_c	celková cena plynu na vypálení plánů v dané tloušťce	[Kč]
C_{El}	cena za 1 kWh elektrické energie	[Kč]
C_G	spotřeba plynu	[kg·min ⁻¹]
D	průměr trysky	[mm]
d_m	počet dní v uvažovaném měsíci	[den]
H	počet hodin v jednom dni	[hod]
K_E	uvažovaný kurs eura vůči koruně	[Kč·EUR ⁻¹]
M	molární hmotnost molekuly plynu	[g·mol ⁻¹]
M_z	uvažovaná mzda pro jednoho zaměstnance	[Kč]
m	uvažovaná hmotnost v gramech	[g]
N_C	celkové náklady na měsíční provoz stroje	[Kč]
N_{EL}	náklady na elektřinu pro stroj	[Kč]
N_O	náklady na obsluhu stroje	[Kč]
N_S	cena za jeden segment	[EUR]
N_U	náklady na údržbu čistícího pásu	[Kč]
n	molární množství	[mol]
P_G	cena za 1 kg procesního plynu	[Kč]
P_P	počet zaměstnanců nutných k obsluze na jedné směně	[-]
P_S	počet segmentů na páslech	[-]
p	tlak plynu	[Pa]
p_c	celkový tlak působící na plyn	[Pa]
Q	příkon stroje	[kW]
R	molární plynová konstanta	[J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹]
S_s	směnnost	[-]
S	průřez trysky	[mm ²]
S_V	počet pracovníků víkendové směny	[-]
T	teplota v kelvinech	[K]
T_P	životnost segmentů na čistícím pásu	[hod]
t_p	celkový čas pálení plechů dané tloušťky	[hh:mm]
U_{El}	úspora nákladů na elektřinu	[Kč]
V	objem	[m ³]
v	rychlost proudění plynu	[m·s ⁻¹]
Z_n	zisk z nově získané kapacity	[Kč]
ρ	hustota plynu při daném tlaku	[kg·m ⁻³]

Seznam příloh

Příloha 1 - Fotografie dílce řezaného oxidační metodou a čištěného strojem Lissmac

Příloha 1

Plocha řezu u dílce páleného oxidačním způsobem, který byl očištěn strojem Lissmac SBM-M 1500 B2

