



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NÁVRH VÝROBY ZÁKLADNÍHO TĚLESA NÁSTĚNNÝCH HODIN NEKONVENČNÍMI METODAMI

THE PROPOSAL OF THE BASE BODY FOR WALL CLOCK USING  
UNCONVENTIONAL METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Milan Janás

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Milan Janás

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

**Návrh výroby základního tělesa nástěnných hodin nekonvenčními metodami**  
v anglickém jazyce:

**The proposal of the base body for wall clock using unconventional methods**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úvod:

1. Teoretický rozbor výroby vybrané součásti nekonvenčními technologiemi
2. Návrh jednotlivých variant výroby
3. Experimentální ověření výroby
4. Diskuze výsledků
5. Závěry

Cíle bakalářské práce:

Navrhnutí modelu součásti a porovnání výroby nekonvenčními technologiemi

Seznam odborné literatury:

1. MAŇKOVÁ, I. Progresivní technologie. Košice: Technická univerzita Košice, Strojnická fakulta – edícia vedeckej a odbornej literatury, 2000. 275 s. ISBN 80 – 7099 – 430 – 4.
2. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80 – 214 – 1996 – 2.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 20.11.2014

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato závěrečná práce se zabývá návrhem a výrobou základního tělesa nástěnných hodin pomocí nekonvenčních metod. Práce se skládá ze dvou částí. V první jsou nekonvenční metody rozebírány po teoretické stránce s vysvětlením základních principů a způsobů použití jednotlivých metod, jejich výhody a nevýhody. Podrobněji jsou zde popsány dvě metody, obrábění laserem a vodním paprskem, které jsou využívány v praktické části řešení této práce. V druhé části je popsáno praktické řešení výroby základního tělesa s využitím laseru a vodního paprsku. Metody jsou dále zkoumány z hlediska vhodnosti použití a jsou rozebírány jejich výhody a nevýhody s ohledem na vyráběnou součást. V závěru práce jsou tyto metody porovnávány z ekonomického hlediska, výrobního času, ovlivnění povrchu a dosažených přesností. Výstupem této práce je porovnání použitých metod k výrobě základního tělesa a sestavení funkčních nástěnných hodin.

### **Klíčová slova**

nekonvenční metody obrábění, těleso nástěnných hodin, laser, paprsek vody, nástěnné hodiny

## **ABSTRACT**

This thesis describes the design and manufacture of the basic body clocks using unconventional methods. The work consists of two parts. In the first unconventional methods are discussed in theory explaining the basic principles and methods of use of different methods and their advantages and disadvantages. More details are described two methods, laser and water jet, which are used in solving the practical part of this work. The second part describes a practical solution of the base body using a laser and water jet. The methods are examined in terms of suitability for use and are analyzed their advantages and disadvantages with respect to the manufactured part. In conclusion, these methods are compared from an economic perspective, production time, affecting surface and achieved accuracy. The outcome of this work is to compare the methods used to produce the base body and the assembly of functional clocks.

### **Key words**

Unconventional methods of machining, body clocks, laser, water jet, wall clocks

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

JANÁS, M. *Návrh výroby základního tělesa nástěnných hodin nekonvenčními metodami.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Návrh výroby základního tělesa nástěnných hodin nekonvenčními metodami** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

-----  
Datum

-----  
Milan Janás

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu práce panu Ing. Jaromíru Dvořákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování závěrečné.

Dále chci poděkovat panu Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za umožnění tisku na 3D tiskárně.

Dále chci poděkovat panu Lukáši Pernicovi a celé firmě Aquadem s.r.o. za umožnění provedení praktické části závěrečné práce a za cenné informace.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ .....	7
OBSAH.....	8
ÚVOD.....	9
1 Teoretický rozbor nekonvenčních metod obrábění .....	10
1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění .....	11
1.1.1 Elektroerozivní obrábění - EDM .....	12
1.1.2 Obrábění paprskem plazmy - PBM .....	14
1.1.3 Obrábění paprskem elektronů - EBM.....	16
1.1.4 Obrábění laserem - LBM .....	18
1.1.5 Chemické obrábění - ECM .....	20
1.1.6 Elektrochemické obrábění - ECM .....	22
1.1.7 Obrábění paprskem vody - WJM a hydroabrazivním paprskem - AWJ.....	24
1.1.8 Obrábění ultrazvukem - USM.....	26
1.1.9 Porovnání nekonvenčních metod.....	28
2 Návrh jednotlivých metod výroby .....	30
2.1 Rozbor metody – paprsek laseru .....	32
2.2 Rozbor metody – vodní paprsek .....	34
3 Experimentální ověření.....	36
3.1 Výroba laserovým paprskem.....	37
3.2 Výroba vodním paprskem .....	39
4 Diskuze výsledků.....	41
4.1 Porovnání drsností pomocí drsnoměru.....	42
5 Závěry .....	45
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	46
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	48
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....	49
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK .....	50
SEZNAM PŘÍLOH.....	52



## ÚVOD

Vzhledem k neustálému růstu strojírenského průmyslu, zdokonalování výroby a nutnosti vyrábět přesné, složité tvary, je třeba hledat způsoby obrábění splňující tyto kritéria. Ideálním se ukázaly být nekonvenční metody, které se díky tomu v posledních letech výrazně vyvíjí a zdokonalují. Nahrazují také třískové obrábění v podmínkách, kdy ho nelze použít nebo materiál není vhodný k tomuto obrábění. V dnešní době jsou nekonvenční metody hojně rozšířeny mezi firmami a jsou běžnou součástí výrobních operací.

Velkou výhodou nekonvenčních metod je jejich ekologické hledisko (až na malé výjimky při některých typech NMO) a široká možnost použití. Oproti klasickému obrábění nejsou tyto metody limitovány, nebo jen velmi málo vlastnostmi materiálu. Závislost obrobitelnosti se limituje pouze fyzikálními vlastnostmi vždy konkrétního materiálu. Díky automatizaci (CAD/CAM technologie) a zavedení CNC obráběcích center je kombinace s nekonvenčními metodami vysoce produktivní a výhodná (ekonomicky, časově, atd.).

Vhodnost použití jednotlivých metod je nutné pečlivě zvážit a porovnat náklady, strojní časy, tvarovou přesnost a požadovanou drsnost povrchu při konkrétním výběru metody. Jednotlivé NMO mají zvýšenou účinnost vždy pro konkrétní typ operace a materiálu, proto je nutná odborná znalost a značné zkušenosti.

V této závěrečné práci bude princip většiny nekonvenčních metod vysvětlen a doplněn ukázkou v podobě obrázku. Celkově budou zahrnuty výhody, parametry a použití jednotlivých metod. Navazovat bude praktická výroba nástěnných hodin. Jednotlivé díly na hodiny se vyrobí pomocí nekonvenčních metod a následně se sestaví. Při výrobě jsou využity metody rapid prototyping, paprsek laseru a vodní paprsek.



Obr. 1 Nástěnné hodiny

## 1 TEORETICKÝ ROZBOR NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ

Pod pojmem nekonvenční metody obrábění si lze představit soubor technologií, které nevyužívají pro dělení materiálu a jeho obrábění klasických nástrojů, ale procesy zakládající se na přírodních zákonitostech o erozi materiálu. Tyto metody jsou také charakteristické tím, že nepoužívají mechanické práce pro úběr materiálu, tedy nevzniká tříska. Jako nástroj se nepoužívá klasický řezný nástroj, který má definované pracovní části (hřbet, čelo, břit, hlavní ostří atd.) nebo nástrojové úhly. U těchto nástrojů, čili trysky, drátku, elektrody apod., nedochází nikdy k přímému styku s obráběným materiálem. Tyto nástroje pak produkují takovou formu energie, která vyvolává v obráběném materiálu erozivní účinky, a díky tomu dochází k dělení nebo odebrání materiálu. [2, 5]

Při klasickém způsobu třískového obrábění je hodnota obrobitelnosti daného materiálu přesně dána limitujícími hodnotami od mechanických vlastností, jako je pevnost nebo tvrdost apod., daného materiálu. U nekonvenčních metod obrábění je hodnota obrobitelnosti materiálu omezena hlavně fyzikálními vlastnostmi materiálu, jako jsou tepelná vodivost, elektrická vodivost, elektroerozivní odolnost, teplota tavení apod., a také chemickým složením. [8]

Důvodem vzniku nekonvenčních metod obrábění byl rozvoj vojenského, leteckého a kosmického průmyslu. Díky zvyšujícím se požadavkům v těchto odvětvích bylo nutné obrábět těžkoobrobitelné materiály třískovými metodami, s důrazem na jejich tvarovou a rozměrovou přesnost. V dnešní době jsou nekonvenční metody díky počítačově řízeným strojům schopny obrábět s přesností až 1  $\mu\text{m}$  a jsou nedílnou součástí strojních parků výrobních podniků. Přinesly také zkrácení výrobních časů, zlepšení kvality, možnost výroby součástek bez tepelného ovlivnění v místě řezu, hospodárnější obrábění materiálů odolných proti opotřebení, s vysokou houževnatostí, pevností apod. [5, 8]

*Následující skutečnosti charakterizují nekonvenční metody obrábění:*

- a) rychlost, výkonnost a možnosti obrábění nejsou závislé na mechanických vlastnostech obráběného materiálu;
- b) není podmínkou, že materiál nástroje musí být tvrdší než obráběný materiál;
- c) možnost provádět složité technologické operace, jako obrábění děr složitých tvarů, tvarové dutiny v materiálech s výbornými mechanickými vlastnostmi;
- d) umožňují zavádění plné mechanizace a automatizace a díky tomu zapojení dané operace do výrobní linky;
- e) umožňují zvýšení technologičnosti konstrukce a sériovosti výroby za současného omezení výroby zmetkových kusů a snížení pracnosti jednotlivých operací;
- f) zároveň s výrobou tvaru součástky dochází u některých nekonvenčních metod obrábění také ke kontrolované změně povrchové vrstvy, především ke zvýšení odolnosti proti korozi, zvýšení únavové pevnosti apod. [1, 9]

### 1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Technologie patřící mezi nekonvenční metody obrábění můžeme dělit do třech základních skupin dle toho, jaká energie je pro obráběcí proces využívána, čili dle převládajících účinků oddělování materiálu:

#### a) Oddělování materiálu tepelným účinkem

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

#### b) Oddělování materiálu chemickým nebo elektrochemickým účinkem

- chemické obrábění (Chemical Machining - CM)
- elektrochemické obrábění (Electro Chemical Machining – ECM)

#### c) Oddělování materiálu mechanickým účinkem

- obrábění paprskem vody (Water Jet Machining – WJM)
- obrábění hydroabrazivním paprskem (Abrasive Waterjet Machining – AJW)
- obrábění ultrazvukem (Ultrasonic Machining – USM). [5, 9]

Pro tyto technologie se používají CNC řízené stroje, které zvětšují oblast jejich použití. [5]

Tab. 1.1 Oblast aplikace nekonvenčních metod [9]

Obráběný materiál	Nekonvenční metody obrábění								Konvenční obrábění	
	Mech. účinek		Tepelný účinek				Chem. účinek			
	USM	AWJM	EDM	EBM	LBM	PBM	CM	ECM	F	S
<b>Slitiny Al</b>	C	C	B	B	B	A	A	B	A	A
<b>Oceli</b>	B	D	A	B	B	A	A	A	A	A
<b>Superslitiny</b>	C	D	A	B	B	A	B	A	B	B
<b>Sklo</b>	A	D	D	B	B	D	B	D	D	C
<b>Křemík</b>			D	B	B	D	B	D	D	B
<b>Plasty</b>	B	B	D	B	B	D	C	D	B	C
<b>Lepenky</b>	D	A	D			D	D	D	D	D
<b>Textil</b>	D	A	D			D	D	D	D	D

A – velmi vhodné, B – vhodné, C – obtížné, D – nelze aplikovat

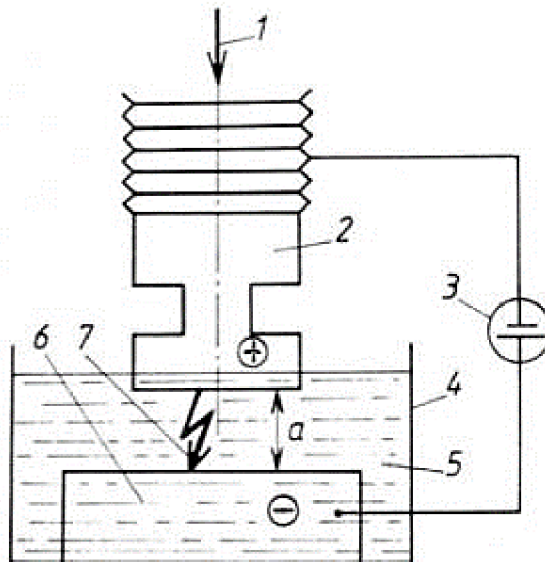
### 1.1.1 Elektroerozivní obrábění - EDM

#### Princip metody – základní pojmy

Elektroerozivní obrábění je fyzikální jev, zahrnující celou řadu metod, které mají společný jeden hlavní znak, úběr materiálu je vyvolán periodicky opakujícími se elektrickými výboji nebo také obloukovými výboji. Z toho plyne, že se předpokládá u obráběného materiálu elektrická vodivost. [9]

Obrábění touto metodou probíhá na dvou elektrodách, které jsou odděleny jiskrovou mezerou o velikosti 0,01 až 0,5 mm a jsou ponořeny v dielektrické kapalině. Tyto elektrody jsou nazývány katody a obrobek ponořený v dielektriku je nazýván anoda. Dielektrikum je kapalina mající vysoký elektrický odpor (petrolej, různé solní roztoky, destilovaná voda, apod.). Mezi katodou a anodou pak vzniká výboj v místech s nejsilnějším elektrickým napětovým polem, které vytváří ionizovaný kanál umožňující přestup jiskry mezi nástrojem a obrobkem. Poté se v tomto místě přemění elektrická energie na energii tepelnou a dojde k natavení nebo odpaření mikroskopických částic materiálu. Tyto částice jsou z místa narušení odplaveny proudící kapalinou. [1, 5, 9]

Velikost a tvar kráteru závisí na energii výboje a době trvání výboje. Tato velikost má vliv na účinnost procesu obrábění, jakost opracovaného povrchu a rozměrovou přesnost obrobku. Nástroj se k obráběné ploše neustále přibližuje díky posuvnému mechanismu a současně vibruje. Vibrace vytváří vhodné podmínky pro opětovné výboje a umožňují také odstranění částic odebraného materiálu a výměnu dielektrika v prostoru mezi elektrodami. [5, 9]



Obr. 1.2 Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění [11]

- 1 – směr posuvu nástrojové elektrody, 2 – nástrojová elektroda, 3 – generátor,  
4 – pracovní vana, 5 – tekuté dielektrikum, 6 – obrobek, 7 – elektrický výboj,  
a – jiskrová mezera

**Parametry elektroerozivní technologie obrábění**

- napěťové impulzy 10 až 300 V,
- frekvence  $f$  0,2 až 500 kHz,
- koncentrace energie  $10^5$  až  $10^7$  W·mm<sup>-2</sup>,
- kráter velikosti  $10^{-3}$  až  $10^{-5}$  mm<sup>3</sup>,
- měrná spotřeba energie: 0,1 až 1,0 kWh·cm<sup>-3</sup>. [1, 2, 9]

**Dělení elektroerozivního obrábění – v závislosti na fyzikálních podmínkách úběru:****a) Elektrojiskrové obrábění**, které se dělí na více metod dle použití:

- *Elektrojiskrové hloubení*: využívá elektrody vyrobené z grafitu, mědi, mosazi, wolframu, apod. pro úběr materiálu a je určena pro výrobu zápusitek a licích forem.
- *Elektrojiskrové řezání*: jako nástroj je zde použit drátek, který má průměr 0,03 až 0,35 a je převíjen z jedné cívky na druhou. Při tomto pohybu prochází plnou tloušťkou místem řezu. Řez je velmi přesný a používá se zejména pro střížné a lisovací nástroje.
- *Elektrojiskrové děrování*,
- *Elektrojiskrové leštění*,
- *Elektrojiskrové nanášení povlaků*,

b) **Elektrokontaktní obrábění**: tato metoda má vyšší produktivitu ale na úkor nižší přesnosti a snížení kvality výsledného povrchu,

c) **Anodomechanické obrábění**: kombinace ECM a EDM, použití pro tvarové broušení nástrojů ze slinutých karbidů, řezání tvrdých a těžce obrobitelných materiálů. [1, 2]

**Výhody a nevýhody metody**

Jednou z hlavních výhod je možnost obrábění vodivých materiálů bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti (houževnatost, pevnost, tvrdost). Dalším výhodným aspektem této metody je možnost výroby složitých součástek při malé pracnosti a velký rozsah pracovních parametrů. Vyráběné součástky nemají na hranách ořepy a nejsou zatíženy mechanickým napětím. Je to jediná metoda, kterou lze dělat díry se zakřivenou osou. Tato metoda využívá elektrod, které jsou z hlediska pracnosti výroby velmi jednoduché. [2, 3]

Nevýhodou je nízká produktivita při obrábění měkkých materiálů. Jakost povrchu závisí na mnoha faktorech, které předem nelze přesně určit. Platí zde nepřímá úměra mezi jakostí povrchu obráběné plochy a produktivitou obrábění. Za nevýhodu lze také považovat nutnost ponoření obrobku do kapaliny v průběhu procesu a nutnost dodržení určitých požadavků dielektrika (chemická neutralita, vysoká teplota hoření, nízká viskozita a dobrá smáčivost, apod.). [2, 3]

### 1.1.2 Obrábění paprskem plazmy - PBM

#### Princip metody – základní pojmy

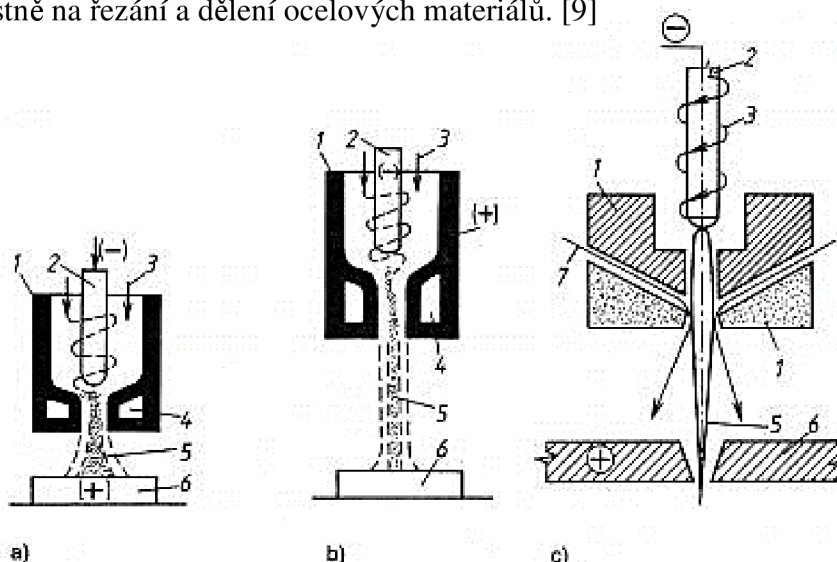
Při této metodě obrábění vystupuje vysokou rychlostí z plazmového hořáku paprsek plazmy, který po částech odpařuje, odtavuje a rozprašuje materiál určený k obrábění. Toto se děje při vysokých teplotách (nad 1000 °C), které jsou vyvolány rozkladem molekul plynu při průchodu elektrickým obloukem. Používají se plyny plazmové (vytváří plazmový paprsek Ar, He, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>), fokusační (zaostřují a zužují paprsek Ar, Ar + H<sub>2</sub>, Ar + N<sub>2</sub>) a ochranné (chrání před vlivy atmosféry Ar, Ar + H<sub>2</sub>). [4]

Plazma je vodivý stav plynu a je směsí volných elektronů, pozitivně nabitých iontů a neutrálních atomů. Pro tuto směs je důležitá přítomnost nosičů náboje a zásadní je vysoká teplota ( $10^4 \div 33 \cdot 10^4$  °C). Plazma vzniká ionizací plynu při vysokých teplotách, nebo také při elektrickém výboji mezi anodou a katodou. Katoda je netavící se a je vyrobena z wolframu. Anoda je tvořena obráběným materiálem, nebo tělem plazmového hořáku. [1, 4]

V plazmovém hořáku dochází k přeměně elektrické energie na energii tepelnou. Hořáky jsou děleny dle druhu stabilizace elektrického oblouku na:

- plazmové hořáky s plynovou stabilizací, plazmové hořáky s vodní stabilizací
- hořáky s transferovým obloukem (oblouk hoří mezi elektrodou uvnitř hořáku a materiálem), netransferovým obloukem (oblouk hoří mezi elektrodou uvnitř hořáku a výstupní tryskou). [1, 3]

Proces obrábění je zde velmi intenzivní a odběr materiálu tak rychlý, že tepelně ovlivněná oblast nepřesahuje 1 mm. S ohledem na velkou rychlost odpovídá metoda ve srovnání s třískovým obráběním hrubovacím operacím. Ve strojírenství se tato metoda používá přednostně na řezání a dělení ocelových materiálů. [9]

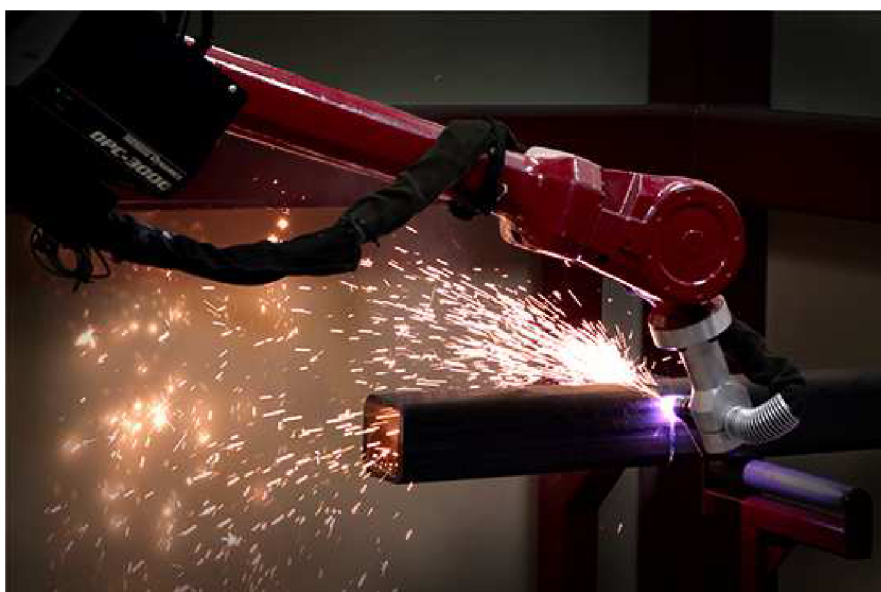


Obr. 1.3 Schéma zařízení pro obrábění paprskem plazmy [12]

Plazmové hořáky s plynovou stabilizací: a) s transferovým obloukem, b) s plynovou stabilizací s netransferovým obloukem, c) s vodní stabilizací (1 – těleso hořáku, 2 – katoda, 3 – přívod plynu, 4 – chlazení hořáku, 5 – paprsek plazmatu, 6 – obrobek, 7 – přívod vody).

**Možnosti použití metody:**

- řezání širokého spektra materiálů a to i těžkoobrobitelných (do šířky 40 mm)
- navařování a svařování
- odtavení materiálu a přehřev
- vysokoteplotní syntéze plynů
- rozklad toxických průmyslových odpadů
- nanášení povlaků a stříkání vrstev materiálu na součástky (železné i neželezné kovy). [2, 3]



Obr. 1.4 Řezání plazmou [13]

**Výhody a nevýhody metody**

Velmi značnou výhodou a hlavním důvodem použití je rychlost řezání silných plechů (100-150 mm), které mají lepší kvalitu řezu u větších tloušťek materiálu oproti nejčastěji srovnávanému způsobu řezání plamenem. Navíc je řezání plazmou časově méně náročné než řezání plamenem. Při porovnání řezání tenkých plechů jsou náklady u plazmy daleko menší než při řezání laserem ale vyšší než při řezání plamenem. [1, 2, 3]

Nevýhodou je horší drsnost povrchu, kvůli stopám po paprsku (rýhy, variace) a opracování oproti laseru. Při řezání plazmou dochází k tepelnému ovlivnění místa řezu. V oblasti řezu jsou pak viditelné odklony od kolmosti v řádech několika stupňů. Díky použitým plynům vzniká u této metody velké množství emisí. Nevýhodné je nemožnost dělení neželezných materiálů (kromě kovů), jako je keramika, jelikož tyto materiály mají v současné době časté použití. [1, 2, 3]

### 1.1.3 Obrábění paprskem elektronů - EBM

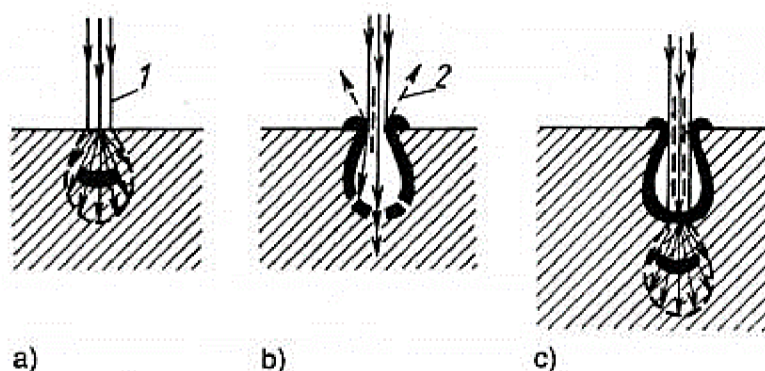
#### Princip metody – základní pojmy

Tato metoda obrábění využívá soustředěný paprsek elektronů o velmi vysoké rychlosti (až  $3/4$  rychlosti světla  $c$ ), který je směřován na velmi malou plochu obráběného materiálu, který je v důsledku paprsku natavován a odpařován. Při styku paprsku s povrchem obráběného materiálu se mění kinetická energie paprsku nejčastěji na energii tepelnou. Energie kinetická se ovšem nemusí měnit pouze na tepelnou, ale také například může materiál ovlivnit chemicky či fyzikálně změnou struktury nebo složení. Tento proces probíhá v prostředí vakua. [1, 5]

Koncentrace tepelné energie pod povrchem může způsobovat tyto změny:

- Fázové přeměny v tuhém stavu (kalení).
- Rozložení materiálu na těkavé látky (vrtání děr – již od průměru 0,015 mm, řezání syntetických materiálů).
- Rázové vlny (materiál se drobí)
- Roztavení – slouží ke svařování obtížně svařitelných či nesvařitelných materiálů, dále k mikroobrábění, leštění a legování.
- Vypaření, neboli úběr materiálu při řezání či výrobě děr a drážek, kdy se materiál taví a následně odpařuje. [5]

Použití této metody v praxi je zejména v oblasti mikroobrábění ale všeobecně je velmi široké, jelikož obrobitelnost materiálu zde nezávisí na jeho mechanických vlastnostech. Zařízení, které produkuje elektrony a má v sobě uloženou katodu a anodu se jmenuje elektronové dělo. [1]



Obr. 1.5 Princip obrábění elektronovým paprskem [14]

- a – vnik elektronů do obrobku, b – erupční odpařování materiálu,  
c – opětový vnik elektronů do materiálu obrobku, 1 – elektronový paprsek,  
2 – páry odpařované z kovu



### Parametry metody

- napájecí generátory dělíme na:
  - nízkonapěťové do 60 kV,
  - vysokonapěťové do 150 kV (8 až 100kW),
- hustota energie paprsku:  $1,55 \text{ MW} \cdot \text{mm}^{-2}$ ,
- průměr fokusovaného paprsku: 0,025 až 1 mm,
- plošná hustota energie:  $10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,
- pracovní cyklus probíhá ve vakuu a účinnost je až 95 %. [1, 2]

### Použití metody

Tato metoda má použití v mnoha oblastech průmyslu, zejména ve strojírenství. Zde slouží k vrtání děr malých průměrů (0,01 až 1 mm a je nutný pomocný materiál), k mikroobrábění a to hlavně velkých tenkých fólií, ke svařování tenkých plechů v leteckém, kosmickém a automobilovém průmyslu, kde potřebujeme vysokou přesnost při obrábění z tenkých materiálů. Také k řezání a obrábění materiálů jak kovových tak i nekovových (kromě některých určitých kovů, jako je bronz, mosaz, zinek, apod.), dále pro zvláště těžkoobrobitelné materiály používané na stavby jaderných reaktorů a na slitiny titanu, hliníku a také diamantu, křemíku a wolframu. K dekorativním a ozdobným účelům je možno použít rytí a značkování. [1, 2, 5]

V elektrotechnice a mikroelektronice se používá zejména k litografii (výroba integrovaných obvodů), s přesností polohování paprsku 0,1 až 0,01  $\mu\text{m}$  a k výrobě čipů. Dále k nanášení povrchových vrstev u polovodičové techniky, elektrických odporů a také v optickém průmyslu. [2]

Principu elektronového paprsku využívají i jiné oblasti jako třeba elektronová mikroskopie. [2]

### Výhody a nevýhody metody

Velkou výhodou u této metody je vysoká účinnost přibližující se až k 95%. Možnost použití na prakticky všechny druhy materiálu v kombinaci s automatizací pracovního cyklu lze považovat za výhodu. Velmi využívané je rychlé a přesné vychylování paprsku elektronů s možností jemné fokusace do bodu. Při vrtání se rychlost pohybuje až na hranici 4000 otvorů za sekundu. Po vrtání nejsou žádné ostré hrany a přesnost s opakovatelností otvorů je velmi vysoká. [1, 2]

Nevýhodou a nutnou podmínkou je udržovat cyklus obrábění ve vakuu ( $10^{-3}$  až  $10^{-4}$  Pa), a s tím spojená doba odsávání komory (výjimku tvoří některé procesy svařování probíhající mimo vakuum.). Při obrábění paprskem elektronů vzniká záření RTG, které je škodlivé a je nežádoucí. Drobné potíže nastávají při opracování diamantu a izolantů. Hlavní nevýhodou je pořizovací cena zařízení a nutnost odborné kvalifikace obsluhujícího personálu. [1, 2]

### 1.1.4 Obrábění laserem - LBM

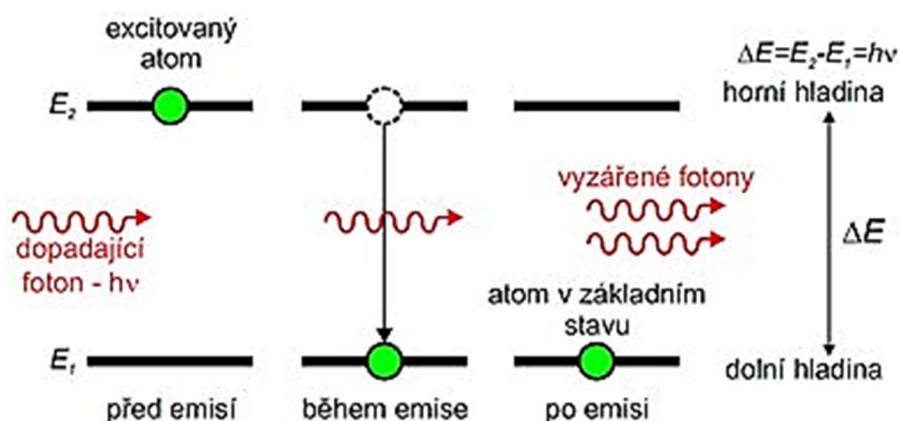
#### Princip metody – základní pojmy

Definicí laseru je vlnění, které se šíří v homogenním prostředí do všech směrů rovnoměrně stejnou rychlostí a intenzitou. Samotný princip vzniku laseru pak spočívá ve vynuceném (stimulovaném) emisním záření. To vyvolává elektromagnetické záření působící na atom prvku. Elektronů obíhající kolem jádra mění své oběžné dráhy (na vyšší oběžné dráhy) a nastává nerovnovážený stav, v důsledku čehož opět elektrony mění své oběžné dráhy (na nižší oběžné dráhy) a díky tomuto dojde k vyzáření světelné energie. [2, 8]

Tento způsob obrábění využívá k úběru materiálu účinek výše popsaného jevu, jenom je jeho účinek zesílen a usměrněn do úzkého paprsku silného monochromatického (pouze jedna vlnová délka) světla, které je soustředěno na velmi malou plošku. Tento paprsek je koherentní, což znamená, že se fotony v celém paprsku pohybují pouze jedním směrem a mají velkou míru neuspořádanosti v celém jeho průřezu a tento paprsek má minimální rozbíhavost (divergenci). V příčném průřezu vytváří paprsek jednoduchou stopu, nebo složitější obrazce, které jsou kruhově symetrické, nebo jsou pravoúhlé. Na povrchu místa dopadu se mění energie světelného záření na energii tepelnou o hustotě až  $10^8 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Díky vzniklému teplu je zde vysoká teplota (až  $10\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) a ta taví a odpařuje materiál obrobku. [7, 8]

Vznikající světelné záření se dělí dle výše energetické hladiny na viditelné, ultrafialové a infračervené. [2]

Zařízení pro obrábění laserem se skládá z laserové hlavičky, která obsahuje laserové medium a to určuje vlnovou délku záření. Dále obsahuje rezonátor, polopropustné a nepropustné zrcátko, zdroj energie a budicí a chladicí zařízení. [5]



Obr. 1.6 Změna dodané energie na laserový paprsek [15]

### Parametry metody

- laser je specifikován výkonem (celková energie vyzářená v podobě laserového světla za sekundu), který bývá 1 W až po 15 kW pro řezání laserem,
- tvar zaměřeného laserového paprsku je definován ohniskovou vzdáleností čočky,
- rychlost při řezání laseru se odvíjí od způsobu řezání, výkonu, tloušťky a kvality řezaného materiálu, kvalita řezu bývá  $Ra = 3,6$  až  $12 \mu\text{m}$  a šířka spáry bývá v rozmezí 0,02 až 1 mm,
- tepelně ovlivněná oblast při řezání je přibližně pouze 0,1 mm,
- nejmenší otvory při vrtání  $\varnothing 0,025 - 0,2$  mm, délka impulsu při vrtání 0,5 až 0,2 ms a frekvence impulsu  $f$  5 až 100 Hz v závislosti na druhu laseru,
- průměry používaných trysek: od 0,8 do 1,5 mm, čili odstup trysky by měl být 0,3 – 1 mm,
- vid (MOD) u laseru určuje jak je rozdělována energie v jeho průřezu, nejlepším videm je Gausovo rozložení. [2, 5]

### Použití metody

Laser se v průmyslu využívá především díky svým tepelným účinkům a používá se na všechny druhy materiálu (od papíru až po titanové slitiny). Toto je využíváno ve strojírenství k řezání a dělení laserovým paprskem, které je velmi rychlé ( $v = 10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ), k vrtání děr velmi malých průměrů, k mikroobrábění, soustružení. Lze jej také použít k dekorativním a popisným účelům pomocí vyřezávání, popisování a gravírování. Laser je možné také použít ke spojování materiálů a to svařováním a pájením. Laser se používá i v poměrně nové technologii Rapid Prototyping. [1, 7]

Dále se používá v lékařství a to především v chirurgii kde je náhradou za skalpel s následnou fotokoagulací cév k odpařování poškozené tkáně a k odstranění šedého zákalu. Používá se i v zubním lékařství, kde vrtá jen do poškozené tkáně a zdravou ponechá nedotčenou. Optické vlastnosti laseru slouží měření rychlosti a měření vzdálenosti těles. Používá se k měření škodlivých plynů v atmosféře. [1, 7]

### Výhody a nevýhody

Velkou výhodou při řezání laserem je velikost řezu, který bývá mimořádně úzký (úspora materiálu). Vzhledem k možnosti koncentrace tepelné energie na jedno velmi malé místo na povrchu obráběného materiálu, lze takto obrábět i křehké materiály aniž by se mechanicky poničily. Paprskem laseru jde obrábět v místech a pozicích, ve kterých to jinými metodami není možné (na přenos paprsku lze využít optické kabely). Velmi vysoká produktivita při kombinaci s CNC centry.[2, 3]

Nevýhodou je tepelně ovlivněná oblast, i když u této metody není tak velká. Při chybném nastavení zařízení mohou vznikat ořepy. Hlavní nevýhodou je vznik karcinogenních plynů, které je nutno odsávat (zejména při řezání plastů a Al slitin). [2, 3]

### 1.1.5 Chemické obrábění - ECM

#### Princip metody – základní pojmy

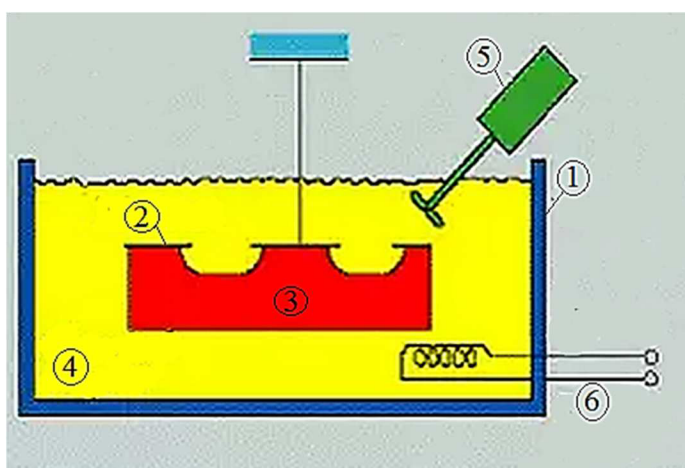
Princip chemického obrábění spočívá v řízeném odleptávání materiálu z povrchu obrobku a to po vrstvách, které jsou tlusté pár setin milimetru až po několik milimetrů (maximálně 12,7 mm). Toto je založeno na chemické reakci mezi obráběným materiálem a pracovní látkou (nejčastěji se jedná o hydroxidy nebo kyseliny). Povrch materiálu, který nemá být chemicky obráběn je chráněn speciálním povlakem, maskou. Masky musí být chemicky odolná a musí jít snadno nanést před leptáním a po leptání snadno odstranit. Materiály používané k výrobě masky poskytují maximální dobu leptání 8 až 10 hodin. Ta se vyrábí se z gumy, neoprénu, polystyrénu, pryskyřice a speciálních laků. Po chemickém obrábění je nutné opláchnutí a omytí materiálu a jeho osušení. [4, 9]

Rychlost  $v$  s jakou materiál odebírán se pohybuje kolem  $0,025 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a drsnost v rozsahu  $0,4$  až  $6,3 \text{ } \mu\text{m}$  v závislosti na typu materiálu leptané součástky a na druhu leptadla. Při odebírání materiálu leptáním vzniká tzv. podřezávání materiálu. Jedná se o odleptávání materiálu v místech pod ochrannou maskou. S tímto jevem je nutno počítat, jelikož není možné ho odstranit. [7, 9]

V dnešní době využívají chemickou reakci k obrábění tyto tři směry:

- chemické obrábění, které je založeno na leptání kyselinou nebo zásadou. Do tohoto směru se řadí chemické frézování a chemické čištění a leštění,
- termické odstraňování materiálu, tato technologie se používá k odstranění otřepů a využívá na to tepelný účinek vznikající při tepelné reakci,
- fotochemické obrábění, slouží leptání tvarových otvorů do velmi tenkých materiálů a fólií. Jsou zde využity poznatky z oblasti fotografické techniky. [1]

V praxi se pak používá z chemického obrábění chemické postřikování a chemické rozměrové leptání. Při chemickém leptání tenkých, tvarově složitých součástek (nosníky leteckých konstrukcí, potahy křidel) je chemické obrábění 5 – 7 x rychlejší než frézování. [1]



Obr. 1.7 Princip chemického obrábění [16]

- 1 – nádoba, 2 – maska, 3 – obráběný materiál, 4 – chemické leptadlo,  
5 – míchač, 6 – chladicí cívka

**Parametry metody**

- tloušťka masky 0,15 – 2 mm,
- maximální doba leptání 8 – 10 hodin,
- drsnost naleptaného povrchu Ra 0,4 – 6,3  $\mu\text{m}$ ,
- rozměrová tolerance  $\pm 0,25$  mm,
- rychlost odleptávání 0,01 – 0,4  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,
- hloubka odleptávané vrstvy v závislosti na odolnosti masky je několik setin milimetru až milimetry,
- obrobek musí být vložen do leptací lázně pod 45° kvůli vzniku bublinek. [3, 7, 9]

**Použití metody**

Mezi materiály vhodné k tomuto druhu obrábění patří hliník a jeho slitiny, titan, mosaz, slitiny hořčíku a titanu, nelegované, korozivzdorné oceli.

Tato metoda je využívána především pro tvarově složité a malé otvory do velmi tenkých plechů nebo fólií a pro výrobu tenkostěnných součástí. Vhodné je použití metody pro úběr velkých ploch o malých tloušťkách, snížení hmotnosti dílů v leteckém průmyslu, k úběru materiálu na nosnících leteckých konstrukcí a potazích křídel z hliníku. Dále k výrobě elektro plechů pro elektrické motory, výrobě elektrických kontaktů a svorek.

Výhodné je použití této metody pro součástky, u kterých nemají být otřepy a pro součástky s horší mechanickou vlastností – tuhostí. [1, 2]

**Výhody a nevýhody**

Přední výhodou je bezsilové působení leptadla, čili nedochází k deformaci obrobku. Nevznikají vnitřní pnutí v materiálu a nejsou ovlivněny mechanické vlastnosti. Výhodou je obrábění složitých a málo tuhých součástí, které nelze nijak upnout, jelikož by se deformovali a také cena, při použití chemického obrábění oproti jiným způsobům na tyto typy součástek, je velmi příznivá. Možnost obrábět většinu ocelí a slitin bez omezení na celkové ploše obrábění (závislost pouze na hloubce). Výsledné tvary po obrábění jsou velmi přesné a nedisponují otřepy. [2, 4]

Hlavní nevýhodou je vznik podřezání pod maskou, kdy nelze vytvořit ostrou hranu ale vždy pouze jen poloměry. Toto podřezání je nekontrolovatelné a nelze mu předejít, musí se s ním počítat dle druhu leptadla a materiálu. Nepříznivý je také fakt, že se na celý proces používají chemikálie, které je nutné kontrolovat a bezpečně likvidovat. U této metody je důležitý zaškolený pracovník s praxí a obeznámený s bezpečností používání chemikálií. Špatně obrobitelné jsou svary a nálitky. [2, 4]

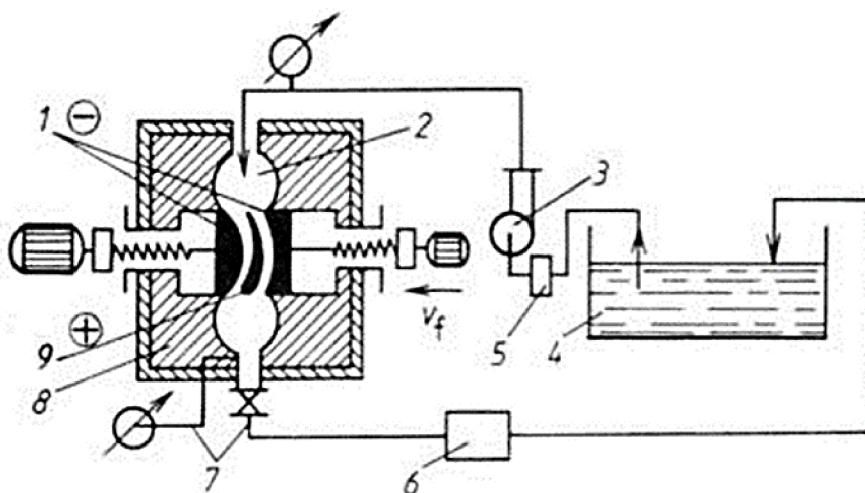
### 1.1.6 Elektrochemické obrábění - ECM

#### Princip metody – základní pojmy

Princip této metody spočívá v řízeném elektrolytickém rozpouštění materiálu obrobku, který je zároveň anodou. Anoda je spojena s katodou, kterou je nástroj a je ponořena do elektrolytu. Po připojení obou elektrod ke stejnosměrnému zdroji napětí se pohybují záporné anionty elektrolytu k anodě a kladné kationty se pohybují ke katodě. Takto se pohybující ionty odevzdávají svůj náboj na elektrodách. Tímto se z nich stanou buď neutrální atomy vylučující se na povrchu katody, nebo chemicky aktivní a reagují s materiálem anody a tím dochází k rozpouštění anody. Tvar požadovaný na obrobku určují jedna nebo dvě katody. Katody se k obrobku pomalu přibližují a současně i kmitají. K největšímu úběru materiálu dojde tam, kde je nejmenší vzdálenost mezi katodou a anodou. [4, 8]

Celý proces elektrochemického obrábění závisí především na složení elektrolytu (většinou chlorid sodný, chlorid draselný, nitrid draselný, vodní roztoky anorganických solí) a jeho vlastnostech (nutná dobrá elektrická vodivost, fyziologická nezávadnost, apod.). Elektrolyt proudí mezerou mezi elektrodami rychlostí  $v = 10$  až  $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Nevhodná volba elektrolytu v kombinaci s nevhodnými podmínkami obrábění mohou způsobit mezikrystalickou korozi obrobku a snížit jeho pevnost. Elektrolyt musí mít dobře dané cesty pohybu, aby nevznikalo víření a tím nerovnoměrné rozpouštění materiálu. Důležitá je i volba nástroje, jenž musí mít dostatečnou tuhost, dobrou obrobitelnost, elektrickou a tepelnou vodivost a chemickou odolnost. [4, 9]

Hustota proudu udává intenzitu, s jakou se materiál rozpouští. Pokud je použita nižší proudová hustota, pak je možné provádět elektrochemické leštění. Při vyšší proudové hustotě se na elektrodách usazují soli a oxidy, které tvoří tzv. pasivační vrstvičku zabraňující rozpouštění anody. Její tvorbu je nutno zamezit a to nejlépe proudícím elektrolytem pod tlakem nebo rotující katodou. [7]



Obr. 1.8 Schéma zařízení pro elektrochemické obrábění [17]

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

### Parametry metody

- proud se pohybuje v rozmezí  $I = 50 \div 20\,000$  A a proudová hustota  $0,2 \div 3$  A·mm<sup>-2</sup>, napětí  $U = 4 \div 30$  V,
- mezera mezi nástrojem a obrobkem je v rozmezí  $0,025 \div 1,3$  mm, a tato mezera je jeden z nejdůležitějších parametrů u elektrochemického obrábění,
- elektrolyt proudí rychlostí  $v = 30 \div 60$  m·s<sup>-1</sup> mezerou mezi nástrojem a obrobkem, tlak elektrolytu  $p = 70 \div 2\,800$  kPa a jeho teplota  $t =$  od 24 do 65 °C,
- pracovní posuv provádí nástroj a jeho rychlost je  $0,2 \div 20$  mm·min<sup>-1</sup>,
- obrobek je anoda + a nástroj je katoda −,
- běžná přesnost u této metody je 0,02 až 0,05 mm,
- drsnost povrchu  $R_a$  se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,8 μm,
- elektrochemické honování je až 4x produktivnější než konvenční honování. [1, 5, 9]

### Použití metody

Uplatnění této metody je zejména při obrábění těžkoobrobitelných a tvrdých materiálů, dále k obrábění materiálů, které by se při mechanickém upínání, nebo vlivem řezného nástroje deformovaly. Díky vhodným podmínkám je možné opakovaně vyrábět tvarově složité součástky, vrtat rotační a nerotační otvory, otvory forem. Metoda a její modifikace jsou vhodné k obrábění lopatek turbín, k vrtání chladících otvorů do lopatek turbín a k obrábění součástech používaných v kosmickém průmyslu. Při elektrolytickém vrtání lze vrtat mazací otvory do ložisek a otvory pro palivové dýzy. [1, 5]

Elektrochemické leštění lze využít i ve výzkumných laboratořích k přípravě metalografických vzorků. Elektrochemickým obráběním je možné odstranit otřepy. [1]

Většina elektrochemických metod je určena k obrábění vodivých materiálů. Existují kombinované metody elektrochemického obrábění, kterými lze obrábět i nevodivé a polovodivé materiály (keramika, polymerové kompozity, apod.). Mezi tyto metody patří i anodomechanické obrábění pro vyřezávání profilů a tvarové broušení nástrojů z SK. [1, 2]

### Výhody a nevýhody

Díky nutnosti použití kvalitního materiálu na nástroj, je jeho životnost velmi dlouhá. Výsledné součásti po obrábění nedisponují otřepy a mají velmi kvalitní povrch bez tepelného ovlivnění a bez obsahu zbytkových napětí. Ve srovnání s klasickým třískovým obráběním jsou vlastnosti povrchu mnohem lepší (lepší odolnost proti korozi, opotřebení, tření). Velkou výhodou je možnost obrábění kalených povrchů (nezáleží na tvrdosti materiálu). [2, 3]

Značnou nevýhodou je snížení meze únavy. Po obrábění touto metodou se projeví všechny vady materiálu a jeho předcházející zpracování. Nemožnost obrábět slitiny Ni a Ti díky pasivaci. Problém je s ekologickou likvidací kalů, jelikož mohou obsahovat množství látek, které jsou základem pro tvorbu jedů. [2, 3]

### 1.1.7 Obrábění paprskem vody - WJM a hydroabrazivním paprskem - AWJ

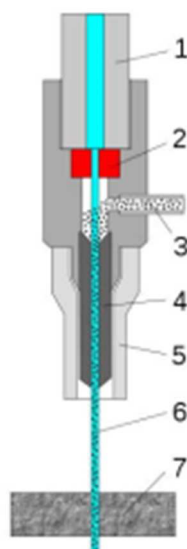
#### Princip metody – základní pojmy

Čistý vodní paprsek pracuje na principu využití kinematické energie vysokotlakého a vysokorychlostního vodního paprsku. Vodní paprsek s abrazivem pracuje na vysokorychlostním erozivním principu, kde je účinek obrábění umocněn abrazivem smíchaným s vodou. Proces lze rozdělit na dvě části, z nichž v první vzniká díky působení vysokého tlaku kapaliny prohlubeň v materiálu a ta se mění na otvor. V druhé části se otvor prohlubuje a vytváří se řezná spára. V obráběném materiálu se pak vytváří mikrotrhliny a rázové trhliny, které se díky zatížení rychle šíří a umožňují tak úběr materiálu. [4, 5]

Vysoký tlak nutný k obrábění je vytvářen ve vysokotlakém čerpadle, které mění nízký tlak oleje na vysoký tlak vody (princip dvou spojených pístů). Odtud je voda vedena do řezací hlavice, kde je voda usměrňována do úzkého, rovnoměrného paprsku a v případě obrábění pomocí abraziva, je ještě ve směšovací komoře přimícháno abrazivo (brusný materiál, nejčastěji přírodní australský granát). [5]

Kvalita řezu je ovlivněna několika faktory, jako například tlakem vody, rychlostí proudění vody, výtokovým průměrem trysky, vzdáleností trysky od povrchu obrobku, atd. Při obrábění paprskem vody s abrazivem má na jakost povrchu a řezný výkon vliv i druh abraziva a jeho množství, stejně jako velikost a tvar zrn, z nichž je abrazivo složeno. Nutné je také používat kvalitní vodu, aby se neucpal otvor trysky (nejlepší je voda deionizovaná a demineralizovaná). [1, 4]

Díky moderním CNC systémům se působnost této metody značně zvětšila a v dnešní době je možné ji použít i na víceosých obráběcích strojích. [8]



Obr. 1.9 Schéma řezání vodním paprskem [18]

- 1 – vysokotlaký přívod vody, 2 – diamantová tryska, 3 – přívod abraziva,  
4 – směšovací komora, 5 - držák, 6 – vodní paprsek, 7 – řezaný materiál



### Parametry metody

- tlak vodního paprsku až  $p = 700$  MPa, při abrazivním paprsku až  $p = 400$  MPa,
- průměr vodní trysky  $0,075 \div 1,5$  mm a průměr trysky s abrazivem  $0,75 \div 2,5$  mm,
- životnost vodní trysky 200 hodin (s možností čištění ultrazvukem a v závislosti na materiálu trysky), životnost abrazivní trysky  $20 \div 150$  hodin dle druhu abraziva,
- dosahovaná rozměrová přesnost  $\pm 0,1$  mm, drsnost povrchu  $2,5 \div 12,5$   $\mu\text{m}$  teplota v místě řezu maximálně  $t = \text{do } 40$  °C,
- maximální průřez, který můžeme vodním paprskem řezat je 500 mm,
- rychlost výtoku vody  $v = 600 \div 900$   $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- rychlost řezání papíru, lepenky, fólie až  $v = 400$   $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , uhlíkové kompozity, gumotexy, sklo a lamináty až  $v = 10$   $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,
- energetická účinnost až 85 %. [1, 5, 8]

### Použití metody

S touto metodou je možné řezat všechny druhy materiálu (kromě několika materiálů, např. kaleného skla). Lze tedy řezat do materiálů nevodivých, odolných vůči chemickému působení, nebo do těch, které nejdou obrábět jinými metodami. Snadné je obrábění jak tvrdých tak i velmi tvrdých materiálů (titan, kobalt, SK). Díky nízké teplotě v oblasti řezu lze řezat i materiály citlivé na teplo. Ve strojírenství je možné tuto metodu použít pro řezání do skla, výrobu dílů proudových motorů, turbín a kompresorů. Vodní paprsek také nahrazuje klasické nástroje při soustružení, vrtání, výrobě závitů a frézování. [4, 8]

V chemickém průmyslu se vodní paprsek využívá k dělení výbušných látek, v elektrotechnickém průmyslu k řezání desek tištěných spojů, k řezání permanentních magnetů, v jaderném průmyslu k dekontaminaci a odstraňování ochranných železobetonových vrstev. Dále v kamenictvích, v potravinářství k řezání zmražených potravin, či ve stavebnictví k dělení betonu. [4]

### Výhody a nevýhody

Velkou výhodou je energetická účinnost dosahující až na 85 % a také možnost recyklace abraziva a jeho opětovné použití. Tato nekonvenční metoda je oproti jiným, především chemickým způsobům velmi šetrná k životnímu prostředí a nevzniká žádný nebezpečný odpad. Díky nízké teplotě v oblasti řezu jde řezat materiály náchylné na teplo. Na obráběné součástce nevznikají tepelné ani silové ovlivnění (není nutné upínat polotovary) a nedochází ke vzniku zbytkových napětí. Tuto metodu je možné používat i v prostředí pod vodou (lze tím snížit hlučnost). Vznikající řez je velmi úzký, v důsledku velmi tenkého proudu vody používaného na obrábění a díky tomu jsou ztráty materiálu minimální. [4, 5]

Nevýhodou je náchylnost některých typů ocelí k rychlé korozi díky působení vody v místě řezu. Pořizovací cena celého zařízení je velmi vysoká. Vodním paprskem nelze řezat do kaleného skla a nezpracované hrnčířské hlíny. Nutno počítat se zaoblením vnitřních rohů, což je určeno průměrem paprsku. [4, 5]

### 1.1.8 Obrábění ultrazvukem - USM

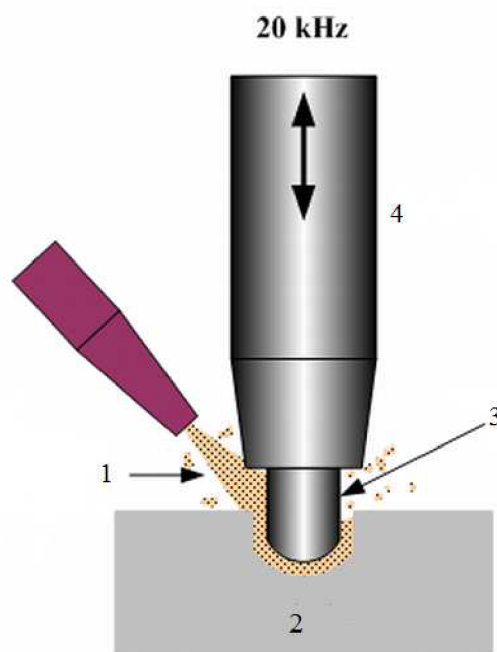
#### Princip metody – základní pojmy

Podstata metody spočívá v řízeném rozrušování materiálu vlivem úderů zrn abraziva (karbid boru, karbid křemíku, elektrokorund) přiváděných kapalinou mezi kmitající nástroj a obrobek. Mechanický účinek abraziva společně s kavitačním (způsobuje mikrotrhliny v materiálu) a chemickým účinkem mají za následek úběr materiálu. Toto se děje díky velké kinetické energii zrn abraziva (získanou od kmitajícího nástroje), která způsobuje narušení povrchu obráběného materiálu a kavitační účinek umožní rychlý přísun nových zrn abraziva. Kapalně prostředí (nejlepší výsledky jsou dosahovány s vodou) slouží k lepšímu pronikání ultrazvukové energie do míst obrábění. Obrobitelnost materiálů je dána jejich křehkostí a tvrdostí. Účinnost metody je pak dána vlastnostmi materiálu, akustickým systémem a vlastností suspenze (směs vody a abraziva). [7, 5]

Velikost zrn abraziva má zásadní vliv na celé obrábění. Čím je zrno větší, tím roste úběr obráběného materiálu, klesá přesnost obrábění, zvětšuje se opotřebení nástroje a velikost mezery mezi nástrojem a obrobkem. Úběr materiálu závisí kromě velikosti zrn také na amplitudě a frekvenci kmitů. [4, 8]

Zařízení pro obrábění ultrazvukem se skládá z generátoru, měniče (převádí elektrickou energii na energii mechanickou) a koncentrátoru amplitudy (zvětšuje amplitudu kmitů). Koncentrátor je spojen s nástrojem (ten je také vystaven účinkům abraziva) a obrobek je upnut na pracovním stole. [4]

Obrábění ultrazvukem se dnes využívá při ultrazvukovém nárazovém broušení a rotačním obrábění. Působením ultrazvuku lze zpevnit povrch materiálu. [9]



Obr. 1.10 Princip obrábění ultrazvukem [19]

1 – abrazivo s kapalinou, 2 – obráběný materiál,  
3 – kmitající nástroj, 4 – převodník změny kmitů

**Parametry metody**

- frekvence nástroje  $f = 18 - 30$  kHz a amplituda  $10 - 100$   $\mu\text{m}$ ,
- kapalina nejčastěji voda, dále olej, benzín, líh,
- materiál nástroje titanové slitiny, mosaz, korozivzdorné oceli,
- výkon generátoru  $P = 0,05 - 4$  kW,
- rozměrová přesnost této metody je  $0,02 - 0,1$  mm a dosahovaná drsnost  $R_a$   $0,4 - 1,6$   $\mu\text{m}$ ,
- koncentrace brusiva v kapalině dle obráběného materiálu  $20 - 60$  % (nejčastěji však poměr 1:1),
- rychlost posuvu nástroje  $v = 20 - 50$   $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,
- vzdálenost mezi nástrojem a obrobkem  $0,025 - 0,075$  mm (nejsou v přímém kontaktu). [2, 4]

**Použití metody**

Obecně je obrábění ultrazvukem vhodnější pro tvrdší ( $35 - 40$  HRC a více), křehčí a elektricky nevodivé materiály (sklo, keramika). Měkčí materiály nelze obrábět, jelikož v nich zrna abraziva zůstávají v povrchu. [4, 5]

Mezi konkrétní technologické aplikace pak patří řezání destiček do  $5$  mm, dělení tyčí z rubínu a křemene, hloubení průchozích děr (maximální tloušťka obrobku  $10$  mm) a hloubení neprůchozích děr o maximálním průměru  $120$  mm. Dále broušení rovinných ploch s volným brusivem nebo broušení s diamantovým kotoučem, lapování a leštění skla a keramiky. Důležitou operací je výroba tvářecích nástrojů ze slinutých karbidů a výroba tvarově složitých elektrod určených k elektrojiskrovému obrábění. Pomocí ultrazvuku lze čistit produkty a dílce a zpevňovat povrch materiálu. [2, 9]

Ultrazvukové kmity se používají pro čištění povrchů, nedestruktivní zkoušky, svařování plastů a jako náhrada klasických metod obrábění - frézování, řezání závitů, vrtání (vrtání diamantovými nástroji) a soustružení (kvalitnější obráběné plochy oproti třískovému soustružení). Uplatnění ultrazvuku najdeme také v jiných oborech, například v lékařství. [4]

**Výhody a nevýhody**

Hlavní výhodou je větší úběr materiálu, menší tlaky na nástroj, rozměrová přesnost a dobrá kvalita vzniklého povrchu. Dalším výhodným aspektem je možnost obrábění elektricky vodivých i nevodivých materiálů (kromě plastických). [1, 9]

Nevýhodou při obrábění drážek je o  $1,6 - 1,7$  velikosti zrn větší rozměr na bocích drážky. Nevýhodná je závislost obrobitelnosti na tvrdosti a křehkosti materiálu. Dále pořizovací cena zařízení a dražší náklady na obrábění například oproti AJW. Nutností je hlídat rozměry nástroje, který je vystaven vlivu abraziva a ztrácí přesnost. [1,2]

### 1.1.9 Porovnání nekonvenčních metod

V této kapitole budou poznatky o nekonvenčních metodách shrnuty do tabulek a pomocí nich budou jednotlivé metody porovnány z různých pohledů.

Výběr dané nekonvenční technologie musí být pečlivě zvážena a musí být vzato v potaz několik faktorů a mít tak přehled o:

- provozních nákladech, připravenosti a schopnosti obsluhy (bezpečnost práce, pracovní podmínky, vzdělání, zručnost), a organizačních nákladech (předpoklad automatizace, flexibilita),
- kvalitě povrchu, požadavcích na drsnost povrchu, tvarové a rozměrové přesnosti,
- celkovém tvaru, rozměrech a použití vyráběné součástky, nutné je znát druh materiálu jeho korozivzdornost a tepelnou citlivost,
- hospodárnosti, roli hraje doba přípravy na obrábění, samotný výrobní čas, údržba a servis. [1]

Obecně nelze říci, která metoda je nejvýhodnější. Každá metoda má své výhody v uplatnění u rozdílných výrobních procesů a operací. Nekonvenční metody lze srovnat z pohledu cenových nákladů – tedy ekonomii výroby, kvalitu povrchu a drsnost povrchu na vyráběné součásti po opracování danou metodou, ekologické hledisko – šetrnost k životnímu prostředí, velikost a intenzitu úběru materiálu, apod. [1, 3]

V dnešní moderní době se strojírenský průmysl bez konvenčních metod neobejde a každá nekonvenční metoda je nedílnou součástí tohoto i jiných průmyslů.

Tab. 1.2 Hodnocení ekologických faktorů u NMO [1, 2]

Nežádoucí činitelé	USM	WJM	ECM	EDM <sup>1</sup>	EDM <sup>2</sup>	LBM	EBM	PBM
Exhaláty (plynné odpadní látky)	-	-	ANO	ANO	-	-	ANO	ANO
Ultrafialové záření	-	-	-	-	-	ANO	ANO	ANO
Toxicita	-	-	ANO	-	-	-	-	
Hlučnost [dB]	Kavitační šum	80	-	-	-	-	-	80
Prostředí	Brusná suspenze	Směs brusiva a vody	Elektrolyt	Kapalné dielektrikum		Vzduch	Vakuum	Směs argonu a vodíku

Poznámky: 1 – elektroerozivní hloubení, 2 – elektroerozivní drátové řezání

Tab. 1.3 Technologické parametry vybraných NMO [9]

Metoda	Drsnost Ra [μm]	Stupeň přesnosti IT	Hloubka ovlivněné vrstvy [μm]	Úběr [cm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> ]	Měrná spotřeba energie [kWh·cm <sup>-3</sup> ]
Elektrojiskrové obrábění	50 až 0,2	6 až 12	10 až 300	10 <sup>-4</sup> až 0,6	0,1 až 1
Obrábění paprskem laseru	50 až 6,3		100	10 <sup>-4</sup>	8 až 13
Obrábění paprskem elektronů	50 až 6,3		beze změn	10 <sup>-2</sup> až 0,4	
Obrábění paprskem plazmy			500 až 800	100	
Elektrochemické obrábění	2,5 až 1,6	9a ž12	beze změn	0,05 až 0,5	0,1 až 0,3
Elektrochemické broušení	0,8 až 0,2	6 až 9	beze změn	10 <sup>-2</sup>	0,04 až 0,08
Ultrazvukové obrábění	6,3 až 0,4	7 až 9	beze změn	10 <sup>-2</sup> až 10	0,07 až 0,8

Tab. 1.4 Možnosti využití principů NMO v technologiích zpracování materiálů [1]

Princip	USM	WJM	AJM	CM	ECM	LBM	EBM	PBM
Dělení materiálu	A	A	N	O	O	A	A	A
Spojování materiálů	A	N	N	O	N	A	A	A
Slévání	N	N	N	N	N	N	N	N
Tváření	A	N	N	N	N	O	A	O
Prášková metalurgie	O	N	N	N	N	O	A	O
Řezání, broušení	A	A	A	A	A	A	A	A
Tepelné zpracování	N	N	N	A	A	A	A	A
Rozměrové opracování	A	O	A	A	A	A	A	N
Změna stavu povrchu	N	N	N	A	A	A	A	O

A – zaužívaný proces, používané, O – omezené využití, N – nevhodné využití, nebo nepoužívané

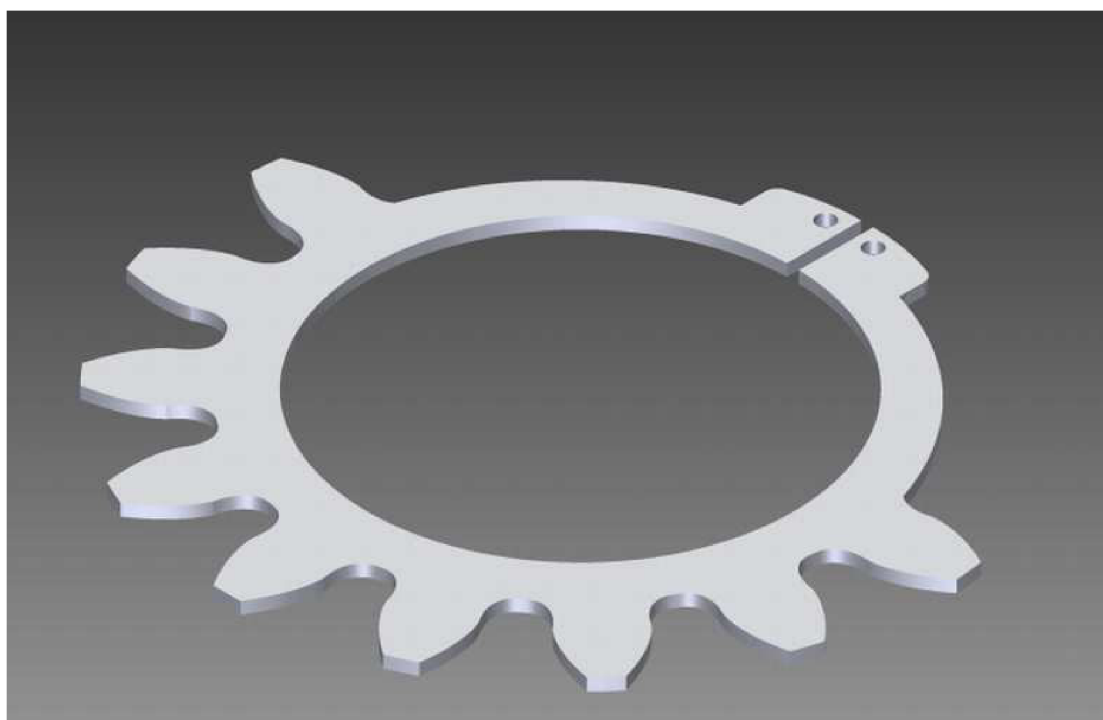
## 2 NÁVRH JEDNOLTIVÝCH METOD VÝROBY

V této kapitole budou podrobněji popsány a rozebrány metody navrhované na výrobu základního tělesa nástěnných hodin (obr. 11).

Jelikož se téma závěrečné práce zabývá nekonvenčními metodami, výroba součástky je volena také pomocí nekonvenčních metod, konkrétně pomocí vodního paprsku a laserového paprsku. Tyto metody jsou vybrány z důvodu vhodnosti použití pro daný materiál (slitina hliníku – dural), způsobu tepelného ovlivnění, drsnost povrchu po obrábění a pro danou tloušťku materiálu (4 mm). Výběr metod je volen i s ohledem na srovnatelné vlastnosti a požadavky, které jsou shrnuty v tabulce 5.

U laserového paprsku je výroba prováděna tepelným účinkem. Princip funkčnosti laseru a parametry, výhody, nevýhody a použití byly rozebrány v předchozí kapitole. Zde se pojednává konkrétněji o zařízení používaném k obrábění a opracování laserem, o laserových hlavách mající funkci nástroje a o druzích laseru využívaných v dnešní době.

Při obrábění vodním paprskem se využívá mechanický účinek vody a většinou i abraziva. U této metody byl také princip, parametry, použití, výhody a nevýhody popsány v kapitole výše. V této kapitole bude rozebrán princip a základní části zařízení pro obrábění vodním paprskem, dále druhy abraziv používaných k tomuto obrábění a také nutná úprava vody.



Obr. 2.1 Základní těleso nástěnných hodin vyráběné nekonvenčními metodami

Tab. 2.1 Porovnání vybraných metod [2]

<b>Metoda</b>	<b>Laser</b>	<b>Vodní paprsek</b>
<b>Dělené materiály</b>	Všechny druhy, kromě materiálů s vysokou světelnou odrazivostí a kompozitů	Všechny materiály
<b>Teplota řezu</b>	Tepelný řez	Studený řez
<b>Vliv teploty řezu na materiál</b>	Malý	Není
<b>Změna struktury materiálu v místě řezu</b>	Malé	Žádné
<b>Kolmost řezu</b>	Mírný odklon	
<b>Drsnost povrchu obráběné plochy</b>	Nízká drsnost	Lze dosáhnout nízké drsnosti (závislé na podmínkách)
<b>Výronek v řezné spáře</b>	Většinou bez výronku	Vždy bez výronku
<b>Tvrдость řezaného materiálu</b>	Nemá vliv na rychlost řezání	Mírně ovlivňuje rychlost řezání
<b>Řezání plastů</b>	Problematické - toxicita	Je možné
<b>Řezání kompozitů</b>	Je možné, pokud mají složky stejnou teplotu tavení	Je velmi vhodné
<b>Řezání keramiky, skla, kamene</b>	Velmi omezené	Je velmi vhodné (s výjimkou kalených skel)
<b>Reliéfní obrábění</b>	Je možné	Výjimečně
<b>Velikost dílce</b>	Malé i velké dílce	
<b>Tloušťka materiálu</b>	Malá a střední	Široký rozsah
<b>Složitost tvaru</b>	Komplikované tvary	
<b>Průstřel</b>	Je možný	
<b>Vznik plyných emisí</b>	Malé množství	Nevznikají, nebo jen při průstřelu
<b>Vznik oxidických povlaků</b>	Pouze při řezání kyslíkem	Pouze u materiálů korodujících při styku s vodou
<b>Energetická účinnost</b>	Až 10%	Až 80%

## 2.1 Rozbor metody – paprsek laseru

### Zařízení na obrábění laserem

Základní složení je u všech typů laserů stejné. Skládá se z laserové hlavy, jejíž součástí jsou: laserové médium, ze zdroje excitační energie, budícího zařízení, chladicího systému a optického rezonátoru. Dále z pracovního stolu stroje, zásobníku asistenčního plynu, zařízení na odsávání zplodin, CNC systému, apod. [1, 10]

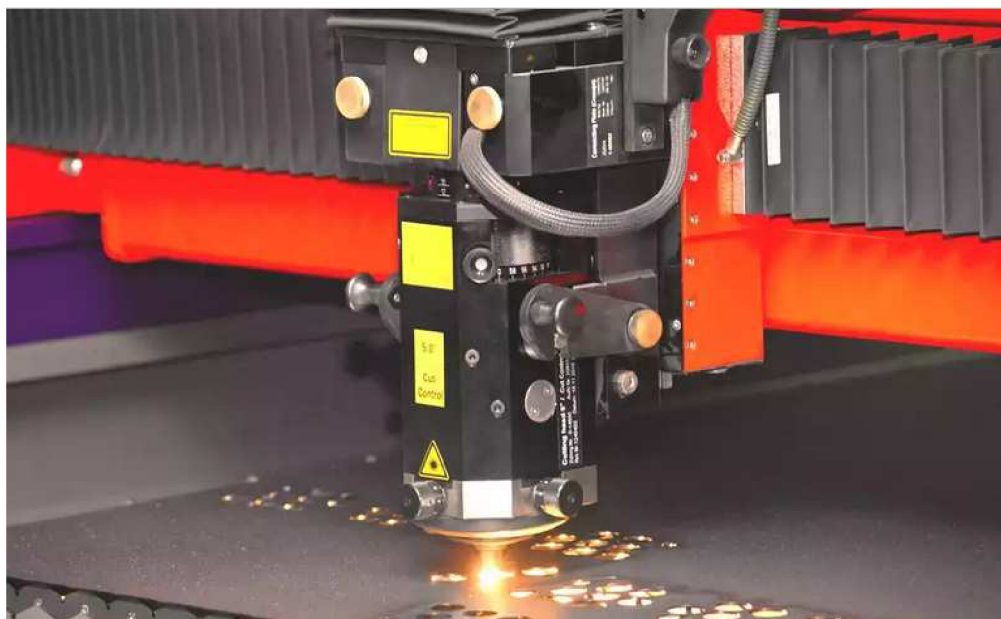
Funkcí laserového media je určovat délku vlny záření. Jedná se o materiál vhodný svými energetickými hladinami ve vhodném nosném materiálu. Většinou se jedná o průhledný materiál, schopný odvádět teplo. Dle stavu média se dělí na pevný, tekutý, plynný stav a stav páry. Jako aktivní materiál se používá neodym, rhodium, neon, helium, argon, kadmium, apod. Jako nosný materiál se používá hlinitý granát, sklo, alkohol, dusík, helium, argon, apod. [1, 3, 10]

Rezonátor je optický systém umožňující zesílit a formovat záření. Systém tvoří nejméně dvě zrcadla (nejčastěji odrazivá a částečně propustná), jejichž zakřivení a průměr udávají rozbíhavost laserového paprsku (dáno rovinným nebo prostorovým úhlem, ve kterém se šíří). Výsledkem je elektromagnetická vlna, která z něj vychází. [1, 10]

Budící zařízení značně ovlivňuje režim práce na laseru a jeho způsob je dán pracovním médiem. Způsob buzení se odvíjí od typu média. Pro pevné médium se používá buzení lampami a diodami, plynné médium se budí elektrickým výbojem, stejnosměrným a střídavým proudem. [1, 10]

Chlazení je zde určeno k odvodu nevyužité energie, která se přeměnila na energii tepelnou. Jako chladicí médium se nejčastěji používá voda (možno chladit i vzduchem). Chlazení probíhá ve vnější (speciální zásobník s čerpadlem) a vnitřní větvi (pomocí deionizované vody). [1, 3, 10]

Jako zdroj excitační energie se využívá speciální druh síťového napáječe. [3]



Obr. 2.2 Laserová hlava při provozu [20]



### Laserová hlava

Laserová hlava je nejdůležitějším prvkem při laserovém obrábění. Dnes je možné využít 3D hlavu napojenou na přírubu robota a obrábět složitější tvary, svařovat hůře dostupná místa, atd. Hlavní vyráběné hlavy jsou řezací a svařovací. [3]

Jedním z typů je řezací hlava. Ta má dvě hlavní části: systém čočky a trysky s přívodem plynu. Celý komplex musí být lehce nastavitelný, odolný s možností zajištění proti změnám v průběhu operace a spolehlivý. Čočka s optickými komponenty je vložena v tubusu a trysku skryje plášť řezací hlavy. V řezací hlavě je skryt sensorový systém regulace odstupů (brání kolizím a konstantní vzdálenosti od materiálu). [3, 10]

Paralelní paprsky laseru láme čočka a následně spojuje do ohniska (místo s nejvyšší energetickou hustotou). Chlazení čočky zajišťuje řezací plyn proudící koaxiálně k laserovému paprsku do míst pod čočkou. S využitím řezací trysky je tato směs vedena na obráběný materiál. Na trysce vzniká díky vysokým rychlostem proudění značné teplo, a proto je nutno chladit tlakovým vzduchem. [3, 10]

### Druhy laserů

Základní dělení dle typu prostředí:

- polovodičové lasery – GaAs s výkonem  $P = 2$  až  $10$  mW (použití v informačních technologiích),
- pevnolátkové – rubínové s výkonem  $P = 5$  kW, Nd - YAG s výkonem  $P = 100$  W až  $1,2$  kW, Nd – sklo s výkonem  $P = 2$  mW, alexandrit s výkonem  $P = 10$  W,
- plynové lasery –  $\text{CO}_2$  a  $\text{N}_2 + \text{He}$  s výkonem  $P = 500$  W až  $20$  kW (používané ve strojírenství k řezání a některé druhy v chirurgii),
- kapalinové lasery – s výkonem  $P = 100$  W (požití v oblasti spektroskopie),
- excimerové lasery – ArCl, WFe o výkonu  $P = 20$  až  $250$  W (oblast použití je zejména v chirurgii a fotolitografii). [1, 2]

Současně se výše zmíněné prostředí odlišují i vlnovou délkou a frekvencí vysílaného záření:

- infračervené záření
- rentgenové a gama záření
- ultrafialové záření
- záření viditelného pásma

Podle typu budícího signálu můžeme pak dělit lasery buzené opticky, elektrickým výbojem, chemicky, rekombinačně, tepelnými změnami, elektronovým svazkem a injekcí nosičů nábojů. Podle režimu paprsku pak na pulzní, kontinuální a kontinuální s vysokou energií impulzu. S ohledem na výkon laseru lze dělit na nízkovýkonové (desetiny W až stovky W) a vysokovýkonové ( $1$  kW až  $30$  kW). [1, 2, 5]

## 2.2 Rozbor metody – vodní paprsek

### Zařízení na obrábění vodním paprskem

Ve strojírenské praxi se nejčastěji využívá vodní paprsek k dělení a řezání materiálu a proto bude popsáno zařízení určené k řezání vodním paprskem.

Toto zařízení se dělí na čtyři základní části:

#### 1. řídicí část

Řídicí část je tvořena CNC řízeným pracovištěm, na kterém je ovládací panel propojený s počítačem. Pomocí tohoto systému se kontroluje, ovládá a monitoruje celý průběh obrábění. Aplikace CAD/CAM programů na těchto zařízeních umožňuje zkracovat vedlejší pracovní časy a zvyšovat tak produktivitu celé výroby. [3]

#### 2. filtrovací část

Tato část je tvořena ze zařízení, které chrání systém na úpravu pracovní kapaliny před vnikáním nečistot. Kvalita vody používané k obrábění přímo ovlivňuje dobu životnosti dýzy a vysokotlaké pumpy. Dále sem patří zařízení na deionizaci vody, změkčení vody a zařízení na zpětnou osmózu. Filtry jsou umístěny ve vysokotlakém vodním čerpadle a mechanicky upravují pracovní kapalinu. Celý systém filtrace je velmi nákladný a výrazně metodu prodražuje. [3, 6]

#### 3. vysokotlaké vodní čerpadlo

Zařízení je určené k vytvoření vysokého tlaku v kapalině (tlak se pohybuje mezi  $p = 300$  až  $500$  MPa). K dosažení takového tlaku se používá triplexové plunžrové čerpadlo nebo multiplikátor. Princip funkce multiplikátoru je práce se dvěma spojenými písty. Ty převádí nízký tlak z oleje pomocí velkého pístu přes malý píst na vysoký tlak vody. Díky velkým tlakům dosahuje spotřeba vody k  $11 \text{ l} \cdot \text{m}^{-1}$ . Plynulý chod a udržení tlaku zajišťuje vyrovnávač vysokotlakého čerpadla. Dále generátor vzduchu, který pomocí speciálního ventilu zajišťuje zapínání a vypínání přívod vody k řezací hlavě, akumulátor (tlaková tlustostěnná nádoba), který tlumí rázy kapaliny vznikající v multiplikátoru (zabraňuje vzniku deformací v podobě makro vad). [5, 6]

#### 4. řezná část

Do této části se řadí řezací hlava s vodní a abrazivní dýzou, pracovní stůl, zásobník s abrazivem. Řezná hlavice se považuje za hlavní a charakterizující část celé metody. Vodní trysky v ní jsou uspořádány do zužující se dýzy a je tak zvětšována rychlost paprsku (rychlost 1 – 4 Mach) s vytvářejícím se kontinuálním proudem. Po průchodu vodního paprsku vodní tryskou je ve směšovací komoře přidáno abrazivo (brusný materiál dodávající progresivitu), pokud se jedná o AWJ metodu. Vzhledem k velkému namáhání jsou trysky vyráběny z velmi odolných materiálů jako diamant, kubický nitrid bóru a safír. [3, 5, 6]

Všechny tyto části jsou spojeny armaturami, trubkami a prvky potrubí na rozvod pracovní kapaliny, vzduchu a abraziva. [3]

### Úprava vody pro AWJ a WJM

Vzhledem k ovlivnění životnosti kvalitou vody je nutné vodu příslušně upravit, aby měla definované vlastnosti. Nedodržení těchto zásad vede k snížení výkonu, zvýšení nákladů, opotřebením a především ucpáním trysky. Hlavními nežádoucími prvky jsou malé částice hmoty a úplně rozpustné pevné látky ve vodě (vápník, magnézium). [1, 2]

K úpravě vody se používají tyto procesy:

- zpětná osmóza – voda se tlačí přes polopropustnou membránu, která zachytává nečistoty a rozpustné částice,
- deionizace – jedná se o výměnu iontů, ale složitějším procesem než u změkčování. Pomocí kationtové a aniontové pryskyřice se voda zbavuje minerálů a nahrazuje se hydroxidy a sodíkem,
- změkčování – k obrábění vodním paprskem je doporučena měkká voda, pokud není voda měkká, je nutná úprava pomocí výměny iontů. Při ní dochází k nahrazení těžko rozpustných částic snadněji rozpustnými (sodíkem),
- filtrace – jde o mechanický způsob úpravy vody, odstraňují se pevné částice (různých velikostí) z vody, často bývá použit čtyřvrstvý hloubkový filtr, který je schopen do čtyř vrstev zachytit částice 1 – 10  $\mu\text{m}$ . [6]

### Druhy abraziv

Proces dělení materiálu je ovlivněn hustotou, pevností a tvrdostí abraziva. Důležitá je proto vhodná volba abraziva na daný materiál. Mezi nejčastější druhy patří granát ( $5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Y}_2\text{O}_3$ ), který má vyšší účinek, je dražší, více opotřebovává trysku a není vhodný k recyklaci. Dále se používá oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), olivín a ocelová drť nebo broky. Za nižší cenu na úkor nižší účinnosti lze použít křemičitý písek. [2, 3]

Velikost abraziva se definuje pomocí jednotek MASH a tvar se popisuje kulatostí a kruhovitostí. Nejvíce vyhovující je tvar s malou kruhovitostí a velkou kulatostí. Velikost a tvar zrn abraziva má vliv na hloubku řezu a na potřebnou kinetickou energii k dělicímu procesu. [3]



Obr. 2.3 Řezací hlava při obrábění [21]

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

Experimentální část závěrečné práce je zaměřena na porovnání dvou nekonvenčních metod, vodního paprsku a laserového paprsku. Metody jsou vybrány z důvodu velké podobnosti, co se výsledných parametrů týče a tím umožní vznik srovnatelných podmínek pro vyhodnocení. Dále mají vhodné použití jak pro vybraný typ, tak pro zvolenou šířku materiálu. Porovnání je prováděno na základním tělese nástěnných hodin. Toto těleso následně slouží k sestavení celkového výrobku – nástěnných hodin.

Obrábění takto složitěho tvaru by konvenčními metodami bylo časově nevýhodné a vzhledem k použitým materiálům i nevhodné. Oproti tomu jsou nekonvenční metody energeticky náročnější a jsou nutné přídavné operace (odsávání zplodin, likvidace vody a recyklace abraziva). Při použití vybraných paprskových metod vzniká jen úzká řezná mezera a nevzniká tak velký odpad. V důsledku toho je využití polotovaru velmi vysoké. Rozměrová přesnost vzhledem k požadované funkci jde docílit konvenčním i nekonvenčním obráběním.

Celý experiment byl prováděn u firmy Aquadem s.r.o. Brno Chrlice. Materiál na výrobu byl dodán od firmy a po konzultaci byl zvolen dural 5754 H22. Materiál je měkký, vhodný na použité paprskové metody a dobře na něm lze pozorovat stopy po obrábění a důsledky použité metody. Zároveň se základním tělesem bylo ve firmě řezáno i sklo (vodním paprskem) a číselníkové čárky (laserovým paprskem) nutné ke kompletaci sestavy.

Výrobní postup, sestaven na základě výkresové dokumentace ze softwaru INVENTOR PROFESSIONAL 2014, byl vytvořen ve firmě a je součástí příloh (příloha 6). Výrobní postup i s naprogramováním pro laser byl sestaven pomocí programu Bysoft do šablony pro tloušťky 1 – 12 mm. Pro vodní paprsek pak pomocí programu IGEMS do šablony pro tloušťky 1 – 60 mm.



Obr 3.1 Obrobené základní těleso nástěnných hodin

### 3.1 Výroba laserovým paprskem

Výroba součástky základního tělesa nástěnných hodin pomocí laserového paprsku byla prováděna na CNC stroji BySprint Fiber 3015 s výkonem 3000 W. Celkové rozměry stroje: délka 10 150 mm, šířka 6200mm a výška 2500mm. Použit je vláknový laser, který oproti CO<sub>2</sub> laseru umožňuje řezat tenké materiály vyššími řeznými rychlostmi. Souběžná rychlost polohování dosahuje až 140 m·min<sup>-1</sup> a maximální zrychlení os 12 m·s<sup>-2</sup>.

Výhodou jsou také nižší provozní náklady díky malé spotřebě elektrické energie. Firmou používaný laserový plyn je kombinace kyslíku a dusíku. Maximální možný rozměr polotovaru, který lze na tomto stroji obrábět je 1500 x 3000 mm. Maximální tloušťka obráběného polotovaru pak závisí na typu použitého materiálu. Nejvhodnějším materiálem je hliník a jeho slitiny (např. dural) a měď a její slitiny (např. mosaz). Stroj se ovládá pomocí dotykového panelu a kontrolních tlačítek na panelu. O bezpečnost provozu se starají vstupní dveře, které jsou při provozu blokovány a uzavírají celou laserovou komoru a světelné závory.



Obr 3.2 Vnitřní pohled na BySprint Fiber 3015

Po zadání programu do stroje a jeho nachystání následoval test rozměrů o určitém rozměru, aby se vyzkoušelo, zda je program správně nastaven pro daný materiál. Poté proběhlo řezání základního tělesa při minimální hlučnosti a ve velmi krátkém časovém intervalu. Vzhledem k použité technologii nebylo potřeba polotovar na pracovní stůl nijak upevňovat a byl tedy volně položen. Zvolený program obrobil požadovaný rozměr s vyhovující tvarovou přesností ale s velkými otřepy (více v další kapitole).

Spolu se základním tělesem byly pomocí laseru obráběny i číselníkové čárky, u kterých byla potřeba kvůli malým rozměrům zavést můstky mezi jednotlivými tvary na polotovaru a zabránit tak jejich propadávání do sběrné odpadní šachty. I přes malé rozměry laser tyto součástky obrobil ve vyhovujících rozměrech a kvalitě.



Obr 3.3 BySprint Fiber 3015

Velkou nevýhodou při řezání laserem a hlavně u Al slitin je vznik karcinogenních plynů. Ty musí být odsávány a bezpečně likvidovány. Odsávány jsou i malé částice vznikající při obrábění a poletující ve vzduchu v laserové komoře. Malé částice zachytí filtry a velké částice jsou shromážděny v odlučovací nádobě. Nutný je velký sací výkon k úplnému odsání všech škodlivin. Všechny tyto operace se dějí v jednom velkém filtračním zařízení. (obr 3.4)



Obr 3.4 Systém odsávání z komory laseru

### 3.2 Výroba vodním paprskem

Obrábění základního tělesa nástěnných hodin vodním paprskem bylo provedeno na CNC stroji NC 4030T od firmy Water Jet Sweden. Stroj má tři řezací hlavy a je možné obrábět obrobky o maximální velikosti 2000 x 3000 mm (příčměž efektivní plocha je 3000 x 4000 mm) a tloušťce až 150 mm. Podobně jako laserový stroj má i tento stroj CAD/CAM grafické pracoviště a lze tak zpracovávat data přímo z výkresu (pokud jsou v elektronické podobě). Seznam materiálů vhodný k řezání na tomto stroji zahrnuje téměř všechny druhy materiálů, např.: nástrojové a konstrukční oceli, hliník a jeho slitiny, nerez ocel, titan, sklo mramor. Výkon stroje je 3500 W. Stroj může být použit v případě výhodnosti pro technologii WJM i pro AWJ. Ovládání stroje se provádí pomocí panelu, s nedotýkovou obrazovkou a ovládacími tlačítky, umístěného vedle stroje. Nevýhodou je neuzavření stroje a s tím související možnost odlétávání nečistot a kapek vody i mimo vymezený prostor.

Součástí systému řezání vodním paprskem je u firmy Aquadem i přístroj na přidávání abraziva se sítí zabraňujícími vstupu nečistot do systému. Dále stroj AQUArec PRO (obr. 3.6) recyklující a oddělující použité abrazivo od vody tak, aby se dalo znovu použít. Tento stroj si firma sama navrhla. Nevýhodou při použití recyklovaného abraziva je snížení účinnosti až o 20 %.



Obr 3.5 Řezací trysky stroje NC 4030T

Při obrábění základního tělesa nebylo nutné materiál nijak uchycovat nebo přidržovat. Pro celou operaci byla použita pouze jedna tryska. Po obrábění bylo nutné materiál opláchnout vodou, jelikož stroj byl před údržbou a vyplavoval na materiál značné množství nečistot (zanesení stroje je patrné z barvy vody na obrázku 3.5). Kvalita výsledné součástky byla velmi dobrá a rozměrová přesnost odpovídala výkresu.

Následně se pomocí vodního paprsku obrobilo i sklo sloužící jako středová výplň hodin. Jelikož zde byl pro otvor nutný nástřel, bylo potřeba mezi trysku a sklo položit kus plechu, aby sklo nepopraskalo. Výsledný tvar splňoval všechny náležitosti a sklo zůstalo bez prasklin. Kvůli zanesení stroje byl také nutný oplach.



Obr 3.6 Stroj na recyklaci abraziva

Firma používá nejrozšířenější a nejpoužívanější druh abraziva Garnet MASH 80 (obr. 3.7). Jedná se o přírodní materiál, který je nerozpustný ve vodě, nehořlavý a nezanechává zápach. Poskytuje optimální rovnováhu mezi řeznou rychlostí a přesností hran.



Obr. 3.7 Abrazivo Garnet MASH 80 na sítích



## 4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V této kapitole budou použité metody porovnány z výsledků skutečné výroby součástky základního tělesa nástěnných hodin.

Obě metody se ukázaly být vhodné pro náš výrobek, ale každá měla i nevýhody. U vodního paprsku je to doba obrábění, která byla v porovnání s laserem značně větší. U laseru to pak byly otřepy vzniklé po obrábění a také tepelně ovlivněná část, která způsobila pnutí a lze ji pozorovat pouhým okem (viz obr. 4.1).

Při prvním pokusu došlo u obrábění laserem k natavení materiálu v oblasti řezu a byl vyroben zmetek. U vodního paprsku vzhledem k studenému řezu toto možné není. Při dalším pokusu již vše proběhlo v pořádku. Naopak u vodního paprsku při obrábění neseseděly součástky do sebe (výplňové sklo a základní těleso) díky velké výrobní toleranci a bylo nutné rozměry nepatrně upravit, aby součástky lépe lícovaly. U laseru díky menší toleranci rozměry seděly lépe.

Kvalita řezaných součástí by u obou způsobů šla výrazně zlepšit nastavením a odladěním vhodnějších podmínek, jako třeba zpomalení rychlosti řezání, vložení hobry nad a pod řez, seřízení ohniskové vzdálenosti, atd.

Z hlediska ekologie je výrazně lepší vodní paprsek, u kterého se likviduje pouze voda a abrazivo je recyklováno a používáno znova. Nevzniká tedy žádný nebezpečný odpad ani výpary. U laserového paprsku je dopad o poznání horší. Vznikající karcinogenní plyny musí být bezpečně filtrovány a zneškodněny ve filtračním zařízení.

Důležité porovnávací hodnoty pro výrobu naší součástky shrnuje následující tabulka.

Tab. 4.1 Porovnání metod dle vyrobené součástky

Skutečné hodnoty získané při výrobě		
Měřená veličina	Vodní paprsek	Laser
Velikost řezné spáry	1 mm	0,3 mm
Přesnost řezu	± 0,3 mm	± 0,1 mm
Tepelné ovlivnění	NE	ANO
Vhodnost volby materiálu pro danou metodu	Vhodný	Vhodný
Předpokládaná drsnost	Ra = 12,5	Ra = 6,3
Řezný čas	2 min 58s	25 s
Celkový čas	3 min 10 s	1 min 53 s
Otřepy	Minimální	Velké
Možnost průstřelu	Průstřel proveden	Průstřel proveden
Vznik povlaku	Ne	Ne



a)

b)

Obr 4.1 Porovnání otřepů po použití jednotlivých metod

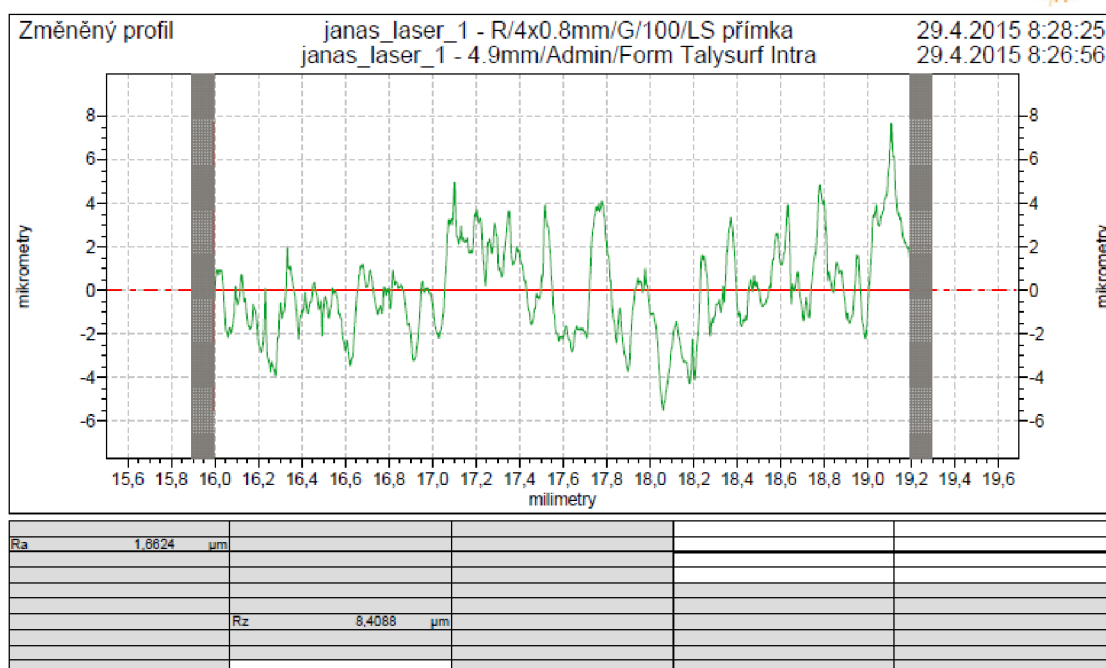
a – obrobené vodním paprskem, b – obrobené laserem

#### 4.1 Porovnání drsností pomocí drsnoměru

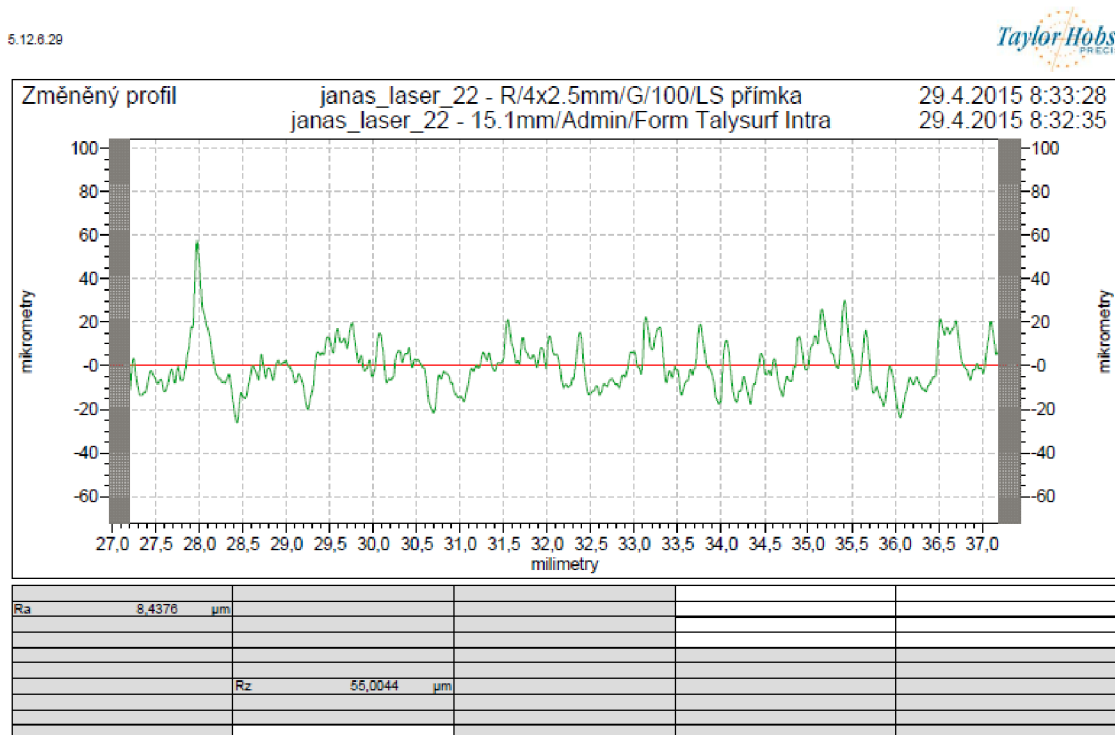
Měření drsnosti na obou součástkách bylo provedeno v laboratoři ústavu strojírenské technologie pomocí přístroje Form Talysurf Intra 50. Na každé součásti bylo měření provedeno na dvou místech a to na vstupu paprsku do materiálu a na výstupu z materiálu v řezné spáře. Zdokumentování měření je zobrazeno na grafech vygenerovaných přístrojem a poslaných do počítače. Tyto grafy jsou vloženy do této závěrečné práce. Přístroj dokáže vyhodnotit mnoho parametrů, my však použijeme jenom parametr Ra a Rz. Z důvodů velkých rozměrů součástky bylo nutno přístroj podložit a zvýšit tak jeho manipulační prostor.

Obr. 4.2 Graf drsnosti při řezání laserem – vstup

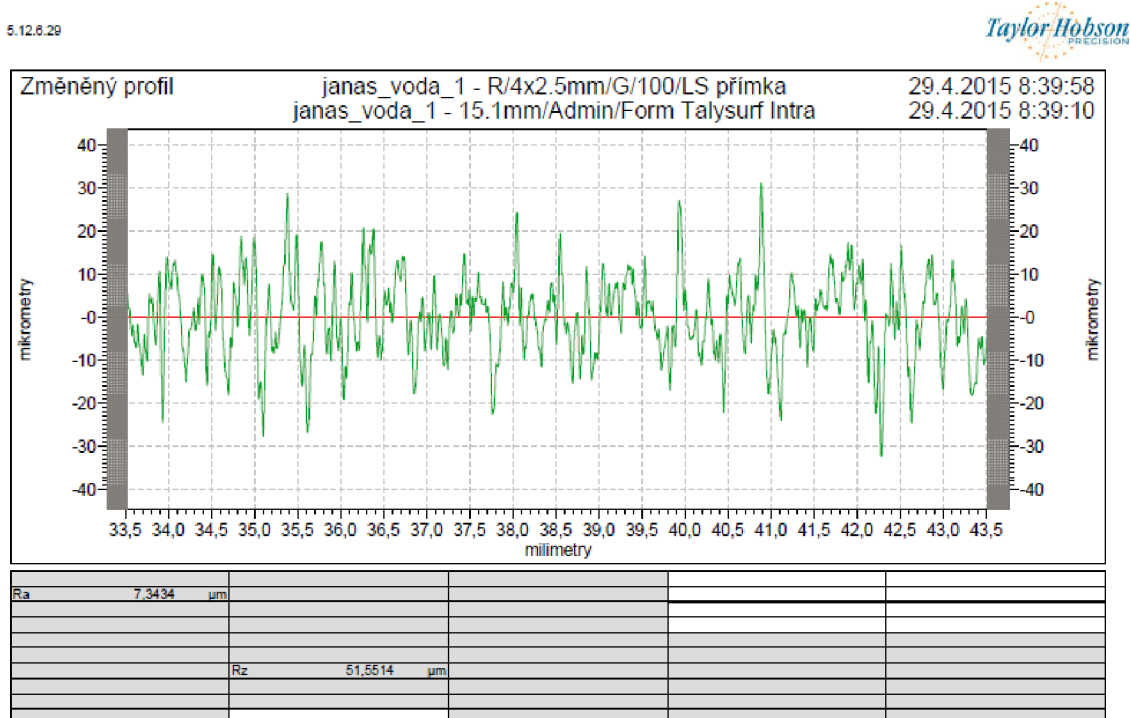
5.12.6.29



Obr. 4.3 Graf drsnosti při řezáním laserem – výstup

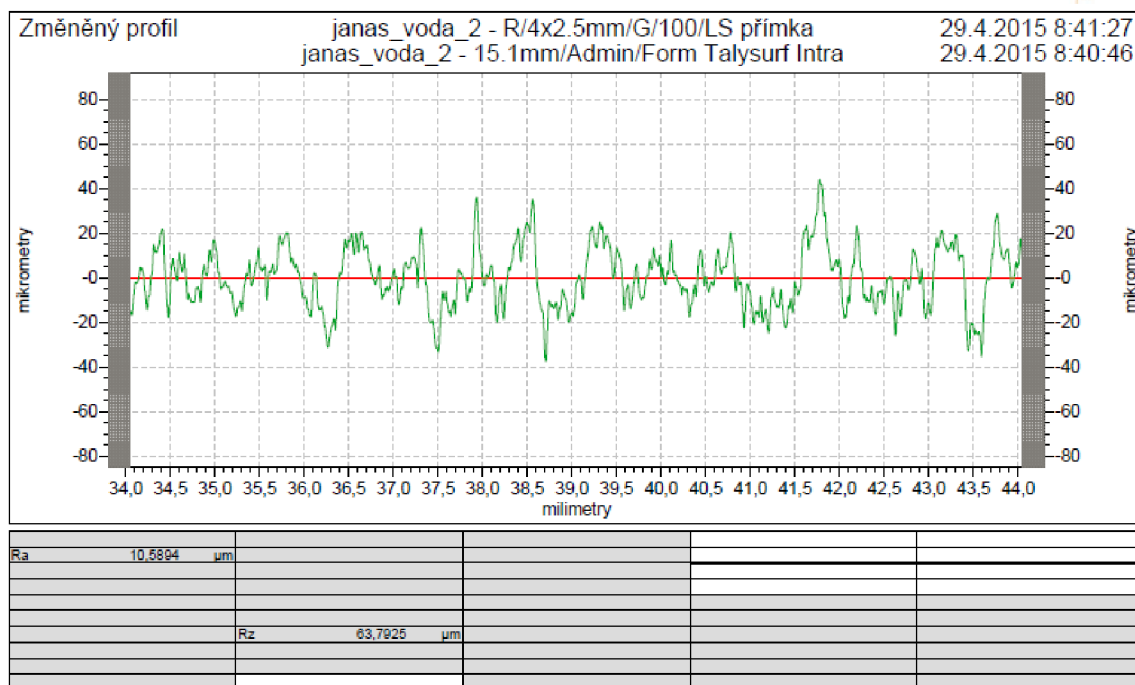


Obr. 4.4 Graf drsnosti při řezáním vodním paprskem – vstup



Obr. 4.5 Graf drsnosti při řezáním vodním paprskem – výstup

5.12.6.29



### Porovnání drsností

Tab. 4.2 Srovnání parametrů skutečně naměřených hodnot Ra, Rz

Metoda	Laser	Vodní paprsek
<i>Ra vstup</i> [μm]	1,6624	7,3434
<i>Ra výstup</i> [μm]	8,4376	10,5804
<i>Rz vstup</i> [μm]	8,4088	51,5514
<i>Rz výstup</i> [μm]	55,0044	63,7925

Z tabulky je patrné, že lepších výsledků je dosaženo u paprsku laseru. Toto srovnání odpovídá tedy teoretickému předpokladu a i přes nepříznivé otřepy má součástka po obrábění laserem lepší povrch z hlediska drsnosti. Důvodem vzniku otřepů je vyfukování nataveného materiálu procesním plynem ve směru působení paprsku. Díky tomu vznikly otřepy na spodní hraně součástky. Otřepy jsou nebezpečné a je potřeba je odstranit.

## 5 ZÁVĚRY

Cílem této závěrečné práce bylo navrhnout vhodné technologie pro výrobu základního tělesa nástěnných hodin, jejich popsání a teoretické porovnání, praktické vyrobení této součástky a porovnání metod s ohledem na vyrobené základní těleso.

V první části této práce jsou komplexně shrnuty všechny nekonvenční metody. Jsou rozebrány základní principy, použití, výhody a nevýhody jednotlivých metod. Princip je vždy doplněn názorným schématem nebo obrázkem. V závěru první kapitoly jsou dané metody porovnány z hlediska technologických parametrů, ekologie a možnosti použití pro konkrétní typy technologických operací.

V druhé části je popsán návrh metod a zdůvodnění výběru metod s následným porovnáním na teoretické úrovni. Následně je proveden experiment s vyhodnocením.

Vzhledem k dekorativnímu účelu celé sestavy je pro nás výhodnější volbou obrábění pomocí vodního paprsku a to hlavně díky nevznikajícím otřepům, celkově dobře vypadajícímu vzhledu ihned po obrábění a tvarové stálosti. U řezání laserem vzniká vnitřní pnutí a základní těleso se deformuje, proto bychom museli do výroby zařadit jako další operaci rovnání součástky. Z ekologického hlediska, jelikož nevznikají žádné nebezpečné vedlejší produkty (karcinogenní plyny) a abrazivo je recyklovatelné. V případě hromadné výroby by se z časových důvodů vyplatila spíše metoda laserového paprsku, která má hlavní řezný čas o značnou dobu kratší. Porovnáním výsledných drsností součástek na drsnoměru je patrné, že při požadované lepší drsnosti by bylo výhodnější použít laser. Tedy pro kusovou, či malosériovou výrobu doporučuji řezání pomocí vodního paprsku a pro sériovou výrobu pomocí laseru.

Finálním výstupem této práce jsou sestavené kompletní a funkční nástěnné hodiny (obr. 5.1). Do sestavy jsou vloženy součástky: základní těleso (vyrobené pomocí vodního paprsku), středová skleněná výplň (vyrobena také pomocí vodního paprsku), hodinový strojek (koupěn), číselníkové čárky (vyrobené laserem) a hodinové ručičky (vytisknuté pomocí metody Rapid Prototyping).



Obr. 5.1 Výsledné nástěnné hodiny

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
2. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
3. MIČIETOVÁ Anna. *Nekonvenčné metódy obrábania*. 1. vyd. Žilina: EDIS, 2001, 376 s. ISBN 978-80-7100-853-8.
4. HUMÁR, A.: *Technologie I, Technologie obrábění – 3. část*, Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program, VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2005.
5. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
6. KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava: 1998. 195s. ISBN 80-8057-091-4.
7. KARAFIÁTOVÁ, Stanislava a Ivo LANGER. *Nekonvenční technologie: [učebnice]*. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 1998, 164 s. Učebnice pro odborné školy (Fragment). ISBN 80-720-0296-1.
8. MORÁVEK, Rudolf a Ivo LANGER. *Nekonvenční metody obrábění: [učebnice]*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 1999, 102 s. Učebnice pro odborné školy (Fragment). ISBN 80-7082-518-9.
9. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
10. PETRA, Janíčková. Sbližování teorie s praxí: Nekonvenční technologie obrábění - Laser. [online]. 2010, s. 32 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z:  
<http://www.uh.cz/szesgm/files/sblizovani/pdf/laser-projekt-sablona.pdf>
11. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 1. díl: Elektroerozivní obrábění. *Mmspektrum* [online]. 2007, 2007 / 7 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z:  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
12. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 8. díl: Obrábění paprskem iontů – plazmatem. *Mmspektrum* [online]. 2008, 2008 / 10 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>
13. Řezání plazmou pomocí programu OCTOPUZ a robotů ABB: Software Octopus. In: *Octopus* [online]. 2014 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z:  
<http://www.octopuz.cz/aktuality/rezani-plazmou-pomoci-programu-octopuz-a-robotu-abb>

14. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 6. díl: Obrábění paprskem elektronů. *Mmspektrum* [online]. 2008, 2008 / 6 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z:  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-2.html>
15. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery: Základní princip laseru a jejich dělení. *Lasery a optika* [online]. 2013 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
16. DHAKAL, Hom Nath. Non Traditional Manufacturing Processes: Chemical milling. *Turxon* [online]. 2007 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z:  
[http://www.turnxon.com/articles/articles\\_5.html](http://www.turnxon.com/articles/articles_5.html)
17. BEZDĚK, Stanislav. Strojírnoství: Hloubení otvorů malých průměrů. *ELUC* [online]. 2014 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://eluc.cz/verejne/lekce/1408>
18. Řezání vodním paprskem: Princip řezání. *WCM* [online]. 2015 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://wcm.cz/technologie-rezani-vodnim-paprskem/princip-rezani>
19. Materials Engineering: Ultrasonic processing. *SubsTech* [online]. 2013 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z:  
[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=ultrasonic\\_processing](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=ultrasonic_processing)
20. Laserové řezání: Technické parametry. *Jontech* [online]. 2015 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://jontech.cz/cs/technologie-a-sluzby/laserove-rezani/>
21. I-Cubed Industry Innovators Inc. *I-Cubed* [online]. 2012 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.icubed.biz/>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK**

<b>Zkratka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
AJW	-	Abrasive water jet machining
Al	-	Hliník
Ar	-	Argon
CAD	-	Computer - aided design
CAM	-	Computer-aided manufacturing
Cl	-	Chlór
CM	-	Chemical machining
CNC	-	Computer numeric control
CO <sub>2</sub>	-	Oxid uhličitý
EBM	-	Electron beam machining
ECM	-	Electro chemical machining
EDM	-	Electro discharge machining
F	-	Frézování
Fe	-	Železo
H <sub>2</sub>	-	Vodík
HRC	-	Tvrdost měřená dle Rockwella
IT	-	Stupeň přesnosti
LBM	-	Laser beam machining
N	-	Dusík
Ni	-	Nikl
NMO	-	Nekonvenční metody obrábění
O <sub>2</sub>	-	Kyslík
PBM	-	Plasma beam machining
S	-	Soustružení
SK	-	Slinuté karbidy
USM	-	Ultrasonic machining
Ti	-	Titan
W	-	Wolfram
WJM	-	Water jet machining
3D	-	Trojdimenzionální prostor



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ**

<b>Zkratka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
c	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost světla
E <sub>1</sub>	[J]	Energie v dolní hladině
E <sub>2</sub>	[J]	Energie v horní hladině
f	[Hz]	Frekvence
I	[A]	Proud
P	[W]	Výkon
p	[Pa]	Tlak
R <sub>a</sub>	[μm]	Střední aritmetická odchylka profilu
R <sub>z</sub>	[μm]	Nejvyšší výška nerovnosti profilu
t	[°C]	Teplota
U	[V]	Napětí
v	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost
φ	[mm]	Průměr

**SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK**



Obr. 1	Nástěnné hodiny	9
Obr. 1.2	Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění	12
Obr. 1.3	Schéma zařízení pro obrábění paprskem plazmy	14
Obr. 1.4	Řezání plazmou	15
Obr. 1.5	Princip obrábění elektronovým paprskem	16
Obr. 1.6	Změna dodané energie na laserový paprsek	18
Obr. 1.7	Princip chemického obrábění	20
Obr. 1.8	Schéma zařízení pro elektrochemické obrábění	22
Obr. 1.9	Schéma řezání vodním paprskem	24
Obr. 1.10	Princip obrábění ultrazvukem	26
Obr. 2.1	Základní těleso nástěnných hodin vyráběné NMO	30
Obr. 2.2	Laserová hlava při provozu	32
Obr. 2.3	Řezací hlava při obrábění	35
Obr. 3.1	Obrobené základní těleso nástěnných hodin	36
Obr. 3.2	Vnitřní pohled na BySprint Fiber 3015	37
Obr. 3.3	BySprint Fiber 3015	38
Obr. 3.4	Systém odsávání z komory laseru	38
Obr. 3.5	Řezací trysky stroje NC 4030T	39
Obr. 3.6	Stroj na recyklaci abraziva	40
Obr. 3.7	Abrazivo Garnet MASH 80 na sítích	40
Obr. 4.1	Porovnání otřepů po použití jednotlivých metod	42
Obr. 4.2	Graf drsnosti při řezání laserem – vstup	42
Obr. 4.3	Graf drsnosti při řezání laserem – výstup	43
Obr. 4.4	Graf drsnosti při řezání vodním paprskem – vstup	43
Obr. 4.5	Graf drsnosti při řezání vodním paprskem – výstup	44
Obr. 5.1	Výsledné nástěnné hodiny	45
Tab. 1.1	Oblast aplikace nekonvenčních metod	11
Tab. 1.2	Hodnocení ekologických faktorů u NMO	28
Tab. 1.3	Technologické parametry vybraných NMO	29

Tab. 1.4	Možnosti využití principů NMO v technologiích zpracování materiálů	29
Tab. 2.1	Porovnání vybraných metod	31
Tab. 4.1	Porovnání metod dle vyrobené součásti	41
Tab. 4.2	Srovnání parametrů skutečně naměřených hodnot	44

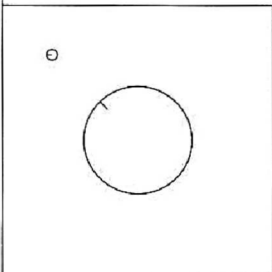
**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1      Výkres základního tělesa nástěnných hodin  
Příloha 2      Výkres výplňového skla  
Příloha 3      Výkres malé ručičky  
Příloha 4      Výkres velké ručičky  
Příloha 5      Výkres sestavy nástěnných hodin a kusovník  
Příloha 6      Výrobní postup

# PŘÍLOHA 6

Seznam zakázek					
31-3 HODINY DURAL 1					
Práce	31-3 HODINY DURAL 1	Stroj	BySprint Fiber		
Popis		Materiál	AW5754		
		Tloušťka	1,00	mm	
Informace1		Počet různých dílců	3		
Informace2		Řezný čas	00:00:33		
Informace3		Vedlejší časy	00:01:10		
		Čas celkem	00:01:44		
Tabule					
Rozměr X	Rozměr Y	Hmotnost	Počet	Informace o artiklu	
600,00 mm	390,00 mm	,632 kg	1		
Dílce					
	Číslo dílce	1			
	Název	soucastka hodin 2	Požad. / skuteč.	20 / 20	
	Popis		Rozměr X	2,50 mm	
	Informace1		Rozměr Y	12,00 mm	
	Informace2		Plocha ef.	0,00003 m <sup>2</sup>	
	Informace3		Hmotnost	0,00008 kg	
	Informace o úloze				
	Řezný čas	00:00:01	Vedlejší časy	00:00:00	Čas celkem 00:00:01
		Číslo dílce	2		
Název		velká čárka do hodin 1	Požad. / skuteč.	20 / 20	
Popis			Rozměr X	2,50 mm	
Informace1			Rozměr Y	15,00 mm	
Informace2			Plocha ef.	0,00004 m <sup>2</sup>	
Informace3			Hmotnost	0,00010 kg	
Informace o úloze					
Řezný čas		00:00:01	Vedlejší časy	00:00:00	Čas celkem 00:00:01

**Seznam zakázek**  
**31-3 HODINY DURAL 1**

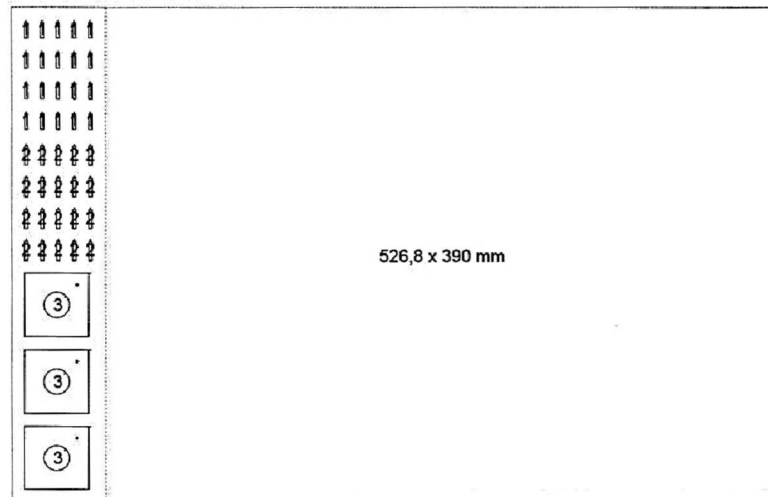
	<b>Číslo dílce</b>	<b>3</b>			
	<b>Název</b>	<b>TEST ROZMĚR D1</b>			
	<b>Popis</b>	<b>Požad. / skuteč.</b>	<b>3 / 3</b>		
	<b>Informace1</b>	<b>Rozměr X</b>	<b>50,00 mm</b>		
	<b>Informace2</b>	<b>Rozměr Y</b>	<b>50,00 mm</b>		
	<b>Informace3</b>	<b>Plocha ef.</b>	<b>0,00218 m<sup>2</sup></b>		
	<b>Informace o úloze</b>	<b>Hmotnost</b>	<b>0,00589 kg</b>		
<b>Řezný čas</b>	00:00:02	<b>Vedlejší časy</b>	00:00:00	<b>Čas celkem</b>	00:00:02



**Seznam zakázek**  
31-3 HODINY DURAL 1

**Řezné plány**

Název řezného plánu	31-3-011	Plánovaný rozměr X	73,24 mm
Průběhy	1	Plánovaný rozměr Y	390,00 mm
Odpad	96,62%	Rozměr tabule X	600,00 mm
Počet dílců	43	Rozměr tabule Y	390,00 mm
Řezný čas	00:00:33	Vedlejší časy	00:01:10
		Čas celkem	00:01:44



Čís.	Název dílce	Rozměr X	Rozměr Y	Hmotnost	Řezný čas	Počet
3	TEST ROZMĚR D1	50,00 mm	50,00 mm	0,006 kg	00:00:02	3
2	velká čárka do hodin 1	2,50 mm	15,00 mm	0,000 kg	00:00:01	20
1	součástka hodin 2	2,50 mm	12,00 mm	0,000 kg	00:00:01	20

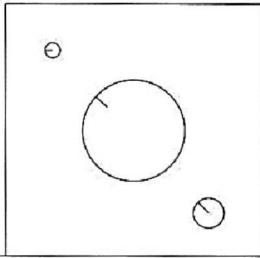
## Seznam zakázek 31-3 HODINY DURAL 4

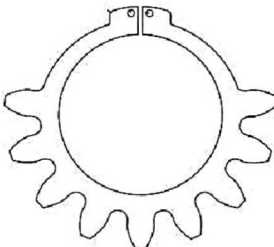
<b>Práce</b>	<b>31-3 HODINY DURAL 4</b>	<b>Stroj</b>	<b>BySprint Fiber</b>
<b>Popis</b>		<b>Materiál</b>	<b>AW5754</b>
		<b>Tloušťka</b>	<b>4,00 mm</b>
<b>Informace1</b>		<b>Počet různých dílců</b>	<b>2</b>
<b>Informace2</b>		<b>Řezný čas</b>	<b>00:00:42</b>
<b>Informace3</b>		<b>Vedlejší časy</b>	<b>00:01:10</b>
		<b>Čas celkem</b>	<b>00:01:53</b>

### Tabule

Rozměr X	Rozměr Y	Hmotnost	Počet	Informace o artiklu
440,00 mm	330,00 mm	1,568 kg	1	

### Dílce

	<b>Číslo dílce</b>	<b>1</b>			
	<b>Název</b>	<b>TEST ROZMĚR D3</b>	<b>Požad. / skuteč.</b>	<b>3 / 3</b>	
	<b>Popis</b>		<b>Rozměr X</b>	<b>50,00 mm</b>	
	<b>Informace1</b>		<b>Rozměr Y</b>	<b>50,00 mm</b>	
	<b>Informace2</b>		<b>Plocha ef.</b>	<b>0,00215 m<sup>2</sup></b>	
	<b>Informace3</b>		<b>Hmotnost</b>	<b>0,02323 kg</b>	
	<b>Informace o úloze</b>				
	<b>Řezný čas</b>	<b>00:00:06</b>	<b>Vedlejší časy</b>	<b>00:00:00</b>	<b>Čas celkem</b>

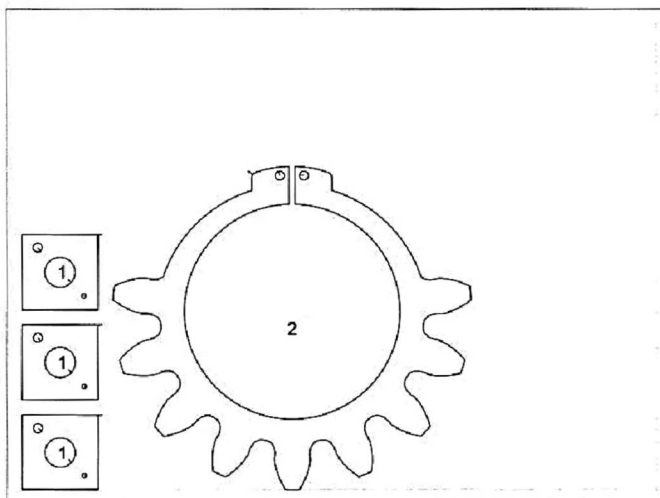
	<b>Číslo dílce</b>	<b>2</b>			
	<b>Název</b>	<b>VÝKRES zakladu 1</b>	<b>Požad. / skuteč.</b>	<b>1 / 1</b>	
	<b>Popis</b>		<b>Rozměr X</b>	<b>237,48 mm</b>	
	<b>Informace1</b>		<b>Rozměr Y</b>	<b>215,47 mm</b>	
	<b>Informace2</b>		<b>Plocha ef.</b>	<b>0,01398 m<sup>2</sup></b>	
	<b>Informace3</b>		<b>Hmotnost</b>	<b>0,15098 kg</b>	
	<b>Informace o úloze</b>				
	<b>Řezný čas</b>	<b>00:00:25</b>	<b>Vedlejší časy</b>	<b>00:00:00</b>	<b>Čas celkem</b>



**Seznam zakázek**  
31-3 HODINY DURAL 4

**Řezné plány**

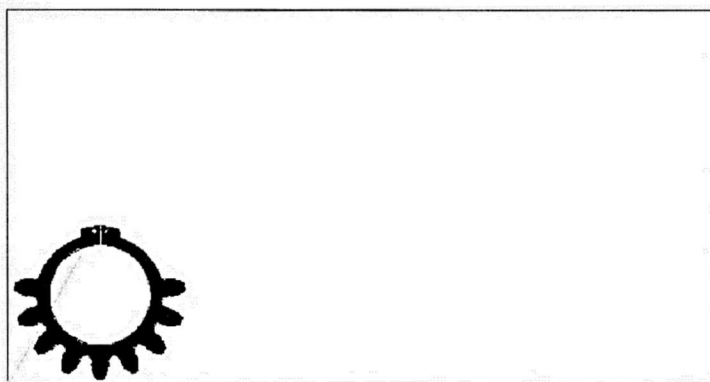
Název řezného plánu	31-3-012	Plánovaný rozměr X	307,55 mm
Průběhy	1	Plánovaný rozměr Y	225,47 mm
Odpad	85,93%	Rozměr tabule X	440,00 mm
Počet dílců	4	Rozměr tabule Y	330,00 mm
Řezný čas	00:00:42	Vedlejší časy	00:01:10
		Čas celkem	00:01:53



Čís.	Název dílce	Rozměr X	Rozměr Y	Hmotnost	Řezný čas	Počet
1	TEST ROZMÉR D3	50,00 mm	50,00 mm	0,023 kg	00:00:06	3
2	VÝKRES zakladu 1	237,48 mm	215,47 mm	0,151 kg	00:00:25	1

## Job report

04/24/15 06:57:45



ACD soubor: dural tl.4

CNC soubor: V:\Programy\New machine\000.CNC

Material: Aluminium  
 Tloušťka.: 4.000  
 Sheet ID:  
 Sheet name:  
 Uložení:  
 Sheet size X: 1000.000  
 Sheet size Y: 530.000  
 Stroj: AWJ Fanuc  
 Tlak: 3600  
 Abrazivo druh: GMA Garnet 80  
 Abrazivo g/min: 300  
 Prumer vodni trysky: 0.254  
 Prumer trysky: 0.762

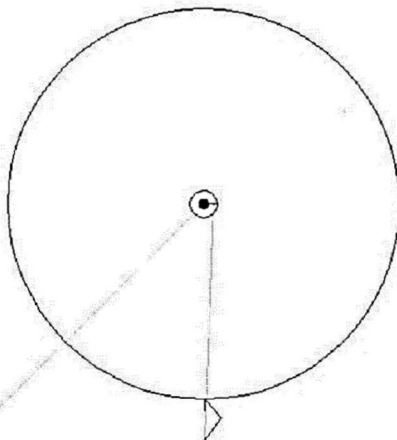
Nastroje:1  
 Rezná délka: 1552.401mm  
 Rapid length: 274.499mm  
 Marking length: 0.000mm  
 Max feedrate: 859.000mm/min  
 Min feedrate: 388.725mm/min  
 Prumerna rychlost posuvu: 520.907mm/min  
 Celkovy cas: 3m, 10s [0.053h]  
 Rychly cas: 1s [0.000h]  
 Doba znaceni: 1s [0.000h]  
 Prostrelovaci cas: 10s [0.003h]  
 Rezny cas: 2m, 58s [0.050h]  
 Drilling/Rapid time: 1s [0.000h]



Part name: pripravek  
 Zakaznik: \*  
 Datum: 31.3.2015  
 Vaha: 0.157  
 X-rozmer: 238.306  
 Y-rozmer: 216.272  
 Marking length: 0.000mm  
 Rezná délka: 1552.401mm  
 Number of parts: 1  
 Prumerny cas: 3m, 10s [0.053h]  
 Single time: 3m, 10s [0.053h]  
 Celkovy cas: 3m, 10s [0.053h]

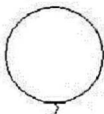
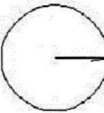

04/24/15 06:58:51

Job report



ACD soubor: sklo tl.4  
CNC soubor: V:\Programy\New machine\000.CNC

<b>Material:</b>	Stainless Steel	<b>Nastroje:1</b>	
<b>Tloustka.:</b>	1.500	<b>Nastroje:1</b>	
<b>Sheet ID:</b>		<b>Rezná délka:</b>	511.141mm
<b>Sheet name:</b>		<b>Rapid length:</b>	201.573mm
<b>Ulozeni:</b>		<b>Marking length:</b>	0.000mm
<b>Sheet size X:</b>	0.000	<b>Max feedrate:</b>	775.581mm/min
<b>Sheet size Y:</b>	0.000	<b>Min feedrate:</b>	349.496mm/min
<b>Stroj:</b>	AWJ Fanuc	<b>Prumerna rychlost posuvu:</b>	704.195mm/min
<b>Tlak:</b>	3600	<b>Celkkovy cas:</b>	53s [0.015h]
<b>Abrazivo druh:</b>	GMA Garnet 80	<b>Rychly cas:</b>	1s [0.000h]
<b>Abrazivo g/min:</b>	300	<b>Doba znaceni:</b>	1s [0.000h]
<b>Prumer vodni trysky:</b>	0.254	<b>Prostrelovac cas:</b>	9s [0.003h]
<b>Prumer trysky:</b>	0.762	<b>Rezny cas:</b>	43s [0.012h]
		<b>Drilling/Rapid time:</b>	1s [0.000h]

	<b>Part name:</b>	MANUAL
	<b>Zakaznik:</b>	
	<b>Datum:</b>	31.3.2015
	<b>Vaha:</b>	0.000
	<b>X-rozmer:</b>	0.000
	<b>Y-rozmer:</b>	0.000
	<b>Marking length:</b>	0.000mm
	<b>Rezná délka:</b>	472.946mm
	<b>Number of parts:</b>	1
	<b>Prumerny cas:</b>	42s [0.012h]
	<b>Single time:</b>	42s [0.012h]
	<b>Celkkovy cas:</b>	42s [0.012h]
	<b>Part name:</b>	MANUAL
	<b>Zakaznik:</b>	
	<b>Datum:</b>	31.3.2015
	<b>Vaha:</b>	0.000
	<b>X-rozmer:</b>	0.000
	<b>Y-rozmer:</b>	0.000
	<b>Marking length:</b>	0.000mm
	<b>Rezná délka:</b>	38.195mm
	<b>Number of parts:</b>	1
	<b>Prumerny cas:</b>	7s [0.002h]
	<b>Single time:</b>	7s [0.002h]
	<b>Celkkovy cas:</b>	7s [0.002h]
	<b>Part name:</b>	nastrel
	<b>Zakaznik:</b>	=
	<b>Datum:</b>	31.3.2015
	<b>Vaha:</b>	0.000
	<b>X-rozmer:</b>	3.846
	<b>Y-rozmer:</b>	3.846
	<b>Marking length:</b>	0.000mm
	<b>Rezná délka:</b>	0.000mm
	<b>Number of parts:</b>	1
	<b>Prumerny cas:</b>	3s [0.001h]
	<b>Single time:</b>	3s [0.001h]
	<b>Celkkovy cas:</b>	3s [0.001h]