



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**Ústav technologie obrábění,  
projektování a metrologie**

**Obrábění ultrazvukem a obrábění proudem abraziva**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Praha**

**2022**

**Martin Veselý**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Veselý** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **492666**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Obrábění ultrazvukem a obrábění proudem abraziva**

Název bakalářské práce anglicky:

**Ultrasonic machining and abrasive flow machining**

Pokyny pro vypracování:

1. Charakteristika a typy metod.
2. Oblasti využití technologií.
3. Srovnání s ostatními výrobními metodami.

Seznam doporučené literatury:

\_\_\_\_\_

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Novák, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

\_\_\_\_\_

Datum zadání bakalářské práce: **15.03.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Pavel Novák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Anotační záznam

Jméno autora: Martin Veselý  
Název práce: Obrábění ultrazvukem a obrábění proudem abraziva  
Anglický název: Ultrasonic and abrasive flow machining  
Rozsah práce: 62 stran  
Akademický rok: 2021/2022  
Ústav: 12134 Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie  
Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství  
Vedoucí práce: Ing. Pavel Novák, Ph.D.

### **Klíčová slova:**

Obrábění proudem abraziva, obrábění ultrazvukem, hybridní procesy obrábění, nekonvenční technologie obrábění, dokončovací operace

### **Keywords:**

Abrasive flow machining, ultrasonic machining, hybrid machining processes, non-conventional machining, finishing processes

## **Abstrakt**

Předmětem této práce je obrábění proudem abraziva, a obrábění ultrazvukem. Práce je rozdělena na dva celky odpovídající těmto tématům. V každém celku je daná metoda charakterizována a srovnána s konkurenčními metodami. Následuje závěr, který přehledně shrne shromážděné informace.

## **Abstract**

The subject of this thesis is abrasive flow machining and ultrasonic machining. The work is divided into two units corresponding to these topics. In each unit, the given method is characterized and compared with competing method. The conclusion follows, which clearly summarizes the information gathered.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Obrábění ultrazvukem a proudem abraziva“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: .....

.....

Martin Veselý

## Poděkování

Rád bych poděkoval především Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D. za jeho rady, připomínky a asistenci při tvorbě mé bakalářské práce.

## Obsah

1. Úvod .....	1
1.1. Cíle práce .....	1
2. Nekonenční metody obrábění .....	2
3. Obrábění proudem brusiva .....	4
3.1. Podstata obrábění proudem brusiva .....	4
3.1.1. Jednocestné obrábění proudem brusiva.....	5
3.1.2. Dvoucestné obrábění proudem abraziva .....	6
3.1.3. Orbitální obrábění proudem brusiva.....	6
3.2. Konstrukce stroje pro obrábění proudem abraziva .....	7
3.2.1. Hydraulický válec.....	7
3.2.2. Komora .....	7
3.2.3. Chladič .....	7
3.2.4. Hydraulická jednotka.....	7
3.2.5. Přípravek.....	8
3.2.6. Řídící systémy .....	8
3.3. Monitorování během obrábění, a tvorba strategie obrábění .....	8
3.4. Obráběcí médium .....	9
3.4.1. Polymer .....	9
3.4.2. Brusivo .....	9
3.5. Hybridní způsoby obrábění proudem abraziva .....	10
3.5.1. AFMmm .....	10
3.5.2. MAAFM.....	11
3.5.3. UAAFM .....	11
3.5.4. AFM tool bar.....	11
3.5.5. CM-AFM.....	13
3.6. Technologické charakteristiky obrábění proudem brusiva .....	15
3.6.1. Produktivita obrábění proudem brusiva .....	15
3.6.2. Přesnost obrábění .....	16

3.6.3.	Kvalita povrchu .....	16
3.7.	Využití AFM .....	16
4.	Porovnání AFM s podobnými technologiemi.....	18
4.1.	Porovnání AFM s metodami pro dokončování otvorů .....	18
4.1.1.	Porovnání AFM s honováním .....	18
4.1.2.	Porovnání AFM s leštěním.....	19
4.1.3.	Porovnání AFM s elektrochemickým dokončováním otvorů.....	20
4.2.	Odjehlování.....	21
4.2.1.	Porovnání AFM s termickým odjehlováním .....	22
4.2.2.	Porovnání AFM s elektrochemický odjehlováním.....	22
4.2.3.	Porovnání AFM s konvenčním odjehlováním.....	23
5.	Obrábění ultrazvukem .....	25
5.1.	Ultrazvuk.....	25
5.2.	Podstata obrábění ultrazvukem .....	25
5.3.	Zařízení pro obrábění ultrazvukem .....	27
5.3.1.	Generátor vysokofrekvenčního proudu .....	28
5.3.2.	Systém pro tvorbu mechanických kmitů.....	28
5.3.3.	Řízení .....	29
5.3.4.	Systém pro přívod brusných zrn a kapaliny .....	29
5.3.5.	Obráběcí kapaliny .....	29
5.3.6.	Brusivo pro obrábění ultrazvukem.....	29
5.4.	Abrazivní materiály používané obrábění ultrazvukem.....	30
5.5.	Nástroje pro obrábění ultrazvukem .....	30
5.6.	Technologické charakteristiky ultrazvukového obrábění.....	32
5.6.1.	Produktivita obrábění ultrazvukem .....	32
5.6.2.	Přesnost obrobků .....	32
5.6.3.	Kvalita povrchu .....	33
5.7.	Využití ultrazvukového obrábění.....	33
5.7.1.	Ultrazvukové leštění.....	34



5.7.2.	Ultrazvukové řezání.....	34
5.7.3.	Ultrazvukem asistované broušení .....	34
5.7.4.	Ultrazvukové hloubení otvorů.....	35
5.7.5.	Povrchové úpravy asistované ultrazvukem.....	36
5.7.6.	Čištění ultrazvukem .....	36
6.	Srovnání obrábění ultrazvukem s jinými technologiemi .....	37
6.1.	Řezání.....	37
6.1.1.	Porovnání s elektroerozivním řezáním .....	37
6.1.2.	Porovnání s řezáním laserem .....	38
6.1.3.	Porovnání s konvenčním řezáním .....	39
6.1.4.	Porovnání s řezáním vodním paprskem.....	40
6.2.	Hloubení válcových otvorů .....	40
6.2.1.	Porovnání s elektroerozivní hloubení válcových otvorů .....	41
6.2.2.	Porovnání s konvenčním obráběním .....	41
6.2.3.	Porovnání s vrtáním laserem .....	42
6.3.	Hloubení tvarově složitých otvorů.....	43
6.3.1.	Porovnání s elektroerozivním hloubením tvarově složitých otvoru .....	43
6.3.2.	Porovnání s konvenčními metodami obrábění .....	43
7.	Závěr.....	45
8.	Seznam citací:.....	46
9.	Seznam obrázků .....	51
10.	Seznam tabulek .....	52
11.	Symboly a zkratky.....	53

## 1. Úvod

Konvenčním obráběním je zpravidla myšleno třískové obrábění za působení mechanické síly stroje na obrobek. Tento způsob obrábění zahrnuje oddělování materiálu, zpravidla ve formě třísky. Tyto techniky jsou známy již velmi dlouhou dobu. Například primitivní metody soustružení se začaly objevovat již přibližně 2000 let př.n.l. Takové „soustruhy“ byly poháněny ručně pomocí struny či řemenu. Tyto metody byly postupně zdokonalovány a časem byly vyvíjeny soustruhy na vodní pohon, parní pohon, a nakonec elektrický pohon. Velkým zlomem pro tyto metody obrábění bylo také numerické řízení, avšak jejich využívání bylo velmi rozšířené i před ním.[1]

Oproti tomu nekonvenční obrábění zpravidla nepůsobí na obrobek mechanickou silou a netvoří třísku. Většina těchto metod je také výrazně novější. I když například leptání je známo již od 16. století, většina nekonvenčních metod obrábění začala vznikat v 50. letech minulého století, ačkoliv významnější rozvoj zaznamenaly až v 80. letech. O to se z části zasloužil příchod NC a CNC strojů, protože velká část nekonvenčních technologií obrábění ztrácí v konvenčním provedení většinu svých výhod. Z části však k rozvoji těchto technologií vedly stále se zvyšující nároky na strojírenskou výrobu. [2]

### 1.1.Cíle práce

Cílem této práce je seznámit čtenáře s možnostmi, důležitými parametry, a také využitím nekonvenčních obráběcích technologií. Konkrétně se tato práce zabývá obráběním pomocí ultrazvuku a proudu brusiva. Obě tyto metody se vyznačují flexibilními nástroji tvořenými směsí zrn abraziva, a tekutého pojiva. Poté bude následovat srovnání těchto metod s konkurenčními metodami obrábění, a to jak konvenčními, tak nekonvenčními.

## 2. Nekonvenční metody obrábění

Nekonvenční metody obrábění se začaly objevovat v polovině 20. století a od té doby neustále nabírají na významu. Důvody pro tento trend jsou stále se zvyšující podmínky na přesnou a ekonomickou výrobu, které jsou způsobeny:

- Zvyšováním podílu žárovzdorných a těžko obrobitelných materiálů
- Rostoucími nároky na výrobu určitých tvarově složitých součástí (např. forem pro odlévání, řezných nástrojů, atd.)
- Rostoucí počet a nároky na přesnost drobných součástí [3]

Velkou výhodou těchto systémů je také jejich vysoký potenciál pro automatizované provozy, stejně jako jejich kompatibilita s NC a CNC řízením.

Nekonvenční metody obrábění zpravidla zahrnují způsoby obrábění, které se od konvenčních metod obrábění liší tím, že ve většině těchto metod není pro obrábění materiálu využíváno primárně působení mechanické síly. Takové metody fungující na principu nějakého fyzikálního jevu, chemického jevu, nebo kombinace obou a často ubírají materiál bez vzniku třísek.

Některé z těchto metod se řadí mezi metody beztržiskového obrábění, protože obrábění probíhá pomocí tepelných účinků, chemických účinků a případně kombinací obou. Při těchto procesech běžně nevzniká tříška.

Tyto metody je možno dělit dle podstaty procesu na:

- mechanické
- chemické
- elektrochemické
- termochemické

Tyto skutečnosti naznačují, že v případě většiny nekonvenčních technologií není obrobitelnost materiálu limitována mechanickými vlastnostmi jako je tvrdost, nýbrž vlastnostmi fyzikálními, jako třeba tepelná vodivost, teplota tavení, popřípadě chemickým složením. Důsledkem těchto skutečností je to, že obráběná součást nemusí být tepelně příliš zatěžována, protože některé z těchto metod nevytvářejí mnoho tepla, anebo ho koncentrují natolik, že zbytkovým teplem zasažená oblast je velice malá.

Naproti tomu nevýhody nekonvenčních metod obrábění jsou často malá produktivita, a vysoká energetická a časová náročnost. Další nevýhodou je vysoká pořizovací cena, a často velmi specifická role stroje ve výrobě. Z tohoto důvodu se v mnoha provozech ekonomicky nevyplatí pořizování těchto strojů.

Procesy	Metody	Označení
Mechanické procesy	Ultrazvukové obrábění	USM
	Obrábění vodním paprskem	WJM
	Obrábění proudem brusiva	AJM
Chemické procesy	Chemické obrábění	CHM
Elektrochemické procesy	Elektrochemické obrábění	ECM
Termoelektrické procesy	Elektroerozivní obrábění	EDM
	Obrábění laserovým paprskem	LBM
	Obrábění paprskem plazmy	PBM
	Obrábění iontovým paprskem	IBM
	Obrábění elektronovým paprskem	EBM

*Tabulka 1: Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [3]*

### 3. Obrábění proudem brusiva

Obrábění proudem abraziva, anglicky abrasive flow machining (AFM), je relativně nová nekonvenční technologie využívaná primárně pro obrábění obtížně dostupných částí výrobků. Tato technologie byla původně vyvinuta v USA v roce 1966.

S postupem času se tato myšlenka dále rozvíjela a probíhal navazující výzkum, který vedl ke hlubšímu porozumění a zdokonalení této technologie. Příkladem může být přidání ultrazvukových vln do média pro obrábění slepých děr, kde nemůže médium protékat skrz, nebo přidání rotačního pohybu do média, čímž se zvýší jeho schopnost odebírat materiál ve třech rozměrech. Těmto způsobům obrábění se také říká hybridní procesy obrábění (HMP). Takovéto procesy se navzájem doplňují za účelem podpoření žádoucích vlastností procesu nebo oslabení nežádoucích.

Úspěšná využití této technologie jsou běžná v oblastech odjehlování, tvorby rádiusů, odstraňování tepelně ovlivněných vrstev materiálu například po vrtání laserem, a dokončování jinak obtížně obrobitelných ploch. Díky „tekutosti“ média je tato metoda vhodná pro výrobu turbín a dalších dílů které pracují s tekutinami, protože médium má schopnost nabrat tvar a směr shodný s průtokem daných tekutin, čímž zajistí optimální průtok.

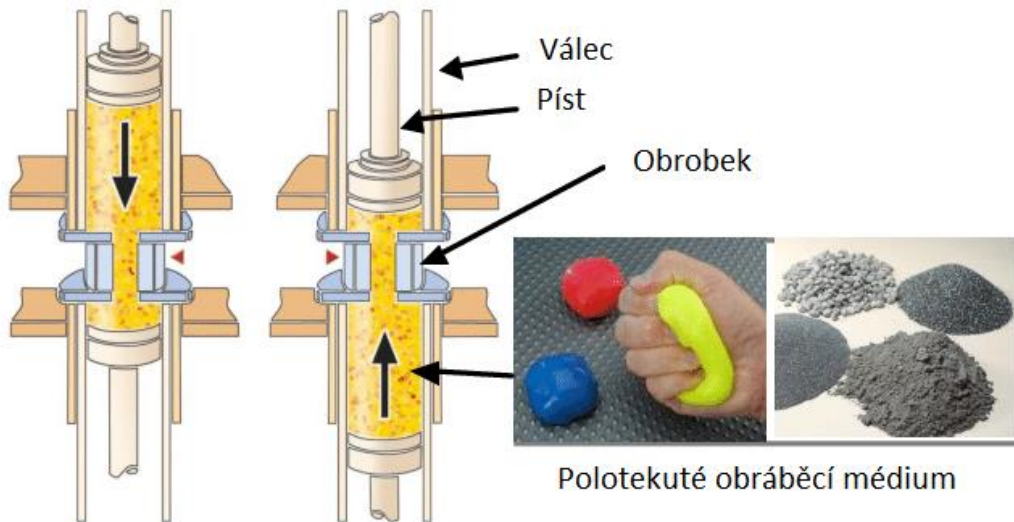
Stejně jako mnoho nekonvenčních metod obrábění, jako obrábění elektrochemické, obrábění laserem a další typy má obrábění proudem abraziva nevýhodu spočívající v pomalém úběru materiálu. Na odstranění této nevýhody se aktivně pracuje, například použitím magnetického pole při obrábění.

#### 3.1. Podstata obrábění proudem brusiva

Při obrábění proudem brusiva je namísto tradičního nástroje využívána kombinace polotekutého média a částí brusiva volně rozprostřených v médiu. Během obrábění je médium s brusivem při vysokém tlaku protlačováno skrze obráběnou oblast, přičemž zrna brusiva při kontaktu s obrobkem ubírají materiál. [14]

Obrábění proudem brusiva je možno rozdělit na:

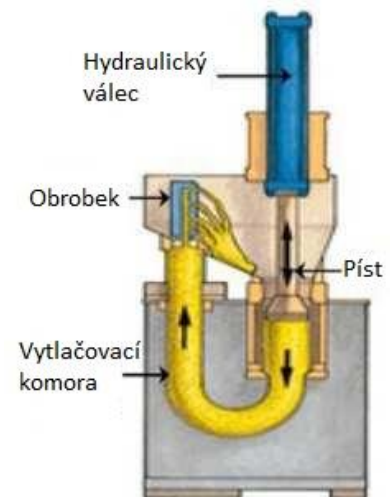
- Jednocestné
- Dvoucestné
- Orbitální



Obrázek 1: Princip obrábění proudem brusiva [15]

### 3.1.1. Jednocestné obrábění proudem brusiva

Při jednocestném obrábění pomocí proudu brusiva je využíván pouze jeden hydraulický píst a brusné médium tedy cestuje při práci pouze jedním směrem. Při práci se píst vysune, a působí silou na médium ve vytlačovací komoře, přičemž v komoře vzniklý tlak protlačuje médium s brusivem skrze obrobek. Po průchodu obrobkem se médium odvádí do sběrného prostoru, odkud je možno ho znovu umístit do vytlačovací komory, nebo ho vyřadit z provozu. Výhodou této metody je, že obvykle nevyžaduje chlazení média, které má po každém cyklu zpravidla čas na dostatečné ochlazení. [14]



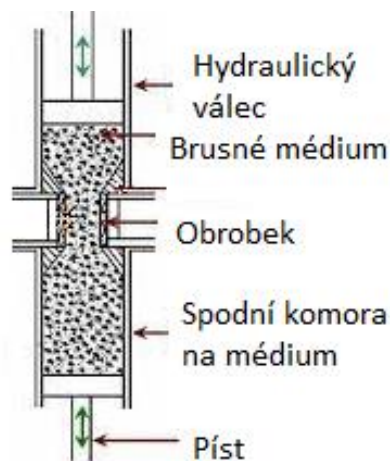
Obrázek 2: Mechanismus pro jednocestné obrábění proudem brusiva [14]

### 3.1.2. Dvoucestné obrábění proudem abraziva

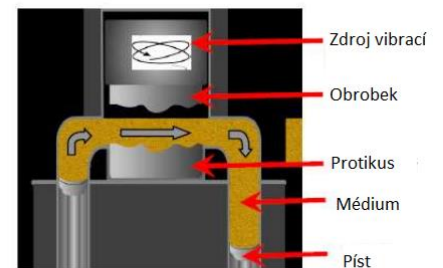
Při dvoucestném obrábění proudem abraziva jsou použity dva hydraulické písty, které umožňují cestování média během obrábění v obou směrech. Každý píst má vlastní komoru, která slouží jako zásobník na pracovní médium. To se přesouvá pomocí pístů z jedné komory do druhé a při tom provádí úběr materiálu. Výhodou tohoto procesu je, že se snáze ovládá a automatizuje. Nevýhodou je, že médium už nekopíruje přirozenou trasu jiných kapalin a obrábění větších součástí je složitější.

### 3.1.3. Orbitální obrábění proudem brusiva

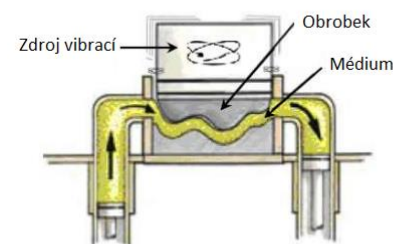
V tomto případě se jedná o kombinaci obrábění proudem brusiva a orbitálního broušení. Během obrábění působí stroj na obrobek rychlými kmity o malé amplitudě (5 až 0,5 mm), čímž způsobuje relativní pohyb mezi médiem a obrobkem. Médium v tomto případě tvoří vrstvu mezi obrobkem a zrcadlovým protikusem o kterou se obrobek při kmitání obrábí a hydraulické válce pouze zásobují a obměňují médium. Přidáním tohoto pohybu je možné obrábět i složitější tvary, které by nebylo možné obrobit například jednocestným obráběním. Médium pro tuto metodu obrábění má zpravidla vyšší viskozitu než v případě jednocestného a dvoucestného obrábění. Příkladem využití této metody jsou formy na mince, jejichž drsnost se po sedmiminutovém procesu zlepšila z Ra 0,5  $\mu\text{m}$  na Ra 0,01  $\mu\text{m}$  [17]



Obrázek 3: Princip dvoucestného obrábění proudem brusiva [16]



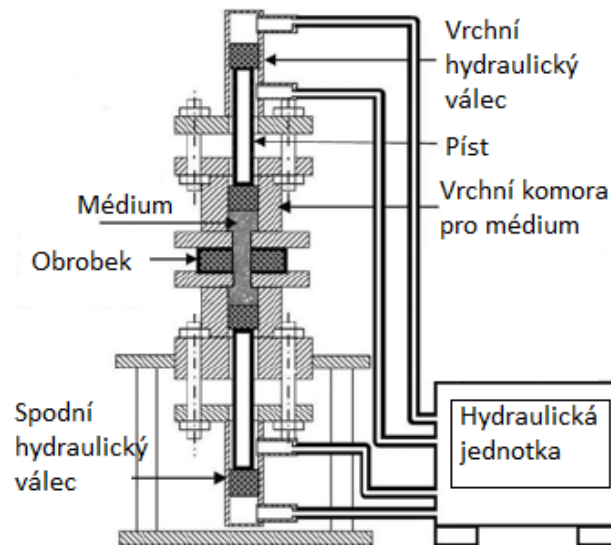
Před začátkem obrábění



Během obrábění

Obrázek 4: Princip orbitálního obrábění [17]

## 3.2. Konstrukce stroje pro obrábění proudem abraziva



Obrázek 5: Schéma stroje pro obrábění proudem brusiva [14]

### 3.2.1. Hydraulický válec

V závislosti na provedení stroje může být hydraulický válec jeden, nebo dva. Výkon stroje je částečně udáván velikostí válce. Velké průmyslové stroje mohou mít válce až o průměru 40 cm s objemem 65 875 cm<sup>3</sup> a průtok média může dosáhnout až 380 l/min. Válce bývají dvojčinné pro zajištění plynulosti chodu.

### 3.2.2. Komora

Komora pro médium je vnitřní prostor ve stroji určený pro manipulaci s médiem. Je možno ji napojit na externí zásobník média, aby zejména při jednosměrném obrábění vždy pracoval válec s optimálním množstvím média.

### 3.2.3. Chladič

Některé stroje obsahují vlastní chladič, který pomáhá ochlazovat pracovní médium během obrábění. Chlazení je prováděno vložením chladičí desky mezi komoru a přípravek. Ke zchlazení média dochází při průchodu chladičí deskou která je napojena na aktivní chladičí systém. Chladič je využíván primárně pro dvoucestné, a orbitální obrábění, při nichž médium pracuje bez výrazných přestávek.

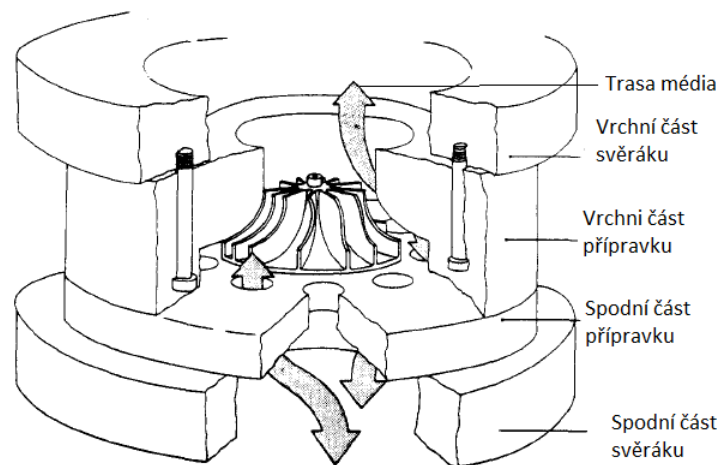
### 3.2.4. Hydraulická jednotka

Hydraulická jednotka je zařízení, které pohání válce. Skládá se z čerpadla, řízení a senzorů. Čím je válec stroje větší, tím nižší je tlak v komoře média. Pro výše zmíněný dvojčinný hydraulický válec je jmenovitý tlak 41,4 baru. Používaný tlak se zpravidla pohybuje mezi 7 a 220 bary.



### 3.2.5. Přípravek

Přípravek není součástí samotného stroje, avšak pro obrábění je nezbytný. Přípravek směřuje médium do správných částí obrobku a umožňuje obrábění většího počtu malých částí současně. Díky tomu lze dosáhnout výrazně větší produktivity při obrábění. V případě obrábění průchozích děr není přípravek nutný, protože díra samotná se chová jako tunel, kterým médium prochází. Pro složitější obrobky jako jsou třeba turbíny je však přípravek složitější a naprosto nezbytný, aby si médium při průchodu zachovalo pracovní tlak a správnou trasu. Možností je také přípravek schopný rotace, který umožňuje provádět v rámci jednoho upnutí více operací. Příkladem může být čištění obrobku ihned po obrábění.



Obrázek 6: Přípravek pro složitější obrobek [18]

### 3.2.6. Řídící systémy

Pro dosažení požadovaných výsledků při obrábění proudem brusiva je nutné monitorovat proces během obrábění. Zpravidla se monitoruje teplota a viskozita média, rychlost průtoku a míra opotřebení. Mimo monitorování aktuálních hodnot řídicí systém také funguje jako standardní CNC řízení.

## 3.3. Monitorování během obrábění, a tvorba strategie obrábění

Jednou z výhod AFM je stálost výsledků při obrábění. Aby bylo možno této vlastnosti využít naplno, je nutné obrábění precizně řídit. V minulosti proběhla řada výzkumů, jejichž cílem bylo změřit vliv jednotlivých parametrů na výsledky obrábění. Některé výzkumy se zaměřily na tepelné procesy a proudění média, jiné se věnovaly viskozitě a tlaku, nebo rychlosti opotřebení brusných zrn. Ačkoliv tyto výzkumy přinesly relevantní výsledky, které umožnily zlepšení procesu obrábění, většina z těchto výzkumů se zaměřila pouze na efekt vybraných parametrů procesu a ostatní zanedbaly.

Jedna z aktuálně známých metod je založená na monitorování akustických vln vznikajících při náhlém uvolnění napětí v materiálu. Tato metoda je silně závislá na kvalitě povrchu na začátku obrábění a na obráběném materiálu.

Nejnovější výzkumy se pokouší vytvořit co nejpresnější modely obrábění pomocí umělé inteligence. Příkladem může být neuronová síť. Tato metoda byla zvolena pro schopnost zpracování nelineárních interakcí mezi různými proměnnými a vysokou rychlost zpracování. Proměnné využitě pro tvorbu modelu jsou například následující: průměr otvoru, potřebná drsnost, teplota a vlhkost v okolí, tlak, počet cyklů, či stav média (teplota, znečištění). Tyto metody pro tvorbu modelu stále neobsahují všechny tyto parametry naráz, ale jedná se o perspektivní výzkum do budoucna.

### 3.4. Obráběcí médium

Pozici nástroje při této metodě obrábění zastává polotekuté médium. Toto médium se skládá z viskoelastického polymeru, který vykonává roli nosiče brusných zrn. Zrna při kontaktu s obrobkem odebírají materiál. Obrábění ovlivňuje viskozita nosiče, zrnitost brusiva a jeho koncentrace. Médium je nutné po určité době měnit, protože se během obrábění znečišťuje třískami z obrobku a brusná zrna se opotřebovávají. Jedním z kritérií pro náhradu média je takzvaný počet aktivních zrn. Toto kritérium má omezený význam při obrábění o malém počtu cyklů, avšak s rostoucím počtem cyklů bez výměny média vzrůstá jeho důležitost. Pokud tato hodnota roste, znamená to, že brusná zrna se rozpadají. Pokud tato hodnota klesá, poukazuje to na rostoucí podíl třísek v médiu. Oba tyto případy jsou důvodem pro výměnu média. [18]

#### 3.4.1. Polymer

Typ polymeru obsažený v médiu významně ovlivňuje parametry obrábění. Když je médium vtlačeno do omezujícího průchodu, jeho viskozita krátkodobě stoupne. Díky tomu jsou brusná zrna držena na místě pevněji, což zvyšuje úběr materiálu. Nosiče o vysoké viskozitě jsou vhodné pro rovnoměrné obrábění velkých dutin, zatímco pro menší dutiny a odjehlování hran je vhodnější nosič s nižší viskozitou. Příkladem běžně používaných nosičů jsou polyborosiloxan, silikonový kaučuk, či butylkaučuk.

#### 3.4.2. Brusivo

V případě brusiva jsou klíčové vlastnosti pro obrábění ovlivňovány použitým materiálem a zrnitostí. Zrnitost se pohybuje mezi FEPA P2500 a P20 (zrna o velikosti 0,005-1,5 mm). S rostoucí zrnitostí se zlepšuje povrch materiálu, ale snižuje se rychlost obrábění. Dalším důvodem pro volbu menších zrn je jejich schopnost obrábět menší dutiny. Běžnými materiály použitými jako brusivo jsou oxid hlinitý, karbid křemíku, karbid bóru nebo syntetický diamant. [18]

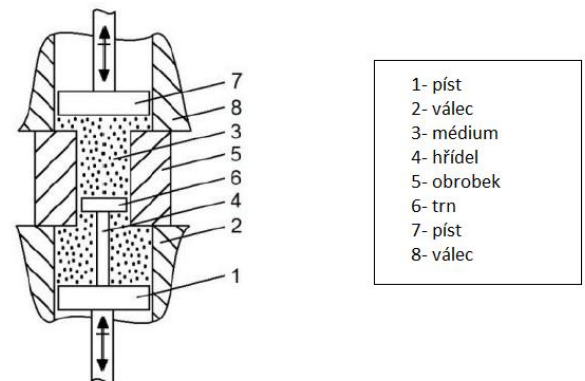
### 3.5. Hybridní způsoby obrábění proudem abraziva

Největší nevýhodou obrábění proudem abraziva je velmi nízká rychlost úběru materiálu. Cílem výzkumu hybridních způsobů obrábění je překonání tohoto omezení díky kombinování AFM s jinými metodami obrábění, například přidáním elektromagnetického pole.

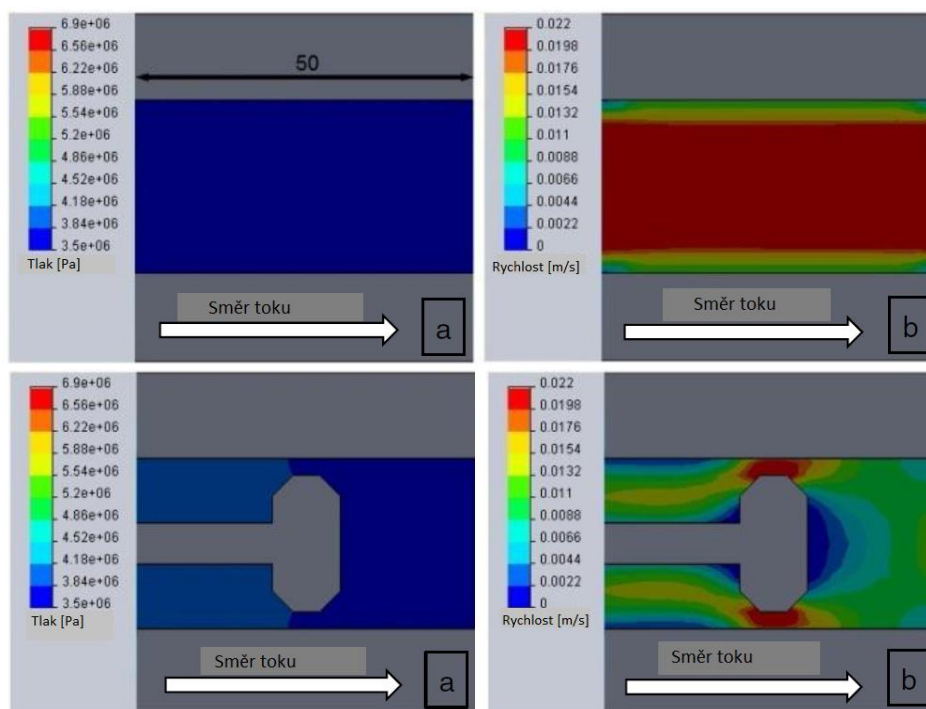
#### 3.5.1. AFMmm

AFMmm (Abrasive flow machining movable mandrel) znamená „obrábění proudem brusiva s pohyblivým trnem“. Jedním z nebezpečí u AFM je možnost nerovnoměrného obrobení na celém obráběném povrchu. Tento problém je nejzávažnější u dílů s velkým průřezem a vede k rozdílné rychlosti brusiva uprostřed proudu a po stranách, což snižuje produktivitu obrábění.

Tento problém nejednotného úběru materiálu je možno řešit přidáním pohyblivého či rotačního trnu. Díky trnu dosahuje tato metoda vyšší produktivity a získáváme lepší schopnost ovládnutí rychlosti média. Nevýhodou této metody je pokles tlaku média mezi vstupem a výstupem. Trn lze připevnit například na píst. Následující obrázky ilustrují výsledky výzkumu v této oblasti.



Obrázek 8: Nástroj pro obrábění AFMmm [19]



Obrázek 7: Porovnání tlaku a rychlosti média mezi AFM a AFMmm [19]

Při testování se ukázalo že trn zrychluje pohyb média nerovnoměrně. Díky tomu je s dostatečně pokročilým řízením procesu možno obrábět také konvexní a konkávní mikro geometrie. [19]

### 3.5.2. MAAFM

MAAFM (magnet assisted abrasive flow machining) je hybridní metoda obrábění využívající proud brusiva a magnetického pole. Cílem této kombinace je zvýšení produktivity obrábění proudem brusiva. Konstrukce stroje pro tuto metodu je rozšířena pouze o stejnosměrný elektromagnet, který má každý pól na jedné straně obrobku. Aby bylo možno využít magnetického pole, musí médium obsahovat slinuté feromagnetické částice s abrazivním práškem. Médium společně s magnetickým polem tvoří „flexibilní magnetický kartáč“, na který působí normálová síla a radiální síla magnetu. Přidáním rotace obrobku nebo pólů magnetu na médium začne působit také tangenciální síla. Výslednice těchto sil zapříčiňuje hlubší vnikání zrn do mikrotrhlin v materiálu a umožňuje rychlejší úběr materiálu.

Vliv této metody na výsledky obrábění je závislý na hustotě magnetického toku, přičemž s rostoucí hustotou magnetického toku se zlepšuje jak rychlost obrábění, tak drsnost povrchu. Nejvýraznější nárůst je pozorován mezi 0,2 a 0,4 T. [25]

### 3.5.3. UAAFM

UAAFM (ultrasonic assisted abrasive flow machining) je hybridní metoda kombinující pohyb obráběcího média a ultrazvukové kmitání obrobku. Díky kmitání obrobku kolmo vůči pohybu média se zvyšuje relativní rychlost mezi obrobkem a brusivem, což vede k vyššímu počtu aktivně obrábějících brusných zrn a zároveň jim umožňuje vniknout hlouběji do materiálu obrobku.

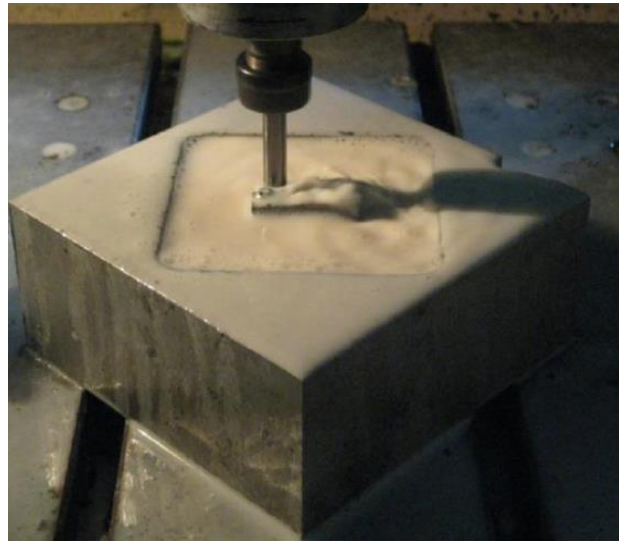
Nevýhodou je nutnost zohlednit kromě parametrů běžného obrábění proudem brusiva také parametry kmitání obrobku, jako amplitudu a frekvenci. Bylo experimentálně zjištěno, že kvalita povrchu stoupá společně s frekvencí kmitání až do určitého bodu, kdy rostoucí frekvence naopak začne způsobovat zhoršení povrchu. Tento problém vzniká kvůli tomu, že s rostoucí frekvencí roste rychlost jakou naráží zrna brusiva do materiálu, což může při příliš vysokých frekvencích způsobit „škrábance“ na materiálu. Tyto vlastnosti procesu na jednu stranu zvyšují produktivitu obrábění i drsnost povrchu, ale potřebný stroj je velmi neobvyklý, v důsledku čehož je pořizovací cena tohoto zařízení relativně vysoká. [25]

### 3.5.4. AFM tool bar

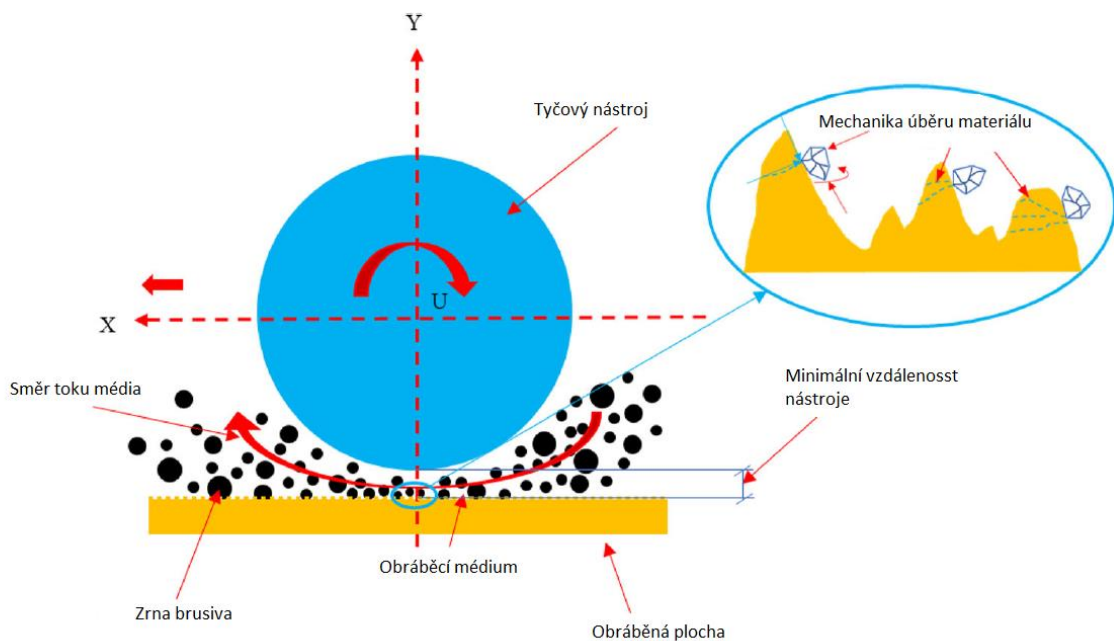
Další možnou metodou obrábění proudem brusiva je přidání tyčového nástroje. Zpravidla se jedná o válec ze slinutého karbidu, který je ponořený do média a koná rotační pohyb, kterým ve svém okolí zvyšuje relativní rychlost média vůči obrobku. Důvodem pro vznik

této metody je snaha zvýšit produktivitu obrábění bez nutnosti nákupu drahých speciálních strojů, jako je tomu například u UAAFM.

Tato metoda je založená na použití běžných NC a CNC strojů, jako například CNC konzolové frézky. Při obrábění stačí válcový nástroj upnout do vřetene, protože veškerá kinematika potřebná pro obrábění pomocí brusného média je shodná s kinematikou frézování. Podmínkou využití této metody je, že celá obráběná plocha musí být plně ponořená do obráběcího média.



Obrázek 9: Dokončování povrchu stěny metodou AFM tool bar [20]



Obrázek 10: Princip AFM tool bar [20]

Důležité parametry pro tuto metodu jsou mimo vlastností média jako typ materiálu a drsnost brusiva či viskozita kapaliny také rychlost otáčení nástroje, velikost mezery mezi nástrojem a obrobkem a rychlost posuvu nástroje.

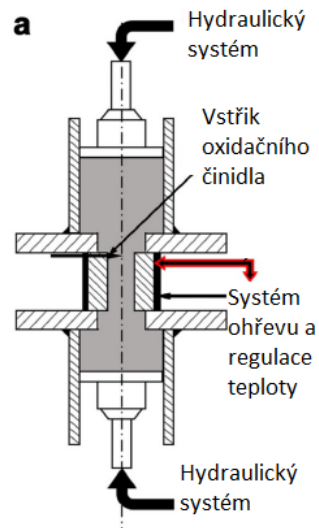
Při pokusu na obrobku (viz obrázek 8) z Ti-5Al-2.5Sn za použití karbidu křemíku jako brusiva byly zjištěny optimální parametry pro obrábění. Otáčky nástroje 19 200 ot/min, rychlost posuvu 500 mm/min. Vzdálenost nástroje od obrobku byla 0,05 mm, a velikost brusných zrna byla 0,012 mm. Při použití těchto parametrů bylo dosaženo drsnosti povrchu  $R_a 0,1028\mu\text{m}$ . [20]

### 3.5.5. CM-AFM

Chemo Mechanical Abrasive Flow Machining, v překladu chemicko mechanické obrábění proudem brusiva, je hybridní technologie, jejímž cílem je zvýšení produktivity AFM při obrábění velice tvrdých materiálů. Jedna z hlavních nevýhod AFM je všeobecně nízká produktivita. Tento problém je ještě závažnější v případě velmi tvrdých materiálů, například u diamantu. Tyto aplikace často zahrnují další limitace, jako třeba malou tloušťku vrstvy, kterou je možno odebrat. Tak tomu je například u diamantem potaženého otvoru v průvlaku na výrobu drátů. Jedním ze způsobů, jak vyřešit zmíněnou negativní vlastnost, je kombinace standardního AFM s chemickou reakcí (oxidací).

Obrábění probíhá stejně jako u standardního AFM, avšak během obrábění je nutno dodávat oxidační činidlo a zachovat optimální obráběcí teplotu. Vyšší teplota zvyšuje účinnost činidla, avšak teploty přes 100 °C výrazně ovlivňují viskozitu média, což negativně ovlivňuje efektivitu obrábění. Se specializovanými činidly se zpravidla obrábí v rozmezí teplot od 70 °C do 90 °C

Z hlediska konstrukce stroje tato modifikace znamená přidání topného tělesa, teploměru, a vstřikovací trysky.



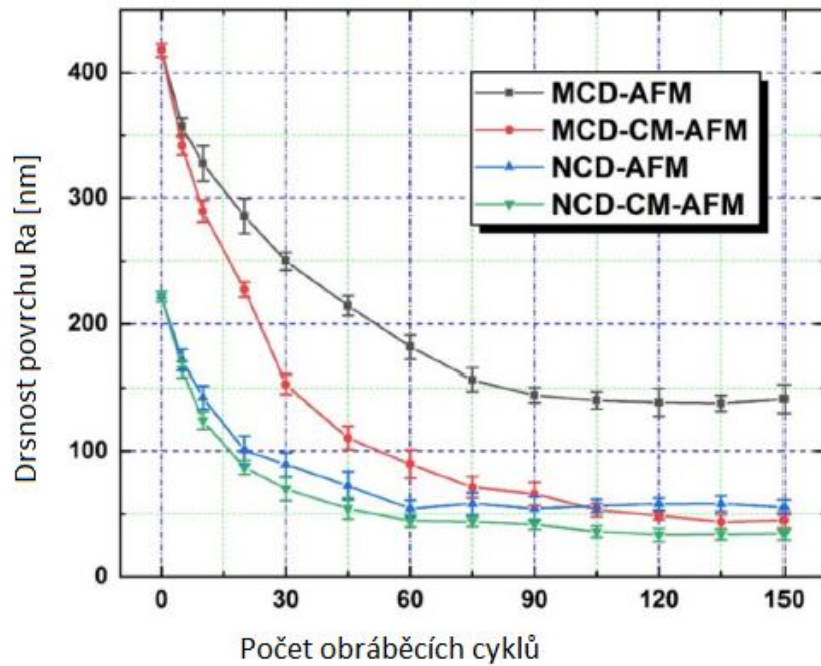
Obrázek 11: Konstrukce stroje pro CM-AFM [26]

Je nepraktické vstřikovat činidlo během samotného obrábění, protože velké množství činidla by měnilo vlastnosti obráběcího média. Postup proto probíhá následovně:



1. Pracovní prostor se zahřeje na požadovanou teplotu
2. Tryska vstříkne oxidační činidlo do blízkosti stěny obrobku
3. Po uplynutí doby potřebné pro reakci činidla s povrchem začne probíhat standardní AFM
4. Po vykonání předem daného počtu obráběcích cyklů se hydraulika stroje zastaví
5. Opět se vstříkne oxidační činidlo, nebo dojde k vyjmutí obrobku

Byly vykonány experimenty při obrábění válcové dutiny pokryté různými druhy diamantových vrstev. Jedna dutina byla pokryta mikrokrytalickým diamantem (MCD), a druhá byla pokryta nanokrytalickým diamantem (NCD). Obě dutiny byly poté obráběny jak běžným AFM, tak CM-AFM. Výsledky poukazují na lepší drsnost  $R_a$  v případě použití CM-AFM, kdy rozdíl mezi metodami obrábění byl mnohem výraznější v případě MCD. V obou případech však CM-AFM dosáhlo lepších výsledků. [26]

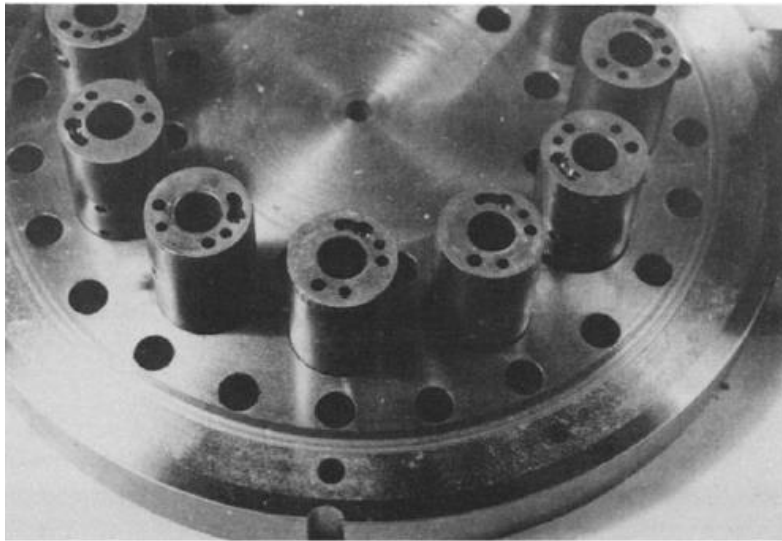


Obrázek 12: Výsledky testování CM-AFM oproti AFM [26]

### 3.6. Technologické charakteristiky obrábění proudem brusiva

#### 3.6.1. Produktivita obrábění proudem brusiva

Produktivita procesu AFM je závislá na vlastnostech stroje a obráběcího média. Z vlastností stroje je důležitá radiální síla, která vychází primárně z tlaku média, rychlost toku média a množství média. Velká výhoda AFM z hlediska produktivity je možnost obrábět menší díly po skupinách. Se správným přípravkem při upnutí je možné obráběcí médium vést skrze několik obrobků naráz, aniž bychom potřebovali jiný stroj. Tímto způsobem se produktivita obrábění násobně zvýší.



Obrázek 13: Obrábění dvanácti trysek pro vstřikování paliva naráz [18]

Radiální sílu je možné zvýšit různými hybridními metodami obrábění. S rostoucí radiální silou se zvyšuje rychlost úběru materiálu. Rychlost toku média zásadně ovlivňuje produktivitu obrábění, protože přímo ovlivňuje množství kontaktu mezi brusivem a obrobkem v daném časovém intervalu. Množství média ovlivňuje rychlost opotřebení brusných zrn i rychlost znečištění. Běžně je možné využívat médium několik týdnů a zpracovat tisíce dílů než je nutná výměna. [18]

Obráběcí médium ovlivňuje produktivitu obrábění skrze výběr brusiva, polymeru a jejich vzájemného poměru. Brusiva se liší v zrnitosti a materiálu. Tvrdší brusivo zpravidla vede k vyšší produktivitě obrábění. Vyšší zrnitost vede ke kvalitnějšímu povrchu, avšak rychlost úběru materiálu klesá. Z hlediska poměru brusiva a polymeru dosahujeme vyšší produktivity s větším množstvím brusiva, avšak pokud je brusiva příliš, zhoršuje se schopnost média procházet drobnými otvory. V případě polymeru je nejdůležitější vlastností viskozita. Polymer s vyšší viskozitou je produktivnější a dosahuje i lepších hodnot drsnosti. [18]



### 3.6.2. Přesnost obrábění

Protože obrábění proudem brusiva je primárně dokončovací metoda, není přesnost závislá především na něm. Pokud je správně nastavená strategie obrábění, je možné pomocí AFM zlepšit tvarovou přesnost, jako například válcovitost u válcového otvoru. Se správnými parametry obrábění je množství odebraného materiálu závislé pouze na počtu cyklů média. Díky tomu, a velmi malému úběru materiálu za jeden cyklus, je možno přesně dosáhnout cílových rozměrů.

### 3.6.3. Kvalita povrchu

Kvalita povrchu je pro AFM naprosto klíčovým požadavkem. Jelikož se jedná o dokončovací metodu, jejím primárním účelem je dosažení kvalitního povrchu na jinak těžko obrobitelných místech. Výhodou této metody je její vlastnost konstantně dosahovat malých drsností povrchu na celé obráběné ploše. Drsnost dosahovaná pomocí AFM je srovnatelná s jemným broušením. Pro většinu aplikací je dostačující drsnost okolo  $R_a 0,3 \mu\text{m}$ , avšak pro velmi náročné aplikace jako například kloubní náhrady je možné dosáhnout až  $R_a 0,035 \mu\text{m}$ . [24]

## 3.7. Využití AFM

Obrábění proudem brusiva je dokončovací technologie schopná dosáhnout drsnosti  $R_a$  v řádu desítek nanometrů. Hlavní výhodou této metody je schopnost obrábět složité vnitřní tvary, které by bylo velmi obtížné či nemožné obrábět konvenčními metodami. Takové tvary by jinak bylo nutné dokončovat ručně, což by vedlo k rozdílným kvalitám povrchu dílu. Ruční dokončování také trvá velmi dlouhou dobu, vyžaduje kvalifikované pracovníky a nelze vyloučit lidskou chybu.

AFM je možno využívat pro velice malé součásti. Touto metodou je možné obrábět otvory o průměru 0,2 mm či ozubená kola o průměru 1,5 mm. [24]

Dalším možným důvodem pro využití AFM oproti ostatním metodám je prodloužení cyklické životnosti výrobku. To je způsobeno tlakem, kterým působí při obrábění médium na stěny obrobku. Ten může v závislosti na tlaku zanechávat zbytkové napětí. Při experimentu na formě pro tvorbu plastových ozubených kol byly testovány dva vzorky. Oba byly vytvořeny elektroerozivním obráběním, a jeden z nich byl dokončován pomocí AFM. Vzorek dokončený pomocí AFM prokázal téměř dvojnásobnou životnost. [21]

Typickým příkladem pro využití AFM je dokončování lopatek turbíny. Kvůli jejich složitému tvaru je jejich povrch standardně dokončován manuálně, což je značně neproduktivní. Při využití AFM je zpravidla dosaženo jednolitého povrchu s drsností  $R_a 0,3 \mu\text{m}$ .

AFM nachází využití také při výrobě lékařských implantátů. Při tvorbě například kloubních náhrad je potřebná vysoká přesnost, kvalitní povrch, a vysoká smáčivost povrchu za účelem snížení bakteriální adheze k náhradě. Toto je jeden z případů, kdy je nezbytné dosáhnout nejlepší možné drsnosti, a tak je na úkor rychlosti odebrání materiálu možno dosáhnout drsnosti  $Ra\ 0,035\ \mu\text{m}$ . Bylo experimentálně zjištěno, že AFM je z hlediska smáčivosti vhodné jak finální drsností povrchu, tak z hlediska struktury povrchu. [24]



Obrázek 14: Výsledky aplikace AFM při výrobě lékařských implantátů [24]

V automobilovém průmyslu se AFM využívá pro dokončování vstřikovacích trysek pro palivo. Tyto trysky obsahují velice malé otvory, které je pro správnou funkci vyžadují vysokou přesnost a kvalitu povrchu. AFM splňuje oba tyto požadavky, s konstantní kvalitou celého povrchu. Další důvod pro využití AFM je odjehlování a sražení hran, díky čemuž se dosahuje vyšší teplotní a únavové odolnosti trysky. [24]

Proběhly také experimenty pro nahrazení honování pomocí AFM. Výhodou honování je kromě vysoké kvality povrchu také charakteristický křížový výbrus, který pomáhá s udržení maziva pro snížení tření mezi válcem a pístem. Takovýto výbrus je možné vytvořit i pomocí hybridního AFM přidáním rotace. [21,24]

AFM často následuje po elektroerozivním obrábění a obrábění laserem. Obě tyto technologie po sobě zanechávají vrstvy materiálu, které mají špatný povrch, a zůstávají na nich krátery a mikropraskliny. AFM se v tomto případě používá proto, že jak elektroerozivní obrábění, tak obrábění laserem se často využívá pro složité geometrie a malé otvory. U otvorů tvořených elektroerozivně je možné pozorovat jak zlepšení povrchu, tak zlepšení geometrie, ačkoliv hlubší krátery se nepodařilo kompletně odstranit. [24]

## 4. Porovnání AFM s podobnými technologiemi

### 4.1. Porovnání AFM s metodami pro dokončování otvorů

Jedním z využití AFM je dokončování vnitřních stěn u děr a otvorů. Ačkoliv hlavní výhodou AFM je možnost obrábět tvarově složité díry, využívá se i pro díry s válcovou geometrií, hlavně když se jedná o velmi malé otvory. Otvory o průměru 0,2 mm je relativně komplikované obrábět konvenčními dokončovacími metodami, jako je třeba vystružování či honování. [21,24]

Využití AFM i při dokončování jednoduchých válcových otvorů je zajištěno jeho schopností obrábět díry o malých průměrech, přičemž se zároveň odjehlují hrany otvoru. Při správném nastavení procesu je často možné obrábět několik dílů naráz, což kompenzuje pomalý úběr materiálu. Velkou výhodou této metody je její schopnost obrábět plochy složitých vnitřních geometrií se stabilní kvalitou povrchu. Mnoho těchto geometrií by jinak bylo nutno ručně doložit. Zároveň je touto metodou možno dosáhnout velmi nízké drsnosti povrchu. Pro většinu aplikací dostačuje drsnost  $R_a 0,2 \mu\text{m}$ , ačkoliv je možné dosáhnout až drsnosti  $R_a 0,035 \mu\text{m}$ . Nižší drsnosti se dosahuje použitím menších zrn brusiva, to však snižuje produktivitu obrábění. [24]

Nevýhody AFM zahrnují vysoké pořizovací náklady, nízkou rychlost úběru materiálu a složité řízení procesu kvůli chování obráběcího média. Zejména v otvorech o větších průměrech se totiž liší rychlost průtoku média ve středu otvoru a na okrajích.

Pro dokončování otvorů budu s AFM porovnávat následující metody:

- Honování
- Leštění
- Elektrochemické dokončování

#### 4.1.1. Porovnání AFM s honováním

Honování je specifický druh broušení využívaný primárně pro zlepšení povrchu vnitřních válcových ploch. Rozdíl oproti broušení spočívá v nízké rezné rychlosti, specifickém nástroji a kinematice nástroje při obrábění. Nástroj se nazývá honovací hlava. Po obvodu honovací hlavy jsou rozmístěny honovací kameny, které dosedají na stěny obrobku díky roztečným kuželům. Ty se nacházejí uprostřed hlavy a díky působení gravitace roztlačují honovací kameny od sebe. Tato funkce kompenzuje jak opotřebení nástroje během obrábění, tak geometrickou nedokonalost díry. Při provozu nástroj vykonává rotační pohyb společně s přímočarým vratným pohybem v axiálním směru obrobku. [35,36]

Nejběžnější využití honování je u válcových průchozích děr, protože při standardním honování musí honovací hlava vyjíždět o 1/3 délky kamenů přes vrchní i spodní hranu obrobku. Je možné honovat i neprůchozí díry, avšak v takovém případě je nutno počítat s výrazně horším povrchem na konci otvoru, protože není možno použít nástroj optimálně. [36]

Výhody honování zahrnují vyšší produktivitu procesu a nižší vstupní investice než pro AFM. Honování je jednodušší z hlediska plánování a řízení procesu. Pokud je honovací hlava vhodně udržovaná a nedojde k chybě během výrobního procesu, lze bezpečně předpokládat, že honovací hlava bude na celé ploše pracovat s konstantní rychlostí.

Další prospěšnou vlastností honování je charakteristický křížový výbrus, který vzniká díky unikátní kinematice procesu. Tento výbrus pomáhá se zadržováním maziva ve válci, čímž zvyšuje jeho trvanlivost. Je experimentálně dokázáno, že pomocí hybridního AFM s přidáním rotací média je možné dosáhnout podobného výbrusu se stejnými účinky. [24]

Nevýhody honování vůči AFM tkví v nemožnosti obrábět mikrootvory a otvory jiného než válcovitého tvaru.

Drsnost povrchu, které je možné honováním dosáhnout je  $R_a 0,1 \mu\text{m}$ . [35]

#### 4.1.2. Porovnání AFM s leštěním

Leštění je druh konvenčního obrábění, který pomocí leštícího kotouče snižuje drsnost obrobku a zlepšuje jeho vzhled. Další využití zahrnuje například zaoblení hran. Nástroj je plstěný či textilní kotouč, který je pokryt zrnky brusiva, a pro jemné leštění je brusivo nahrazeno brusnou pastou. Možností je taktéž chemické leštění, kdy roli brusiva při narušování obráběného materiálu nahradí chemický roztok. [37]

Tento proces často předchází povrchovým úpravám kovů jako třeba chromování či nátěr. Kromě zlepšení drsnosti dochází také k odstranění různých povrchových nečistot, například oxidů kovů. Vzhledem k naprosto minimálnímu úběru materiálu se při leštění výrazně nezlepšuje ani tvarová ani geometrická přesnost výrobku.

Leštění vyžaduje výrazně menší vstupní investici, protože tvarově jednoduché plochy, jako třeba válcové díry, je možné leštit na běžných strojích, a složitější tvary je možno leštit pomocí ručně držených přístrojů. V takovém případě je produktivita relativně nízká, a stupeň opracování povrchu na obráběné ploše bude nestálý.

Oproti tomu AFM umožňuje automatizaci tohoto procesu i v případě složitějších geometrií a dosahuje stálé kvality povrchu na celé ploše. Potenciální produktivita u malých obrobků může být ještě vyšší, protože na rozdíl od leštění AFM umožňuje obrábění více drobných dílů naráz.

Ve výsledku je pomocí leštění možno dosáhnout o něco nižší drsnosti povrchu. Zatímco AFM umožňuje dosažení drsnosti Ra 0,035  $\mu\text{m}$ , leštěním je možno dosáhnout drsnosti Ra 0,01  $\mu\text{m}$ . [37,24]

#### 4.1.3. Porovnání AFM s elektrochemickým dokončováním otvorů

Elektrochemické obrábění je nekonvenční metoda obrábění založená na elektrolýze. Jak nástroj, tak obrobek jsou ponořeny v lázni elektrolytu a prochází mezi nimi elektrický proud. Proud vyvolává reakci, která odebírá z obrobku materiál, který je následně odplaven elektrolytem. Nástroj je tvarovým opakem obrobku a obráběná plocha je určena velikostí mezery mezi nástrojem a obrobkem. Mezera má svou ideální hodnotu a s jejím zvětšením či zmenšením ztrácíme produktivitu. Zpravidla se pohybuje mezi 0,2 až 0,8 mm. Dalším faktorem ovlivňujícím produktivitu obrábění je rychlost proudění elektrolytu, protože s rostoucí rychlostí toku roste i rychlost úběru materiálu. Tato metoda obrábění nevyužívá mechanickou sílu a proto není silně závislá na mechanických vlastnostech materiálu. Jediná podmínka z hlediska materiálu je elektrická vodivost. [42]

Využití této metody je primárně pro dokončování tvarově složitých otvorů z obtížně obrobitelných materiálů, jako jsou formy a zápustky. Díky využití specifických nástrojů pro každý obrobek je možné produktivně dokončovat i složitější profily na jeden záběr. Za správných podmínek tato metoda dosahuje velmi kvalitního povrchu a velmi dobré rozměrové přesnosti. To je z velké části díky tomu, že opotřebení nástroje je téměř nulové. [40,42]

Nevýhody této metody jsou vysoké vstupní náklady, velmi pomalý úběr materiálu a vysoká energetická náročnost.

V ideálních podmínkách je možné touto metodou dosáhnout rozměrové přesnosti  $\pm 0,02$  mm s drsností Ra 0,4  $\mu\text{m}$ . Velkou výhodou je možnost zlepšení geometrických tolerancí obrobku díky tvarově velmi stabilnímu nástroji. [40]

## 4.2. Odjehlování

Dalším obvyklým využitím AFM je odjehlování hran výrobků. Při obrábění běžně vznikají na okrajích obrobku otřepty, které je nutné odstranit, protože komplikují následnou manipulaci a další zpracování, zvyšují pravděpodobnost zranění a zhoršují jak funkční, tak estetickou hodnotu výrobku. AFM se v tomto případě využívá pro tvarově náročnější výrobky, jako třeba pružinové kleštiny pro upínání obráběcích nástrojů. Tyto výrobky zpravidla vyžadují přesnost okolo 5  $\mu\text{m}$ , a proto je nutné otřepty kvalitně odstranit. [38,24]

Pružinová kleština je příklad, který má mnoho obráběných hran jak zvenku, tak i zevnitř. Z toho důvodu je v tomto případě AFM nejlepší volba, protože se správným přípravkem je možné odjehlovat všechny hrany naráz a zároveň zlepšit drsnost povrchu ploch. [38]

Výhodou AFM je, že při odjehlování médium také ovlivňuje drsnost ve zbytku obrobku. Je proto možné na jednom stroji při jednom upnutí provést jak odjehlení, tak dokončování. AFM je vhodné pro dokončování velice malých děr a na rozdíl od konvenčních metod vykazuje minimální změnu tvaru obrobku. Díky orbitálnímu AFM je také možné odjehlovat naráz velice složité tvary jako například zápustky či formy. A v případě menších obrobků je jich možné obrábět několik současně. [38]



Číslo otřepu	Původní velikost otřepu	Velikost otřepu po AFM	Velikost odstraněné části otřepu	
Vrchní část	1	0.052	0	0.052
	2	0.060	0	0.060
	3	0.052	0	0.052
	4	0.034	0	0.034
Spodní část	1	0.103	0.017	0.086
	2	0.069	0.052	0.017
	3	0.069	0.035	0.034
	4	0.069	0	0.069

Obrázek 15: Výsledek experimentu AFM odjehlení pružinové kleštiny [38]

Pro odjehlování budu s AFM porovnávat následující metody:

- Termické odjehlení
- Elektroerozivní odjehlení
- Konvenční odjehlení

#### 4.2.1. Porovnání AFM s termickým odjehlováním

Při termickém odjehlování je součást uzavřena do vzduchotěsné komory, která je následně vyplněna směsí kyslíku s metanem, vodíkem, nebo zemním plynem. Když je tato směs stlačena na požadovaný tlak, zapalovací svíčka vytvoří v komoře jiskru která zapálí směs plynů. Následující exploze je dlouhá pouze několik desítek milisekund, a v komoře krátce vytvoří teplotu až 3500 °C. Tento prudký tepelný šok je příliš krátký na to, aby výrazně ovlivnil tvar či strukturu obrobku, protože obrobek je tvořený dostatečným množstvím hmoty na to, aby tepelný šok absorboval. Otřepy jsou však daleko menší, a proto je tento tepelný šok „upálí“. [39]

Díky podstatě metody, kde se plyn před zažehnutím dostane do všech skulin v obrobku, jsou spolehlivě a bez vlivu lidského faktoru odstraněny všechny otřepy na výrobku. Metoda je velice produktivní, umožňuje zpracování tvarově velice složitých výrobků, nepoškozuje ani závitů a v případě menších obrobků je možné zpracovávat větší množství zároveň. [39]

Tato metoda však není vhodná pro kusovou výrobu, protože každý díl vyžaduje specifický tlak a složení plynu v závislosti na materiálu a tvaru. Po této operaci je nutné díly vyčistit, protože na nich ulpívá oxid z upálených otřepů. Dalším omezujícím faktorem je maximální velikost obrobku, která je limitovaná velikostí komory stroje. [39]

Tato metoda nachází uplatnění v hydraulickém a pneumatickém průmyslu, automobilovém průmyslu a letectví.

Využití této metody z hlediska materiálů zahrnuje všechny materiály schopné oxidace. To znamená veškeré typy oceli, litiny, mosazi a slitiny hliníku. Měď je méně vhodná, protože velmi dobře vede teplo a proto může zanechat zbytky otřepů. [39]

#### 4.2.2. Porovnání AFM s elektrochemickým odjehlováním

Elektrochemické obrábění funguje na principu elektrolýzy. Nástroj (katoda) i obrobek (anoda) jsou ponořeny v elektrolytu, kterým prochází proud mezi katodou a anodou. Tento proud následně rozpouští iony z povrchu obrobku, čímž probíhá úběr materiálu. Tento materiál je z dielektrika později možno odfiltrovat. Na rozdíl od elektroerozivního obrábění zde nedochází ke vzniku jisker. Nástroj je tvarován konkrétně pro obrobek, aby bylo zajištěno, že odhrotování bude probíhat pouze tam, kde je potřebné. [40,42]

Výhodou této metody je absence mechanických sil, teplotních šoků a opotřebení nástroje. Zároveň metoda dosahuje vysoké přesnosti a opakovatelnosti. Také umožňuje obrábění většího počtu dílů naráz.

Mezi nevýhody patří vysoké vstupní náklady, vysoká energetická náročnost a nutnost vodivosti obráběného materiálu. Nízká rychlost úběru materiálu není v tomto případě příliš podstatným faktorem, protože při procesu odjehlování dochází k úběru velmi malého objemu hmoty. [40]

#### 4.2.3. Porovnání AFM s konvenčním odjehlováním

Nejprimitivnější způsob konvenčního odjehlování je ruční odjehlování. Zpravidla se provádí pilníkem, kovovým kartáčem nebo takzvaným „škrabákem“ Výhodou jsou v tomto případě vstupní náklady v řadu stovek korun. Nevýhody zahrnují velmi nízkou míru přesnosti, závislost na zručnosti pracovníka a nulovou opakovatelnost. Proto se tato metoda využívá pouze pro součásti, u kterých nehraje rozměrová a tvarová přesnost žádnou roli a cílem je pouze zvýšení bezpečnostních standardů a zlepšení vzhledu dílu.

Běžnější je odjehlování pomocí obráběcích strojů, které vnášejí do procesu značnou přesnost. Při konvenčním odjehlování jsou držáky pro nástroje často vytvářeny tak, aby po dobu obrábění působily konstantní silou za účelem jednotného opracování obráběné plochy. Pokud je potřeba pouze odjehlení a není nutné sražení hran, je možné využít kovových kartáčů. Za předpokladu že je žádoucí i sražení hran, je možné využít broušení nebo speciální odjehlovací nástroje.

V případě využití této metody konvenčního odjehlování sice výrazně rostou náklady oproti ruční variantě, avšak také se zbavujeme nevýhod ručního odjehlování. Touto metodou je možné dosáhnout spolehlivě přesného výsledku a pro většinu jednodušších dílů stačí zakoupit pouze nástroj, což tuto metodu stále činí ekonomicky velmi atraktivní.

Velkou nevýhodou jsou však skutečnosti, že je takto zpravidla možno pracovat pouze na jednom kusu naráz a je možné obrobek pouze snadno dostupné kontury.

Další velmi běžnou možností je omílání. Tato metoda odjehlování funguje na principu otírání se obrobku o takzvaná omílací tělíška. Pohyb potřebný pro fungování omílání je možno vyvolat gravitací, odstředivou silou, či vibračním tělíškem. Obrobek i omílací tělíška jsou vloženy do válcové nádoby která se začne pohybovat a způsobí tření mezi oběma komponenty. Opakovaným kontaktem mezi obrobkem a tělíškem je možno docílit odhranění, zaoblení hran, leštění i zlepšení povrchu. Tělíška mohou být z rozličných materiálů od porcelánu až po ořechové skořápky a mohou mít různé rozměry. [41]

Výhodou této metody je snadná automatizace, vysoká produktivita a velmi široké využití. Zároveň se jedná o ekonomicky výhodnou metodu.

Nevýhodou je že proces je velmi špatně říditelný a proto je nevhodný pro případy kdy chceme dokončit pouze určité plochy a hrany. Stejně tak je nutné obrobky často kontrolovat,



protože u tvarově složitějších obrobků není zaručeno, že na všech hranách proběhne odjehlení dle požadavků.

## 5. Obrábění ultrazvukem

### 5.1. Ultrazvuk

Ultrazvuk je mechanické vlnění které přesahuje frekvenci 20 kHz. Tato hodnota přesahuje horní hladinu slyšitelnosti lidského ucha. Jinými slovy se jedná o zvuk pro lidi neslyšitelný. Podobně jako zvuk se ultrazvuk nejlépe šíří v pevných látkách, v nichž může dosahovat rychlosti až 3000 m/s. Je možné ho využít pro obrábění a měření, a to jak v lékařství, tak v technice. Pro měření se využívá jeho vlastnost odrazu na rozhraní dvou prostředí. Například v rozhraní kov-vzduch je téměř stoprocentní šance pro odraz. Tímto způsobem je možné odhalit vnitřní vady materiálu.

### 5.2. Podstata obrábění ultrazvukem

Obrábění ultrazvukem je řízené rozrušování materiálu obrobku účinkem pohybu zrn abrazivního materiálu a působením kavitační eroze. Tato metoda se řadí mezi mechanické procesy, protože odebrání materiálu je realizováno mechanickým otěrem, nikoliv chemickým či tepelným procesem.

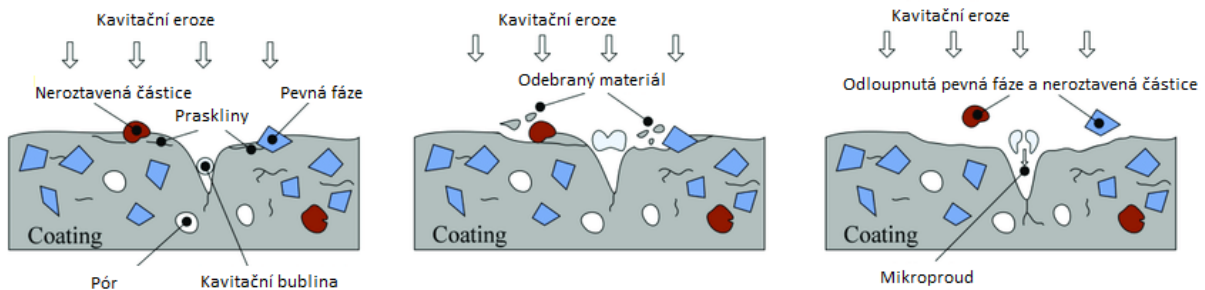
Princip metody spočívá v tom, že mezi obráběný povrch a nástroj jsou přivedena zrna abrazivního materiálu. Tento nástroj poté začne kmitat s vysokou frekvencí a relativně nízkou amplitudou, čímž rozpohybuje zrna abraziva, která začnou svým působením odebírat materiál. Z principu této metody přichází v úvahu pouze dva druhy pohybu nástroje, a to kmitání kolmo k obráběnému povrchu, nebo kmitání podélné. Tyto dva pohyby je také možno kombinovat.

Vysokou intenzitu procesu zajišťuje primárně vysoké frekvence kmitání ( $18$  až  $25 \cdot 10^3$  za sekundu) a velkým množstvím abrazivních zrn současně zapojených v procesu ( $30$  až  $100 \cdot 10^3 \cdot \text{cm}^{-2}$ ). Tato zrna zachycena mezi materiálem a nástrojem pomalu pronikají do obráběného materiálu a tím ho rozrušují. [3]

Proces probíhá v pracovním prostředí jímž je kapalina. Ta se používá pro unášení zrn do pracovního prostoru nástroje a odplavuje opotřebená zrna, čímž udržuje tempo obrábění. Vedlejším efektem je, že viskozita kapaliny způsobuje útlum kmitání nástroje.

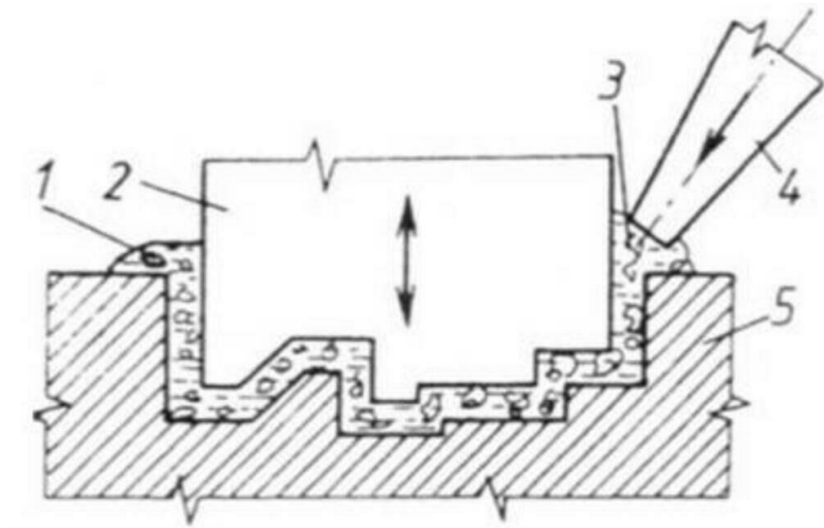
Dalším následkem vysoké rychlosti kmitání nástroje je tzv. kavitace. Kavitace je fyzikální jev, který nastává při vypařování kapalin. Rapidní kmitání nástroje tvoří oblasti ve kterých se tvoří podtlak, který vede k odpařování kapalin při nižších teplotách než je jejich běžný bod varu v atmosféře. Tyto plyny tvoří bubliny, které pomáhají jednak při samotném obrábění, a dále

podporují výměnu opotřebených zrn za nová. Díky těmto dvěma vlastnostem je kavitace při ultrazvukovém obrábění prospěšná. Princip kavitace je graficky znázorněn na obrázku.



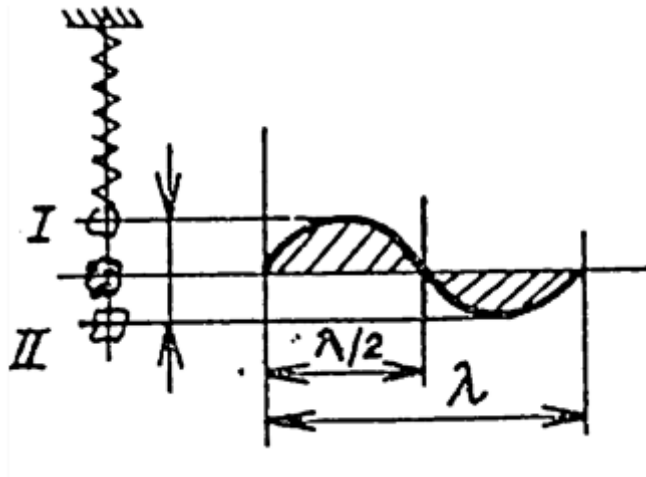
Obrázek 16: Princip kavitační eroze [5]

Během obrábění je možno také působit pomocí nástroje přítlačnou silou na brusná zrna, čímž se zrychlí úběr materiálu a umožní se lepší obrobení tvarově složitějších ploch, protože zrna která jsou v kontaktu s nástrojem kopírují jeho tvar. Při návrhu takového nástroje je však potřeba počítat s tím, že ačkoliv nejrychlejší odběr je v rovině kolmé ke směru kmitání nástroje, dochází také k obrábění na bočních stranách nástroje. Tento úběr je způsoben abrazivním otěrem zrn brusiva a je výrazně pomalejší, avšak není zanedbatelný.



Obrázek 17: Princip metody obrábění ultrazvukem [3]

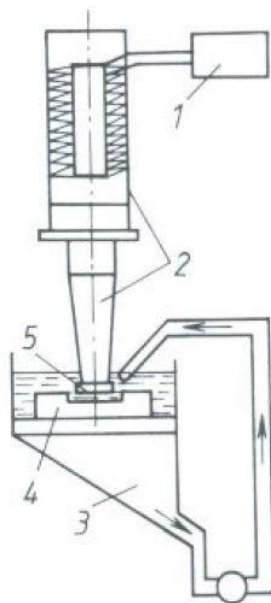
1-kapalina, 2-nástroj, 3-brusné zrna, 4-přívod kapaliny s abrazivem, 5-obrobek



Obrázek 18: Modelový příklad procesu obrábění [4]

Proces ultrazvukového obrábění lze zjednodušeně vymodelovat jako zrno abraziva připevněné na pružině. Zrno vykonává přímočarý vratný pohyb z polohy I do polohy II, definovaný amplitudou, frekvencí a vlnovou délkou.

### 5.3. Zařízení pro obrábění ultrazvukem



Obrázek 19: Konstrukce obráběcího zařízení [4]

Zařízení pro obrábění ultrazvukem jsou tvořena

- 1) generátorem vysokofrekvenčního proudu
- 2) systémem pro tvorbu mechanických kmitů
- 3) přívodem brusných zrn a kapaliny
- 4) obrobkem
- 5) nástrojem

### 5.3.1. Generátor vysokofrekvenčního proudu

Ultrazvukové generátory jsou zařízení, která vytváří ze střídavého elektrického proudu o frekvenci 50 Hz proud o frekvenci vysoké 18 až 25 kHz. Důležitým parametrem těchto generátorů je jejich výstupní výkon, který bývá mezi cca 0,2 až 4 kW. [3,4]

### 5.3.2. Systém pro tvorbu mechanických kmitů

„Systém pro tvorbu mechanických kmitů se skládá z měniče elektrické energie na mechanické kmitání, koncentratoru amplitudy a pracovního nástroje. „ [3]

Pro tvorbu mechanických kmitů jsou používány dva různé jevy, a to:

- Piezoelektrický jev
- Magnetostrikce

Historicky užívaly první obráběcí stroje na bázi ultrazvuku pro tvorbu kmitů piezoelektrické materiály. Následně však kvůli křehkosti tehdy využívaných piezoelektrických materiálů (přírodní krystaly) byly tyto stroje dočasně nahrazeny stroji využívající magnetostrikci. Během druhé světové války byla v rámci vývoje technologie SONAR objevena tzv. piezokeramika, která byla vytvářena uměle a byla výrazně robustnější než přírodní materiály. Poslední problém piezoelektrických systému byl vyřešen v 50. letech vývojem dokonalejších metod lepení pro aplikace v letectví.[6]

V případě použití obráceného piezoelektrického jevu spočívá podstata procesu ve vlastnostech takzvaných piezoelektrických materiálů. Tyto materiály mají šestiúhelníkovou strukturu, která je za běžných okolností bez napětí, avšak pokud na tyto látky začne působit síla, která způsobí deformaci, rovnováha pólů v šestiúhelníku se naruší a materiál vygeneruje el. napětí. Tento efekt je možno využít opačně, jinými slovy vpuštěním el. napětí do těchto materiálů je možné je buď roztáhnout, nebo stlačit. Na základě tohoto principu funguje měnič elektrického napětí na mechanické kmitání.

Výhodou strojů založených na piezoelektrickém jevu je větší rozsah frekvencí vlnění. Magnetostrikční stroje nejsou schopny dosáhnout stejně vysokých frekvencí. Piezoelektrická konstrukce je také energeticky výhodnější. Při jejím provozu totiž dochází k pouze jedné změně energie z elektrické na mechanickou, díky čemuž je možno dosáhnout až 70 % efektivity. Naproti tomu magnetostrikční technologie nejprve mění energii elektrickou na magnetickou, přičemž nastávají vysoké tepelné ztráty v cívkách, a následně převádí energii z magnetické na mechanickou. Kvůli této nevýhodě dosahují takové stroje pouze 40 % efektivity a je nutné je chladit, což vede k dalšímu nárůstu jejich rozměrů. [6]

Při použití magnetostrikce vyvolávají vlnění za sebou seřazené plátky feromagnetického materiálu obklopeného cívkou. V cívce je pomocí elektrického proudu generováno magnetické

pole na jehož přítomnost reaguje feromagnetický materiál kontrakcí či expanzí. Frekvence takových strojů je limitována fyzickou velikostí feromagnetu. Čím vyšší frekvence je potřeba, tím kratší musí být feromagnetické těleso. Tato podmínka běžně limituje frekvenci magnetostruktury na operace po 30 kHz. Výhodou této konstrukce je schopnost pracovat v širším frekvenčním pásmu, což umožňuje vzít v potaz například opotřebení nástroje. [6]

Neméně důležitou součástí systému je koncentrátor (vlnovod), jehož účelem je tvorba kmitání o vyšší amplitudě soustředěného na malé ploše nástroje. Koncentrátory existuje několik konstrukcí (stupňovitý, kuželový, exponenciální) a materiál vybraný pro konstrukci musí vykazovat vysokou odolnost vůči opotřebení, únavě a korozi. Zpravidla je z těchto důvodů volena slitina titanu, nerezová ocel, monel, či hliníkový bronz. Nejdůležitější charakteristikou koncentrátoru je tzv. koeficient zesílení, jenž udává, koliknásobně je větší amplituda kmitů nástroje v oblasti obrábění oproti místě napojení na měnič el. energie na kmity. V praxi jsou nejobvyklejší koncentrátory stupňovité, protože mají nejvyšší koeficient zesílení a nejsnáze se vyrábí. [3]

### 5.3.3. Řízení

Tyto stroje se využívají pro velice přesné obrábění, a proto jsou vždy vybaveny CNC řízením. Různé modely mohou mít 3 až 5 os, což umožňuje provádět velké množství operací při jediném upnutí. Tato vlastnost je klíčová pro přesné obrábění.

### 5.3.4. Systém pro přívod brusných zrn a kapaliny

Tento systém má za úkol regulovat množství přiváděné suspenze a její vhánění do mezery mezi nástrojem a obrobkem. Množství a tlak dopravované kapaliny je nutno vzít v potaz i z hlediska nahrazení kapaliny opotřebené a znečištěné.

### 5.3.5. Obráběcí kapaliny

Obráběcí kapalina je potřebná pro dopravu a odvádění zrn z místa obrábění. Požadavky na obráběcí kapalin zahrnují nízkou cenu, nízkou viskozitu, vysokou smáčivost a hustotu co nejpodobnější k použitému brusivu. Kapalina s vysokou viskozitou totiž pohlcuje mechanickou energii nástroje na úkor výkonnosti obrábění. Nejběžnějšími kapalinami používanými pro tento účel je voda, líh, petrolej, či strojní olej. [3]

Obráběcí kapalina	voda	petrolej	líh	strojní olej
Index produktivity	1	0,7	0,57	0,3

Tabulka 2: Zhodnocení produktivity obráběcích kapalin [3]

### 5.3.6. Brusivo pro obrábění ultrazvukem

Brousící zrna vyžadují především vysokou tvrdost a otěruvzdornost. Z těchto důvod se využívá diamant, kubický nitrid bóru, umělý korund, nebo karbid křemíku. Velikost obráběcích

zrn se pohybuje mezi 10 až 30 $\mu$ m, a zpravidla tvoří 30 až 40 % hmotnosti obráběcí suspenze, ve specifických případech i pouhých 20 %. Zrnitost abraziva také ovlivňuje produktivitu obrábění. Čím je zrnitost vyšší, tím pomaleji probíhá úběr materiálu, ale zlepšuje se přesnost a kvalita povrchu. [7]

#### 5.4. Abrazivní materiály používané obrábění ultrazvukem

Zrna brusiva se postupně rozrušují a tupí, což vede ke snížení výkonnosti obrábění. Musíme je průběžně měnit. Z tohoto důvodu vháníme do obráběcího prostoru suspenzi pod tlakem, což způsobuje postupnou výměnu brusných zrn.

Abrazivní materiál	Poměrná řezivost	Tvrlost dle Mohse	Mikrotvrlost [ $N \cdot mm^{-2}$ ]
diamant	1	10	100 000
kubický nitrid bóru BN	1,1	~10	~110 000
karbid bóru $B_4C$	0,5-0,6	9	43 000
karbid křemíku $SiC$	0,25-0,45	9	30 000
Elektrokorund $Al_2O_3$	0,14-0,16	8	20 600

Tabulka 3: Typy materiálů pro obrábění [3]

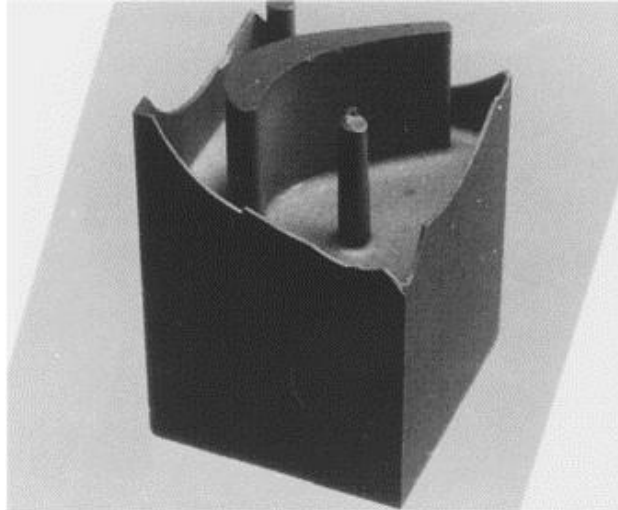
#### 5.5. Nástroje pro obrábění ultrazvukem

Nástroje pro obrábění ultrazvukem je možno dělit na nástroje pevně spojené s koncentrátorem kmitů, nástroje výměnné a nástroje sdružené. Nástroje je také možno připevnit k vlnovodu pájením. Proběhly pokusy o připevnění nástroje pomocí závitu, s předpokladem, že tato konfigurace by umožnila rychlou výměnu nástroje, avšak bylo zjištěno, že nástroj se vlivem vibrací uvolňoval, docházelo ke ztrátě výkonu, a někdy i k poškození nástroje následkem únavy materiálu. Sdružené nástroje jsou schopné provádět postupně několik různých operací různými částmi nástroje. Jako materiály pro nástroje jsou zpravidla voleny konstrukční a nerezové oceli, slitiny mědi, mosazi, a titanu, nebo karbid wolframu. Nástroje pro tento typ obrábění je možno pojmout dvěma způsoby. [3]

Jednou možností je vytvořit nástroj ve tvaru díry kterou chceme obrobit (obrázek 19). Tato metoda dokáže v mnoha případech ušetřit velké množství času oproti konvenčním metodám obrábění. Grafitová elektroda pro elektroerozivní obrábění byla ultrazvukem obrobena za 30 minut oproti 20 hodinám potřebným pro dosažení tohoto výsledku na kopírovací frézce. Nevýhoda tohoto postupu je taková, že nástroj se neopotřebovává stejně po celém povrchu a proto je třeba pečlivě kontrolovat výsledné díly a nástroj. [8]

V závislosti na kombinaci materiálu a abraziva se opotřebení obrobku vůči nástroji pohybuje v rozmezí od 1:1, po 1:100. [8]

Na nástroj při práci zpravidla působí přítlačná síla vyvinutá například pružinou či hydraulickými a pneumatickými systémy. Pro dobré výsledky musí stroj vyvíjet stabilní sílu během celého procesu obrábění. Tato přítlačná síla se zpravidla pohybuje v rozmezí 0,1 až 30 N.



*Obrázek 20: Součást turbíny vytvořená ultrazvukovým obráběním [8]*

Druhou možností je nástroje ve tvaru válce, který pro obrábění komplikovaných dílů spoléhá na CNC program. Tento druh technologie je velice perspektivní a je zkoumán v řadě vyspělých zemí. [8]



## 5.6. Technologické charakteristiky ultrazvukového obrábění

### 5.6.1. Produktivita obrábění ultrazvukem

Produktivita procesu obrábění je závislá na amplitudě a frekvenci kmitů, velikosti přtlaku nástroje, druhu abraziva a jeho množství. Produktivitu samotnou je možno vyhodnotit dvěma způsoby, a to:

- Rychlostí vnikání nástroje do obrobku [ $m \cdot \text{min}^{-1}$ ]
- Objemovým úběrem materiálu [ $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ]

Nejvíce produktivitu obrábění ovlivňuje amplituda kmitů. Díky experimentálním měření víme, že nejvyššímu výkonu obrábění odpovídá amplituda mezi 30 a 80  $\mu\text{m}$ . Vhodná frekvence byla s ohledem na efektivitu procesu experimentálně určena jako 18 až 20 kHz. [3]

Přítlačná síla nástroje je značně závislá na zrnitosti abraziva a amplitudě kmitů. Za zdůraznění však stojí, že křehké materiály jako například sklo jsou limitovány na maximálně  $30 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-2}$ . [3]

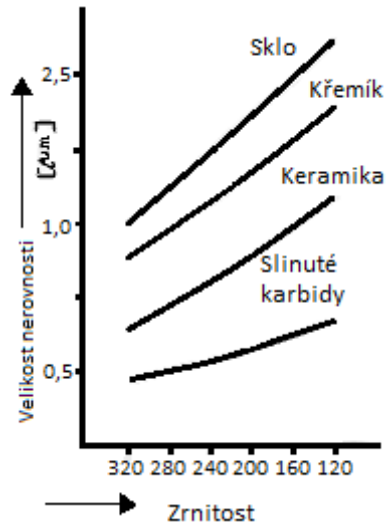
Zrnitost abraziva je pro produktivitu obrábění velmi důležitá. Pro hrubování se používají větší brusná zrna a pro obrábění na čisto menší.

### 5.6.2. Přesnost obrobků

Experimentálně je zjištěno, že pro přesné obrábění je klíčem stabilní velikost přiváděných zrn abraziva. Z principu obrábění vychází nevyhnutelná kuželovitost obráběných válcových děr. Ve správných podmínkách se přesnost zpravidla pohybuje v setinách milimetru. Je nutno vzít v úvahu také zda je díra průchozí. Neprůchozí díra zabraňuje ideálnímu toku abraziva, což vede ke snížení přesnosti.

### 5.6.3. Kvalita povrchu

Kvalita povrchu závisí na zrnitosti abraziva, obráběném materiálu a amplitudě obrábění. Obrázek 6 znázorňuje drsnost dosaženou při výrobě čtvercového otvoru o straně 10 mm. [3]



Obrázek 21: Dosahované drsnosti UZ obráběním [3]

### 5.7. Využití ultrazvukového obrábění

Obráběný materiál	Relativní obrobiteľnosť
Sklo	1
Rubín	0,9
Ferit	0,9
Germanium	0,6-0,3
Křemík	0,5
Keramika	0,3
Achát	0,3
SK P10	0,05-0,02

Tabulka 4: Poměrná obrobiteľnosť různých materiálů [3]

Primární využití ultrazvukového obrábění spočívá v obrábění složitých tvarů do velmi tvrdých a křehkých materiálů. Příkladem může být sklo, křemík, grafit, kevlar, keramika a polodrahokamy. Také často zastupuje elektroerozivní obrábění v případě materiálů s nízkou elektrickou vodivostí. S klesající tvrdostí obráběného materiálu klesá také jeho obrobiteľnosť. Některé plastické materiály jsou touto metodou velmi špatně obrobiteľné, protože obrábění ultrazvukem vykonává většinu úběru materiálu prostřednictvím mikroprasklin, které vznikají nejlépe v křehkých materiálech. [9]

### 5.7.1. Ultrazvukové leštění

Ultrazvukové leštění je proces velmi podobný běžnému obrábění ultrazvukem. Klade se větší důraz na konečnou kvalitu povrchu, čemuž odpovídají volené parametry obrábění. Tato metoda je často využívána pro dokončování forem a často také následuje po elektroerozivním obrábění za účelem zlepšení kvality povrchu, odstranění tepelně ovlivněné vrstvy materiálu a zlepšení povrchových vlastností materiálu po produkčních procesech založených na teple.

### 5.7.2. Ultrazvukové řezání

Tato technologie se využívá pro dělení malých a tvrdých polotovarů. Například řezání tyčí kubického nitridu bóru o tloušťce 10 mm na destičky. Výhodou je malá ztráta materiálu. Ultrazvukové řezání je silně zastoupené i v řezání měkkých materiálů, které se při běžném řezání lepí, nebo je pro ně podstatné provést řez bez otřepků. Příkladem může být nevulkanizovaná guma, textil, či potraviny. Pro tyto účely je často možné využít ručně držené přístroje, ačkoliv pro náročnější provozy se také vyrábí průmyslové CNC varianty. [3,4]



Obrázek 23: Ruční stroj na řezání pryže [22]

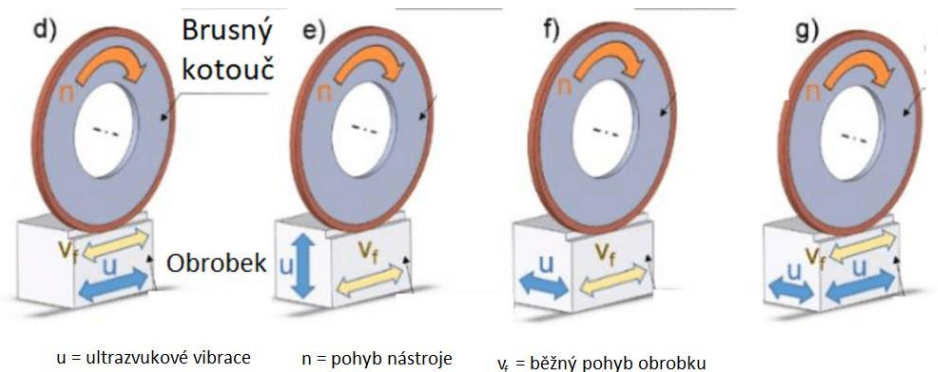


Obrázek 22: CNC stroj na řezání jídla [23]

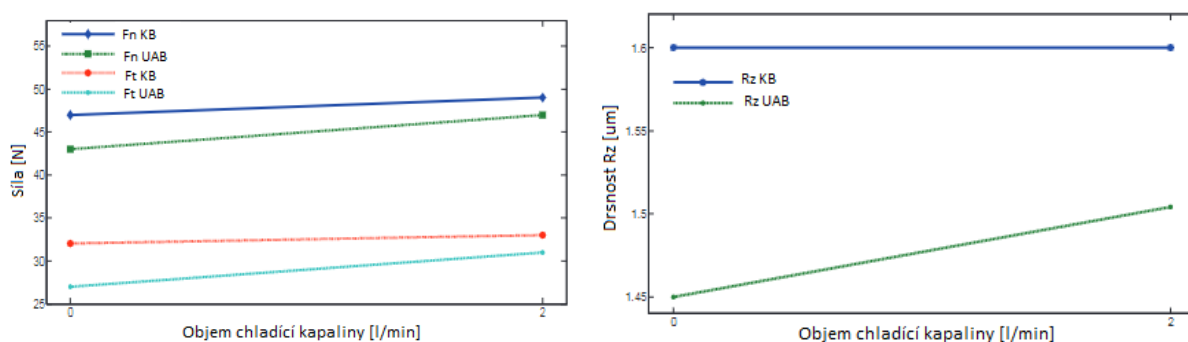
### 5.7.3. Ultrazvukem asistované broušení

Technologie ultrazvukem asistovaného broušení (UAB) využívá jako nástroje konvenční brusné kotouče bez přídavku brusné suspenze. Tyto kotouče jsou zpravidla z diamantových zrn s kovovou vazbou. Kinematika při obrábění je složená z rotačního pohybu kotouče a z přímočarého vratného pohybu obrobku při vysoké frekvenci (20kHz). Kmitání obrobku může být jak podélné, tak kolmé k obráběnému povrchu. Všeobecně je možno předpokládat, že UAB

při stejné hloubce záběru a stejné řezné rychlosti bude vyžadovat menší tangenciální a normálové síly a bude dosahovat lepších drsností povrchu oproti konvenčnímu broušení. Obě tyto výhody jsou závislé na množství dodávané chladicí kapaliny. Z následujících grafů vyplývá, že jak drsnost povrchu, tak potřebné síly se zvyšují se stoupajícím množstvím chladicí kapaliny. Tento fakt je připisován měknutí materiálu se stoupající teplotou. [10]



Obrázek 25: Možnosti ultrazvukových vibrací při broušení [13]



Obrázek 24: Závislost hodnot obrábění UAB a KB v závislosti na množství chladicí kapaliny [10]

Dalším pozitivním účinkem UAB je snížení opotřebení nástroje, a možnost lepšího obrábění určitých materiálů. Například některé slitiny titanu při KB ulpívají na kotouči nebo se poškozují vysokou teplotou. UAB tyto problémy výrazně redukuje, což z něj dělá velmi perspektivní technologii v oblasti letectví a kosmonautiky. [10]

#### 5.7.4. Ultrazvukové hloubení otvorů

Hloubení je z technologického hlediska nutno rozdělit na hloubení otvorů průchozích a neprůchozích. Hloubení otvorů průchozích je operace vykonávaná za vertikálního přísuvu nástroje. Z důvodu nízké produktivity této metody se zpravidla obrábějí součástky o tloušťce do 10 mm. V případě, že je potřeba vytvořit průchozí díru kruhového tvaru, je možno obrábění výrazně urychlit využitím nástroje ve tvaru trubky, čímž výrazně snížíme objem odebíraného materiálu. [3]

Hloubení neprůchozích otvorů jako například různých drážek se zpravidla vykonává posuvem nástroje v horizontální rovině. Výhodou těchto technologií je vysoká přesnost a

schopnost obrábět tvrdé a křehké materiály. Tyto vlastnosti nacházejí uplatnění při výrobě stupnic měřících strojů, nebo mikro technologií. Příkladem může být obrábění V-drážek o hloubce 15  $\mu\text{m}$ . Ultrazvukové obrábění dosahuje vyšší tvarové přesnosti a vyžaduje menší obráběcí sílu. Nevýhodou je v tomto případě zhoršení povrchu. [4]

#### 5.7.5. Povrchové úpravy asistované ultrazvukem

S vývojem nových technologií se v dnešní době výrazně zvyšuje potřeba pro čím dál přesnější součásti, ať už jde o přesnost tvarovou, rozměrovou, či o velmi hladký povrch. Pro takovéto díly se běžně používají metody jako honování, lapování a superfinišování. S rostoucím využitím těchto metod stoupá také potřeba zvýšení jejich produktivity. Změny běžných parametrů této technologie, jako například zvýšení přitlačné síly či řezné rychlosti však vedly ke zhoršení finálního produktu, a proto se zkoumá alternativní řešení využívající ultrazvuku.

Honování se využívá pro dokončování vnitřních a vnějších válcových ploch za účelem zlepšení povrchu, přesnosti obrábění a potlačení kuželovitosti děr. Nástrojem je honovací hlava, ve které jsou upnuté honovací kameny. Při práci honovací hlava pomalu rotuje a vykonává přímočarý vratný pohyb ve svislém směru, jehož výsledkem je charakteristický křížový výbrus. Z experimentálních pokusů vyplývá že přidání ultrazvukových kmitů do procesu honování není možno dosáhnout menších drsností než při konvenčním obrábění, bylo však zjištěno, že z vzniklá struktura povrchu je vhodnější například pro mazání obrobených ploch. [12]

Superfinišování se provádí jako dokončovací operace pro vnější válcové plochy pomocí rychlého kmitavého pohybu superfinišovací hlavou podélně s povrchem obrobku. Asistence ultrazvukem přidává nástroji kmitavý pohyb kolmo k povrchu obrobku. Oproti konvenčnímu superfinišování je ultrazvukové superfinišování produktivnější až o 70 %, a je možno snížit drsnost až o 25 %. [13]

#### 5.7.6. Čištění ultrazvukem

Ultrazvukové čištění je proces, který využívá vlivu ultrazvuku na kapaliny, konkrétně kavitačního jevu. Pracovním prostorem ultrazvukové čističky je vana, jejíž dno je spojeno s ultrazvukovým měničem. Ten mění přivedenou elektrickou energii na mechanickou, která v kapalině uvnitř vany vyvolá ultrazvukové vlnění. Toto vlnění způsobuje intenzivní kmitání molekul, které vede k prudkému vypařování kapaliny, a vzniku bublin naplněných párou. Tyto bubliny následně implodují, čímž uvolní mechanickou energii do okolní kapaliny a skrze kapalinu do obrobku. Díky tomuto procesu se v blízkosti bubliny výrazně zvedá teplota a v okolní kapalině se rapidně střídá zvýšený tlak při vzniku bubliny a podtlak při jejím kolapsu. Tato změna tlaku narušuje vazby mezi materiálem a nečistotou. [11]

## 6. Srovnání obrábění ultrazvukem s jinými technologiemi

Největší výhodou obrábění ultrazvukem oproti konvenčním metodám obrábění je jeho schopnost obrábět velice tvrdé a křehké materiály. S vysokou přesností je možné vyrábět i tvarově velmi složité profily, a díky nízkým potřebným silám a minimálnímu tepelnému ovlivnění materiálu je vhodné i pro tenkostěnné obrobky. Nevýhodou této technologie je nízká produktivita práce, vysoké náklady na pořízení stroje a rychle se opotřebovávající nástroj.

### 6.1. Řezání

Řezání ultrazvukem je možno využívat pro velkou škálu materiálů. Jedná se buďto o křehké a velmi tvrdé materiály (například sklo či rubín), nebo materiály příliš měkké, či příliš málo teplotně odolné pro využití jiných metod (například potraviny, či textil). Výhodou je minimální teplo působící na obrobek, velmi dobrý povrch po obrábění a malá ztráta materiálu. V případě měkčích materiálů, jako například potraviny či guma, je možné také používat ručně držené stroje, což umožňuje vysokou efektivitu v kusové výrobě. Nevýhody této metody zahrnují špatnou schopnost obrábět houževnaté materiály, vysoké vstupní náklady a nízkou produktivitu. Tato technologie se většinou využívá pro součásti o malé tloušťce, zpravidla do 10 mm. [3,4]

V případě řezání budu s obrábění ultrazvukem porovnávat následující metody:

- Elektroerozivní řezání
- Řezání laserem
- Konvenční řezání
- Řezání vodním paprskem

#### 6.1.1. Porovnání s elektroerozivním řezáním

Elektroerozivní obrábění je nekonvenční metoda obrábění, která využívá k odstraňování materiálu energii elektrického oblouku. Při obrábění vzniká mezi nástrojem (katodou), a obrobkem (anodou) elektrický oblouk, který dodá do obrobku dostatek energie na to, aby se jeho část vypařila či odtála. Důsledkem tohoto způsobu obrábění je, že takto obráběné plochy často vyžadují následné dokončovací procesy za účelem snížení drsnosti povrchu, protože po jednotlivých výbojích zůstávají na povrchu obrobku malé krátery. Tento proces probíhá v kapalině s vysokým elektrickým odporem zvané dielektrikum. [3,29]

Elektroerozivní řezání nachází využití primárně při obrábění těžko obrobitelných materiálů, jako je třeba titan. To je možné díky faktu, že na elektroerozivní obrábění mají vliv hlavně fyzikální vlastnosti materiálu, z nichž je nejdůležitější elektrická vodivost. Mechanické vlastnosti materiálu mají na obrábění výrazně menší vliv.

Dále je možné pomocí elektroerozivního obrábění vytvořit tvarově velmi složité řezy, které je často téměř nemožné vytvořit jiným nástrojem než drátem. [3]

Výhody elektroerozivního řezání zahrnují možnost obrábět s vysokou přesností jakýkoliv elektricky vodivý materiál, schopnost pracovat dlouhou dobu bez zásahu obsluhy (díky dlouhému drátu), velkou maximální tloušťku obrobku a malou šířku spáry po řezání. [29]

Nevýhody zahrnují vysokou energetickou náročnost, nízkou rychlost úběru materiálu a vysokou rychlost opotřebení nástroje, a to jak v případě tvarové elektrody, tak i drátu. Na rozdíl od obrábění ultrazvukem také dochází k tepelnému ovlivnění povrchu obrobku. [29]

Obě metody sdílejí nevýhodu vysokých pořizovacích nákladů a nutnost občasného nahrazení pracovní kapaliny za účelem zachování její čistoty.

#### 6.1.2. Porovnání s řezáním laserem

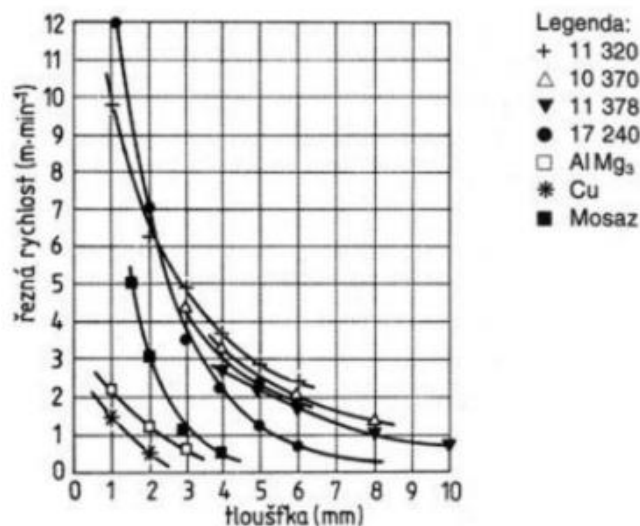
Obrábění laserem je založené na vysílání koncentrovaného paprsku částic soustředěného do jednoho bodu, kde se při kontaktu s materiálem mění světelná energie na energii tepelnou. Do místa dopadu tohoto paprsku přivádíme zároveň procesní plyn, který může v závislosti na typu řezání laserem zvyšovat teplotu při řezání materiálu nebo průběžně vyfukovat roztavený materiál z oblasti řezu.

Obrobitelnost jednotlivých materiálů při řezání laserem závisí primárně na nastavení laseru, absorpci materiálu, tepelné vodivosti materiálu a odrazivosti povrchu obrobku. V závislosti na vlnové délce paprsku je možné řezat například i dřevo a keramiku. [30]

Výhodami při obrábění laserem je nulové opotřebení nástroje, možnost řezání tvarově náročných tvarů, relativně vysoká hospodárnost při menších sériích, schopnost obrábět materiály s různými mechanickými vlastnostmi a možnost obrábění v jinak nepřístupných místech.[28]

Mezi nevýhody patří tepelné ovlivnění materiálu, které je výraznější než u elektroerozivního, avšak ne tak výrazně jako například u plazmy. Laser také zpravidla nedosahuje stejně kvalitního povrchu jako obrábění elektroerozivní, či obrábění ultrazvukem. [28]

Produktivita této metody závisí na jak na materiálu, tak na tloušťce obrobku. Tyto parametry přímo ovlivňují rychlost řezání. [28]



Obrázek 26: Závislost řezné rychlosti na tloušťce a druhu řezaného materiálu výkon laseru 1 500 W [28]

### 6.1.3. Porovnání s konvenčním řezáním

Konvenčními metodami řezání jsou myšleny metody které využívají pro obrábění materiálu primárně mechanické síly. Příkladem může být řezání na pile, rozbrušování či upichování.

Většina těchto metod je produktivnější, vyžadují výrazně nižší vstupní náklady, a jak údržba stroje, tak opatření nástrojů bývá zpravidla levnější. Další velkou výhodou je výrazně menší omezení z hlediska maximální tloušťky materiálu.

Nevýhodou oproti nekonvenčním metodám řezání je horší schopnost obrábět velmi tvrdé materiály a i přes vyšší rychlost úběru materiálu může řezání tvarově náročnějších součástí trvat výrazně déle.

Problémem je také nutnost působení výrazné mechanické síly, což komplikuje či přímo znemožňuje obrábění tenkostěnných obrobků a vyžaduje určitou minimální tloušťku využívaného nástroje.

	Ultrazvukové řezání	Rozbrušování diamantovým brusným kotoučem
Minimální šířka řezu [mm]	0,12	0,3
Rozměrová přesnost [mm]	±0,05	±0,1
Čas pro řezání jednoho obrobku [min]	0,8 - 1	15-20

Tabulka 5: Porovnání parametrů konvenčního obrábění a obrábění ultrazvukem při řezání mikroprvků z turmalínu [3]



#### 6.1.4. Porovnání s řezáním vodním paprskem

Tato metoda obrábění je založená na přivádění paprsku vody pod vysokým tlakem na povrch obrobku. Díky vysokému tlaku ve stroji dosahuje voda při vypuštění z trysky rychlosti přesahující rychlost zvuku, což jí umožňuje dělit materiál. Voda bývá natlakovaná na 500 až 6000 barů pomocí speciálního čerpadla. Při nárazu vody na povrch obrobku vzniká na malé ploše vysoký tlak, který narušuje a následně odebírá materiál. Pro měkčí materiály (například lamináty) se využívá čistá voda, zatímco při obrábění tvrdších materiálů vodní paprsek obsahuje i částice abraziva. [31,32]

Mezi výhody této metody patří možnost řezat značně tlusté obrobky bez tepelného ovlivnění materiálu s vysokou kvalitou povrchu a přesností. Zároveň se jedná o jednu z ekologičtějších metod dělení materiálu. [31,32]

I přes možnost řezání tlustých obrobků se s rostoucí tloušťkou materiálu zhoršuje kvalita povrchu. Nejnižší drsnost je zpravidla na straně kde paprsek vchází do materiálu a nejvyšší bývá na výstupní straně. S tloušťkou taktéž klesá rozměrová přesnost, která může u velmi tlustých obrobků při tvorbě rádiusů dosahovat až 1 mm. [33]

	Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rozměrová přesnost [mm]
Řezání ultrazvukem	0,4 – 1,6	$\pm 0,02 - 0,1$
Elektroerozivní řezání	0,15 - 0,3	$\pm 0,01 - 0,02$
Řezání laserem	3,2 – 6,3	$\pm 0,05 - 0,2$
Konvenční řezání	0,1 - 3,2	$\pm 0,1 - 0,3$
Řezání vodním paprskem	2 – 6,3	$\pm 0,01-0,02$

Tabulka 6: Srovnání metod řezání dle dosažitelných parametrů [3,28,29,30,31,32,33]

#### 6.2. Hloubení válcových otvorů

Při hloubení válcových otvorů pomocí ultrazvuku se využívá tvarového nástroje, který kmitá v obráběcí suspenzi. Zde je nutné rozlišit hloubení průchozích a neprůchozích otvorů. Při hloubení průchozích otvorů je možné použít u větších průměrů otvorů nástroj ve tvaru trubky, který musí obrobit pouze konturu. To částečně kompenzuje nízkou produktivitu procesu, protože není nutné odebírat všechny materiál obráběním. V případě neprůchozích otvorů tuto možnost nemáme. [3]

Tato metoda se využívá pouze pro obrobky o maximální tloušťce maximálně 10 mm. Díky tomu, že obrábíme směrem dolů v ose Z, vrchní části otvorů mají delší kontakt s brusnou emulzí. To vede ke kuželovitosti otvorů.

Tato metoda hloubení nachází využití díky schopnosti ultrazvukového obrábění obrábět tvrdé a křehké materiály, jako například sklo. Příkladem konkrétního využití je vrtání otvorů do stupnic měřících přístrojů. V případě hloubení velkého množství velmi malých otvorů je možné dosáhnout obráběním pomocí ultrazvuku výrazně vyšší produktivity oproti ostatním metodám. Pomocí specializovaného nástroje je možné vytvořit velké množství otvorů současně. [3,4]

V případě hloubení válcových otvorů budu s obráběním ultrazvukem porovnávat následující metody:

- Elektroerozivní hloubení válcových otvorů
- Konvenční obrábění
- Vrtání laserem

#### 6.2.1. Porovnání s elektroerozivní hloubení válcových otvorů

Při elektroerozivním hloubení využíváme jako nástroj grafitovou elektrodu ve tvaru válce, která provádí přímočarý vratný pohyb v ose zamýšlené díry. Tato kinematika je při hloubení nutná kvůli obměně dielektrika, které by se jinak příliš znečistilo odebraným materiálem. Při určování průměru využití elektrody je potřeba vzít v úvahu velikost pracovní mezery a tloušťku narušeného povrchu. Po elektroerozivní hloubení je často nutná následující dokončovací operace, protože po jednotlivých výbojích zůstávají na povrchu krátery, které vedou k vysoké drsnosti Ra. [3,29]

Tato technologie se využívá pro vodivé materiály, které je jinak velmi obtížné obrobit pomocí konvenčních metod obrábění, například v letectví. Pomocí této technologie je možné vytvářet otvory už od průměru 0,02 mm. K tomu je nutné využít speciální stroje, které generují elektrické pulzy o malé energii, které se jinak využívají pro elektroerozivní leštění. [29]

#### 6.2.2. Porovnání s konvenčním obráběním

Nejběžnější způsoby obrábění pro výrobu válcových děr a kapes do materiálu je vrtání či frézování. Nevýhoda těchto technologií oproti ostatním zde zmíněným je vyvíjení relativně velkých mechanických sil na obrobek. Díky tomu se nejmenší díry zpravidla obrábí jinými způsoby, protože obrábění kovových materiálů je s malými nástroji velice obtížné. Další nevýhodou konkrétně vůči obrábění ultrazvukem je schopnost vytvářet pouze jeden otvor naráz.

Výhodou je malá vstupní investice, možnost obrábět s minimálním teplotním ovlivněním materiálu, snazší dostupnost nástrojů i servisu a výrazně vyšší produktivita.

### 6.2.3. Porovnání s vrtáním laserem

Při vrtání otvorů laserem se materiál odstraňuje formou odpařování. Aby bylo možné dosáhnout odpaření materiálu, je potřebná vysoká intenzita paprsku, a proto se pro vrtání zpravidla využívají pulsní lasery. Při vrtání laserem platí, že čím je kratší pulz, tím kvalitnější je vytvořená díra. Vzhledem k velmi malé tloušťce dopadajícího paprsku se během výroby díry hlava stroje musí pohybovat rovnoběžně s materiálem i pro vrtání relativně malých děr (průměr 0,8mm). [28]

Výhodou této metody je možnost vytvářet díry o minimálním průměru 0,025 mm do většiny materiálů. Také neodchází k opotřebení nástroje. [28]

Nevýhodou laserového vrtání je, že čím je díra hlubší, tím více klesá její přesnost z důvodu rozptýlení energie do materiálu. Na vnitřní straně díry také zpravidla zůstává vrstva nataveného materiálu, která může být až 0,1 mm silná. Díky tomu je často nutné následovat vrtání dokončovací operací, například AFM. [28,30]

	Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rozměrová přesnost [mm]
Hloubení ultrazvukem	0,4 – 1,6	$\pm 0,01 - 0,2$
Hloubení elektrodou	2 - 6	$\pm 0,01 - 0,02$
Konvenční vrtání	3,2 – 12,5	$\pm 0,011 - 0,5$
Vrtání laserem	0,1-1,6	$\pm 0,01 - 0,3$

Tabulka 7: Srovnání metod hloubení a vrtání dle dosažitelných parametrů [3,4,28,29,30]

### 6.3. Hloubení tvarově složitých otvorů

Jedno z nejběžnějších využití ultrazvukového obrábění je tvorba tvarově složitých dutin pomocí nástroje ve tvaru protikusu k výrobku. Samotný proces obrábění probíhá velmi podobně jako hloubení válcových otvorů, avšak tvarová složitost obráběných tvarů často znemožňuje využití některých hybridních způsobů obrábění. Dalším rozdílem je nutnost více kontrolovat nástroj, protože na rozdíl od tvarově pravidelného nástroje při hloubení válcových děr se nástroj při této aplikaci opotřebovává nerovnoměrně.

Příkladem aplikace může být výroba grafitové elektrody pro elektroerozivní obrábění.

V případě hloubení tvarově složitých otvorů budu s obráběním ultrazvukem porovnávat následující metody:

- Elektroerozivní hloubení
- Konvenční obrábění

#### 6.3.1. Porovnání s elektroerozivním hloubením tvarově složitých otvorů

Podobně jako u obrábění ultrazvukem je hloubení tvarově složitých otvorů jedna z primárních aplikací této metody. Při obrábění vznikají mezi materiálem a nástrojem elektrické oblouky, které svou energií odstraňují malé části materiálu. Nástroj je v tomto případě také ve tvaru protikusu vůči finálnímu tvaru obrobku. Metoda vyžaduje hlavně elektrickou vodivost obrobku, a proto je možné obrábět veškeré kovy. [3]

Při běžném hloubení elektrodou vzniká plocha o vysoké drsnosti Ra. To je pro většinu využití nepřijatelné, protože časté využití elektroerozivního obrábění je výroba forem a zápustek, které zpravidla vyžadují kvalitní povrch. Proto často následuje po elektroerozivním obrábění dokončovací operace.

Pro tvarově složitější obrobky je velmi dobrou metodou elektroerozivní leštění. Pro využití této metody je potřeba speciální stroj, který vyvolává kratší a slabší pulzy než je zvykem pro běžné obrábění. Po této metodě sice stále zůstávají krátery na povrchu materiálu, ale jsou výrazně plošší, a symetričtější, což umožňuje dosažení drsnosti až Ra 0,2  $\mu\text{m}$ . [3,34]

#### 6.3.2. Porovnání s konvenčními metodami obrábění

Pro výrobu tvarově složitých otvorů je nejběžnější metodou obrábění frézování. Jedná se o dostupnější a levnější metodu obrábění s vyšší rychlostí úběru materiálu. I přes to je však v mnoha aplikacích méně produktivní, či dokonce nepoužitelné. Obrobitelnost velmi tvrdých materiálů pomocí konvenčních metod je často relativně nízká a značné mechanické síly komplikují výrobu tenkostěnných obrobků, zejména z křehkých materiálů.

Tato technologie je primárně nahrazena při produkci malých, tvarově složitých součástí. Malá velikost jednotlivých obráběných prvků vyžaduje drobné nástroje, které limitují rychlost obrábění kvůli své omezené mechanické odolnosti. V případě takových obrobků mohou být obě výše zmíněné metody výrazně produktivnější. Samotné frézování na rozdíl od obrábění ultrazvukem zpravidla dosahuje relativně velkých drsností, což v případě náročnějšího využití taktéž vyžaduje následující dokončovací proces.

## 7. Závěr

Tato práce byla rozdělena na dvě hlavní části, z nichž se každá zabývala jedním typem nekonvenčního obrábění. V úvodu každé kapitoly jsem stručně popsal historii metody a následně jsem každou z nich detailněji charakterizoval. Zahrnul jsem parametry podstatné pro jednotlivé metody, jejich výhody a limitace a oblasti vhodné pro jejich využití. Na závěr jsem obě metody porovnal s konkurenčními metodami.

Nejdříve jsem se věnoval obrábění proudem abraziva. Tato metoda pro dokončování vnitřních děr a odjehlení hran je unikátní svou schopností obrábět téměř libovolně tvarově složité otvory. Díky této vlastnosti a schopnosti dosahovat extrémně dobré drsnosti povrchu tato metoda nachází mnohá uplatnění. Hlavní nevýhodou obrábění proudem abraziva je jeho nízká produktivita. Snaha využít jedinečné pozitivní vlastnosti tohoto způsobu opracovávání ústí ve výzkumy pro testování nových médií a vývoj hybridních technologií. Díky těmto výzkumům je tato metoda perspektivní i do budoucna.

Metodu jsem porovnal s konkurenčními způsoby obrábění, a je zřejmé, že obrábění proudem abraziva je schopné z hlediska výsledků konkurovat ostatním metodám obrábění nebo je i předčit. Hlavním důvodem k využití jiných technologií je kombinace nižších nákladů a vyšší produktivity.

Další zpracovanou kapitolou bylo obrábění ultrazvukem. Tato metoda nachází využití při obrábění velmi tvrdých a křehkých materiálů, jako je například sklo, rubín či grafit. Aplikace metody je vhodná také v situacích, kdy je nutné účinné a zároveň úhledné dělení měkkých materiálů, například potravin. Velkou výhodou je absence působení velkých mechanických sil, teplotních rázů a chemického ovlivnění obrobků. Obrábění ultrazvukem je využíváno primárně pro řezání, hloubení a čištění.

Ostatní technologie, se kterými jsem obrábění ultrazvukem porovnával, buď nedosahovaly stejně vysoké kvality povrchu, nebo po sobě zanechávaly tepelně ovlivněnou oblast. Hlavní limitací obrábění ultrazvukem oproti konkurenčním metodám je maximální tloušťka řezaného či hloubeného obrobku, která zpravidla nepřesahuje 10 mm

Další velmi perspektivní a aktivně zkoumanou aplikací je podpora jiných metod obrábění pomocí ultrazvuku. V takovém případě se zpravidla zlepšuje drsnost povrchu a snižuje se potřebná obráběcí síla, což často vede k významně delší životnosti nástrojů. Přidání ultrazvukových kmitů do obráběcího procesu naneštěstí vyžaduje speciální stroje, které jsou velmi drahé, a proto tato aplikace ultrazvuku zatím nenachází běžně uplatnění. Potenciální výhody jsou však natolik významné, že neustále probíhají výzkumy pro zahrnutí tohoto aspektu do konvenčních i nekonvenčních metod obrábění.

## 8. Seznam citací:

- [1] LUCAS, Adam. Wind, Water, Work: Ancient and Medieval Milling Technology. 2nd ed. Boston: BRILL, 2006. ISBN 9004205934.
- [2] HIND, Arthur. A History of Engraving and Etching. 3rd ed. New York: Dover Publications, 1963. ISBN 0486209547.
- [3] BARCAL, Jaroslav a České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. Nekonvenční metody obrábění. 1. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1989
- [4] Nekonvenční metody obrábění-3. díl: Obrábění ultrazvukem. Průmyslové spektrum [online]. 2007, 18.12.2007 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-3-dil>
- [5] Du, & Zhang, Yiyi. (2019). Effect of Heat Treatment on the Cavitation Erosion Performance of WC–12Co Coatings. Coatings. 9. 690. 10.3390/coatings9100690. [https://www.researchgate.net/publication/336754321\\_Effect\\_of\\_Heat\\_Treatment\\_on\\_the\\_Cavitation\\_Erosion\\_Performance\\_of\\_WC-12Co\\_Coatings](https://www.researchgate.net/publication/336754321_Effect_of_Heat_Treatment_on_the_Cavitation_Erosion_Performance_of_WC-12Co_Coatings)
- [6] Magnetostrictive Versus Piezoelectric Transducers For Power Ultrasonic Applications. Cleaning Technologies Group [online]. Cincinnati [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.ctgclean.com/magnetostrictive-versus-piezoelectric-transducers-for-power-ultrasonic-applications>
- [7] Obrábění ultrazvukem. ELUC [online]. 2016 [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1418>
- [8] THOE, T. B., D. K. ASPINWALL a M. L. H. WISE. Review on ultrasonic machining. Science Direct [online]. 1998 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695597000369?casa\\_token=50\\_G0M5fkgEAAAAA:9QtS2Q4Z0cnM\\_7OBhgKquxfIFcjEWFhtGVblbmFe\\_-ceUJJ7CcIH\\_6-PD--FTLxR0CM31YtiL2cU](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695597000369?casa_token=50_G0M5fkgEAAAAA:9QtS2Q4Z0cnM_7OBhgKquxfIFcjEWFhtGVblbmFe_-ceUJJ7CcIH_6-PD--FTLxR0CM31YtiL2cU)
- [9] GUZZO, Pedro L., Armando H. SHINOHARA a A. A. RASLAN. A Comparative Study on Ultrasonic Machining of Hard and Brittle Materials. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering [online]. 2004, 56 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/26375755\\_A\\_Comparative\\_Study\\_on\\_Ultrasonic\\_Machining\\_of\\_Hard\\_and\\_Brittle\\_Materials](https://www.researchgate.net/publication/26375755_A_Comparative_Study_on_Ultrasonic_Machining_of_Hard_and_Brittle_Materials)

- [10] HAHRAMANI, Mohsen, Mohammad R. MOVAHHEDY a Javad AKBARI. Ultrasonic-Assisted Grinding of Ti6Al4V Alloy [online]. Tehran, 2012 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z:  
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2212827112000649?token=A801802D9103FBA967BB17731FF6730D7EFE8C6115DF2D13E857A571DE7C469C41BDA3804B33CBAF9EDB8FC78186D461&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220403130708>. Sharif University of Technology. Vedoucí práce Konrad Wegener.
- [11] How Do Ultrasonic Cleaners Work? How to Identify Quality Differences in Ultrasonic Cleaners. Best Technology [online]. Minneapolis [cit. 2022-04-04]. Dostupné z:  
<https://www.besttechnologyinc.com/precision-cleaning-systems/how-do-ultrasonics-work/>
- [12] MA, Kai, Xijing ZHU, Xueliang CUI, et al. Experimental investigation on surface quality in ultrasonic-assisted honing of 304 stainless steel. Precision Engineering [online]. 2020, 2020(63), 148-158 [cit. 2022-04-04]. ISSN 0141-6359. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635919303198>
- [13] Measurements of surface texture parameters after ultrasonic assisted and conventional grinding of carbide and ceramic samples in selected machining conditions [online]. 2018. 2018 [cit. 2022-04-15]. ISSN 2212-8271. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118312083>
- [14] BARAIYA, Rajendra. Abrasive Flow Machining: An Area Seeking for Improvement. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering [online]. 2016, 03(03), 01-09 [cit. 2022-04-29]. ISSN 2320334X. Dostupné z:  
[doi:10.9790/1684-15010030301-09](https://doi.org/10.9790/1684-15010030301-09)
- [15] KRAJNIK, Peter a Fukuo HASHIMOTO. Finishing. THE INTERNATIONAL ACADEMY FOR PRODU, ed. CIRP Encyclopedia of Production Engineering [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, 2018-03-13, s. 1-9 [cit. 2022-04-29]. ISBN 978-3-642-35950-7. Dostupné z: [doi:10.1007/978-3-642-35950-7\\_16717-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16717-1)
- [16] Abrasive flow machining. Machinemfg [online]. [cit. 2022-04-29]. Dostupné z:  
<https://www.machinemfg.com/abrasive-flow-machining/>
- [17] A Review on Abrasive Flow Machining (AFM). Procedia Technology [online]. 2016, 2016, 1297-1304 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z:  
<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.224>.



- [18] Abrasive flow machining: a case study. RHOADES, Larry. Journal of Materials Processing Technology [online]. 1991, s. 107-116 [cit. 2022-06-05]. ISBN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0924013691902106>
- [19] KENDA, Jani, Franci PUŠAVEC a Janez KOPAC. Modeling and Energy Efficiency of Abrasive Flow Machining on Tooling Industry Case Study [online]. 2014 [cit. 2022-06-05]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114000043>
- [20] WANG, Tingting, De CHEN, Weihua ZHANG a Luling AN. Study on key parameters of a new abrasive flow machining (AFM) process for surface finishing [online]. 2019, 30.10. 2019 [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-018-2914-9.pdf>
- [21] Pusavec F, Kenda J. The transition to a clean, dry, and energy efficient polishing process: an innovative upgrade of abrasive flow machining for simultaneous generation of micro-geometry and polishing in the tooling industry. J Clean Prod 2014;76:180–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.071>
- [22] Ultrasonic rubber sheet cutting machine. In: Jiayuandate [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.jyultrasonicequipments.com/ultrasonic-cutting-equipments/ultrasonic-rubber-cutting/ultrasonic-rubber-sheet-cutting-machine.html>
- [23] Automatic ultrasonic food cutter. In: Jiayuandate [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.jyultrasonicequipments.com/ultrasonic-cutting-equipments/ultrasonic-food-cutting/automatic-ultrasonic-food-cutter.html>
- [24] DIXIT, Nitin, Varun SHARMA a Pradeep KUMAR. Research trends in abrasive flow machining: A systematic review [online]. 2021. [cit. 2022-07-06]. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612521001754>
- [25] ALI, Parvesh, Sachin DHULL, R.S. WALIA, Q. MURTAZA a Mohit TYAGI. Hybrid Abrasive Flow Machining for Nano Finishing - A Review [online]. 2014. 2017 [cit. 2022-07-06]. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317313366>
- [26] WANG, Xinchang, Baocai ZHANG, Yu QIAO a Fanghong SUN. Chemo-mechanical abrasive flow machining (CM-AFM): A novel high-efficient technique for polishing diamond thin coatings on inner hole surfaces [online]. 2021. 2021 [cit. 2022-07-08]. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612521005338>

- [27] KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonenční metody obrábění: Elektrochemické obrábění. Průmyslové spektrum [online]. Praha, 2007 [cit. 2022-07-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2>
- [28] KEREČANINOVÁ, Zuzana a Jaroslav ŘASA. Nekonenční metody obrábění - 5. díl: Řezání laserem. Průmyslové spektrum [online]. 2008, 12.5.2008 [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil>
- [29] POSLUŠNÝ, Petr. Elektroerozivní obrábění. Průmyslové spektrum [online]. 2006, 17.7.2006 [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-obrabeni>
- [30] AUTOR, NEUVEDEN. Obrábění laserem: Řezání laserem. Elektronická učebnice [online]. 2008 [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1423>
- [31] BOUDA, Luděk. Řezání vodním paprskem. Průmyslové spektrum [online]. 2008, 9.7.2008 [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem>
- [32] Srovnání řezání. Flow: Shape technologies group [online]. 2021 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Srovnavaci-Rezani.aspx#waterjet>
- [33] Obrábění kapalinovým paprskem. Elektronická učebnice [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1425>
- [34] EL-HOFY, Hassan Abdel-Gawad. Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. ISBN 978-1-4665-7702-2.
- [35] Honování. Elektronická učebnice [online]. [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1384>
- [36] Postupy při honování a vhodná brusiva. Techcentrum [online]. [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.prodejbrusiva.cz/postupy-pri-honovani-a-vhodna-brusiva-techcentrum>
- [37] Leštění. Elektronická učebnice [online]. [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1387>
- [38] Kim J-D, Kim K-D. Deburring of burrs in spring collets by abrasive flow machining. Int J Adv Manuf Technol 2004;24:469–73. <https://doi.org/10.1007/s00170-002-1536-3>.

- [39] PROKOP, Jiří. Termické odhroťování. Průmyslové spektrum [online]. 2011, 13.4.2011 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z:  
<https://www.mmspektrum.com/clanek/termicke-odhrotovani-2>
- [40] HAGENLOCHER, Oliver. Přesné odhroťování dílů. Průmyslové spektrum [online]. 2012, 11.4.2012 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z:  
<https://www.mmspektrum.com/clanek/presne-odhrotovani-dilu>
- [41] KUČERA, Martin. Přesné odhroťování dílů: Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů. Technický deník [online]. 2006, 1.1.2006 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/omilani-jako-univerzalni-metoda-pro-upravu-povrchu\\_12622.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/omilani-jako-univerzalni-metoda-pro-upravu-povrchu_12622.html)
- [42] International Journal of Machine Tools and Manufacture: Evolution of electrochemical finishing processes through cross innovations and modeling [online]. 2013. 2013 [cit. 2022-07-21]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.11.005>

## 9. Seznam obrázků

Obrázek 1: Princip obrábění proudem brusiva [15] .....	5
Obrázek 2: Mechanismus pro jednocestné obrábění proudem brusiva [14] .....	5
Obrázek 3: Princip dvoucestného obrábění proudem brusiva [16] .....	6
Obrázek 4: Princip orbitálního obrábění [17].....	6
Obrázek 5: Schéma stroje pro obrábění proudem brusiva [14].....	7
Obrázek 6: Přípravek pro složitější obrobek [18] .....	8
Obrázek 8 : Porovnání tlaku a rychlosti média mezi AFM a AFMmm [19] .....	10
Obrázek 7: Nástroj pro obrábění AFMmm [19] .....	10
Obrázek 9: Dokončování povrchu stěny metodou AFM tool bar [20] .....	12
Obrázek 10: Princip AFM tool bar [20].....	12
Obrázek 11: Konstrukce stroje pro CM-AFM [26] .....	13
Obrázek 12: Výsledky testování CM-AFM oproti AFM [26] .....	14
Obrázek 13: Obrábění dvanácti trysek pro vstřikování paliva naráz [18] .....	15
Obrázek 14: Výsledky aplikace AFM při výrobě lékařských implantátů [24] .....	17
Obrázek 15: Výsledky experimentu AFM odjehlení pružinové kleštiny [38] .....	21
Obrázek 16: Princip kavitační eroze [5].....	26
Obrázek 17: Princip metody obrábění ultrazvukem [3].....	26
Obrázek 18: Modelový příklad procesu obrábění [4] .....	27
Obrázek 19: Konstrukce obráběcího zařízení [4] .....	27
Obrázek 20: Součást turbíny vytvořená ultrazvukovým obráběním [8] .....	31
Obrázek 21: Dosahované drsnosti UZ obráběním [3] .....	33
Obrázek 22: CNC stroj na řezání jídla [23].....	34
Obrázek 23: Ruční stroj na řezání pryže [22] .....	34
Obrázek 25: Závislost hodnot obrábění UAB a KB v závislosti na množství chladicí kapaliny [10] .....	35
Obrázek 24: Možnosti ultrazvukových vibrací při broušení [13] .....	35
Obrázek 26: Závislost řezné rychlosti na tloušťce a druhu řezaného materiálu výkon laseru 1 500 W [28].....	39

## 10. Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [3] .....	3
Tabulka 2: Zhodnocení produktivity obráběcích kapalin [3].....	29
Tabulka 3: Typy materiálů pro obrábění [3].....	30
Tabulka 4: Poměrná obrobiteľnosť různých materiálů [3] .....	33
Tabulka 5: Porovnání parametrů konvenčního obrábění a obrábění ultrazvukem při řezání mikroprvků z turmalínu [3].....	39
Tabulka 6: Srovnání metod řezání dle dosažitelných parametrů [3,28,29,30,31,32,33].....	40
Tabulka 7: Srovnání metod hloubení a vrtání dle dosažitelných parametrů [3,4,28,29,30] ...	42

## 11. Symboly a zkratky

AFM	Abrasive flow machining	Obrábění proudem brusiva
HMP	Hybrid machining processes	Hybridní procesy obrábění
UZ	-	Ultrazvukovým
UAB broušení	-	Ultrazvukem asistované
KB	-	Konvenční broušení
NC	Numerical controled	Číslicově řízené
CNC	Computer numerical controled	Počítačem číslicově řízené
FEPA výrobců brusiva	Federation of European producers of abrasives	Federace evropských
AFMmm abraziva s pohyblivým trnem	Abrasive flow machining with movable mandrel	Obrábění proudem
MAAFM obrábění proudem abraziva	Magnet assisted abrasive flow machining	Magneticky podporované
UAAFAM obrábění proudem brusiva	Ultrasonic assisted abtrasive flow machining	Ultrazvukem podporované
CM-AFM obrábění proudem brusiva	Chemo machanical abrasive flow machining	Chemicko mechanické
NCD	Nanocrystalline Diamond	Nanokrystalický diamant
MCD	Microcrystalline Diamond	Mikrokrystalický diamant