

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 POROVNÁNÍ NE- KONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ AWJ A LBM Z HLEDISKA POTŘEB FIRMY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. JAN MALÁT

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MARTIN SLANÝ

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Malát

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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 diplomové práce:

Technicko-ekonomické porovnání nekonvenčních technologií AWJ a LBM z hlediska potřeb firmy

v anglickém jazyce:

Cost-effect and technical comparison of nonconventional technologies AWJ and LBM with the view of needs of a company

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zaměřena na srovnání nekonvenčních metod obrábění z hlediska kvality, mechanických a chemických vlastností nově vzniklého povrchu v místě řezu. Bude provedeno zhodnocení technických a ekonomických kritérií na základě požadavků zvolené firmy.

Cíle diplomové práce:

Student by se měl blíže seznámit s oblastí nekonvenčních technologií a na základě provedených měření a výpočtů vytvořit práci, která poslouží zvolené firmě jako podklad pro volbu nového strojního vybavení na základě stanovených kritérií, týkajících se zejména kvality, mechanických a chemických vlastností povrchu a časové náročnosti výroby u zvoleného testovacího dílu.

Seznam odborné literatury:

VALÍČEK, J; HLOCH, S. Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením. 1. vydání. Ostrava : ÁMOS Mgr. Zdeňka Pustinová, 2008. 128 s. ISBN 978-80-254-3588-5

KRAJNÝ, Z. Vodný lúč v praxi. Bratislava : Miroslav Mračko, 1998. 384 s. ISBN 80-8057-091-4

MAŇKOVÁ, I. Progresívne technológie. Košice : Technická univerzita Košice, Strojnícka fakulta - edícia vedeckej a odbornej literatúry, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4

HLAVÁČEK, P. Měření textury povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením jemnozrnných materiálů. Ostrava, 2009. 61 s. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní

BUMBÁLEK, B.; ODVODY, V.; OŠŤÁDAL, B. Drsnost povrchu. 1. vydání. Praha : SNTL, 1989. 340 s. typ. č.: L13-B2-IV-41/22881

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Slaný

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 25.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Předkládaná studie pojednává o technologiích nekonvenčního dělení materiálu se zaměřením na dělení abrazivním vodním paprskem a CO₂ laserem. Práce je rozdělena na část teoretickou a experimentální. Teoretická část popisuje principy a funkce nekonvenčních technologií, jejich základní dělení a praktické využití. Experimentální část je zaměřena na výběr nejvhodnější technologie pomocí výroby vzorků a jejich následnou komparací. Z porovnání dosažených výsledků je následně doporučen výrobce technologie a stroj, který nejlépe plní dané požadavky.

Klíčová slova

Nekonvenční technologie, dělení materiálu, abrazivní vodní paprsek, laserové řezání, pevnolátkový laser, plazma, drátové řezání.

ABSTRACT

This study deals with unconventional materials cutting technology with a focus on abrasive water jet cutting and CO₂ laser. The thesis is divided into theoretical and experimental section. The theoretical part describes principles and functions of nonconventional technologies, the basic division and practical applications. The practical part is focused on choosing the best technology with the production of samples and their subsequent comparison. The thesis recommends producer and type of the machine which best meets requirements on basis of the test results.

Key words

Unconventional technologies, cutting materials, abrasive water jet, laser cutting, fiber laser, plasma, wire cutting.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MALÁT, Jan. Technicko-ekonomické porovnání nekonvenčních technologií AWJ a LBM z hlediska potřeb firmy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. s. 70, přílohy 3. Vedoucí práce: Ing Martin Slaný

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma.....
vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených
na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Martinu Slanému za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce a firmě DK-Styl Ústí nad Orlicí za podporu a spolupráci při vypracování praktické části této práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 Základní pojmy pro nekonvenční metody obrábění.....	10
1.1 Základní druhy nekonvenčních metod.....	10
1.2 Rozhodovací proces pro výběr vhodné technologie.....	11
2 Rozdělení metod nekonvenčního obrábění.....	13
2.1 Obrábění paprskem laseru.....	13
2.1.1 Pevnolátkové lasery.....	14
2.1.2 Kapalinové lasery.....	16
2.1.3 Plynové lasery.....	16
2.1.4 Polovodičové lasery.....	18
2.2 Elektroerozivní obrábění.....	18
2.3 Obrábění paprskem elektronů.....	19
2.4 Obrábění paprskem plazmy.....	21
2.5 Ultrazvukové obrábění.....	23
2.6 Obrábění vodním paprskem.....	24
2.7 Elektrochemické obrábění.....	27
2.8 Chemické obrábění.....	28
3 Požadavky firmy na novou technologii.....	30
3.1 Hlavní úkol studie.....	30
4 Volba vzorku.....	31
4.1 Volba tvaru vzorku.....	31
4.2 Použitý materiál.....	32
4.3 Měření tvarové a rozměrové přesnosti.....	32
5 Výroba vzorku.....	34
5.1 Řezání vodním paprskem.....	34
5.1.1 Použitý stroj.....	34
5.1.2 Výrobní aspekty.....	35
5.1.3 Hodnocení rozměrové přesnosti.....	35
5.1.4 Hodnocení obrobeného povrchu.....	38
5.2 Řezání CO ₂ laserem.....	39
5.2.1 Použitý stroj.....	39
5.2.2 Výrobní aspekty.....	40
5.2.3 Hodnocení rozměrové přesnosti.....	40
5.2.1 Hodnocení obrobeného povrchu.....	43
5.3 Elektroerozivní obrábění.....	44
5.3.1 Použitý stroj.....	44
5.3.2 Výrobní aspekty.....	45
5.3.3 Hodnocení rozměrové přesnosti.....	45
5.3.4 Hodnocení obrobeného povrchu.....	47
5.4 Řezání pevnolátkovým laserem.....	48
5.4.1 Pevnolátkový stroj (Fiber).....	48
5.5 Řezání plazmou.....	49

6	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	50
6.1	Zhodnocení parametrů	50
6.2	Náklady na provoz stroje a jeho údržbu	52
6.3	Celkové zhodnocení	56
7	Výběr vhodného CO ₂ laseru	57
7.1	Provoz a výroba laserového centra	57
7.1.1	Výrobní plán	57
7.1.2	Umístění laserového centra	57
7.1.3	Průzkum trhu výrobců laserových systémů	58
7.2	Výběr stroje	58
7.2.1	TRUMPF	59
7.2.2	Bystronic	61
7.2.3	Odjehlovací stroj	62
7.3	Závěrečné zhodnocení	64
	Závěr.....	65
	Seznam použitých zdrojů	66
	Seznam použitých zkratk a symbolů	69
	Seznam příloh.....	70

ÚVOD

Cílem diplomové práce je na základě analýzy dostupných dat navrhnout firmě do jaké technologie a do jakého stroje by měla investovat, aby co nejdříve došlo k návratnosti finančních prostředků a k ziskovosti nové technologie.

Hlavními důvody stále častějšího zavádění nekonvenčních technologií do průmyslové výroby jsou rostoucí počet těžkoobrobitelných materiálů a dílců s nepravidelnými tvary, které kladou nároky na tvarovou složitost a rozměrovou přesnost. Těmto požadavkům jsou podřízeny metody řezání materiálu.

Proces dělení materiálu musí být velmi intenzivní a uživatel vyžaduje možnost strojem flexibilně zpracovávat nejrůznější dílce, a to i v malých dávkách. Proto musí řezací zařízení umožňovat použití velmi širokého spektra způsobů zpracování. Kromě toho musí stroj uživateli zaručovat vysokou bezpečnost procesu. Je také důležitá dostatečně velká řezná mezera, aby mohly být součásti spolehlivě odděleny.

Nejčastěji používaným strojem k dělení materiálu je CO₂ laser, který splňuje mnoho požadavků na, řezání různých druhů materiálů a na kvalitní a výkonnou výrobu. Mohlo by se zdát, že kdo chce být při dělení materiálů nekonvenčními metodami flexibilní, použije například CO₂ laser. Tak jednoduché to přece jen není. Naskýtají se také další metody jako abrazivní vodní paprsek, plazmové a elektroerozivní obrábění, řezání různými laserovými paprsky apod. Význam dalších technologií především pevnolátkových a diodových laserů bude u flexibilního zpracování dílců vzrůstat. A to nejen u řezání, ale také u svařování.

V blízké budoucnosti pravděpodobně nebude existovat nová technologie, která nahradí ostatní metody dělení materiálu. I v budoucnu bude používána široká paleta různých technologií, které se budou navzájem doplňovat. A k výběru správné technologie se bude muset nadále přistupovat s kompromisem. Klíčová technologie blízké budoucnosti je nepochybně dioda. Diodou čerpaný pevnolátkový laser nebo přímý diodový laser budou hrát stále důležitější roli v efektivním dělení materiálu.

1 ZÁKLADNÍ POJMY PRO NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Nekonvenční (progresivní) metody obrábění (dále jen NMO), zaznamenaly rychlý rozvoj v druhé polovině 20. století stejně jako počítačová technika, kvantová elektronika, nové druhy konstrukčních materiálů a jejich zpracování.

NMO jsou založeny na využití fyzikálního, chemického nebo mechanického principu úběru materiálu. Jedná se většinou o působení bez mechanické síly na obráběný materiál, bez vzniku třísek, které známe z obrábění řeznými nástroji^[1].

Rozhodující vlastnosti obráběného materiálu pro tyto metody jsou především fyzikální a chemické (elektrická a tepelná vodivost, odolnost proti elektrické a chemické korozi, teplota tavení aj.) Proto je možné obrábět širokou škálu materiálů (kalené a žáruvzdorné oceli, titanové slitiny, keramika, kompozitové materiály, fólie, papír apod.).

Progresivita těchto metod spočívá především na: ^[2]

- rostoucím podílu těžkoobrobitelných materiálů (žáropevných a žáruvzdorných ocelí, kalených ocelí a litin, keramických materiálů, slinitých kovů, titanových slitin, kompozitních materiálů),
- možnosti opracování i nepravidelných tvarů (vnějších i vnitřních),
- zvyšujících se nároků na tvarovou složitost a rozměrovou přesnost součástí, zejména nástrojů, forem a zápuštěk
- miniaturizaci součástí (lékařský průmysl, řídicí a regulační prvky)
- vhodnost využití v automatizovaných provozech, využití CAD/CAM systémů

1.1 Základní druhy nekonvenčních metod^[3]

Podle převládajících účinků NMO lze rozdělit oddělování materiálu do tří základních skupin

a. Dělení materiálu tepelným účinkem:

- **obrábění paprskem laseru** (LBM – Laser Beam Machining),
- **elektroerozivní obrábění** (EDM – Electro Discharge Machining),
- **obrábění paprskem elektronů** (EBM – Electron Beam Machining),
- **obrábění paprskem plazmy** (PBM – Plasma Beam Machining),

b. Dělení materiálu mechanickým účinkem

- **ultrazvukové obrábění** (USM – Ultrasoni Machining)
- **obrábění vodním paprskem** (WJM – Water Jet Machining)

c. Dělení materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem

- **elektrochemické obrábění** (ECM – Electro Chemical Machining)
- **chemické obrábění** (CM – Chemical Machining)
- **fotochemické obrábění** (PCM – Photo Chemical Machining)

1.2 Rozhodovací proces pro výběr vhodné technologie^[4]

Proces rozhodování výběru správné technologie je naprosto zásadní pro správný chod a ekonomičnost výroby. V současné době je zavádění nových metod spojené s vysokými finančními náklady, nejenom na nákup zařízení, ale i na realizaci technologie. Je proto nutné řídit se při zavádění nových technologií určitými kritérii rozhodování.

Kritéria pro výběr progresivní technologie berou v úvahu údaje o výrobku, požadované kvalitě povrchu, hospodárnosti výroby a provozní požadavky.

Tab. 1.1 Kritéria pro výběr technologie^[4].

Obrobek	tvar, rozměry, druh materiálu, citlivost na tlak, řezné síly, teplota, odolnost proti korozi
Kvalita povrchu	přesnost tvaru a rozměrové tolerance, integrita povrchu, reprodukovatelnost
Hospodárnost	doba přípravy, výrobní čas, kapitálové náklady, provozní náklady, (vratné náklady na personál, nástroje, údržbu a běžné výdaje)
Provozní požadavky	lidské zdroje: vzdělání, zručnost, bezpečnost, pracovní podmínky, životní prostředí organizační: flexibilita, předpoklady pro automatizaci a integraci do automatizovaných výrobních systémů

Rozhodování při výběru správné technologie musí být založeno na výše uvedených kritériích, ale také musí splňovat další požadavky jako:

- Co stojí technologie tj. ekonomické aspekty výroby a hospodářské ukazatele technologie.
- Co může technologie tj. hledisko charakterizované kvalitativními ukazateli vstupů a výstupů.
- Co dokáže technologie tj. výkonové ukazatele technologie
- Dostupnost technologie tj. zdroje informací o stavu vývoje, výroby a dodavatelích zařízení a technologie.

Tab. 1.2 Kritéria pro výběr technologie^[4]

Informační požadavky na rozhodovací proces			
Ekonomické aspekty (kolik stojí)	Oblast použití (co může)	Popis procesů	Zdroj informací
kapitálové náklady výrobní náklady provozní náklady	tvár dílce druh materiálu přesnost a tolerance výrobní čas	Parametry procesu Přednosti procesu Nedostatky procesu Úpravy povrchu Dokončování povrchu	Vývoj Výrobci Leasing pronájem

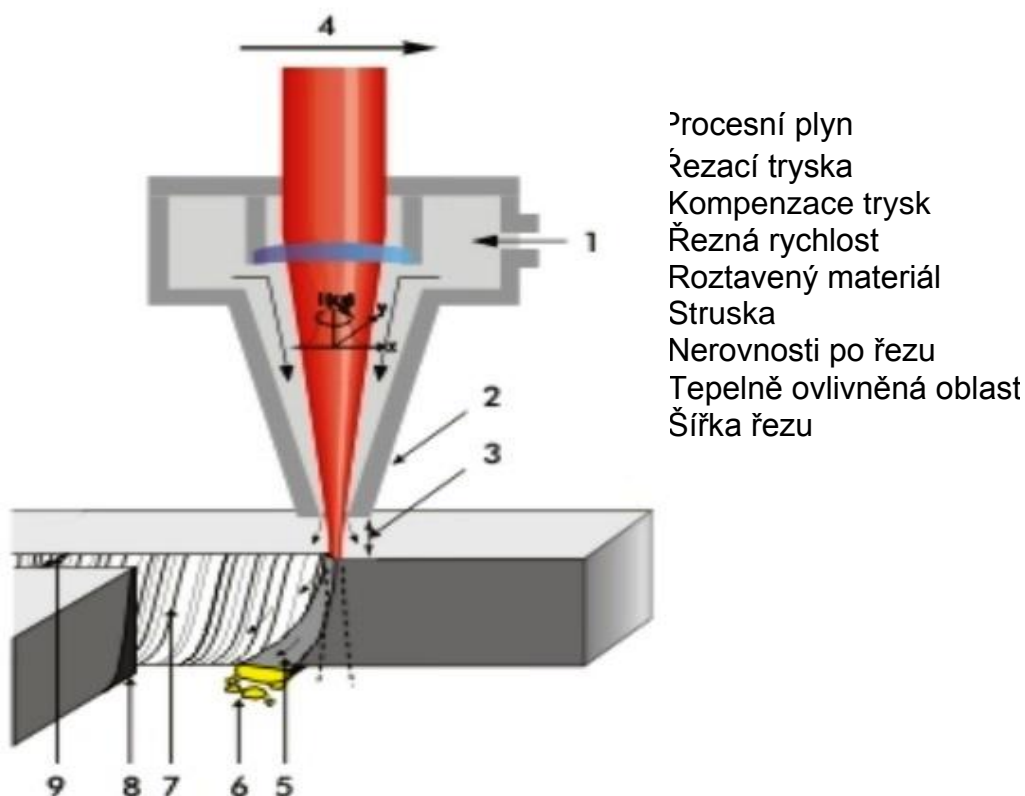
Je také důležité si uvědomit, že rok od roku se věnuje více pozornosti těmto progresivním (nekonvenčním) procesům. Jako důkaz je zvyšující se množství technických článků, konferencí, knih, vědeckých a technických symposií. Tyto aktivity nejen učí odbornou veřejnost a ukazují jedinečné možnosti těchto procesů, ale také zabezpečují úspěšnou budoucnost pro tyto způsoby opracování materiálů ^[4].

2 ROZDĚLENÍ METOD NEKONVENČNÍHO OBRÁBĚNÍ

2.1 Obrábění paprskem laseru

Laserové řezání je technologie tepelného dělení materiálu, působením úzkého paprsku silného monochromatického světla, které je soustředěno na velmi malou plochu. Tuto technologii je již dnes díky masivnímu rozšíření možné označit slovem standardní. Strojírenská výroba, zpracovávající plechy se již dnes bez laserového řezání neobejde. Řezání laserem je vhodné pro všechny typy konstrukčních materiálů s omezením jejich tloušťky. Laser je schopen dělit nelegovanou ocel do tloušťky cca 25 mm, korozivzdornou ocel a slitiny hliníku do tloušťky cca 15 mm. Výhodou je velká rychlost řezání, prakticky nulové deformace plechů a vynikající kvalita řezu, nevýhodou snad jen vysoké investiční náklady. ^[17,18]

S řezacími lasery se můžeme setkat jak přímo ve firmách, vyrábějících vlastní finální výrobky, tak ve specializovaných subdodavatelských společnostech, dodávajících laserové výpalky k dalšímu zpracování jako polotovary. Bezpochyby nejrozšířenějším typem průmyslového řezacího laseru jsou CO₂ systémy, pracující s vlnovou délkou 10.640 nm^[18].



Obr. 2.1 Princip laserového řezání ^[19]

Technologie tepelného dělení materiálu laserem je podobně jako většina laserových procesů založena na vysoké hustotě výkonu, produkovaného laserovým zařízením. Díky tomu dochází po dopadu svazku na materiál k jeho prudkému ohřevu, natavení a odpaření. Vytváření řezné spáry se uskutečnu-

je pomocí spalování materiálu, jeho odtavení a následné vyfouknutí z místa řezu, při tomto procesu se také část materiálu odpaří. Na tomto základě pracují všechny řezací lasery. Pro odstraňování taveniny, oxidů a výparů se používá asistenčních plynů, které jsou foukány do místa řezu tryskou, jejímž středem zároveň prochází zaostřený laserový svazek (obr. 1). Jako asistenční (řezací) plyn se používá kyslík nebo dusík, případně u speciálních materiálů argon. ^[18]

Lasery lze rozdělit dle trvání výstupního záření na:

- impulsní,
- trvale svítící.

Nebo také dle skupenství aktivního prostředí na:

- pevnolátkové, (Nd:YAG, Er:YAG, Alexandritový)
- kapalinové,
- plynové, (CO₂, N₂, He, označované jako CO₂ lasery)
- polovodičové.

Tab. 2.1 Srovnání parametrů jednotlivých typů laserů ^[13]

Vlastnosti	CO ₂ laser	Nd: YAG laser	Výkonný polovodičový laser
Délka vlny [μm]	10,6	1,06	0,3 ÷ 30
Účinnost [%]	10 ÷ 15	3 ÷ 8	30 ÷ 50
Velikost pracovní hlavy laseru [dm ³]	10	10	1
Střední výstupní výkon [kW]	do 30	do 4	do 2
Střední intenzita zaostření paprsku [W · cm ⁻¹]	10 ⁶ ÷ 10 ³⁰	10 ⁵ ÷ 10 ⁹	10 ³ ÷ 10 ⁵
Interval údržby [h]	1 000	500	2000 ÷ 10 000

2.1.1 Pevnolátkové lasery^[7]

Aktivním prostředím v pevnolátkovém laseru je pevná opticky propustná látka např. krystaly, oxidy, granáty, fluoridy a další. Tyto lasery jsou schopny pracovat v mnoha režimech a jsou velmi flexibilní. Nesporná výhoda pevnolátkových laserů oproti jiným typům spočívá v robustnosti, stabilitě a v malých nárocích na údržbu a provozních podmínkách.

Nejrozšířenějším a dnes asi nejlépe technicky zvládnutým pevnolátkovým laserem je laser označovaný jako Nd:YAG. Tento laser našel uplatnění jak v průmyslu, tak v medicíně a vědě. Dalšími představiteli pevnolátkových laserů jsou Fiber lasery používané pro řezání a gravírování, Alexandritový a Er:YAG lasery, které jsou používané především v medicíně.

Pevnolátkové lasery jsou používány především pro řezy s menší šířkou rezné spáry. Pro řezání konstrukční oceli do tloušťky 6 mm, korozivzdorné oceli do tloušťky 3 mm a slitin hliníku do tloušťky 2 mm se používají Nd:YAG lasery o výkonu 100 až 1000 W.

Nd:YAG laser

Aktivním prostředím toho laseru je krystal yttriumaluminumgranát dopovaný neodymem. Pracuje jak v pulzním tak i v kontinuálním režimu. Dosahuje výkonu 100 až 4 000 W. Paprsek pevnolátkových laserů má vlnovou délku 1,06 μm . Záření u Nd:YAG laseru lze jednoduše přenášet optickými vlákny na vzdálenost několika desítek metrů. Nevýhodou tohoto laseru je poměrně nízká účinnost 2 až 3 %, značný elektrický příkon výkonových systémů a s tím spojená nutnost vodního chlazení systému. Uvedené nedostatky se v dnešní době pokouší odstranit několik výrobců nahrazením výbojkového čerpání, čerpáním polovodičovými diodami. Ovšem velmi vysoká cena vysokovýkonových polovodičových laserových diod prozatím brzdí rozšíření těchto laserových systémů.

V lékařství se používá kontinuální Nd:YAG laser jako skalpel (v chirurgii) a pulzní Nd:YAG laser především v oční mikrochirurgii. Je vhodný pro vrtání, svařování, řezání a žihání.

Tab. 2.2 Srovnání parametrů Nd:YAG laseru a CO₂ laseru ^[4]

Parametry	Nd: YAG laser	CO ₂ laser
Aktivní médium	YAG krystal	Plyn CO ₂
Řízení pohybu paprsku	Flexibilně přes čočky, zrcadla, optická vlákna	Odrazová zrcadla, pevné čočky
Max. hustota toku energie [W/cm ²]	10 ⁹	10 ⁷
Průměr paprsku [μm]	15	100
Šířka řezu [μm]	30	2000
Elektrická účinnost [%]	3 – 6	8 - 10
Střední výkon paprsku [W]	20 – 6 000	50 – 50 000
Kvalita paprsku	Slábne při vysokém výkonu	optimální
Přesnost	Vysoká	střední
Vhodnost použití	Vrtání, svařování, řezání, tepelné zpracování	Řezání, svařování, tepelné zpracování, povrchové úpravy

FIBER laser ^[27]

Vláknové nebo také „fiber lasery“ jsou nejnovějším typem laseru, které se začaly používat pro aplikace laserového značení, gravírování a řezání. Za svůj název vděčí optickému vláknu, jelikož vlákno je aktivním prostředím a zároveň tvoří vlastní laser. V řadě aplikací vláknové lasery nahradily (díky svým vlastnostem) stávající technologii Nd: YAG laserů a staly se tak velmi atraktivním rozšířením v nabídce laserových technologií.

Jako aktivní prostředí je použito ytterbiové optické vlákno. Vlákno slouží nejen jako aktivní prostředí (zesilovač), ale zároveň tvoří i vlastní rezonátor (zrcadla – Braggovy mřížky jsou součástí vlákna). Energie je do vlákna čerpána opticky pomocí sady polovodičových diod. Diody typicky pracují na vlnových délkách 960 nm a jsou přímo navázány na optická vlákna. Tato vlák-

na jsou pomocí vláknového slučovače napojena do aktivního prostředí (ytterbiového vlákna).

Vláknové lasery se vyznačují vysokou účinností, proto mají nízký příkon a běžně se chladí pouze vzduchem. Vysoká kvalita svazku se dosahuje soustředěním (fokusací) do velmi malého průměru.

2.1.2 Kapalinové lasery^[7, 21]

Jako aktivní prostředí u kapalinových laserů jsou převážně buzené roztoky organických barviv. Pomocí několika barviv a využitím metod nelineární optiky lze tak prakticky spojitě pokrýt pásmo vlnových délek od 300 nm do 1500 nm. Jako budící zdroje se používají speciální výbojky, argonový laser nebo dusíkový laser. Kapalinová barviva umožňují generovat záření v oblasti viditelného i neviditelného spektra tedy v rozmezí (400 – 700 nm).

Typickým představitelem kapalinového laseru je rhodamonový laser, generující pulzní záření. Podstatnou nevýhodou těchto laserů je toxicita a nepříliš dlouhá životnost aktivního prostředí, které se účinkem tepla a světla rozkládá. Ve většině případů dochází k jejich nahrazování přeladitelnými pevnolátkovými lasery. Výhoda kapalinových laserů spočívá především v jejich laditelnosti a plynulé změně vlnové délky laserového záření.

Nejčastější využití nachází kapalinový laser ve spektroskopii a informační technice.

2.1.3 Plynové lasery

Aktivní prostředí plynových laserů tvoří atomy (He-Ne-laser), ionty (Ar-laser), molekuly (CO₂-laser) či jejich směsi v plynné fázi, přičemž inverze obsazení nastává mezi energetickými hladinami některé složky. Plynové lasery pracují převážně v kontinuálním režimu, ale existují i výkonné pulzní systémy.

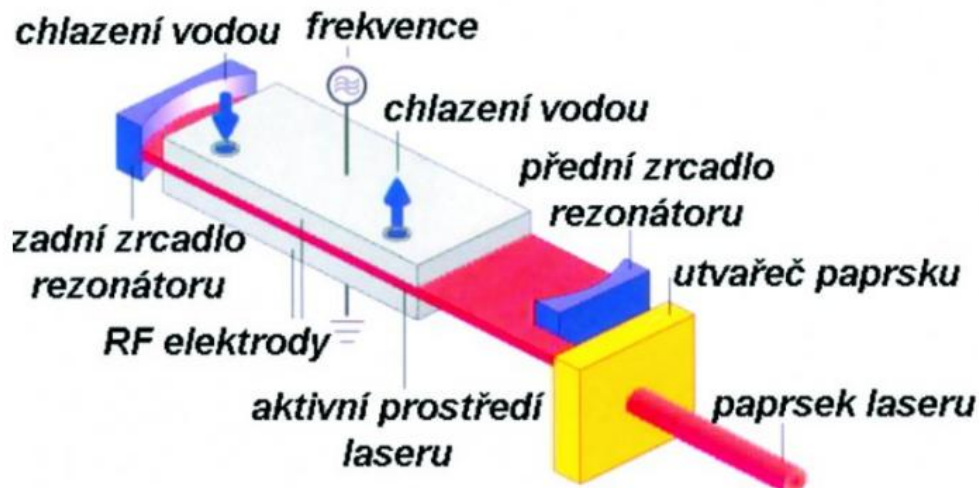
K nejčastějším typům buzení patří:

- elektrickým výbojem ve zředěném plynu,
- příčné buzení elektrickým výbojem za vysokých tlaků (TEA CO₂-laser)
- elektronovým svazkem
- chemickou reakcí či expanzí horkého plynu^[7]

Šíření laserového svazku

Koncepce šíření laserového svazku v CO₂ laserů jsou v zásadě dvě. První systém s pevnou optikou je založen na pohybujícím se stole s řezaným materiálem, přičemž laserová hlava se pohybuje pouze ve svislé ose z. Tento způsob má velkou přednost v konstantní délce optické dráhy a stacionárních zrcadlech. Toto uspořádání napomáhá k zachování konstantního průměru svazku v průběhu celé technologické operace, což přispívá ke stálosti nastavených parametrů. Nevýhodou ale je nutnost pohybu obrobku, což při objemnějších dílech, a tudíž velkých setrvačných silách, extrémně zvyšuje nároky na zařízení. Další variantou je tzv. mobilní optika, kdy je tabule plechu stacionární a 3D pohyb zajišťuje laserová hlava. Toto řešení je využíváno některými i renomovanými výrobci laserových řezacích strojů. Nevýhodou je proměnlivá délka dráhy paprsku a pohyb odrazných zrcadel, v důsledku čehož

hož lze často pozorovat jiné parametry paprsku v různých místech pracovního prostoru laseru. Dobrým a v praxi také používaným kompromisem mezi oběma variantami je případ kombinace těchto možností, kdy pohyb plechu v jedné ose zajišťuje posuvný stůl, pohyb v dalších dvou osách je zajištěn řezací hlavou.^[18]



Obr. 2.2 Konstrukce CO₂ laseru^[21]

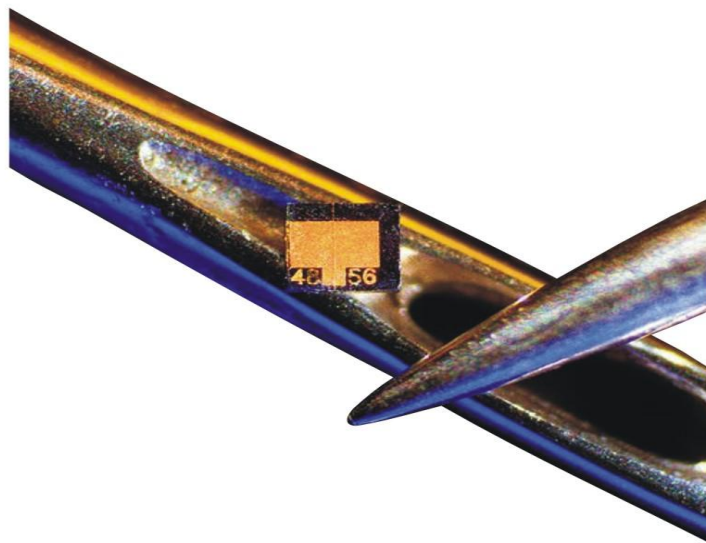
Plyny a jejich využití

Užití kyslíku jako řezacího plynu je výhodné především pro napomáhání spalování při vytváření řezné spáry což zvyšuje efektivitu řezacího procesu. V praxi se kyslík používá pro řezání nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. U vysokolegovaných ocelí způsobuje kyslík vznik těžko odstranitelné strusky v oblasti řezných hran. Řezání slitin hliníku kyslíkem přináší o cca 25 – 30 % vyšší rychlost než dusík, naproti tomu ovšem stojí snížená kvalita řezu (oxidy na hraně řezu, vysoká drsnost, snížená svařitelnost, zhoršení mechanických vlastností). Pro laserové řezání kyslíkem se nastavují tlaky od 0,5 do 4 bar podle řezané tloušťky materiálu.

Pro řezání vysokolegovaných ocelí a slitin hliníku je vhodné nasazení dusíku. Oproti kyslíku je snížena rychlost řezání a maximální řezatelná tloušťka, což lze částečně kompenzovat zvýšením tlaku asistenčního plynu. Řezné hrany jsou prosté oxidů a strusky a jsou kovově lesklé. Dusík slouží jako asistenční plyn rovněž pro řezání plastů, textilií, keramiky, dřeva a papíru. V současnosti vyráběné lasery běžně pracují v režimu vysokotlakého řezání, tzn. je vyžadován tlak dusíku na trysce od cca 7 až do 20 bar. Argon jako inertní plyn je poměrně drahý, takže se využívá výhradně pro řezání vysoce reaktivních materiálů jako je titan a jeho slitiny, kdy není možné z metalurgických důvodů použití kyslíku ani dusíku. Je známo, že podstatnou úlohu sehrává rovněž čistota asistenčního plynu. Pro laserové řezání konstrukčních uhlíkových ocelí je vyžadován kyslík o čistotě 3,5 (99,95 %), přičemž běžně používaný tzv. technický kyslík má čistotu 2,5 (99,5 %). Vyšší čistota kyslíku přináší vyšší kvalitu řezu a možnost zvýšení řezné rychlosti (obr. 3). V případě dusíku je optimální čistota 5,0 (99,9990 %).^[18]

2.1.4 Polovodičové lasery^[7]

Polovodičové lasery jsou dnes vůbec nejrozšířenější lasery. Často se pro ně používá označení laserová dioda. Od ostatních laserů se liší tím, že nepracují s přechodem elektronů mezi diskretními hladinami, nýbrž se u nich vyskytují elektronové přechody mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. Tyto lasery mají velmi malé rozměry, což má za následek větší rozbíhavost výstupního svazku oproti jiným laserům. Polovodičové lasery se vyznačují vysokou účinností (běžně až 50%). Nalézají uplatnění především v telekomunikacích a ve výpočetní technice.



Obr. 2.3 Samotný čip laserové diody na oušku jehly^[22]

Funkce laserové diody je stejně jako funkce ostatních laserů založena na procesu stimulované emise. Aktivním prostředím je zde okolí PN přechodu, kde dochází k injekci elektronů a děr.

Laserové diody mají jakožto nejběžnější zástupce laserů široké uplatnění v mnoha odvětvích. Jejich úspěch spočívá především v nízkých nákladech na výrobu, možnosti použití v integrovaných obvodech, telekomunikacích a optických vlnovodech. Jejich použití je také v drahých přístrojích používaných k měření vzdálenosti družic od Země. Vysokovýkonné laserové diody se uplatňují v průmyslových oblastech k řezání, obrábění, svařování či buzení jiných laserů, ale také v lékařství v chirurgii, fotodynamické terapii nebo zbraňové systémy či holografie.

2.2 Elektroerozivní obrábění

Při tomto způsobu obrábění dochází k úběru materiálu díky periodicky se opakujícím elektrickým, případně obloukovým výbojům.

Obrábění probíhá na dvou elektrodách oddělených jiskrovou mezerou velikosti 0,01 až 0,5 mm a ponořených v dielektrické kapalině. Výboj mezi elektrodami vzniká v místě nejsilnějšího elektrického napěťového pole, které vytváří ionizovaný (vodivý) kanál umožňující přechod jiskry mezi nástrojem a obrobkem^[3].

Snahou je dosáhnout maximálního úbytku materiálu na obrobku při minimálním úbytku materiálu nástrojové elektrody.

Elektroda je tvořena nejčastěji mosazným drátem o průměru 0,02 až 0,3 mm, pohybuje se plynule přímočaře. Nástrojová elektroda, i když není v přímém kontaktu s obrobkem, má aktivní úlohu v procesu elektroerozivního obrábění. Náklady na elektrody představují podstatnou část provozních nákladů, protože zahrnují náklady na materiál elektrody, údržbu a obnovu opotřebovaných elektrod^[4]

Dielektrikum může být tvořeno vzduchem, olejem, petrolejem, vodou nebo vodním sklem apod. Pracovní prostředí, které převážně tvoří kapalina je nazývané dielektrikum, má vliv na vznik elektrojskrového náboje^[8].

Elektroerozivní řezání se používá zejména na:

- opracování třírozměrných tvarových ploch,
- zhotovení nejrůznějších otvorů do kalených materiálů a spékaných karbidů,
- obrábění materiálů vysoké pevnosti,
- výrobu, velkých dutin, záпустek a forem jejichž délka je větší než 70 mm
- odstranění zalomených nástrojů apod.

Tab. 2.3 Parametry obrábění dosahované elektroerozivním obráběním^[13].

Způsob obrábění	Dosažitelná přesnost rozměrů [mm]	Dosažitelná hodnota obrobeného povrchu Ra, R _{max} [μm]
Opracování nahrubo, pulzní zdroje, velká energie výboje (hloubení)	±0,02 ÷ ±0,05	Ra > 6 R _{max} asi 25
Normální opracování, pulzní zdroje	±0,01 ÷ ±0,02	Ra = 2 ÷ 6 R _{max} = 8 ÷ 25
Jemné a velmi jemné přesné obrábění, vysokofrekvenční zdroje (řezání drátovou elektrodou)	±0,005 ÷ ±0,010	Ra = 0,8 ÷ 2 R _{max} < 6
Elektroerozivní leštění (přesné řezání drátovou elektrodou)	až ± 0,002	Ra = 0,2 ÷ 0,8 R _{max} < 2,5 ÷ 4

2.3 Obrábění paprskem elektronů ^[15]

Princip metody obrábění elektronovým paprskem je založen na využití kinetické energie proudu urychlených elektronů, při které dochází k dopadu soustředěného svazku elektronů o vysoké rychlosti na obráběný materiál.

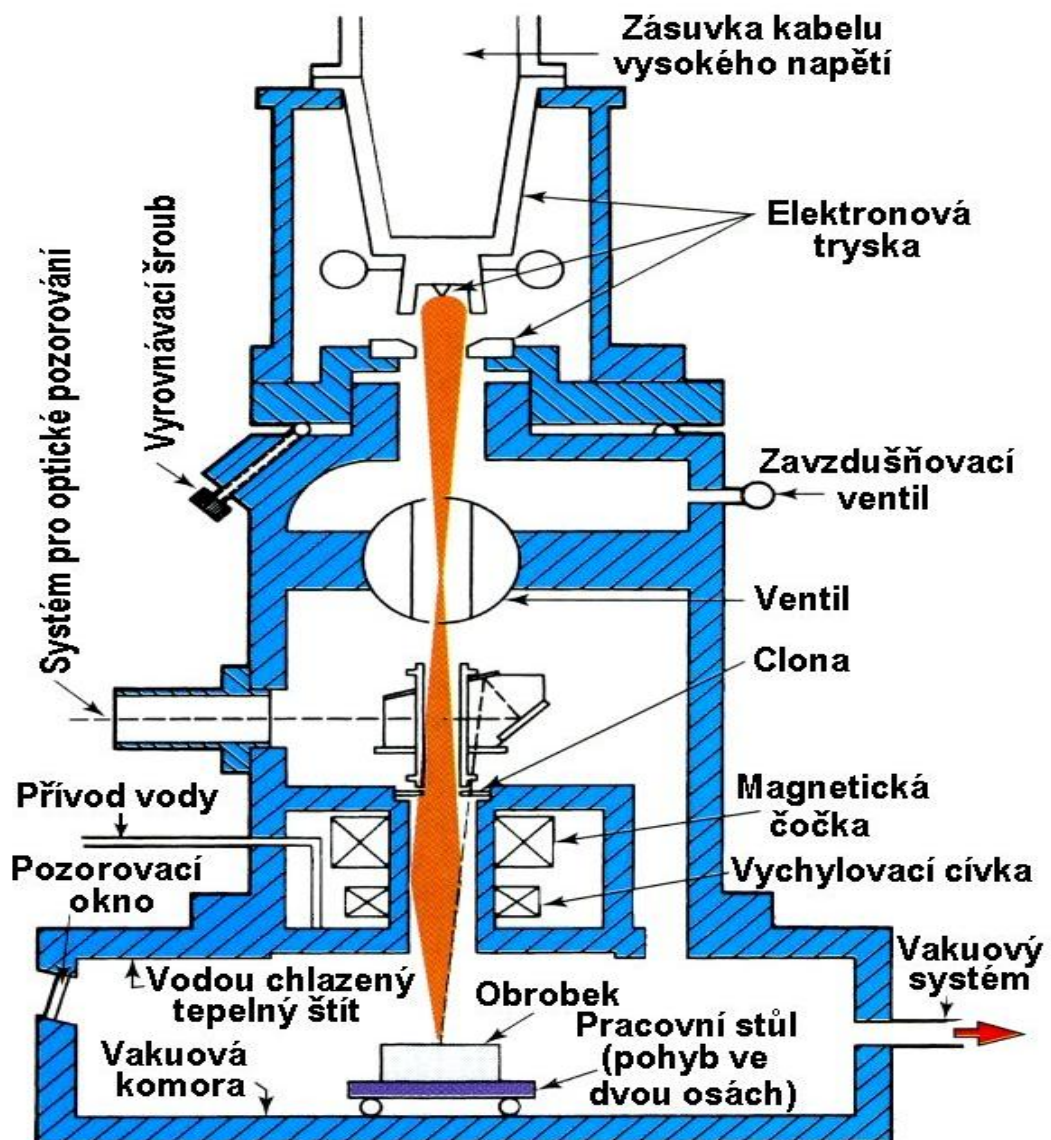
V místě dopadu se mění kinetická energie elektronů v energii tepelnou. Materiál obrobku se taví a následně odpařuje.

Elektronový svazek o hustotě $10^6 \div 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ se generuje a urychluje v elektronovém dělu. Rychlost elektronů je přibližně o 25 % nižší než paprsku světla a celý tento děj probíhá ve vakuu.

Paprsek působí na materiál termickým nebo netermickým účinkem. Při netermickém účinku se mění chemicky nebo fyzikálně složení a struktury obráběného materiálu.

Z technického hlediska lze paprsek elektronů použít pro:

- Termické procesy - svařování, pájení, vrtání dlouhých děr malých průměrů, řezání a tepelné zpracování materiálů;
- Netermické procesy – k vyvolání chemické reakce, využití především při výrobě čipů



Obr. 2.4 Princip obrábění elektronovým paprskem^[15]

2.4 Obrábění paprskem plazmy ^[4, 9, 13]

Plazmový způsob řezání se začal používat začátkem 50 let 20. století jako alternativa způsobu řezání hliníkových a neželezných materiálů namísto řezání kyslíkovým plamenem. V současné době se však používá pro řezání všech vodivých kovových materiálů.

Plazma je elektricky vodivý stav plynu, který se na Zemi vyskytuje jen výjimečně, ve fyzice je označován jako čtvrté skupenství hmoty. Vzniká ionizací plynu při vysokých teplotách nad 20 000 °C, anebo jako elektrický výboj mezi anodou a katodou.

Základem obrábění plazmatem je ohřev nebo tavení materiálu za extrémně vysokých teplot (nad 10 000 °C), které vznikají rozkladem molekul plynu při jejich průchodu elektrickým obloukem. Oblouk hoří mezi netavící se katodou z wolframu a anodou, která je vytvořena opracovávaným materiálem nebo tělesem hořáku. Z hořáku vychází vysokou rychlostí úzký paprsek plazmy o průměru řádově 1mm. Při řezání je roztavený materiál vyfukován z místa řezu asistenčním plynem.

Hlavní oblasti aplikace plazmového paprsku jsou:

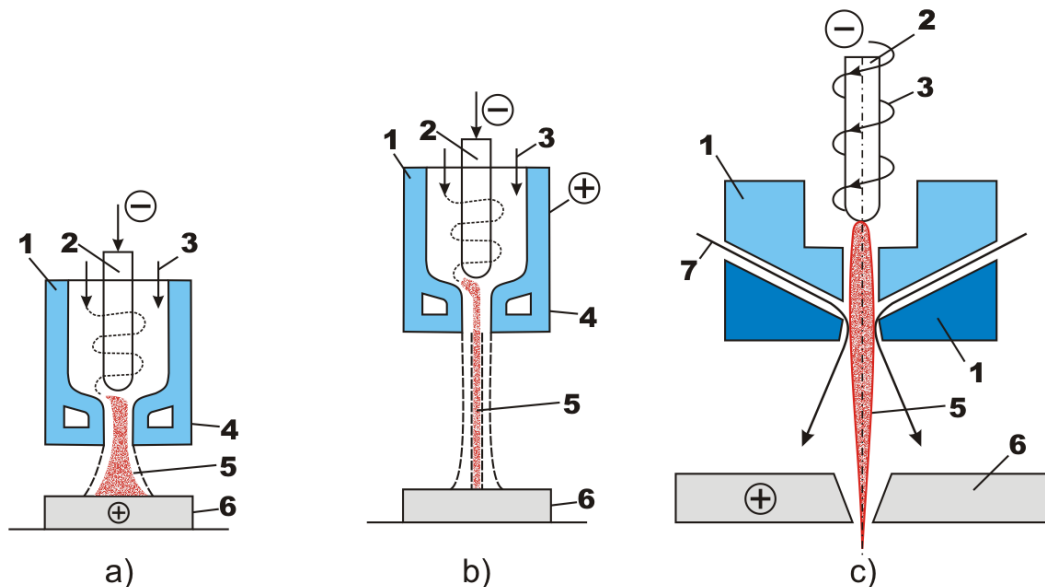
- řezání, svařování, navařování, obrábění těžkoobrobitelných materiálů,
- nanášení povlaků plazmovým paprskem např. vysokotlaké kovové a keramické povlaky,
- Obrábění (soustružení) pomocí plazmového paprsku, jako zdroj lokálního ohřevu materiálu ^[9]

Tab. 2.4 Pracovní podmínky pro řezání plazmou ^[13]

Obráběný materiál	Tloušťka materiálu [mm]	Pracovní podmínky				Šířka řezu [mm]	
		Proud [A]	Napětí [V]	Průměr paprsku [mm]	Řezná rychlost [mm · min ⁻¹]	na vstupu paprsku	na výstupu paprsku
Korozivzdorná ocel	20	300	130	2,8	1 500	4,4	3,0
	30	280	140	3,0	1 000	5,8	3,5
	60	500	150	4,4	550	8,0	6,0
	100	700	170	5,5	370	10,0	9,0
Slitiny hliníku	25	280	130	3,0	2 800	4,5	3,0
	50	450	135	4,2	1 600	6,2	5,0
	70	450	150	4,2	1 000	6,5	5,0
	125	700	160	5,5	550	9,5	7,5

V plazmovém hořáku je nutné oddělit velmi teplé plazma od elektrod, aby nedocházelo k jejich rychlému opotřebení. Katoda zasahuje ve směru osy do válcové komory uzavřené v čele s anodou, která je tvořena kruhovou deskou s otvorem ve středu. Do prostoru obloukového výboje je pod tlakem tryskou vháněno pracovní médium (voda, plyn), které víří po stěnách nádoby, nezasahuje plamen a vytváří chladící vrstvu, která chrání nádobu i elektrody

před vysokou teplotou. Proudící pracovní látka vytváří kanál určující tvar výboje a zároveň ho i stabilizuje. Důsledkem je tepelné zúžení plazmy. Výstupní rychlosti plazmy dosahují rychlostí 1.500 až 2.300 m.s⁻¹, natavený materiál je z řezné spáry vyfukován.



a) s transferovým obloukem, b) s plynovou stabilizací s netransferovým obloukem, c) s vodní stabilizací

(1 - těleso hořáku, 2 - katoda, 3 - přívod plynu (argon), 4 - chlazení hořáku, 5 - paprsek plazmatu, 6 - obrobek, 7 - přívod vody)

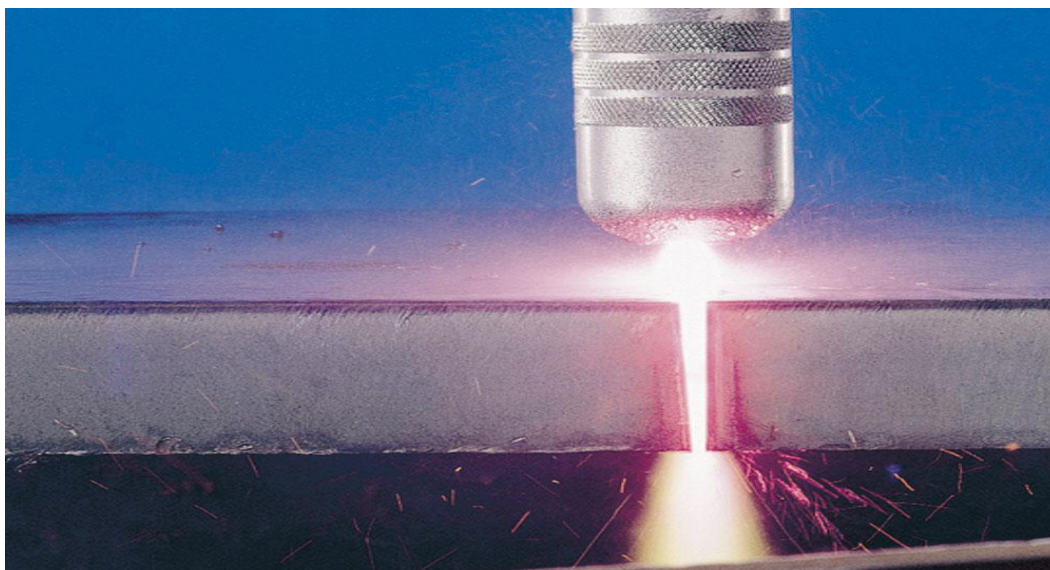
Obr. 2.5 Plazmové hořáky s plynovou stabilizací ^[9]

Do hořáku se nejčastěji přivádějí 3 druhy plynů:

- Plazmový – (argon, vodík, dusík, kyslík, vzduch) je přiváděn do elektrického oblouku, kde dochází k jeho ionizaci a disociaci a vytváří tak plazmový paprsek.
- Fokusační – (argon, dusík, směs argonu a vodíku nebo argonu a dusíku) zaostruje paprsek plazmatu po jeho výstupu z trysky hořáku.
- Ochranný – (argon, dusík) obklopuje paprsek plazmatu a pracovní místo na řezaném materiálu a chrání jej před účinkem atmosféry. ^[23]

Zvolení vhodného plazmového plynu závisí na druhu řezaného materiálu. Kdy u většiny řezaných materiálů se používá především kombinace argonu a vodíku.

Kombinací argonu a vodíku od 5 do 35 % vzniká směs Hytec, pomocí které lze dosáhnout optimální teploty plazmatu. Za těchto optimálních pracovních podmínek lze dosáhnout dobrou jakost stěn řezu, bez ořepů na spodní straně řezu.



Obr. 2.6 Plazmový hořák firmy ESAB ^[24]

Obecně je kvalita řezu a maximální tloušťka řezaného materiálu závislá na metodě plazmového řezání, na napájecím proudu a napětí, na rychlosti řezání a na druhu řezaného materiálu. Maximální tloušťka řezaného materiálu je u korozivzdorných ocelí 130 mm, u slitin hliníku a mědi až 150 mm.

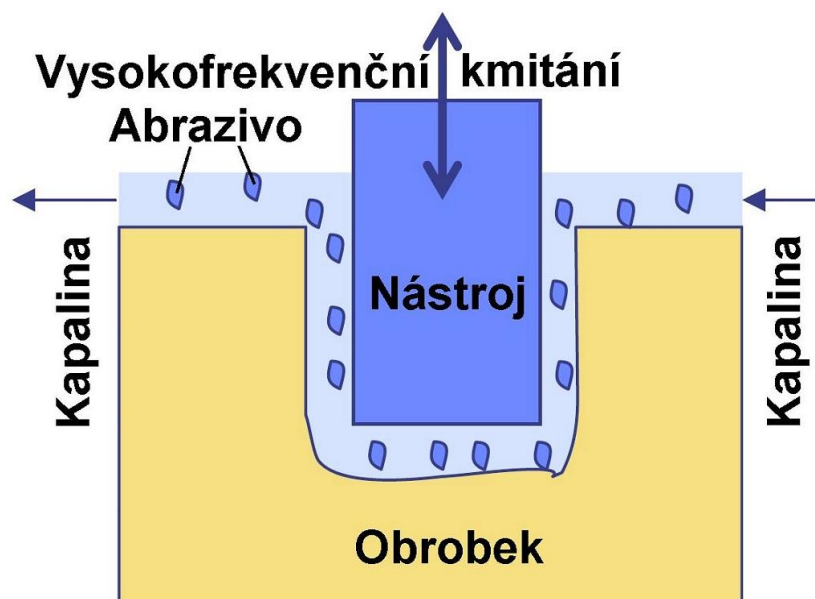
2.5 Ultrazvukové obrábění

Ultrazvukové obrábění je řízené rozrušování materiálu obrobku účinkem pohybu zrn abrazivního materiálu a působením kavitační eroze. Tato metoda je založena na mechanickém úběru materiálu. Zrna abrazivního materiálu jsou přiváděna mezi obráběný povrch a nástroj, který kmitá kolmo k obráběnému povrchu o frekvenci 18 až 25 kHz. Zrna jsou nástrojem přitlačována řízenou silou na obráběný povrch, čímž dochází k překopírování tvaru činné části nástroje do obrobku^[10].

Ultrazvukem jsou obráběny nejčastěji tvrdé (nad 40 HRC) a křehké materiály (měkké materiály nelze tímto způsobem obrábět, protože v nich ulpívají zrna abraziva)

Nejčastější použití:

- řezání především tyčí křemene, rubínu a dalších tvrdých materiálů
- hloubení průchozích děr
- hloubení dutin – zejména při obrábění skla, keramiky
- broušení rovinných ploch

Obr. 2.7 Princip ultrazvukového obrábění ^[15]

2.6 Obrábění vodním paprskem

Historie řezání vodním paprskem

Technologie řezání a dělení materiálu vodním paprskem (hydrodynamické obrábění) je známé už několik desetiletí. Na začátku roku 1970 došlo k vylepšení technologie vodního paprsku, který se stal velice účinným na opracování a dělení dřeva a plastu. Tato technologie využívala jako řezný nástroj vysokotlakový a vysokorychlostní proud vody (tlak vody asi 380 MPa).

Tab. 2.5 Rychlost řezání vodním paprskem bez abraziva ^[4]

Materiál	Tloušťka [mm]	Řezná rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	Průměr dýzy [mm]	Pracovní tlak [MPa]
Azbestový obklad	18	1520	0,20	190
Gumové dlaždice	3	150	0,13	380
Sklo	300	420	0,15	350
Polypropylen	2	60	0,10	380
Polyester	12	600	0,15	380
Uhlíkový kompozit	1,6	10	0,15	380
Sklolaminát	1,7	40	0,20	385

Později se začalo přidávat jemné brusivo, které zvýšilo účinnost řezání, a tím se také zvýšila možnost využití řezání vodním paprskem. Technologie řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí se začalo využívat od roku 1983 a to pro řezání skla. Později se tato technologie začala uplatňovat při obrábění a opracování různých kovových i nekovových materiálu (slitiny, nerezové ocele, legované uhlíkové ocele, nástrojové ocele, mědi, hliníku, titanu, betonu, keramiky, mramoru, žuly, těsnících a pěnových materiálů, podlahových krytin, apod.). Jako abrazivum se používá široké spektrum materiálů (např. přírodní granát, olivín, minerální a křemičitý písek a karbidy křemíku).

Původně byla technologie řezání vodním paprskem využívána především v leteckém, kosmickém a báňském průmyslu. V současné době se tato technologie rozšířila do různých průmyslových odvětví, ve kterých se používá k obrábění těžko obrobitelných materiálů.

Řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí má mnoho předností, mezi které patří zejména:

- schopnost řezat rovinné i tvarově složité plochy,
- vysoká rychlost řezání,
- minimální tepelné ovlivnění povrchu,
- malé deformační napětí,
- možnost řezat v různých směrech,
- schopnost dělit vícesložkové kompozitní materiály,
- bezprašnost řezu,
- vysoká spolehlivost a jednoduchost obsluhy,
- řízení pomocí NC a CNC strojů nebo manuální řízení.

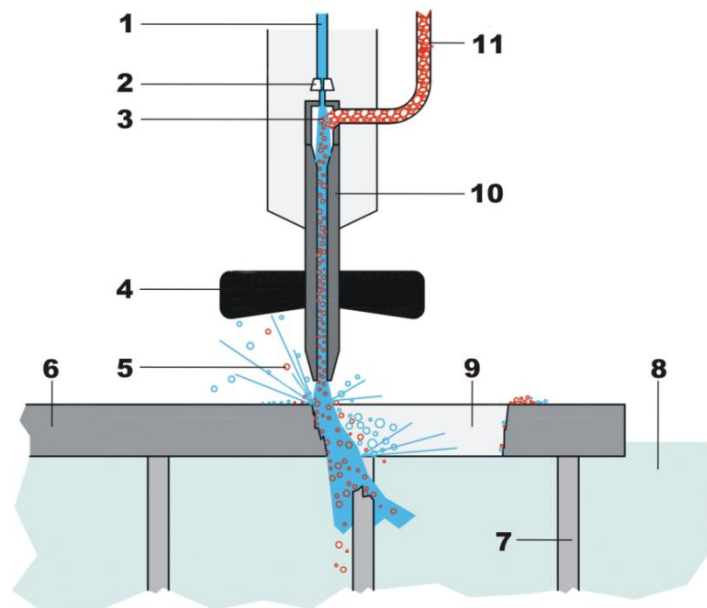
Vodní paprsek narušuje materiál a zároveň ho odplavuje. Při použití abraziva jednotlivá zrna narážejí na materiál a tím ho obrušují. Významnou výhodou řezání vodním paprskem je, že nevzniká tepelně ovlivněná oblast. Vysokotlaké čerpadlo vytvoří pracovní tlak vody až 400 MPa, poté je paprsek veden potrubím k vodní trysce, která usměrní průměr vodního paprsku v rozmezí 0,2 ÷ 0,4 mm. Vodní tryska je vyráběna ze safíru, rubínu nebo diamantu. V případě použití abraziva jde paprsek přes směšovací komoru, do které je pod tlakem nasáváno abrazivo, do abrazivní trysky, která určuje výsledný průměr vodního paprsku v rozmezí od 0,75 ÷ 2,5 mm. Při obrábění bez abraziva je výsledný průměr od 0,08 ÷ 1,6 mm.^[2]

Mechanismus rozrušování materiálu ^[25]

Fyzikální podstatou řezání materiálu paprskem kapalinou vychází z úvahy, že paprsek se pohybuje dvojnásobnou až čtyřnásobnou rychlostí zvuku. Proces probíhá ve dvou etapách:

1. V první etapě vzniká působením tlaku kapaliny prohlubeň, která se mění na otvor.
2. V druhé etapě dochází k prohlubování a vytváření rezné štěrbině.

Při nárazu kapaliny na obrobek dochází k akumulaci vysokého tlaku na velmi malé ploše, tím vznikají v řezaném materiálu rázové trhliny a dochází k rychlejší destrukci materiálu obrobku na hranici zrna a k mikrotrhlinám. Mikrotrhliny se v důsledku dynamického zatížení rychle šíří a tím dochází k rozrušování obráběného materiálu. K destrukci řezaného materiálu dochází také turbulentním proudním kapalinou ve štěrbině s účinkem kavitačních bublin.



- | | | |
|--------------------------------|----------------------------|--------------------|
| 1. Vysokotlaká voda | 6. Obráběný materiál | 11. Abrasivní písk |
| 2. Vodní tryska | 7. Mřížka pracovního stolu | |
| 3. Směšovací komora | 8. Hladina vody | |
| 4. Ochranná manžeta | 9. Řezná mezera | |
| 5. Odražený paprsek a abrazivo | 10. Tryska | |

Obr. 2.8 Schéma řezání vodním paprskem ^[26]

Kvalita řezné plochy

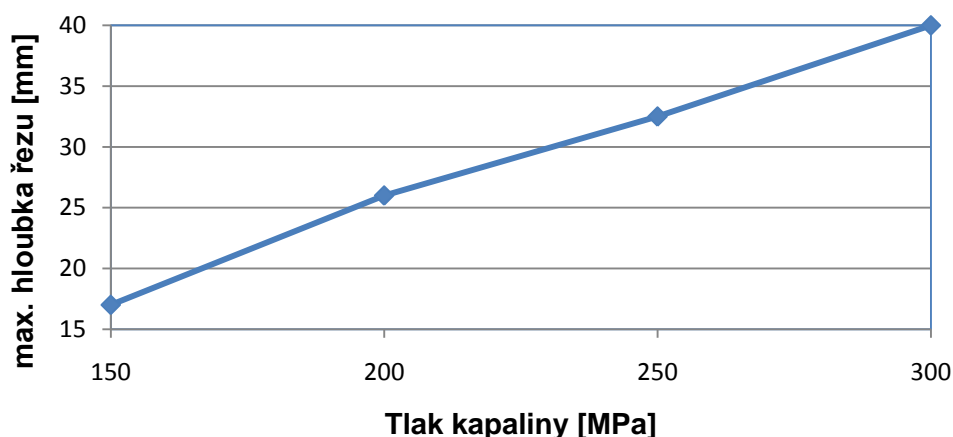
Kvalita řezné plochy a hloubka řezu jsou závislé technologické parametry, které charakterizují účinky působení vodního paprsku na řezný materiál. Kvalitu řezné plochy reprezentuje drsnost povrchu a zpevnění materiálu. Do skupiny parametrů jsou zařazené: hloubka obrobené plochy, výška nerovnosti povrchu, úhel sklonu řezné plochy, šířka řezné mezery, přesnost rozměrů při vyřezávání tvarů a ohyb paprsku.

Tab. 2.6 Rychlost řezání AWJ ^[4]

Materiál	Tloušťka [mm]	Řezná rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]
Konstrukční ocel	1,6	0,50
	50	0,038
	180	0,010
Korozivzdorná ocel	5	0,40
	25	0,076
Hliník	1,6	1,30
	100	0,025
Titan	3	0,50
	12	0,10
Sklo	13	1,3
	25	0,13
Mramor	50	0,40
Beton	250	0,025

Maximální hloubka řezu ^[25]

Pro zjištění maximální hloubky, do které je vodní paprsek schopen proniknout byly vykonány zkoušky s postupnou změnou tlaku kapaliny, hmotnostního toku abraziva tak i řezné rychlosti, které popsal, ve své literatuře Vodný luč v praxi Ing. Zdeno Krajný CSc.



Obr. 2.9 Vliv tlaku kapaliny na hloubku řezu ^[25]

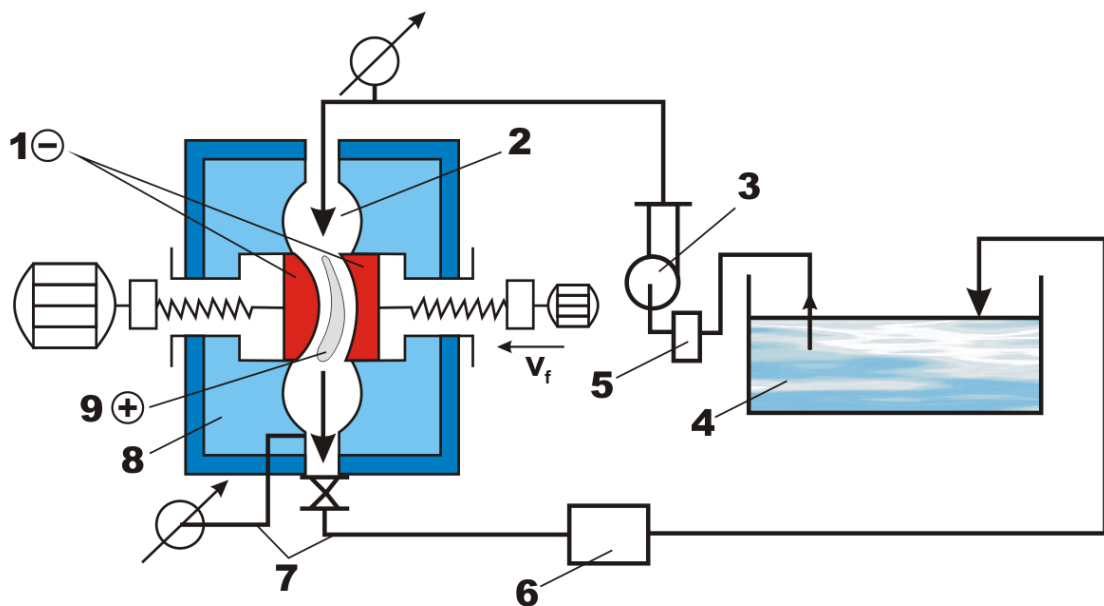
Graf dokazuje, že závislost maximální hloubky řezu a tlaku kapaliny je téměř lineární a zvyšováním tlaku dochází ke zvýšení hloubky řezu. Tlaková energie kapaliny se v řezací hlavici transformuje na energii kinetickou potřebnou k rozrušování materiálu.

Z dalších zkoušek dále vzešlo, že hmotnostní tok abraziva má také podstatný vliv na maximální hloubku řezu, čím vyšší hmotností tok tím dosáhneme větších hloubek. Naproti tomu se zvyšující se řeznou rychlostí, dosahovaná hloubka řezu rapidně klesá.

2.7 Elektrochemické obrábění

Elektrochemické obrábění je metoda beztržiskového řízeného obrábění elektricky vodivých materiálů. Využívá poznatků o působení elektrického proudu na elektrolyt, podstatou metody je fyzikální jev zvaný elektrolýza. Hlavní zákonitosti elektrochemického obrábění jsou dány Faradayovými zákony, teorií elektrolytů a termodynamikou galvanických článků.

Obrobek (anoda) je ponořena do elektrolytu a dochází na něm k reakci, při níž se kationty elektrolytu slučují s anionty kovu na povrchu anody a postupně rozrušují (ubírají) kov z anody. Anoda tím kopíruje tvar katody (nástrojové elektrody, vyráběné z mosazi, mědi, grafitu a korozi-vzdorné oceli). ^[12]



- | | | |
|----------------------|------------------------|-------------------|
| 1 nástroj (katoda) | 4 nádrž s elektrolytem | 7 regulátor tlaku |
| 2 rozvod elektrolytu | 5 chladič | 8 pracovní komora |
| 3 čerpadlo | 6 filtr | 9 obrobek (anoda) |

Obr. 2.10 Schéma zařízení pro elektrochemické obrábění vnějších tvarových ploch^[12]

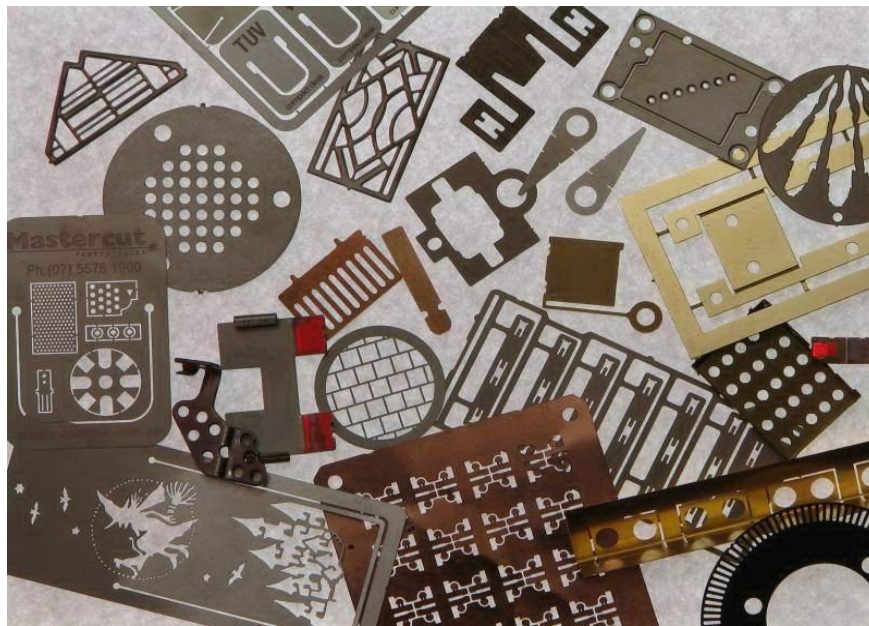
Nejčastěji se elektrochemické obrábění používá pro:

- hloubení vnitřních a vnějších tvarů a dutin nástrojových forem,
- hloubení děr malých rozměrů (menších než 1 mm),
- odstraňování otřepů,
- broušení či povrchové značení,
- dělení materiálů^[12].

2.8 Chemické obrábění

Chemické obrábění se používá především pro leptání a termické odstraňování otřepů. Jedná se o metodu beztliskového a bezsilového obrábění, při které je povrch obrobku narušován chemickými reakcemi s kyselinami či hydroxidy. Zakrýváním pryskyřicí nebo speciálním lakem se řízené odleptání vrstvy materiálu se zařizuje zakrýváním míst, která nemají být obrobena, zakrývají se pryskyřicí nebo speciálním lakem.

Slouží k výrobě velkých ploch do malých tloušťek a složitých tvarů (nosníky v leteckých konstrukcích, potahy křidel z hliníku apod.). Jelikož nedochází k silové deformaci obrobku je tato metoda vhodná k obrábění tenkostěnných součástí, tvarově složitých a málo tuhých součástí, které lze obtížně upínat, aniž by došlo k jejich deformaci



Obr. 2.11 Dílce vyráběné chemickým obráběním ^[11]

Leptání se používá pro:

- hliník a jeho slitiny,
- konstrukční uhlíkové a korozi-vzdorné ocele,
- měď, mosaz a titan.^[12]

3 POŽADAVKY FIRMY NA NOVOU TECHNOLOGII

Firma vlastní dva stroje, které dělí materiál vodním paprskem. Na těchto strojích s vysokou přesností a požadovanou kvalitou obrábějí široké spektrum tvarově náročných dílců z uhlíkaté a korozivzdorné oceli, hliníku a jeho slitin.

Procentní ukazatel nejčastěji řezaných materiálů:

- Uhlíkatá ocel - 40%
- Hliník a jeho slitiny - 40%
- Korozivzdorná ocel - 20%

Firma chce v horizontu do jednoho roku zakoupit novou technologii na řezání svého portfolia výrobků. Nová technologie musí být vysoce produktivní a ekonomická především při řezání uhlíkatých a korozivzdorných ocelí. Záměrem je přesunout 60% dosavadní výroby na novou technologii, která by tyto materiály měla obrábět mnohem efektivněji avšak se stejnou kvalitou jako doposud používané stroje. Cenový strop nebyl stanoven ale, hledána je taková technologie, která bude splňovat všechna kritéria pro bezproblémovou výrobu a také bude co nejekonomičtější.

3.1 *Hlavní úkol studie*

Hlavním úkolem práce je navrhnout firmě technologii a stroj, který bude nejlépe splňovat daná kritéria.

Postupem řešení:

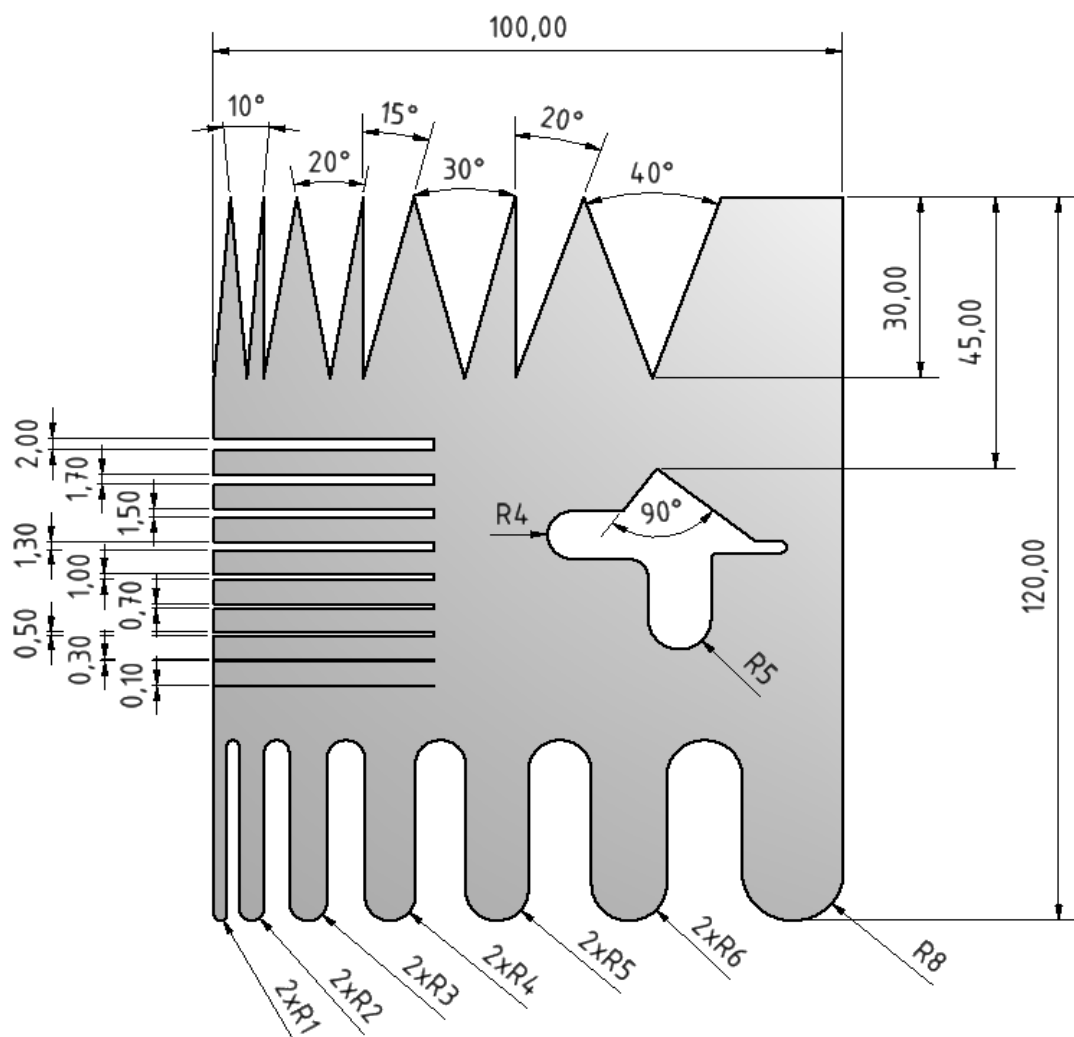
- vyhotovit vzorky vybranými technologiemi
- vzorky porovnat v obecných kritériích jako kvalita řezu, tepelně ovlivněná oblast, strojní čas, čas obsluhy, cena, atd.
- porovnat vzorky podle kritérií ve, kterých budou zkoumány možnosti technologie přímo na jednotlivých vzorcích.
- vybrat technologii, která bude nejlépe vyhovovat daným požadavkům
- vyhotovit přehled trhu s výrobcí dané technologie.
- navrhnout vhodný stroj

4 VOLBA VZORKU

Jako vhodné technologie pro výrobu vzorku a splnění požadavků byly vybrány 5 metod, které představují v dnešní době hlavní zastoupení NMO v průmyslové výrobě. Jde o obrábění elektroerozivní, abrazivním vodním paprskem, plazmou, CO2 Laserem a pevnolátkovým laserem.

4.1 Volba tvaru vzorku

Tvar vzorku byl volen s ohledem na výrobní možnosti (výhody, nevýhody) jednotlivých metod. Na vzorku se vyskytují ostré hrany, rovinné a rádiusové plochy, které budou sloužit k porovnání tvarové přesnosti jednotlivých metod. Výkres s rozměry je uveden v příloze č. 3



Obr. 4.1 Model vzorku se základními rozměry

4.2 Použitý materiál

Při výrobě vzorku byl použit plech z korozivzdorné oceli 1.4301 (dle ČSN 10088-1 1.4301, staré značení 17 240) o tloušťce 1,5 mm. Jedná se o nejpoužívanější druh korozivzdorných ocelí, je odolná proti korozi v běžném prostředí (voda, slabé kyseliny, slabé alkálie). V oblasti tepelného ovlivnění náchylná k mezikrystalové korozi. Nejčastěji se používá na vnější konstrukce, vnější architekturu, apod.^[28]

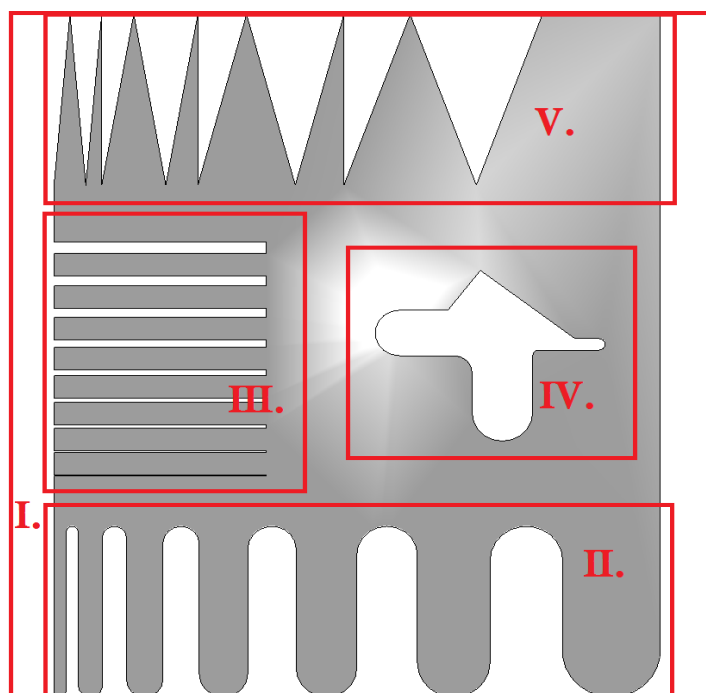
Tab. 4.1 Chemické složení oceli 1.4301 (17 240)^[29]

Druh	Materiál	Chemické složení v [%]								
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
A2	17 240	0,1	1	6,5	0,05	0,03	15-20	0	8-19	4

4.3 Měření tvarové a rozměrové přesnosti

Rozměrová přesnost bude měřena na pěti částech vzorku:

- I. Měření obvodové přesnosti a rovinných ploch dílce.
- II. Měření rádiusových ploch.
- III. Měření přesnosti a kvality zhotovených drážek.
- IV. Měření přesnosti vyrobeného vnitřního tvaru.
- V. Měření ostrých hran a minimální šířky řezu s ohledem na řezný nástroj.



Obr. 4.2 Model vzorku se znázorněnými 5 měřenými částmi

Všechna měření budou porovnávána s výrobním výkresem a následně hodnocena na stupnici od 1 do 10 kde hodnota 10 znamená shodu rozměrů na vzorku a na výkrese, tedy nejvyšší hodnotu. Dále budou výsledné hodnoty sečteny a jejich výsledná hodnota bude použita k technicko-ekonomickému hodnocení.

V tabulkách 4.2 až 4.6 jsou uvedena kritéria, ke kterým byla přiřazena bodová hodnota.

Tab. 4.2 Bodové hodnocení pro část I.

Body	10 b	9 b	8 b	7 b	6 b	5 b	4 b	3 b	2 b	1 b
[mm]	± 0	± 0,05	± 0,07	± 0,09	± 0,1	± 0,12	± 0,15	± 0,17	± 0,2	± 0,25

Tab. 4.3 Bodové hodnocení pro část II.

Body	10 b	9 b	8 b	7 b	6 b	5 b	4 b	3 b	2 b	1 b
[mm]	± 0	± 0,05	± 0,07	± 0,09	± 0,1	± 0,12	± 0,15	± 0,17	± 0,2	± 0,25

Tab. 4.4 Bodové hodnocení pro část III.

10 b	9 drážek, vysoká kvalita obrobení, dodržení rozměrů ± 0 mm
9 b	8 drážek, vysoká kvalita obrobení, dodržení rozměrů ± 0,05 mm
8 b	7 drážek, vysoká kvalita obrobení, dodržení rozměrů ± 0,07 mm
7 b	6 drážek, vysoká kvalita obrobení, dodržení rozměrů ± 0,09 mm
6 b	6 – 8 drážek, střední kvalita obrobení, dodržení rozměrů ± 0,1 mm
5 b	6 – 8 drážek, střední kvalita obrobení, dodržení rozměrů ± 0,12 mm
4 b	6 – 8 drážek, střední kvalita obrobení, dodržení rozměrů ± 0,15 mm
3 b	4 – 6 drážek, střední kvalita obrobení, dodržení rozměrů ± 0,17 mm
2 b	4 – 6 drážek, nízká kvalita obrobení, dodržení rozměrů ± 0,2 mm
1 b	4 – 6 drážek, nízký kvalita obrobení, dodržení rozměrů ± 0,25 mm

Tab. 4.5 Bodové hodnocení pro část IV.

10 b	Dodržení rozměrů ± 0 mm, zaoblení pravého úhlu žádné
9 b	Dodržení rozměrů ± 0,05 mm, zaoblení pravého úhlu žádné
8 b	Dodržení rozměrů ± 0,05 mm, zaoblení pravého úhlu nepatrné
7 b	Dodržení rozměrů ± 0,07 mm, zaoblení pravého úhlu nepatrné
6 b	Dodržení rozměrů ± 0,07 mm, zaoblení pravého úhlu patrné
5 b	Dodržení rozměrů ± 0,09 mm, zaoblení pravého úhlu patrné
4 b	Dodržení rozměrů ± 0,09 mm, zaoblení pravého úhlu výrazné
3 b	Dodržení rozměrů ± 0,1 mm, zaoblení pravého úhlu patrné
2 b	Dodržení rozměrů ± 0,1 mm, zaoblení pravého úhlu výrazné
1 b	Dodržení rozměrů ± 0,15 mm, zaoblení pravého úhlu výrazné

Tab. 4.6 Bodové hodnocení pro část V.

Body	Tolerance výšky [mm]	Tolerance šířky [mm]	Úhlová tolerance [°]
10 b	0 ÷ 1	±0	±0
9 b	1 ÷ 2	± 0,05	± 0,25
8 b	2 ÷ 3	± 0,07	± 0,35
7 b	3 ÷ 4	± 0,1	± 0,45
6 b	4 ÷ 5	± 0,12	± 0,55
5 b	5 ÷ 6	± 0,15	± 1
4 b	6 ÷ 7	± 0,2	± 1
3 b	7 ÷ 8	± 0,3	± 1,5
2 b	8 ÷ 9	± 0,4	± 2
1 b	9 ÷ 10	± 0,5	± 2,5

5 VÝROBA VZORKU

Tato kapitola se bude zabývat výrobou vzorku různými metodami dělení materiálu. Budou zde uvedeny řezné a technologické parametry, které byly naměřeny při výrobě součásti, zhodnocení tvarové a rozměrové přesnosti, kvality řezaného povrchu.

5.1 Řezání vodním paprskem

5.1.1 Použitý stroj

Pro výrobu vzorku byl použit stroj švédské firmy Water Jet Sweden NC3000 na (obr. 5.1). Tento stroj lze osadit, až 12 řezacími hlavami což umožňuje zvýšit produktivitu práce^[30]. Většinou se však na těchto strojích používají dvě až tři řezací hlavy, které se používají pro výrobu rozměrných dílců. Základní technické parametry jsou uvedeny v tab. 5.1



Obr. 5.1 Stroj pro řezání vodním paprskem WJS NC 3000^[14]

Tab. 5.1 Technické parametry stroje NC 3000^[14]

Max. rozměr řezaného materiálu (š x d)	3100x 2550 mm
Pohyb v ose Y	2050 mm
Pohyb v ose X	2510 mm
Pohyb v ose Z (výška)	175 mm
Polohová přesnost	±0,1mm na 1000 mm
Opakovací přesnost	±0,05 mm
Posuv v ose X a Y	120 m · min ⁻¹
Posuv v ose Z	40 m · min ⁻¹
Minimální vzdálenost trysek	85 mm
Příkon vysokotlakého čerpadla	75 kW
Příkon pracovního CNC stolu	3 kW
Max. tlak vody	360 MPa

5.1.2 Výrobní aspekty

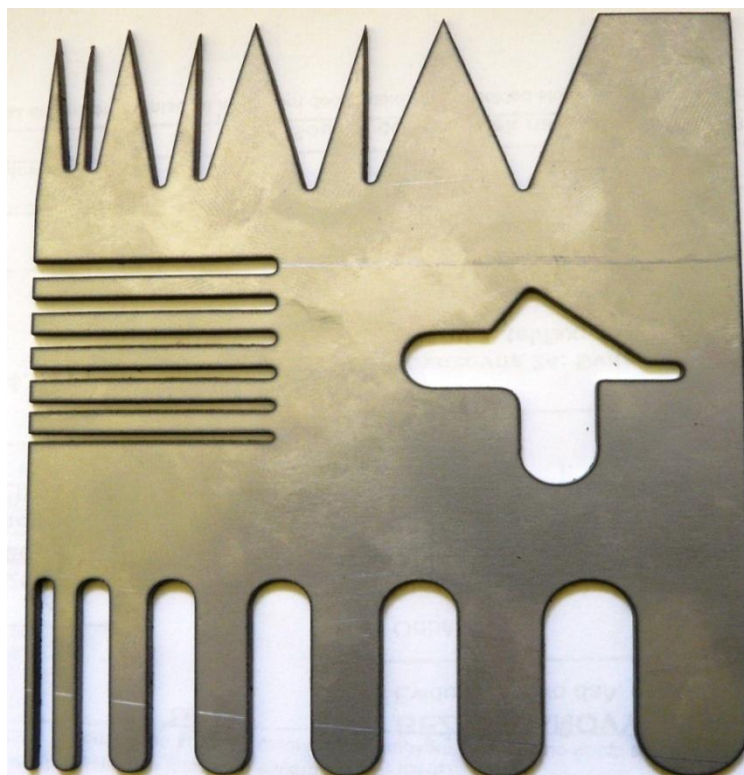
Vzorek byl vyroben z korozivzdorného plechu o tloušťce 1,5 mm. Zjištěné hodnoty při výrobě vzorku jsou uvedeny v tab. 5.2.

Tab. 5.2 Zjištěné hodnoty při výrobě vzorku

Strojí čas	2 min 25 s
Použité abrazivo	GMA Garnet 80
Průměrná spotřeba abraziva	300 g · min ⁻¹
Celková spotřeba abraziva	725 g
Průměr vodní trysky	0,254 mm
Průměr vodního paprsku	0,762 mm
Počet vpichovacích bodů	2
Hmotnost	0,103 kg
Celková délka řezu	1611,706 mm
Průměrná rychlost posuvu	699,693 mm · min ⁻¹
Přibližná spotřeba el. energie	3,5 kW
Hodinová sazba za práci stroje	2500 Kč · hod ⁻¹ *
Cena vzorku	101 Kč

*hodinová sazba stroje je závislá od zákazníka a sériovosti výroby

5.1.3 Hodnocení rozměrové přesnosti

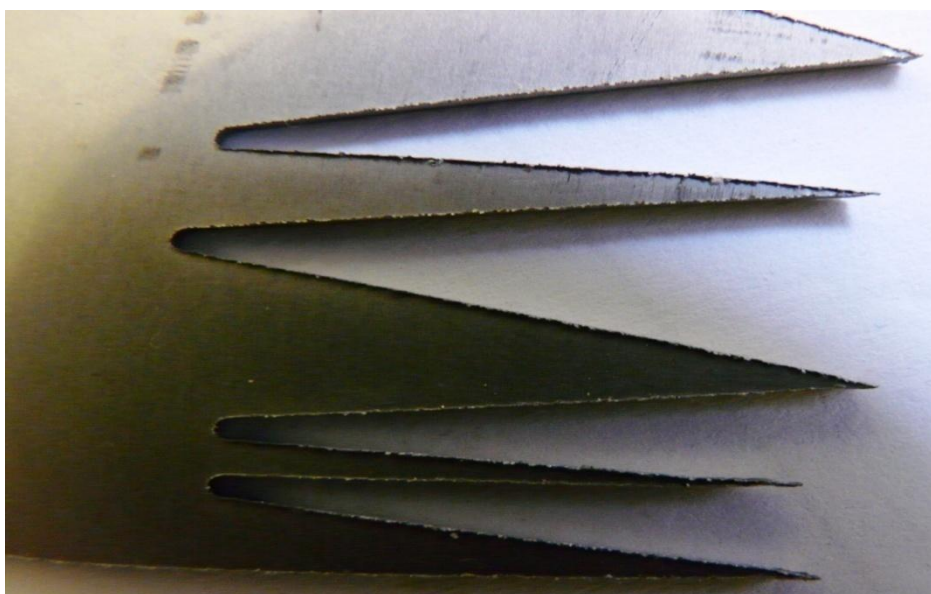


Obr. 5.2 Vzorek vyrobený CO₂ laserem

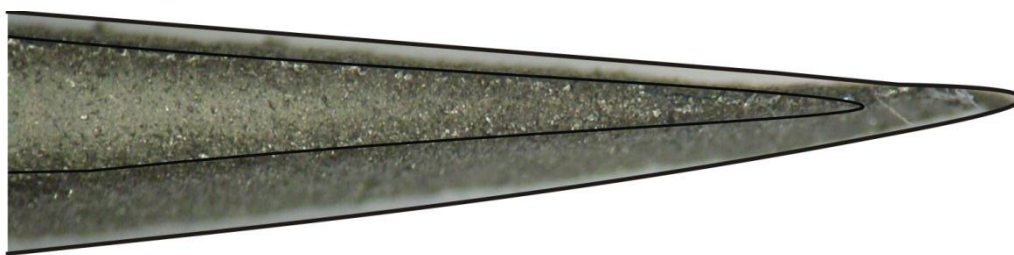
Tab. 5.3 Tabulka bodového hodnocení vyrobeného vzorku

Měřená část vzorku	Počet bodů
I.	9
II.	10
III.	3
IV.	5
V.	5
Σ	32

- I. Typickým znakem dílců obráběných abrazivním vodním paprskem je tenký lem po délce řezu, který je způsoben vychýlenými částicemi abraziva. Na rubové straně dílce, jsou znatelné otřepy, které mohou být způsobeny nesprávně zvoleným abrazivem nebo vysokou řeznou rychlostí. Při optimálních podmínkách by výskyt otřepů nebyl tak znatelný. Tyto otřepy prodlužují výrobní čas každého dílce, protože musejí být před předáním zákazníkovi ručně nebo strojně odstraněny. Celková rozměrová přesnost je v rozmezí $\pm 0,05$ mm od uvažovaného tvaru. Řezná hrana není kolmá a je viditelně podřezaná. Podřezání činí 0,175 mm po celém řezaném obvodu.

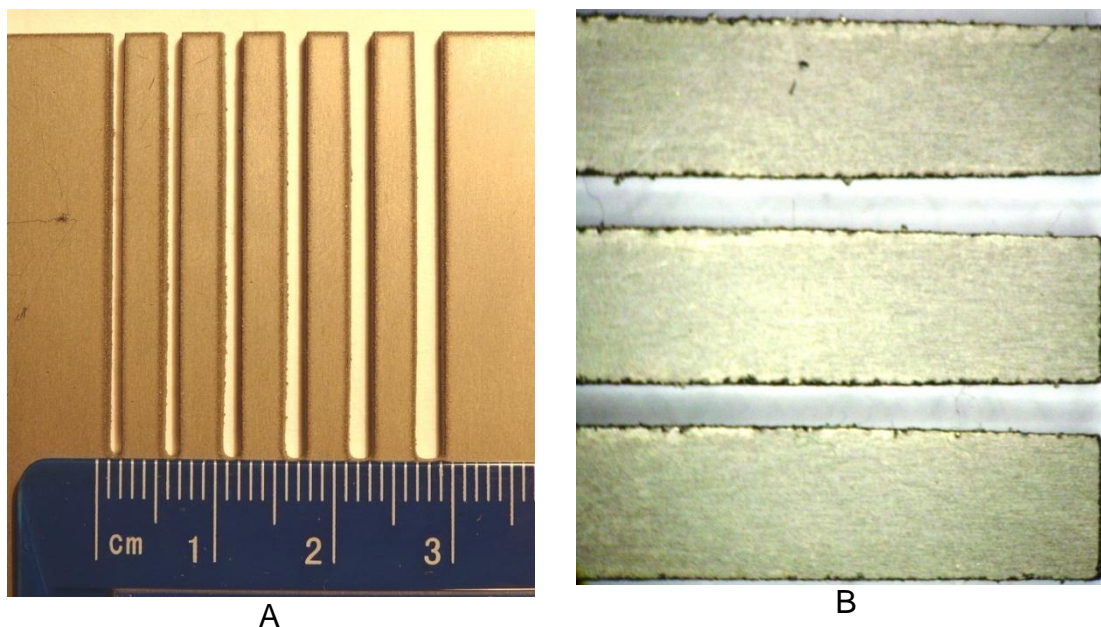


Obr. 5.3 Detail otřepů, vzniklých na rubové straně při obrábění vodním paprskem



Obr. 5.4 Detail oblasti ostrých hran se znázorněným podřezáním o 0,175 mm

- III. Nejmenší velikost zhotovené drážky je 0,8 mm. U této drážky již nejsou patrné rohy ve vnitřní části, které není vodní paprsek schopen zhotovit především kvůli použitému průměru a samotné geometrii vodního paprsku. Otřepy po řezu jsou patrné také v okolí drážek a zejména v této oblasti by se velmi obtížně odstraňovali.



Obr. 5.5 A - Drážky vyrobené AWJ B – detail nejmenších vyrobených drážek

- V. Při řezání ostrých hran nemohl paprsek obrábět materiál až do konečného rozměru trojúhelníkového tvaru a tedy vytvářel rádius o rozměru 0,782 mm což je průměr vodního paprsku. Úzké trojúhelníkové špice byly vlivem abraziva o 0,2 mm kratší než ostatní ostré výstupky. Detailní obrázek ukazuje jak je oblast řezu podřezána a ovlivněna odletujícím abrazivem.



Obr. 5.6 Detail oblasti ostrých hran

5.1.4 Hodnocení obrobeného povrchu

Všeobecně platné normy pro hodnocení topografie povrchu vytvořeného metodou AWJ nebyly doposud sestaveny ani zavedeny. Avšak již řadu let existuje rozdělení dosahovaných kvalit řezu, jež se označují Q1 až Q5. Kdy kvalita řezu Q1 je definována jako nejhorší dělicí řez a hodnota Q5 jako nejlepší. Firmy, které technologii AWJ používají, toto značení dodržují, ovšem u každé z nich lze mezi jednotlivými stupni kvality nalézt rozdíly. Je to způsobeno především nedefinovanými parametry přesnosti a jakosti povrchu pro jednotlivé stupně. A také že každá společnost vyrábějící stroje řezající metodou AWJ dodává spolu se zařízením také svůj kalkulační software, ve kterém jsou již integrovány jednotlivé stupně kvality řezu.



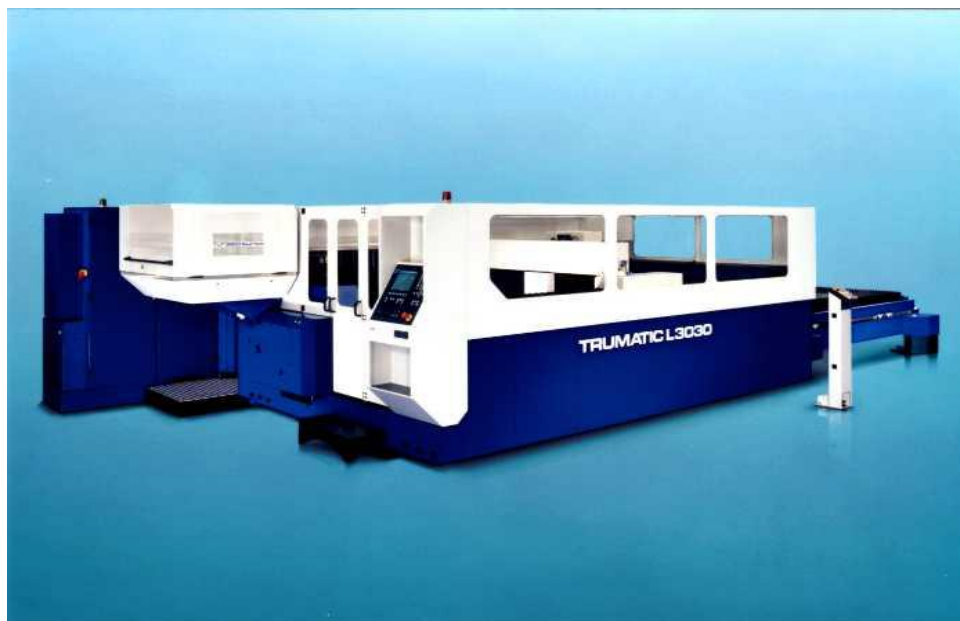
Obr. 5.7 Charakteristika profilu vzorku řezaného metodu AWJ označená hodnotou Q3 ^[38]

Povrch generovaný při řezu abrazivním vodním paprskem je obecně charakteristický svou typickou strukturou kdy se paprsek „ohýbá“ proti směru řezu. Na obr. 5.2 je viditelná stopa po řezu vodním paprskem. Dosažená průměrná aritmetická úchylka profilu Ra, která byla na vzorku naměřena při řezání abrazivním vodním paprskem, je 3,2 μm . Kvalita řezu dosažená na vyrobeném vzorku se dá vyhodnotit dle používaných označení jako Q3.

5.2 Řezání CO₂ laserem

5.2.1 Použitý stroj

Výroba vzorku byla prováděna na laserovém centru TRUMATIC L 3030 od firmy TRUMPF, který je na obr. 5.8. Tento 2D laserový řezací stroj pracuje na principu „létající optiky“, což znamená, že pohyblivá se řezací laserová hlava opracovává fixně uložený obrobek na výměnném pracovním stole. Maximální rozměry výpalku a základní technické parametry stroje jsou uvedeny v tabulce v tab. 5.4.



Obr. 5.8 Laserový stroj TRUMATIC L 3030 ^[31]

Tab. 5.4 Technické parametry stroje TRUMATIC L 3030 ^[32]

Max. výkon laseru		3200 W
Max. rozměr řezaného materiálu (š x d)		1500 x 3000 mm
Pohyb v ose Y		3000 mm
Pohyb v ose X		1500 mm
Pohyb v ose Z (výška)		115 mm
Min. programovatelný přírůstek		0,01 mm
Opakovací přesnost		±0,03 mm
Polohovací přesnost		±0,1 mm
Posuv v ose X a Y		60 m · min ⁻¹
Souběžný posuv		85 m · min ⁻¹
Max. hmotnost obrobku		710 kg
Tloušťka řezaného materiálu	Ocel	0,5 ÷ 20 mm
	Hliníkové slitiny	0,5 ÷ 4 mm
	Korozivzdorné ocele	0,5 ÷ 8 mm

5.2.2 Výrobní aspekty

Tab. 5.5 Zjištěné hodnoty při výrobě vzorku

Strojí čas	38 s
Použitý plyn	Dusík
Průměr trysky	1,4 mm
Ohnisková vzdálenost čočky	7,5 mm
Mezera řezu	0,2 mm
Počet vpichovacích bodů	2
Hmotnost	0,138 kg
Průměrná rychlost posuvu	8500 mm · min ⁻¹
Celková délka řezu	1692,24 mm
Hodinová sazba za práci stroje	2200Kč · hod ⁻¹ *
Cena vzorku	23 Kč

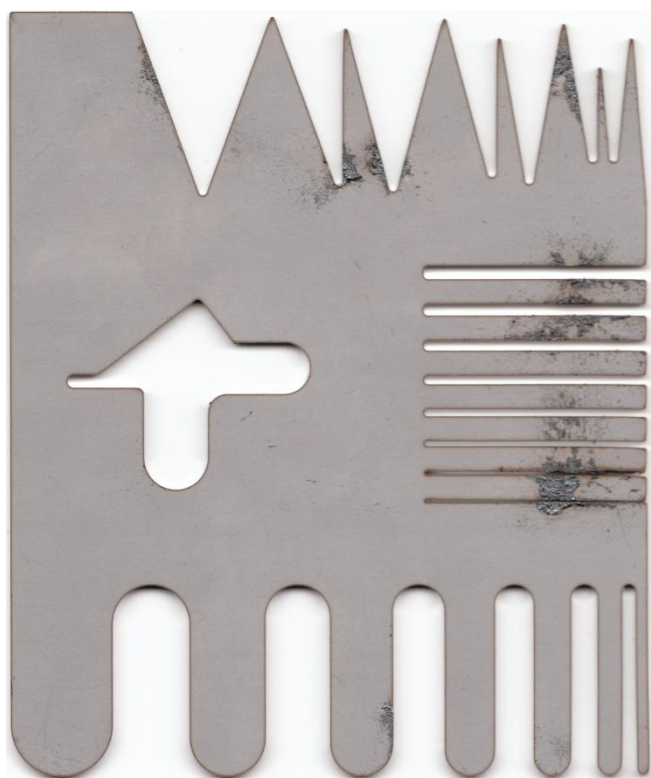
*hodinová sazba stroje je závislá od zákazníka a sériovosti výroby

5.2.3 Hodnocení rozměrové přesnosti

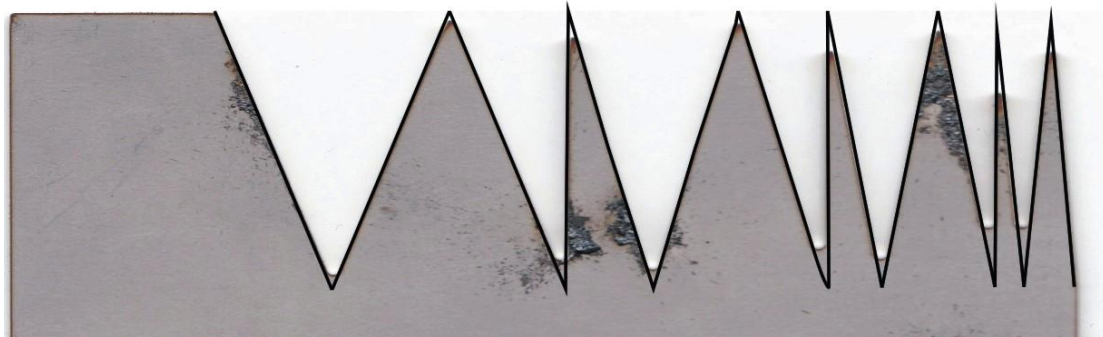
Tab. 5.6 Tabulka bodového hodnocení vyrobeného vzorku

Měřená část vzorku	Počet bodů
I.	10
II.	10
III.	6
IV.	7
V.	4
Σ	37

- I. Celkové rozměry výpalku a rádiusové plochy jsou vyrobeny v daných tolerancích a na propálené straně nejsou znatelné otřepy po řezu. Celkové obrobení je dobré. Na zadní straně výpalku je znatelný častý výskyt okují a návarků, které jsou při dělení materiálu laserovou metodou běžné. Tyto okuje je nutné odstranit. Ruční odstraňování okují je poměrně obtížné proto se k tomuto účelu nejčastěji používají stroje s podélnými kartáči, které obrobek zbavují nežádoucích otřepů a okují. Okuje jsou okysličené plátky kovu (oxidy železa), které vznikají při tepelném tváření kovových slitin na bázi železa vlivem atmosférického kyslíku. Vznik okují je způsoben odletováním rozpáleného materiálu a následným chladnutím na rubové straně dílce.

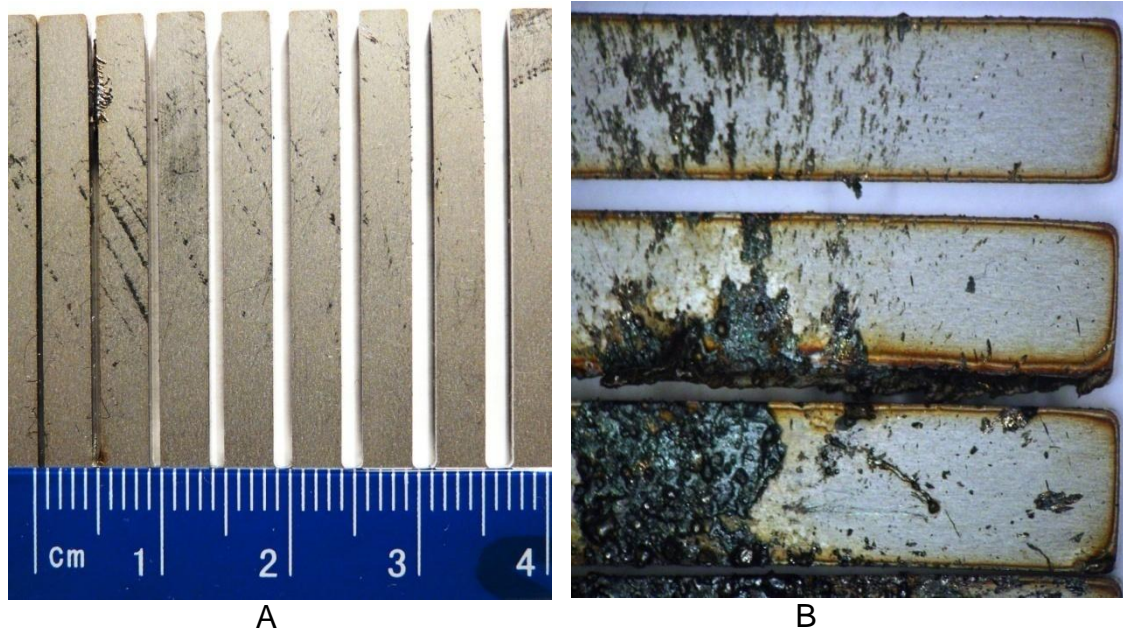


Obr. 5.9 Častý výskyt okují na rubové straně po obrábění CO₂ laserem



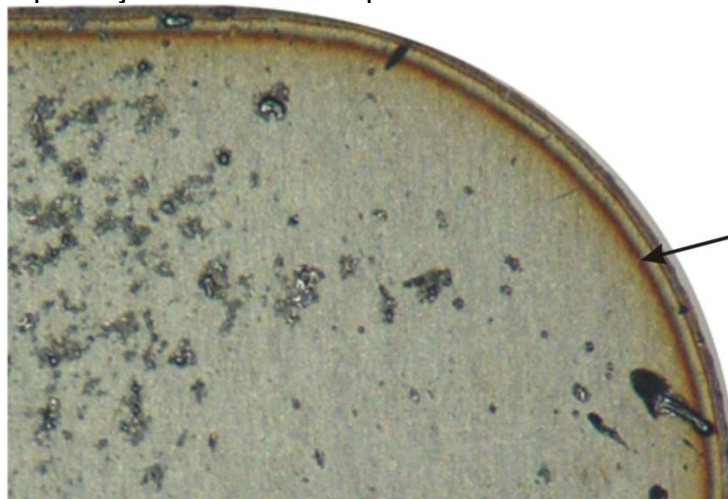
Obr. 5.10 Znárodnění ideálního tvaru ostrých hran

- III. Vyrobené drážky splňují rozměrovou přesnost až do rozměru 0,5 mm. Oblast drážek je nejvíce poznamenána výskytem okují, které se při řezání blízko u sebe umístěných drážek spékají a zasahují také do stran drážek. Rohová zakončení drážek nejsou pravoúhlého tvaru, je to způsobeno jejich malým rozměrem a geometrií laserového paprsku, po kterém zůstávají vnitřní i vnější hrany zaobleny. Jako další nevýhodu se u dělení materiálu laserovým paprskem ukázalo tepelné ovlivnění materiálu a jeho náchylnost na ohýbání a kroucení. Poslední drážka, která je vyříznuta, je zkroucena a její velikost na obou koncích je různá. Tento jev je patrný na obr. 5.11 A. Často se kroucení materiálu objevuje u dlouhých řezů, kde je materiál dlouhodobě vystaven většímu tepelnému zatížení. I s tímto nežádoucím prvkem se musí při dělení materiálu počítat a snažit se ho eliminovat např. zvětšením ohniskové vzdálenosti.



Obr. 5.11 A – Drážky vyrobené CO₂ laserem; B – Detail drážek s výskytem okují

Na detailním snímku můžeme také pozorovat tepelně ovlivněnou oblast, která je výrazně lemována hnědo-červenou konturou. Tato barva je způsobena odpařováním legujících prvků. Největší procentuální zastoupení legujících prvků v materiálu 17 240 mají chrom (19,5 %) a nikl (10,5 %), které se velkou měrou podílejí na zabarvení tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 5.12 Detail tepelně ovlivněné oblasti na vzorku vyrobeným CO₂ laserem

- V. Vyrobené ostré hrany nespĺňujú zadanou rozměrovou přesnost. První dvojce je o 7 mm kratší než udává výkres, přičemž vrcholy trojúhelníkových ploch nejsou stejně vysoké a jsou znatelně opáleny řezacím paprskem. Rozměrová přesnost by se dala zlepšit změnou dráhy nástroje. Nástroj by vyjížděl nad vrcholy, kde by udělal zpětnou smyčku a vracel by se zpět po druhé hraně trojúhelníku. Tato změna by však měla za následek značný nárůst strojního času, který by činil 25% z celkového strojního času. Tedy z 38 s by se celkový čas zvýšil na 47,5 s.



Obr. 5.13 Detail oblasti ostrých hran vyrobených CO₂ laserem



Obr. 5.14 Detail trojúhelníkové plochy s naznačenou zpětnou smyčkou nástroje

5.2.1 Hodnocení obrobeného povrchu [2]

U laserového řezání nelze měnit kvalitu řezu v různých stupních řezacích parametrů jako je tomu například u abrazivního paprsku. Vždy je nutno nastavit optimální řezné podmínky a zvolit správný řezný plyn a tím dosáhnout optimální kvality řezu. Povrch, který vytváří laserové řezání, je způsoben počátečním roztavením materiálu a jeho následným tuhnutím se tak vytváří hladký až „zrcadlový“ povrch.

I při použití dusíku jako řezného plynu se řezání neobešlo bez výskytu okují a návarků, které se vyskytují na spodní straně dílce. Hodnoty Ra naměřené na vzorku řezaném CO₂ laserem byly v rozmezí 0,8 ÷ 1,2 μm.

5.3 Elektroerozivní obrábění

5.3.1 Použitý stroj

K výrobě vzorku byla použita elektroerozivní drátová řezačka Fanuc A-11D, která je vyobrazená na obr 5.15. Základní technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 5.7



Obr. 5.15 Drátová řezačka Fanuc A-11D ^[33]

Tab. 5.7 Technické parametry stroje Fanuc A-11D ^[34]

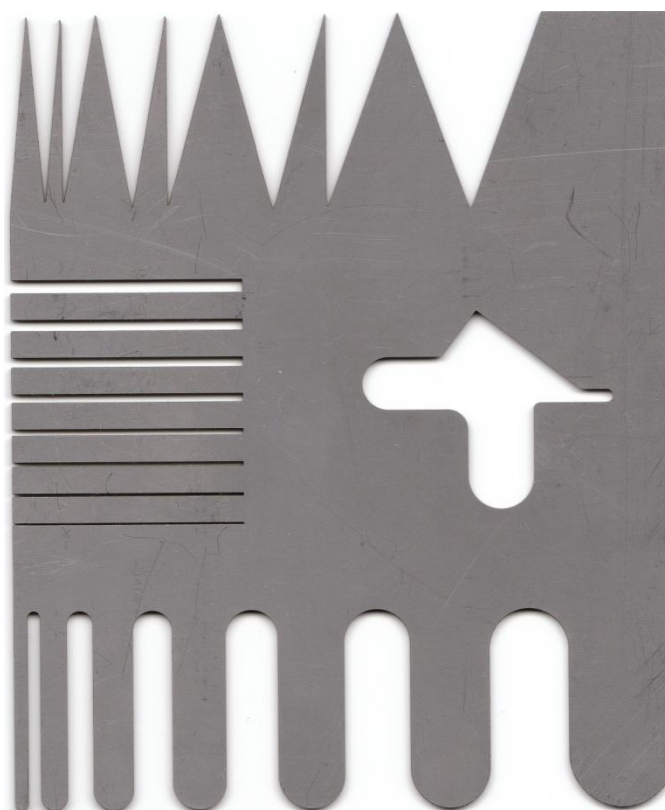
Rozměry stroje	3100 x 2900 x 2400 mm
Hmotnost stroje	3 670 kg
Metoda řezání	Pod hladinou / koaxiální výplach
Max. obrobek	1050 x 820 x 300 mm
Max. hmotnost obrobku	1000 kg
Pojezdy os X a Y	600 x 400 mm
Posuv osy Z	310 mm
Rychloposuv	0,9 m · min ⁻¹
Max. úhel řezu	±30° / 150
Průměry řezacího drátu	0,10 ÷ 0,30 mm

5.3.2 Výrobní aspekty

Tab. 5.8 Zjištěné hodnoty při výrobě vzorku

Strojí čas	5 hod
Čas obsluhy	0,5 hod
Řezáno	jedním hrubovacím řezem
Průměr řezacího drátu	0,25 mm
Řezná rychlost	7 mm · min ⁻¹
Počet vpichovacích bodů	2
Celková délka řezu	1810 mm
Hodinová sazba za práci stroje	600 Kč · hod ⁻¹ *
Cena vzorku	3 300 Kč

*hodinová sazba stroje je závislá od zákazníka a sériovosti výroby



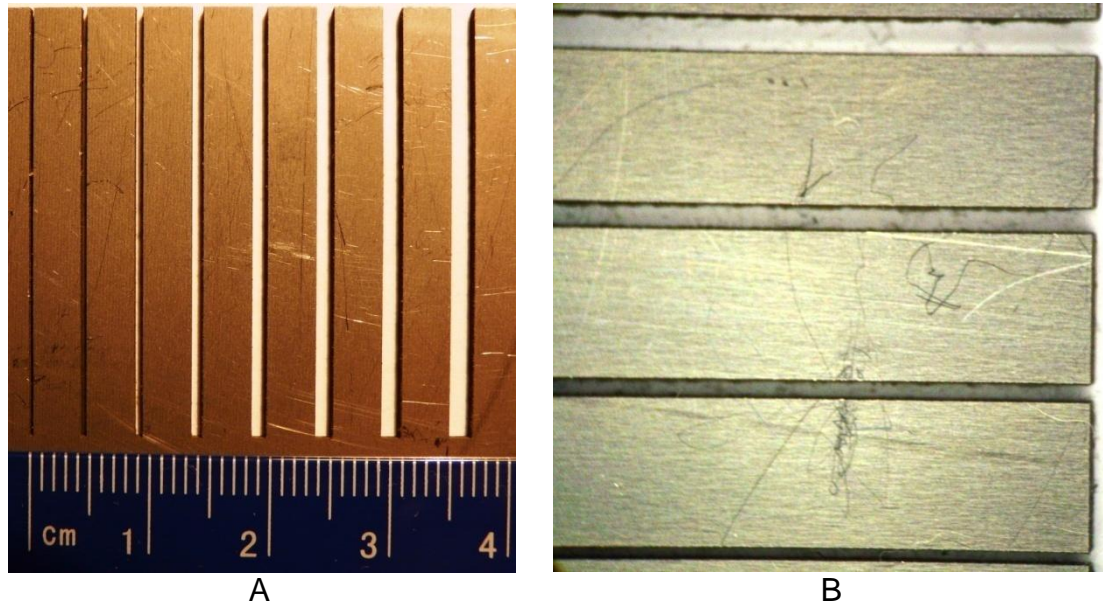
Obr. 5.16 Vzorek vyrobený elektroerozivním obráběním

5.3.3 Hodnocení rozměrové přesnosti

Tab. 5.9 Tabulka bodového hodnocení vyrobeného vzorku

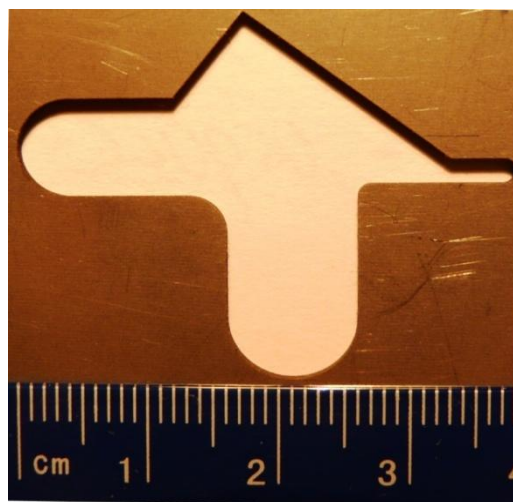
Měřená část vzorku	Počet bodů
I.	10
II.	10
III.	9
IV.	10
V.	8
Σ	47

- I. Celkové rozměry a obecné rovinné plochy jsou obrobena přesně dle zadání. Při výrobě vzorku bylo dosaženo přesnosti rozměrů $\pm 0,025$ mm. Řezná hrana je bez otřepů a nepotřebuje další úpravu.
- III. Vyrobené drážky splňují rozměrovou přesnost. Poslední vyrobená drážka je velikosti 0,25 mm tedy velikosti průměru použitého řezacího drátu. Vrcholy obdélníkových drážek mají mírný rádius, který je úměrný použitému řezacímu drátu a pouhým okem není takřka patrný.



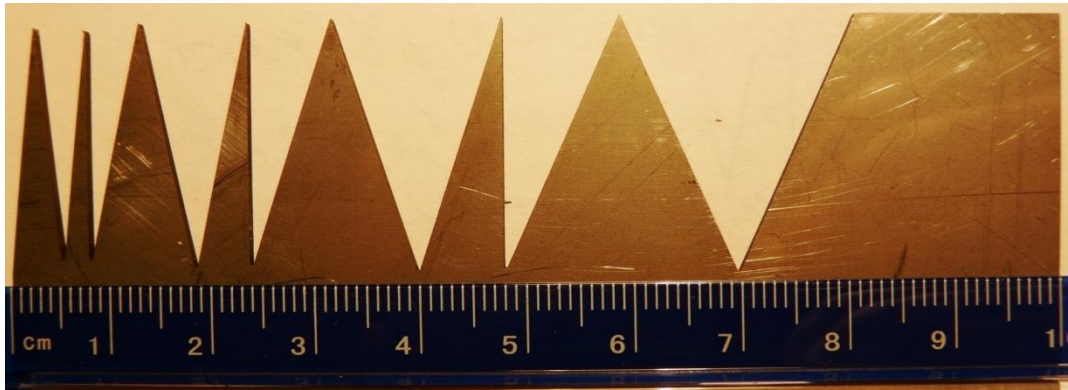
Obr. 5.17 A – Drážky vyrobené elektroerozivním dělením ; B – Detail drážek s nejmenším rozměrem

- IV. Vnitřní tvar je vyroben přesně. Na hraně vnitřního tvaru je patrný vpichovací bod, ale další celý řez je kontinuální a čistý. Pravý úhel je také přesný a pouze pod mikroskopem je patrný mírný rádius, který zanechává řezací drát. Vnitřní rádiusové hrany jsou hladké a struktura řezu není rozdílná od zbytku řezu.



Obr. 5.18 Vnitřní tvar vyrobený elektroerozivním obráběním

- V. Výroba trojúhelníkových plocha probíhala až do krajních úhlů, které byl schopen řezací drát zhotovit. Rozměrová přesnost je nejlepší ze všech vyrobených vzorků.



A



B

Obr. 5.19 A – trojúhelníkové plochy vyrobené elektroerozivním obráběním ; B – Detail vrcholů s nejmenšími úhly

5.3.4 Hodnocení obrobeneho povrchu

Řezání bylo provedeno jedním hrubovacím řezem, a tedy nebylo dosaženo maximální možné jakosti povrchu. Dosažená průměrná aritmetická úchylka povrchu R_a zhotovená drátovým řezacím nástrojem má hodnotu v rozmezí $2,71 \div 3,31 \mu\text{m}$.

5.4 Řezání pevnolátkovým laserem

Výroba vzorku pevnolátkovým (Fiber) laserem nemohla být provedena vzhledem k nedostupnosti této ještě stále se vyvíjející technologie.

5.4.1 Pevnolátkový stroj (Fiber)

Stroje, které jsou na trhu k dostání s technologií pevného vlákna. Pro ilustraci byl vybrán jeden reprezentant této kategorie.

Bystronic BySprint Fiber 3015

Nenáročná technologie vláknového laseru a vysoká účinnost umožňují dělit materiál s velmi nízkými provozními náklady. Výkon laseru 2 kW je schopen řezat materiál až do tloušťky 12 mm, ale je spíše předurčuje k opracování především tenkých plechů do 4 mm.



Obr. 5.20 BySprint Fiber 3015 od firmy Bystronic ^[35]

Výhody těchto strojů spočívají především:

- v nízkých provozních a servisních nákladech díky úspornosti energie
- v minimálních nárocích na místo (nejsou zde rozměrná chladicí zařízení)
- v rychlosti opracování a kvalitě řezné plochy
- možnost opracování i barevných kovů
- účinnost až 40 %
- životnost budících diod 50 000 – 100 000 hodin (dle zatížení)

Nevýhody při zavedení pevnolátkového laseru do výroby:

- prozatím nedostačující výkon
- omezení v opracovávání silnějších materiálů
- zdravý škodlivá vlnová délka pevnolátkového laseru (obsluha musí být více chráněna před únikem laserového paprsku)

5.5 Řezání plazmou

Výroba vzorku technologií plazmového řezání, nebyla provedena z důvodu nevhodně zvoleného vzorku. Tloušťka materiálu (1,5 mm) je příliš malá na to aby plazmový hořák mohl obrobit materiál bez nežádoucího propálení. Pro řezání takto tenkých materiálů se používají speciální řezací plyny, které jsou velmi drahé, a řezání je tak velmi nákladné. Plazmové řezání se s výhodou používá především pro dělení materiálu o síle 5 ÷ 150 mm. Viz kapitola 2.4 Řezání plazmovým paprskem.

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

6.1 Zhodnocení parametrů

Pro celkové zhodnocení a porovnání jednotlivých metod při výrobě vzorku byly zvoleny společné charakteristické parametry, uvedené v tab. 6.1. Zeleňou barvou jsou zvýrazněny nejlepší dosažené hodnoty a červenou naopak hodnoty nejhorší.

Tab. 6.1 Srovnání parametrů jednotlivých metod.

	AWJ	CO ₂ Laser	Fiber laser	Drátové řezání
Výrobní strojní čas	2 min 25 s	38 s	-	300 min
Cena stanovená firmou na hodinu práce stroje [Kč · hod ⁻¹]	2500	2200	-	600
Cena vzorku [Kč]	101	23	-	3300
Průměrná rychlost posuvu [mm · min ⁻¹]	699	8500	-	7
Průměr řezného nástroje [mm]	0,762	1,4	-	0,25
Bodové hodnocení vyrobeného vzorku	32	37	-	47
Dosažená průměrná aritmetická úchylka povrchu Ra [μm]	3,2	0,8 ÷ 1,2	-	2,7 ÷ 3,3
Náklady na pořízení stroje [Kč]	2,5 mil	13 mil	12,5 mil	6 mil

Z uvedených dat lze vyčíst, že nejkratšího výrobního času bylo dosaženo při obrábění CO₂ laserem, zároveň při nejnižších nákladech na výrobu jednoho kusu, které činí 23 Kč/ks. Pokud by, byl, vzorek vyráběn v sériových dávkách rozhodně by byla zvolena metoda laserového obrábění, která je ekonomicky nejvýhodnější, dosáhlo se při ní uspokojivých rozměrových přesností a také nejnižší hodnoty Ra.

Nepříjemnost, která, doprovází řezání laserem, jsou okuje a návarky, které se vyskytují na výstupu řezné spáry. Tyto nedostatky je nutné následnou operací odstraňovat. Tato operace není součástí zde uvedeného strojního času. A proto by se k němu musela přičíst. Odstranění okují se provádí ruční nebo strojní cestou. Ruční způsob odstraňování je velice časově náročný s ohledem na charakter okují. Pro strojní odstraňování je nutné pořízení odjehlovacího stroje do kterého musíme investovat.

Požizovací cena CO₂ laseru je nejvyšší z výše uvedených strojů. Je dána především rozměrnými částmi stroje, jako je chladicí zařízení a

úschovné boxy na asistenční a procesní plyny. Tato zařízení vytvářejí nemalou část z celkové ceny stroje. Výše uvedená cena je pouze orientační. Stroje jsou konstrukčně řešeny s ohledem na adaptivitu, aby bylo možné je co nejvíce přiblížit potřebám konkrétního výrobního procesu. Zákazník si poté může vybrat ze široké škály nabízených úprav, které mu budou nejvíce vyhovovat.

Jako alternativou k CO₂ laseru se jeví poměrně nová metoda pevnolákového laserového řezání (Fiber laser). Tato metoda byla dříve používána především pro laserové gravírování a značení. V dnešní době se již s výhodou používá také pro řezání především tenkých plechů, kde profituje z maximální energetické úspornosti díky nenáročnému vláknovému laseru a vyspělé strojní technologii. Výkon Fiber laseru není natolik velký, aby mohl konkurovat CO₂ laseru v řezání materiálů tloušťky od 6 mm více, ale v kategorii řezání tenkých plechů dosahuje až o 35 % rychlejšího výrobního času.

Přednosti Fiber laseru jsou především jednodušší ovládání a nastavení laserového paprsku, nižší nároky na celkové chlazení a vyšší produktivita při řezání materiálů s tloušťkou do 6 mm. Fiber lasery jsou pro své omezené využití zatím poměrně málo používané (v české republice prozatím není známa firma, která disponuje Fiber laserem) a tudíž nebylo možné vyrobit pomocí Fiber laseru vzorek, který by byl dále porovnáván. Tato technologie je prozatím rentabilní pouze při řezání tenkých plechů, pokud se však podaří zvýšit výkon laserového zařízení, bude to velmi silný konkurent CO₂ laserům, které jsou v tuto dobu na současném vrcholu svých technických možností.

Abrazivní vodní paprsek, byl schopen vzorek zhotovit, s velmi podobnými rozměrovými přesnostmi jako CO₂ laser, ale ukázal se při výrobě vzorku poměrně nekonkurence schopný z hlediska časové náročnosti výroby. Pro vyrobení vzorku metodou AWJ bylo zapotřebí stejného času jako pro výrobu bezmála čtyř kusů vzorku na CO₂ laseru, a také cena za jeden kus je 3,5 x vyšší. Výrobní strojní čas nelze urychlit, ale produktivitu stroje lze zvýšit použitím více řezných hlav, které podle svého počtu násobí počet vyrobených kusů.

Vodní paprsek je nenahraditelný především při obrábění nevodivých materiálů, jako je papír, plast či fólie. Další velký klad vodního paprsku je jeho pořizovací cena a náklady na provoz stroje, které jsou především za elektrickou energii na provoz vysokotlakého vodního čerpadla a CNC stolu.

Vzorek zhotovený drátovou elektrodou má jednoznačně nejlepší rozměrovou přesnost a kvalitu obrobení. Pokud srovnáme 5 hodin práce drátové řezačky a 38 sekund chodu CO₂ laseru, vyjde nám, že laser by vyrobil za strojní čas drátové řezačky 473 ks. Cena za obrobek je také 32x v případě AWJ a 140x v případě CO₂ laseru nižší než co stál vzorek vyrobený elektroerozivním obráběním. Z těchto důvodů se obrábění drátovou elektrodou s výhodou používá především pro šikmé řezy a složité tvary těžkoobrobitelných materiálů, při kterých se nehledí na rychlost obrobení, ale na rozměrovou přesnost a kvalitu obrobeného povrchu. Nejčastějšími zástupci výrobků, které jsou obráběny elektroerozivně, jsou stříhací nástroje.

Nejlepších výsledků mezi porovnávanými technologiemi dosáhl CO₂ laser, který i přes své nedostatky a nutnost dalšího opracování dílce prokázal nejekonomičtější a nejvíce rentabilní výrobu.

6.2 Náklady na provoz stroje a jeho údržbu

Dalšími důležitými aspekty pro výrobu je zhodnocení nákladů na údržbu a provoz stroje. Všechny tyto náklady obecně patří do režijních nákladů a jsou zahrnuty v nákladech na jednu hodinu provozu stroje. Pro výpočet je důležité znát hodnotu fixních a variabilních nákladů. Fixní náklady se nevztahují přímo na objem výroby, firma je musí vynakládat při každém objemu výroby (tedy i nulovém). I velký fixní náklad může být ekonomicky schůdný pro výrobu velkého množství výrobků, pokud zisk z každého výrobku od určitého okamžiku danou investicí zaplatí.

Naproti tomu variabilní náklady rostou spolu s objemem výroby. Tyto náklady v sobě vždy zahrnují něco, co se neoddělitelně váže s každým jednotlivým vyrobeným zbožím. Při výrobě je přirozeně snahou snížit variabilní náklady na minimum, neboť i jejich malé snížení se vždy násobí počtem kusů a v absolutních číslech může představovat výrazné úspory. Proto pro velké objemy výroby mohou být výhodné i nákupy drahých zařízení, pokud přinesou snížení variabilních nákladů.

Zde je uveden názorný ekonomický propočet, který ukazuje finanční náročnost jednotlivých technologií. Pro znázornění byly vybrány metody, které se jevíly při výrobě vzorku jako neekonomičtější a nejvíce rentabilní.

Tab. 6.2 Ukázkový ekonomický propočet výrobních nákladů CO₂ laser a AWJ

		AWJ	CO₂ laser
Invenstiční náklady	[Kč]	2 500 000	13 000 000
Technické zabezpečení	[Kč]	250 000	750 000
Celkové náklady	[Kč]	2 750 000	13 750 000
Rovnoměrné odepisování	[rok]	5	5
Odpis za první rok	[Kč]	302 500	1 512 500
Odpis v dalších letech	[Kč]	611 875	3 059 375
Roční náklady na údržbu stroje	[Kč]	50 000	200 000
Fixní náklady v prvním roce	[Kč]	352 500	1 712 500
Fixní náklady v dalších letech	[Kč]	661 875	3 259 375
Provozní náklady			
Elektrická energie	[Kč]	760 000	560 000
Spotřební látky (abrazivo a plyny)	[Kč]	300 000	550 000
Náhradní díly	[Kč]	35 000	82 000
Mzdy zaměstnanců	[Kč]	1 800 000	1 800 000
Režie	[Kč]	200 000	300 000
Celkové variabilní náklady	[Kč]	3 095 000	3 292 000
Celkové roční náklady	[Kč]	3 695 000	6 242 000

Směnnost		2 - 3 směny	2 -3 směny
Roční časový fond	[hod]	4 048 – 6 072	4 048 – 6 072
Hodinové náklady pracoviště	[Kč]	913	1542

Z výše uvedené tabulky je viditelný markantní rozdíl v nákladech na řezání vodním paprskem a CO₂ laserem. Náklady na koupi stroje a jeho údržbu jsou v případě vodního paprsku 5x nižší než koupě CO₂ laseru. Financování nákupu stroje může být rozdílné. Současný stav bankovního sektoru umožňuje poskytování půjček nebo podnikatelských úvěrů s navýšením 3 - 7 % na nákup nové technologie čím pomáhá k dalšímu rozvoji firmy. Další možností jak financovat nákup může být využití firemních rezerv určených pro rozvoj firmy. Tento způsob může být ovšem ošidný, pokud se firma vydá z velké finanční částky najednou a přijde krize či pokles poptávek může mít rázem existenční problémy.

Při úvahách o možném získání úvěru na nákup laserového zařízení bylo zjištěno, že banka není schopna dodat celou částku tedy zhruba 13 milionů Kč klientovy, který nemá dostatečné bonitní body a prověřenou historii. Maximální možný úvěr byl vykalkulován československou obchodní bankou na 8 milionů Kč s měsíční splátkou 63 263 Kč, při 5 % úrokové sazbě, po dobu 180 měsíců. Přeplatek, který zaplatí, klient banky činí 3 387 340 Kč. Z těchto údajů je tedy zřejmé, že firma při nákupu nové technologie bude využívat obě možnosti financování. Tedy využití cizích zdrojů, což by v tomto případě byl bankovní úvěr a vlastních zdrojů ve formě firemních rezerv určených k rozvoji firmy, kterými doplatí zbývající část nákladové ceny. Při takto nastavených podmínkách je nutné mít propracovaný podnikatelský záměr a mít jistotu o maximálním využití nového stroje. Je nutné totiž připočítat zisk zprostředkovatele úvěru k celkové ceně stroje.

Do celkové částky stroje je také zahrnuto technické zabezpečení, do kterého spadá převoz stroje jeho usazení a prvotní nastavení, které zajišťuje prodejce. U CO₂ laseru je tato částka znatelně vyšší z důvodu větších rozměrů stroje a větší nákladnosti zapojení chlazení, odvětrání a přívodu procesních plynů.

Dlouhodobý hmotný majetek patří mezi stálý majetek podniku. Nespoteřbovává se jednorázově, ale postupně se opotřebovává. Jeho opotřebení je vyjádřeno v odpisech. Při použití rovnoměrného odepisování spadá nákup nového stroje do odpisové skupiny č. 2, ve které se hmotný majetek odepisuje v prvním roce 11% z celkové ceny a v dalších letech 22,25%.

U nákladů na provoz stroje jsou technologie poměrně vyrovnané, větší spotřebu elektrické energie, má vodní paprsek. Jediným spotřebním artiklem u vodního paprsku je abrazivo, voda a elektrická energie, na rozdíl od laseru, který využívá navíc řadu asistenčních a provozních plynů k výrobě a také spotřebovává chladící medium k chlazení tepelně namáhaných dílů. Cena náhradních dílů a servisu je u laseru také vyšší. Důvodem je poměrně složitá fokusační část, která vyžaduje častější kontrolu a údržbu než řezné hlavice u vodního paprsku. Režie představují určité společné náklady, které se nevztahují přímo na jednici a je nutné je tedy rozvrhovat do tzv. režijní přírážky.

Do režie můžeme započítat doprovodné náklady spojené s odbytem, správou či výrobou.

Celkové roční náklady na provoz stroje jsou u laseru dvakrát vyšší a stejně tak i hodinové náklady na provoz pracoviště. Tyto náklady jsou však výrazně kompenzovány efektivností s jakou CO₂ laser pracuje. Jeho efektivita jak bylo dokázáno při výrobě vzorků je až 4 násobná při srovnání s metodou AWJ. Je zde také potřebné uvést, že vodní paprsek má mnohem širší spektrum využití, kdy vodním paprskem můžeme dělit v podstatě jakýkoliv materiál ať už to je kovový materiál, slitiny hliníku a mědi, bronz nebo více složkové kompozitní materiály.

Každá technologie nalézá své uplatnění někde jinde a je jen na vlastníkově kapitálu jakou má představu o využití stroje.

Analýza bodu zvratu

Bod zvratu vychází z kapacitního členění nákladů na fixní a variabilní. Slouží především ke zjištění:

- Kritického množství produkce
- Minimálních prodejní ceny
- Maximálně přípustných nákladů

Výpočet:

Při lineárním růstu nákladů a tržeb se vychází z těchto veličin.

q – množství výrobků

p – prodejní cena jednoho výrobku

PVN – průměrné variabilní náklady na jednotku produkce

FN – fixní náklady podniku za rok

Dále platí, že při neměnné prodejní ceně p se celkové tržby T vyvíjejí podle vztahu:

$$T = p \cdot q \quad (6.1)$$

Celkové náklady CN se vyvíjejí podle vztahu:

$$CN = FN + PVN \cdot q \quad (6.2)$$

Dále platí, že zisk Z je rozdílem mezi tržbou T a celkovými náklady:

$$Z = T - CN \quad (6.3)$$

Pokud je $T > CN$ pak vzniká zisk v opačném případě ztráta. Když jsou T a CN rovni, nevzniká ani zisk ani ztráta tj. Bod zvratu, množství produkce q_0 , při kterém k tomuto dochází, nazýváme kritické množství výroby.

Výpočet kritického množství:

$$T = CN$$

$$p \cdot q_0 = FN + PVN \cdot q_0$$

$$q_0 = \frac{FN}{(p - PVN)} \quad (6.4)$$

$(p - PVN)$ vyjadřuje příspěvek na úhradu fixních nákladů a zisku, je to rozdíl mezi jednotkovou prodejní cenou a průměrnými variabilními náklady.

Výpočet bodu zvratu bude dále aplikován na laserové centrum, pro které byly stanoveny náklady v tabulce 6. 2:

q = neznámá kvantita

$p = 2500 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$ (cena je stanovena jako hodinové náklady na provoz stroje + marže)

$PVN = 1542 \text{ Kč}$ (stanovené jako hodinové náklady na provoz stroje)

$FN = 3\,259\,375 \text{ Kč}$

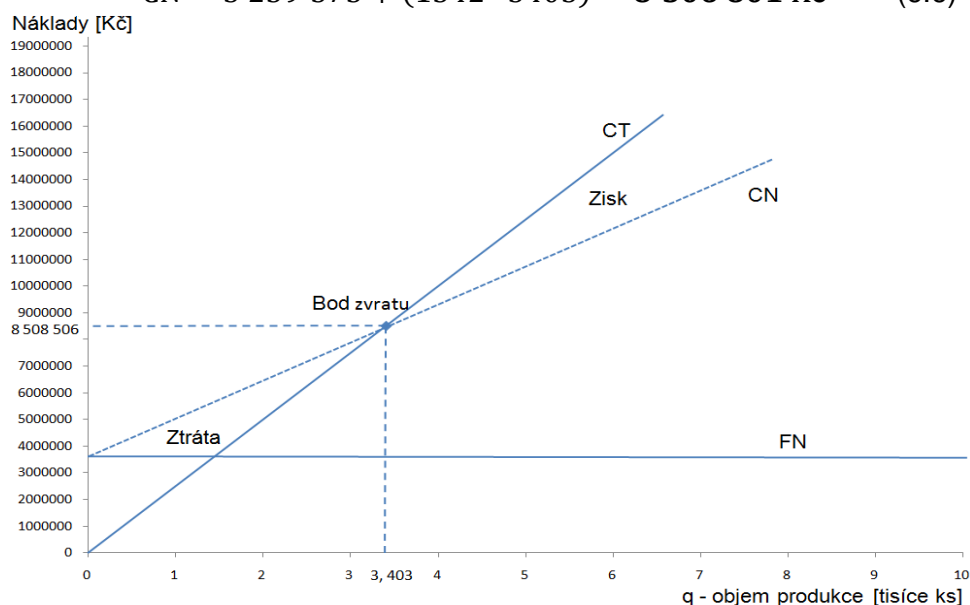
Kritické množství výroby:

$$q_0 = \frac{3\,259\,375}{(2500 - 1542)} = 3\,403 \text{ ks} \quad (6.5)$$

Z výše uvedeného výpočtu je zřejmé, že minimální množství produkce, které se bude vyrábět na laserovém stroji je 3 403 ks. Díky zvoleným vstupním proměnným se množství produkce rovná počtu hodin potřebných k výrobě. Aby výroba produkovala zisk, je nutné vytížení stroje alespoň ve dvousměrném provozu.

Celkové náklady:

$$CN = 3\,259\,375 + (1542 \cdot 3403) = 8\,506\,801 \text{ Kč} \quad (6.6)$$



Obr. 6.1 Bod zvratu při lineárním růstu nákladů a tržeb

Hodnoty, které byly vybrány pro sestavení ukázkového propočtu výrobních nákladů a analýzy bodu zvratu, jsou jen přibližné a nelze je brát jako vzor pro další výpočty.

6.3 Celkové zhodnocení

Pro co největší využitelnost a rentabilitu by měl laserový stroj pracovat alespoň ve dvousměnném provozu.

Pokud se vyhodnotí výše uvedené poznatky z výroby vzorků a porovnání nákladů na provoz stroje je zřejmé, že CO₂ laser je v dnešní době nejkomplexnější stroj pro dělení uhlíkatých a korozivzdorných ocelí. Z tohoto důvodu by se tato práce měla dále zaměřit na výběr vhodného stroje, který by splňoval kritéria stanovená firmou.

7 VÝBĚR VHODNÉHO CO₂ LASERU

Před samotným výběrem stroje je nutné zmínit, že pořízení laserové technologie je v současné době velmi nákladnou záležitostí a každý investor si musí důkladně rozmyslet, zda bude laserové centrum dostatečně vytížené, aby v co nejbližší době bylo schopné vytvářet zisk. K těmto rozhodnutím napomáhá sestavení podnikatelského a výrobního plánu, který je nutný ke správnému rozhodnutí.

7.1 Provoz a výroba laserového centra

7.1.1 Výrobní plán

Požadavek firmy na novou technologii zněl, že chce 60 % své dosavadní výroby přesunout na nový stroj. Na kterém, budou řezány především korozi-vzdorné plechy do tloušťky 15 mm, uhlíkatá ocel a slitiny hliníku do tloušťky 20 mm. Vzhledem k tomuto poměrně širokému spektru řezaných materiálů lze doporučit pro stanovené požadavky laserovou technologii, která bude dostatečně výkonná a přitom hospodárná.

7.1.2 Umístění laserového centra

Umístění laserového stroje má své náležitosti, bez kterých není možné plně využívat přesného obrábění a efektivnosti, které laser nabízí. Je nutné myslet především na dopravu materiálu ke stroji a jeho následné odebrání. Dělený materiál je nejčastěji ve formátu plechů, se kterým musí být vhodně manipulováno. K manipulaci se nejčastěji používají otočné a mostové jeřáby, pásové dopravníky a liftmastery.

Velikost laserových center bývá v průměru 10 x 7 m při hmotnosti 12 000 kg, což klade velké nároky na podlahu pod strojem. Minimální tloušťka betonové desky, na které bude laserový stroj umístěn, je 0,2 m. Při účinnosti CO₂ laseru, která je 10 ÷ 15 % je nutné myslet také na chladicí a větrací systém jelikož nevyužitá energie, generovaná při řezání se mění v teplo, které je potřebné odvádět.

Před koupí CO₂ laseru je nutné vyřešit problém s uskladněním plynu. Plyny se mohou uchovávat ve svazku 12 lahví. Tento způsob uchování je nejdostupnější, avšak doplnění plynových lahví je velmi nákladné. Majitel laserového centra musí znát stav naplnění lahví s plyny a včas je vyměnit za nové, předtím než plyn dojde úplně a stroj bude stát kvůli nedostatku plynu. Při použití svazku lahví vychází jeden litr plynu O₂ na 30 Kč.

Druhým způsobem k uchování plynu jsou POS zásobníky, které médium uchovávají v kapalně formě a při jeho spotřebování se z ní stává plyn. Mají vyšší kapacitu a snadněji se doplňují. Při tomto způsobu uchování se cena pohybuje okolo 10 Kč za jeden litr plynu O₂.

Pro uchování velkého množství plynu se využívají stacionární zásobníky. Výstavba stacionárního zásobníku je poměrně nákladná, jelikož je zapotřebí i stavebního povolení. V kapalně formě je médium uchováno i v tomto případě. Velkou výhodou při jejich použití je především cena, která se pohybuje okolo 3 Kč za litr O₂ a také telemetrie, která hlídá svat plynu v zásobníku.

7.1.3 Průzkum trhu výrobců laserových systémů

Trh s výrobcí laserových zařízení je velmi široký. Najdeme zde firmy, které se zabývají pouze kompletací strojů s využitím součástí od různých výrobců, které jsou volně prodejné, ale také nadnárodní společnosti, které mají s výrobou a výzkumem, laserových zařízení, mnohaleté zkušenosti a své renomé si vydobyli především díky kvalitnímu zpracování dodávaných strojů a jejich částí. K velkým přednostem těchto výrobců také patří profesionálně zvládnutý servis, který je velmi důležitý pro plynulý chod stroje.

Předními světovými výrobci laserových řezacích strojů jsou: ^[7]

- **Amada, Inc.** – je výrobce CNC obráběcích zařízení a strojů pro plechovou výrobu, sídlící v Americe a působící po celém světě. Tato firma nemá zastoupení v České republice, její nejbližší pobočka se nachází v Rakousku.
- **TRUMPF, Inc.** – Německý výrobce průmyslových CO₂ a Nd:YAG laserů a laserových systémů s výkonem od 700 W do 20 kW pro řezání, sváření a modifikaci povrchů. Tato firma má velmi široké zastoupení po celém světě. Zastoupení firmy v České republice je poměrně široké s hlavním sídlem v Praze.
- **Bystronic** – Švýcarský výrobce pro hospodárné obrábění plechů a jiných plochých materiálů. Specializuje se na služby pro řezání laserem, vodním paprskem a ohýbání. Jednu ze svých poboček má firma Bystronic také v Brně.
- **Electrox** – Firma sídlící ve Velké Británii, zabývající se výrobou laserových systémů pro řezání, sváření a značkování.
- **IPG photonics** – Světový výrobce, který produkuje převážně vláknové (Fiber) lasery a části laserových strojů.
- **PRC Laser** – Americká společnost vyrábějící výkonné CO₂ lasery pro řezání a sváření.

Při nákupu takto nákladné technologie rozhodně není vhodné šetřit, ale je doporučeno obrátit se na renomovaného výrobce. Každý z výše uvedených výrobců vyrábí své stroje ve formě modulů, které se mohou různě kombinovat, aby co nejvíce vyhověli požadavkům zákazníka.

7.2 Výběr stroje

Nejvýhodnější pro účely firmy by bylo spojení se s výrobcem, který má zastoupení v České republice. Tato spolupráce má více výhod např. odpadá slovní bariéra při komunikaci, komplexnost a pružnost opravy stroje nebo jeho servis apod.

Z této krátké charakteristiky mohou být zvoleny dva největší výrobci laserových strojů, kteří mají silné zastoupení také v tuzemsku. Jsou to firma Trumpf a Bystronic. Mezi těmito výrobci by měl být hledán nový stroj, který bude splňovat daná kritéria.

7.2.1 TRUMPF ^[36]

Výrobce strojů pro komplexní zpracování plechu a kovu. V oblasti průmyslových laserů a laserových systémů je TRUMPF firmou s velmi pokrokovou technologií a s největším podílem na trhu. Paleta produktů laserové techniky a laserů zahrnuje laserové řezací a svařovací zařízení pro ploché a 3D díly, vysoce výkonné CO₂ lasery, světelné lasery, pevnolátkové lasery a popisovací lasery.

CO₂ lasery TRUMPF

Laserová řada **TruFlow** se vyznačuje širokým výkonovým spektrem od 700 W do 15 kW. Tato řada je dále rozdělena do více kategorií, ve kterých se stroje rozlišují především podle své velikosti a dosahovaného výkonu.

- **TruLaser 3030 / 3040 / 3060** – tyto 2D laserové řezací stroje mají stejnou stavbu. Rozdílné jsou pouze velikostí pracovní oblasti, která se pohybuje od rozměru 3000 x 1500 mm v případě TruLaseru 3030 po rozměr 6000 x 2000 mm v případě TruLaseru 3060.

Maximální tloušťky řezaného materiálu jsou pro:

- konstrukční ocel 20 mm
- korozivzdornou ocel 15 mm
- slitiny hliníku 10 mm

Pro typ TruLaser se dodávají lasery TrueFlow s výkonem 2000 / 2700 / 3200 / 4000 W.

- **TreLaser 3530** – 2D laserový řezací stroj vychází z typu 3030. Používá však navíc zdvojený pohon osy x a přímé pohony os Xp a Y. Pro rychlé opracování menších členitých dílů jsou stroje vybaveny dodatečnou osou Xp, která umožňuje pohyb řezací hlavy v ose x o 300 mm bez nutnosti pojezdu celého příčnicku. To dovoluje vyšší dynamiku pojezdů díky nižším setrvačným hmotám.

- **TruLaser 5030 / 5040 / 5060** – Tyto stroje završují spektrum 2D laserových strojů. Hospodárnost a produktivitu zajišťuje použití lineárních pohonů pro osy Y a Z a také 5 kW laser.

Maximální tloušťky řezaného materiálu jsou pro:

- konstrukční ocel 25 mm
- korozivzdornou ocel 20 mm
- slitiny hliníku 12 mm

Tento typ stroje lze kombinovat se zařízením SortMaster, který slouží pro automatizované nakládání, odebírání a třídění jednotlivých dílců.

- **TruLaser 7025 / 7040** – umožňuje vysokorychlostní laserové řezání. Využívá lineárních pohonů pro extrémní zrychlení a umožňuje enormní nárůst produktivity vlivem použití dvou řezacích hlav. Výkon jednotlivých řezacích hlav je 3200 W.

Maximální tloušťky řezaného materiálu jsou pro:

- konstrukční ocel 20 mm
- korozivzdornou ocel 12 mm
- slitiny hliníku 8 mm

Vybraný laserový stroj

Jako nejvhodnější stroj od firmy Trumpf se pro dané účely doporučuje TrueLaser 5040, který disponuje dostatečným výkonem a dovoluje připojit zařízení SortMaster a LiftMaster. Jeho pracovní rozsah je 4000 x 2000 mm a jeho laser dosahuje výkonu 5000 - 7000 W. Technické údaje o stroji jsou uvedeny v tabulce 7.1.



Obr. 7.1 CO₂ laser firmy TRUMPF TruLaser 5030 ^[36]

Tab. 7.1 Technické údaje Laseru Trumpf TrueLaser 5030 / 5040 / 5060 ^[36]

	TrueLaser 5030	TrueLaser 5040	TrueLaser 5060
Pracovní oblast			
Osa X	3000 mm	4000 mm	6000 mm
Osa Y	1500 mm	2000 mm	2000 mm
Osa Z	115 mm	115 mm	115 mm
Maxi. rychlost posuvu	300 m · min ⁻¹	300 m · min ⁻¹	300 m · min ⁻¹
Rozměry stroje			
Délka	11 100 mm	13 000 mm	16 950 mm
Šířka	4 600 mm	5 400 mm	5 500 mm
Výška	2 400 mm	2 400 mm	2 400 mm
Hmotnost	12 000 kg	14 000 kg	16 000 kg
Max. tloušťky řezaného materiálu			
Použitý laser	TrueFlow 5000	TrueFlow 6000	TrueFlow 7000
Konstrukční ocel	25 mm	25 mm	25 mm
Korozivzdorná ocel	20 mm	25 mm	30 mm
Slitiny hliníku	12 mm	15 mm	20 mm

7.2.2 Bystronic ^[37]

Společnost Bystronic se zabývá nabídkou uživatelsky orientovaných systémů a služeb pro ohýbání a řezání laserem a vodním paprskem. S touto nabídkou jsou spojeny procesy pro řezání a ohýbání spolu s automatizací celého pří-sunu materiálů a toku dat.

Firma Bystronic nabízí kvalitní vláknové lasery pro opracování tenkých plechů, malá laserová zařízení pro standartní plechy a mimo jiné dvě řady výkonných CO₂ laserů.

CO₂ lasery Bystronic

- **BySpeed** – Univerzální stroj, který díky použití dynamického pohonu DHM (přímočarý spirálový motor) zdatelně snižuje výrobní časy a zvyšuje výkon. Řízený výkon laseru je od 4,4 kW až do 5,2 kW, tento stroj lze používat pro řezání materiálu až do tloušťky 25 mm.
- **BySpeed Pro** – Velmi produktivní stroj v celém rozsahu tloušťek materiálu. Je vyráběn s laserovým zdrojem o výkonu 4400 W nebo o výkonu 6000 W.
- **BySprint** – Flexibilně využitelné zařízení pro efektivní řezání laserem. Tento model se dodává s laserovými zdroji o výkonu 2200 a 3300 W což ho předurčuje k obrábění především tenkých plechů do 6 mm tloušťky.
- **BySprint Pro** – Vysokorychlostní laserové řezací zařízení pro maximální efektivitu a hospodárnost je osazeno laserovým zdrojem o výkonu 4400 W. Je schopno s použitím 3,75“ řezací hlavou s výhodou řezat tenké plechy a při použití 7,5“ řezací hlavy obrábět materiál až do tloušťky 20 mm.

Výrobce laserových technologií Bystronic je stejně jako jeho konkurent firma Trumpf, mezinárodní společnost, z mnohaletou praxí v oboru dělení materiálu. Provádí také vlastní výzkum a určuje tím směr, kam se budou metody nekonvenčního obrábění dále posouvat.

Vybraný laserový stroj

Jako vhodný stroj od firmy Bystronic, který plní zadané požadavky na CO₂ laser bylo doporučeno laserové centrum BySprint Pro, který svou rozmanitostí výrobních možností splňuje předpoklady pro vhodný výrobní stroj. Je vhodný jak pro obrábění tenkých plechů, tak i pro řezání silného materiálu. Stroj je znázorněn na obr. 7.2 a jeho technické údaje jsou uvedeny v tab. 7.2.

Obr. 7.2 CO₂ laser Bystronic BySprint Pro ^[37]Tab. 7.2 Technické údaje Laseru ^[37]

BySprint Pro s laserem ByLaser 4400	
Pracovní oblast	
Osa X	3048 mm
Osa Y	1524 mm
Osa Z	70 mm
Max. rychlost posuvu	140 m · min ⁻¹
Max. tloušťka řezaného materiálu	
Konstrukční ocel	20 mm
Korozivzdorná ocel	20 mm
Slitiny hliníku	12 mm
Rozměry stroje	
Délka	10 400 mm
Šířka	7 300 mm
Výška	2 380 mm
Hmotnost	12 000 kg

7.2.3 Odjehlovací stroj

Při výrobě vzorku CO₂ laserem byl zjištěn častý výskyt okují a návarků, které je nutné odstraňovat. S tímto neduhem je nutné při výrobě laserem počítat. Pro tyto účely jsou vytvořeny odjehlovací stroje, které zbavují dílce nečistot. V této podkapitole bude uveden stručný přehled odjehlovacích strojů, které budou dále doporučeny jako vhodné pro finální povrchovou úpravu dílce zhotoveného laserovým řezáním.

Na trhu je řada různých odjehlovacích zařízení ať už ručních nebo strojních. Liší se především způsobem odstraňování otřepů a nečistot, svou velikostí a také cenou.

Způsobů odjehlení je hned několik:

- pásem či kartáčem,
- abrazivním diskem,
- válcové s abrazivním pásem,
- mokry nebo suchy způsob,
- další jejich kombinace.

Velikost stroje se odvíjí od výrobku, který je nutné opracovat. Pokud se budou odjehlovávat malé dílce postačí jednoduchý pásový či kartáčový stroj. Pokud se však odstraňují otřezy z vnějších a vnitřních hran rozměrných dílců je nutné použít speciální stroje, které využívají např. oscilačního pohybu pracovní hlavy osazené brusnými lamelovými kotouči.

Cena se pohybuje u méně složitých strojů, v řádu desetitisíců avšak u rozměrných strojů, které odjehlují celé tabule plechu se cena pohybuje v řádech statisíců korun.

Pro ilustraci jsou zde uvedeny někteří výrobci odjehlovacích strojů:

- Fladder
- Bomar
- Exactcut
- Pilous
- Rasa



Obr. 7.2 Odjehlovací stroj Fladder 400 GYRO ^[37]

7.3 Závěrečné zhodnocení

Výše uvedené společnosti jsou předními výrobci laserových strojů a není jednoznačné, která z nich je lepší. Každá má své přednosti, stejně tak i stroje, které vyrábějí. Rozhodně nebude chybou zvolit jednoho z těchto výrobců. Cena strojů se nijak výrazně neliší a proto ani nebyla cílem hodnocení. Výsledná cena stroje, záleží především na dané konfiguraci, kterou si zákazník vybere. Tato cena se ale bude pohybovat okolo 500 000 €.

Obě firmy Trumpf a Bystronic mají technické i prodejní zastoupení v české republice a to přímo v Brně což velmi usnadňuje komunikaci při nákupu nového stroje.

K finálnímu doporučení je zvolena firma Trumpf, to především díky svému mnohaletému působení na poli s řezacími stroji, propracovanému servisu, historii a renomé firmy, dlouhotrvajícímu výzkumu v oblasti nekonvenčních technologií. Univerzální laserový řezací stroj z řady TruLaser 5030 je ideálním strojem, který splňuje firmou zadaná kritéria. Splňuje požadavky na výkonné obráběcí centrum, které je schopno efektivně a ekonomicky řezat různé druhy materiálů.

Na základě zkoumaných vzorků je také doporučen nákup odjehlovacího stroje, který zjednodušuje odstraňování okují, návarků a otřepů, které se mohou při řezání CO₂ laserem vyskytovat.

ZÁVĚR

Vzhledem ke stávající situaci na trhu, se společnosti zajímají především o stroje, které jsou schopny vyrábět dílce v nejkratších strojních časech a s minimálními náklady. Vzhledem k těmto požadavkům byly v experimentální části práce zhotoveny vzorky nekonvenčními metodami obrábění, které byly dále komparovány v rozměrové přesnosti, povrchové jakosti a rentabilitě výroby.

Na základě porovnání vyrobených vzorků se zjistilo, že nejkratšího výrobního času bylo dosaženo při obrábění CO₂ laserem, zároveň při nejnižších nákladech na výrobu jednoho kusu, které činí 23 Kč. Tato technologie se ukázala jako ekonomicky nejvýhodnější, dosáhlo se při ní uspokojivých rozměrových přesností a nejnižší hodnoty Ra. Při řezání CO₂ laserem se však vyskytovali okuje a návarky, které byly patrné na výstupu z řezné spáry. Tyto nedostatky je nutné následnou operací odstraňovat.

Technologie, která je schopna konkurovat CO₂ laseru při řezání materiálů do tloušťek 6 mm je vláknový (fiber) laser. Tato metoda však v České republice není dostupná. A proto nebyla dále porovnávána. Její omezené možnosti a zatím nedostatečné prověření ve výrobě nedovolují doporučit tuto technologii za vhodnou.

Výroba vzorku abrazivním vodním paprskem dosahovala podobných rozměrových přesností jako výroba CO₂ laserem, avšak cena za jeden kus a výrobní čas byly téměř čtyřnásobkem hodnot produkovaných CO₂ laserem. Při výrobě vzorku metodu AWJ došlo k výskytu otřepů na rubové straně vzorku, které by museli být dále odstraňovány ruční nebo strojní cestou.

Drátová řezačka dokázala vyhotovit vzorek s nejlepší rozměrovou přesností avšak za dobu 450-ti násobku výrobního času CO₂ laseru. Z těchto důvodů se obrábění drátovou elektrodou využívá především pro šikmé řezy a složité tvary těžkoobrobitelných materiálů, při kterých se nehledí na rychlost obrobění, ale na rozměrovou přesnost a kvalitu obrobeného povrchu.

Komplexně nejlepších výsledků mezi porovnávanými technologiemi dosáhl CO₂ laser, který se i přes své nedostatky a nutnost dalšího opracování dílce prokázal jako nejekonomičtější a nejvíce rentabilní výrobou.

Při porovnání ročních nákladů na provoz stroje a jeho údržbu byly náklady u CO₂ laseru dvakrát vyšší než u abrazivního vodního paprsku. Tyto náklady jsou však výrazně kompenzovány efektivností s jakou CO₂ laser pracuje.

Dle vybrané metody řezání byl zhotoven průzkum trhu, s výrobci laserových technologií. Na trhu dominují dva výrobci, kteří mají silné zastoupení také v České republice. Jsou jimi Bystronic a Trumpf. Z těchto vybraných výrobců byly dále doporučeny vhodné stroje, které splňují zadaná kritéria. Díky mnohaletým zkušenostem s výzkumem a s výrobou laserových strojů byla doporučena firma Trumpf jako nejvhodnější kandidát pro spolupráci ohledně nákupu nové technologie.

K doporučení byl dále zvolen odjehlovací stroj, který je na základě zkoumání vhodný pro kompletní výrobu CO₂ laserem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. **ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana.** *MM průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2011-02-28]. Nekonvenční metody obrábění. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>.
2. **Muzikant, Dušan.** 2009. *Bakalářská práce: SROVNÁNÍ ENVIROMENTÁLNÍCH ASPEKTŮ RŮZNÝCH NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ OBRÁBĚNÍ.* Brno : Muzikant Dušan, 2009.
3. **Kocman, Karel, Prokop, Jaroslav.** *Technologie obrábění.* 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005.
4. **MAŇKOVÁ, Ildikó.** *Progresívne technologie: Advanced methods of materiál removal.* Košice: Vienaľa, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
5. **FARMATEC, a.s** [online]. 2011 [cit. 2011-03-05]. *Rezani-laserem.* Dostupné z WWW: <<http://www.farmtec.cz/rezani-laserem>>.
6. **Laser a vše o něm** [online]. 2010 [cit. 2011-03-08]. *Fotky laserů.* Dostupné z WWW: <http://lasery.wz.cz/foto.html#laserove_rezani>.
7. **ŠULC, Jan.** *Plslaser* [online]. 8.10.2002 [cit. 2011-03-10]. *Lasery.* Dostupné z WWW: <<http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>>.
8. **Fermatmachinery** [online]. 2008 [cit. 2011-03-18]. *Elektroerozivní drátové řezání.* Dostupné z WWW: <<http://www.fermatmachinery.com/cs/392-pouziti-edm-technologie/1121-elektroerozivni-dratove-rezani.html>>.
9. **ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana.** *MM průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2011-03-18]. Nekonvenční metody obrábění. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil>>.
10. **ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana .** *MM průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2011-03-18]. Nekonvenční metody obrábění. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-3-dil>>.
11. **RIEDEL, Jiří .** *Semach.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-04-20]. *Chemické frézování.* Dostupné z WWW: <<http://www.semach.cz/clanek.html>>.
12. **ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana .** *MM průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2011-03-18]. Nekonvenční metody obrábění. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2>>.
13. **ŘASA, Jaroslav., POKORNÝ, Přemysl., GABRIEL, Vladimír.** *Strojnírenská technologie 3. 2. díl :Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění.* Praha : Scientia, 2001. 221 s. ISBN 80-7183-227-8.
14. **Baltic Steel Center** [online]. 2008 [cit. 2011-04-06]. *Waterjet.* Dostupné z WWW: <<http://www.waterjet.ee/htm/index.php?id=22>>.

15. **HUMÁR, Anton.** *Technologie I: : Technologie obrábění - 3. část.* [online]. [cit. 2011-04-06]. 57 s. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>>
16. **HUMÁR, Anton.** *Technologie I: : Technologie obrábění - 3. část.* [online]. [cit. 2011-04-06]. 57 s. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
17. **ROUBÍČEK, Martin.** Kriteria volby metody a trendy tepelného dělení materiálu [online]. 2007 [cit. 2011-04-20]. Dostupné z WWW: <http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/roubicek49122.pdf>
18. **ROUBÍČEK, Martin.** *Konstrukce* [online]. 1.11.2005, 7.4.2009 [cit. 2011-04-20]. Řezání CO2 laserem. Dostupné z WWW: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/rezani-co2-laserem-opticky-system-bifocal/>>.
19. **Rofin.com** [online]. 2009 [cit. 2011-04-20]. Cutting Processes. Dostupné z WWW: <<http://www.rofin.com/index.php?id=500&L=1>>.
20. **REICHL, Jaroslav ; VŠETIČKA, Martin .** *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2011-04-20]. Lasery kapalinové. Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=787>>.
21. **ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana .** *MM průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2011-03-18]. Nekonenční metody obrábění. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-4-dil>>.
22. **Commons.wikimedia** [online]. 2009 [cit. 2011-04-20]. Laser diode chip. Dostupné z WWW: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laser_diode_chip.jpg>.
23. **HAUZAROVÁ, Michaela.** *Analýza plazmového řezání.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Kubíček.
24. **Esab** [online]. 2009 [cit. 2011-04-20]. Imagine archive. Dostupné z WWW: <<http://www.esab.com/global/en/news/image-archive.cfm>>.
25. **KRAJNÝ, Zdenko.** *Vodný lúč v praxi.* Bratislava : Epos, 1998. 384 s. ISBN 80-8057-091-4.
26. **KISS-ALBERT, Márton .** *Commons.wikimedia* [online]. 2008 [cit. 2011-04-20]. Diagram of water jet cutter machine. Dostupné z WWW: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagram_of_water_jet_cutter_machine.png>.
27. **MediCom** [online]. 2008 [cit. 2011-05-22]. Vláknové lasery. Dostupné z WWW: <http://www.medicom.cz/p.php?p=prumyslove.aplikace.laser.laser_fibre>.
28. **Inox** [online]. 2009 [cit. 2011-05-22]. NEREZOVÁ OCEL 1.4301. Dostupné z WWW: <<http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>>.

29. **Akros** [online]. 2008 [cit. 2011-05-22]. Druhy nerezových ocelí. Dostupné z WWW: <<http://www.akros.cz/druhy-nerezovych-oceli/menu/>>.
30. **Water Jet Sweden** [online]. 2011 [cit. 2011-05-22]. Product Range. Dostupné z WWW: <<http://www.waterjetsweden.com/product.php>>.
31. **Thoma-cnc** [online]. 2011 [cit. 2011-05-22]. Blechbearbeitung. Dostupné z WWW: <<http://www.thomacnc.de/maschinenpark/blechbearbeitung/index.html>>.
32. **Truckma AB** [online]. 2011 [cit. 2011-05-22]. CO2 -Laser Cutting Systems. Dostupné z WWW: <<http://www.truckma.se/pdf/101.pdf>>.
33. **Semeko** [online]. 2009 [cit. 2011-05-22]. Elektroerozivní drátová řezačka. Dostupné z WWW: <<http://www.semeko.cz/nastrojarna/elektroerozivni-dratova-rezacka-fanuc->>>.
34. **Avu-edm** [online]. 2008 [cit. 2011-05-22]. FANUC. Dostupné z WWW: <http://www.avu-edm.wz.cz/1211882030__206.pdf>.
35. **Bystronic** [online]. 2011 [cit. 2011-05-22]. BySprint Fiber 3015. Dostupné z WWW: http://www.bystronic.com/cutting_and_bending/cz/cs/products/laser/BySprintFiber/index.php
36. **TRUMPF** [online]. 2010 [cit. 2011-05-22]. Trumpf Praha. Dostupné z WWW: <<http://www.cz.trumpf.com/>>.
37. **Bystronic** [online]. 2011 [cit. 2011-05-22]. Bystronic. Dostupné z WWW: <<http://www.bystronic.com>>.
38. **VALÍČEK, Jan**. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006 [cit. 2011-05-22]. Měření a analýza povrchu při řezání abrazivním vodním paprskem. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-a-analyza-povrchu-pri-rezani-abrazivnim-vodnim-paprskem>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
2D	/	Dvourozměrný
3D	/	trojrozměrný
AWJ	/	Abrasive Water Jet (abrazivní vodní paprsek)
CAD	/	Computer-aided design (počítačem podporované navrhování)
CAM	/	Computer-aided manufacturing (počítačem podporovaná výroba)
cca	/	Circa (přibližně)
CM	/	Chemical Machining (chemické obrábění)
CNC	/	Computer Numerical Control (číslíkové řízení počítačem)
CO ₂	/	Chemická značka oxidu uhličitého
d	mm	Průměr trysky
DHM	/	Direct Helical Motor (přímočarý spirálový motor)
EBM	/	Electron Beam Machining (obrábění paprskem elektronů)
ECM	/	Electro Chemical Machining (elektrochemické obrábění)
EDM	/	Electro Discharge Machining (elektroerozivní obrábění)
He	/	Chemická značka Helia
HRC	/	Tvrдость podle Rockwellovy stupnice
LBM	/	Laser Beam Machining (obrábění lasrovým paprskem)
N ₂	/	Chemická značka Dusíku
NC	/	Numerical Control (číslíkové řízení)
Ne	/	Chemická značka Neonu
NMO	/	Nekonvenční Metody Obrábění
PBM	/	Plasma Beam Machining (obrábění paprskem plazmy)
PCM	/	Photo Chemical Machining (fotochemické obrábění)
Ra	μm	Střední aritmetická úchylka profilu
TEA	/	Druh příčně buzeného laseru
USM	/	Ultrasoni Machining (ultrazvukové obrábění)
WJM	/	Water Jet Machining (obrábění vodním paprskem)

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Katalogový list společnosti TRUMPF
Příloha 2 Katalogový list společnosti Bystronic
Příloha 3 Výrobní výkres

Příloha 1

Katalogový list společnosti TRUMPF

TruLaser Series 5000

Productive machines.

These powerhouses set high standards of productivity and cost efficiency.

The machines in the TruLaser Series 5000 offer convincingly high productivity and minimal downtime. This is achieved by dynamic drives and high axis speeds, along with functions such as the single cutting head strategy and the automatic nozzle changer. You also have a choice of laser – between the universal professional, TruFlow and the thin sheet metal specialist, TruDisk.

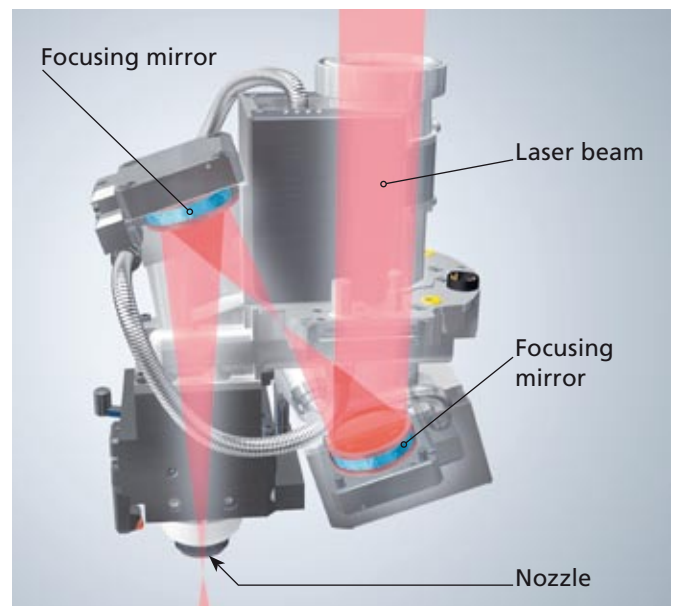
TruLaser Series 5000: Benefits at a glance.

- 1 Highest productivity for thin sheet metal or universal cutting.
- 2 High axis speed and positioning dynamics.
- 3 Minimal downtime.
- 4 Great material variety.
- 5 Various automation options.

Real powerhouses.

Our productive universal machines with the TruFlow laser effortlessly master thin and thick sheets. With power outputs of up to 7,000 W they can even cut through 30 mm thick stainless steel. You can configure your ideal machine from a variety of options. These include:

- **Mirror cutting head technology package** – for robust and low-maintenance focusing without a lens.
- **Nozzle changer** – for automatic nozzle exchange.



Mirror cutting head: cutting without a lens.

With the TruLaser 5030 fiber TRUMPF offers you the most cost-efficient solution for productive thin sheet processing. Thanks to its dynamic drive system the machine makes full use of the high feed rates delivered by the fiber-guided, energy-efficient TruDisk laser.

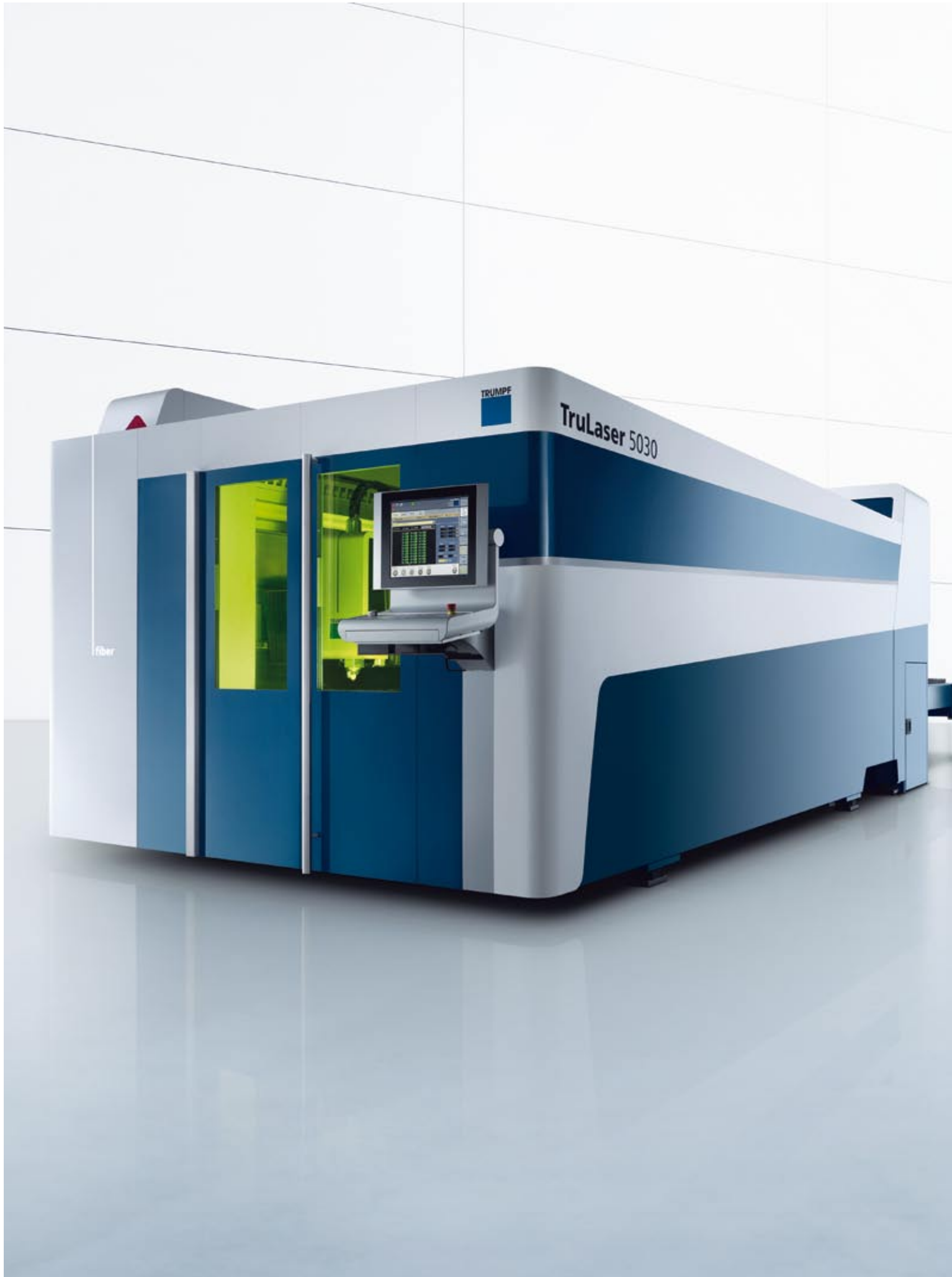


Benefits of a solid-state laser:

- Feed rates up to three times higher in thin sheet.
- Excellent energy efficiency.
- Material variety expanded to include copper and brass.
- Maintenance-free beam guidance.



TruLaser 5030 with TruFlow 7000.



Technical data				
	TruLaser 5030	TruLaser 5040	TruLaser 5060	TruLaser 5030 fiber
Working range				
X axis	3000 mm	4000 mm	6000 mm	3000 mm
Y axis	1500 mm	2000 mm	2000 mm	1500 mm
Z axis	115 mm	115 mm	115 mm	115 mm
Workpiece				
Max. weight	900 kg	1800 kg	2800 kg	900 kg
Max. speeds				
Simultaneous	300 m/min	300 m/min	300 m/min	235 m/min
TRUMPF CNC control	Siemens Sinumerik 840D	Siemens Sinumerik 840D	Siemens Sinumerik 840D	Siemens Sinumerik 840D SL
Accuracy^[1]				
Position deviation Pa	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm
Average position range Ps ^[1]	0.03 mm	0.03 mm	0.03 mm	0.03 mm
Dimensions and weight^[2]				
Length	11100 mm	13000 mm	16950 mm	9400 mm
Width	4600 mm	5400 mm	5550 mm	3000 mm
Height	2400 mm	2400 mm	2400 mm	2400 mm
Weight	12000 kg	14000 kg	16000 kg	12700 kg
Available lasers	TruFlow 5000/6000/7000	TruFlow 5000/6000/7000	TruFlow 5000/6000/7000	TruDisk 3001

Laser data	TruFlow 5000	TruFlow 6000	TruFlow 7000	TruDisk 3001
Max. power	5000 W	6000 W	6000 W	3000 W
Wavelength	10.6 µm	10.6 µm	10.6 µm	1.03 µm

Max. sheet thickness				
Mild steel	25 mm	25 mm	25 mm	20 mm
Stainless steel	20 mm	25 mm	30 mm	15 mm
Aluminum	12 mm	15 mm	20 mm	15 mm
Copper	–	–	–	6 mm
Brass	–	–	–	6 mm

Power consumption for the entire system^[3]	11–72 kW	11–89 kW	43–110 kW	13–29 kW
--------------------------------------------------------------	----------	----------	-----------	----------

^[1] The attainable accuracy depends on, among other things, workpiece type, its pretreatment, sheet size, and the position in the working area. In accordance with VDI/DGQ 3441, measured length 1 m.

^[2] Approximate values. The exact figures can be obtained from the valid installation plan.

^[3] Including suction, control, HF generator and cooling system, depending on the machining program.

Příloha 2

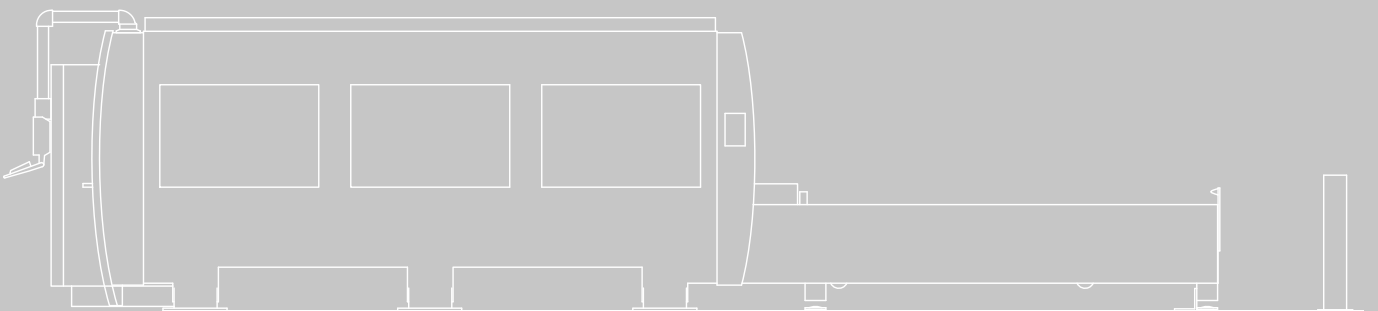
Katalogový list společnosti Bystronic

Bystronic

efficiency in laser cutting

BySprint Pro

Jedinečné vysokorychlostní laserové
řezací zařízení pro maximální efektivitu
a hospodárnost



BySprint Pro – bleskurychlý a hospodárný

Rekordní rychlost při řezání tenkých plechů a maximální hospodárnost jsou hlavní přednosti laserového řezacího zařízení BySprint Pro. Vysokorychlostní plazmové řezání v kombinaci s dynamikou stroje zabezpečuje maximální efektivitu zařízení, které uživatele nadchne nejkratšími časy řezání. Z minimálních provozních nákladů a mimořádné výkonnosti celého systému vyplývá hospodárné zpracování zakázek. Tím zákazník dosáhne významné konkurenční výhody.



Důležité komponenty

Perfektní souhra vyspělých a vzájemně sladěných jednotlivých komponentů tvoří základ prvotřídního strojového systému. «Vše z jednoho zdroje», tak zní úspěšná zásada společnosti Bystronic, která platí i u laserového řezacího zařízení BySprint: Všechny prvky systému důležité pro bezpečnost procesu pocházejí z vlastního vývoje společnosti Bystronic a jsou zárukou spolehlivého řešení a maximálních výhod pro zákazníka.



Laserový zdroj ByLaser 4400

Díky vysoké účinnosti, neopotřebitelnému buzení a kompresoru s magnetickým uložením, rovněž neopotřebitelnému, má ByLaser 4400 o výkonu 4,4 kW velmi nízké provozní náklady. Laserový zdroj navíc zaručuje konstantně vysokou kvalitu paprsku.

Díky použití LASERMIX® 312 jsou náklady nižší než při použití samostatných plynů. Kromě toho je zaručena konstantní kvalita laserového plynu a je zapotřebí pouze jedna láhev s plynem.



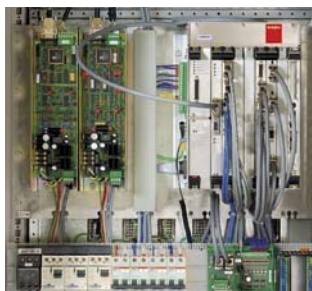
Řezací hlava

Krátké doby montáže umožňují maximální vytížení zařízení BySprint Pro při velmi krátkých vedlejších dobách. Zařízení je standardně dodáváno s 5" a 7,5" a dále volitelně s 3,75" řezací hlavou. Řezací hlava průměru 3,75" je optimalizovaná pro použití na tenké plechy a zajišťuje uživateli při odpovídajících zakázkách o 15 až 40 % kratší doby řezání. Zařízení BySprint Pro je vybavené rychlovýměnným systémem umožňujícím výměnu jakékoli řezací hlavy během několika sekund.



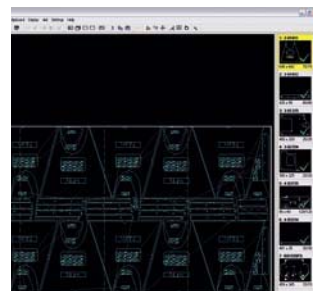
Ovládací terminál

Na dotykové obrazovce ovládacího terminálu jsou zobrazeny pouze právě potřebné funkce. Navigace v menu je díky tomu snadná a uživatelsky pohodlná. Terminál a ovládací plocha jsou navrženy podle přísných ergonomických zásad.



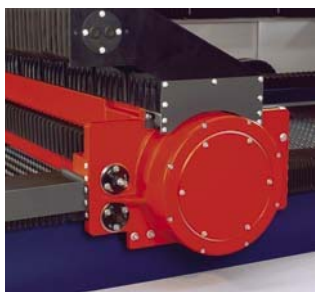
Vysokovýkonné řízení ByVision

Vysokovýkonné řízení ByVision společnosti Bystronic splňuje kritéria jednoduchosti a rychlosti. Do stroje lze během několik sekund přenést i velké plány řezů. Komponenty hardwaru se nacházejí v jediné kompaktní skřínce, kterou lze při údržbě ve velmi krátkém čase vyměnit.



CAD/CAM software Bysoft

Bysoft je softwarový balík CAD/CAM vyvinutý společností Bystronic pro řezání a ohýbání. Software je optimálně přizpůsobený pro zařízení Bystronic a zajišťuje uplatnění použitých technologií řezání a ohýbání v plném rozsahu. Bysoft je uživatelsky komfortní a prakticky orientovaný software, který díky rychlému programování ideálně slouží pro přípravu výroby. Funkce přizpůsobené požadavkům a modulární softwarová struktura systému v maximální míře usnadňují práci uživatele.



Pohon

Přímý dynamický pohon zaručuje i při nízkých otáčkách vysoké hodnoty krouticího momentu a zrychlení. Výsledkem je rychlé a přesné polohování. To společně s velmi vysokými rychlostmi řezání, kterých je dosahováno díky vysokorychlostnímu plazmovému řezání, umožňuje vyřezat se zařízením BySprint Pro tolik dílů jako nikdy dříve.

Možnosti sestavení

- Řešení manipulace a automatizace, zejména automatického nakládání a vykládání plechu, automatického třídění dílů, automatického skladu plechu
- Různé rošty stolu
- Dotykové snímání pro řezání nevodivých materiálů

Servis a podpora

Vyspělá technologie a rozsáhlé know-how společnosti Bystronic jsou zárukou vysoké spolehlivosti systému. V případě potřeby společnost Bystronic se svou hustou globální sítí zajišťuje dostupnost jak dílů, tak i specializovaných servisních pracovníků. Kromě údržby, dodávky dílů a oprav rovněž nabízíme jednotlivým zákazníkům jak školicí programy, tak i podporu v otázkách hardwaru, softwaru a obsluhy. Díky tomu naši klienti využít všechny možnosti systému pro zvýšení své konkurenceschopnosti.

Oblasti využití

Zařízení BySprint Pro je bleskurychlé zařízení a zejména při zpracování tenkých plechů představuje třídu samu pro sebe. S 4,4 kW disponuje dostatečným výkonem laseru a lze ho flexibilně použít pro celé spektrum tloušťek plechu až do 20 mm pro nejrůznější aplikace. Se zařízením BySprint Pro je uživatel vždy o krok napřed před konkurencí.

Elektrotechnický průmysl

Adaptérová deska
1,5 mm, ušlechtilá ocel



Výroba strojů a zařízení
Kryt tlačítek, osobní výtah
1 mm, ušlechtilá ocel

Výroba letadel

Kryt
1 mm, hliník





Výroba strojů

Základová deska s řídicí křivkou
6 mm, konstrukční ocel



Hnací technika

Víceramenný kotouč spojky
20 mm, konstrukční ocel

Výroba strojů

Příruba náboje
3 mm, konstrukční ocel



Výhody pro zákazníka

- Vysokorychlostní plazmové řezání s velmi vysokými rychlostmi ve srovnání s aktuálním standardem na trhu
- Nejnovější technologie řezání a zápi-
chu, jako je RPP, zajišťují maximální
produktivitu
- Nová funkce Power Saving Mode snižuje
spotřebu proudu systému pro řezání lase-
rem v pohotovostním režimu až o 50 %
- Velmi nízké provozní náklady díky neo-
potřebitelnému buzení a magneticky ulo-
ženému nepotřebitelnému kompresoru
- Mimořádně krátká doba rozběhu
pouze pouze pět min
- Vysoké rychlosti řezání díky pneumatic-
kému řezání do tloušťky materiálu 3 mm
- Nižší náklady a konstantně vysoká
kvalita laserového plynu díky použití
LASERMIX® 312

Tento prospekt zobrazuje díly, které nejsou součástí standardní výbavy, ale jsou dostupné jako volitelné. Pro lepší zobrazení detailů stroje na snímku byly bezpečnostní kryty otevřeny, resp. částečně odstraněny. Změny rozměrů, konstrukce nebo výbavy jsou vyhrazeny. Technické údaje viz samostatný dokument.

Certifikované podle ISO 9001

Společnost Bystronic nabízí po celém světě uživatelsky orientované systémy a služby v oblasti procesů řezání laserem, vodním paprskem a ohýbání. Zařízení je mimořádně hospodárné, výkonné a spolehlivé.

Best choice.



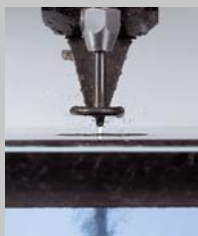
Řezání laserem

Zařízení pro řezání laserem na inovativní zpracování různých materiálů a vyřezání různých tvarů



Ohýbání

Stroje na mimořádně přesné zpracování plechových dílů na principu tříbodového ohýbání a dvoubodového ohýbání



Řezání vodním paprskem

Zařízení pro řezání vodním paprskem na řezání kovů, skla, plastů, keramiky a mnoha dalších materiálů



Automatizace

Vysokovýkonné manipulační a automatizační řešení od jednoduchého přiváděcího systému až po plně automatickou jednotku pro obrábění laserem s integrovaným skladovacím systémem



Software a řízení

Uživatelsky orientované programování a obsluha pomocí uživatelských aplikačních programů a rozhraní pro systémy CAD a ERP



Servis a podpora

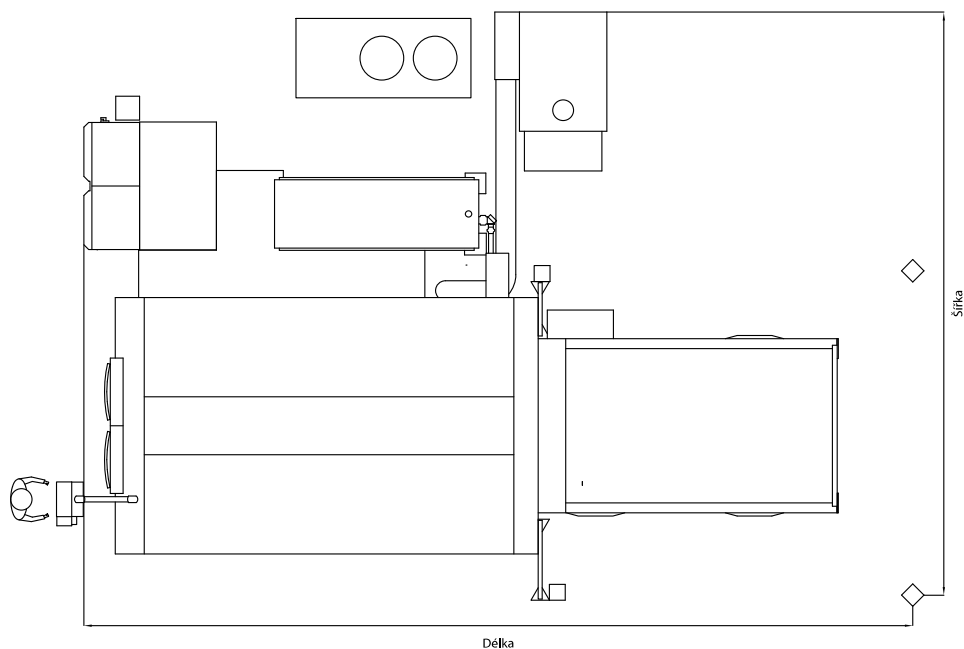
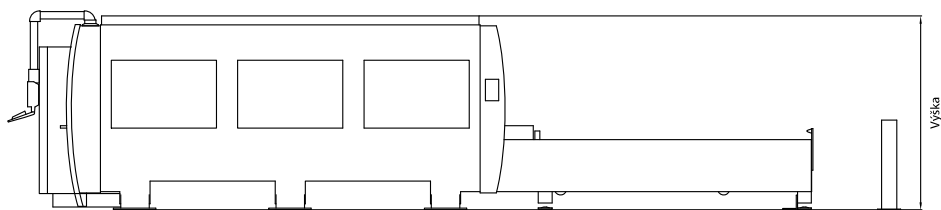
Kompetence a podpora zákazníků prostřednictvím celosvětově dostupné poprodejní podpory. Lokální komunikační partneři, rychlé dodávky náhradních dílů a profesionální školení

Více informací

bystronic.com

Technické údaje

BySprint Pro



s ByLaser 4400

Délka	10 400 mm
Šířka	7 300 mm
Výška	2 380 mm

Volitelná střecha

Jmenovité rozměry plechu	x = 3000 mm y = 1500 mm
Rozsah řezání	x = 3048 mm/ 120 in y = 1524 mm/ 60 in z = 70 mm/2,75 in
Maximální rychlost polohování, paralelní osy x, y	100 m/min
Maximální rychlost polohování, simultánně	140 m/min
Maximální zrychlení osy	12 m/s ²
Odchylka polohování Pa*	± 0,1 mm
Rozptyl polohy Ps*	± 0,05 mm
Přesnost detekce okraje	± 0,5 mm
Maximální hmotnost obrobku	750 kg
Hmotnost stroje**	12 000 kg
Podklad	normální armovaná průmyslová podlaha podle plánu instalace
Řezací hlavy	5" a 7,5"
Ovládací panel	s 15" dotykovou obrazovkou, klávesnicí a ručním ovládačem
Mechanika	DVD-RW, USB 2.0
Připojení sítě	přípoj RJ45 10/100 Mbit/s

Laserové zdroj CO ₂	ByLaser 4400
--------------------------------	--------------

Výkon	4400 W
Vlnová délka	10,6 μm
Polarizace	kruhová
Frekvence impulzů	1–2500 Hz
Maximální tloušťka plechu***	
Konstrukční ocel	20 mm
Ušlechtilá ocel	20 mm
Hliník	12 mm
Maximální spotřeba elektrické energie celého zařízení****	51 kW

* Podle VDI/DGQ 3441 délka měření 1 m. Přesnost plechového dílu závisí na materiálu a jeho předběžné úpravě, velikosti tabule a jejím zahřívání.

** Kompletní laserové řezací zařízení s výměnným stolem bez odsávání, chladičového zařízení a automatiky

*** Pro řezání maximálních tloušťek musí být splněny následující podmínky:

- Optimálně ošetřované a nastavené laserové řezací zařízení
- Materiály musí dosahovat kvality požadované společností Bystronic (laserové materiály)

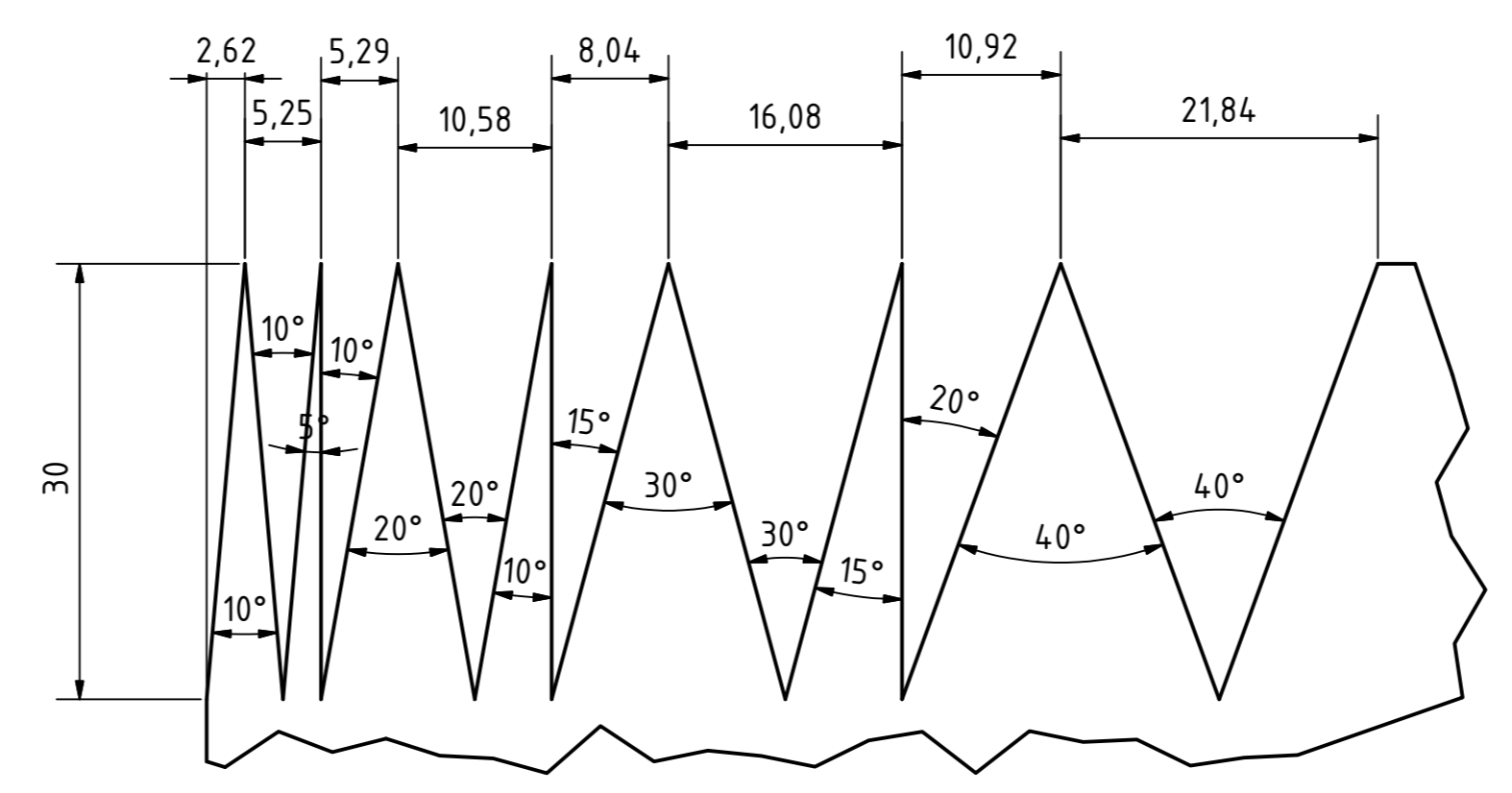
**** Celé zařízení s odsáváním a chladičovým zařízením

Změny rozměrů, konstrukce nebo vybavy jsou vyhrazeny. Certifikované podle ISO 9001

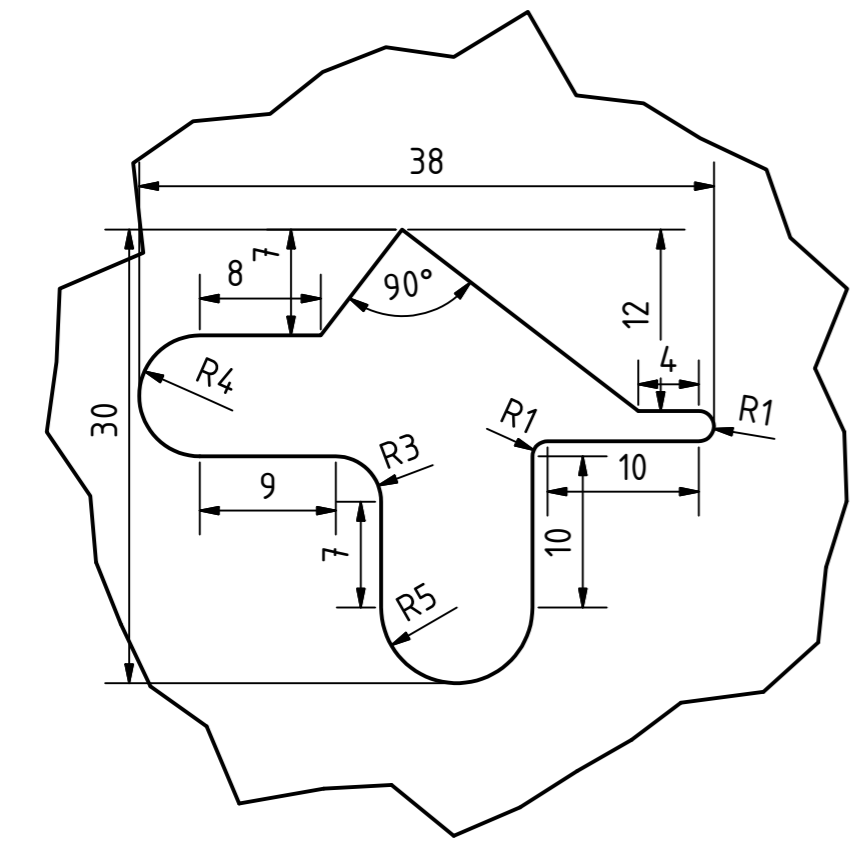
Bystronic Best choice.

Laser | Ohýbání | Vodní paprsek
bystronic.com

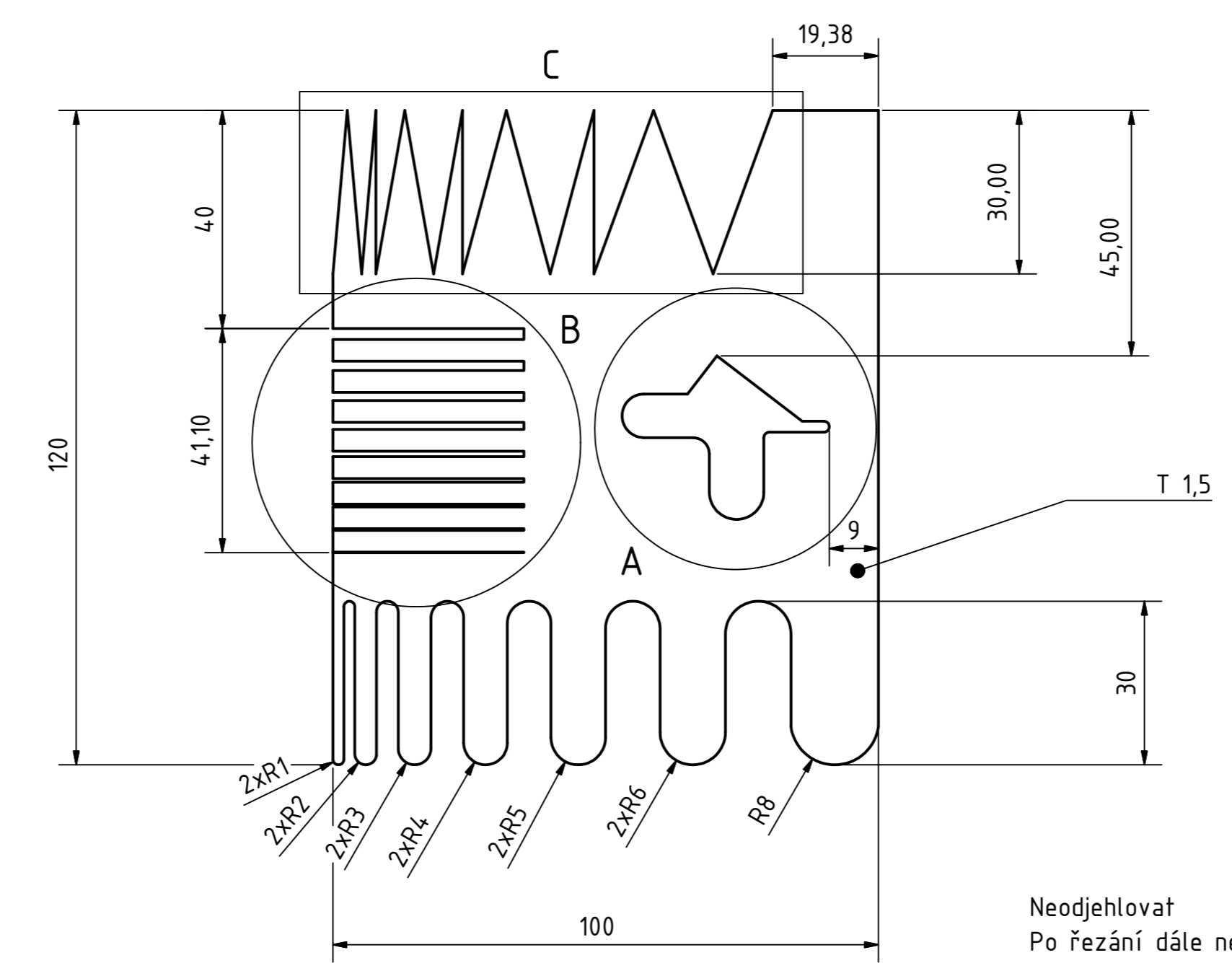
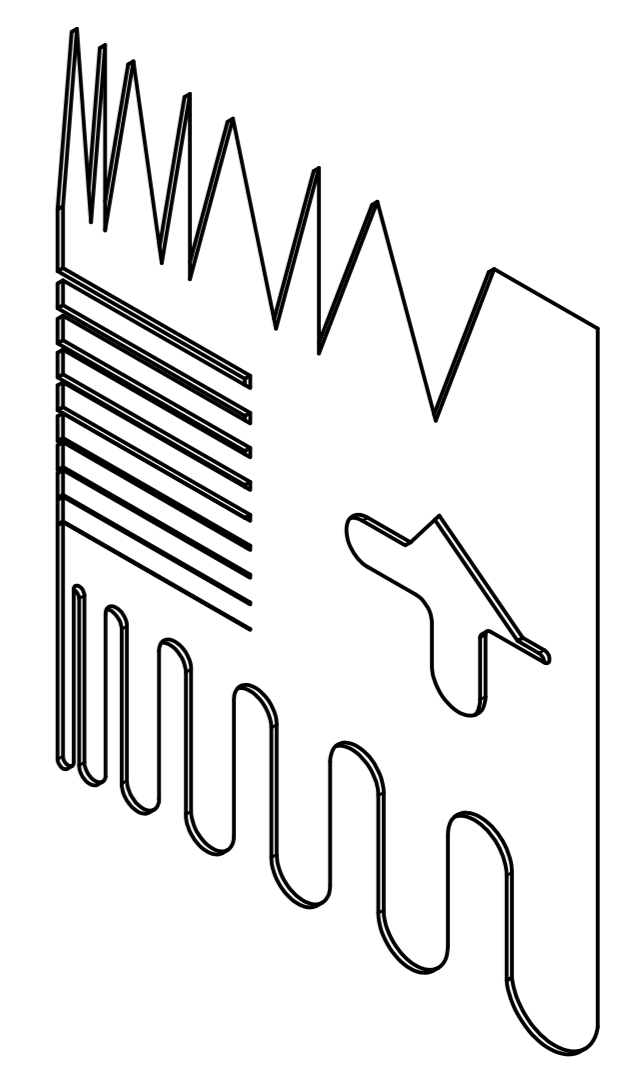
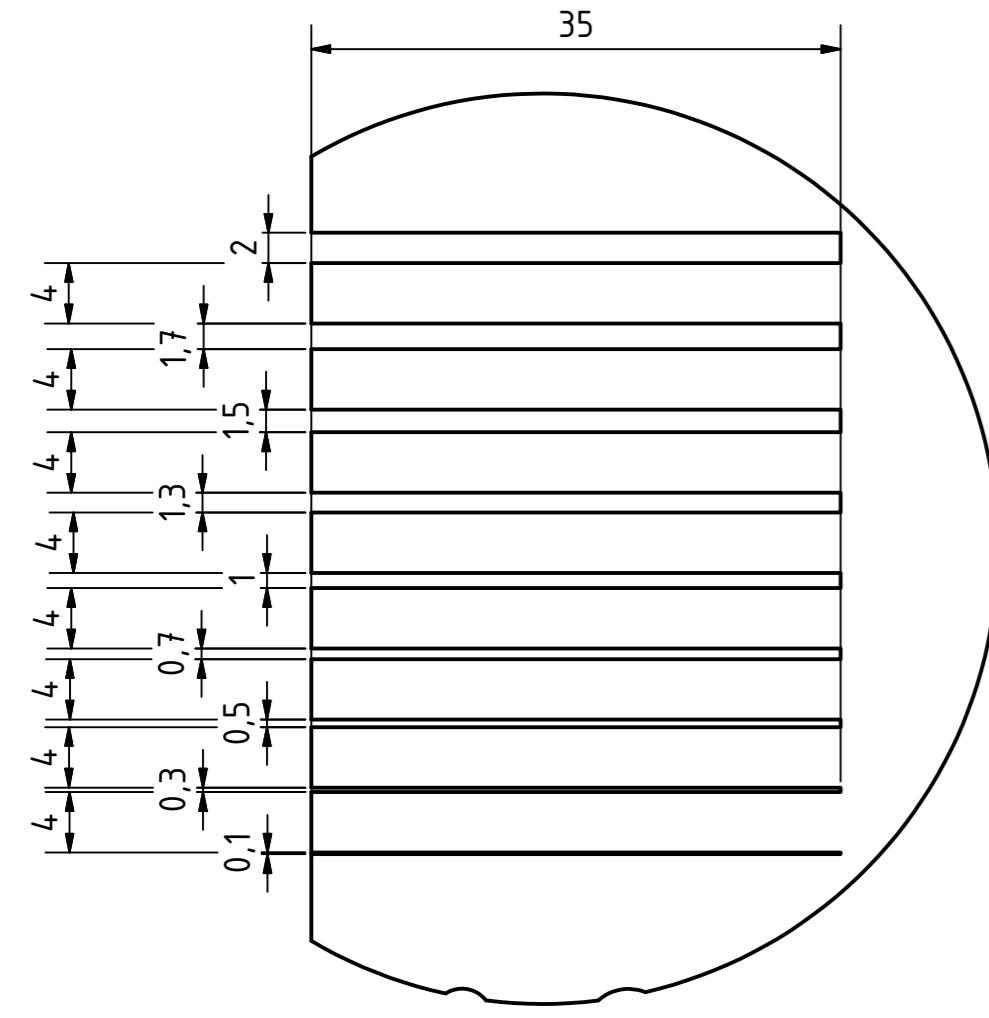
C (2 : 1)



A (2 : 1)



B (2 : 1)



Neodjehlovat
Po řezání dále nepracovávat

Struktura povrchu	Hrany	1:1	Přesnost	ISO 2768-mk
			Tolerování	ISO 8015
			Promítání	
Materiál: 17 240	Polotovár		CHRANĚNO PODLE ISO 1606	
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE	Druh dokumentu	Název Vzorek		
	Kreslil	Jan Malát	číslo dokumentu 20.4.2011	
	Schválil			
	Datum vydání	20.4.2011		