

Aplikace řezání laserovým paprskem pro potřeby elektromagnetické susceptibility zařízení

Karel Krejčíř

Bakalářská práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav bezpečnostního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Karel Krejčíř**
Osobní číslo: **A17695**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Aplikace řezání laserovým paprskem pro potřeby elektromagnetické susceptibility zařízení**
Téma práce anglicky: **The Application of Laser Cutting for Electromagnetic Susceptibility Devices**

Zásady pro vypracování

1. Vysvětlíte a popíšete vznik laserového paprsku v řezacích strojích.
2. Prezentujete šíření paprsku uvnitř řezacího stroje typu TRUMPF a základní podmínky řezacího procesu.
3. Popíšete materiály používané pro odstínění ústřední části zařízení OASIS JA 80 a 100.
4. Popíšete postup přípravy výroby a výrobní proces stínícího krytu.
5. Realizujete samotnou výrobu stínícího krytu.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. SILFVAST, William Thomas. *Laser fundamentals*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004, 1 online zdroj (xxiv, 642 p.). ISBN 9780521833455. Dostupné také z: http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpLFE00011/laser_fundamentals_2nd_edition
2. CARISTAN, Charles L. *Laser cutting guide for manufacturing*. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, c2004, 1 online zdroj (xx, 447 p.). ISBN 9781613449646. Dostupné také z: http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpLCGM0002/laser_cutting_guide_for_manufacturing
3. CHARSCHEAN, S. S. *Lasers in industry*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1972, xvii, 641 s. Western electric series. ISBN 0442215169.
4. ENGST, Pavel a Milan HORÁK. *Aplikace laserů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 204 s. Populární přednášky o fyzice.
5. SENGUPTA, Dipak L. a Valdis V. LIEPA. *Applied electromagnetics and electromagnetic compatibility*. Hoboken, NJ: John Wiley, 2005, xxii, 486 s. Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN 0471165492.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ján Ivanka

Ústav bezpečnostního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: 7. prosince 2019
Termín odevzdání bakalářské práce: 25. května 2020

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan

Ing. Jan Valouch, Ph.D.
ředitel ústavu

Jméno, příjmení: Karel Krejčíř

Název bakalářské práce: Aplikace řezání laserovým paprskem pro potřeby elektromagnetické susceptibility zařízení

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnaní případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne

Karel Krejčíř, v. r.
.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Bakalářská práce vysvětluje problematiku laserového paprsku, jeho vznik a následné využití v obráběcích, řezacích strojích. Věnuje se problematice plynových laserů CO₂, které se ve strojírenství vyskytují nejčastěji. Práce popíše vznik a šíření laserového paprsku v systému stroje se zaměřením na laserové řezací stroje značky TRUMPF. Práce se dále zabývá obecným popisem materiálů, které je možné na laserových strojích opracovávat a základními podmínkami, které musí být splněny pro úspěšné řezání těchto materiálů v požadované kvalitě. Popisuje základní principy elektromagnetické kompatibility a materiály vhodné pro výrobu stínících krytů určených pro elektromagnetické stínění. Praktická část bakalářské práce představuje technologické postupy a software, který se využívá pro přípravu výrobních podkladů. Prezентuje a zdokumentuje kompletní výrobní proces od zaměření přes návrh konkrétního stínícího krytu, jeho softwarové zpracování, až po samotnou fyzickou realizaci výroby stínícího krytu.

Klíčová slova: laser, laserové řezání, CO₂ laser, elektromagnetická kompatibility, stínící technika

ABSTRACT

The bachelor's thesis explains the issue of laser beam, its origin and subsequent use in machine tools and cutting machines. It deals with the issue of CO₂ gas lasers, which are most common in mechanical engineering. The work describes the origin and propagation of the laser beam in the machine system with a focus on TRUMPF laser cutting machines. The work also deals with a general description of materials that can be machined on laser machines and the basic conditions that must be met for successful cutting of these materials in the required quality. It describes the basic principles of electromagnetic compatibility and materials suitable for the production of shielding covers designed for electromagnetic shielding. The practical part of the bachelor's thesis presents technological procedures and software that is used for the preparation of production materials. It presents and documents the complete production process from the focus through the design of a specific shielding cover, its software processing, to the actual physical implementation of the shielding cover production.

Keywords: laser, laser cutting, CO₂ laser, electromagnetic compatibility, shielding technology

Rád bych poděkoval vedoucímu této práce Ing. Jánovi Ivankovi za vedení mé práce, rady a připomínky. Děle společnosti TRUMPF za možnost využití potřebné dokumentace a společnosti Scott Automation a.s. za umožnění realizace a zdokumentování praktické části. Závěrem bych rád poděkoval svým rodičům, rodině a přátelům, kteří mi byli oporou po celou dobu studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 LASER	11
1.1 PROSTŘEDÍ VZNIKU LASEROVÉHO PAPRSKU	12
1.2 VZNIK LASEROVÉHO PAPRSKU	14
2 ŠÍŘENÍ LASEROVÉHO PAPRSKU UVNITŘ STROJE	16
2.1 VEDENÍ PAPRSKU SE SYSTÉMEM TLF 2000, 2700, 3200.....	17
2.2 VEDENÍ PAPRSKU SE SYSTÉMEM TLF 4000	18
2.3 ŘEZACÍ HLAVA	19
2.4 DĚLENÍ MATERIÁLU	21
2.4.1 Tavné řezání materiálu	22
2.4.2 Oxidační řezání materiálu	23
2.4.3 Sublimační řezání materiálu.....	24
3 PROBLEMATIKA EMC	25
3.1 MATERIÁLY VHODNÉ PRO ŘEZÁNÍ LASEREM A PRO EMS	26
4 POSTUP PŘÍPRAVY PODKLADŮ PRO VÝROBU	28
II PRAKTICKÁ ČÁST	29
5 VÝROBA STÍNÍCÍHO KRYTU PRO ÚSTŘEDNU	30
5.1 NÁVRH 3D MODELU	30
5.2 PŘÍPRAVA PODKLADŮ PRO LASEROVÝ ŘEZACÍ STROJ.....	34
5.2.1 TruTops CAD – příprava řezané kontury dílu	34
5.2.2 TruTops NEST – rozklad dílů.....	35
5.2.3 TruTops LASER – technologie řezání	36
5.3 VÝROBA STÍNÍCÍHO KRYTU.....	39
ZÁVĚR	43
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	44
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	47
SEZNAM OBRÁZKŮ	48
SEZNAM TABULEK	49

ÚVOD

Pojem laser nebo laserový paprsek je v dnešní době naprosto běžný. Mladší osoby si mohou představit laserové meče a pistole ze sci-fi filmů, ti starší, dle svého zaměření a zájmů, si mohou představit laserové paprsky pomáhající v lékařství, v letectví nebo ve strojírenství, což je odvětví, na které se zaměřuje tato bakalářská práce.

Laserové paprsky využívané v řezacích strojích výrobců různých značek v dnešní době usnadňují tvorbu jednotlivých hlavně plechových dílců. Laserová technologie je samozřejmě ve strojírenství využívána i v dalších strojích, a to podle použitého výkonu od menších zařízení, která jsou určena pouze ke značení a popisování materiálů, až po velké řezací stroje, které si bez problémů poradí i s opravdu silnými či houževnatými materiály. Z těchto materiálů by bylo bez využití řezání laserovým paprskem jen velmi složité či extrémně časově náročné vyrobít požadované tvary. Na druhou stranu je možné za pomoci těchto strojů řezat i velmi tenké tloušťky materiálů, které by bylo jen velmi složité opracovávat jinak, aniž by při samotném výrobním procesu nedošlo k poškození tohoto materiálu, protože se většinou jedná, vzhledem k síle materiálu, o velmi křehké plechy, které lze snadno deformovat pouze velmi malým fyzickým působením. Laser se ve strojírenství využívá hlavně k dělení materiálu, ale je možné ho využít také pro značení či svařování. Další z důvodů velmi častého využití laserového paprsku pro řezání materiálů je jeho tenký paprsek. Vzhledem k tomu není nutné počítat s velkým odpadem po samotném řezání a díly je možné vkládat na plechové tabule jeden vedle druhého, nutné je pouze správným řezným postupem zajistit, aby se materiál v místě řezu příliš nepřehříval, protože následně dochází ke zhoršení samotného jinak čistého a kvalitního řezu.

Samotnou přípravu dílců pro laserové řezání v dnešní době velmi usnadňují různá softwarová řešení pro navrhování podporovaná počítačem, dále jen CAD (z anglického Computer Aided Design) a počítačem řízenou výrobu, dále jen CAM (z anglického Computer Aided Manufacturing). Díky CAD/CAM softwarům je možné si potřebné díly namodelovat a nakreslit a poté je již pouze přenést do softwaru samotného stroje, kde se nastaví parametry řezání jako je síla a jakost materiálu, rozložení jednotlivých dílů na plechové tabule a postup jejich řezání, případně další detaily samotného řezného procesu, které jsou specifické pro různé výrobce strojů.

Důležité je si uvědomit, že vynález laserových paprsků je označován za jeden z podstatných vynálezů pro lidstvo. Aplikace laserových paprsků prostupuje naše životy

stále více. Pro příklad můžeme uvést aplikace v odvětvích jako je strojírenství, kde je laserový paprsek využíván pro dělení, značení a svařování materiálu, v medicínských oborech pro náročné operace, ale také v běžném životě, například u laserových měřidel.

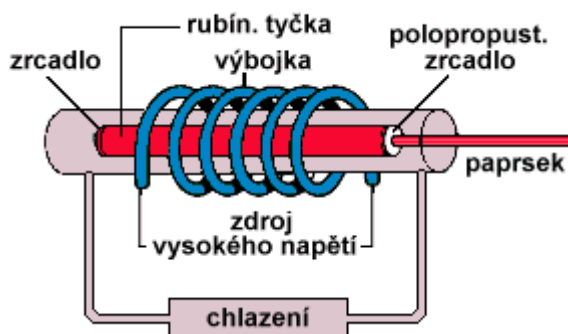
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LASER

Název laser je vlastně zkratkou zjednodušeného popisu procesu, který je nutný pro vznik laserového paprsku, o kterém mluvíme. Odborná zkratka LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - by se dala do českého jazyka přeložit jako zesílení světla za pomoci stimulované emise záření.

První zmínka o laserovém paprsku je udávána ve spojitosti s Albertem Einsteinem, který došel k závěru, že by mohlo dojít při vzájemném působení elektromagnetického záření a atomů látky nejenom k absorpci záření, ale také ke spontánní emisi záření. Předpověděl možnost vynucené nebo tzv. stimulované emise. Albert Einstein tento objev provedl již v roce 1917. [1]

Teprve až o 43 let později (v roce 1960) se podařilo americkému fyzikovi a inženýrovi Theodorovi Haroldovi Maimanovi představit ve své laboratoři v Hughes v Malibu první funkční laser, který využíval jako aktivní prostředí krystal rubínu. [2]



Obr. 1. Rubínový laser [3]

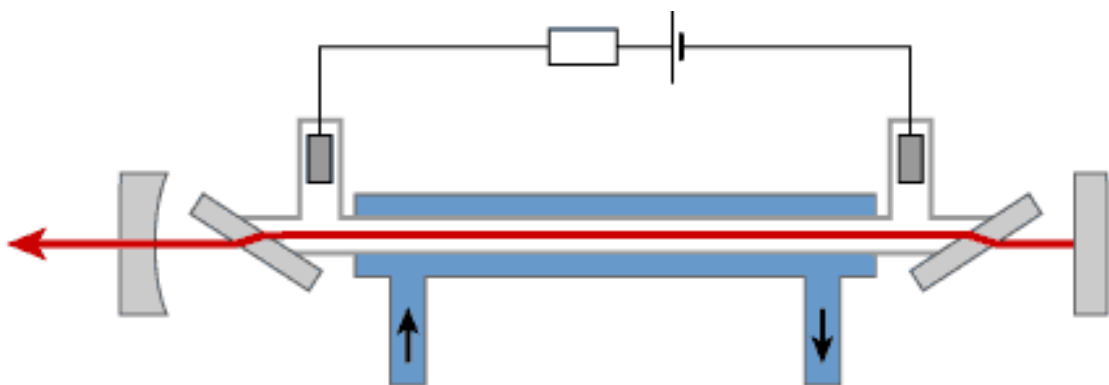
O další čtyři roky později (v roce 1964) byl zkonstruován první plynový laser, jenž byl vynalezen indickým fyzikem a elektrotechnikem Čandrou Kumarem Naranbhaiem Patelem. Patel na základě výzkumu akcí laseru ve vzácných plynech provedl v roce 1963 objev působení laserového záření v oxidu uhličitým, dále jen CO₂. Do dnešní doby se jedná o nejrozšířenější typ laseru, který dokáže kontinuálně produkovat vysokovýkonné záření a který se využívá právě pro řezací lasery využívané ve strojírenském prostředí. [4]

Od této doby bylo zkonstruováno a ve strojním průmyslu je provozováno několik typů laserových strojů, kdy každý pracuje na jiném principu aktivního prostředí nebo využívá různá média pro vedení laserového paprsku uvnitř stroje až k řezací hlavě. Každá aplikace je vhodná pro využití na určité operace a každá má jinou efektivitu.

1.1 Prostředí vzniku laserového paprsku

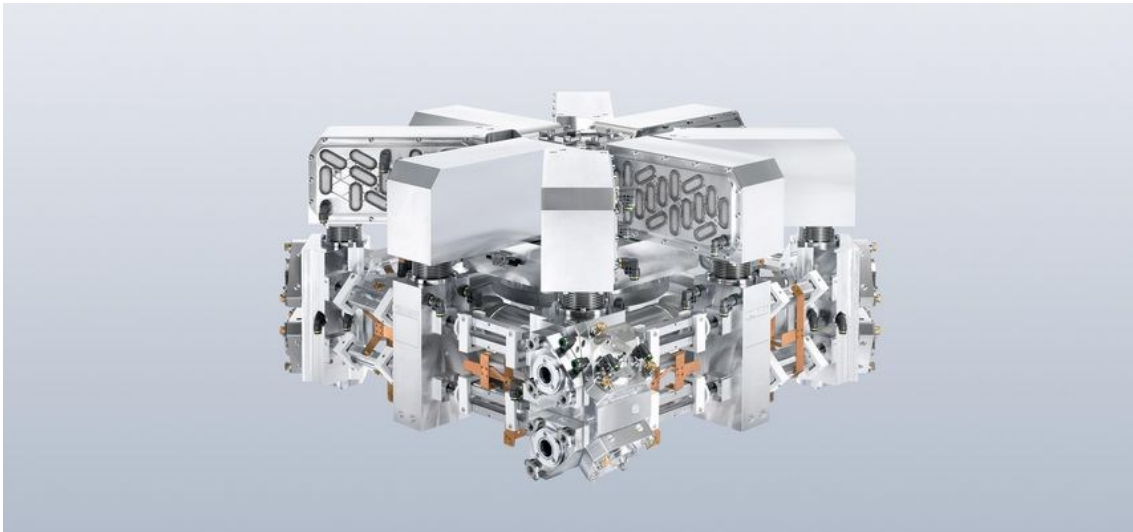
Laserový paprsek u plynových laserů vzniká v rezonátoru. K jeho konstrukci se využívaly trubice v délce 50 až 100 centimetrů, které mají v průměru 10 až 20 milimetrů. Tyto trubice jsou na obou stranách ukončeny zrcadly, kdy zrcadlo na jedné straně je polopropustné. Tato zrcadla vytváří rezonátor. U menších strojů se často využívá soustava více trubic, které se následně vzájemně propojují pomocí optického systému, kdy se na výstupech samostatných rezonátorů použijí zrcadla pod úhlem 45°. Do trubic jsou čerpány vzácné plyny (nebo přesněji směs plynů), které tvoří aktivní prostředí. U plynových řezacích strojů se využívá směs oxidu uhličitého (CO₂), helia (He) a dusíku (N₂). Všechny tyto plyny musí mít vysokou čistotu dle specifikace výrobce laserového stroje, čímž je dále garantována spolehlivost laserového zdroje. Plyny jsou směřovány buď přímo v laseru nebo se využívá připravených směsí podle daného typu stroje. [5]

Plyny (aktivní prostředí) jsou v případě laserů malých výkonů, většinou okolo 200 W, načerpány do hermeticky uzavřené trubice a buzení se provádí radio-frekvenčně pomocí měděných elektrod připojených na radio-frekvenční generátor. Protože účinnost takových laserů se pohybuje okolo 15 % a převážný zbytek energie je přeměněn na teplo až 200 °C, je nezbytně nutné chlazení celého systému, protože tato teplota by již mohla způsobit změnu fyzikálních vlastností plynů. V takovém případě se provádí chlazení aktivního prostředí nejčastěji skrze měděné elektrody nebo přímým chlazením trubice. V hermeticky uzavřené trubici neuniká aktivní prostředí, nedochází ke ztrátám směsi plynů, a tak se šetří náklady, které je nutné vynaložit. Bohužel nevýhodou celé konstrukce je relativně malý výkon, který sice může být až 5 kW, ale jak již bylo uvedeno dříve, nejčastěji se pohybuje okolo 200 W. Popsaná konstrukce laserů se využívá hlavně ke značení, řezání nekovových materiálů, svařování a k povrchovému kalení. [6]



Obr. 2. Schéma plynového laseru s hermeticky uzavřenou trubicí, chlazenou vodou [7]

U průmyslových řezacích laserů se častěji využívá konstrukce, kdy aktivní prostředí skrze rezonanční optický obvod neustále proudí a je buzeno elektrickým výbojem. V tomto případě je směs plynů vháněna do rezonanční optické soustavy, která dnes již ale často není tvořena pouze skleněnými trubicemi, ale z důvodu potřeby i vnějšího chlazení rezonančního obvodu, je využit hliníkový monoblok. Vzhledem k použitému materiálu monobloku je velmi snadno odváděna velká část vyprodukovaného tepla. Další chlazení probíhá za pomoci proudícího plynu, který je přečerpáván přes chladicí šnekové systémy a tím ochlazován. Tyto konstrukce laserů dosahují vysokých výstupních výkonů, které se mohou šplhat až ke 30 kW, ale v běžné praxi se řezací lasery pro průmysl vyrábějí s výkonem okolo 5 kW. Podle výše popsané konstrukce, kterou je možné vidět na obrázku (Obr. 3), lze odvodit nevýhody tohoto laseru, za které jsou považovány velikost samotného rezonátoru a složitější konstrukce jeho samotného a celé optické soustavy, což sebou přináší riziko náročnější a nákladnější údržby. Další nevýhodou je vyšší spotřeba plynů, které laser využívá pro vytvoření aktivního prostředí. Oproti těmto nevýhodám se jedná o nenahraditelnou pomoc při řezání uhlíkové oceli, kdy podle výkonu samotného laseru je možné řezat ocelové tabule až do tloušťky 45 mm. [8][9]

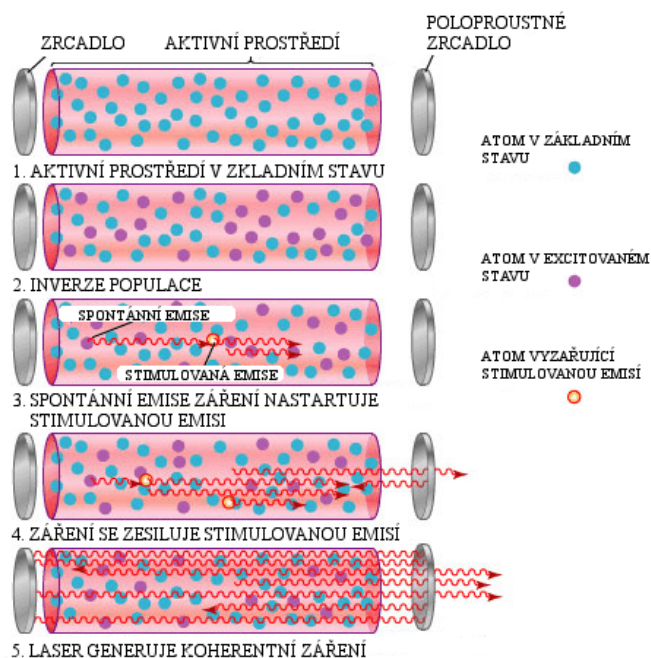


Obr. 3. Rezonátor CO₂ laseru společnosti TRUMPF [10]

Řezání takto silných materiálů je možné i díky vlnové délce samotného laserového paprsku, která je 10,6 μ m. Nevýhodou této vlnové délky je nemožnost přenášet paprsek k řezací hlavě za použití optického vlákna, jako to například umožňují jiné konstrukce laserů, ale je nutné použít soustavu odrazových zrcadel. Odrazová zrcadla je nutné chladit, pravidelně seřizovat a kalibrovat. [9] O šíření laserového paprsku uvnitř stroje práce pojednává detailněji v následujících kapitolách.

1.2 Vznik laserového paprsku

Samotný laserový paprsek vzniká uvnitř rezonátoru v aktivním prostředí na základě pravidel kvantové mechaniky. Aktivní prostředí, které v našem případě plynového laseru tvoří směs plynů CO_2 , He a N_2 , je vybuzeno elektrickým výbojem. Pokud elektrony v atomu pohlcují dodanou energii, mohou se dostat na vyšší vzdálenější orbitalu od jádra a jsou poté označovány jako excitované/vybuzené. Excitovaný stav je ovšem nestabilní, protože v základním stavu každého atomu jsou zmiňované orbitály vždy zaplněny od nejnižších, nejbližších k jádru, směrem od něj. Vybuzený elektron má tedy tendenci se vrátit na své původní místo a tím navrátit atomu jeho původní stabilitu. Při přechodu elektronu z vyšší energetické úrovně zpět na nižší energetickou úroveň dochází k uvolnění energie v podobě vyzářeného fotonu. Pokud foton pocházející ze spontánní emise následně prochází skrz aktivní prostředí, naráží do dalších excitovaných atomů, čímž strhne tyto atomy k hromadné emisi fotonů. Za pomoci zrcadel na obou stranách rezonátoru jsou fotony emitované ve směru k těmto zrcadlům odraženy zpět a při každém průchodu rezonátorem strhávají další fotony, čímž dochází ke zvyšování intenzity paprsku a také k jeho koncentraci. Fotony, které jsou vyzářeny jiným směrem, unikají kolem zrcadel nebo skrze trubici rezonátoru, a protože nejsou dále zesilovány, tak zanikají. [11][12]

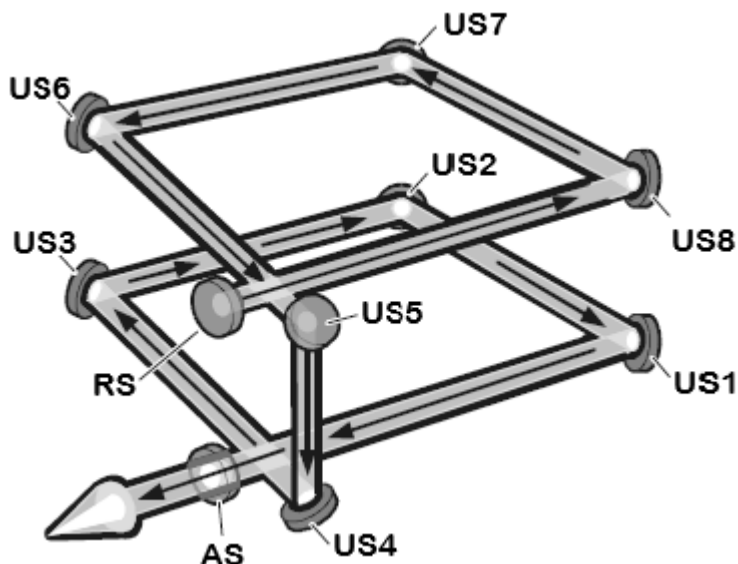


Obr. 4. Stimulovaná emise v laserové dutině [13]

U celého principu se využívá poznatku, že směr každého dalšího uvolněného fotonu je shodný se směrem fotonu předchozího, který tuto následnou emisi vyvolává. Na základě této skutečnosti dochází ke sjednocení toku fotonů. Takovýto tok paprsků má i na velké vzdálenosti minimální rozbíhavost, takže o něm mluvíme jako o koherentním paprsku, který je možné za pomoci optiky zaostřit na velmi malý bod. Velikost takto zaostřeného bodu nám následně určuje šířku řezné spáry u laserového řezacího stroje a bývá většinou menší než 0,5mm. [5]

2 ŠÍŘENÍ LASEROVÉHO PAPRSKU UVNITŘ STROJE

Šíření laserového paprsku uvnitř řezacích laserových strojů značky TRUMPF začíná v rezonátoru. Na obrázku (Obr. 5) je vidět náčrt rezonátoru, který je rozložený ve dvou rovinách. Na obrázku (Obr. 5) jsou znázorněny trubice rezonátoru, odrazová zrcátka označená zkratkami AS, RS a US1 až US8 a hlavní směr paprsku. Zrcátka označená jako RS a US1 až US8 jsou plně odrazivá zrcátka, jak bylo popsáno a vysvětleno dříve. Zrcátko RS je zpětné zrcátko a jedná se o jeden konec rezonátoru. Zrcátka US1 až US8 jsou zrcátka určená pro směřování paprsku v systému rezonátoru. V případě zrcátka AS se jedná o polopropustné zrcátko, které tvoří druhý konec rezonátoru. Zrcátko AS odráží část paprsku zpět do rezonátoru a část laserového paprsku propouští. Propuštěný laserový paprsek po průchodu celého optického systému stroje již slouží k opracování materiálu. [14]



Obr. 5. Dráha paprsku v rezonátoru [14]

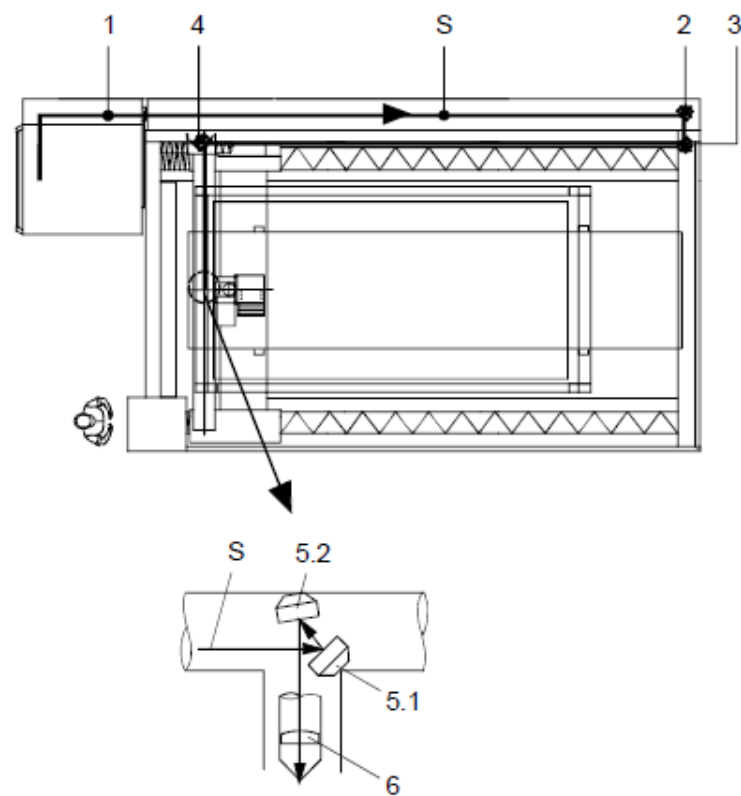
Poté, co paprsek opustí rezonátor, prochází přes zapouzdřené vedení paprsku, které zabraňuje nežádoucímu unikání paprsku a také vnikání spalin vznikajících při řezání materiálu a které by mohlo ovlivňovat vlastnosti paprsku. Společnost TRUMPF pro toto vedení využívá dvě provedení závislá na použitém laseru, a to TLF 2000, 2700, 3200 (název systému) nebo TLF 4000 (název systému).

Obě provedení následně používají před samotnou řezací hlavou auto-fokusační funkci AutoLas Plus (název systému) - zařízení, které slouží k automatickému nastavení ohniska před čočkovou optikou řezací hlavy, a tak v závislosti na řezané jakosti materiálu a jeho

tloušťce nastavuje správné zaostření paprsku. Dále pak v důsledku různých paprskových délek v pracovním rozsahu kompenzuje přemístění ohniska. [14]

2.1 Vedení paprsku se systémem TLF 2000, 2700, 3200

V případě systémů TLF 2000, 2700, 3200 je výstupní, neviditelné, laserové záření z rezonátoru směrem k řezací hlavě přenášeno za pomoci zrcadlového teleskopu, který obsahuje konvexní a konkávní odrazové zrcátka. Jsou využity tři filtrační vložky, které zajišťují, že k laserovému paprsku je přiváděn pouze vzduch, který neobsahuje žádné nečistoty, jako je například prach, nebo olejové částice. Celý systém zrcadlového teleskopu je větrán za pomoci stlačeného vzduchu. [14]



- | | |
|---|--------------------------------------|
| 1 TLF laser s paprskovým teleskopem | 5.1 Odrazné zrcátko a auto-fokusační |
| 2 Odrazné zrcátko | 5.2 zrcátko u AutoLas Plus |
| 3 Odrazné zrcátko a posouvač fáze v kruhovém polarizátoru | 6 Čočková optika řezací hlavy |
| 4 Odrazné zrcátko na pohybové jednotce | S paprsek |

Obr. 6. Vedení paprsku systémem TFL 2000,2700,3200 [14]

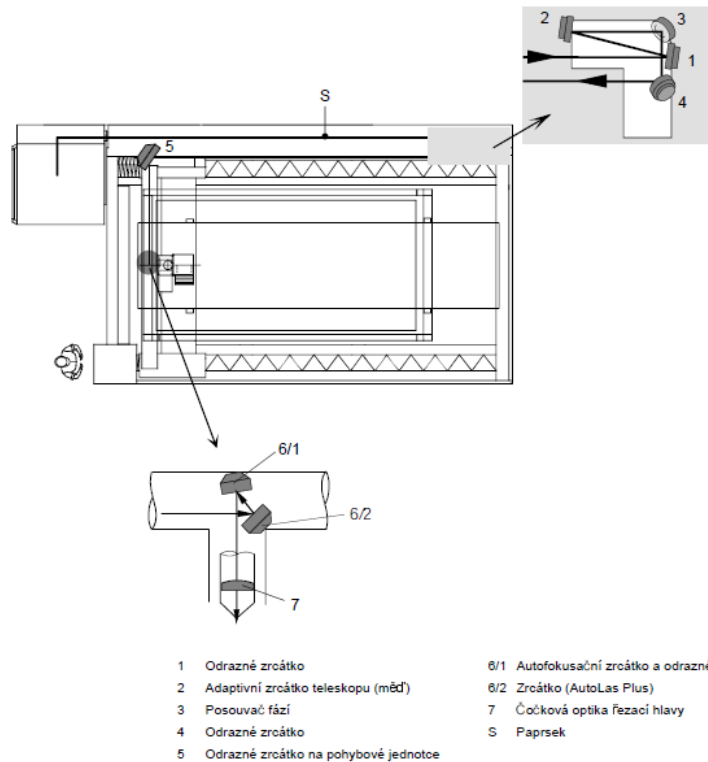
Na obrázku (Obr. 6) je v nákresu stroje znázorněno vedení paprsku od rezonátoru, kdy paprsek prochází celým pracovním prostorem uvnitř stroje a následně je za pomoci

odrazných zrcátek 2 a 3 směřován zpět do přední části stroje. Z důvodu, nutnosti zajištění možnosti pohybu portálu nesoucího řezací hlavu ve směru osy X (vodorovně na obrázku Obr. 6) jsou zrcátka 2 a 3 umístěny až v zadní části stroje mimo pracovní prostor. Umístěním těchto odrazových zrcátek vzadu je zajištěno, že ať se portál s řezací hlavou nachází v jakékoliv pozici na ose X, vždy bude stát v cestě paprsku odraženého zpět do přední části stroje. Odražený paprsek je následně směřován pomocí zrcátka číslo 4, které je umístěno na portálu, do optického systému nad samotnou řezací hlavou.

Poslední optické součásti před řezací hlavou jsou zrcátka 5.1 a 5.2. Soustava těchto zrcátek zajišťuje auto-fokusační úlohu, kdy je u zrcátka 5.1 automaticky přizpůsobována jeho poloha a zakřivení povrchu podle tlaku chladící vody a zrcátko 5.2 automaticky přizpůsobuje zaostření laserového paprsku dle jakosti řezaného materiálu a jeho tloušťky a v případě různých paprskových délek kompenzuje přemístění ohniska. [14]

2.2 Vedení paprsku se systémem TLF 4000

Systém vedení paprsku TLF 4000 je velmi podobný předchozím systémům vedení paprsku s tím rozdílem, že zrcátka 2 a 3 viz obrázek (Obr. 6) v zadní části pracovního prostoru jsou nahrazena větším počtem různých odrazných zrcátek viz obrázek (Obr. 7), která zajišťují optimalizaci geometrie paprsku a obsahují posouvač fází (ECQ). Díky délce paprskové dráhy dochází k zatemnění okrajových polí paprsku. Paprsek směřovaný přes tuto sestavu optických zrcátek odražený zpět směrem k přední části stroje, je následně, stejně jako u předchozích systémů, za pomoci dalšího odrazového zrcátka nasměřován do auto-fokusačního a AutoLas Plus zrcátka. [14]

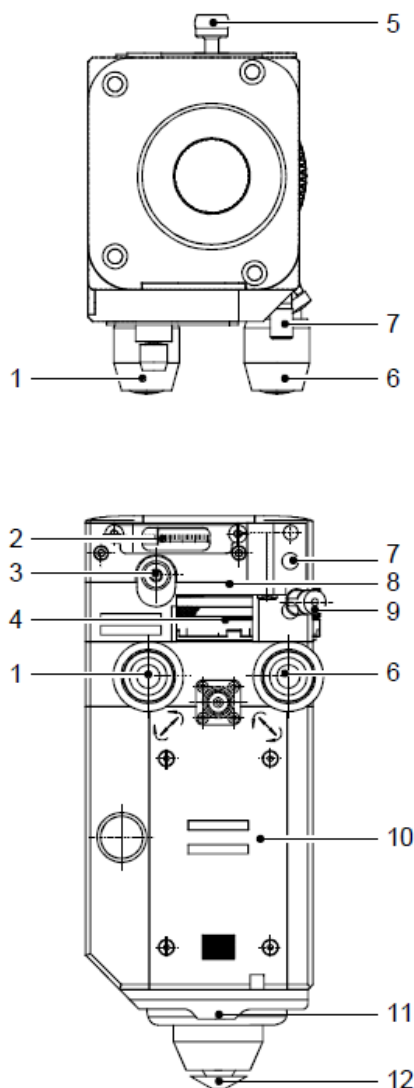


Obr. 7. Vedení paprsku systémem TFL 4000 [14]

2.3 Řezací hlava

Po průchodu paprsku přes vedení uvnitř stroje popsaného v předchozích kapitolách se dostává laserový paprsek k samotné řezací hlavě. Pohled na celou řezací hlavu a popis jednotlivých komponent je možné vidět na obrázku (Obr. 8). Laserový paprsek je směřovaný do řezací hlavy shora, kde prochází tubusem k čočce, která soustřeďuje veškeré paralelně dopadající laserové paprsky do jednoho ohniska. V tomto ohnisku poté dosahuje záření své maximální energetické hodnoty. V laserových řezacích strojích se používají zinek-seleniové (ZnSe) čočky nejčastěji s ohniskovou vzdáleností 5" nebo 7,5". Čočka je chlazená procházejícím řezným plynem, aby nedošlo k jejímu poškození vlivem tepla. Jako poslední prochází usměrněný a zaostřený laserový paprsek spolu s řezným plynem skrz trysku. K chlazení trysky je dodatečně využíváno i vyčištěného stlačeného vzduchu. Řezací hlava je dále vybavena sensorovým systémem regulace odstupu a kapacitní regulací odstupu. Oba systémy zajišťují, že vzdálenost trysky od řezaného materiálu je udržována v konstantní vzdálenosti po celou dobu řezání. Využitím těchto systémů je zaručeno, že i při nerovnostech na materiálu, které mohly vzniknout již při výrobě nebo při následné manipulaci s materiálem, bude nastavené ohnisko vždy v ideální pozici pro pálení daného materiálu.

Z důvodu, že čočka uvnitř řezací hlavy nemá nekonečnou životnost, obsahují stroje vybavené systémem TFL 4000 senzorickou kontrolou. Modul uvnitř řezací hlavy kontroluje intenzitu světla a pokud zaznamená silný světelný záblesk uvnitř řezací hlavy, dochází k vypnutí celého stroje. Po takovémto vypnutí je nutné zkontrolovat příčinu aktivace senzorické kontroly. Může se jednat o procesní světlo nebo o začínající tepelný rozklad čočky, která se před rozkladem rozbleskne. V takovém případě je sice nutné provést výměnu čočky v řezací hlavě, ale není nutné kompletní čištění celého vedení paprsku, které by bylo nezbytné provést v případě tepelného rozkladu čočky. [14]

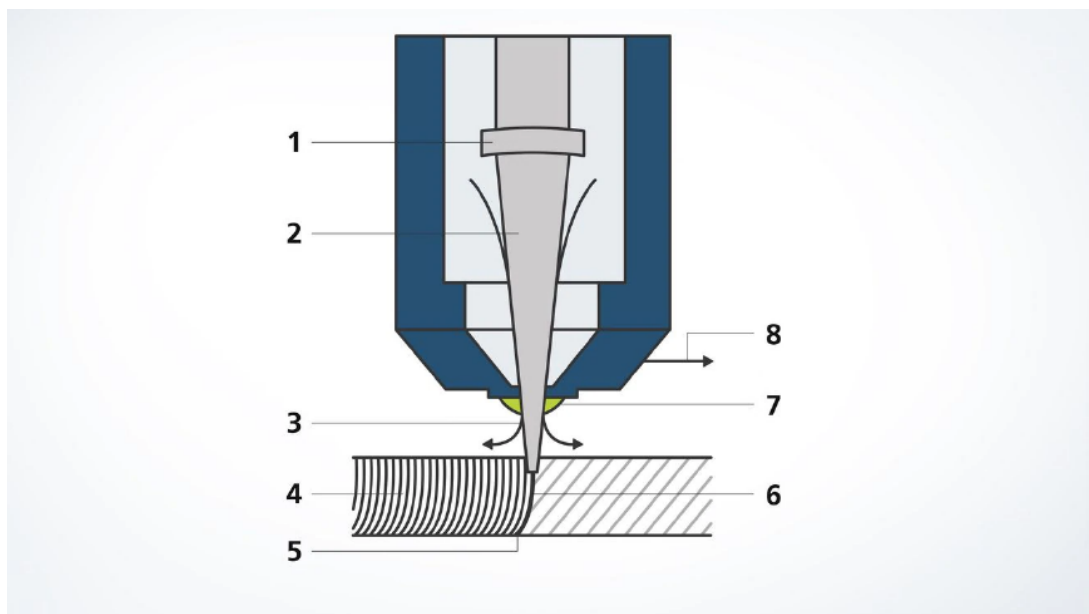


- | | | | |
|---|--|----|---|
| 1 | Seřizovací šroub se stupnicí | 7 | Připojení provzdušňování vedení paprsku |
| 2 | Skala Z s dělením 1 mm | 8 | Horní část řezací hlavy (kazeta) |
| 3 | Šroub pro seřízení ohniska | 9 | Stavěcí pojistka |
| 4 | Stavěcí kroužek Z, s dělením stupnice 0.1 mm | 10 | Spodní část řezací hlavy |
| 5 | Blokovací čep | 11 | Trubka proudícího vzduchu |
| 6 | Seřizovací šroub se stupnicí | 12 | Tryska |

Obr. 8. Řezací hlava, horní a čelní pohled [14]

2.4 Dělení materiálu

Ve chvíli, kdy laserový paprsek dopadne na materiál, jenž chceme dělit, začne docházet k zahřívání a následně tavení tohoto materiálu v místě, kam koncentrovaný paprsek dopadá. Bod dopadu laserového paprsku má velikost menší než půl milimetru, takže zahřívání probíhá na velmi malé ploše. Tepelná vodivost řezaného materiálu nedokáže efektivně odvádět všechnu nahromaděnou energii a laserový paprsek pronikne roztaveným materiálem skrz celou tloušťku řezaného plechu. Prostup laserového paprsku skrze materiál nazýváme zápich. Zápich je ideálně vždy prováděn mimo řezanou konturu výsledného dílce z důvodu jeho většího průměru a teprve následně je řez vedený na konturu dílu a dochází k samotnému řezání požadovaného dílce ze zpracovávaného materiálu. Na obrázku (Obr. 9) jsou viditelné řezné rýhy charakteristické pro řez laserovým paprskem. [15]



1. Zaostřovací optika: čočkové a zrcátkové optiky zaostřují laserový paprsek na místo obrábění
2. Laserový paprsek: laserový paprsek naráží na obrobek a zahřívá ho, dokud se neroztaví nebo neodpaří.
3. Řezný plyn: pomocí řezného plynu je vznikající tavenina vyfukována z řezné mezery. Plyn vychází z trysky souose s laserovým paprskem.
4. Řezné rýhy: při laserovém řezání získává řezná hrana typický vzor rýhy. Při malé rychlosti řezání probíhají tyto rýhy téměř paralelně s laserovým paprskem.
5. Tavenina: laserový paprsek – svazkové laserové světlo – je veden po obryse a v daném místě roztaví materiál.
6. Čelní strana obrobku: řezná mezera je stěží širší než zaostřený laserový paprsek.
7. Tryska: laserový paprsek a řezný plyn prochází řezací tryskou a dopadá na obrobek.
8. Směr řezu: v důsledku pohybu řezací hlavy nebo obrobku v určitém směru vzniká řezná mezera.

Obr. 9. Proces laserového řezání [16]

U dělení materiálu za pomoci laserového paprsku se využívají fyzikální jevy jako tavení materiálu, jeho spalování či sublimování. Velmi často se jedná o kombinaci těchto jevů. Daný jev je závislý na použitém řezném plynu a nastavených parametrech laserového stroje. Podle toho můžeme mluvit o tavném řezání, oxidačním řezání nebo sublimačním řezání, kdy každá metoda řezání má jiné výsledky z pohledu kvality povrchu na výsledném obrobku. [15]

2.4.1 Tavné řezání materiálu

Jak již napovídá samotný název metody, jedná se o dělení materiálu za pomoci tavení a využití plynů, které jsou inertní (netečné). U laserových řezacích strojů se jedná o dusík nebo argon. V případě metody tavného řezání je ohnisko laserového paprsku fokusováno do spodní poloviny materiálu, aby došlo k nejlepšímu natavení materiálu v celé jeho tloušťce. Správné nastavení ohniska paprsku má výrazný vliv na rychlost natavení materiálu a v závislosti s tím také na rychlost samotného řezacího procesu. Řezací plyn prochází skrze trysku souběžně s laserovým paprskem do vzniklé štěrbině a jeho úkolem je vyfouknout taveninu ven z řezné spáry. Aby nedocházelo k ulpívání nataveného materiálu na řezných hranách ze spodní strany obrobku, je nutný vysoký tlak řezného plynu, který se pohybuje mezi 2 a 20 bary. Přesný tlak je určený podle druhu děleného materiálu a jeho tloušťky. Množství plynu a tvar jeho proudění určuje tryska, která je použita na řezací hlavě. Konkrétní typ trysky, kterou je doporučeno použít, je přednastavený v technologických předpisech stroje dle řezaného materiálu a použitých technologických metod. [9][15]

Využití inertního plynu pro řezání s sebou přináší výhodu v podobě vytvoření ochranné atmosféry v prostoru samotného řezu. Inertní plyn, který zajišťuje vyfukování taveniny, zamezuje přístupu vzduchu do řezné spáry, čímž ochraňuje řezané hrany od oxidace, které by mohly podléhat, a tak má hrana kvalitní povrch, který již nepotřebuje další dokončovací práce. Další výhodou je skutečnost, že při využití inertního plynu nedochází k exotermické reakci, a tak není okolí řezu vystaveno příliš vysokým teplotám, které by mohly mít za následek například zakalení silnější vrstvy materiálu, a tak způsobit komplikace při dalších operacích jako například při řezání závitů do vypálených otvorů.

Nevýhodou dělení materiálů za pomoci tavné metody je rychlost řezu u silnějších tloušťek plechů. Protože je použitý řezný plyn, který je inertní, pro natavení materiálu je využíváno pouze výkonu daného stroje. Na základě toho je tedy řezání tenkých plechů zhruba stejně rychlé jako při využití oxidační metody, ovšem s narůstající silou materiálu se rychlost řezu

výrazně snižuje. Stejně tak není možné pomocí tavné metody řezat tak silné plechy, jako umožňuje využití metody oxidační. Řezané materiály touto metodou jsou nejčastěji legované oceli, hliník a jeho slitiny, případně další barevné kovy, které je možné na laserových strojích pálit. [15][17]

2.4.2 Oxidační řezání materiálu

V případě oxidačního řezání materiálu se často také používá označení „řezání plamenem“. U tohoto typu dělení materiálu se jako řezný plyn využívá kyslík, který podporuje exotermickou reakci. U laserového řezání se jedná o exotermickou reakci hoření železa, takže využívaný řezný plyn se na procesu řezání podílí aktivně. Ohnisko laserového paprsku je fokusováno do horní poloviny opracovávaného materiálu, ideálně těsně pod jeho povrch, aby k jeho prohřátí a natavení došlo v co nejkratší době. Po dosažení potřebné teploty začne řezný plyn reagovat se žhavou taveninou oceli a tím vznikne exotermická reakce hoření, která produkuje velké množství tepla. Energie reakce hoření je oproti energii laserového paprsku až pětinasobná. Uvolněná energie tepla prudce ohřívá dělený materiál až k bodu tavení a následně jeho spalování. Protože velká část materiálu je během exotermické reakce spálena, a ne pouze roztavena, není u dělení materiálu oxidační metodou nutné dosahovat tak vysokých tlaků řezného plynu pro vyfouknutí taveniny a vytvoření řezné spáry, jako tomu bylo u tavné metody. Tlak řezného plynu dosahuje maximálně 6 barů. [18]



Obr. 10. Ukázka řezu oxidační metodou [Vlastní zdroj]

Největšími výhodami oxidační metody je rychlost řezání a tloušťka materiálu, kterou je možné metodou dělit díky využití exotermické reakce, která do procesu řezání vnáší velké množství energie, a tak není proces řezání závislý pouze na výkonu samotného laserového stroje. Oxidační řezání má vysoké nároky na kvalitu a čistotu řezného plynu, což se projevuje na kvalitě výsledného řezu. V případě využití nižší čistoty plynu dochází k rapidnímu poklesu řezných rychlostí. Nevýhodou oxidačního řezání je zoxidovaný povrch řezu a vysoká teplota exotermické reakce, která spaluje materiál a tepelně ovlivňuje materiál v blízkém okolí řezu, který se působením tepla zakalí a je tak náročnější jeho další opracování. Nejčastěji je to například řezání závitů. Vysoká teplota dále komplikuje výrobu například úzkých drážek, nebo konturu o menších rozměrech. U těch dochází velmi často ke spálení a je tak nutné, pokud to nastavení stroje dovoluje, využít pro řezání takových dílů tavné nebo sublimační metody. Oxidační metodou je možné řezat ocelové materiály nelegované a nízkolegované. [18][19]

2.4.3 Sublimační řezání materiálu

Sublimační řezání je metoda, která se využívá převážně u materiálů, které není možné tavit a je u nich nutné dosáhnout vysokých přesností řezu. Velmi často se metodou vyrábí například zdravotnické pomůcky a používá se u materiálů, u kterých není nutné dodání vysoké energie pro jejich odpařování. V případě sublimačního řezání není materiál opracováván tavením, jako tomu bylo u předchozích dvou metod, ale využívá se vysokých výkonů laserového paprsku pro odpaření materiálu. Řezná spára je vytvářena vysokým tlakem par, které v materiálu vznikají a jejich expanze vymrští natavený materiál ve volných směrech. Jako asistenční plyny jsou využívány dusík nebo argon, stejně jako je tomu u tavného řezání, což zajistí, že řezná spára po zpracování neoxiduje a v kombinaci s nízkým natavením materiálu je tak dosaženo kvalitního hladkého řezu bez otřepů. Tlak asistenčního plynu je nízký, protože je využíván pouze jako ochranná atmosféra řezu. [20]

3 PROBLEMATIKA EMC

V dnešní době nás neustále obklopují různá zařízení, která vyzařují elektromagnetická pole. V minulosti, v dobách, kdy nebylo využíváno tolik elektrických a elektronických zařízení, na lidský organismus působilo pouze přírodní záření. Ovšem v dnešní době, kdy je člověk zvyklý pro své pohodlí a zvýšení životního komfortu využívat řadu elektronických přístrojů, je lidský organismus, ale i samotná elektronická zařízení, denně vystavován působení rozličných elektromagnetických polí, která tato zařízení vyzařují. Elektromagnetická pole se rozdělují na pole nízkofrekvenční, jejich frekvence dosahuje úrovně 0 Hz až 30 kHz, kdy elektromagnetická pole s touto frekvencí vyzařují většinou běžné domácí elektro-spotřebiče, a následně elektromagnetická pole vysokofrekvenční jejichž frekvence dosahují až hodnot 300GHz. Do vysokofrekvenčních polí spadají například rádiové vlny a mikrovlny. Při běžném životě nedochází člověk do styku s elektromagnetickými poli, která by byla zdraví či život ohrožující. Jiná situace ovšem nastává u jednotlivých elektronických zařízení. Velmi často se dnes v těsné blízkosti nachází taková zařízení, která pracují s velmi nízkými hodnotami napětí a proudu, a vedle nich nalezneme zařízení, která naopak pracují s hodnotami napětí a proudu tak vysokými, že při průtoku elektrického proudu vodičem vzniká magnetické pole. Takto vzniklé pole může ovlivňovat první zmíněné zařízení, které následně nemusí pracovat správně. [21][22][23]

Vzhledem k těmto faktům ovlivňování se jednotlivých zařízení navzájem, vznikla v průběhu šedesátých let dvacátého století v USA vědeckotechnická disciplína nazvaná elektromagnetická kompatibilita (anglická zkratka EMC). V počátcích byly zájmy EMC soustředěny hlavně na problematiku kosmického a vojenského charakteru, ovšem v průběhu osmdesátých let se tyto zájmy díky rozvoji osobních počítačů, mobilních a satelitních komunikačních služeb a mikroprocesorové techniky rozšířily i do oblastí civilního života. Cílem EMC je zajištění schopnosti správné funkčnosti zařízení tak, aby nebylo v prostředí působení jiného zařízení, které vyzařuje elektromagnetické pole, ovlivňováno. Stejně tak ale nesmí toto zařízení negativně ovlivňovat jiná zařízení ani sebe samo svým vlastním vyzařovaným elektromagnetickým polem. V případě EMC se nejčastěji mluví o elektromagnetickém rušení (anglická zkratka EMI) nebo elektromagnetické odolnosti (anglická zkratka EMS). Elektromagnetickou odolnost je možné u zařízení, celých systémů a přístrojů zvýšit například využitím stínícího krytu. [22][23]

Velmi často se k výrobě stínících krytů využívají vodivé kovové materiály, což je příležitostí pro aplikaci laserového řezání, neboť výroba krytů klasickými metodami, jako je řezání,

vrtání a další zámečnické práce, je mnohem komplikovanější, náročnější a vzhledem k efektivitě i cenově nákladnější.

3.1 Materiály vhodné pro řezání laserem a pro EMS

Laserové stroje jsou schopné řezat různé druhy kovových materiálů. V případě CO₂ laserů se nejčastěji jedná o uhlíkovou ocel, nízkolegované a vysoce legované oceli označované také jako korozivzdorná ocel nebo slangově „nerezivějící ocel“, hliníkové materiály, případně některé slitiny hliníku. U uhlíkové oceli je možné zpracovávat také materiály s povrchovou úpravou pozinkováním. Povrchová úprava pozinkováním chrání materiál proti korozi a zvyšuje jeho odolnost proti mechanickému a chemickému poškození.

Pro výběr správného materiálu k výrobě elektromagnetického stínícího krytu je nutné uvážit různá hlediska. Pokud bychom se v první řadě zaměřili na odolnost a životnost stínícího krytu a jeho stabilitu po delší dobu a za jakýchkoliv provozních podmínek, nejideálnější by z výše vyjmenovaných materiálů bylo použití legované oceli, následně hliníku a na závěr by to byla uhlíková ocel, která časem podléhá korozi, a tak z dlouhodobějšího hlediska není vhodná. Uhlíkovou ocel je ovšem možné využít v případě, že se bude jednat o materiál, který je ošetřený povrchovou úpravou pozinkováním.

Dalším kritériem v případě výběru vhodného materiálu pro elektromagnetický stínící kryt je určitě pořizovací cena materiálu. Porovnání cen materiálu je možné vidět v tabulce (Tab. 1), a to jak cenu za 1 kg materiálu, tak cenu za 1 m², neboť materiály s různou hustotou mají různou hmotnost, a tak pro ideální představu nestačí pouze cena za kilogram materiálu.

Tab. 1. Porovnání cen materiálů [Vlastní zdroj]

	Ocel	Nerez	Hliník	Pozink
Cena za 1 kg	37,00,-Kč	125,00,-Kč	138,30,-Kč	44,50,-Kč
Cena za 1 m ²	296,00,-Kč	1000,10,-Kč	448,00,-Kč	356,30,-Kč

Poslední kritériem je měrný elektrický odpor/vodivost použitého materiálu, což bude v našem případě nejdůležitější parametr, neboť nevodivé materiály mají horší stínící vlastnosti proti elektromagnetickým polím [23].

Měrný elektrický odpor jednotlivých materiálů je možné porovnat v tabulce (Tab. 2)

Tab. 2. Porovnání měrného el. odporu materiálů [24]

	Ocel	Nerez	Hliník	Zinek
Měrný el. odpor (ρ)	0,1-0,2	0,7-0,8	0,027	0,06

Po předložení veškerých informací je nutné se zamyslet nad vhodností konkrétního materiálu.

Nerezová ocel sice vyniká odolností proti okolnímu prostředí, ale řadí se mezi nejdražší materiály z našeho výběru. Bohužel i vodivost tohoto materiálu, která je pro stínící kryt maximálně důležitá, není pro aplikaci na elektromagnetický stínící kryt vůbec vhodná. Nerezové materiály se spíše využívají jako odporový materiál.

Odolnost proti okolnímu prostředí má výbornou i hliník, případně jeho slitiny. Cena materiálu za 1 kg je sice vyšší, ale vzhledem k nízké hustotě materiálu je stejné množství stejný objem materiálu lehčí, a tak není kilogramová cena příliš vypovídající. Je proto nutné se orientovat cenou za 1 m². Nejdůležitější parametr – vodivost, má hliník ze všech uvažovaných materiálů nejlepší.

Uhlíková ocel nám v celém porovnání vychází nejhůře. Materiál působením prostředí koroduje, čímž dochází ke znehodnocení materiálu. Cena je sice nejvýhodnější, ale vodivost materiálu oproti například hliníku je zhruba 7x horší. Jedna z možností je ovšem využití pozinkovaného materiálu. Tento materiál je díky své povrchové úpravě odolný proti působení okolního prostředí, cena materiálu je výhodná a vodivost bude velmi podobná uhlíkové oceli.

Favorité jsou tedy hliník a pozinkovaná uhlíková ocel, mezi kterými je nutné se rozhodnout. Pokud by se jednalo o sériovou výrobu, bude přihlíženo ke každému nákladu, který ovlivní finální cenu výrobku. V tu chvíli bude pořizovací cena pozinkovaného materiálu nespornou výhodou. Dále fakt, že laserové opracování pozinkovaného materiálu je možné provést oxidační metodou za využití řezného plynu kyslíku, který je v pořizovacích nákladech levnější než dusík, který bude využit pro řezání hliníku za pomoci tavné metody, bude další výhodou pro pozinkovanou uhlíkovou ocel.

Na základě těchto faktů bude elektromagnetický stínící kryt vyrobený z pozinkované uhlíkové oceli.

4 POSTUP PŘÍPRAVY PODKLADŮ PRO VÝROBU

Před samotnou výrobou kovového dílce na laserovém stroji je nutná příprava výrobních podkladů. V případě výroby stínícího krytu je nutné nejprve zaměření a následně návrh daného krytu. Pokud se bude jednat o stínící kryt do zařízení, ke kterému vydal výrobce technickou dokumentaci, je výhodné využít rozměry z tohoto dokumentu.

Samotný návrh je možné provádět různými způsoby, ale v dnešní době se nejčastěji využívá 3D softwarových modelovacích nástrojů. Ve strojírenství jsou nejvíce rozšířené programy Inventor od společnosti Autodesk [25] a Solidworks 3D CAD od společnosti Solidworks [26]. V obou případech se jedná o komplexní softwarové nástroje, které obsahují nejenom možnost zpracování plechových částí, která je využívána u laserových řezacích strojů, ale umožňují kompletní návrhy strojních součástí a také následnou kompletaci jednotlivých dílců do celých technických zařízení. Další funkcionalitou je tvorba výkresové dokumentace, která je nezbytná pro následné technologické operace jako je například vrtání, závitování nebo ohýbání plechových dílců vyrobených na laserových řezacích strojích.

3D model vytvořený v modelovacím softwaru je následně převedený na rozvinutý tvar a jeho kontura je uložena a následně zpracována softwarovým vybavením, dodaným výrobcem laserového stroje. V případě společnosti TRUMPF se jedná o SW nástroj pojmenovaný TruTops [27]. Za jeho pomoci jsou dílci nastavené parametry jako například tloušťka a jakost materiálu. Následně je díl, případně dílce, které mají stejnou tloušťku a jakost materiálu, rozmístěny na plech konkrétního rozměru, a nakonec jsou na takto připravenou tabuli aplikovány technologie a postup pálení jednotlivých dílců. Na závěr je vytvořený soubor, který obsahuje informace o všech potřebných parametrech a ten je nahrán do laserového řezacího stroje, kde je následně zpracován operátorem.

Jednotlivým krokům se tato práce detailněji věnuje v praktické části, která je zaměřená na výrobu stínícího krytu a jednotlivé kroky směřující k hotovému a funkčnímu výrobku.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 VÝROBA STÍNÍCÍHO KRYTU PRO ÚSTŘEDNU

Aby bylo možné realizovat samotnou výrobu stínícího krytu, jejímž výsledkem bude plechový stínící kryt určený pro danou ústřednu, je nutné projít jednotlivé fáze přípravného a výrobního procesu jako je zaměření krytu či využití výkresové dokumentace, tvorba 3D modelu, ze kterého následně vychází výkresová dokumentace stínícího krytu a rozvinutý tvar dílu neboli jeho obrys/kontura, která je určena právě pro pálení laserem. Takto připravené podklady jsou následně zpracovány programem výrobce laserového stroje, aby byl stroj schopný tato data zpracovat. Nakonec je vytvořen pálicí plán nesoucí informace pro obsluhu řezacího stroje, jako je tloušťka, jakost a rozměr materiálu, který má být pro výrobu páleného dílu určen. Pálicí plán obsahuje také technologické tabulky pro daný materiál, použitý řezný plyn, řeznou čočku, která byla pro program použita a ovlivňuje parametry samotného řezání. Následuje samotný výrobní proces. V první řadě se jedná o vypálení zadaného dílu na laserovém řezacím stroji a následně je tento díl, pokud to jeho charakter vyžaduje, ohnut na ohraňovacím lisu dle vytvořené výkresové dokumentace a na ní uvedených rozměrů.

5.1 Návrh 3D modelu

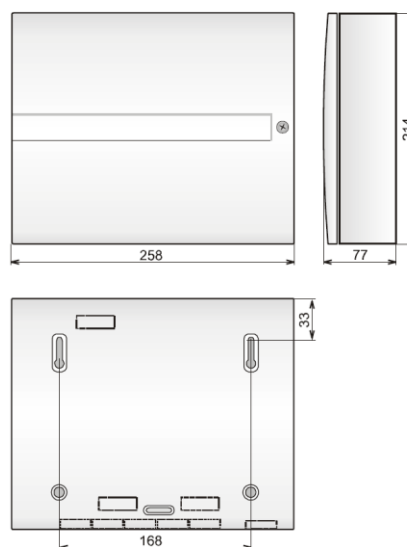
Návrh samotného krytu v softwaru pro tvorbu 3D modelů je v dnešní době standardní. Největší výhodou těchto modelovacích nástrojů je, že designér nebo konstruktér ihned vidí tvořenou součást a pracuje s mírami, které naměřil, nebo vyčetl z technické dokumentace. Dříve probíhala tvorba pouze ve dvourozměrné rovině 2D, což kladlo vysoké nároky na konstruktéra, který musel mít, hlavně v případě ohýbaných dílů, dobrou představivost a již při samotném návrhu bylo nutné počítat se zkrácením materiálu. Ohýbaný materiál se při ohybu natahuje, a tak nebylo možné pracovat s rozměry, které byly naměřeny, ale bylo nutné je upravit. Dnešní modelovací nástroje již umožňují při rozvinutí nakresleného dílu automaticky započítat faktor zkrácení.

17. Technické parametry ústředny

napájení ústředny	230 V / 50 Hz, max 0,1 A, třída ochrany II
zálohovací akumulátor	12 V, 1,3 nebo 2,2 Ah, životnost kvalitního akumulátoru max. 5 let
výstup zálohovaného napájení	maximální trvalý odběr 0,4 A, krátkodobě lze odebrat až 1 A po dobu max. 15 min
počet adres pro bezdrát. periférii	50
počet drátových vstupů	2 dvojitě vyvážené vstupy rozlišující aktivaci a sabotáž, jejich reakce je nastavitelná
výstup externího poplachu EW*	přepínací kontakt relé max. 1A/60V
výstup interního poplachu IW*	spíná na GND, max. zátěž 0,5A
programovatelné výstupy*	PGX, PGY max. 0,1 A, spínají na GND, programovatelná funkce
paměť událostí	255 posledních událostí včetně data a času
pracovní frekvence	868 MHz
stupeň zabezpečení	2 dle ČSN EN50131-1, ČSN EN 50131-6, ČSN EN 50131-5-3
určeno pro prostředí	II, vnitřní všeobecné (-10 až +40°C) dle ČSN EN 50131-1
rádiové vyzvaování	ČSN ETSI EN 300220
EMC	ČSN EN 50130-4, ČSN EN 55022
elektrická bezpečnost	ČSN EN 60950-1
podmínky provozování	ČTÚ VO-R/10/03.2007-4
* tyto signály též ústředna poskytuje bezdrátově pro bezdrátové sířeny a výstupní moduly AC a UC.	

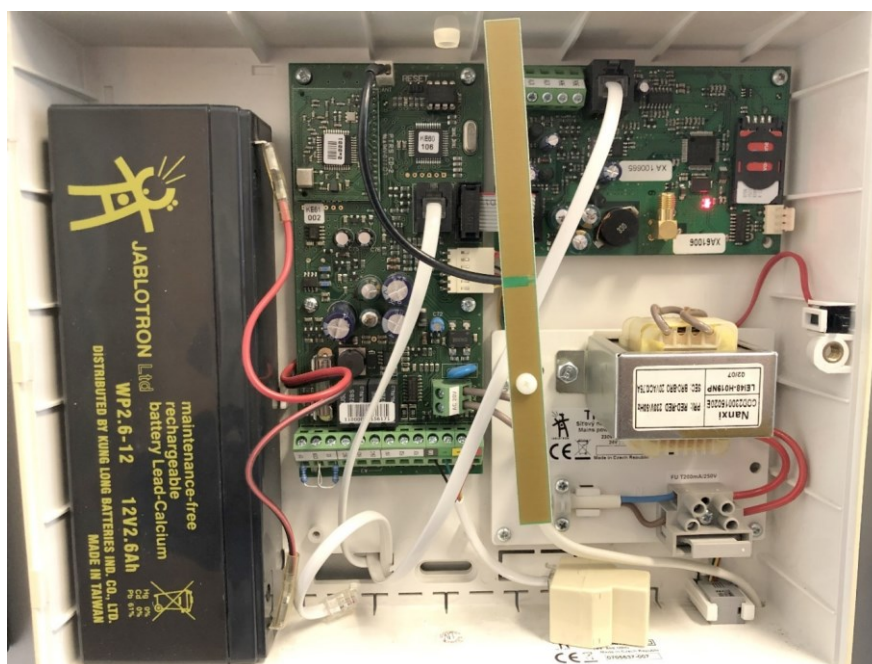


Poznámka: Výrobek, ačkoliv neobsahuje žádné škodlivé materiály, nevyhazujte do odpadků, ale předejte na sběrné místo elektronického odpadu. Podrobnější informace na www.jablotron.cz sekce Poradenství.



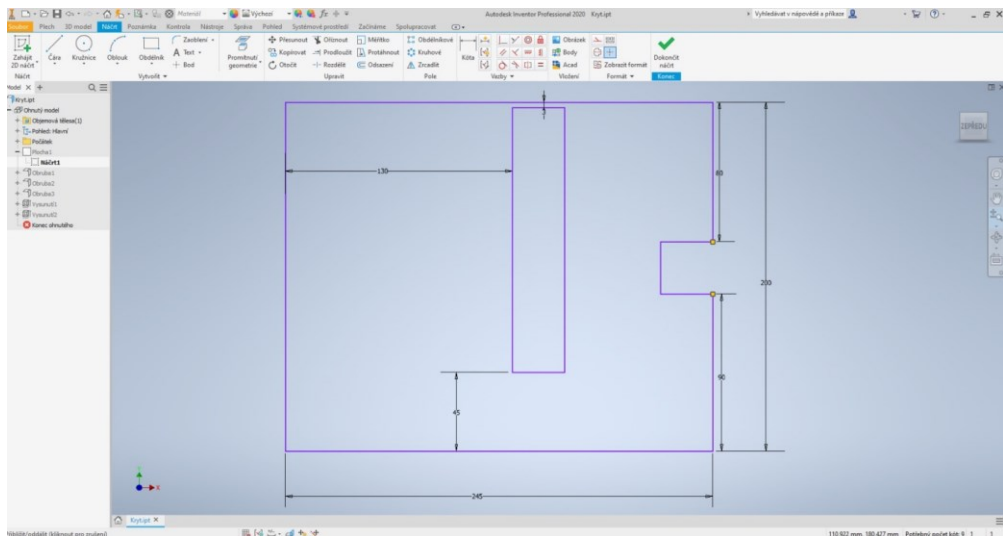
Obr. 11. Technické parametry ústředny JA-80K [28]

Pro návrh stínícího krytu je nejvhodnější využít technickou dokumentaci pro skříň, kterou chceme odstínit, přímo od výrobce. Bohužel ne vždy je technická dokumentace vydaná výrobcem pro dané účely tím nejvhodnějším materiálem. Jak je vidět na obrázku (Obr. 11), uvedeny jsou pouze vnější rozměry skříňné ústředny potřebné pro instalaci skříňe. Bohužel z dokumentace nedokážeme vyčíst rozměry vnitřní, které potřebujeme pro návrh stínícího krytu, který má být umístěn uvnitř uzavřené skříňe. V takovém případě je nutné ruční zaměření vnitřního prostoru skříňe ústředny.



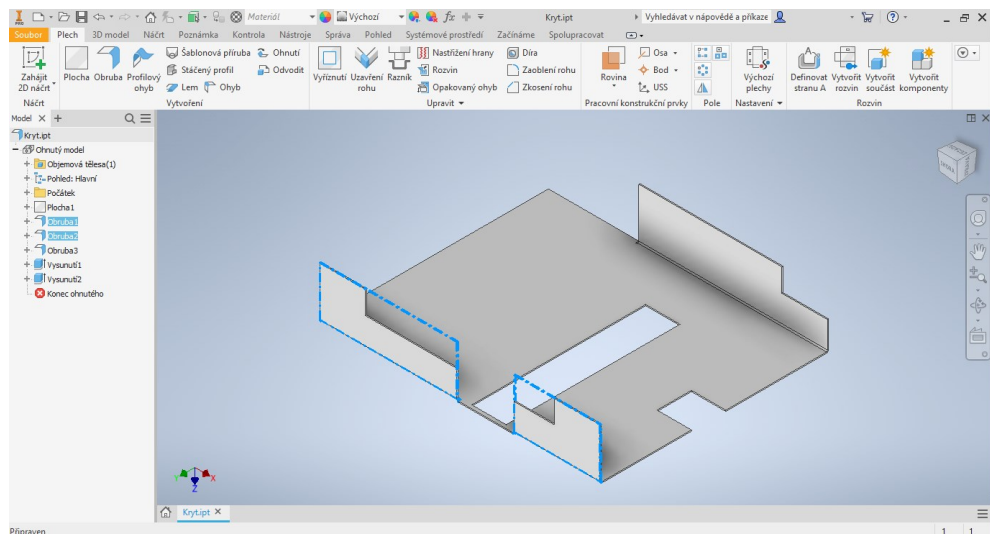
Obr. 12. Fotografie ústředny Jablotron JA-80K [Vlastní zdroj]

Během ručního zaměření nejčastěji vzniká skica/náčrt finálního produktu s poznámkami o jednotlivých rozměrech, které konstruktér potřebuje k následnému vytvoření 3D modelu. Vzniklá skica s rozměry je poté překreslena v modelovacím softwaru, v našem případě Autodesk Inventor. Možností kreslení je několik, v našem případě je prvně nakreslena čelní strana stínícího krytu viz obrázek (Obr. 13), která je následně označena jako plocha s nadefinovanou tloušťkou a jakostí materiálu, které dále určují faktor zkrácení pro konkrétní materiál.



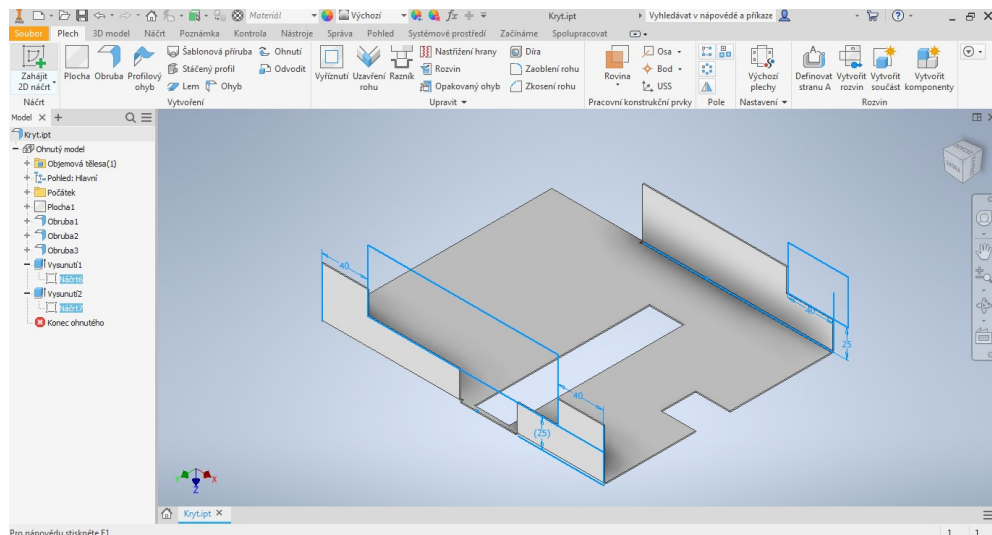
Obr. 13. Nákres čelní stěny krytu [Vlastní zdroj]

Dalším krokem je vytvoření obrub v potřebné délce a s požadovaným úhlem ohybu. Jednotlivé obruby je možno aplikovat po celé délce hrany nebo jako v našem případě pouze v určité délce či s odsazením.



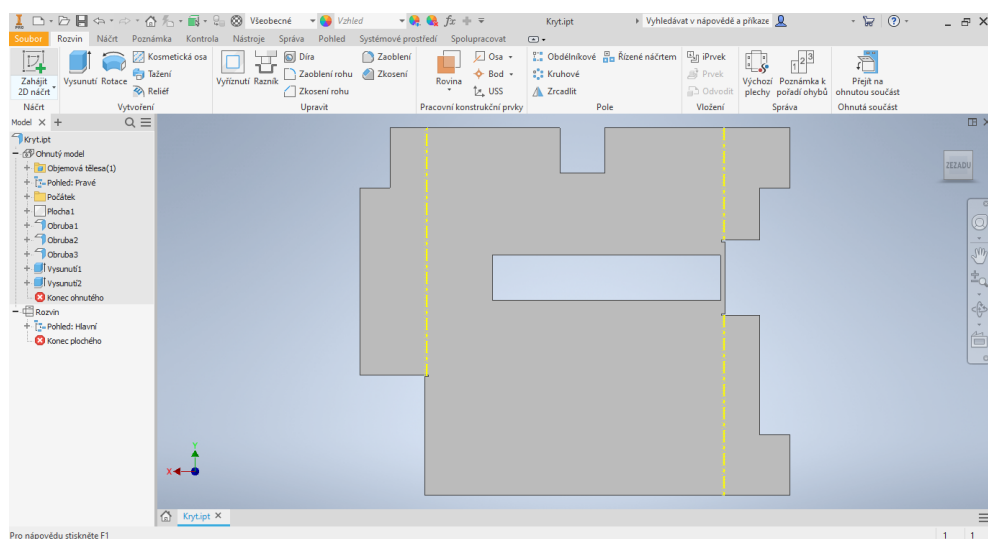
Obr. 14. Aplikace obrub na čelní stěnu krytu [Vlastní zdroj]

Posledním krokem ve 3D návrhu stínícího krytu je vyříznutí částí obrub, které uvnitř skříně kolidují s nainstalovanými součástmi, jako je například baterie, nebo přímo s plastovými součástmi skříně.



Obr. 15. Odstranění kolidujících částí obrub [Vlastní zdroj]

Po kompletním vytvoření 3D modelu stínícího krytu se provede jeho rozvinutí do plochého dílu, viz obrázek (Obr. 16). Na rozvinutém dílu jsou viditelné ohybové osy. Takto vytvořený plechový díl se uloží do digitálního souboru ve formátu, který dokáže následně zpracovat software dodaný výrobcem laseru, který je nutný pro tvorbu souborů určených pro řezací stroj. Nejčastěji je využíváno typu soubor DXF, který umožňuje výměnu dat mezi Autocadem a dalšími programy.



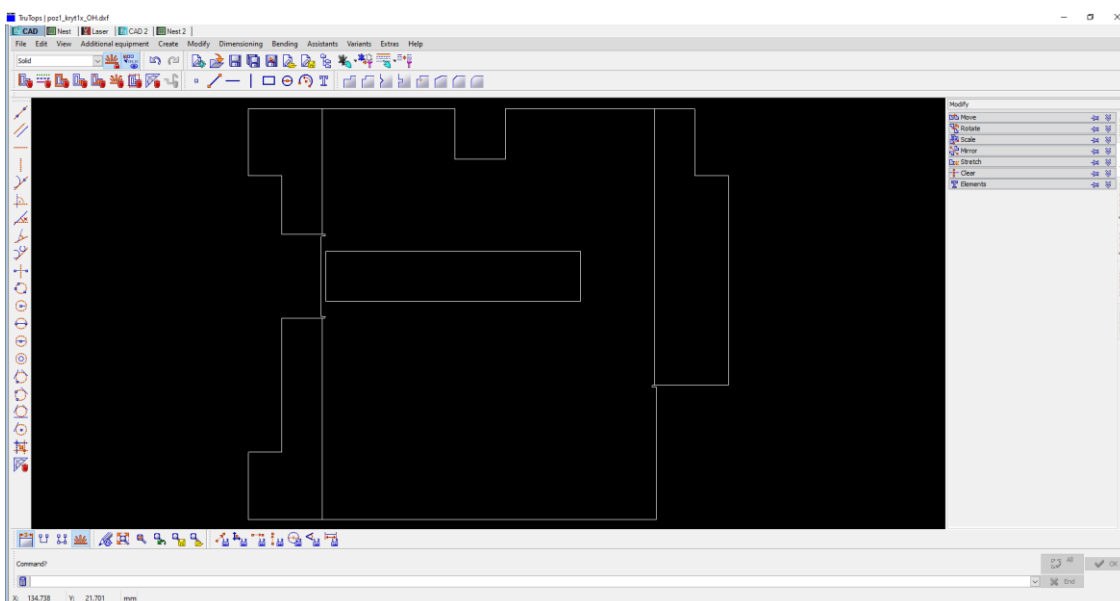
Obr. 16. Rozvinutý tvar stínícího krytu [Vlastní zdroj]

5.2 Příprava podkladů pro laserový řezací stroj

Kontura připravená a uložená v předchozím kroku bohužel není aplikovatelná přímo v řezacím stroji. Pro laserový řezací stroj je nutné konturu dále upravit pomocí programového vybavení od výrobce stroje, v našem případě se jedná o program TruTops od společnosti TRUMPF. TruTops obsahuje tři základní součásti a to CAD, který je určen ke kreslení a případné úpravě již nakreslených plechových dílců, součást NEST, pomocí níž jsou seskupovány díly stejné tloušťky a jakosti materiálu a ty jsou následně rozloženy na plechové tabule dle skladových možností. Poslední součástí je LASER, který umožňuje programátorovi osadit tabuli nebo několik tabulí ve stejném programovém balíku s rozloženými díly jednotlivými technologiemi a nastavit postup, jakým budou díly případně kontury uvnitř jednoho dílu řezány.

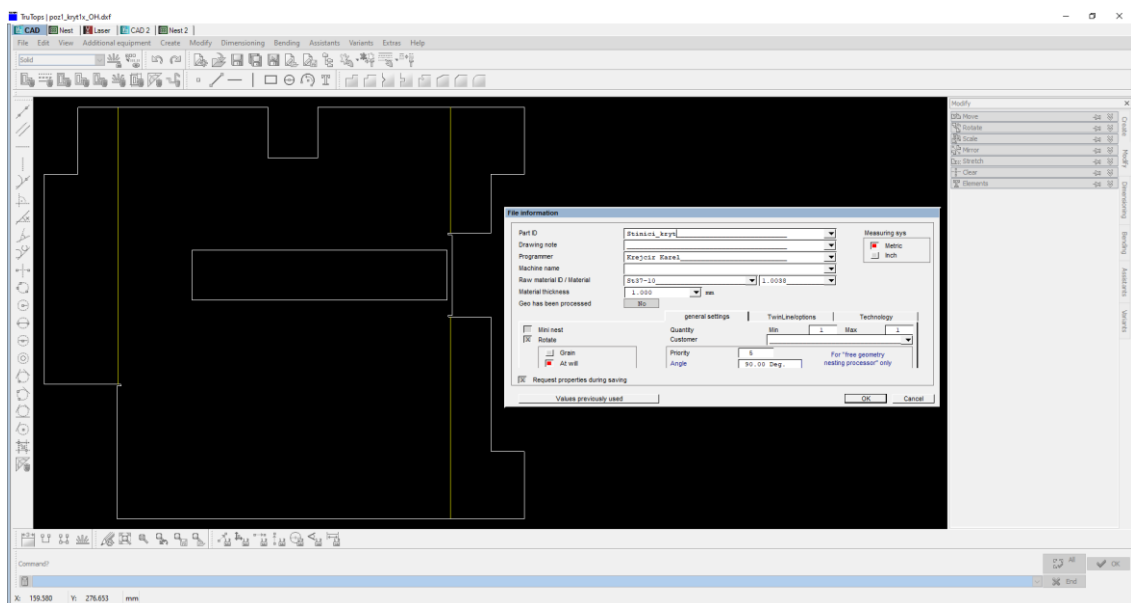
5.2.1 TruTops CAD – příprava řezané kontury dílu

Prvním krokem je příprava rozvinutého tvaru uloženého ve formátu DXF do formátu, který dokáže program TruTops zpracovat, a úprava vstupních dat tak, aby s nimi TruTops dokázal pracovat a nedošlo k nechtěnému zpracování kontur označených jiným typem čáry nebo barvou. To vše z důvodu, že různé typy a barvy čar jsou zpracovávány různými způsoby. Z toho důvodu je po načtení vstupních dat nutné odstranit viditelné osy ohybu, které jsou znázorněny plnou bílou čarou, kterou TruTops standardně považuje za řez a zkontrolovat uzavřenost všech řezaných obrysů. Pokud by byl některý obrys otevřený, program na tuto skutečnost upozorní v průběhu ukládání dílu a graficky zobrazí otevřené body kontury.



Obr. 17. TruTops CAD, příprava řezané kontury [Vlastní zdroj]

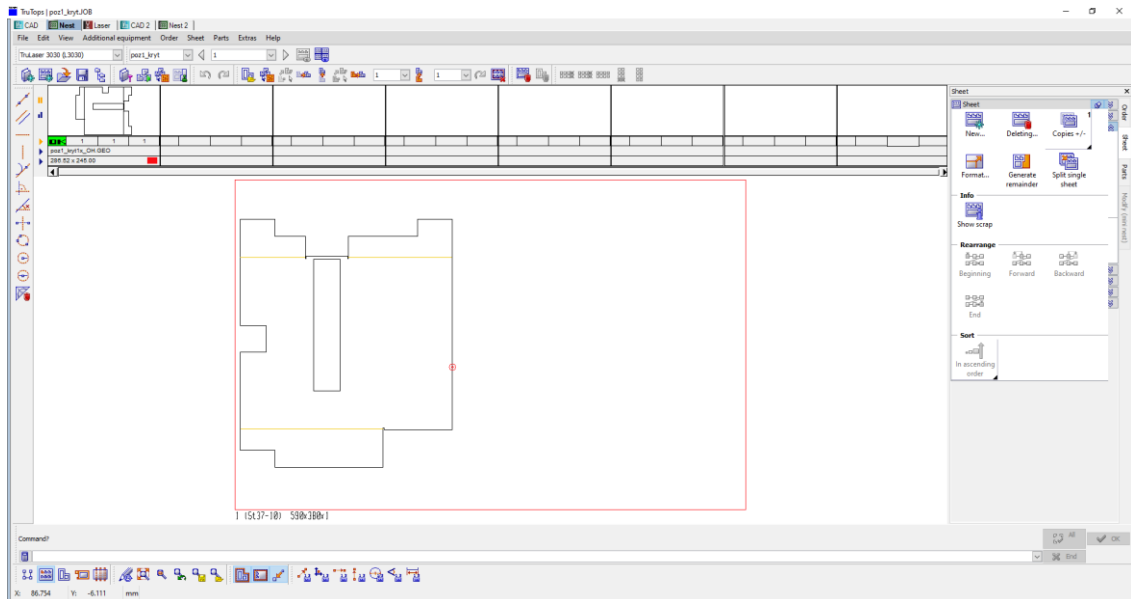
Pokud bychom chtěli zachovat ohybové osy jako vyznačenou (vygravírovanou) čáru na hotovém výpalu, například jako kontrolu při ohýbání, je možné místo odstranění bílé čáry znázorňující osu ohybu pouze změnit její barvu na žlutou, kterou program chápe jako konturu určenou pro gravírování. Zároveň je ale nutné v tomto případě celý díl zrcadlit, neboť vzhledem k poloze na obrázku (Obr. 17) by vyznačená osa ohybu byla na špatné, spodní straně dílu vůči potřebnému ohybu, který je prováděn vždy směrem nahoru. Jakmile je díl takto připraven, proběhne jeho uložení do formátu GEO, což je vnitřní soubor softwaru TruTops. Při ukládání souboru jsou do souboru uloženy i informace o tloušťce a jakosti materiálu.



Obr. 18. TruTops CAD, uložení vlastností materiálu [Vlastní zdroj]

5.2.2 TruTops NEST – rozklad dílů

V dalším kroku je tento soubor načtený do části NEST, kde je nejprve vložena tabule materiálu v takovém rozměru, který je k dispozici dle skladových zásob a samotný díl je na tuto tabuli umístěn. Vkládané díly je možné otáčet v různých úhlech, případně je zrcadlit, což umožňuje při rozkladu většího množství dílců, které jsou tvarově rozlišné, využít maximální možnou plochu tabule a tím minimalizovat odpadní síť, která po jednotlivých výpalech vzniká.



Obr. 19. TruTops NEST, vložení dílu do plechové tabule [Vlastní zdroj]

Rozklad dílů umožňuje využívat i tzv. společného řezu, kdy je možné uložit jednotlivé díly řezanou hranou těsně k sobě a tím ještě více minimalizovat výsledný odpad a zároveň snížit dobu působení laserového paprsku, protože se hrany jednotlivých dílů nezpracovávají pomocí laserového řezání každá zvlášť, ale zpracovávají se jedním řezem najednou. Využití společného řezu ovšem klade vysoké nároky na programátora a jeho zkušenosti, protože v případě nevhodného rozmístění dílů hrozí vyšší riziko pohybu materiálu či dílů, a také poškození dílů samotných nebo poškození laserového řezacího stroje, konkrétně řezací hlavy, které hrozí kolize s materiálem nebo již hotovým dílem.

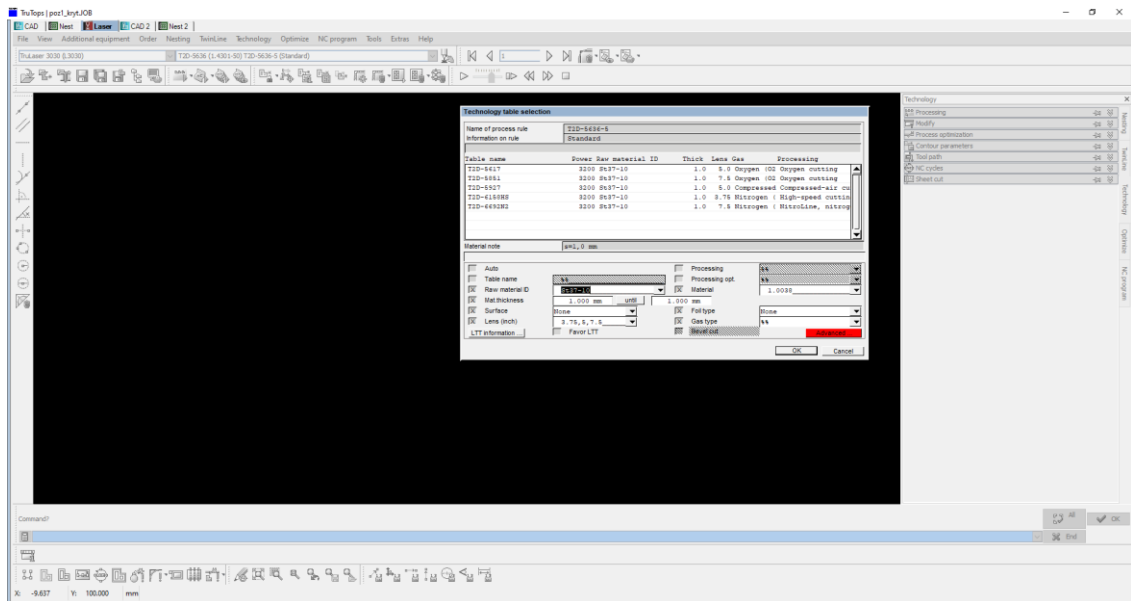
Jakmile je rozklad dílů na konkrétní plechové tabule hotový, je nutné vše uložit, aby tento soubor mohl být načten pro další zpracování.

5.2.3 TruTops LASER – technologie řezání

Poslední součástí softwarového balíku TruTops používaného pro řezání plechových dílců je součást LASER, která slouží k osazení technologií na jednotlivé tabule.

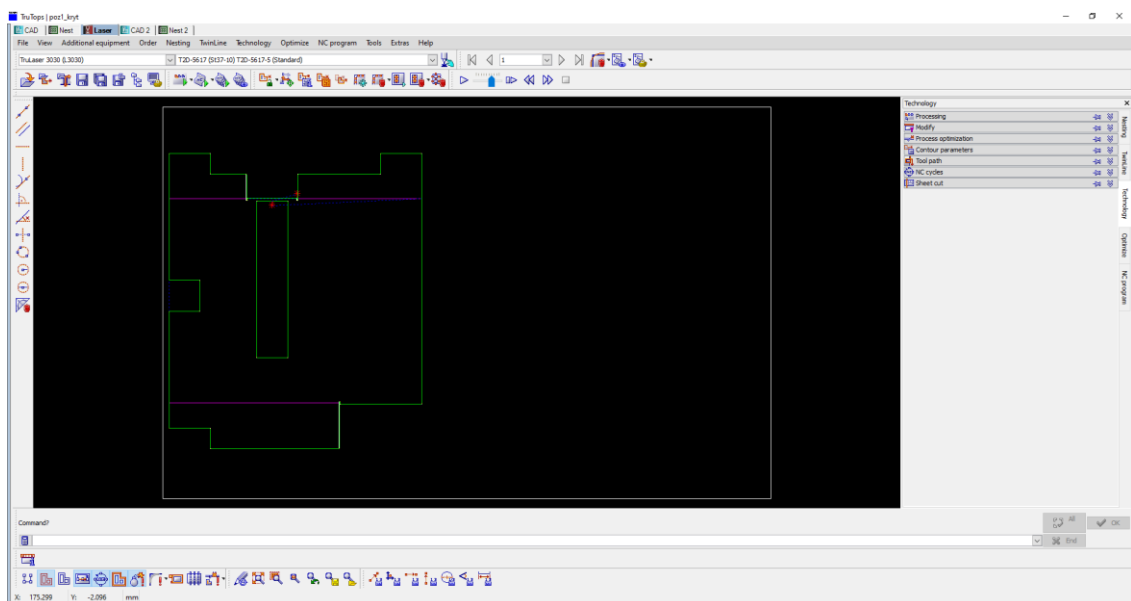
Ihned po načtení uloženého rozkladu dílů je nutné vybrat technologické tabulky, které budou použity pro zpracování, viz obrázek (Obr. 20). Použitelné technologické tabulky jsou filtrovány na základě zadaného typu laserového stroje, konkrétně výkonu rezonátoru, což je viditelné ve druhém sloupci (Power) a také tloušťky a jakosti materiálu nastavených v předchozích krocích. Parametry materiálu jsou viditelné ve třetím a čtvrtém sloupci. Třetí

sloupec (Raw material) znázorňuje jakost materiálu St37 což je klasická ocel a čtvrtý sloupec (Thick) znázorňuje tloušťku materiálu v milimetrech.



Obr. 20. TruTops LASER, výběr technologických tabulek [Vlastní zdroj]

Při výběru technologických tabulek hraje velkou roli také použitá řezací hlava, konkrétně typ čočky uvnitř řezací hlavy, který určuje ohniskovou vzdálenost 5“ nebo 7,5“, a také řezný plyn, který dále ovlivňuje, jestli se bude jednat o oxidační či tavné řezání, jak bylo představeno v předchozích kapitolách. Standardně je zažítým pravidlem u materiálů do 3 mm využívat řeznou hlavu s ohniskovou vzdáleností 5“. Pozinkované materiály se nejčastěji dělí pomocí řezání oxidační metodou, kdy se jako řezný plyn využívá kyslík.



Obr. 21. TruTops LASER, základní technologie [Vlastní zdroj]

Po výběru technologických tabulek se nám zobrazí načtená tabule materiálu s rozkladem dílů osazená základními technologiemi, které stanovil program sám za pomoci vnitřních přednastavených definic. To vše je vidět na obrázku (Obr. 21).

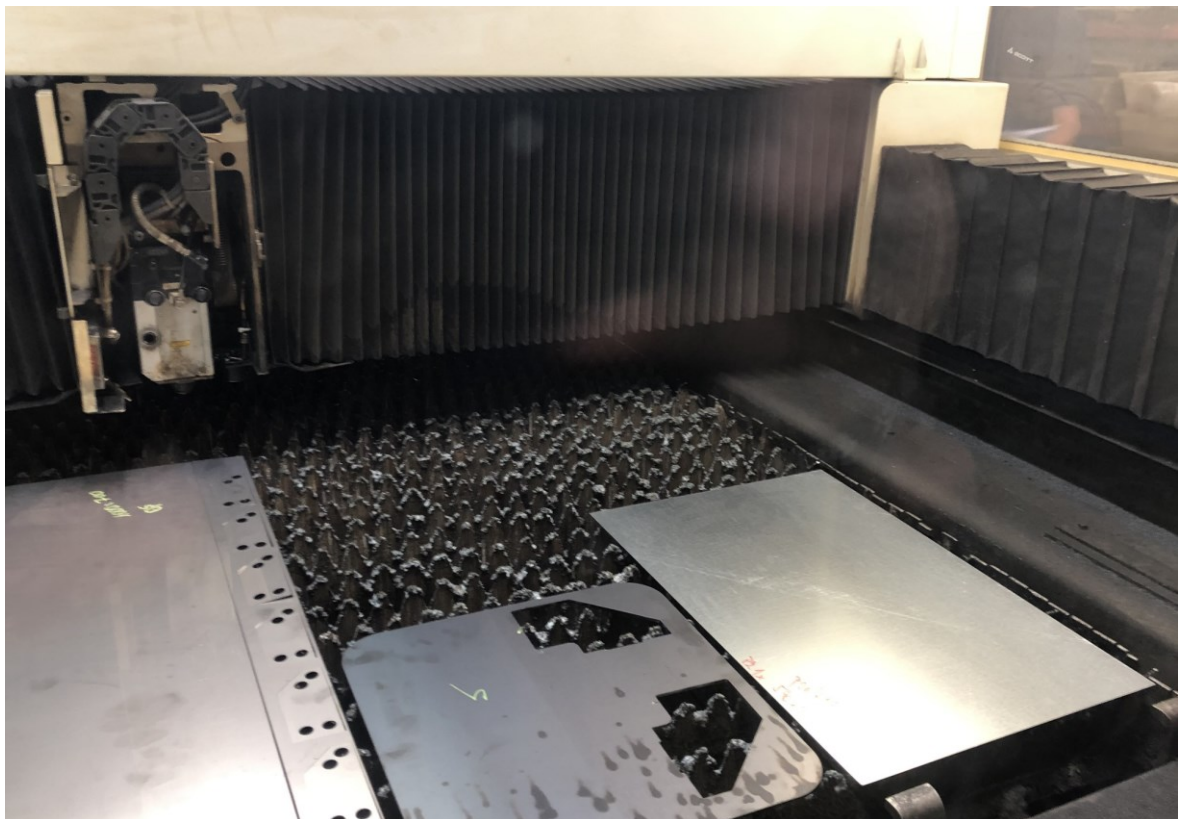
Zelenou barvou je znázorněná řezaná kontura a ke každé takto zpracované kontuře je vždy jeden zápich a nájezd. Zápich neboli prostup laserového paprsku skrze materiál je značený červenou hvězdičkou. Vždy se nachází mimo řezanou konturu a od něj vede nájezd k samotnému obrysu. Pokud programátor nerozhodne jinak a technologii zápichu neupraví ručně, nachází se zápich mimo řezanou konturu z důvodu, že otvor, který vzniká při prostupu laserového paprsku skrze materiál má větší průměr, než je šířka řezné spáry, a tak by na místě zápichu zůstával na kontuře viditelný „vryp“, který je pro spoustu následných aplikací laserových výpalů nevhodný. Růžová barva značí gravírované součásti. Při gravírování je výkon laseru snížen tak, že materiál je sice natavován, ale nedochází k prostupu laserového paprsku skrz materiál. Tím je docíleno pouze značení na povrchu materiálu.

Nejčastější úpravou technologií bývá přesun nájezdu venkovní kontury dílu tak, aby poslední řezaná hrana celého dílu ležela na co největším zbytkovém materiálu. Při samotném řezání dochází k zahřívání materiálu, který se právě vlivem teplotního působení začne rozpínat a pohybovat. Pokud je poslední řezaná hrana pouze okraj materiálu a jedná se o tenký materiál, často dochází k pohybu celého dílu a výsledný řez není rovný, čímž dochází ke znehodnocení výsledného dílu. Další úprava výchozí technologie je například aplikace mikrobodu na konkrétní konturu. Standardně probíhá řez po celém obvodu řezané kontury, což zajistí „vypadnutí“ páleného otvoru nebo celého dílu ze zpracovávaného materiálu. V případě použití mikrobodu není obvod řezaný až do konce, ale dráha řezu je ukončena dřív o nastavenou hodnotu. Tím zůstane zbytkový materiál, který drží odpálený materiál, uvnitř a je nutné ho vylomit za použití síly. Poslední technologií, která se aplikuje je zařezání zbytkové tabule. V případě, že zbytkový materiál, který po vypálení dílů zůstává, je dostatečně veliký a je možné ho následně využít pro další projekty, vkládá se do tabule řez, který oddělí odpadní síť včetně výpalů a materiál vhodný pro další zpracování. Jakmile programátor dokončí veškeré úpravy technologií, provede finalizaci programu. Tím se vytvoří pálicí plán, který se vytiskne a následně je předán obsluze laseru a vznikne datový soubor určený pro řídicí jednotku laserového řezacího stroje.

5.3 Výroba stínícího krytu

Závěrečný krok výroby stínícího krytu je jeho samotná fyzická realizace. Obsluha laseru obdrží pálicí plán, což je spolu s programem pro řezací stroj finální výstup po softwarovém zpracování. Z pálicího plánu je pro obsluhu zřejmé, o jakou jakost materiálu se jedná, jeho tloušťka a rozměry použité plechové tabule. Dále pálicí plán obsahuje informace o použitém řezném plynu a použitém průměru pálicí trysky. Správně použitý průměr pálicí trysky je důležitý, neboť určuje průchozí průměr pro řezný plyn a tím i jeho správný tlak působící v místě soustředěného laserového paprsku a vytvářející řeznou spáru.

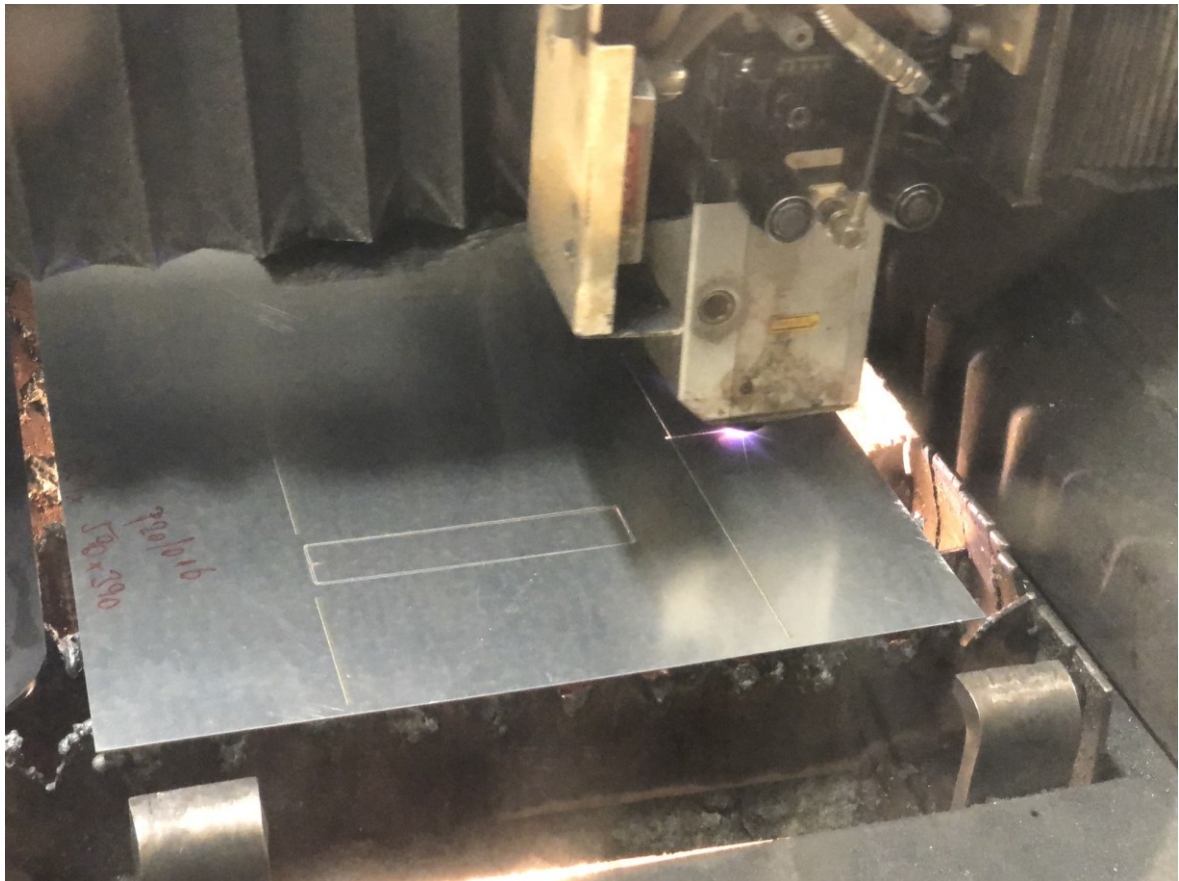
Materiál je uložený na výměnnou paletu a ta je přesunuta do operačního prostoru uvnitř stroje. Do řídicí jednotky stroje je načten program vytvořený programátorem a který s sebou nese data z pálicího plánu. V tuto chvíli je stroj připravený a má veškerá potřebná data, jako je tvar dílu, rozměry, tloušťka a jakost použitého materiálu, a hlavně konkrétní technologické tabulky, které určují správné zaostření optiky, výšku trysky nad materiálem, použitý výkon laserového paprsku, typ a tlak řezného plynu a rychlosti posunu portálu nesoucího řezací hlavu.



Obr. 22. Uložení materiálu v prostoru stroje [Vlastní zdroj]

Obsluha nyní nastaví pozici materiálu uvnitř stroje, aby bylo možné jeho správné zaměření a spustí samotný proces řezání.

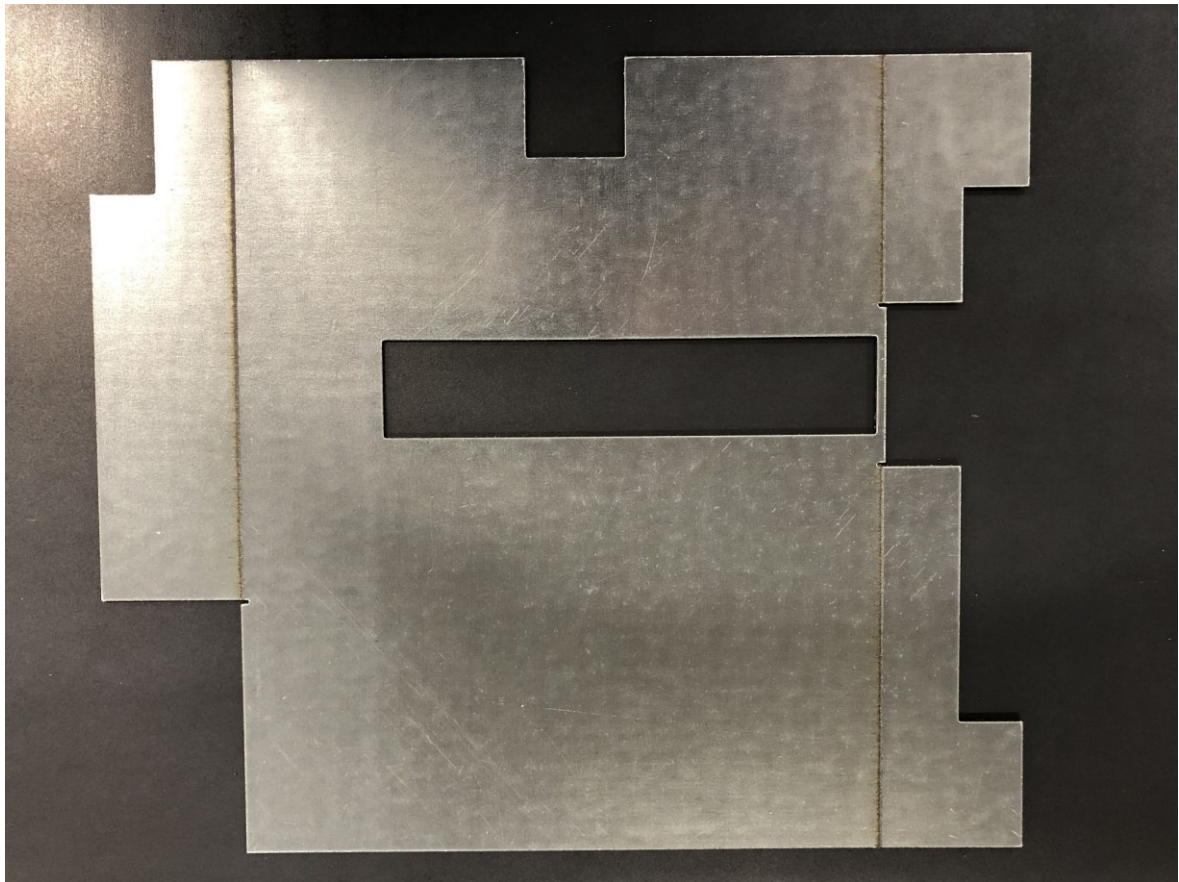
U zaměřování se využívá metody tří bodů pro určení správné polohy materiálu. První bod na jedné hraně materiálu zaměřuje pozici této hrany, další dva body na hraně kolmé k první zaměřené udávají její pozici a případný úhel uložení materiálu. Po tomto zaměření je znám nulový bod použitého materiálu a řezací stroj může zahájit samotný řezací proces. Jako první je nejčastěji zpracováno značení, takže v našem případě kontrolní osy ohybu. Další jsou vypáleny veškeré vnitřní kontury, otvory a jako poslední je zpracován venkovní obrys dílu. Protože během přípravy technologií jsme nastavili i zařezání materiálu, po dokončení všech plánovaných výpalů je materiál posledním řezem rozdělen na odpadní síť s hotovými výpaly a zbývající materiál, který je posléze uložen pro další zpracování.



Obr. 23. Probíhající pálicí proces [Vlastní zdroj]

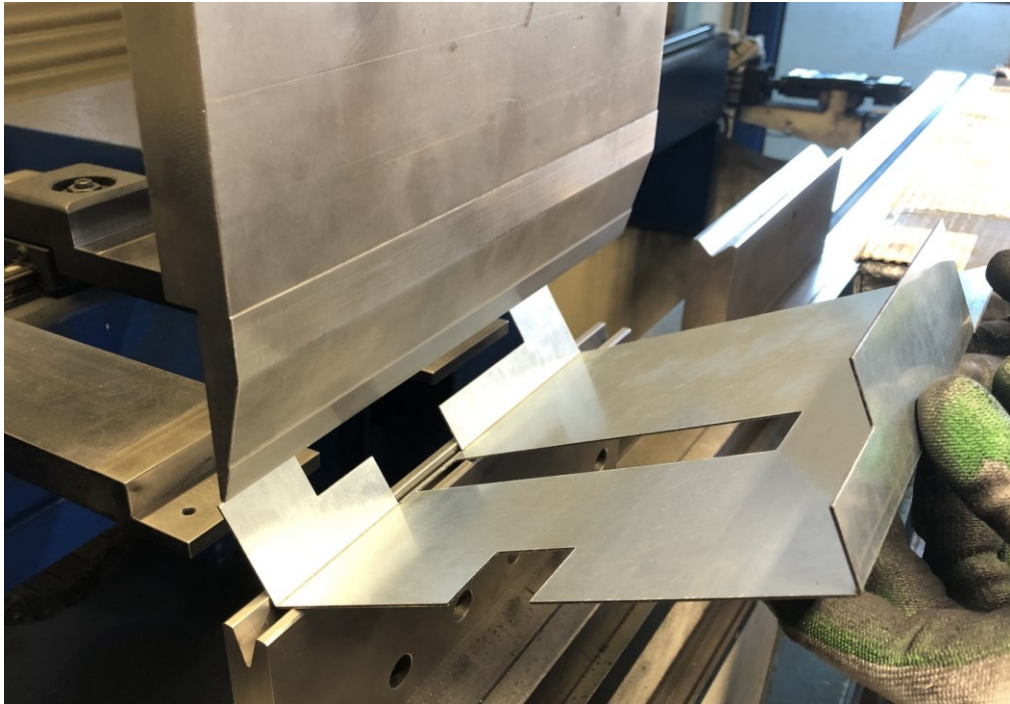
Po dokončení pálicího procesu je výměnná paleta s hotovými díly vyvezena ven z pracovního prostoru stroje, odpadní síť vyhozena, zbytkový materiál uložen do skladových prostor a hotový díl přesunut k dalšímu zpracování. Jestliže finální výpal není dokonale

vypálen a jsou na něm patrné otřepy vznikající při pálení, je nutné díl před ohraňením těchto otřepů zbavit za pomoci odjehlovacího stroje, nebo ručně pomocí pilníku.



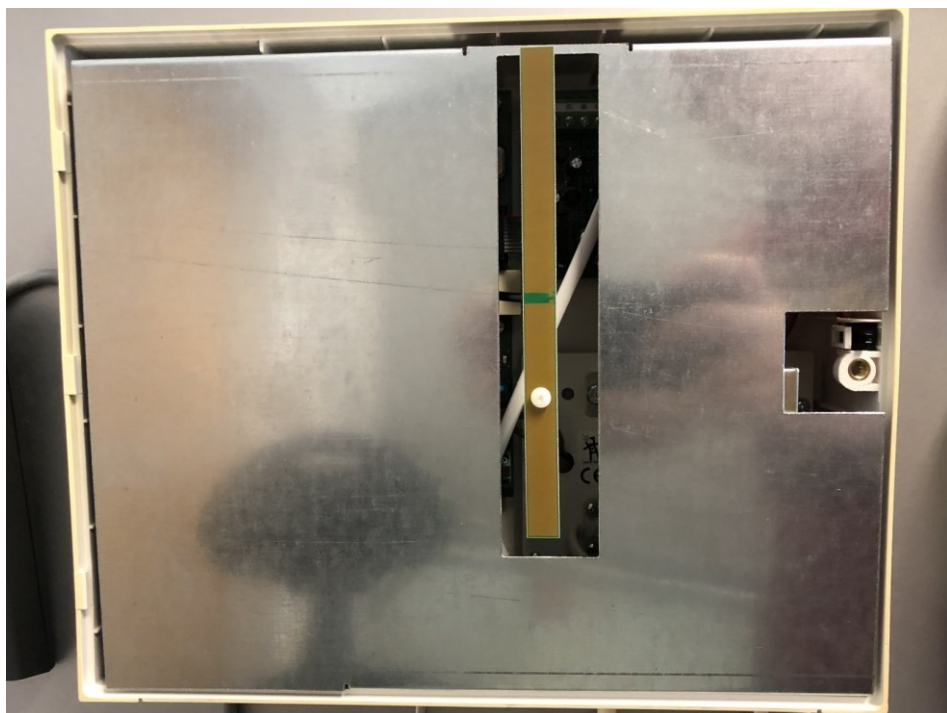
Obr. 24. Hotový díl [Vlastní zdroj]

Po kompletním očištění vypáleného dílu následuje ohraňení dílu na ohraňovacím lisu, dále jen OHL. Obsluha OHL na základě výkresové dokumentace vydané k danému dílu nastaví na stroji potřebné parametry jako je tloušťka materiálu, délka ohraňení a šířka dorazů, které se při ohraňování využívají, aby nebylo nutné veškeré ohybové osy na díl předem orýsovat. Jakmile je stroj nastavený, ohraňují se hrany postupně tak, jak si obsluha OHL nastavila. Při samotném ohraňování je nutná kontrola směru ohybu, aby výsledný výrobek neměl například potřebné výřezy na druhé straně v případě opačného ohybu.



Obr. 25. Ohraňení vypáleného dílu [Vlastní zdroj]

Jakmile je díl takto ohraňený, poslední součástí výroby je překontrolování jeho rozměrů za pomoci posuvného měřítka a úhloměru, aby bylo zajištěno, že rozměry hotového výrobku a ohnuté úhly korespondují s daty z výkresové dokumentace. Překontrolovaný výrobek je následně připraven k expedici nebo v našem případě nainstalovaný do skříně ústředny.



Obr. 26. Aplikace hotového stínícího krytu [Vlastní zdroj]

ZÁVĚR

Cílem předložené bakalářské práce bylo stručně objasnit základní principy vzniku laserového paprsku, popsat šíření vzniklého paprsku uvnitř laserových řezacích strojů, se zaměřením na značku laserů TRUMPF, vysvětlit základní techniky řezání materiálů u plynových laserů, jejich výhody a podmínky a objasnit základní problematiku EMC. Předložená práce měla za cíl praktické části vyrobit stínící kryt pro ústřednu a průběžně popsat a zdokumentovat krok po kroku celý tento výrobní proces od zaměření a návrhu až po aplikaci hotového stínícího krytu do skříně ústředny.

V teoretické části jsem nejprve zmínil historii laserového paprsku od jeho teoretického objevení A. Einsteinem přes první funkční realizovaný laserový generátor za pomoci rubínu až po zkonstruování prvního plynového laseru. Dále jsem popsal vznik a šíření laserového paprsku uvnitř laserových řezacích strojů značky TRUMPF.

Popsal jsem základní metody dělení materiálu, jejich výhody i nevýhody a podmínky, za kterých je možné tyto metody použít.

V kapitole o EMC jsem popsal obecně problematiku elektromagnetických polí a jejich vliv hlavně na elektronická zařízení, jež se staly běžnou součástí našich životů. Dále jsem popsal vlastnosti materiálů, které je možné řezat za pomoci laserového paprsku, a rozebral jednotlivá kritéria, která bylo nutné zohlednit pro výběr správného materiálu, ze kterého se následně v praktické části této práce stínící kryt vyráběl.

Praktická část popisuje a dokumentuje výrobní proces od zaměření a návrhu stínícího krytu, následně zpracování podkladů za pomoci softwarového vybavení dodávaného výrobcem stroje a poté kompletní výrobu za pomoci laserového řezacího stroje a ohraňovacího lisu.

Nutné nastudování materiálů okolo laserového paprsku a jeho vzniku, šíření uvnitř laserového stroje a podmínky, které je nutné splnit pro jednotlivé metody řezání materiálů, mi pomohlo lépe pochopit a proniknout do celé problematiky. Tyto nově nabyté poznatky mohu nyní aplikovat ve svém zaměstnání.

Stejně tak základní principy okolo EMC mi dovolily pochopit důležitost tohoto vědního oboru a potřebu správného návrhu elektronických zařízení a případně jejich dodatečné odstínění.

Technologie využívající laserového paprsku se budou jistě nadále rozšiřovat a zdokonalovat a v budoucnu bude jejich aplikace stále častější.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LASER A JEHO VYUŽITÍ. *Praotec Einstein* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k11.htm>
- [2] About Theodore Maiman. *LASER INVENTOR* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.laserinventor.com/bio.html>
- [3] Rubínový laser. In: *Princip laseru* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/obr/ruby.gif>
- [4] Kumar Patel. *Lemelson-MIT Program* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://lemelson.mit.edu/resources/kumar-patel>
- [5] Princip CO2 laseru. *Leonardo technology* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>
- [6] Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *MEGABLOG* [online]. 2013 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
- [7] CO2 Lasers. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/img/co2_laser.png
- [8] CARISTAN, Charles L. *Laser cutting guide for manufacturing*. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, c2004, 1 online zdroj (xx, 447 p.). ISBN 9781613449646. Dostupné také z: https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpLCGM0002/laser_cutting_guide_for_manufacturing
- [9] PODANÝ, Petr. *OPTIMALIZACE TECHNOLOGIE LASEROVÉHO DĚLENÍ TRUBEK SE ČTVERCOVÝM PRŮŘEZEM* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=174474. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
- [10] TruFlow rezonátor společnosti TRUMPF. In: *CO2 LASER TruFlow* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Processed/_processed_/d/a/csm_TruFlow-resonator_6d65fc4b9d_562e46a8e0.jpg

- [11] SILFVAST, William Thomas. *Laser fundamentals*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004, 1 online zdroj (xxiv, 642 p.). ISBN 9780521833455. Dostupné také z:
https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpLFE00011/laser_fundamentals_2nd_edition
- [12] HECHT, Jeff a. Laser. *Encyclopædia Britannica* [online]. 2020 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/laser/Fundamental-principles>
- [13] Stimulated emission in a laser cavity. In: *Encyclopædia Britannica* [online]. 2020 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://cdn.britannica.com/s:700x500/45/95645-004-32D0C70A/emission-laser-cavity.jpg>
- [14] TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH + CO. KG. *Návod k provozu TC L 3030, TC L 4030, TC L 6030*. 2005.
- [15] Laserové řezání. *TRUMPF* [online]. TRUMPF [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/
- [16] Proces laserového řezání. In: *TRUMPF* [online]. TRUMPF [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/_processed_/a/7/csm_TRUMPF-principle-lasercutting-graphic_ccf034ce0c.jpg
- [17] Tavné řezání. *TRUMPF* [online]. TRUMPF [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/tavne-rezani/
- [18] *Technik*. BUSINESS MEDIA CZ, 2014, **2014**(09).
- [19] Řezání plamenem. *TRUMPF* [online]. TRUMPF [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/rezani-plamenem/
- [20] Sublimační řezání. *TRUMPF* [online]. TRUMPF [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/sublimacni-rezani/
- [21] SENGUPTA, Dipak L. a Valdis V. LIEPA. *Applied electromagnetics and electromagnetic compatibility*. Hoboken, NJ: John Wiley, 2005, xxii, 486 s. Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN 0471165492.

- [22] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita* [online]. Brno, 2002 [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: https://home.pilsfree.net/fantom/FEL/EMC/EMC_skripta.pdf. Přednášky. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [23] DRÍNOVSKÝ, Jiří, Tomáš FRÝZA, Václav RŮŽEK a Jiří ZACHAR. *Elektromagnetická kompatibilita* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~drinovsky/?download=Skripta_EMC.pdf. Přednášky ver. 2017/10/06. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [24] MIKULČÁK, Jiří, Jura CHARVÁT, Martin MACHÁČEK a František ZEMÁNEK. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. Praha: Prometheus, 2003, 276 s. ISBN 8071962643.
- [25] Inventor|Software pro strojírenské návrhy a 3D CAD. *Autodesk* [online]. AUTODESK [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/inventor/overview>
- [26] Solidworks 3D CAD. *Solidworks* [online]. SOLIDWORKS [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-3d-cad>
- [27] TruTops Boost. *TRUMPF* [online]. TRUMPF [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/software/software-produkty/trutops-boost/
- [28] JA-80K "Oasis": *Ústředna systému - instalační manuál*. Dostupné také z: https://www.jablotron.com/cz/o-jablotronu/ke-stazeni/?filename=JK-80_CZ_inst_MKE51001.pdf&do=downloadFile

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CAD Computer aided design

CAM Computer aided manufacturing

CO₂ Oxid uhličitý

mm Milimetr

ZnSe Zinek-selenidové

DXF Drawing Exchange Format

Hz Hertz

kHz Kilo hertz

EMC Electromagnetic Compatibility, přeloženo jako elektromagnetická kompatibilita

EMI Electromagnetic interference, přeloženo jako elektromagnetické rušení

EMS Electromagnetic susceptibility, přeloženo jako elektromagnetická odolnost

OHL Ohraňovací lis

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Rubínový laser [3]</i>	11
<i>Obr. 2. Schéma plynového laseru s hermeticky uzavřenou trubicí, chlazenou vodou [7]</i> ...	12
<i>Obr. 3. Rezonátor CO₂ laseru společnosti TRUMPF [10]</i>	13
<i>Obr. 4. Stimulovaná emise v laserové dutině [13]</i>	14
<i>Obr. 5. Dráha paprsku v rezonátoru [14]</i>	16
<i>Obr. 6. Vedení paprsku systémem TFL 2000,2700,3200 [14]</i>	17
<i>Obr. 7. Vedení paprsku systémem TFL 4000 [14]</i>	19
<i>Obr. 8. Řezací hlava, horní a čelní pohled [14]</i>	20
<i>Obr. 9. Proces laserového řezání [16]</i>	21
<i>Obr. 10. Ukázka řezu oxidační metodou [Vlastní zdroj]</i>	23
<i>Obr. 11. Technické parametry ústředny JA-80K [28]</i>	31
<i>Obr. 12. Fotografie ústředny Jablotron JA-80K [Vlastní zdroj]</i>	31
<i>Obr. 13. Náčrt čelní stěny krytu [Vlastní zdroj]</i>	32
<i>Obr. 14. Aplikace obrub na čelní stěnu krytu [Vlastní zdroj]</i>	32
<i>Obr. 15. Odstranění kolidujících částí obrub [Vlastní zdroj]</i>	33
<i>Obr. 16. Rozvinutý tvar stínícího krytu [Vlastní zdroj]</i>	33
<i>Obr. 17. TruTops CAD, příprava řezané kontury [Vlastní zdroj]</i>	34
<i>Obr. 18. TruTops CAD, uložení vlastností materiálu [Vlastní zdroj]</i>	35
<i>Obr. 19. TruTops NEST, vložení dílu do plechové tabule [Vlastní zdroj]</i>	36
<i>Obr. 20. TruTops LASER, výběr technologických tabulek [Vlastní zdroj]</i>	37
<i>Obr. 21. TruTops LASER, základní technologie [Vlastní zdroj]</i>	37
<i>Obr. 22. Uložení materiálu v prostoru stroje [Vlastní zdroj]</i>	39
<i>Obr. 23. Probíhající pálicí proces [Vlastní zdroj]</i>	40
<i>Obr. 24. Hotový díl [Vlastní zdroj]</i>	41
<i>Obr. 25. Ohranění vypáleného dílu [Vlastní zdroj]</i>	42
<i>Obr. 26. Aplikace hotového stínícího krytu [Vlastní zdroj]</i>	42

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Porovnání cen materiálů [Vlastní zdroj].....</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 2. Porovnání měrného el. odporu materiálů [24].....</i>	<i>27</i>

