

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Dokončování povrchu žárových nástřiků

Studijní program: Výrobní inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pelikán

Praha 2021

Bc. Kostková Monika

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kostková** Jméno: **Monika** Osobní číslo: **465381**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Dokončování povrchu žárových nástřiků**

Název diplomové práce anglicky:

**Finishing of the thermal sprayed surfaces**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Žárové nástřiky, jejich vlastnosti a využití
- 2) Technologie flexibilního broušení a leštění tvrdých povrchů
- 3) Návrh technologie dokončování žárových nástřiků
- 4) Testování a vyhodnocení dokončovacích metod žárových nástřiků

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Lukáš Pelikán, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Lukáš Pelikán  
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

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze 25.7.2021

Podpis.....

Poděkování

Ráda bych poděkovala mému vedoucímu Ing. Lukáši Pelikánovi za věnovaný čas, cenné připomínky a rady.

## Abstrakt

Tato diplomová práce popisuje nejběžnější druhy žárových nástřiků, jejich využití a vlastnosti. Po nanesení nástřiku jsou některé hodnoty nedostačující a povrch je třeba dále dokončovat. Část práce je proto věnovaná brusným materiálům, nástrojům a strojům, kterými lze pomocí flexibilního broušení dosahovat požadovaných parametrů. Dále jsou shrnuty i další metody, kterými lze žárové nástřiky dokončovat. Praktická část je zaměřena na testování tří zvolených způsobů broušení těchto nástřiků, a to broušení pomocí diamantového fibrového kotouče, broušení diamantovým a keramickým brusným pásem a broušení kotoučem z netkané textilie. Cílem práce je seznámit čtenáře s danou problematikou a otestovat vybrané metody dokončování žárových nástřiků pro další vývoj a optimalizaci.

Klíčová slova: žárové nástřiky, dokončování, flexibilní broušení

## Abstract

This diploma thesis describes the most common types of thermal spraying, their use and properties. After spraying, some values are insufficient and the surface needs to be further finished. Part of the work is therefore devoted to abrasives, tools and machines, which can be used to achieve the required parameters through flexible grinding. Other methods suitable for finishing thermal sprayed surfaces are also summarized. The practical part is focused on testing of three selected methods of grinding sprayed surfaces, namely grinding with a diamond fiber wheel, grinding with a diamond and ceramic sanding belt and grinding with a non-woven wheel. The aim of the work is to acquaint the reader with the given issue and to test selected methods of finishing thermal sprayed surfaces for further development and optimization.

Key words: Thermal spraying, finishing, flexible grinding



## Obsah

1	Úvod.....	1
2	Žárové nástřiky.....	2
2.1	Princip vytváření žárových nástřiků .....	2
2.2	Vlastnosti žárových nástřiků.....	4
2.3	Druhy žárových nástřiků.....	4
2.3.1	High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) nástřiky.....	5
2.3.2	Plazmové nástřiky .....	6
2.3.3	Nástřik elektrickým obloukem .....	6
2.3.4	Nástřik plamenem.....	7
2.3.5	Nástřik detonační vlnou.....	8
2.4	Využití žárových nástřiků.....	9
3	Technologie flexibilního broušení a leštění tvrdých povlaků .....	11
3.1	Broušení a leštění.....	11
3.1.1	Proces broušení.....	12
3.1.2	Způsoby broušení .....	12
3.1.3	Brusná zrna .....	15
3.2	Flexibilní broušení a leštění tvrdých povlaků.....	16
3.2.1	Brusné materiály vhodné pro tvrdé povlaky.....	16
3.2.2	Brusné nástroje pro flexibilní broušení a leštění .....	17
3.2.3	Brusné stroje pro flexibilní broušení a leštění.....	23
4	Návrh technologie dokončování žárových nástřiků.....	30
4.1	Broušení a leštění.....	31
4.2	Soustružení a frézování.....	32
4.3	Válečkování .....	32



**DIPLOMOVÁ PRÁCE                      Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

4.4	Shape Adaptive Grinding (SAG).....	33
4.5	Laser.....	34
5	Testování a vyhodnocení dokončovacích metod žárových nástřiků.....	35
5.1	Materiál nástřiku.....	35
5.2	Měřicí přístroj a měřené veličiny.....	37
5.3	Dokončování rovinné plochy pomocí fibrového kotouče.....	38
5.3.1	Popis měření.....	38
5.3.2	Zkušební broušení.....	40
5.3.3	Závislost šířky úběru na tlaku nástroje.....	40
5.3.4	Závislost drsnosti na posuvu.....	42
5.3.5	Závislost drsnosti na otáčkách.....	44
5.3.6	Srovnání nesousledného a sousledného broušení.....	45
5.3.7	Vyhodnocení.....	47
5.4	Dokončování rotační součásti pomocí brusného pásu.....	48
5.4.1	Popis měření.....	48
5.4.2	Broušení č. 1 pásem s diamantovým zrnem-trn č. 1.....	51
5.4.3	Broušení č. 2 pásem s diamantovým zrnem-trn č. 1.....	52
5.4.4	Broušení č. 3 pásem s diamantovým zrnem-trn č. 1.....	53
5.4.5	Broušení č. 4 pásem s keramickým zrnem-trn č. 1.....	54
5.4.6	Broušení č. 5 pásem s keramickým zrnem-trn č. 1.....	55
5.4.7	Broušení č. 1 pásem s keramickým zrnem-trn č. 2.....	55
5.4.8	Broušení č. 2 pásem s keramickým zrnem-trn č. 2.....	56
5.4.9	Vyhodnocení.....	56
5.5	Dokončování rovinné plochy pomocí netkaného kotouče.....	59
5.5.1	Popis měření.....	59



**DIPLOMOVÁ PRÁCE                      Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

5.5.2	Vzorek č. 1 – broušení zápichem.....	60
5.5.3	Vzorek č. 2.....	61
5.5.4	Vzorek č. 2 – změna příčného posuvu.....	63
5.5.5	Vzorek č. 3.....	64
5.5.6	Vzorek č. 4.....	65
5.5.7	Vzorek č. 5.....	66
5.5.8	Vzorek č. 6.....	67
5.5.9	Vyhodnocení.....	68
5.6	Diskuse výsledků .....	70
6	Závěr.....	72
7	Citovaná literatura .....	74
8	Seznam obrázků .....	80
9	Seznam tabulek .....	82





## 1 Úvod

Životnost průmyslových strojů a nástrojů je omezena hlavně mechanickými opotřebeními a chemickou korozí. Zvyšující se poptávka po vysoké produktivitě, efektivitě a kvalitě s sebou nese také větší namáhání nástrojů a strojních součástí. Žárový nástřík je jednou z neúčinnějších metod ochrany dílů před opotřebeními, vysokoteplotní korozí, zbytkovým napětím a erozí. Současně zajišťuje tvrdé a husté povlaky, kterými lze zvyšovat životnost součástí. [1] Žárové nástříky lze použít v určitých aplikacích jako vhodnou alternativu k tvrdému chromování, které je škodlivé pro životní prostředí, kvůli chemickým roztokům přítomným u procesu. Další uplatnění je pro opravu komponentů, jelikož žárový nástřík lze nanášet v tlustých vrstvách. [2]

Po nanesení žárového nástříku na součást jsou některé vlastnosti povlaku nedostatečné a povrch je třeba dodatečně upravovat, aby splňoval funkční požadavky. Dokončování těchto nástříků je však problémové a v současné době neexistuje žádný jednotný postup, jelikož společnosti zabývající se tímto tématem si pečlivě chrání své know-how. S tím souvisí i omezené možnosti výrobců nástrojů, kteří nenabízí optimální, testované nástroje. Rostoucí nároky na funkční součásti s žárovým nástříkem, ať už z hlediska minimalizování nákladů, nebo z hlediska zvyšování produktivity opracování jsou důvodem, proč je nutné se touto oblastí zabývat a dále ji rozvíjet.

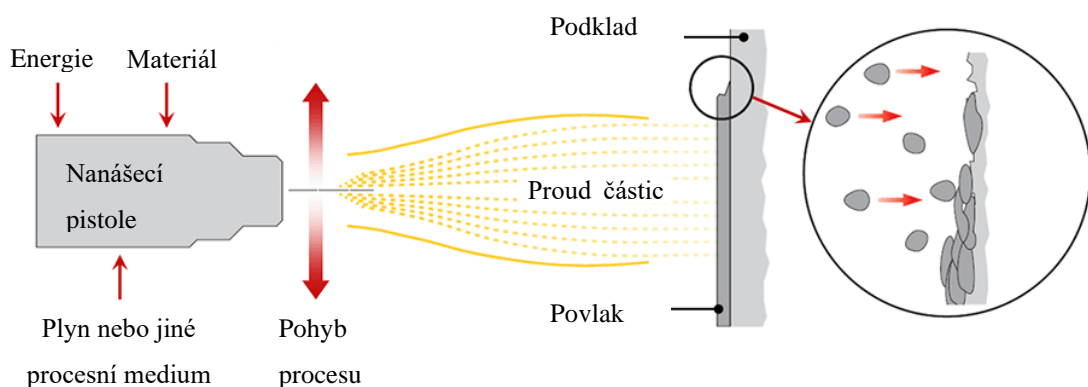
Zatím bylo sepsáno pouze malé množství studií zabývajících se touto problematikou. Proto si tato práce klade za cíl otestovat a porovnat tři možné způsoby dokončování těchto nástříků, kterými lze dosahovat požadované kvality povrchu. V této práci bude nejdříve provedena rešerše používaných metod nanášení žárových nástříků a jejich vlastností. Jedním ze způsobů, kterými lze dokončovat povrchy těchto nástříků je flexibilní broušení. Z toho důvodu bude část práce zaměřena na samotný proces broušení a leštění, vhodné stroje a nástroje. V další části budou sepsány i některé jiné metody, kterými lze dokončovat tyto nástříky. Hlavní část bude věnována testování tří zvolených metod flexibilního broušení žárových nástříků, v závislosti na proměnných parametrech. Výsledky provedených experimentů a jejich srovnání mohou v budoucnu sloužit pro další rozvoj v oblasti návrhu dokončování žárových nástříků.

## 2 Žárové nástřiky

Povrchové úpravy jsou ekonomický způsob výroby materiálů, nástrojů a součástí strojů, které vyžadují povrchové vlastnosti, jako jsou koroze, eroze a odolnost proti opotřebení, přičemž k dosažení požadovaných vlastností se používají různé povlaky. Žárový nástřik je jedena z neúčinnějších metod pro zvyšování životnosti materiálu. [3] V minulosti spadaly žárové nástřiky do skupiny technologií umožňujících přípravu funkčních povlaků o tloušťkách od 50 až do 1 200  $\mu\text{m}$  přednostně při opravě zmetkových nebo opotřebovaných součástí z provozu s cílem doplnění požadovaného rozměru a prodloužení životnosti. S rychlým rozvojem přesné strojírenské výroby využívající CNC stroje a technologii 3D tisku je tento trend spíše na ústupu a jsou identifikovány nové směry pro využití tohoto typu technologie již v prvovýrobě. [4]

### 2.1 Princip vytváření žárových nástřiků

Žárové nástřiky jsou obecným termínem pro skupinu procesů, při nichž se používají kovové, keramické, cermetové a některé polymerní materiály ve formě prášku, drátu, nebo tyče. Ty jsou přiváděny k hořáku nebo pistoli, kterými jsou zahřáté blízko, nebo těsně nad jejich teplotu tání. Roztavené nebo téměř roztavené kapičky materiálu jsou urychlovány v proudu plynu a nanášeny na povrch, který má být povlakován. Vlivem nárazu na chladný povrch se kapičky přemění na tenké lamelární částice, které ulpívají na povrchu, překrývají se, vzájemně do sebe zapadají a následně tuhnou, jak je znázorněno na obrázku níže (Obr. č. 1). [3]

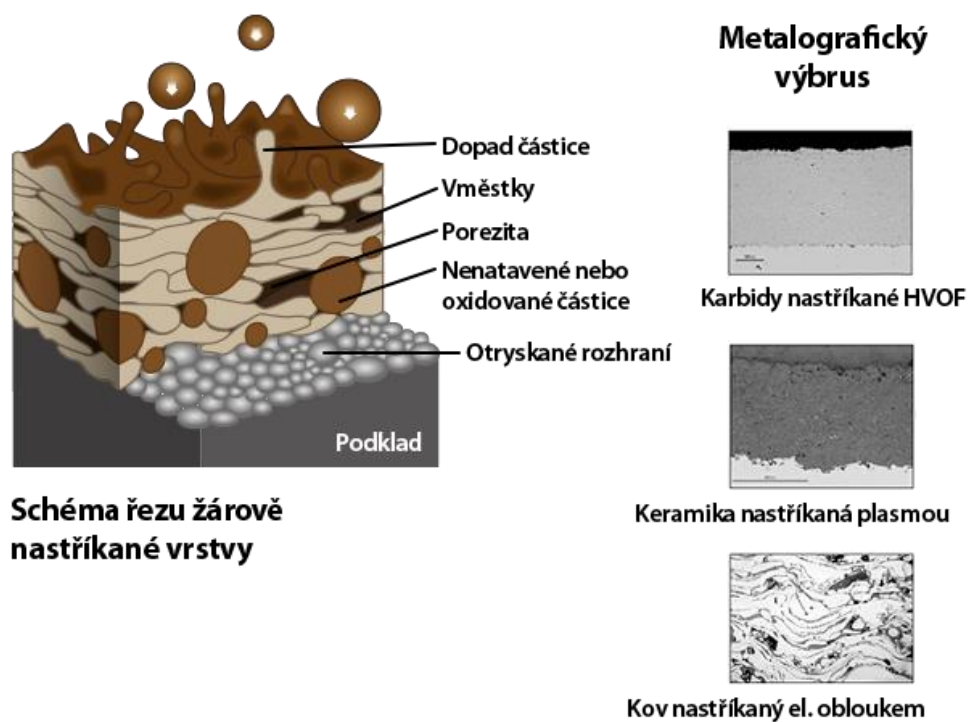


Obr. č. 1 Princip vytváření žárových nástřiků [5]

Roztavený, nebo téměř roztavený nástřikový materiál narážející na podklad vytváří povlak pomocí jednoho, nebo více z těchto možných vazebných mechanismů: [6]

- Mechanické spojování částic, které se vzájemně blokují na zdrsněném podkladu.
- Lokální difuze nástřiku se substrátem.
- Vazebný mechanismus pomocí Van der Waalsových sil.

Detailní pohled na proces je zobrazen na Obr. č. 2. V detailu je možno vidět kromě samotných roztavených částic také póry, vměstky a nenatavené nebo oxidované částice. Mikropóry a oxidované částice jsou částečně důvodem, proč mají některé kovové nástřikové vrstvy nízký koeficient tření a vysokou tvrdost. Mikroporézní nástřikové vrstvy také velmi dobře zadržují určitá maziva, čímž zabraňují opotřebení způsobenému kontaktem kov na kov. [5]



Obr. č. 2 Detail vrstvy žárového nástřiku [7]

## 2.2 Vlastnosti žárových nástřiků

Žárový nástřík může dosahovat tloušťky 20  $\mu\text{m}$  až několik milimetrů v závislosti na metodě a rychlosti posuvu. Celý proces je spojen s velmi malým vneseným teplem do podkladu a mechanickým propojením, působícím jako hlavní mechanismus adheze, který umožňuje povlakování téměř jakýchkoliv materiálů na jakýkoliv podklad. Kvalita povlaků se hodnotí na základě fázové stability, hustoty povlaku, přilnavosti, tvrdosti, houževnatosti, obsahu oxidů a drsnosti povrchu [3]. Fyzikální vlastnosti jako je pórovitost nebo hustota žárově stříkaných povlaků závisí na procesních parametrech jako je distribuce a velikost kapiček, rychlost, stupeň tuhnutí, materiál substrátu a teplota [6].

## 2.3 Druhy žárových nástřiků

Žárové nástříky lze rozdělit na pět nejběžnějších procesů, a to na High Velocity Oxy-Fuel (HVOF), plasmový nástřík, nástřík elektrickým obloukem, nástřík plamenem a nástřík detonační vlnou.

Zdroj energie používaný k ohřevu a tavení částic nanášeného povlaku může být spalování plynného paliva, elektrický oblouk i plazmový oblouk. Dále lze žárové nástříky rozdělit do dvou kategorií. tj. na nízkoenergetické a na vysokoenergetické procesy. Nízkoenergetické procesy jsou nástřík plamenem a obloukem, často označované jako pokovení a mezi vysokoenergetické procesy patří plazmové, detonační a HVOF nástříky. [6]

Nástříky lze nanášet ručně, poloautomaticky či roboticky, v závislosti na opakovatelnosti a přesnosti konečného produktu, kterého má být dosaženo [6]. Každá z těchto technologií má určité výhody, ale stejně tak omezení dané vstupním materiálem a dosažitelnými technologickými parametry [4].

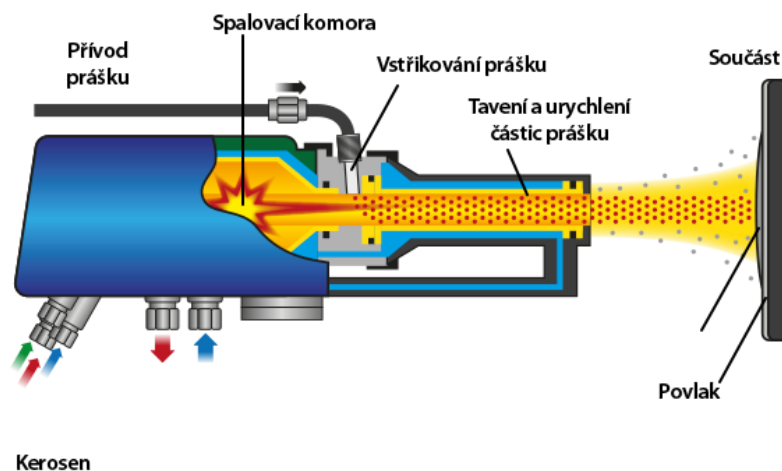


### 2.3.1 High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) nástřiky

Metoda nástřiku High Velocity Oxy-Fue (HVOF) se průmyslově začala využívat již na počátku 8. let 20. století. Od konvenčních nástřiků plamenem se metoda HVOF liší rapidně zvýšenou rychlostí spalin. Stejně tak jsou i práškové částice urychlovány na větší rychlost průměrně 650 m/s. Díky vysoké rychlosti je interakce mezi částicemi a horkým plynem krátká a přenos tepla je menší. Částice nejsou úplně roztavené, čímž se snižuje riziko oxidace, která může způsobovat snížení odolnosti proti korozi. [8] Tuto technologii blíže popisuje obrázek níže (Obr. č. 3).

Vysoká rychlost horkých pevných částic dopadajících na podklad umožňuje vytvářet povlaky s vysokou hustotou, výbornou adhezí k ocelovým podkladům, spolu s velkými kohézními silami. Nízké tepelné ovlivnění částic má za výsledek produkci tvrdokovových nástřiků s pouze malými změnami ve fázovém složení oproti původnímu prášku, a tudíž vynikající odolnost proti abrazi a rázům. Nárazy částic o vysoké rychlosti způsobují vznik zbytkových napětí v povrchu součásti, což je výhodné pro dynamicky zatěžované součásti. [8]

Mezi charakteristické vlastnosti HVOF nástřiků tedy patří zejména: vysoká hustota, silná přilnavost k podkladu, vysoká soudržnost, omezené reakce a fázové přeměny (oxidace, rozpouštění karbidů wolframu) a zbytková tlaková napětí. [8]



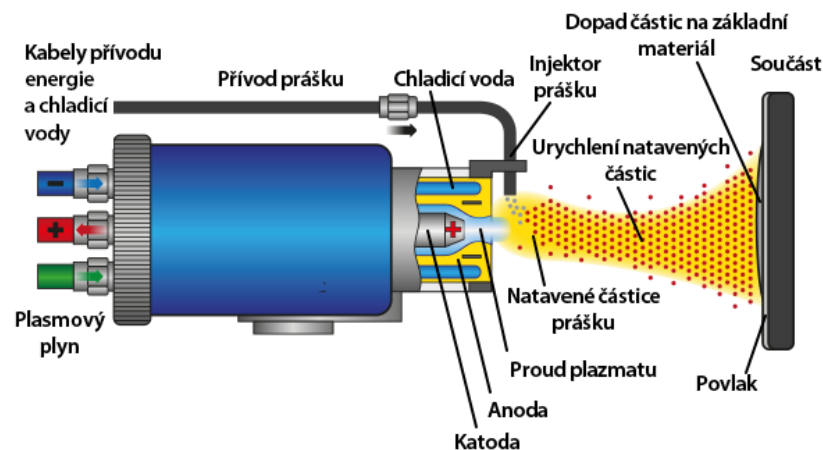
Obr. č. 3 Princip nanášení žárového nástřiku metodou HVOF [7]



### 2.3.2 Plazmové nástřiky

Jako tepelný zdroj k natavení nanášeného materiálu slouží tzv. nízkoteplotní nebo termické plazma, které lze získat dvěma způsoby. Pro stabilizování plazmového plamenu lze použít zařízení pro generování plazmatu (plazmové hořáky) s plynným nebo kapalným plazmotvorným médiem. [9] Proces je vidět na obrázku (Obr. č. 4).

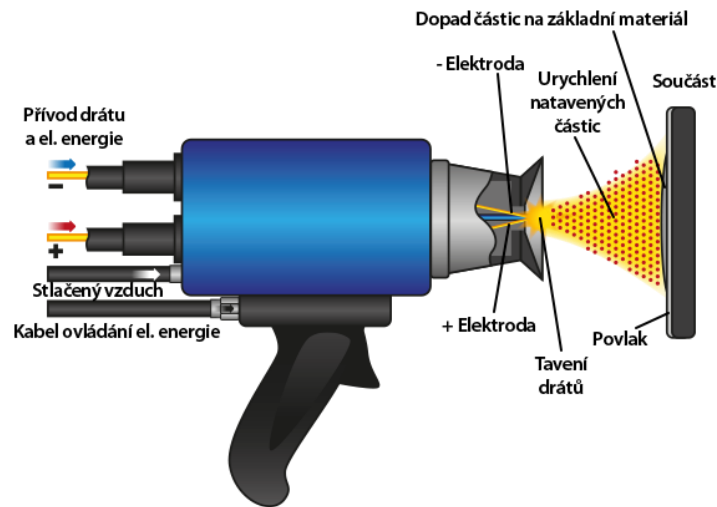
Plazmové nástřiky jsou jednou z nejuniverzálnějších metod žárových nástřiků, ve srovnání s ostatními metodami žárových nástřiků, přičemž vytváří spíše tlusté vrstvy s unikátními vlastnostmi. Značnou výhodou je i minimální teplotní vliv na povrch podkladu v poměru s bodem tání nanášených látek. Plazmové nástřiky umožňují výrobu funkčních a ochranných povlaků z různých kovových i keramických materiálů případně jejich kovo-keramických směsí, a to jak homogenních, tak funkčně gradovaných. [9]



*Obr. č. 4 Princip nanášení žárového nástřiku plazmou [7]*

### 2.3.3 Nástřik elektrickým obloukem

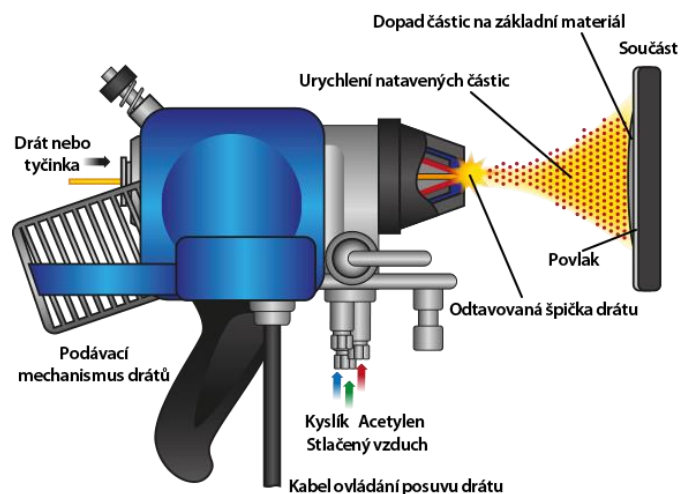
U procesu nanášení nástřiku elektrickým obloukem jsou dvě elektrody připojeny ke zdroji stejnosměrného proudu. Ty jsou dále přiváděny do nástřikové pistole kde se mezi nimi vytvoří oblouk, který taví špičky elektrod. Roztavený kov je poté atomizován a proudem vzduchu poháněn směrem k podkladu. Proces má velkou energetickou účinnost, protože veškerá vstupní energie je použita k roztavení kovu. Jelikož směrem na podklad není mířen žádný horký plyn, teploty podkladu mohou být velmi nízké. [10] Schéma procesu je na obrázku (Obr. č. 5).



Obr. č. 5 Princip nanášení žárového nástřiku elektrickým obloukem [7]

### 2.3.4 Nástřik plamenem

Jde o nejstarší technologii žárového nástřiku, vyvinutou již okolo roku 1910. Nástřik plamenem využívá energii spalování a spalin ke generování tepla. Nejběžněji používané hořáky jsou kyslíkacetylenové, kde je hlavním palivem acetylen v kombinaci s kyslíkem. Přídavný materiál je buď ve formě drátu, tyčinky nebo ve formě prášku. Materiál dále vstupuje do zapálené směsi plynů kyslík-acetylen, kyslík-propan-butan, nebo kyslík-propylen. Pomocí plynu je urychlen směrem k materiálu, který má být povlakovaný. [10] Technologie nanášení je na obrázku níže (Obr. č. 6).



Obr. č. 6 Princip nanášení žárového nástřiku plamenem [7]

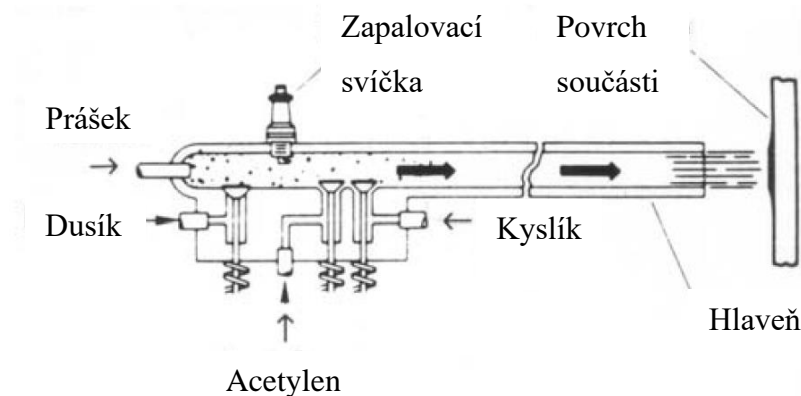




### 2.3.5 Nástřik detonační vlnou

Při procesu detonačního nástřiku je výbušná směs paliva, kyslíku a prášku zavedena do dlouhé trubice/hlavně a zažehnuta zapalovací svíčkou. Výsledkem je detonační tlaková vlna, která ohřívá a urychluje částice prášku, které putují vodou chlazenou hlavní směrem k substrátu. Pro čištění hlavně mezi detonacemi se používá dusík. Cyklus čištění, vstřikování a detonace se opakuje s frekvencí 3 až 6 Hz. Kvůli vysokým frekvencím a hluku spojeným s procesem nanášení pomocí detonační vlny je nutné používat akustické kryty. [10] Princip metody je na obrázku (Obr. č. 7).

Během procesu jsou generovány vysoké rychlosti větší než 800 m/s. Ukázalo se, že tyto vysoké rychlosti zlepšují deformaci částic a zvyšují vazbu částic a nástřiku. Tím je eliminována velká část pórovitosti, která se obvykle vyskytuje při konvenčním nástřiku plamenem. [10]



Obr. č. 7 Princip nanášení žárového nástřiku detonací [10]





**DIPLOMOVÁ PRÁCE      Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

## 2.4 Využití žárových nástřiků

Povlaky vyrobené žárovým stříkáním mají širokou škálu použití zahrnující ochranu před teplem, odolnost proti opotřebení a korozi. Příklady některých aplikací můžeme najít v následujících odvětvích:

- Všeobecné strojírenství
  - čerpací a hydraulická technika (povlaky odolné proti opotřebení, korozi a působení agresivních médií)
  - papírenský a tiskařský průmysl (povlaky odolné proti mechanickému opotřebení a korozi)
  - textilní průmysl (povlaky odolné proti opotřebení)
  - elektrotechnický průmysl (elektroizolační, elektrovedivé povlaky)
  - chemický průmysl (povlaky odolné proti působení různých druhů chemických látek)
  - náhrada tvrdého chromování
- Těžké strojírenství
  - otěruvzdorné tvrdé povlaky na rovinné a rotační plochy součástí a komponent (povlaky odolné proti otěru, frettingu, únavě)
  - náhrada tvrdého chromování
- Renovace
  - renovace opotřeбенých součástí (kluzná ložiska, čepy válců, trakčních motorů, pístnice, plunžry apod.)
  - renovace špatného obrobení
- Energetika
  - povlaky odolné proti korozi, erozi, abrazi a kavitaci
  - renovace generátorů a elektromotorů
  - povlaky tepelných bariér a bariér proti horké korozi
- Automobilový průmysl
  - povlaky tepelných bariér (díly spalovacího motoru – píst, hlava válce, vložka, ventily)



**DIPLOMOVÁ PRÁCE** Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

- povlaky odolné proti opotřebení (synchronní kroužky, čepy klikových hřídelí, vačky, čepy)
- samomazné a kluzné povlaky
- Letecký průmysl
  - tepelné bariéry (horké díly leteckých motorů – spalovací komory, lopatky)
  - povlaky těsnění a ucpávek
  - náhrada tvrdého chromování
- Sklářský průmysl
  - nástřiky pracovních ploch sklářských forem a trnů namáhaných abrazivním a tepelným účinkem skloviny

[11]



### 3 Technologie flexibilního broušení a leštění tvrdých povlaků

Hranice mezi broušením a leštěním nelze přesně vymezit. Tyto dvě metody se navzájem prolínají, obzvláště v případech, kde se používají podobné nástroje. [12] Broušení je proces vyznačující se znatelným úběrem materiálu, přičemž zrna by měla být pevně ukotvena v podložce. U leštění již nedochází ke znatelnému úběru materiálu a slouží spíše k odstranění stop po předchozích krocích, přičemž jednotlivá brusná zrna jsou ukotvena pružně na vláknech textilní podložky. U flexibilního broušení a leštění od sebe nelze tyto dvě metody jednoznačně odlišit, jelikož se mohou používat nástroje se zrnem ukotveným v pružné podložce, ale vždy cílem většího úběru materiálu, a nikoliv zahlazení stop. V této práci jsou metody souhrnně popisovány jako broušení, jelikož se vždy používají s cílem úběru materiálu v co nejkratším čase.

#### 3.1 Broušení a leštění

Broušení je hlavní dokončovací metoda, kterou lze získat vysokou přesnost obrobenej plochy. [13] U broušení slouží brusná zrna jako malé břity, které jsou nepravidelně rozložené s různým převýšením na nástroji. Řezná geometrie tudíž nemůže být přesně definovaná. Broušení lze využívat k hrubování i dokončování všech druhů materiálů, včetně i velmi tvrdých, u kterých je použití jiných třískových metod obtížné. Typicky jsou jedním zrnem odebírány pouze velmi malé průřezy třísek vysokou rychlostí za vzniku značného tepla. [12]

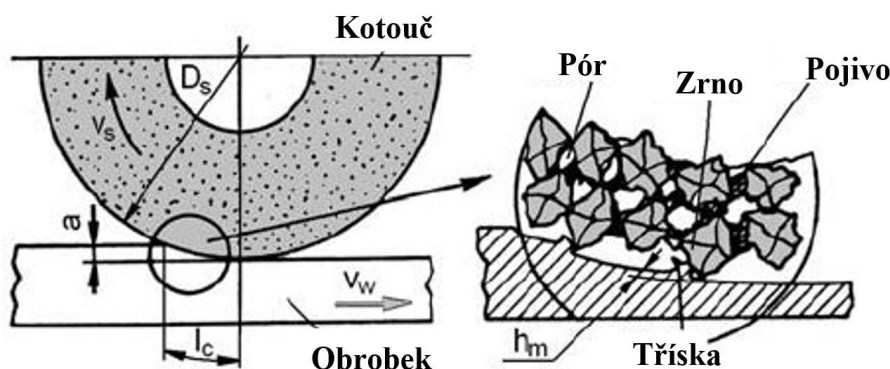
Leštění se řadí mezi dokončovací metody s úběrem materiálu. Používá se pro dosažení lesklého povrchu především z důvodu vzhledu. Úběr materiálu je minimální, přičemž se pouze odstraňují stopy po předešlém obrábění, které určuje přesnost rozměrů a tvaru. Z povrchu se odstraňují nejen mikronerovnosti, ale také nečistoty a vrstvičky oxidů či jiných chemických sloučenin. [12]



### 3.1.1 Proces broušení

Proces broušení je definován kinematickými a geometrickými parametry (viz Obr. č. 8). Kinematické parametry jsou: řezná rychlost  $v_s$ , rychlost obrobku  $v_w$  a případně posuv  $s$ . Geometrickými parametry jsou: průměr kotouče  $D_s$ , průměr obrobku  $D_w$ , hloubka řezu  $a$ , délka kontaktu  $L_c$  a průměrná tloušťka třísky  $h_m$ . [14]

Odebraná tenká vrstva materiálu je zachycena mezi brusnými zrny a póry, jak lze vidět na Obr. č. 8. Když nejsou brusná zrna v kontaktu s materiálem, třísky opustí oblast vlivem odstředivé síly nebo pomocí řezné kapaliny určené pro chlazení a mazání. [14]



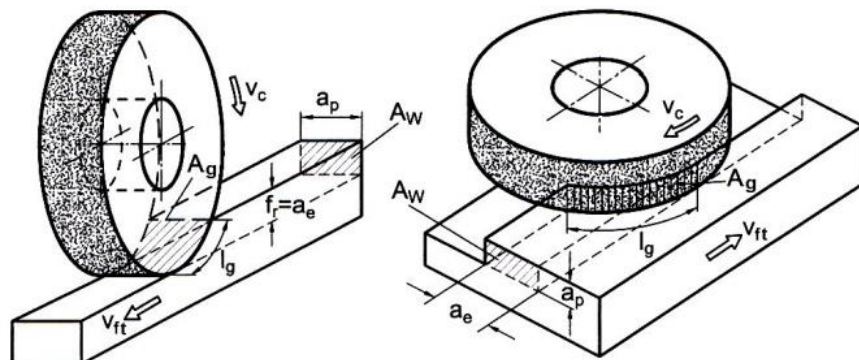
Obr. č. 8 Mechanismus procesu broušení [14]

### 3.1.2 Způsoby broušení

Broušením lze obrábět téměř všechny druhy ploch, ať už vnější nebo vnitřní rotační, rovinné či tvarové. Nejčastějším nástrojem je brousící kotouč, který je celistvý či složený ze segmentů, případně se používá brousící pás. [12]

#### Brusné kotouče

Brousící kotouče lze rozdělit podle aktivní části na obvodové broušení (broušení obvodem kotouče) a na čelní broušení (broušení čelem kotouče). [13] Rozdíl mezi těmito druhy je vyobrazen na Obr. č. 9.



$a_e$  - pracovní (radiální) záběr       $A_w$  - průřez odebírané vrstvy  
 $a_p$  - zadní (axiální) záběr       $A_g$  - geometrická styková plocha  
 $f_r$  - radiální posuv                      brousicího kotouče  
 $v_c$  - řezná rychlost                       $l_g$  - geometrická délka styku  
 $v_{ft}$  - tangenciální rychlost posuvu

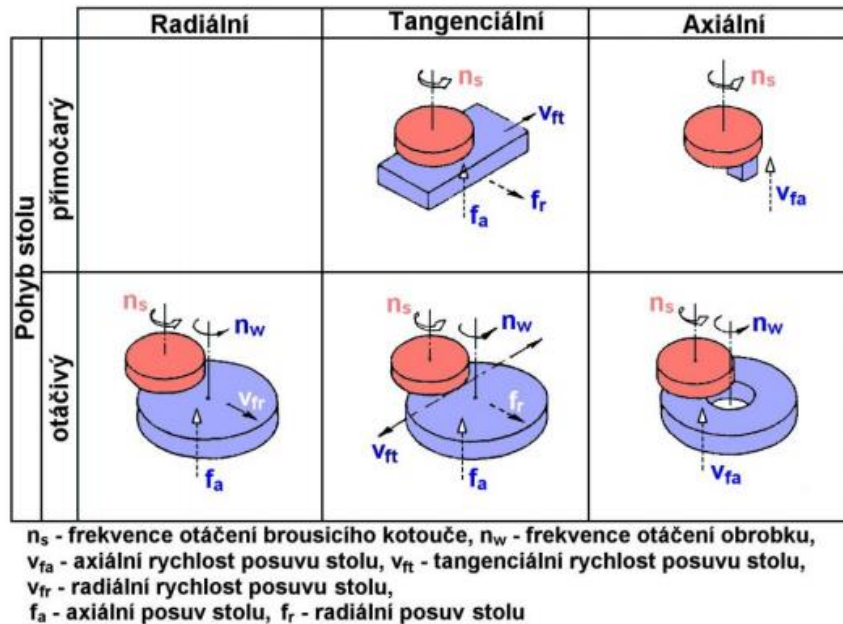
Obr. č. 9 Obvodové (vlevo) a čelní (vpravo) broušení [13]

Broušení kotoučem lze dále rozdělit na axiální, radiální a tangenciální broušení v závislosti na hlavním pohybu posuvu stolu vzhledem ke kotouči. [13] Příklady různých způsobů broušení kotoučem jsou uvedeny níže na obrázcích pro obvodové (Obr. č. 10) a pro čelní (Obr. č. 11) broušení.

	Rovinné broušení - pohyb stolu		Broušení do kulata	
	přímočarý	otáčivý	Vnější plochy	Vnitřní plochy
Axiální				
Tangenciální				
Radiální				

$n_s$  - frekvence otáčení brousicího kotouče,  $n_w$  - frekvence otáčení obrobku,  
 $v_{fa}$  - axiální rychlost posuvu stolu,  $v_{ft}$  - tangenciální rychlost posuvu stolu,  
 $v_{fr}$  - radiální rychlost posuvu kotouče,  
 $f_a$  - axiální posuv stolu,  $f_r$  - radiální posuv kotouče

Obr. č. 10 Příklady obvodového broušení brusným kotoučem [13]

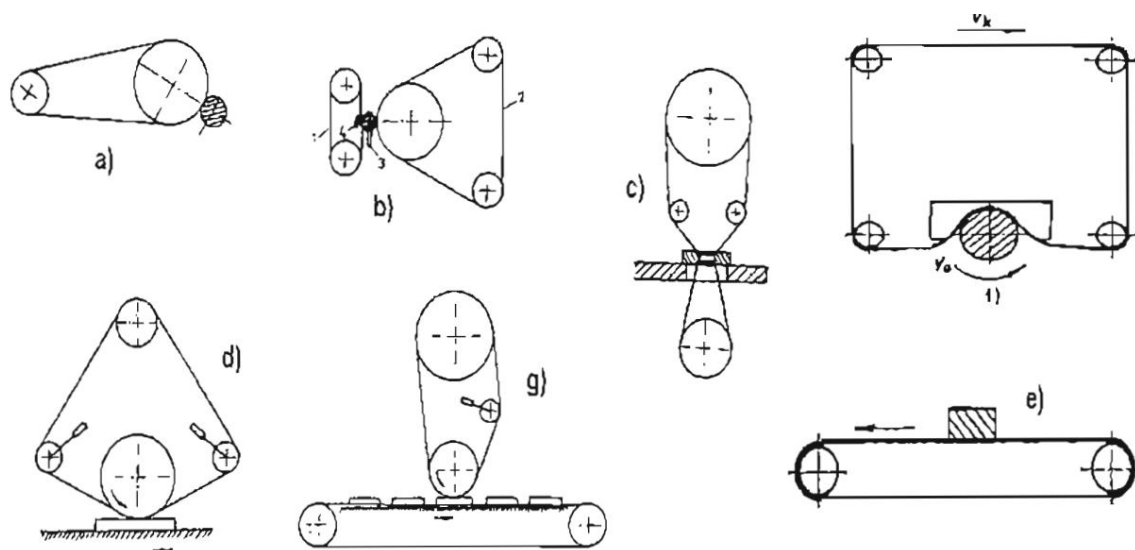


Obr. č. 11 Příklady čelního broušení brusným kotoučem [13]

## Broušení pásem

Pásově broušení je speciální způsob úběru materiálu pomocí brusných zrn na pružném podkladu. Jedna vrstva nebo více vrstev brusných zrn je naneseno na vrstvu lepidla (klih, umělá pryskyřice), která je na podkladovém materiálu, kterým může být papír nebo různé tkaniny. Nekonečný pás je veden a vypínán kladkami a podle způsobu broušení jsou některé kotouče hnací a některé kontaktní. Úběr může být uskutečněn různými způsoby, na kontaktním kotouči, na volném pásu, či na tvarové podepře, která je negativ broušené plochy. [12] Přehled několika způsobů je na Obr. č. 12.





Obr. č. 12 Příklady pásového broušení [12]

### 3.1.3 Brusná zrna

Při jemném broušení, kde je pouze malé zatížení brusných zrn, dochází k jejich samoostření, jelikož se zrna štípu, a tím se obnovuje ostří. Při hrubovacím broušení tvrdých materiálů se zabránuje předčasnému vylamování zrn houževnatostí kotouče. Při správné volbě tvrdosti kotouče se vylomí otupené zrno na základě většího řezného odporu. [15] Příklad nejpoužívanějších druhů materiálů a jejich vhodných oblastí použití je na Obr. č. 13.

Označení	Druh brusiva	HK* N/mm <sup>2</sup>	mezní teplota	Oblasti použití
A	korund směsný korund legovaný (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	16 350 až 20 800	2 000 °C	středně houževnaté až tvrdé materiály do 60 HRC ( $R_m < 500 \text{ N/mm}^2$ ) jako nekalená ocel a temperovaná litina
	čistý korund (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	21 000		houževnaté tvrdé oceli nad 60 HRC, jako nástrojová ocel; broušení a leštění skla
C	karbid křemíku (SiC)	24 800	1 370 °C	rovinné broušení SK, litiny, keramiky a neželezných kovů; rovnání brusných kotoučů, broušení z volné ruky
B	nitrid boru (BN)	47 000	1 200 °C	přesné broušení houževnatých tvrdých ocelí jako HSS ocelí a tepelně zušlechťených ocelí
D	diamant (C)	70 000	800 °C	přesné broušení houževnatých tvrdých a křehkých materiálů, jako SK, litiny, skla, keramiky a slitin niklu

\* HK zkouška tvrdosti podle Knoop se provádí vtačováním diamantového jehlanu s vrcholovými úhly 172,5° a 130°.

Obr. č. 13 Druhy brusiv [15]



### 3.2 Flexibilní broušení a leštění tvrdých povlaků

Konvenční broušení je poměrně tvrdý proces, který neumožňuje úplné kopírování povrchu broušené součásti. Jako vhodná metoda pro dokončování tvrdých povlaků se nabízí tzv. flexibilní broušení. To dovoluje určitou deformaci brusného nástroje, který se může lépe přizpůsobit broušenému povrchu a dosáhnout požadované kvality povrchu.

#### 3.2.1 Brusné materiály vhodné pro tvrdé povlaky

Pro materiály, které nelze obrábět běžnými brusivky, jako jsou karbid křemíku nebo korund, se používají vysoce tvrdá brusiva obsahující diamant nebo kubický nitrid boru (CBN). Zrna diamantu a CBN jsou mnohem tvrdší a bříty velmi odolné proti ztupení, tudíž nástroje s těmito zrny dosahují velké životnosti. [16] Pomocí nástrojů z diamantů nebo CBN lze opracovávat i tvrdé povlaky, jako jsou WC-C-Co nástřiky, a zlepšovat drsnost jejich povrchu. Na rozdíl od diamantu, dochází při broušení těchto nástřiků pomocí CBN nástrojů k rychlému obroušování zrn, jelikož není příliš velký rozdíl v tvrdosti mezi CBN zrny a WC-C-Co nástřikem. [2]

#### **Diamant**

Nejpevnější látka vyskytující se v přírodě je diamant. Pro použití v brusných nástrojích se vyrábí synteticky za vysokých teplot a vysokého tlaku a skládá se z čistého uhlíku v krystalickém uspořádání. Ačkoliv je diamant nejtvrdším brusivem, není vhodný pro práci na oceli, kvůli silnému chemickému opotřebení. [16]

#### **Kubický nitrid bóru (CBN)**

Druhá nejtvrdší pevná známá látka je kubický nitrid bóru, který je složen z boru a dusíku v krystalické struktuře. Jeho použití je vhodné zejména na různé druhy ocelí, kde doplňuje diamantová brusiva. [16]





## **DIPLOMOVÁ PRÁCE      Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

### 3.2.2 Brusné nástroje pro flexibilní broušení a leštění

Broušení tvrdých materiálů vyžaduje měkké brusné kotouče. Tvrdostí brusného kotouče je myšlena soudržnost kotouče (mechanický odpor proti vylamování zrn). [15] Jakmile dojde ke kontaktu brusného nástroje a součásti, zrna kotouče se třou o broušenou součást a odebírají z ní materiál. Při kontaktu je však také odebírán materiál z kotouče, což má za následek snížení ostrosti zrn nástroje. Když otupený nástroj přijde do kontaktu se součástí, bude se pouze otírat o povrch součásti bez úběru materiálu. Při použití měkkého podkladu se otupená zrna snadno uvolní z kotouče a díky samoostření se do záběru dostávají jiná brusná zrna, která je nahradí.

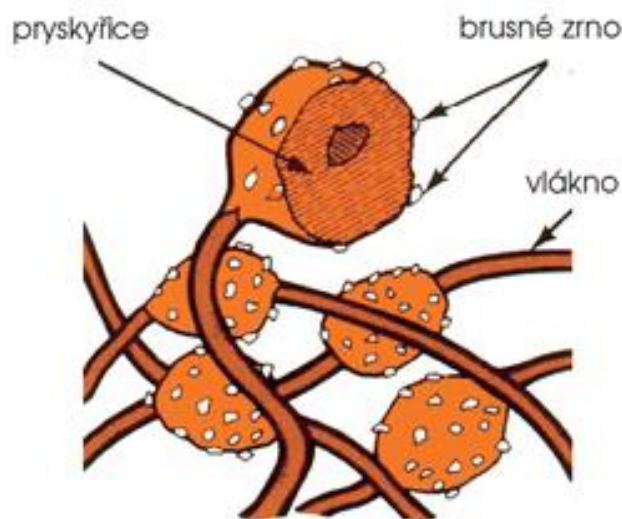
Pro flexibilní broušení lze použít několik nástrojů, a to jak brusné pásy, tak brusné kotouče a disky, skládající se z brusných zrn ukotvených na měkkém podkladu. Jako vhodná volba se jeví následující nástroje, které budou dále popsány:

- Brusné kotouče
  - Z netkané textilie
- Brusné disky
  - Z netkané textilie
  - Fíbrové disky s poddajným unašečem
- Brusné pásy
  - Klasické diamantové pásy
  - Z netkané textilie
  - V kombinaci s nasazovacím brusným prstencem



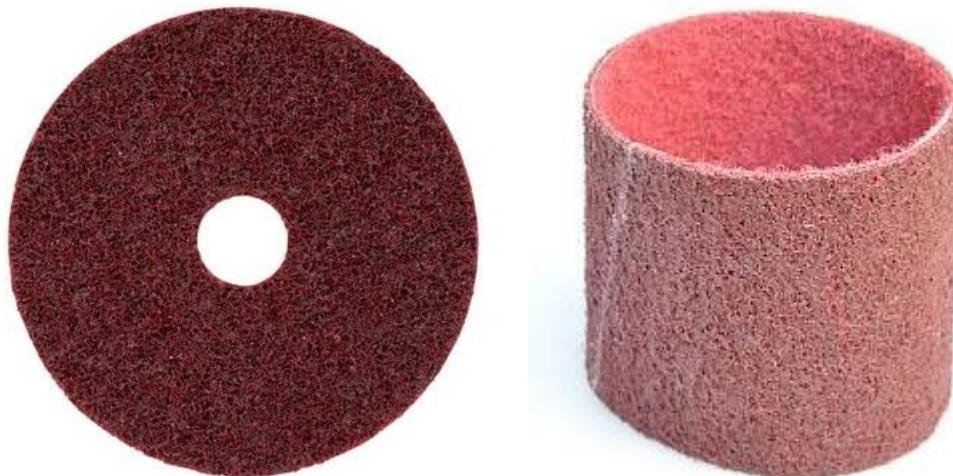
### Nástroje z netkané textilie

Netkané výrobky se skládají z rouna z nylonových vláken, která jsou spojena dohromady a nasycená pryskyřicí s brusnými zrnny, jak je znázorněno na Obr. č. 14. Tím se vytvoří trojrozměrný materiál, který je poddajný, pružný a velmi trvanlivý. [17]



Obr. č. 14 Struktura netkané textilie [18]

Nástroje vyrobené z netkané textilie jsou nejčastěji ve tvaru kotouče, ale lze se s nimi setkat také ve tvaru pásů, destiček či houbiček v různých velikostech a délkách. Ukázka kotouče a brusného pásu z netkané textilie je na Obr. č. 15. Povrch disků je poddajný, čímž se zamezuje podbroušení nebo poškození základního materiálu. Otevřená struktura materiálu se při provozu nezahřívá a odolává zatížení, což udržuje vysoký výkon brusných zrn omezením zanášení nosných vláken. [19]



Obr. č. 15 Kotouč Scotch-brite firmy 3M (vlevo) [19] a brusný pás z netkané textilie (vpravo) [20]

### Fibrové kotouče

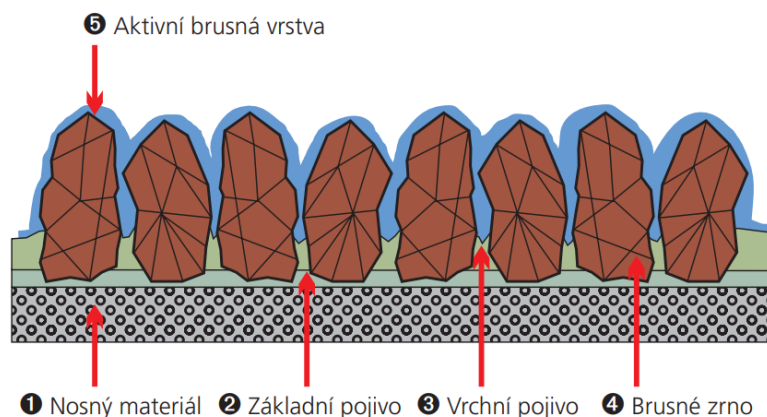
U fibrových kotoučů jsou pojivo a brusná zrna upevněna na podkladovém materiálu z vulkanizovaného fibru. Tento vláknitý materiál se používá převážně pro výrobu kotoučů do ručních úhlových brusek. Dle tloušťky se rozlišuje různá tuhost kotouče. Zrna mohou být na kotouči rozmístěna s mezerami, což umožňuje snížení zanášení povrchu brusiva částicemi uvolněnými z broušeného materiálu. Další možností je úplné pokrytí kotouče zrny umožňující rychlejší úběr materiálu u broušení, kde nehrozí zanesení nástroje prachovými částicemi. [21]

Na obrázku Obr. č. 16 je znázorněno složení fibrového kotouče a číslicemi jsou označeny jednotlivé části. U fibrových kotoučů se používá jako podklad vulkanizovaný fibr (❶) v různých tloušťkách přizpůsobených pro každou obráběcí operaci. Vulkanizovaný fibr poskytuje extrémně silný, robustní podklad a je vysoce odolný proti opotřebení. Pro upevnění brusného zrna na podklad se používají různá pryskyřičná pojiva. Nejdříve je podkladový materiál potažen základním pojivem (❷). Dále je brusné zrno rovnoměrně rozptýleno po povrchu a speciálními postupy zarovnáno, aby se dosáhlo vyšší účinnosti.



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**      **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Následně je brusné zrna pevně ukotveno vrchním pojivem (③), které zároveň chrání brusné zrna proti silám a zatížením, které vznikají během brusného procesu. Volba správného brusného zrna (④) významně ovlivňuje kvalitu povrchu a hospodárnost. Poslední část je aktivní brusná vrstva (⑤), která zvyšuje úběr materiálu a snižuje teplotu obrobku. [22]



Obr. č. 16 Složení fibrového kotouče [22]

Poddajný fibrový kotouč lze většinou pomocí suchého zipu umístit na pružný unášecí prsteneček, který se do určité míry přizpůsobí tvaru součásti. Ten je následně upnut v úhlové brusce, jak lze vidět na fotografii (Obr. č. 17).



Obr. č. 17 Fibrový kotouč na flexibilním unášeci [22]



### **Brusné pásy**

Dobrou vlastností brusných pásů je možnost použití pružného záběru, přičemž se zvětší plocha styku nástroje s obrobkem. Tímto způsobem lze odebírat více materiálu na jeden průchod pásu, na rozdíl od tuhého brousícího kotouče, který by se při větším záběru odtlačoval a „skákal“. [12]

Kovové, cermetové a keramické nástřiky lze brousit a leštit pomocí brusných a leštících pásů. Výhodou brusných pásů je úběr bez zahřívání, nepotřebují orovnávací a při opotřebení je lze rychle vyměnit. Velikost zrna lze přizpůsobit buď rychlému úběru materiálu, nebo zlepšení povrchové drsnosti. [23] Pásy se dají využít jak pro broušení rotačních součástí, tak pro rovinné povrchy. Na výběr je mnoho šířek i délek pásů, druhů i velikostí zrn a různých podkladových materiálů. Na obrázku (Obr. č. 18) je fotografie pásu s diamantovými zrny.



*Obr. č. 18 Brusný pás s diamantovým zrnem [24]*



### **Nasazovací brusné prstence**

Brusné pásy lze kombinovat s brusnými pružnými kotouči. Tyto kotouče využívají odstředivou sílu k držení brusného pásu, namísto konvenčních pneumatických systémů, spoléhajících na tlak vzduchu. Odstředivá síla je více efektivní a konzistentní. [25] Tato šterbinová kola používají standardní brusné pásy, které zcela obklopí průměr kola. Abrazivní pás je během provozu bezpečně držen na místě odstředivou silou vytvářenou otáčením kola. [26] Na obrázku níže (Obr. č. 19) je vlevo ukázka různých velikostí pružných brusných prstenců a vpravo ukázka kombinace s brusným pásem z netkané textilie.



*Obr. č. 19 Pružný brusný prstenec firmy CRC vlevo [26] a v kombinaci s pásem z netkané textilie vpravo [27]*





## **DIPLOMOVÁ PRÁCE      Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

### 3.2.3 Brusné stroje pro flexibilní broušení a leštění

Pro flexibilní broušení lze používat stejné stroje jako pro konvenční broušení. Existuje mnoho typů ručních brusek, strojních brusek, či speciálních konstrukce zahrnující robotická ramena. V závislosti na typu plochy (rovinná/válcová) lze tyto stroje kombinovat s nástroji, které byly shrnuty v předchozí kapitole:

- Ruční brusky
  - Ruční úhlové brusky-kotouče a disky z netkané textilie, fibrové disky
  - Ruční pásové brusky trubek-pás s diamantovým zrnem, pás z netkané textilie
- Strojní brusky
  - Rovinné-kotouče a disky z netkané textilie, fibrové disky
  - Hrotové-kotouče z netkané textilie
  - Pásové-pás s diamantovým zrnem, pás z netkané textilie
- Robotické broušení
  - Robotické rameno-fibrové disky
  - Pružná hlava-fibrové disky
  - Robotická pásová bruska-pás s diamantovým zrnem, pás z netkané textilie

#### **Ruční brusky**

Do ručního typu brusky jdou upnout dle konstrukce různé druhy brusných nástrojů. Lze použít fibrové kotouče i disky, nebo kotouče, disky i pásy z netkané textilie. Nevýhodou ručního broušení je malá opakovatelnost procesu, jelikož nelze dodržet stejný úhel, sílu ani tlak vyvíjené na součást.



*Obr. č. 20 Ruční pásová bruska trubek [28]*

### **Strojní brusky**

Strojní brusky mají oproti ručnímu broušení výhodu v opakovatelnosti procesu. Lze zajistit konstantní podmínky a opakovatelnost pomocí nastavení posuvu řízeného strojem většinou ve více osách, v závislosti na konkrétním stroji.

Rovinné brusky lze rozdělit podle způsobu broušení na:

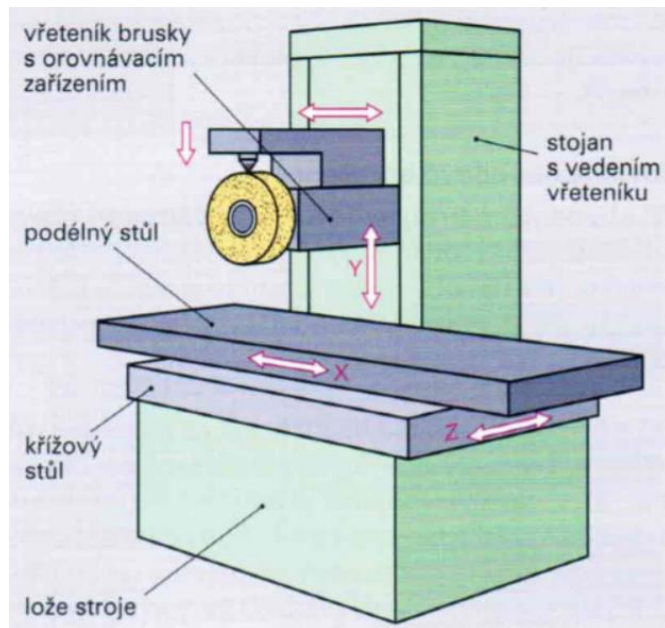
- Rovinné broušení čelem
- Rovinné obvodové broušení

Nebo podle konstrukce stroje na:

- Vodorovné (horizontální) rovinné brusky
- Svislé (vertikální) rovinné brusky

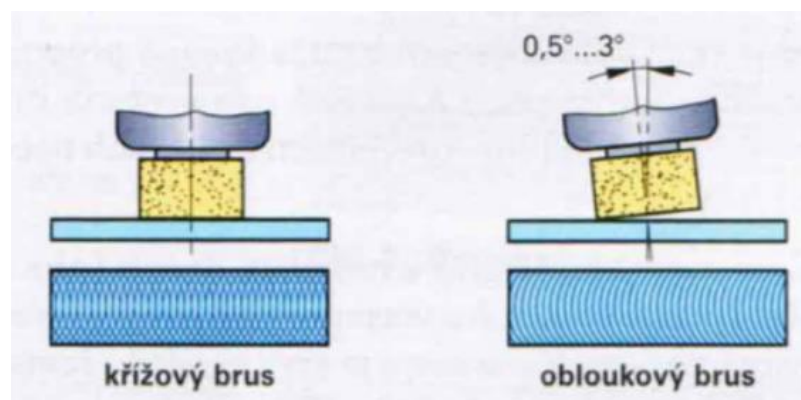
Schéma konstrukce horizontální rovinné brusky je na Obr. č. 21.





Obr. č. 21 Horizontální rovinná bruska [15]

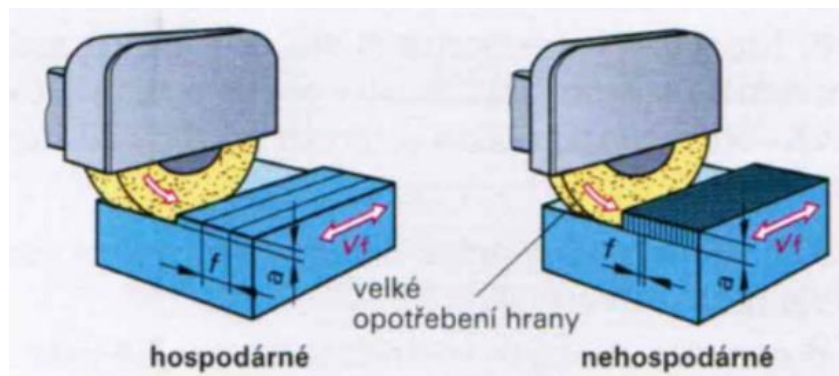
Pro čelní broušení se používá čelní plocha brusného kotouče. Pohyb obrobku může být podélný, nebo kruhový (otočný stůl). Při tomto způsobu broušení je stále v záběru velká plocha kotouče, která je zanesena třískami. V důsledku toho je vyvíjen velký tlak kotouče na obrobek, velký brousící výkon, ale špatná kvalita broušeného povrchu. Při naklonění osy kotouče o  $0,5^\circ$  až  $3^\circ$  se zmenší plocha záběru a styk kotouče s broušeným povrhem je tvaru srpku. [15]



Obr. č. 22 Rovinné čelní broušení [15]



Obvodové broušení je realizováno pomocí válcové obvodové plochy brusného nástroje. Pohyb může být podélný, nebo kruhový. Plocha záběru je malá a kotouč se nezanáší. K čištění od třísek napomáhá odstředivá síla, případně tlak řezné kapaliny. Průměr a šířka brusného kotouče by měla být co největší pro zvýšení brusného výkonu při větší ploše záběru, jak lze vidět i na obrázku (Obr. č. 23.). Příčný posuv (posun na další podélné projetí dalšího pruhu obráběné plochy) by měl ideálně být  $4/5$  šířky kotouče. Kombinace malého přísuvu (hloubky záběru) s velkým příčným posuvem využívá všechna brusná zrna po obvodu kotouče, čímž se snižuje opotřebení hran a lokální přehřívání kotouče. Obvodové broušení je metoda, která je zvláště hospodárná při použití kotoučů o co největším průměru a šířky, při velkém příčném posuvu. [15]



Obr. č. 23 Rovinné obvodové broušení [15]

Hrotové brusky se používají zejména pro broušení vnějších válcových rotačních ploch upnutých mezi hroty. Umožňují brousit kužele i čelní rovinné plochy. [13]

### **Robotické broušení**

Broušení je potenciaálně nebezpečný proces, u kterého může snadno dojít k znečištění a kde je zapotřebí mít zkušené a schopné pracovníky. Jedno z řešení těchto problémů může být použití robotů k automatizaci části procesů. Zatímco robotické svařování je poměrně rozšířené, pro robotické broušení a dokončování existuje pouze několik systémů s dostatečnými znalostmi z oblasti broušení a automatizace. [29]

- **ABG Ferrobotics brusná hlava**

Pro dosažení perfektního povrchu je ideální, aby během celého brusného procesu byla kontaktní síla stejná na celém povrchu broušené součásti. Technologie Active Compliant umožňuje kompenzovat povrchové tolerance až do 35,5 mm se zaručením konstantní kontaktní síly. Tuto aktivní brusnou hlavu je možné kombinovat s roboty od jiných výrobců. Fotografie aktivní brusné hlavy je na fotografii (Obr. č. 24). [30]



*Obr. č. 24 Brusná aktivní hlava AGB Ferrobotics [30]*

- **Robotické rameno KUKA Ready2\_grind ve spolupráci s 3M**

Společnost 3M ve spolupráci s KUKA vyvinuli systém ready2\_grind, který kombinuje výkonný a konzistentní proces umožňující opakovatelnost. Systém je dodáván s robotem KUKA KR 60 a přednastaveným ovládním. Šestiosý robot poskytuje vysokou tuhost potřebnou pro kompenzaci sil vyskytujících se během brusného procesu. Pohon brusného kotouče je uskutečněn pomocí servomotoru od firmy 3M, který lze naprogramovat tak, aby udržoval rychlost pro optimalizování brusného výkonu. Většina pneumatických nástrojů při zatížení jakoukoliv přijatelnou silou sníží svoji rychlost. Nástroje mají tendenci se utahovat, tudíž je jejich reálná rychlost obvykle nižší než při otáčení nástroje bez zatížení. To však neplatí pro příslušně velký servopohon, který dokáže efektivněji udržovat požadovanou rychlost, což se projeví nejen na delší životnosti brusiva, ale i na vyšší produktivitě.

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**      **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Další výhodou je možnost automatické výměny nástrojů. Nejdůležitější částí je Active Compliant Tool, která je připojena na konci robota. Tato součást poskytuje aktivní poddajnost, která umožňuje brusivu udržovat kontakt s povrchem dílu při určité síle nebo tlaku. Nástroj se přizpůsobí různým součástem i programování. [29] [31] Ukázka této technologie je na fotografii (Obr. č. 25).



*Obr. č. 25 Robotické rameno Ready2\_grind [29]*

- **Robotická pásová bruska PusCorp**

Další možností je použití robotické pásové brusky PushCorp, která je zachycena na fotografii (Obr. č. 26). Díky své konstrukci ji lze využít třemi různými způsoby, a to na velké ocelové desce, na kontaktním kole velkém 178 mm, nebo na volné oblasti pásu. Důležitými prvky této pásové brusky jsou servomotor s vysokým točivým momentem a pohon rozvodovým řemenem. Robotická pásová bruska má pneumatické napínání pásu a elektronické sledování pásu umožňující bezpečné dálkové ovládání napnutí pásu. [32]



Obr. č. 26 Robotická pásová bruska firmy PushCorp [32]

- **Robotické aktivní broušení pásem**

Aktivní pásová bruska ABG Active Belt Grinder slouží pro opracování malých až středních obrobků. Pásovou brusku lze snadno integrovat do linky s roboty a vytvářet snadné, spolehlivé a ekonomické reprodukovatelné procesy. Mezi výhody patří aktivní kompenzace tolerancí, přesné nastavení procesních sil a jejich neustálé monitorování. Pohon reaguje na velikost síly a mechanicky změní napnutí brusného pásu. [33] Fotografie brusky je na obrázku (Obr. č. 27).



Obr. č. 27 ABG Active Belt Grinder [33]



## 4 Návrh technologie dokončování žárových nástřiků

Po nanesení nástřiku je třeba povrch dále upravovat, aby se dosáhlo konečného rozměru a získal se hladký povrch. Obrábění povlaků však může být problematické. Zvláště u povlaků, které jsou odolné proti abrazi, porézní, a u povlaků obsahujících částice, které mohou být občas špatně spojeny. Částice často mohou být spojeny pouze mechanicky a mohou se lehce oddělit. Tyto částice mají také menší tepelnou vodivost než samotný původní prášek, čímž se snižuje přenos tepla a například u broušení může docházet k drastickému zvýšení teploty povrchu. Obecně používané metody, postupy a techniky užívané pro obrábění tvářeného materiálu nelze aplikovat na stejný materiál, vytvořený žárovým stříkáním. [23]

Obecně se dokončování dělá nejen kvůli dosažení určité drsnosti, ale také s cílem: [10]

- Změny struktury
- Zvýšení soudržnosti nástřiku a podkladu
- Uvolnění vnitřních zbytkových napětí
- Uzavření a redukce pórů
- Zlepšení homogenity
- Zmenšení obsahu oxidů
- Precipitace pevné fáze

Metody pro dosažení těchto vlastností lze rozdělit na: [10]

- Mechanické úpravy (obrábění, broušení, kuličkování, leštění, izostatické lisování za horka)
- Chemické ošetření (utěšňování pórů, chromování, hliníkování)
- Tepelné zpracování (žihání, difúze, fúze)

Nejběžnější operace po nanesení nástřiku jsou dokončení pomocí soustružení, nebo pomocí brusných kotoučů. Metoda je volena s ohledem na tvrdost povlaku, povrchovou úpravu a požadovanou přesnost rozměrů. [10]





#### 4.1 Broušení a leštění

Jak bylo podrobněji popsáno v kapitole č. 3, broušení je metoda umožňující opracovávat i tvrdé materiály s velkou přesností. [15] Povrchové broušení nástřiků pomáhá zvyšovat odolnost proti abrazivnímu a erozivnímu opotřebení, přičemž zvýšení mikrotvrdomosti povlaku je považováno za důvod vysoké odolnosti proti opotřebení. [34]

Ve srovnání s obráběním kovových povlaků je broušení poměrně nákladnější, tudíž množství odebíraného materiálu by mělo být co nejmenší. Z toho důvodu by měla být tloušťka povlaku co nejbližší konečným rozměrům. Stejně jako u soustružení a frézování se podmínky pro broušení žárových nástřiků velmi liší od broušení tvářených nebo litých materiálů. Během broušení může docházet k vylupování jednotlivých částic, nebo dokonce k delaminaci celého povlaku od podkladu. [23]

Tažnost keramických povlaků je velmi nízká. Kromě špatné tepelné vodivosti je problémem i to, že kontakt mezi povlakem a substrátem není nikdy dokonalý, což dále snižuje vedení tepla směrem k podkladu. Keramické povlaky jsou velmi porézní a bez ohledu na kvalitu broušení bude povrch po broušení vždy obsahovat díry. [23]

Výběr brusného kotouče závisí na tvrdosti a mikrostruktuře povlaku. Mezi další důležité parametry patří i rychlost kotouče, posuv, kontaktní plocha a správná volba procesní kapaliny. [23]

Ačkoliv je broušení průmyslově rozšířený proces, při broušení žárových nástřiků je třeba brát v potaz následující úvahy: [10]

- Žárové nástřiky mají tendenci hodně zatěžovat kotouče brusné kotouče, pro kontrolu nad opotřebením kotoučů je třeba používat relativně hrubá zrna s nízkým obsahem pojiva.
- Je vhodné používat jemné řezy, protože nadměrný tlak může způsobit trhliny, delaminaci, lom nebo vytržení povlaku.
- Při finální operaci nevyjiskřovat, aby nedošlo ke spálení povrchu součásti.
- Kola musí být pravidelně orována.
- Powlaky z karbidu wolframu vždy vyžadují diamantové brusné kotouče.



## 4.2 Soustružení a frézování

Jelikož je struktura žárových nástřiků spíše granulární než homogenní, budou se při soustružení tvořit drobné třísky podobné obrábění litiny. Povrch součásti bude matný a bude patrná jemná pórovitost. [10]

U kovových povlaků lze použít soustružení a frézování k vytvoření konečných rozměrů a k odstranění drsnosti vzniklé po nanesení povlaku. Řezná maziva, oleje a chladiva však mohou pronikat do otevřených pórů povlaků a zůstat i po opracování, pokud není součást dále vhodně ošetřena. [23]

Pro cermety (zejména cermety obsahující karbidová zrna), je doporučeno používat karbidové nástroje, jelikož tyto povlaky jsou velmi abrazivní. [23]

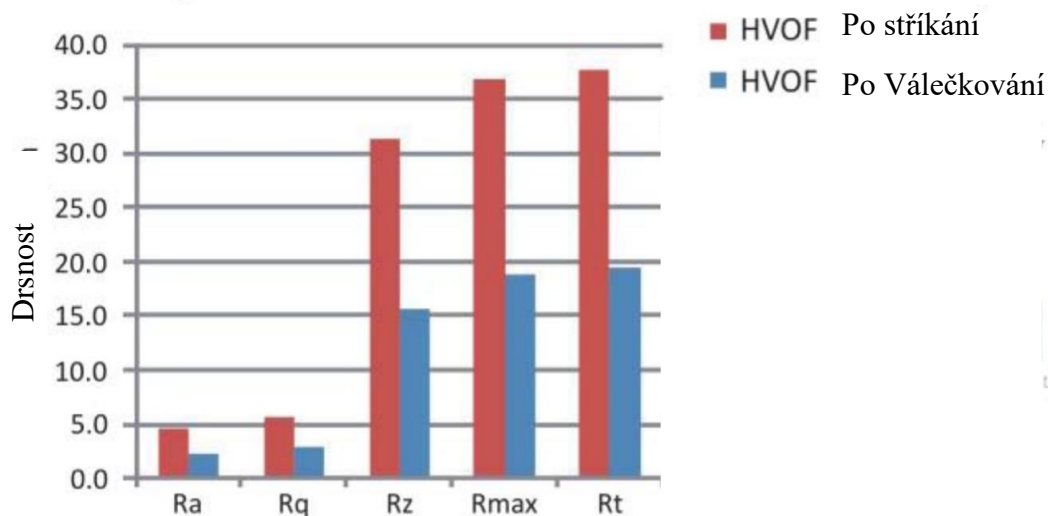
Pro keramické nástřiky je možné používat pro úpravu povrchu pouze broušení. [23]

## 4.3 Válečkování

Frazen a kol. [35] zkoumali hydrostatické válečkování s kulovým nástrojem na žárových nástřicích WC-Co, které byly nanášeny metodou HVOF. Válečkování lze využít jako alternativní proces k broušení. Během procesu válečkování dochází ke zploštění povrchových nerovností. Navíc lze válečkováním zvyšovat životnost součástí. Zvýšením zbytkových tlakových napětí v povrchové vrstvě se totiž zvyšuje odolnost proti iniciaci trhlin. Z tohoto důvodu jsou dynamicky namáhané součásti válečkovány. [35]

Výsledky ukazují, že válečkováním lze snižovat drsnost WC-Co nástřiků, avšak vše závisí na parametrech procesu. V porovnání s broušením bylo při vysokém kontaktním tlaku a nízké rychlosti posuvu dokonce dosaženo lepších tribologických vlastností, což je zřejmě způsobeno topologií povrchu po válečkování. Drsnost povrchu po provedeném procesu silně závisí na síle použité pro válečkování. [35]

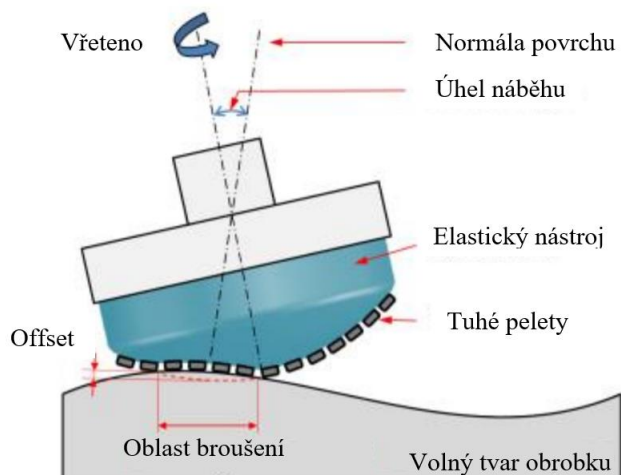




Obr. č. 28 Drsnost nástřiku po válečkování [35]

#### 4.4 Shape Adaptive Grinding (SAG)

Tvarově adaptivní broušení SAG je poměrně nová, nízkonákladová metoda úběru materiálu. U obtížně opracovatelných keramických materiálů lze z původního parametru drsnosti  $R_a$  vyššího než  $1 \mu\text{m}$  dosáhnout jemného povrchu  $R_a$  menší než  $0,5 \mu\text{m}$ . Princip této „semi-pružné“ metody je znázorněn na Obr. č. 29. Nástroj je poddajný, přičemž je současně dosaženo pevného kontaktu v menším měřítku díky tuhým peletám, které nástroj pokrývají. [36]



Obr. č. 29 Princip Shape Adaptive Grinding (SAG) [36]



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE      Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Gourhari Ghosh spolu s dalšími [37] zkoumali SAG broušení WC-Co nástřiku a účinky různých parametrů. S nárůstem komprese nástroje se zvyšoval kontaktní tlak a docházelo ve větší míře k odlamování špiček broušeného povrchu, což mělo za následek vyšší rychlost úběru a nižší povrchovou drsnost. Na druhou stranu, při použití tvrdšího nástroje se drsnost povrchu zvyšovala, jelikož bylo vytvořeno mnoho hlubokých drážek kvůli agresivnější mechanické interakci. Z toho důvodu není tvrdší nástroj SAG vhodný jako dokončovací metoda pro cermetové povlaky. Při vícenásobném použití SAG leštících polštářků s postupně snižující se velikostí částic bylo dosaženo drsnosti povrchu 7 nm a bylo sníženo i zbytkové napětí. [37]

### 4.5 Laser

Laserové dokončování žárových nástřiků má smysl zejména kvůli tomu, že konvenční obrábění je nákladný a časově náročný proces, který je obtížný automatizovat. Běžná řešení jsou zejména manuální a lze nimi získat nestabilní výsledky, které závisí na schopnostech kvalifikovaných techniků. Bylo zjištěno, že laserová metoda Fast Regime-Fluidized Bed Machining (FR-FBM) významně zlepšuje povrch žárově stříkaných součástí a zaručuje dobrý vzhled, vysokou přesnost obrábění a dobrou přesnost. Možnost dokončování touto metodou je však závislá na mechanických vlastnostech žárových nástřiků. Pomocí této metody může být dokončování tvrdších odolných materiálů problémové. Stejně tak nadměrně křehké materiály náchylné ke křehkému lomu, jsou obtížné na zpracování laserem. Pro optimalizaci procesních podmínek je nutný další výzkum. V budoucnu budou analýzy této metody zejména zaměřené na dokončování tvarově složitých součástí. [38]

## 5 Testování a vyhodnocení dokončovacích metod žárových nástřiků

Pro testování a porovnání byly použity tři metody vhodné pro broušení tvrdých materiálů, jako jsou žárové nástřiky. Jednalo se o čelní broušení pomocí diamantového fibrového kotouče, broušení diamantovým a keramickým brusným pásem a obvodové broušení kotoučem z netkané textilie.

Experiment slouží pro praktické použití na součástech určených pro lisovací formy. Jelikož tyto díly musí při provozu odolávat velkému abrazivnímu opotřebení, jsou opatřeny žárovým nástřikem. Povrch nástřiku je nevhodný pro přímou aplikaci a je nutné jej dodatečně dokončovat. Pro zajištění funkčnosti lisovacího procesu je nutné, aby povrch nástřiku dosahoval parametru drsnosti  $R_a$  menšího než  $0,8 \mu\text{m}$ . Během následujícího testování bude hlavním kritériem pro posouzení metody právě tato hodnota.

### 5.1 Materiál nástřiku

Materiálem nástřiku použitým při experimentech je WOKA 3652 WC-Co-Cr, nanesený metodou HVOF. Tyto nástřiky se používají pro mnoho součástí náchylných k silné erozi nebo abrazi, jako jsou plynové a vodní turbíny, letecké motory a další. [34] Charakteristické vlastnosti tohoto povlaku jsou vysoká tvrdost, dobrá adheze a nízká porozita. [39] [40]

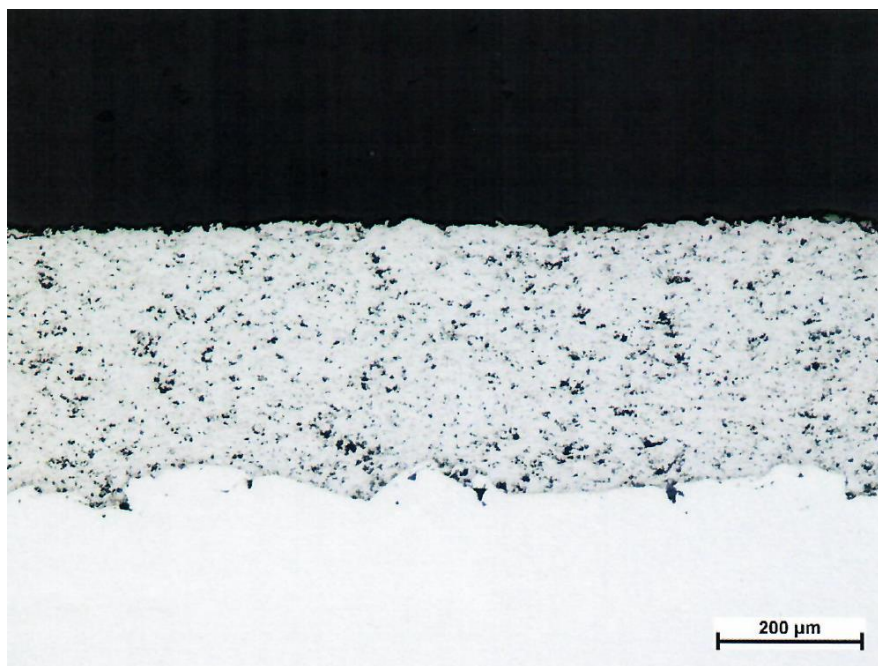
Cermetové nástřiky WC-Co-Cr se skládají z tvrdé keramické fáze karbidu wolframu (WC) v měkké kobaltové matici. [40] Tvrdé částice WC jsou hlavním důvodem odolnosti proti opotřebení, zatímco prvek Co zajišťuje houževnatost. [39] Bylo zjištěno, že přidání Cr k matici zlepšuje odolnost proti opotřebení a korozi. [34] Vlastnosti nástřiku jsou ovlivněny nejen výběrem prášku, ale také nastavením určitých parametrů během procesu nanášení nástřiku. [40] Konkrétní naměřené hodnoty nástřiku naneseného na zkoumaných vzorcích jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. č. 1). Na obrázku (Obr. č. 30) je mikrostruktura jednoho ze vzorků sledovaná optickým mikroskopem.



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**      **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Tab. č. 1 Vlastnosti zkoušeného nástřiku WC-Co-Cr

<b>Kvalitativní znak</b>	<b>Materiálová zkouška/předpis/norma</b>	<b>Referenční hodnota</b>
Povrchová tvrdost HRC	Zkouška tvrdosti podle ČSN EN 6508-1 Broušený povrch	58,8 ±1,5 HRC
Mikrotvrdost HV <sub>0,3</sub>	Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse dle ČSN EN ISO 6507-1 – na příčném řezu	1 170 ±15
Přilnavost povlaku v tahu [MPa]	Zkouška přilnavosti v tahu dle ČSN EN ISO 14916	Min. 62 MPa
Depoziční účinnost [%]	Zkouška depoziční účinnosti nástřiku dle ČSN EN ISO 17836	53,6 %



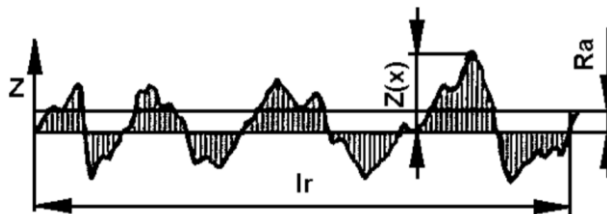
Obr. č. 30 Příčný řez vzorkem, optický mikroskop při zvětšení 100x

## 5.2 Měřicí přístroj a měřené veličiny

Jako měřicí přístroj byl pro všechna měření použit přenosný drsnoměr MarSurf PS 10, na kterém byly měřeny parametry  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ . Jejich definice podléhá normě ČSN EN ISO 4287.

- $R_a$ - střední aritmetická úchylka profilu

Je aritmetickým průměrem absolutních hodnot vzdáleností jednotlivých povrchů od nulové čáry. Vypovídající schopnost parametru  $R_a$  není vysoká, jelikož není citlivý na extrémní výšky hrotů profilů nebo hloubky rýh profilů. [41]

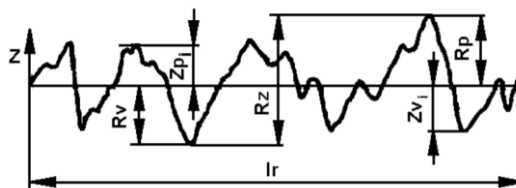


Obr. č. 31 Měření střední aritmetické úchylky profilu  $R_a$  [41]

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx [\mu m] \quad (1)$$

- $R_z$  - největší výška profilu

Jedná se o součet absolutních hodnot nejvyššího výstupku  $Z_p$  a nejnižší prohlubně profilu  $Z_v$  v rozsahu základní délky  $l_r$ . [41]



Obr. č. 32 Měření největší výšky profilu  $R_z$  [41]

- $R_{max}$  -maximální hloubka drsnosti

Udává největší jednotlivou hloubku drsnosti uvnitř celkové měřicí dráhy.

### 5.3 Dokončování rovinné plochy pomocí fibrového kotouče

#### 5.3.1 Popis měření

##### Vzorky

Jako vzorek byl použit kvádr s žárovým nástřikem se zaoblenými rohy. Prostřední část povrchu již byla strojně zbroušena pomocí pevného diamantového kotouče. Tvar a vzhled vzorku je na obrázku (Obr. č. 33).

Drsnost vstupního povrchu po strojním zbroušení je uvedena v tabulce (Tab. č. 2).

*Tab. č. 2 Drsnost vstupního povrchu po strojním broušení*

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,13	0,91	1,08

Okraje vzorku, na kterých byl nebroušený nástřik, dosahovaly v průměru mnohem vyšších hodnot než prostřední část vzorku, a to následujících (Tab. č. 3).

*Tab. č. 3 Drsnost okrajů s žárovým nástřikem*

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
3,28	19,26	23,88



*Obr. č. 33 Tvar a povrch testovaného vzorku*





### **Použité přístroje**

Pro následující pokus byla použita konzolová frézka F2V firmy TOS s naklápěcím vřeteníkem. Při všech měřeních byl vřeteník natočen o úhel  $5^\circ$ , jak lze vidět na Obr. č. 34 .



*Obr. č. 34 Konzolová frézka F2V s naklopeným vřeteníkem*

### **Nástroje**

Jako nástroj byl použit fibrový kotouč se zrnem velikosti  $46 \mu\text{m}$  a průměrem 150 mm, který byl pomocí suchého zipu připevněn k pružnému unášecímu talíři.



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE      Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

### 5.3.2 Zkušební broušení

Při prvním broušení byly na stroji nastaveny následující podmínky. Cílem bylo pozorování chování daného fibrového kotouče během broušení, aby mohly být podmínky dále optimalizovány a také byla snaha zajistit rovnoměrnější povrch pro následující broušení.

- Otáčky             $n = 2\,000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv             $f = 224 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Oproti již zbroušenému povrchu došlo při broušení fibrovým kotoučem ke zhoršení všech parametrů drsnosti (Tab. č. 4). Úběr materiálu činil přibližně 0,007 mm.

*Tab. č. 4 Drsnost rovinné plochy po 1. broušení*

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,63	3,82	4,06

### 5.3.3 Závislost šířky úběru na tlaku nástroje

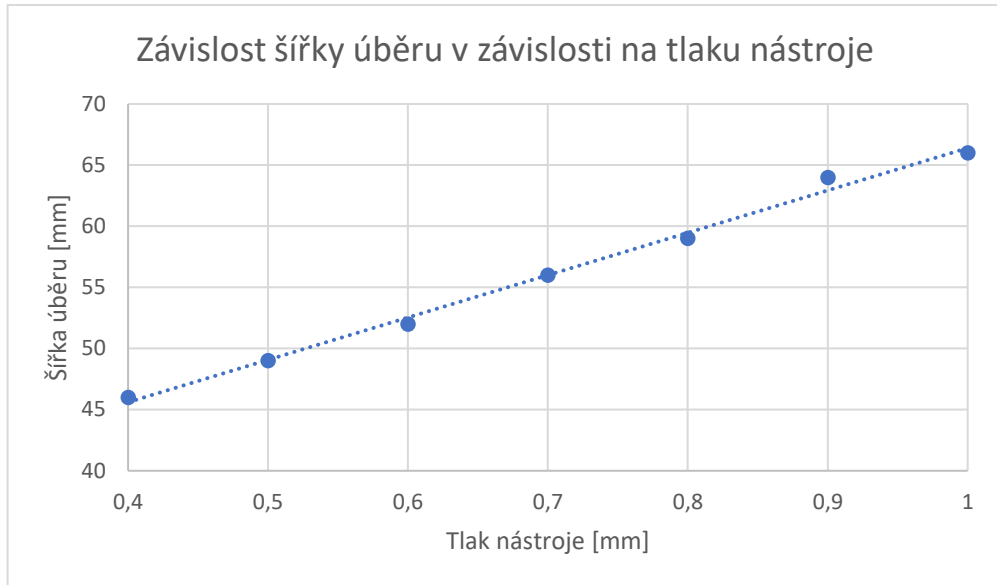
Při měření bylo cílem zjistit, jak ovlivní tlak nástroje šířku úběru. Velikost tlaku byla určována jako posunutí nástroje v ose Z, přičemž nulový bod byl zvolen jako místo, kde došlo k prvnímu dotyku nástroje s obrobkem. Šířka úběru byla měřena na lesklé šířce vzorku pomocí posuvného pravítka.

Aby bylo měření snadněji zaznamatelné a přesnější, byl zvolen menší posuv ve směru osy X než v předešlém měření, přičemž otáčky zůstaly stejné. Přítlak v ose Z byl testován v rozmezí 0,4 mm až 1 mm.

- Otáčky             $n = 2\,000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv             $f = 80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Přítlak (osa Z)    (0,4-1) mm

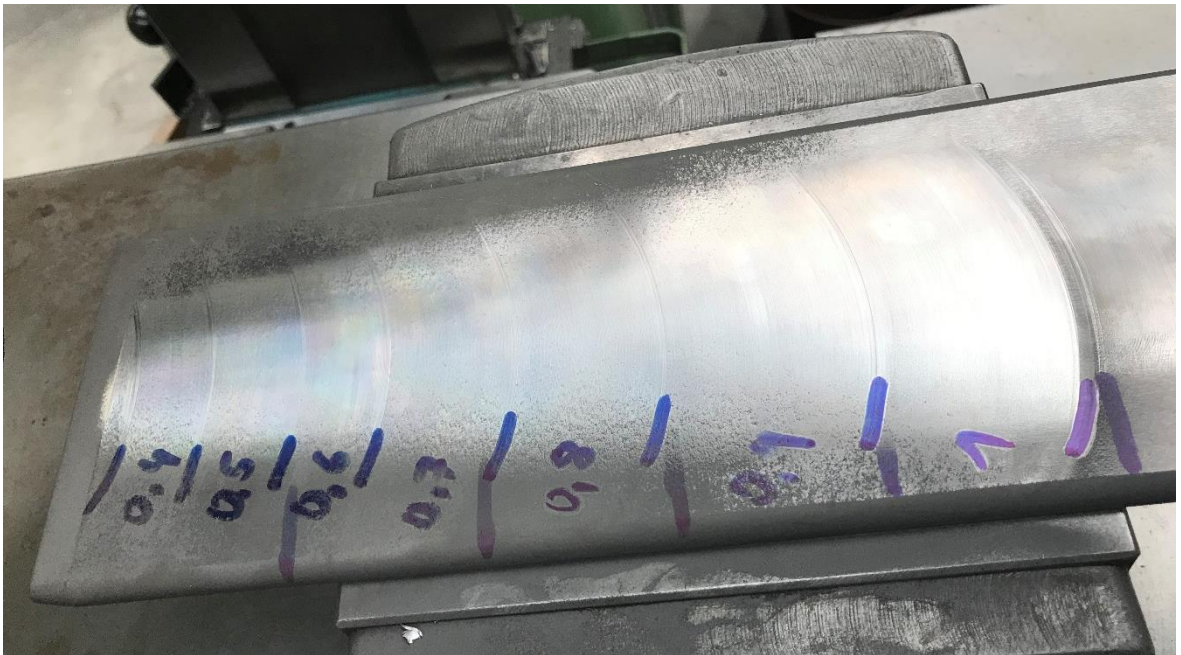
Vztah mezi šířkou úběru a tlakem nástroje je uveden v Graf č. 1. Závislost je poměrně lineární. Při zvyšujícím se tlaku se zvětšuje také šířka úběru. Při posunutí v ose Z o 0,1 mm (zvětšení tlaku nástroje) došlo ke zvětšení šířky vždy o 2-3 mm.





Graf č. 1 Závislost šířky úběru na velikosti tlaku nástroje

Tuto lineární závislost dokládá přímo fotografie broušeného povrchu na Obr. č. 35.



Obr. č. 35 Vzhled plochy při broušení různým tlakem nástroje

Co se týká drsnosti, hodnota parametru  $R_a$  byla vždy menší než  $0,8 \mu\text{m}$ , ačkoliv naměřená závislost nebyla lineární. Bohužel nelze určit, zda je to vlivem rozdílného přitlaku nástroje, nebo kvůli nerovnoměrnému předchozímu broušení. Při použití většího i menšího tlaku bylo dosaženo parametru drsnosti  $R_a = (0,27 - 0,34) \mu\text{m}$ . Z toho vyplývá, že lze použít větší tlak nástroje a brousit větší plochu za menší čas bez negativního vlivu na drsnost povrchu.

Tab. č. 5 Drsnost v závislosti na přitlaku nástroje

Přítlak [mm]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1,00	0,34	2,29	2,95
0.7	0,41	2,62	2,79
0.4	0,27	2,10	3,76

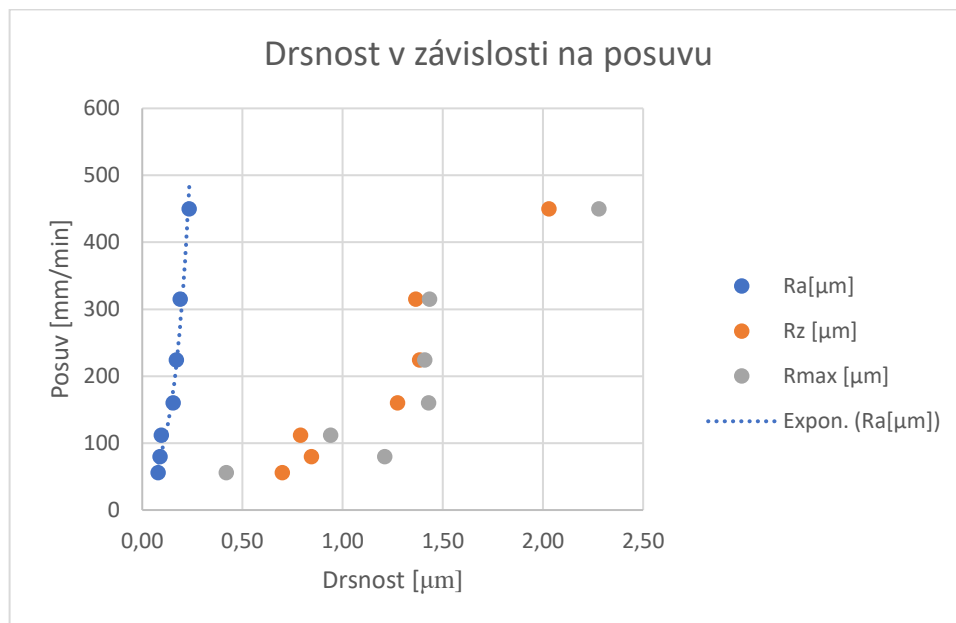
#### 5.3.4 Závislost drsnosti na posuvu

Před samotným měřením byl povrch nejdříve připraven přebroušením otáčkami  $2\,000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , posuvem  $160 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a přitlakem nástroje v ose Z 1 mm.

Při měření byly nastaveny následující podmínky, přičemž rozmezí měřeného posuvu bylo voleno tak, aby nezahrnovalo maximální a minimální hodnotu posuvu, kterou lze na použitém stroji nastavit.

- Otáčky  $n = 2\,000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = (56-450) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Přítlak (osa Z) 2 mm

Při vynesení naměřených hodnot do grafu (Graf č. 2) vyplývá, že parametr drsnosti  $R_a$  je tím menší, čím menší je posuv nástroje a danou závislost lze přibližně proložit exponenciálou. Hodnoty parametru  $R_z$  a parametru  $R_{\text{max}}$  nelze vhodně proložit, avšak pro většinu měření platí, že čím menší posuv, tím menší jsou hodnoty posuvu. Rozdíl je větší než u parametru  $R_a$ .



Graf č. 2 Závislost drsnosti na posuvu

Tabulka s průměrnými naměřenými hodnotami je uvedena níže (Tab. č. 6). Při všech měřených posuvech byl parametr  $R_a$  menší než 0,8. Při nejmenším posuvu  $56 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se dosáhlo hodnoty  $R_a = 0,08 \mu\text{m}$ . Vzhled povrchu je na fotografii (Obr. č. 36).

Tab. č. 6 Naměřené hodnoty drsnosti v závislosti na posuvu

posuv	Ra	Rz	Rmax
[ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]
450	0,24	2,03	2,28
315	0,19	1,37	1,44
224	0,17	1,39	1,41
160	0,16	1,28	1,43
112	0,10	0,79	0,94
80	0,09	0,85	1,21
56	0,08	0,70	0,42



Obr. č. 36 Povrch broušený různým posuvem

### 5.3.5 Závislost drsnosti na otáčkách

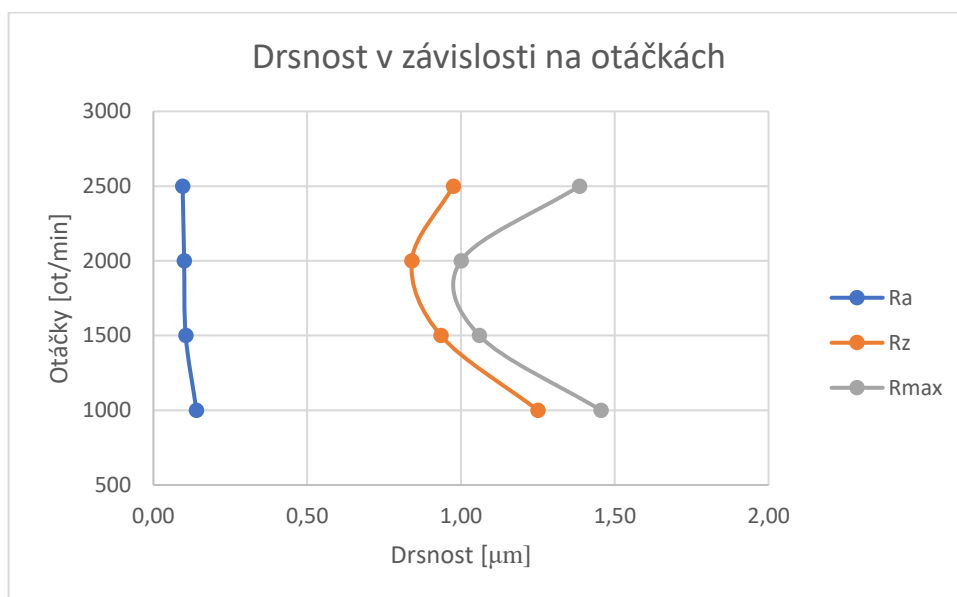
Před dalším měřením byl povrch dvakrát přebroušen otáčkami  $2\,000\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , posuvem  $224\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a přítlakem nástroje v ose Z 3 mm, a poté jednou s odlišným posuvem  $160\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Pro samotné měření byl vybrán zhruba střední posuv, který daný stroj dovoluje a větší přítlak nástroje (posunutí v ose z) 3 mm.

- Otáčky  $n = (1\,000 - 2\,500)\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 160\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Přítlak (osa Z) 3 mm

Drsnost byla měřena při rozpětí otáček od  $1\,000\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  do  $2\,500\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  a grafické znázornění naměřených parametrů drsnosti lze vidět v grafu (Graf č. 3).

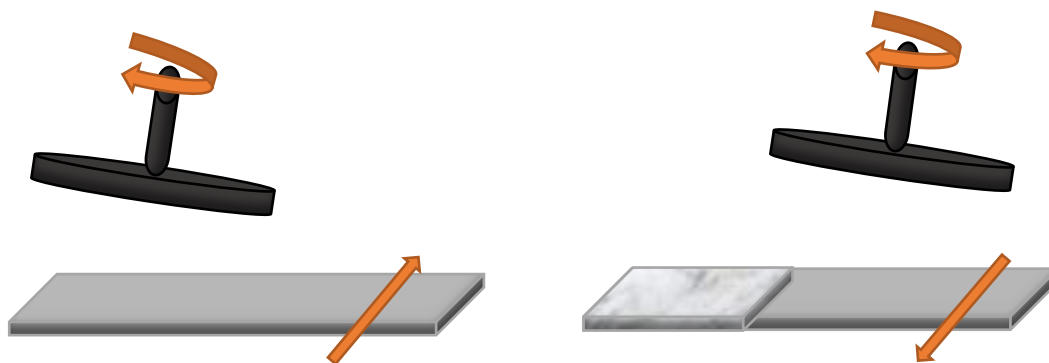
Zatímco parametr  $R_a$  se spolu při zvyšování otáček zmenšoval, parametry  $R_z$  a  $R_{max}$  vykazovaly vyšší hodnoty při nejnižších a při nejvyšších měřených otáčkách. To odpovídá skutečnosti, že otáčky doporučené výrobcem fibrového kotouče jsou okolo  $2\,000\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Nad nebo pod touto hodnotou se můžou vyskytovat vibrace, které mají negativní vliv na kvalitu povrchu.



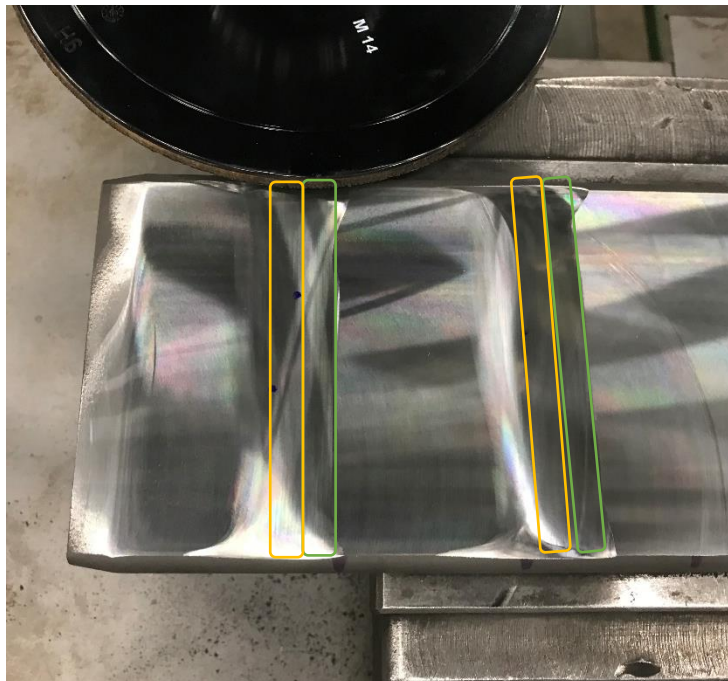
Graf č. 3 Závislost parametrů drsnosti na otáčkách

### 5.3.6 Srovnání nesousledného a sousledného broušení

Poslední měření si klade za cíl porovnat povrch při nesousledném broušení a broušení sousledném. Schéma měření je znázorněno na obrázku níže (Obr. č. 37). Nástroj rotoval stejným směrem, pouze se změnil směr posuvu obrobku a broušené místo. Měření drsnosti bylo provedeno na dvou místech, a to v blízkosti hrany, kde byl největší přítlak daný nakloněním nástroje (Obr. č. 38-želná oblast) a 15 mm od hrany (Obr. č. 38-žlutá oblast).



Obr. č. 37 Schéma broušení vláknovým kotoučem sousledně (vlevo) a poté nesousledně (vpravo)



*Obr. č. 38 Sousedné (vlevo) a nesousedné (vpravo) broušení*

Z porovnání Tab. č. 7 a Tab. č. 8 vyplývá, že při broušení sousledném i nesousledném se dosáhlo velmi dobrých hodnot drsnosti. Při měření drsnosti u hrany bylo dosaženo  $R_a$  přibližně  $(0,06 - 0,07) \mu\text{m}$ , přičemž při měření 15 mm od hrany bylo  $R_a$  v rozmezí  $(0,15 - 0,13) \mu\text{m}$ . Broušený povrch byl na pohled velmi lesklý v obou případech (Obr. č. 38).

*Tab. č. 7 Drsnost při sousledném broušení*

Měřeno	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	$R_{\text{max}} [\mu\text{m}]$
u hrany	0,06	0,65	0,79
15 mm od hrany	0,15	1,22	1,43

*Tab. č. 8 Drsnost při nesousledném broušení*

Měřeno	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	$R_{\text{max}} [\mu\text{m}]$
u hrany	0,07	0,62	0,91
15 mm od hrany	0,13	1,07	1,37



### 5.3.7 Vyhodnocení

Při měření drsnosti v závislosti na posuvu lze usuzovat, že vyhovujícího parametru drsnosti  $R_a = 0,8 \mu m$  je možné dosáhnout všemi měřenými posuvy. Nejlepší hodnoty se dosáhlo při nejnižším posuvu, avšak z hlediska časové náročnosti se jako nejlepší možnost jeví obrábět pomocí nejvyššího zkoušeného posuvu  $450 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  tak, aby byl čas na jednu součást co nejnižší.

Měření závislosti drsnosti na otáčkách potvrdilo, že doporučená hodnota otáček  $2\,000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  (udávaná výrobcem) je pro dané broušení optimální. Nad touto hodnotu a pod touto hodnotou se během procesu vyskytovaly vibrace, které měly za následek horší hodnoty parametrů drsnosti  $R_z$  a  $R_{max}$ .

Z porovnání sousledného a nesousledného broušení vyplývá, že nemá příliš velký vliv na drsnost. Tato volba je důležitá zejména kvůli co nejmenšímu opotřebení brusného kotouče při přejíždění přes náběžné hrany.





## 5.4 Dokončování rotační součásti pomocí brusného pásu

### 5.4.1 Popis měření

#### Vzorky

Pro experiment byly použity dva stejné trny pro lisovací formy, které byly z jedné strany opatřeny HVOF žárovým nástřikem (Obr. č. 39). Geometrie trnu přechází z válcové části do kuželové, přičemž měření bylo provedeno vždy na válcové části. Drsnost žárového nástřiku trnu č. 1 i č. 2 byla naměřena ve 3 různých místech válcové části a průměrné hodnoty jsou v následujících tabulkách (Tab. č. 9, Tab. č. 10)

Tab. č. 9 Drsnost žárového nástřiku trnu č. 1

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
3,80	24,01	28,49

Tab. č. 10 Drsnost žárového nástřiku trnu č. 2

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
3,86	24,39	29,03



Obr. č. 39 Trn s žárovým nástřikem uchycen v soustruhu

#### Použité přístroje

Experiment byl proveden na soustruhu SN1B (Obr. č. 40). Trn byl z jedné strany uchycen ve sklíčidle a z druhé strany hrotem. Dále byla do soustruhu upnuta pásová bruska 1401EK značky Stayer (Obr. č. 41) s pružným ramenem. Díky pružnému ramenu brusky lze přizpůsobit tlak brusného pásu na broušenou součást.





*Obr. č. 40 Soustruh SN1B*



*Obr. č. 41 a) Pásová bruska trubek 1401 EK [44] b) uchycení pásové brusky v soustruhu*



## Nástroje

- **DA930X-Pás s diamantovým zrnem 46  $\mu\text{m}$**

Na stránkách výrobce je uvedeno, že pás je vhodný pro broušení velmi tvrdých materiálů, jako jsou neželezné kovy, sklo, keramiky, kámen, ale také pro superslitiny, nebo povrchově kalené kovové součásti. Vyznačuje se dlouhou životností, vysokým úběrem materiálu, stálou kvalitou povrchu a vysokou teplotní odolností. [42]

Cena tohoto pásu je oproti pásu s keramickým zrnem 50x větší.



*Obr. č. 42 Pás s diamantovým zrnem [42]*

- **XK870X-Pás s keramickým zrnem 120  $\mu\text{m}$**

Pás s keramickým zrnem obsahuje univerzální keramické brusivo se samoostřícím efektem, vhodné pro nerezovou ocel, superslitiny, neželezné kovy, přičemž dosahuje dlouhé životnosti při různých aplikacích. [43]



*Obr. č. 43 Pás s keramickým zrnem [43]*



#### 5.4.2 Broušení č. 1 pásem s diamantovým zrnem-trn č. 1

Při prvním broušení diamantovým pásem byly na soustruhu nastaveny následující podmínky:

- Otáčky  $n = 360 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Smysl otáčení brusky proti smyslu otáčení soustruhu

Průměrné hodnoty drsnosti po prvním měření jsou uvedeny v tabulce (Tab. č. 11). Z této tabulky vyplývá, že se drsnost výrazně zlepšila. Co se týče parametru drsnosti  $R_a$ , jeho velikost klesla o  $3,11 \mu\text{m}$  z původní hodnoty  $R_a = 3,8 \mu\text{m}$  na hodnotu  $R_a = 0,69 \mu\text{m}$ .

Tab. č. 11 Drsnost nástřiku trnu č. 1 po 1. broušení

$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	$R_{\text{max}}[\mu\text{m}]$
0,69	5,24	5,93

Velikost úběru materiálu na trnu byla měřena na několika místech pomocí mikrometru. Rozdíl hodnot činil  $0,07 \text{ mm}$ , přičemž původní hodnota průměru trnu s nástřikem byla  $\varnothing d = 26,37 \text{ mm}$  a velikost průměru trnu se zbroušeným nástřikem byla  $\varnothing d = 26,3 \text{ mm}$ . Srovnání povrchu před broušením a po 1. broušení lze pozorovat na obrázku níže (Obr. č. 44). Na obrázku lze vidět, že zprvu matný povrch je již po prvním broušení lesklý



Obr. č. 44 a) původní povrch trnu s žárovým nástřikem b) žárový nástřik trnu po 1. broušení

#### 5.4.3 Broušení č. 2 pásem s diamantovým zrnem-trn č. 1

Při druhém broušení byly na soustruhu nastaveny stejné podmínky jako při prvním broušení. Pro měření byl použit povrch součást, na kterém již bylo provedeno první broušení. Byla snaha udržovat stejnou velikost příčného posuvu, aby byl na trn vyvíjen stejný tlak.

- Otáčky  $n = 360 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Smysl otáčení brusky proti smyslu otáčení soustruhu

Po druhém broušení se opět dosáhlo zlepšení drsnosti, avšak rozdíl již nebyl tak výrazný. Velikost parametru drsnosti se zmenšila o  $0,13 \mu\text{m}$  z průměrné velikosti  $R_a = 0,69 \mu\text{m}$  po 1. broušení na hodnotu  $R_a = 0,56 \mu\text{m}$ . Průměrné naměřené hodnoty po druhém broušení jsou uvedeny v tabulce (Tab. č. 12)





Tab. č. 12 Drsnost nástřiku trnu č. 1 po 2. broušení

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,56	4,87	6,02

Při druhém broušení se nedosáhlo tak velkého úběru materiálu, jako v případě prvního broušení. Průměr válcové části trnu se zmenšil o 0,01 mm na  $\varnothing d = 26,29$  mm.

Po druhém broušení již nebyl okem pozorovatelný rozdíl mezi stavem povrchu po prvním broušení a stavem povrchu po druhém broušení, jak jde vidět na obrázku (Obr. č. 45).



Obr. č. 45 Porovnání žárového nástřiku a) po 1. broušení b) po 2. broušení

#### 5.4.4 Broušení č. 3 pásem s diamantovým zrnem-trn č. 1

Třetí přejetí brusného pásu po povrchu trnu, který byl již dvakrát zbroušen, bylo provedeno při stejných otáčkách. Posuv se oproti předešlým dvěma pokusům zvýšil na  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a změnil se smysl otáčení vřetena soustruhu. Příčný posuv zůstal stejný jako v předešlých dvou případech.



**DIPLOMOVÁ PRÁCE** **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

- Otáčky  $n = 360 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Smysl otáčení brusky stejný jako smysl otáčení vřetena soustruhu

Ve srovnání s předešlým broušením již nedošlo k žádnému zlepšení drsnosti, naopak byly při změně smyslu otáčení vřetena soustruhu naměřeny hodnoty vyšší.

*Tab. č. 13 Drsnost nástřiku trnu č. 1 po 3. broušení*

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,60	4,88	6,26

Průměr válcové části se zmenšil o 0,01 mm, a to z hodnoty  $\varnothing d = 26,29 \text{ mm}$  na  $\varnothing d = 26,28 \text{ mm}$ .

#### 5.4.5 Broušení č. 4 pásem s keramickým zrnem-trn č. 1

Další pokus o zlepšení povrchu byl proveden pomocí pásu s keramickým zrnem s vyšší zrnitostí. Při broušení č.3 pásem s diamantovým zrnem se nedosáhlo žádné pozitivní změny parametru drsnosti, proto byly pro pokus použity stejné podmínky a příčný posuv jako v prvních dvou případech.

- Otáčky  $n = 360 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Smysl otáčení brusky proti smyslu otáčení soustruhu

Při broušení jemnějším zrnem došlo ke zlepšení parametru drsnosti z  $R_a = 0,60 \mu\text{m}$  na  $R_a = 0,46 \mu\text{m}$ .

*Tab. č. 14 Drsnost nástřiku trnu č. 1 po 4. broušení*

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,46	3,93	4,63

Úběr materiálu byl opět stejný, přičemž se průměr válcové části zmenšil o 0,01 mm z průměru  $\varnothing d = 26,28 \text{ mm}$  na  $\varnothing d = 26,27 \text{ mm}$ .



#### 5.4.6 Broušení č. 5 pásem s keramickým zrnem-trn č. 1

Poslední broušení trnu č. 1 bylo provedeno opět pásem s keramickým zrnem. Pro pokus byly použity stejné podmínky a příčný posuv jako v prvních dvou případech.

- Otáčky  $n = 360 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Smysl otáčení brusky proti smyslu otáčení soustruhu

Hodnoty drsnosti se sice zmenšili, avšak rozdíl byl zanedbatelný, a to pouze  $0,01 \mu\text{m}$ .

Tab. č. 15 Drsnost nástřiku trnu č. 1 po 5. broušení

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,45	3,51	4,29

Úběr materiálu byl tak malý, že se nepodařilo jeho hodnotu změřit a průměr válcové části tak zůstal  $\varnothing d = 26,27 \text{ mm}$ .

#### 5.4.7 Broušení č. 1 pásem s keramickým zrnem-trn č. 2

Pro první broušení byl použit nový brusný pás s keramickým zrnem a nebroušený trn č. 2. s žárovým nástřikem. Pro pokus byly použity stejné podmínky a příčný posuv jako při broušení trnu č. 1.

- Otáčky  $n = 360 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Smysl otáčení brusky proti smyslu otáčení soustruhu

Oproti původnímu nebroušenému povrchu se parametr drsnosti  $R_a$  zmenšil o  $1,6 \mu\text{m}$  na hodnotu  $R_a = 2,25 \mu\text{m}$  z hodnoty  $R_a = 3,86 \mu\text{m}$ .

Tab. č. 16 Drsnost nástřiku trnu č. 2 po 1. broušení

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
2,25	13,51	18,05



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**      **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

### 5.4.8 Broušení č. 2 pásem s keramickým zrnem-trn č. 2

Při dalším broušení trnu č. 2. byl použit stejný brusný pás s keramickým zrnem jako při prvním broušení trnu č. 2 a nastaveny stejné podmínky a příčný posuv.

- Otáčky       $n = 360 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv       $f = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Smysl otáčení brusky proti smyslu otáčení soustruhu

Parametr drsnosti  $R_a$  se při druhém broušení zmenšil méně, a to o  $0,18 \mu\text{m}$  na hodnotu  $R_a = 2,07 \mu\text{m}$  z hodnoty  $R_a = 2,25 \mu\text{m}$ .

*Tab. č. 17 Drsnost nástřiku trnu č. 2 po 2. broušení*

$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	$R_{\text{max}}[\mu\text{m}]$
2,07	13,43	16,81

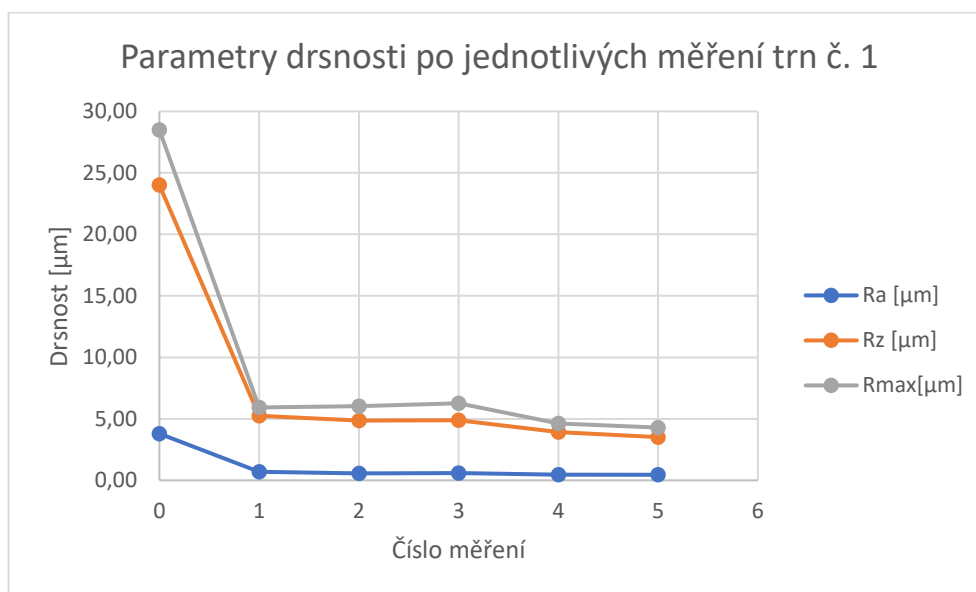
Po druhém přebroušení byl úběr materiálu válcové části

### 5.4.9 Vyhodnocení

Již při prvním broušení pomocí pásu s diamantovým zrnem došlo u trnu č. 1 k výraznému zlepšení parametru drsnosti, a to z původní  $R_a = 3,80 \mu\text{m}$  na  $R_a = 0,69 \mu\text{m}$ . Úběr materiálu byl ze všech případů nejvyšší a to přibližně  $0,035 \mu\text{m}$ . Z toho vyplývá, že předepsané drsnosti  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$  lze dosáhnout již při jednom broušení pásem s diamantovým zrnem.

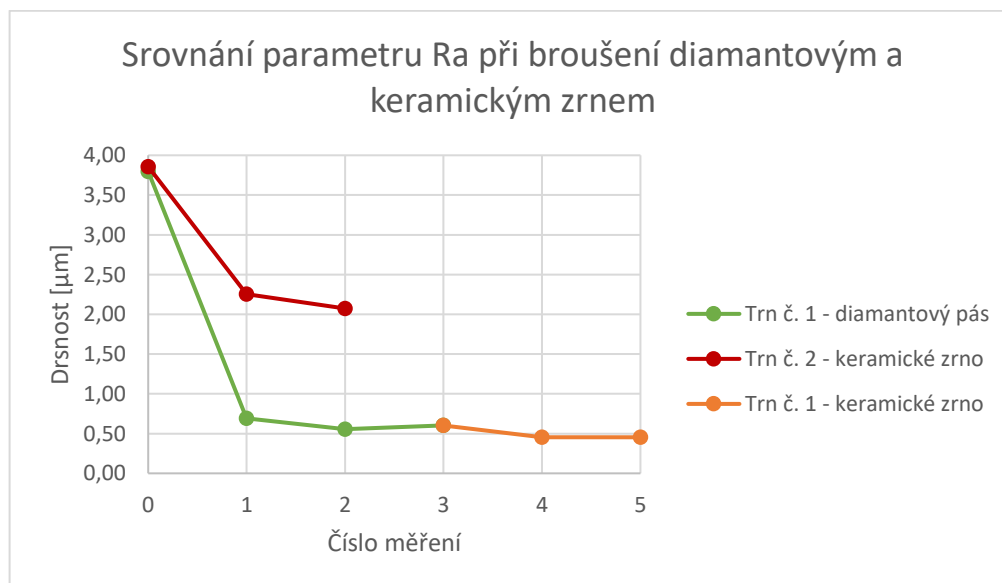
Dalším broušením pásem s diamantovým zrnem trnu č. 1 již změna parametru drsnosti nebyla tak výrazná, přičemž se po 5. broušení podařilo dosáhnout  $R_a = 0,45 \mu\text{m}$ . Při broušení č. 3 trnu č. 1 byl změněn smysl otáčení vřetena soustruhu, aby byl stejný jako smysl otáčení brusky a zvětšen posuv. Při těchto podmínkách došlo ke zhoršení parametrů drsnosti. Srovnání těchto hodnot lze vidět na grafu níže (Graf č. 4).





Graf č. 4 Změna parametrů drsnosti po měření u trnu č. 1

Při srovnání parametru drsnosti  $R_a$  u obou trnů (Graf č. 5) lze vidět, že při broušení původního žárového nástřiku došlo k většímu zlepšení drsnosti při broušení pásem s diamantovým zrnem na  $R_a = 0,69 \mu\text{m}$ . Při broušení původního žárového nástřiku trnu č. 2 pomocí pásu s keramickým zrnem se dosáhlo pouze  $R_a = 2,25 \mu\text{m}$ .



Graf č. 5 Srovnání broušení diamantovým a keramickým zrnem



Při broušení nedocházelo k výraznému zahřívání součásti jak při broušení pomocí pásu s diamantovým zrnem, tak při broušení pásem s keramickým zrnem. Při broušení pomocí keramického zrna vznikalo více prachu než při broušení diamantovým zrnem, tudíž docházelo i k většímu opotřebení. Nejvíce opotřebovaným místem byl vždy spoj na brusném pásu.



## 5.5 Dokončování rovinné plochy pomocí netkaného kotouče

### 5.5.1 Popis měření

#### Vzorky

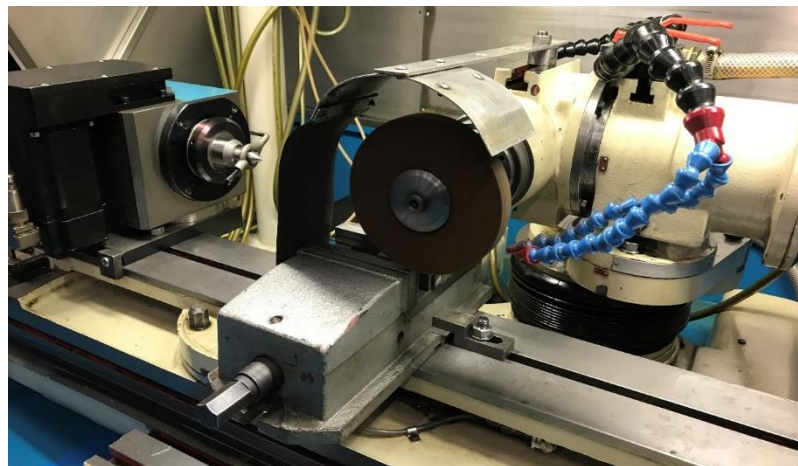
Při experimentu bylo použito 6 rovinných vzorků s žárovým nástřikem. Pět vzorků mělo rozměr 40x40 mm, šestý vzorek měl rozměry 100x200 mm. Drsnost povrchu s nástřikem byla změřena drsnoměrem a hodnoty jsou v následující tabulce (Tab. č. 18).

*Tab. č. 18 Drsnost žárového nástřiku rovinných vzorků*

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
5,50	37,00	41,00

#### Použité přístroje

Pro broušení byla použita nástrojová bruska BN 102 CNC s výkonem vřetene 4 kW, maximálními otáčkami 10 000  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$  a maximální rychlostí posuvu stolu 8 000  $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$  (Obr. č. 46).



*Obr. č. 46 Broušení rovinných vzorků naplocho nástrojovou bruskou BN 102 CNC*



## Nástroje

Jako nástroj byl použit kotouč Norton Unified Diamond Wheel STD, 6" X 3/4" X 1", U7301 NOR DIME5+. Netkané kotouče se skládají brusných zrn uchycených v rounu z nylonových vláken, které jsou spojeny dohromady. Tím se vytvoří trojrozměrná struktura, která je poddajná, pružná a velmi trvanlivá. [17]

Z výroby byl kotouč velmi neexcentrický. Bylo pozorováno házení po obvodu zhruba 2 mm. Z toho důvodu byl orovnán tvrdokovovým orovnávačem a dále byl orovnán během prvních pokusů broušením vzorečků.



### 5.5.2 Vzorek č. 1 – broušení zápichem

*Obr. č. 47 Kotouč z netkané textilie diamantovými zrny  
Norton [45]*

Na vzorku č. 1 bylo provedeno broušení zápichem, kdy se nástroj pohyboval zleva doprava bez příčného posuvu. Hloubka řezu se zvětšovala po 5  $\mu\text{m}$  na finální hloubku 0,1 mm. Řezné podmínky byly během pokusu následující:

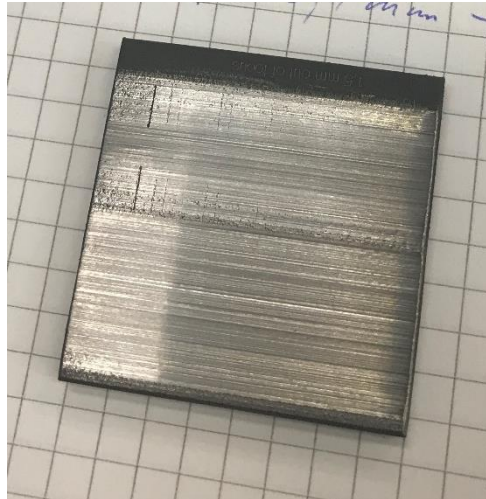
- Otáčky  $n = 2\,000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 5\,000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Příčný posuv žádný

Jak lze vidět na obrázku (Obr. č. 48), na vzorku jsou po broušení viditelné hluboké rýhy podle tvaru kotouče. Hluboké rýhy vznikly v důsledku neorovnaného brusného kotouče.



**DIPLOMOVÁ PRÁCE** **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Vzorek byl dále testován broušením na sucho a následně broušením s vodou. Bylo vypořádováno, že při daných řezných podmínkách se brusný kotouč méně zalepoval při broušení na sucho než při broušení s vodou.



*Obr. č. 48 Vzorek č. 1 po broušení netkaným diamantovým kotoučem*

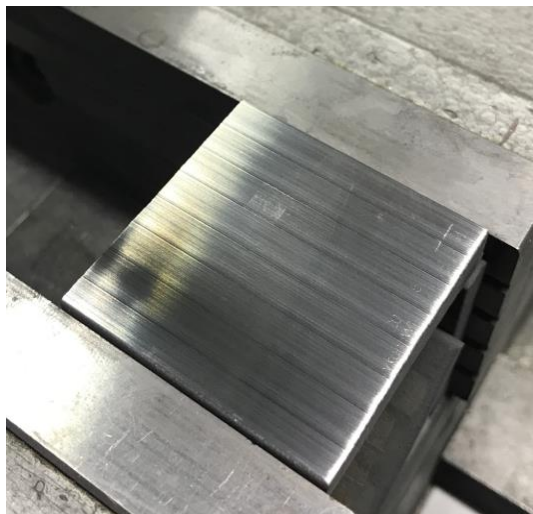
### 5.5.3 Vzorek č. 2

Na rozdíl od 1. vzorku byly všechny další vzorky broušeny s příčným přísuvem. Hloubka řezu se měnila o 5  $\mu\text{m}$  na finální hloubku 0,1 mm, tedy stejně jako v předešlém případě. Při broušení nebyla použita voda.

- Otáčky  $n = (2\ 000-2\ 500) \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 5\ 000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Příčný posuv 5 mm



Během experimentu docházelo ke zjevnému zalepování kotouče, který ještě zřejmě nebyl dostatečně orovnán, jelikož bylo pozorováno skokové zajištění do řezu.



*Obr. č. 49 Vzorek č. 2 po broušení netkaným diamantovým kotoučem*

Drsnost byla u vzorku měřena ve dvou směrech, a to podélně s brusem a příčně na brus, přičemž hodnoty jsou uvedeny v tabulkách níže (Tab. č. 19, Tab. č. 20). Z porovnání tabulek je zřejmé, že zatímco při měření drsnosti podélně s brusem bylo naměřeno pouze  $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ , při měření drsnosti příčně na brus byla hodnota výrazně vyšší, a to  $R_a = 5,2 \mu\text{m}$ .

*Tab. č. 19 Drsnost vzorku č. 2 měřena podélně s brusem*

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,30	2,10	3,30

*Tab. č. 20 Drsnost vzorku č. 2 měřena příčně na brus*

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
5,20	26,80	30,20



**DIPLOMOVÁ PRÁCE** Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

5.5.4 Vzorek č. 2 – změna příčného posuvu

Při dalším pokusu se pokračovalo na vzorku č. 2, pouze s rozdílem v příčném posuvu, který se zmenšil na 1 mm. Nástroj sjížděl po 10  $\mu\text{m}$  na finální hodnotu 0,3 mm. Po tomto pokusu byl kotouč téměř celý orovnaný, avšak ještě docházelo k jeho orovnávaní.

- Otáčky  $n = 2\,500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 5\,000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Příčný posuv 1 mm

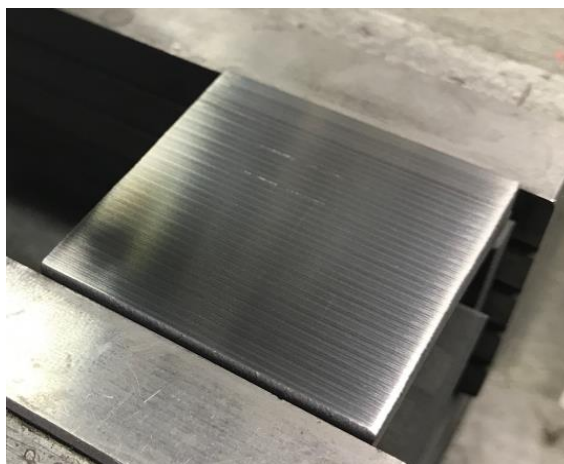
Z tabulek níže (Tab. č. 21, Tab. č. 22) lze konstatovat, že při dalším broušení a zmenšení příčného posuvu nedošlo při měření podélně s brusem k velkému rozdílu oproti prvnímu broušení. Avšak hodnoty u broušení příčně s brusem se výrazně zmenšily na  $R_a = 0,86 \mu\text{m}$ .

Tab. č. 21 Drsnost vzorku č. 2 po druhém broušení podélně s brusem

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,29	1,60	2,20

Tab. č. 22 Drsnost vzorku č. 2 po druhém broušení příčně s brusem

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,86	4,90	5,30



Obr. č. 50 Vzorek č. 2-2. broušení



**DIPLOMOVÁ PRÁCE** **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

5.5.5 Vzorek č. 3

U vzorku č. 3 se zvýšily otáčky z  $2\,500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  na  $3\,500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  a nástroj sjel na hloubku 0,05 mm. Během pokusu se zmenšilo zanášení kotouče a kotouč již byl skoro celý orovnaný.

- Otáčky  $n = 3\,500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 5\,000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Příčný posuv 1 mm

Naměřená drsnost vzorku ve směru podélně s brusem po jednom přejetí danými podmínkami je sepsaná v tabulce níže (Tab. č. 23). Pro testování vlivu vícenásobného přejetí nástrojem byl stejný vzorek broušen dvakrát v obou směrech. Naměřené hodnoty u 3x broušeného vzorku jsou uvedeny v Tab. č. 24 a lze z nich konstatovat, že se ve srovnáním s jedním broušením všechny parametry drsnosti výrazně zlepšily. Vzhled povrchu po vícenásobném broušení lze vidět na Obr. č. 51.

Tab. č. 23 Drsnost vzorku č. 3 podélně s brusem

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
2,3-4,5	13-27	19-32

Tab. č. 24 Drsnost 3x broušeného vzorku č. 3 podélně s brusem

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,27	1,60	2,00



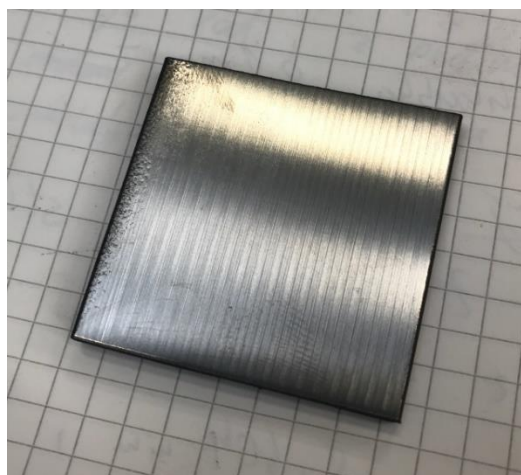


Obr. č. 51 Povrch 3x broušeného vzorku č. 3

#### 5.5.6 Vzorek č. 4

Na vzorečku č. 4 se zvětšila hloubka, a to na 0,1 mm., jiné podmínky zůstaly stejné. Hodnoty drsnosti na vzorku bohužel nebyly proměřeny.

- Otáčky  $n = 3\,500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 5\,000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Příčný posuv 1 mm



Obr. č. 52 Vzorek č. 4 po dvou broušeníh tam a zpět



**DIPLOMOVÁ PRÁCE** **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

5.5.7 Vzorek č. 5

Vzorek č. 5 byl broušen pouze jednou, přičemž první polovina byla broušena bez použití vody a druhá polovina s použitím vody na hloubku 0,3 mm.

- Otáčky  $n = 3\,500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 5\,000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Příčný posuv 0,5 mm

Z porovnání naměřené drsnosti při použití vody a při broušení na sucho (Tab. č. 25, Tab. č. 26) lze říct, že při broušení s vodou došlo ke zlepšení všech parametrů drsnosti. U broušení s vodou dosáhl parametr  $R_a = 0,13 \mu\text{m}$ .

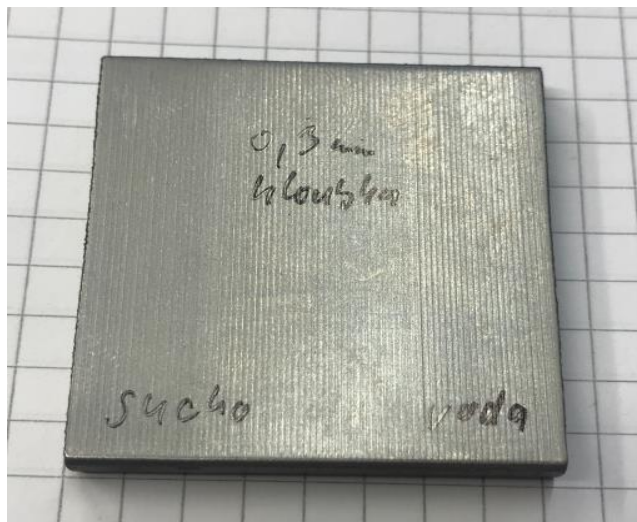
Tab. č. 25 Drsnost vzorku č. 5 podélně s brusem-broušení s vodou

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,13	0,90	1,30

Tab. č. 26 Drsnost vzorku č. 5 podélně s brusem-za sucha

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,18	1,00	1,60

Na povrchu vzorku (Obr. č. 53) nelze okem pozorovat rozdíl mezi oběma způsoby broušení. Při broušení bez vody byl během broušení cítit zápach, zřejmě vznikající pálením pryskyřice v kotouči.



Obr. č. 53 Povrch vzorku č. 5 při broušení na sucho a broušení s vodou

#### 5.5.8 Vzorek č. 6

U velkého vzorku č. 6 se pouze zvětšil posuv na  $6\,000\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Vzorek byl broušen pouze jednou, přičemž z jedné strany byl broušen na sucho bez použití vody a z druhé strany s použitím vody na hloubku  $0,3\text{ mm}$ .

- Otáčky  $n = 3\,500\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- Posuv  $f = 6\,000\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- Příčný posuv  $0,5\text{ mm}$

Při záběru kotouče  $0,3\text{ mm}$  byl naměřen úběr tloušťky materiálu vzorku  $0,14\text{ mm}$ . Naměřená drsnost vzorku podélně s brusem se při použití vody lišila pouze v hodnotě  $R_{max}$ . Parametr drsnosti byl v obou případech  $R_a = 0,14\text{ }\mu\text{m}$ .

Tab. č. 27 Drsnost vzorku č. 6 podélně s brusem-broušení s vodou

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,14	0,90	1,30

Tab. č. 28 Drsnost vzorku č. 6 podélně s brusem-broušení za sucha

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
0,14	0,90	1,10



Obr. č. 54 Vzorek č. 6 po broušení s vodou a na sucho

### 5.5.9 Vyhodnocení

Z provedených experimentů vyplývá, že kvalita povrchu velmi závisí na správném orovnání kotouče. Při prvních několik pokusech, kdy byl kotouč excentrický, docházelo k zanášení kotouče, přičemž na vzorku byly znatelné stopy po nástroji. Ty by zřejmě šly zahladit následným leštěním, avšak výrazně by se tím zvýšil potřebný čas.

Vzorky č. 5 a č. 6 byli broušeny s vodou a na sucho při odlišných otáčkách  $5\,000\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $6\,000\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  (Tab. č. 29). U broušení s vodou byla naměřená drsnost u obou vzorků téměř identická. Ani rozdíl u broušení na sucho bez vody nebyl velký. Při nižších otáčkách byly u broušení na sucho naměřeny horší hodnoty než u vyšších otáček.

Tab. č. 29 Srovnání broušení s vodou a na sucho při odlišných otáčkách

Vzorek	Otáčky [ot/min]	S vodou			Na sucho		
		Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
5	5000	0,13	0,90	1,30	0,18	1,00	1,60
6	6000	0,14	0,90	1,30	0,14	0,90	1,10



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE      Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Vzorek č. 2 byl broušen nejdříve s příčným posuvem 5 mm a poté byla stejná plocha broušena s příčným posuvem 1 mm (Tab. č. 30). U měření podélně s brusem je rozdíl pouze malý. Markantního zlepšení se však dosáhlo při měření příčně na brus u přebroušení plochy pomocí menšího příčného posuvu. Drsnost se zmenšila zhruba na pětinu až šestinu původních hodnot po 1. broušení. Z toho vyplývá, že lepších hodnot drsnosti lze dosáhnout při použití menšího příčného posuvu.

*Tab. č. 30 Srovnání 1x a 2x broušeného vzorku č. 2*

Příčný posuv [mm]	Broušeno	Podélně s brusem			Příčně na brus		
		Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax[μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax[μm]
5	1x	0,30	2,10	3,30	5,20	26,80	30,20
1	2x	0,29	1,60	2,20	0,86	4,90	5,30

Jak lze vidět na fotografii kotouče po provedeném testování (Obr. č. 55), povrch kotouče je poměrně zalepený kobaltovým pojivem. I přesto broušený povrch dosahoval dobrých výsledků. Při měření bylo sledováno, že při sousledné nájezdu kotouč zaobljuje náběžnou hranu vzorku a při nesousledném nájezdu hranu téměř nezaobljuje.



*Obr. č. 55 Vzhled brusného kotouče NORTON po broušení šesti vzorků*



## 5.6 Diskuse výsledků

Pro srovnání jednotlivých metod byla spočítána efektivita  $E$  jako součin posuvu a šířky záběru. Šířka záběru u rovinného broušení kotoučem z netkané textilie při výpočtu byla rovna příčnému posuvu. U fibrového kotouče byla šířka záběru uvažovaná při největším měřeném přitlaku nástroje a při pásovém broušení byla počítána šířka záběru jako obvod broušené součásti. Pro tyto hodnoty byly do tabulky Tab. č. 31 vyneseny příslušné naměřené parametry drsnosti  $R_a$ , dosažené při jednom broušení součásti.

- broušení kotoučem z netkané textilie

$$f = 5\,000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$b = 0,5 \text{ mm}$$

$$E = f \cdot b = 500 \cdot 0,5 = 25 \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1} \quad (2)$$

- diamantový fibrový kotouč

$$f = 224 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$b = 66 \text{ mm}$$

$$E = f \cdot b = 22,4 \cdot 6,6 = 148 \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1} \quad (3)$$

- broušení diamantovým a keramickým brusným pásem

$$f = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$b = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 26,4 = 166 \text{ mm}$$

$$E = f \cdot b = 5 \cdot 16,6 = 83 \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1} \quad (4)$$



**DIPLOMOVÁ PRÁCE** **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Z porovnání naměřených výsledků po prvním broušení (Tab. č. 31) vyplývá, že nejlepší drsnosti  $R_a = 0,14 \mu\text{m}$  dosahoval diamantový kotouč z netkané textilie NORTON, avšak jeho efektivita byla nejnižší. Dle očekávání, broušení keramickým pásem nedosahovalo požadovaných hodnot parametru drsnosti. Co se týče efektivity počítané jako zbroušenou plochu za jednotku času, nejvyšší dosahoval diamantový fibrový kotouč.

*Tab. č. 31 Srovnání testovaných metod*

Nástroj	Parametr drsnosti $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Efektivita $E$ [ $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ ]
Kotouč z netkané textilie	0,14	25
Diamantový fibrový kotouč na pružném unašeči	0,34	148
Diamantový brusný pás	0,69	83
Keramický brusný pás	2,25	83





## 6 Závěr

Pomocí žárových nástřiků lze zlepšovat vlastnosti součástí a prodlužovat jejich životnost. Povrch nástřiku na vysoce namáhaných lisovacích nástrojích nespĺňuje požadavky drsnosti, které jsou nutné pro zajištění správné funkce těchto součástí. V současnosti však neexistuje žádný univerzální nástroj ani metoda, pomocí kterých by bylo možné tvrdé žárové nástřiky jednoduše opracovávat. Z tohoto důvodu je nutné provést dostatek experimentů, které by pomohly v rozvoji této problematiky. V práci byly vyzkoušeny tři metody broušení, jimiž lze dosáhnout požadované drsnosti povrchu menší než  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$  na žárovém nástřiku WC-Co-Cr, použitého na dílech lisovacích nástrojích.

Nejdříve byly shrnuty principy, vlastnosti a využití různých metod nanášení žárových nástřiků. Dále byla popsána problematika flexibilního broušení a leštění tvrdých povlaků. Kvůli vysoké tvrdosti povlaků lze používat hlavně nástroje s diamantovým zrnem, případně se zrnem z kubického nitridu bóru. Také byly uvedeny vhodné nástroje, které jsou dostatečně poddajné pro práci s tvrdými povlaky a možnosti použití různých strojů pro broušení tvrdých povlaků. Následoval přehled návrhu možných technologií dokončování žárových nástřiků, z nichž je broušení jednou z nejvhodnějších a nejpoužívanějších. To bylo dále zkoumáno v praktické části, kde byly testovány tři různé technologie dokončování žárových nástřiků, a to broušení pomocí diamantového fibrového kotouče, broušení diamantovým a keramickým brusným pásem a broušení kotoučem z netkané textilie.

Všemi třemi testovanými metodami lze dosáhnout požadované drsnosti povrchu menší než  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ , přičemž rozdíl byl zejména v produktivitě. Nejlepších hodnot parametru drsnosti  $R_a = 0,14 \mu\text{m}$  dosahoval kotouč z netkané textilie, avšak efektivita jeho použití byla ve srovnání s ostatními metodami nejhorší. Při použití tohoto kotouče by bylo možné během minuty dokončit plochu  $25 \text{ cm}^2$ . Vhodným kompromisem je diamantový fibrový kotouč, který dosahoval největší efektivity  $148 \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$  a současně přijatelné hodnoty parametru drsnosti  $R_a = 0,34 \mu\text{m}$ .



**DIPLOMOVÁ PRÁCE** Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Tyto hodnoty lze brát pouze jako orientační, jelikož je třeba brát v úvahu, že drsnost a stejně tak efektivita závisí na mnoha procesních podmínkách a parametrech, které je potřeba dále prozkoumat a optimalizovat. Výsledky však mohou sloužit jako ověření, zda jsou tyto testované metody vhodné pro další výzkum flexibilního broušení tvrdých povlaků.



## 7 Citovaná literatura

- [1] HENKE, Henry, Dietrich ADAM, Andreas KÖHLER a Robert HEIMANN. Development and testing of HVOF-sprayed tungsten carbide coatings applied to moulds for concrete roof tiles. In: *Wear* [online]. 2004, , s. 81-87 [cit. 2021-07-03]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(03)00348-X
- [2] ZHONG, Zhaowei. MACHINING OF THERMALLY SPRAYED WC-Co COATINGS. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. 2007, **16**(1), 103-112 [cit. 2021-06-17]. ISSN 1042-6914. Dostupné z: doi:10.1081/AMP-100103700
- [3] *A Review on Thermal Spray Coating Processes* [online]. 2016, [cit. 2021-04-10]. ISSN 2455–1392. Dostupné z: <http://poudrafshan.com/wp-content/uploads/2019/05/A-Review-on-Thermal-Spray-Coating-Processes-1.pdf>
- [4] ČELKO, Ladislav, David JECH, Pavel KOMAROV, Michaela REMEŠOVÁ a Ivana ROČŇÁKOVÁ. Technologie žárových nástřiků: Aplikace, kvalita povlaků a rizika při jejich výrobě. *Povrcháři* [online]. (3), 3-6 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: [http://povrchari.cz/kestazeni/201703\\_povrchari.pdf](http://povrchari.cz/kestazeni/201703_povrchari.pdf)
- [5] Techniques. *Griekspoor Thermal Coating* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.griekspoorthermalcoatings.com/techniques>
- [6] TALIB, R.J., S. SAAD, M.R.M TOFF a H. HASHIM. THERMAL SPRAY COATING TECHNOLOGY – A REVIEW. *Solid State Science and Technology* [online]. Malaysia, 2003, (1), 109-117 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.678.5931&rep=rep1&type=pdf>
- [7] Žárové stříkání. In: *PLASMAMETAL* [online]. [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <http://plasmametal.mrazon.cz/pouzite-technologie>
- [8] WIELAGE, Bernhard, Andreas WANK, Hanna POKHMURSKA, Thomas GRUND, Christian RUPPRECHT, Guido REISEL a Eduard FRIESEN. Development and trends in HVOF spraying technology. In: *Surface and Coatings Technology* [online]. Chemnitz,



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**      **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Německo, 2006, , s. 2032-2037 [cit. 2021-06-09]. ISSN 02578972. Dostupné z:  
doi:10.1016/j.surfcoat.2006.04.049

[9] POKORNÝ, Petr a Vlastimil BROŽEK. Úvod do technologie povrchové úpravy plazmovým nástřikem (1. část). *Tribotechnika* [online]. TechPark [cit. 2021-07-07]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62012/uvod-do-technologie-povrchove-upravy-plazmovym-nastrikem-1-cast.html>

[10] DAVIS, J. R., ed. *Handbook of thermal technology: prepared under the direction of the Thermal Spray Society Training Committee*. [online]. First printing. United States of America, 2004 [cit. 2021-07-04]. ISBN 0-87170-795-0. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=S0PryYc9T70C&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>

[11] Aplikace žárových nástřiků. *TRIBO ENGINEERING* [online]. [cit. 2021-07-19]. Dostupné z: <https://www.triboing.cz/zarove-nastriky.html>

[12] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění* [online]. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999 [cit. 2021-07-07]. ISBN 978-80-01-03752-2.

[13] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II*. 2. díl. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, . ISBN 978-80-248-1822-1.

[14] GOSTIMIROVIČ, M., D. RODIC, P. KOVAČ, D. JESIC a N. KULUNDŽIC. INVESTIGATION OF THE CUTTING FORCES IN CREEP-FEED SURFACE GRINDING PROCESS. *Journal of Production Engineering* [online]. 2015, **18**(2) [cit. 2021-07-08]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/289497830\\_INVESTIGATION\\_OF\\_THE\\_CUTTING\\_FORCES\\_IN\\_CREEP-FEED\\_SURFACE\\_GRINDING\\_PROCES](https://www.researchgate.net/publication/289497830_INVESTIGATION_OF_THE_CUTTING_FORCES_IN_CREEP-FEED_SURFACE_GRINDING_PROCES)

[15] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. 1. Europa Sobotáles, 2007. ISBN 987-80-86706-19-1.



**DIPLOMOVÁ PRÁCE** **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

- [16] *Diamantové a CBN nástroje* [online]. In: . [cit. 2021-07-03]. Dostupné z: <https://www.abefekt.cz/wp-content/uploads/2019/05/05-catalogue-5-tm23-150dpi-cs.pdf>
- [17] How to Use Non-Woven Abrasives. *Norton Abrasives* [online]. [cit. 2021-07-02]. Dostupné z: <https://www.nortonabrasives.com/en-gb/resources/expertise/how-use-non-woven-abrasives>
- [18] Typy a použití brusných netkaných textilií. In: *Abrasive* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://eshop.abrasiv.cz/typy-a-pouziti-brusnych-netkanych-textilii>
- [19] 3M™ Scotch-Brite™ SC-DH Leštící Disk, 125 mm x 22 mm, A MED. *3M* [online]. [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: [https://www.3mcesko.cz/3M/cs\\_CZ/p/d/v101178410/](https://www.3mcesko.cz/3M/cs_CZ/p/d/v101178410/)
- [20] Brusný pás netkaná textilie SC-FE 100x314 Medium. In: *Abrasive* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://eshop.abrasiv.cz/brusny-pas-netkana-textilie-sc-fe-100x314-medium>
- [21] TECHNICKÉ INFORMACE: VŠOBEČNÉ INFORMACE O BRUSIVU NA FLEXIBILNÍ PODLOŽCE. *Rekord abrasives* [online]. [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <http://www.rekordabrasives.cz/technicke-informace/#flexibiln%C3%AD%20podlo%C5%BEka>
- [22] Nástroje pro jemné broušení a leštění. In: *ABEFEKT* [online]. [cit. 2021-07-09]. Dostupné z: <https://www.abefekt.cz/wp-content/uploads/2019/05/04-catalogue-4-tm23-150dpi-cs.pdf>
- [23] FAUCHAIS, Pierre, Joachim HEBERLEIN a Maher BOULOS. *Thermal Spray Fundamentals* [online]. In: . [cit. 2021-07-09]. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-68991-3
- [24] Abrasive with diamond: for surfaces of extreme hardness: Vitex-VSM. In: *Feria virtual* [online]. [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <http://www.interempresas.net/Hardware/Companies-Products/Product-Abrasive-with-diamond-Vitex-VSM-57270.html>



**DIPLOMOVÁ PRÁCE** **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

- [25] 3M™ Rubber Slotted Expander Wheel. In: *3M: Science. Applied to life.* [online]. [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: [https://www.3m.com/3M/en\\_US/p/d/b40066205/](https://www.3m.com/3M/en_US/p/d/b40066205/)
- [26] Product Overview: C130E Slotted Expander Wheels. *Contact Rubber Corporation* [online]. [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <https://www.contactrubber.com/products/expander-wheels-mandrels/c130e-slotted-expander-wheels/>
- [27] Non Woven 3M Scotch Brite Belt. In: *IndiaMart* [online]. [cit. 2021-07-18]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/3m-scotch-brite-belt-6468467048.html>
- [28] RUČNÍ PÁSOVÁ BRUSKA A LEŠTIČKA PÁSOVEC 40V. In: *For steel* [online]. [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.forsteel.eu/rucni-pasova-bruska-a-lesticka-pasovec-40v/#>
- [29] Fast, Easy Robotic Grinding. *FABTECH* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://www.fabtechexpo.com/blog/2020/01/05/fast-easy-robotic-grinding>
- [30] Active Orbital Kit 905 Model: AOK/905 FerRobotics Inc. *Association for advancing automation* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://trends.directindustry.com/ferrobotics-compliant-robotic-technology-gmbh/project-88538-1107769.html>
- [31] KUKA ready2\_grind. *KUKA* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: [https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/kuka-ready2\\_use/kuka-ready2\\_grind](https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/kuka-ready2_use/kuka-ready2_grind)
- [32] RBS372 Series Robotic Belt Sander. *PushCorp* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://pushcorp.com/product/rbs372-series/>
- [33] ABG ACTIVE BELT GRINDER. In: *Ferrobotics* [online]. [cit. 2021-07-18]. Dostupné z: <https://www.ferrobotics.com/app/uploads/2020/12/2020-ABG-Datasheet-EN-web.pdf>
- [34] MAITI, A., N. MUKHOPADHYAY a R. RAMAN. Improving the Wear Behavior of WC-CoCr-based HVOF Coating by Surface Grinding. In: *Journal of Materials*



**DIPLOMOVÁ PRÁCE      Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

*Engineering and Performance* [online]. 2009, , s. 1060-1066 [cit. 2021-06-20]. ISSN 1059-9495. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-009-9354-5

[35] FRANZEN, V., M. TROMPETER, A. BROSIUS a A. TEKKAYA. Finishing of Thermally Sprayed Tool Coatings for Sheet Metal Forming Operations by Roller Burnishing. In: *International Journal of Material Forming* [online]. 2010, , s. 147-150 [cit. 2021-07-17]. ISSN 1960-6206. Dostupné z: doi:10.1007/s12289-010-0728-x

[36] BEAUCAMP, Anthony, Yoshiharu NAMBA a Phillip CHARLTON. Process mechanism in shape adaptive grinding (SAG). In: *CIRP Annals* [online]. 2015, , s. 305-308 [cit. 2021-07-17]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2015.04.096

[37] GHOSH, Gourhari, Ajay SIDPARA a P.P. BANDYOPADHYAY. Theoretical and experimental investigation of material removal rate in shape adaptive grinding of HVOF sprayed WC-Co coating. In: *Precision Engineering* [online]. 2021 [cit. 2021-07-17]. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2021.07.009

[38] BARLETTA, Massimiliano, Gianluca RUBINO, Giovanni BOLELLI a Luca LUSVARGHI. Fast Regime Fluidized Bed Machining (FR-FBM) of Thermally Sprayed Coatings. In: *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2008, , s. 796-804 [cit. 2021-07-19]. ISSN 1059-9630. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-008-9266-1

[39] LARISSA MEINCKE, Eickhoff a Pedrali PATRÍCIA CAROLINA. Study and characterization of the alloy WC-Co-Cr deposited by HVOF. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, **45**, 4315-4320 [cit. 2021-07-08]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.12.845

[40] PICAS, Josep, Miquel PUNSET, M. BAILE, Enric MARTÍN a Antonio FORN. Properties of WC-CoCr Based Coatings Deposited by Different HVOF Thermal Spray Processes. *Plasma Processes and Polymers* [online]. 2009, **6**(1), 948-953 [cit. 2021-07-12]. ISSN 16128850. Dostupné z: doi:10.1002/ppap.200932402





**DIPLOMOVÁ PRÁCE** **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

- [41] TICHÁ, Šárka. *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE: část 1* [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2021-07-19]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
- [42] Product Data Sheet Belts: DA930X. In: *VSM Abrasives* [online]. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: [https://es.vsmabrasives.com/fileadmin/ftp-upload/product\\_datasheets/VSM\\_DA930X\\_EN.pdf](https://es.vsmabrasives.com/fileadmin/ftp-upload/product_datasheets/VSM_DA930X_EN.pdf)
- [43] Product Data Sheet Belts: XK870X. In: *VSM Abrasives* [online]. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: [https://uk.vsmabrasives.com/fileadmin/ftp-upload/product\\_datasheets/VSM-Product-Data-Sheet-XK870X-EN.pdf](https://uk.vsmabrasives.com/fileadmin/ftp-upload/product_datasheets/VSM-Product-Data-Sheet-XK870X-EN.pdf)
- [44] 1401 EK - BELT STAYER - LT - PIPE GRINDER. In: *FERSHOP* [online]. [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://www.fershop.eu/grinders-portable/16251-sander-to-tube-stayer-lt-1401-ek-.html>
- [45] Norton Unified Diamond Wheel STD, 6" X 3/4" X 1", U7301 NOR DIME5 +. In: *Alloy Coating Supply* [online]. [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://store.alloycoatingsupply.com/shop/abrasives-and-finishing-solutions/superabrasives/diamond-unitized-wheels/norton-unified-diamond-wheel-std-6-x-3-4-x-1-u7301-nor-dime5/>



## 8 Seznam obrázků

Obr. č. 1 Princip vytváření žárových nástřiků [5].....	2
Obr. č. 2 Detail vrstvy žárového nástřiku [7] .....	3
Obr. č. 3 Princip nanášení žárového nástřiku metodou HVOF [7].....	5
Obr. č. 4 Princip nanášení žárového nástřiku plazmou [7].....	6
Obr. č. 5 Princip nanášení žárového nástřiku elektrickým obloukem [7].....	7
Obr. č. 6 Princip nanášení žárového nástřiku plamenem [7] .....	7
Obr. č. 7 Princip nanášení žárového nástřiku detonací [10] .....	8
Obr. č. 8 Mechanismus procesu broušení [14] .....	12
Obr. č. 9 Obvodové (vlevo) a čelní (vpravo) broušení [13] .....	13
Obr. č. 10 Příklady obvodového broušení brusným kotoučem [13].....	13
Obr. č. 11 Příklady čelního broušení brusným kotoučem [13].....	14
Obr. č. 12 Příklady pásového broušení [12] .....	15
Obr. č. 13 Druhy brusiv [15].....	15
Obr. č. 14 Struktura netkané textilie [18] .....	18
Obr. č. 15 Kotouč Scotch-brite firmy 3M (vlevo) [19] a brusný pás z netkané textilie (vpravo) [20] .....	19
Obr. č. 16 Složení vláknového kotouče [22].....	20
Obr. č. 17 Vláknový kotouč na flexibilním unašeči [22].....	20
Obr. č. 18 Brusný pás s diamantovým zrnem [24] .....	21
Obr. č. 19 Pružný brusný prstenec firmy CRC vlevo [26] a v kombinaci s pásem z netkané textilie vpravo [27].....	22
Obr. č. 20 Ruční pásová bruska trubek [28] .....	24
Obr. č. 21 Horizontální rovinná bruska [15].....	25
Obr. č. 22 Rovinné čelní broušení [15].....	25
Obr. č. 23 Rovinné obvodové broušení [15].....	26
Obr. č. 24 Brusná aktivní hlava AGB Ferrobotics [30] .....	27
Obr. č. 25 Robotické rameno Ready2_grind [29].....	28
Obr. č. 26 Robotická pásová bruska firmy PushCorp [32].....	29
Obr. č. 27 ABG Active Belt Grinder [33].....	29



**DIPLOMOVÁ PRÁCE                      Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Obr. č. 28 Drsnost nástřiku po válečkování [35] .....	33
Obr. č. 29 Princip Shape Adaptive Grinding (SAG) [36].....	33
Obr. č. 30 Příčný řez vzorkem, optický mikroskop při zvětšení 100x .....	36
Obr. č. 31 Měření střední aritmetické úchytky profilu Ra [41] .....	37
Obr. č. 32 Měření největší výšky profilu Rz [41].....	37
Obr. č. 33 Tvar a povrch testovaného vzorku.....	38
Obr. č. 34 Konzolová frézka F2V s naklopeným vřeteníkem .....	39
Obr. č. 35 Vzhled plochy při broušení různým tlakem nástroje .....	41
Obr. č. 36 Povrch broušený různým posuvem.....	44
Obr. č. 37 Schéma broušení fibrovým kotoučem sousledně (vlevo) a poté nesousledně (vpravo).....	45
Obr. č. 38 Sousledné (vlevo) a nesousledné (vpravo) broušení.....	46
Obr. č. 39 Trn s žárovým nástřikem uchycen v soustruhu .....	48
Obr. č. 40 Soustruh SN1B .....	49
Obr. č. 41 a) Pásová bruska trubek 1401 EK [44] b) uchycení pásové brusky v soustruhu	49
Obr. č. 42 Pás s diamantovým zrnem [42].....	50
Obr. č. 43 Pás s keramickým zrnem [43].....	50
Obr. č. 44 a) původní povrch trnu s žárovým nástřikem b) žárový nástřik trnu po 1. broušení .....	52
Obr. č. 45 Porovnání žárového nástřiku a) po 1. broušení b) po 2. broušení .....	53
Obr. č. 46 Broušení rovinných vzorků naplocho nástrojovou bruskou BN 102 CNC .....	59
Obr. č. 47 Kotouč z netkané textilie diamantovými zrny Norton [45] .....	60
Obr. č. 48 Vzorek č. 1 po broušení netkaným diamantovým kotoučem.....	61
Obr. č. 49 Vzorek č. 2 po broušení netkaným diamantovým kotoučem.....	62
Obr. č. 50 Vzorek č. 2-2. broušení.....	63
Obr. č. 51 Povrch 3x broušeného vzorku č. 3 .....	65
Obr. č. 52 Vzorek č. 4 po dvou broušeních tam a zpět.....	65
Obr. č. 53 Povrch vzorku č. 5 při broušení na sucho a broušení s vodou.....	67
Obr. č. 54 Vzorek č. 6 po broušení s vodou a na sucho.....	68
Obr. č. 55 Vzhled brusného kotouče NORTON po broušení šesti vzorků.....	69



## 9 Seznam tabulek

Tab. č. 1 Vlastnosti zkoušeného nástřiku WC-Co-Cr.....	36
Tab. č. 2 Drsnost vstupního povrchu po strojním broušení .....	38
Tab. č. 3 Drsnost okrajů s žárovým nástřikem .....	38
Tab. č. 4 Drsnost rovinné plochy po 1. broušení .....	40
Tab. č. 5 Drsnost v závislosti na přítlaku nástroje .....	42
Tab. č. 6 Naměřené hodnoty drsnosti v závislosti na posuvu.....	43
Tab. č. 7 Drsnost při sousledném broušení.....	46
Tab. č. 8 Drsnost při nesousledném broušení .....	46
Tab. č. 9 Drsnost žárového nástřiku trnu č. 1 .....	48
Tab. č. 10 Drsnost žárového nástřiku trnu č. 2 .....	48
Tab. č. 11 Drsnost nástřiku trnu č. 1 po 1. broušení .....	51
Tab. č. 12 Drsnost nástřiku trnu č. 1 po 2. broušení .....	53
Tab. č. 13 Drsnost nástřiku trnu č. 1 po 3. broušení .....	54
Tab. č. 14 Drsnost nástřiku trnu č. 1 po 4. broušení .....	54
Tab. č. 15 Drsnost nástřiku trnu č. 1 po 5. broušení .....	55
Tab. č. 16 Drsnost nástřiku trnu č. 2 po 1. broušení .....	55
Tab. č. 17 Drsnost nástřiku trnu č. 2 po 2. broušení .....	56
Tab. č. 18 Drsnost žárového nástřiku rovinných vzorků .....	59
Tab. č. 19 Drsnost vzorku č. 2 měřena podélně s brusem .....	62
Tab. č. 20 Drsnost vzorku č. 2 měřena příčně na brus.....	62
Tab. č. 21 Drsnost vzorku č. 2 po druhém broušení podélně s brusem .....	63
Tab. č. 22 Drsnost vzorku č. 2 po druhém broušení příčně s brusem.....	63
Tab. č. 23 Drsnost vzorku č. 3 podélně s brusem .....	64
Tab. č. 24 Drsnost 3x broušeného vzorku č. 3 podélně s brusem.....	64
Tab. č. 25 Drsnost vzorku č. 5 podélně s brusem-broušení s vodou .....	66
Tab. č. 26 Drsnost vzorku č. 5 podélně s brusem-za sucha .....	66
Tab. č. 27 Drsnost vzorku č. 6 podélně s brusem-broušení s vodou .....	67
Tab. č. 28 Drsnost vzorku č. 6 podélně s brusem-broušení za sucha .....	67
Tab. č. 29 Srovnání broušení s vodou a na sucho při odlišných otáčkách.....	68



**DIPLOMOVÁ PRÁCE** Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Tab. č. 30 Srovnání 1x a 2x broušeného vzorku č. 2 .....	69
Tab. č. 31 Srovnání testovaných metod .....	71