

# Vliv volby nástroje na jakost povrchu formy

Bc. Petr Mana

---

Diplomová práce  
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Petr Mana  
Osobní číslo: T21425  
Studijní program: N3909 Procesní inženýrství  
Studijní obor: Výrobní inženýrství  
Forma studia: Prezenční  
Téma práce: Vliv volby nástroje na jakost povrchu formy

## Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma
2. Provedte analýzu metod obrábění
3. Navrhněte a realizujte experiment
4. Analyzujte naměřená data

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

**Seznam doporučené literatury:**

KOCMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 9788072047222.

HOLEŠOVSKÝ, František a Martin NOVÁK. Obrábění a montáže. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2012, 237 s. Skripta. ISBN 9788074145308.

MAREK, Jiří a Petr BLECHA. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010, 420 s. MM speciál. ISBN 9788025479803.

WHITEHOUSE, D. J., 2011. Handbook of surface and nanometrology. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-1-4200-8201-2.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Řezníček, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2023

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou víceosého frézování tvarových ploch simulující dutinu formy. V teoretické části je rozebrána problematika technologie frézování, jsou popsány nástroje pro frézování a princip CNC obrábění. Zmíněny jsou také základní informace z odvětví vyhodnocení jakosti povrchu.

Praktická část se zabývá zkoumáním vlivu dvou soudečkových dokončovacích nástrojů na tvarovou plochu při daných řezných podmínkách. V praktické části je popsán postup přípravy vzorků a obecný postup programování G-kódu v softwaru NX. Výsledkem praktické části je vyhodnocení řezných sil, drsnosti povrchu a řezných třísek. Všechny vzorky byly vyrobeny z konstrukční oceli ČSN 12 050 (1.1191).

**Klíčová slova:** víceosé frézování, dokončování, soudečková fréza, CNC frézování, řezné síly, jakost povrchu

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the problem of multi-axis milling of shaped surfaces simulating a mould cavity. In the theoretical part the milling technology is discussed, the milling tools and the principle of CNC machining are described. Basic information from the field of surface quality evaluation is also mentioned.

The practical part deals with the investigation of the effect of two spindle finishing tools on the form surface under given cutting conditions. The practical part describes the sample preparation procedure and the general procedure for programming G-code in NX software. The practical part results in the evaluation of cutting forces, surface roughness and cutting chips. All specimens were made of structural steel CSN 12 050 (1.1191).

**Keywords:** multi-axis milling, finishing, barrel mill, CNC milling, cutting forces, surface finish

Mé poděkování náleží Ing. Martinovi Řezníčkovi, Ph.D. za jeho všechen obětovaný čas, cenné rady a za předané zkušenosti, které jsem mohl během tvorby diplomové práce získat. Dále z celého srdce děkuji mé rodině a přítelkyni za to, že mě během celého studia maximálně podporovaly ve všech směrech. Nelze zapomenout také na poděkování Ing. Cyrilu Hořavovi za výpomoc při tvorbě vzorků.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ – VÝROBNÍ OPERACE</b> .....	<b>11</b>
1.1 ZÁKLADNÍ METODY FRÉZOVÁNÍ .....	11
1.1.1 Metody frézování podle záběru frézy .....	12
1.1.2 Metody frézování podle smyslu otáčení nástroje a pohybu obrobku.....	13
1.2 DALŠÍ METODY FRÉZOVÁNÍ .....	16
1.2.1 Frézování úkosů .....	16
1.2.2 Vrtání otvorů .....	17
1.2.3 Vystružování .....	17
1.2.4 Vyvrtávání.....	18
1.2.5 Zahlubování.....	18
1.2.6 Vytvoření závitů.....	19
1.3 SOUČASNÉ ZPŮSOBY FRÉZOVÁNÍ.....	20
1.3.1 Dynamické obrábění (HDC) .....	20
1.3.2 Vysokorychlostní obrábění (HSM) .....	21
1.3.3 Vysokovýkonné obrábění (HPM) .....	21
1.3.4 Suché obrábění (DM) .....	22
1.3.5 Tvrdé obrábění (HM) .....	23
1.3.6 Frézování vysokým posuvem (HFM) .....	23
1.3.7 Trochoidní frézování .....	23
<b>2 NÁSTROJE PRO FRÉZOVÁNÍ</b> .....	<b>25</b>
2.1 BŘITOVÉ MATERIÁLY .....	25
2.1.1 Rychlořezná ocel HSS (High Speed Steel) .....	26
2.1.2 Slinuté karbidy .....	27
2.1.3 Povlakované slinuté karbidy .....	30
2.1.4 Cermety .....	31
2.1.5 Řezná keramika .....	32
2.1.6 Kubický nitrid bóru .....	37
2.1.7 Polykrystalický diamant (PKD) .....	37
<b>3 JAKOST POVRCHU</b> .....	<b>39</b>
3.1 VLASTNOSTI TEXTURY POVRCHU .....	39
3.2 HODNOCENÍ TEXTURY POVRCHU .....	42
<b>4 CNC OBRÁBĚNÍ</b> .....	<b>44</b>
4.1 CNC PROGRAMOVÁNÍ .....	44
4.2 PRACOVNÍ BODY CNC STROJŮ .....	47
4.3 ROZDĚLENÍ CNC STROJŮ .....	48
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>50</b>
<b>5 STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI</b> .....	<b>51</b>

<b>6</b>	<b>POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>52</b>
6.1	PÁSOVÁ PILA PPK-175 T .....	48
6.2	UNIVERZÁLNÍ CNC FRÉZKA S NAKLÁPĚCÍM ROTAČNÍM STOLEM DMG MORI DMU 50 3. GENERACE .....	54
6.3	DYNAMOMETR KISTLER TYP 9129AA .....	55
6.4	KONTAKTNÍ DRSNOMĚR MITUTOYO SJ410 .....	57
<b>7</b>	<b>POUŽITÉ NÁSTROJE.....</b>	<b>60</b>
7.1	SOUDEČKOVÁ FRÉZA TVARU KAPKA (JH734100X2R2R85.0Z4 SIRA).....	66
7.2	SOUDEČKOVÁ FRÉZA TVARU KUŽELE (JH746100T2R2R250.0Z6 SIRA).....	66
<b>8</b>	<b>PŘÍPRAVA VZORKŮ.....</b>	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.</b>
8.1	OBRÁBĚNÝ MATERIÁL ČSN 12 050 .....	71
8.2	TVORBA TVAROVÉ GEOMETRIE .....	71
8.3	UPNUTÍ VZORKU V DYNAMOMETRU .....	72
8.4	TVORBA G-KÓDU .....	73
8.4.1	Hrubování.....	73
8.4.2	Dokončování .....	74
<b>9</b>	<b>PRŮBĚH EXPERIMENTU .....</b>	<b>78</b>
9.1	VOLBA ŘEZNÝCH PODMÍNEK .....	78
9.2	POSTUP MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT .....	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.</b>
<b>10</b>	<b>VYHODNOCENÍ JAKOSTI DOKONČENÉHO POVRCHU .....</b>	<b>80</b>
<b>11</b>	<b>VYHODNOCENÍ ŘEZNÝCH SIL PŘI OBRÁBĚNÍ .....</b>	<b>86</b>
<b>12</b>	<b>VYHODNOCENÍ VELIKOSTI A TVARU TŘÍSKY .....</b>	<b>89</b>
12.1	PODNADPIS.....	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.</b>
12.1.1	Podpodnadpis .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
12.2	PODNADPIS.....	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.</b>
<b>13</b>	<b>NADPIS HLAVNÍ KAPITOLY.....</b>	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.</b>
13.1	PODNADPIS.....	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>92</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>94</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>99</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>102</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>105</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>106</b>



## ÚVOD

Frézování je jeden z nejrozšířenějších konvenčních výrobních procesů. V průběhu posledních let zažívá toto odvětví technologie velký progres. Je to zapříčiněno hlavně využíváním pětiosého obrábění. Dalo by se říct, že při obrábění v pěti osách neexistuje nic, co by se nedalo obrobit. V návaznosti na tento technologický pokrok úměrně rostou požadavky na tvarovou přesnost a kvalitu povrchu. Velké ohledy jsou taktéž kladeny na vysokou produktivitu, kde se například díky správné volbě řezných podmínek, univerzální strategie obrábění a efektivní volby nástroje docílí nejkratšího pracovního času.

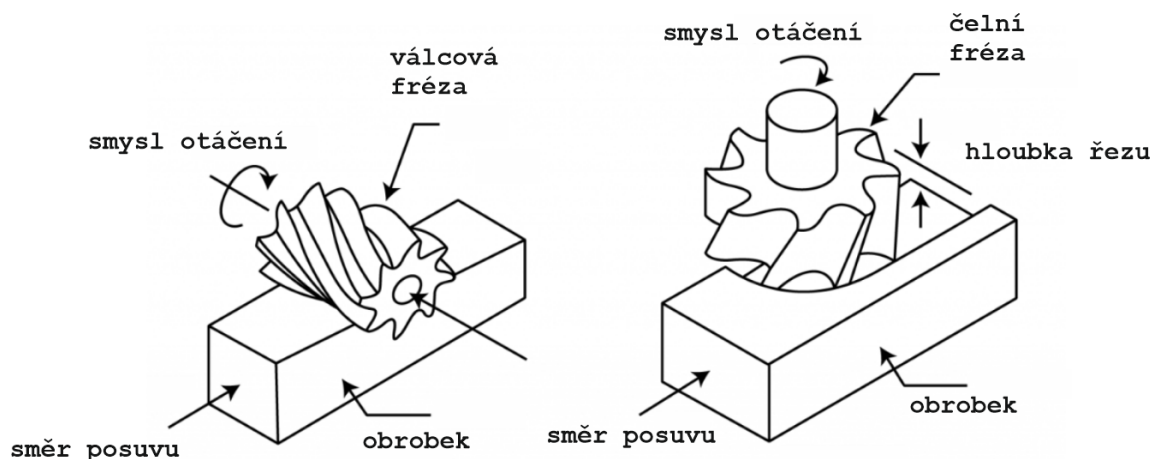
Aktuálními výraznými pomocníky pro nejkvalitnější průběh výrobního procesu jsou softwary CAD, CAM a CAE. Software CAD (*Computer Aided Design*) je designový nástroj, jenž se využívá ve velkém spektru technologických odvětví (strojírenství, letectví, stavebnictví, automobilový průmysl apod.). Software CAD umožňuje tvorbu součástí a konstrukcí, které lze zobrazit ve 2D nebo 3D prostoru. Dalším důležitým softwarem je CAE (*Computer Aided Engineering*), který umožňuje konstruktérovi zobrazit detailní simulaci chování součásti v reálných podmínkách (např. když na součástku působí síla, tlak apod.). Díky simulacím CAE lze predikovat vzniku kolizí a celkových chyb ještě před spuštěním výroby. Posledním zmíněným softwarem je CAM (*Computer Aided Machining*), což je počítačová podpora obrábění. CAM software dokáže v návaznosti na CAD modely vygenerovat G-kód, který se po kontrole nahraje do výrobního zařízení. Pohyby stroje jsou řízeny G-kódem a díky tomu lze říct, že celý výrobní proces probíhá automaticky.

Program NX od firmy Siemens disponuje všemi zmíněnými aplikacemi. V této diplomové práci byl využit právě software NX, kde byly vytvořeny modely (CAD) a samotné G-kódy pro frézování (CAM).

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ – VÝROBNÍ OPERACE

Technologie frézování spadá mezi nejpoužívanější metody třískového obrábění. Při frézování dochází k úběru materiálu díky rotujícímu nástroji, který se posouvá do upnutého obrobku. Hlavní pohyb nejčastěji koná rotující nástroj a pohyb vedlejší nejčastěji koná stůl, jenž je nasměrován v kolmém směru vůči nástroji. Obráběný materiál je upnut v upínacím zařízení, které je připevněno ke stole frézky. Moderní obráběcí centra a víceosé CNC frézky nabízí plynulé posuvné pohyby, které mohou být realizovány a kombinovány ve všech osách stroje. Řezný nástroj je v technickém názvosloví označen jako fréza, což je nástroj, který má různý počet řezných zubů rozložen po svém válcovém obvodu. Řezná metoda frézování je přerušovaná, kde jednotlivé zuby frézy obrábí třísky proměnné tloušťky. Technologie frézování nabízí dvě hlavní metody obrábění materiálu. Jedna z metod je obrábění obvodem válcové frézy a druhou metodou je obrábění nazývané jako čelní frézování (viz. *Obr. 1*). Frézování se nejčastěji používá pro vyhotovení dílů, které obsahují drážky, kapsy, díry a trojrozměrné kontury povrchu. Frézování dále nachází své široké uplatnění ve výrobě nástrojů. Například u vstřikovacích forem se v největším případě tvarové dutiny frézují, jelikož nynější frézky umožňují obrábění ve více osách. Technologie frézování se vyznačuje poměrně velkou výkonností současně s vysokou kvalitou obrobené plochy. [1] [2] [3] [4]



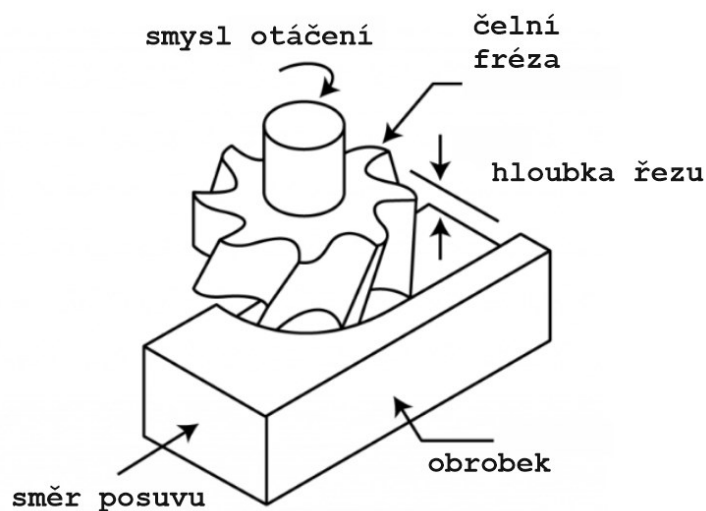
*Obr. 1 Válcové a čelní frézování [5]*

### 1.1 Základní metody frézování

Metody frézování se rozdělují podle záběru a smyslu otáčení frézy. Metody jsou popsány níže.

### 1.1.1 Metody frézování podle záběru frézy

- **Čelní frézování (*end milling*)** – tento způsob patří mezi nejrozšířenější frézovací operace a může se využívat ve velké kvantitě různých nástrojů. Výsledkem použití této operace je vytvoření širokého a rovného povrchu díky zubům, které se nachází jak na obvodě, tak na čele nástroje. Nejběžnější jsou frézy, které se vyznačují velkým průměrem s několika řeznými zuby, které mají úhel nastavení  $45^\circ$ . Dále jsou používány čelní frézy s kruhovými břitovými destičkami nebo čelní kotoučové frézy. Čelní fréza je orientována kolmo k ploše obrobku, který bude rovinně obrábět. Díky kolmému nastavení nástroje k obrobku dochází ke konstantnímu množství odebírané třísky. Čelní frézování nachází svého největšího využití u frézování rovných ploch nebo u frézování dutin s rovným dnem. Aktuálně čelní frézování nabízí i možnost dokončování plochy s použitím hladicích břitových destiček. [1] [3] [6] [7] [8]

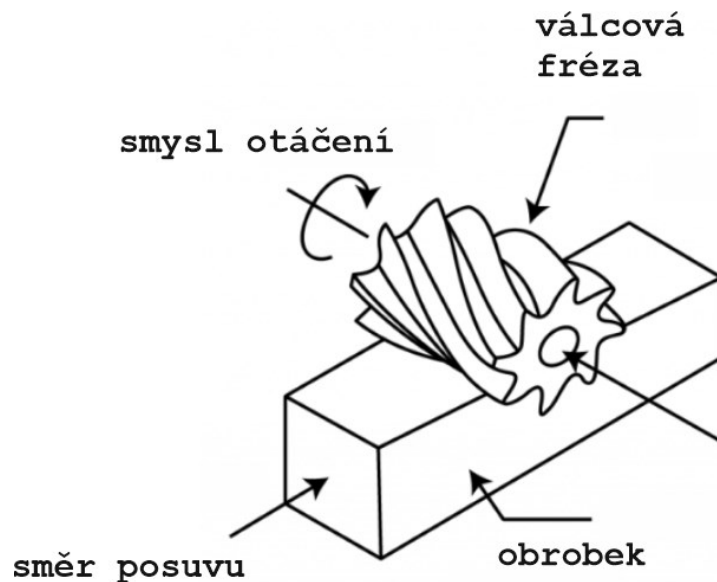


Obr. 2 Čelní frézování [5]



Obr. 3 Dokončování hladicími břitovými destičkami [6]

- **Válcové frézování (*peripheral milling*)** – tato metoda využívá pro úběr materiálu zuby, které jsou rozloženy po obvodě válcového nástroje (*Obr. 4*). Osa válcového nástroje je kolmá vůči směru posuvu. K samotnému úběru materiálu dochází díky rotačnímu pohybu válcové frézy v kombinaci s přímočarým pohybem obrobku. Celková dráha břitu znázorňuje prodlouženou cykloidu. Největší využití válcového frézy se nachází u frézování desek, profilového frézování, frézování hlubokých drážek a frézování zubů ozubených kol. [1] [5] [7] [8]



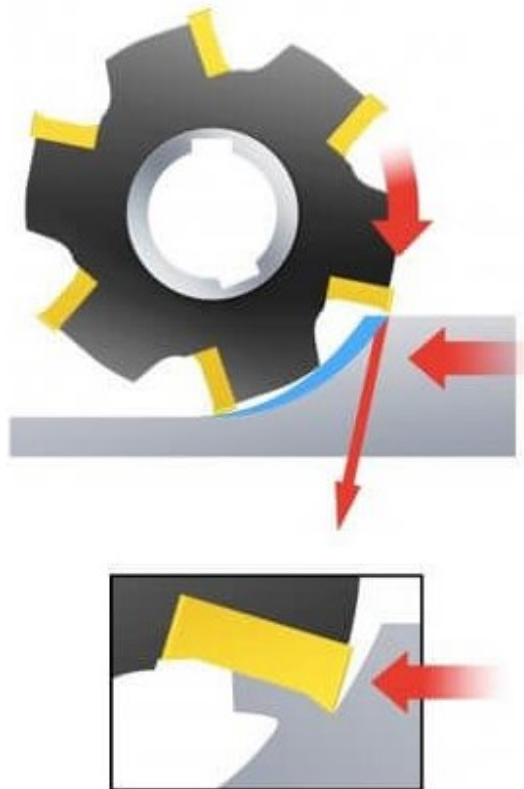
Obr. 4 Válcové frézování [5]

### 1.1.2 Metody frézování podle smyslu otáčení nástroje a pohybu obrobku

Vždy, když je zub frézy v záběru, tak podstupuje rázovému namáhání. Aby došlo ke kvalitnímu obrobení, je nutné zvolit vhodný princip kontaktu mezi ostřím a obrobkem v okamžiku startu a konce řezu. Během frézování se obráběný materiál posouvá ve směru, nebo proti směru rotujícího nástroje. Rozeznávají se dva způsoby frézování:

- **Sousledné frézování (*climb milling*)** – při tomto způsobu frézování má fréza stejný smysl otáčení jako směr posuvu obrobku. Při sousledném frézování dochází k menšímu tření mezi nástrojem a materiálem, což vede k minimálnímu vzniku tepla. Je to zapříčiněno z důvodu, jelikož posuv a smysl otáčení frézy je totožný. Z obrázku

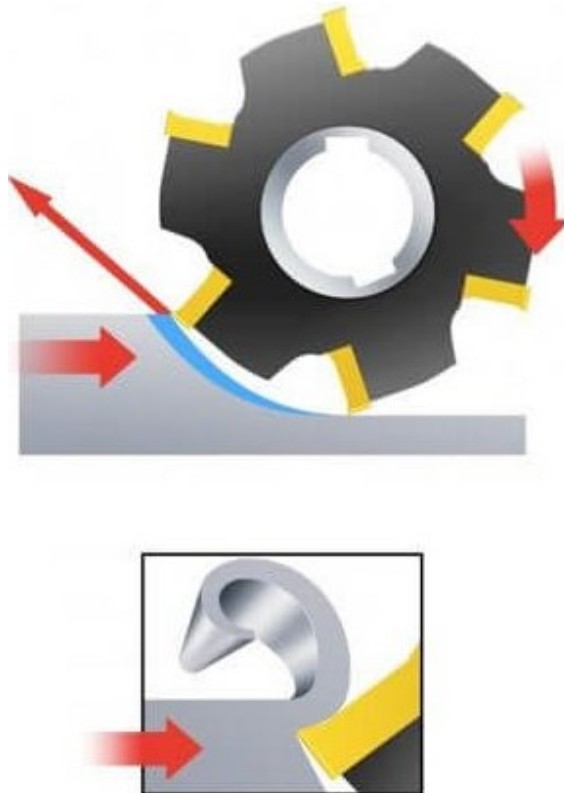
(Obr. 5) je patrné, že při záběru se tloušťka třísky mění od maxima do minima. Řezné síly při sousledném frézování jsou rovněž proměnné. V průběhu řezu se řezné síly opět zmenšují. Dá se konstatovat, že maximální řezné síly nabývají hned při startu řezu. Při tomto postupu se samotné upínání obrobku stává vhodnější, jelikož směr řezné síly má tendenci obrobek zatlačit do upínacího zařízení. Tyto faktory vedou ke snadnějšímu odstranění třísky, které nepřekážejí v následném průběhu frézování. Průběh řezných sil a tloušťka třísky u starších strojů vede k výskytu chyby vůle, která se může vyskytovat mezi posuvným šroubem stolu a maticí. Pokud je řezný nástroj vtahován do materiálu, nastane nežádoucí zvyšování posuvu. To všechno může vést k výskytu nepřiměřeně velké tloušťce třísky, kterou nástrojový břit nebude schopen odebrat a v důsledku toho se zlomí. [1] [9] [10]



Obr. 5 Schéma sousledného frézování [9]

- **Nesousledné frézování (*conventional milling*)** - při tomto způsobu frézování se fréza a posuv pohybují v opačném směru, což znamená, že fréza se otáčí proti posuvu obrobku. Skrze rozdílné pohyby se šířka řezné třísky od počátku záběru postupně zvětšuje do maxima. Řezné síly se během záběru zvětšují a směřují směrem od obrobku, což má za následek zvedání obrobku z upínacího zařízení. U této metody

frézování se vyskytuje problém vniknutí chladicí kapaliny přímo do počátečního místa řezu. Oproti souslednému frézování zde vzniká kvůli velkému tření větší množství tepla, což má za následek objevení vysokých tahových pnutí. Kvůli teplotě a vysokému pnutí se životnost nástroje výrazně zmenšuje. Nesousledné frézování se nejvíce uplatňuje v případech, kdy nástroj obsahuje keramické břitové destičky, jenž se doporučují pro obrábění vysokoteplotních slitin. [1] [9] [10]



Obr. 6 Schéma nesousledného frézování

Tab. 1 Srovnání sousledného a nesousledného frézování [9] [10] [11]

	Sousledné	Nesousledné
Hlavní aplikace	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dokončování,</li> <li>- využití u materiálu, které nejsou náročné na obrobení (hliník a jeho slitiny),</li> <li>- skrze své výhody se používá primárněji</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hrubování,</li> <li>- využití u náročně obrobitelných a houževnatých materiálů (titan, nerezová ocel, mosaz, bronz, atd.)</li> </ul>
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lepší kvalita povrchu,</li> <li>- menší opotřebení nástroje,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bezpečnější proces bez rázů,</li> <li>- záběr nezávisí na hloubce řezu</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- menší podmínky pro upnutí</li> </ul>	
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> <li>- u starších frézek je nutnost eliminace vůle,</li> <li>- větší rázy při vnikání nástroje do obrobku</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rychlejší opotřebení nástroje,</li> <li>- kvůli rezným silám je náročnější upnutí,</li> <li>- nelze použít pro křehké materiály,</li> <li>- složitější přístup chladicí kapaliny,</li> <li>- při frézování se třísky akumulují v rezné zóně a narušují povrch materiálu,</li> <li>- prudký vzrůst teplot</li> </ul>

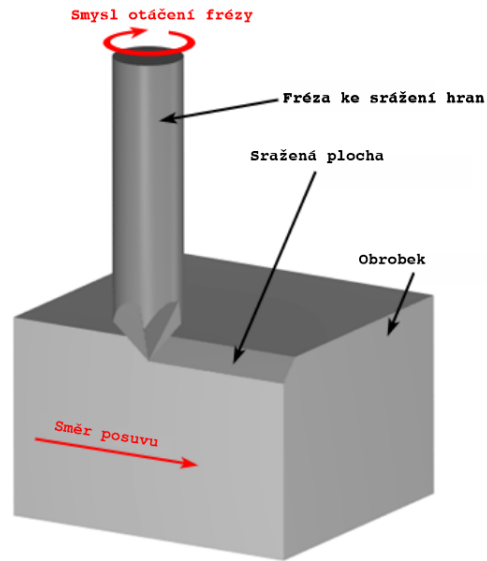
## 1.2 Další metody frézování

Technologie frézování díky použití velkého spektra nástrojů o různých geometriích umožňuje vytvoření různých tvarů, které jsou požadovány. Níže jsou rozepsány operace, které jsou popsány typem použité frézy a trajektorií, kterou nástroj obrábí materiál z obrobku.

### 1.2.1 Frézování úkosů

K vytvoření úkosu je nástrojem veden obvodový řez, jenž je nasměrován podél hrany, která má být sražena. Fréza, která je určena pro vytvoření úkosu disponuje většinou úhlem břitu o velikosti  $45^\circ$ . Lze obrábět, jak vnější, tak i vnitřní hrany součástí, které mohou být libovolně zakřiveny.

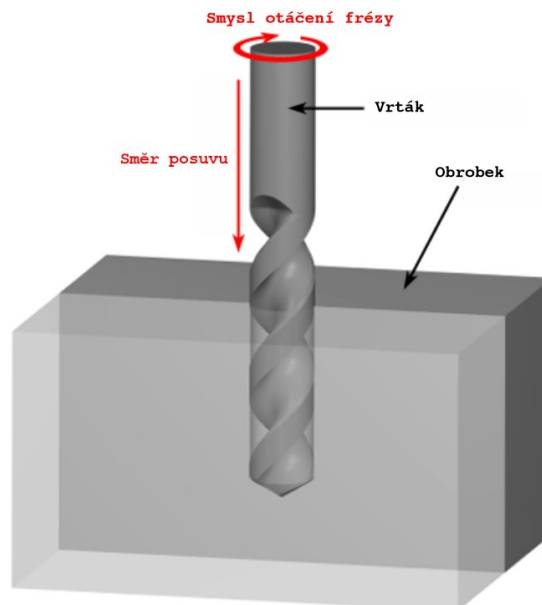




Obr. 7 Frézování úkosů

### 1.2.2 Vrtání otvorů

Nástroj (vrták) je veden axiálním směrem do obrobku a vyhotovuje otvor o průměru shodném s průměrem vrtáku. Vrtáním lze vytvořit jak otvor slepý (vytvoření díry v zadané hloubce), tak otvor průchozí.



Obr. 8 Vrtání otvorů

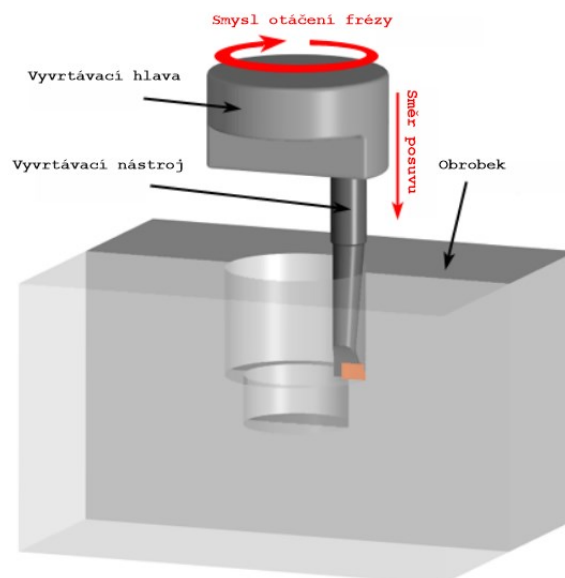
### 1.2.3 Vystružování

Vystružování je téměř stejný proces jako vrtání. Rozdíl je pouze v tom, že díky vystružování se získá přesnější průměr a drsnost povrchu díry je kvalitnější.

Výstružník vstupuje do obrobku axiálně a zvětšuje stávající otvor na průměr nástroje. Vystružováním se odebrává minimální množství materiálu a často se provádí po vrtání, aby se dosáhlo přesnějšího průměru a hladšího vnitřního povrchu.

#### 1.2.4 Vyvrtávání

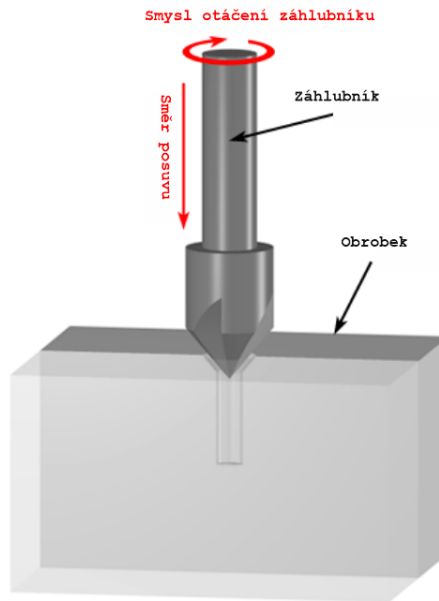
U metody vyvrtávání nástroj vstupuje do obráběného materiálu axiálním směrem a zvětšuje tvar již vyvrtaného otvoru. Vyvrtávání se často provádí po vrtání, aby se vytvořil prostor pro usazení hlavy spojovacího prvku, například šroubu, pod povrchem součásti. Metoda zahrnuje použití jednobřitých nástrojů. Vyvrtávání v praxi usnadňuje výrobu otvorů, u kterých je požadovaná vyšší rozměrová přesnost.



Obr. 9 Vyvrtávání

#### 1.2.5 Zahlubování

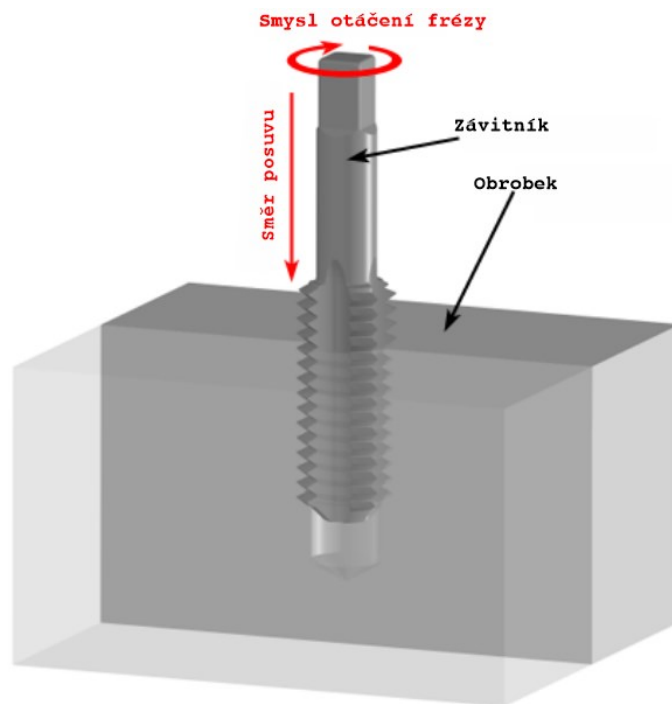
Pohyb nástroje k obrobku je jako u předešlých operací (vrtání a vyvrtávání) axiální. Nástroj má kuželovitý tvar a po úběru materiálu je vytvořen z předem vytvořeného otvoru kuželovitá dutina. V největší četnosti případů se zahlubování provádí po vrtání, aby byl vytvořen prostor pro následné uložení hlavy šroubu, jenž bude zarovnan v rovině povrchu obrobku. Nejběžnější úhly záhlubníku jsou 60, 82, 90, 100, 118 a 120 stupňů.



Obr. 10 Zahlubování

### 1.2.6 Vytvoření závitů

V neposlední řadě současné frézy umožňují i tvoření závitů. Závitník vstupuje do materiálu axiálním směrem a řeže vnitřní závit do již předvrtaného otvoru, jenž má velikosti, která je vhodná pro vytvoření závitu.



Obr. 11 Závitování

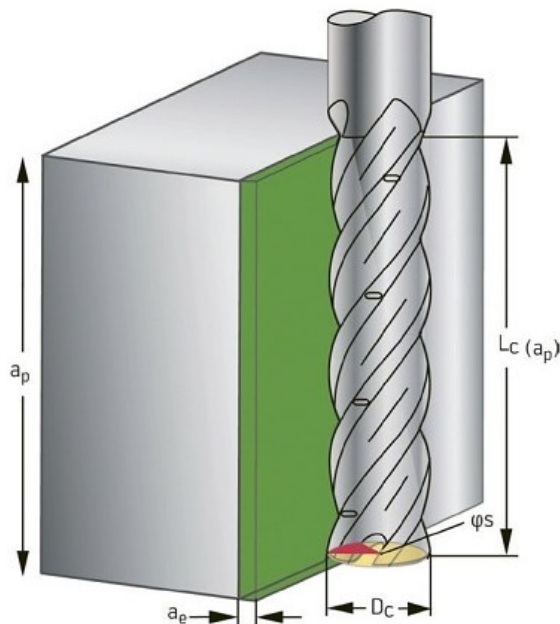
### 1.3 Současné způsoby frézování

V aktuální době požadují zákazníci v odvětví průmyslu co nejrychlejší a nelevnější proces výroby. Tato efektivita nesmí být prováděna na úkor zhoršení celkové kvality hotového výrobku (jakost povrchu a rozměrová stabilita). Dále rovněž roste i náročnost skrze obrábění materiálu, jenž jsou hůře obrobitelné. Řešením těchto aspektů je použití metod, které jsou vypsány níže.

#### 1.3.1 Dynamické obrábění (HDC)

Charakteristickým znakem dynamického obrábění (*High Dynamic Cutting*) je úroveň stability procesu a dlouhá životnost nástrojů. Celkové řezné síly nejsou příliš velké, jelikož při použití HDC se volí malý úhel záběru. U dynamického frézování se většinou dosahuje velkého obráběného objemu v důsledku použití velkých řezných parametrů s určením co nejmenších přesunů nástroje.

Řezné parametry: malá radiální šířka ( $a_e$ ), velká hloubka řezu ( $a_p$ ) a malý úhel záběru ( $\varphi_s$ ). Konkrétní hodnoty řezných parametrů se odvíjí od druhu obráběného materiálu. [12]



Obr. 12 Schéma dynamického frézování (HDC) [12]

### 1.3.2 Vysokorychlostní obrábění (HSM)

Technika HSM (*High Speed Machining*) je využívána zhruba od roku 1980. Tato metoda vede k vysokým řezným rychlostem. Díky možnosti použití vysokých otáček vřetena s kombinací použití nízkých hodnot hloubek řezu je umožněno obrábění při velkých rychlostech pracovního posuvu. Tento způsob frézování se v některých případech označuje jako frézování posuvem. Díky nízké hloubce řezu se při obrábění vyskytují axiální síly několikanásobně menší než síly radiální. HSM je vhodnou metodou i pro obrábění těžko obrobitelných, žáruvzdorných a vysoce legovaných slitin.

Použití obrábění HSM lze využít i pro složité tvarové plochy. Nástrojem je ve velkých případech rádiusová fréza. Pro obrábění tvarových ploch nástroj následuje trojrozměrně zakřivenou plochu obrobku. Tento způsob je vysoce efektivní pro samostatné dokončování.

Hlavní výhodou HSM je získání hladkého povrchu s velkým objemem odebraného materiálu za relativně krátkou jednotku času. Mezi dalšími výhodami patří malá spotřeba elektrické energie a nepatrná generace tepla.

[13] [14]

### 1.3.3 Vysokovýkonné obrábění (HPM)

Vysokovýkonné obrábění je typické tím, že při řezu je odebírána velká tříska. Hlavní aplikace této metody se nachází u obrábění dvourozměrných tvarů (2,5D) a u hrubovacích operacích u těžko obrobitelných materiálů. Hloubka řezu se může nacházet v hodnotách až v násobnosti 1,5 průměru nástroje. Vysokovýkonné frézování se vyznačuje ekonomickou a ekologickou významností v sériové výrobě.

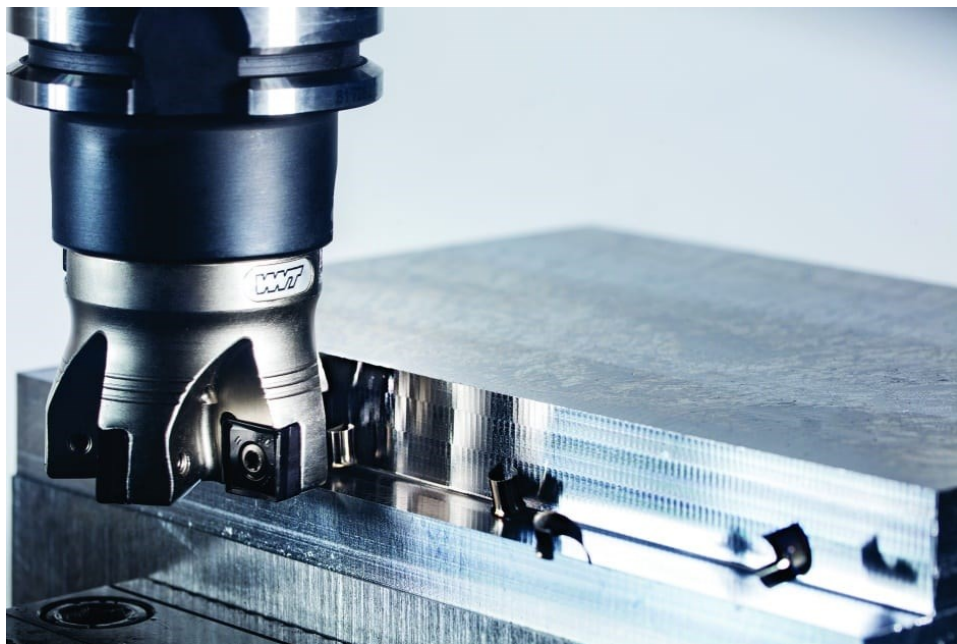
Tato metoda je náročná skrze volby nástroje, kde se doporučuje používat frézy s kvalitním substrátem slinutého karbidu, který navíc obsahuje povlak o vysoké teplotní odolnosti (např. TiAlN). V současné době jsou díky této metodě obráběny oceli s tvrdostí až 67 HRC. Dalším důležitým parametrem, který si vyžaduje metoda HPM, je možnost použití stroje, který má vysoký výkon s vysokým kroutícím momentem. Důležitým faktem je zmínění nákladů procesní kapaliny. Právě skrz tento faktor se v praxi spíše uvažuje použití metody suchého obrábění, jelikož procesní kapaliny tvoří až 17 % celkových nákladů pro výrobu. [15]

### 1.3.4 Suché obrábění (DM)

Metoda suchého obrábění (*Dry Machining*) při procesu nepoužívá žádné procesní kapaliny. Tento fakt vede k úspoře nákladů (odhaduje se až na 15 %) celkového výrobního procesu. Díky úspoře nákladů se v Evropském průmyslu začal typ DM aplikovat při obrábění zhruba 12 % hromadně zhotovených dílů.

Absence použití procesních kapalin má výrazný přínos z pohledu ochrany životního prostředí. Při procesu není nutná likvidace řezných kapalin (po jejich využití) a rovněž se eliminují náklady pro skladování, manipulování a čištění procesních kapalin. Nemalou výhodou suchého obrábění je především vysoká produktivita obrábění. Při frézování bez použití kapaliny se teplota obrobku a nástroje zvyšuje, ale právě díky tomu je průběh více stálý. Stálý proces zaručuje lepší tvorbu třísek a vyšší výkon frézování. Dopad to má o na nástroj, jelikož se díky stálosti prodlužuje celková trvanlivost břitů. Obecně je známo, že životnost nástroje zkracují teplotní šoky, které jsou vytvořeny během kontaktu nástroje s obrobkem při chlazení procesní kapalinou.

V současnosti švédská firma Sandvik Coromant, dodavatel řezných nástrojů, nabízí sady břitových destiček, které jsou prioritně určeny k obrábění metodou DM. Nejběžnější povlaky břitových destiček jsou cermety, řezná keramika, kubický nitrid boru a polykrystalické diamanty. [16] [17]



Obr. 13 Frézování pomocí metody suchého obrábění [17]

### 1.3.5 Tvrdé obrábění (HM)

Podstata této metody je téměř totožná jako u vysokorychlostního frézování (HSM). Jediným rozdílem je to, že se při aplikaci metody HM vzniká (u tvrdých materiálů) enormní množství tepla, které se většinou kompenzuje snížením hloubky řezu.

### 1.3.6 Frézování vysokým posuvem (HFM)

Metoda HFM (*Hight Feed Milling*) je strategií, kde dochází k vysokému úběru materiál, díky velkým posuvům na zub nástroje. Tento řezný parametr je kombinován současně s malou hloubkou záběru a střední řeznou rychlostí. Na zub nástroje současně s použitím malých hloubek řezu.

Při procesu je směr řezných sil nasměrován do vřetena stroje v axiálním směru. Tento fakt přináší do procesu vyšší stabilitu, menší vibrace a zvýšení celkové životnosti nástroje. Nástroje pro obrábění velkým posuvem navíc spoří čas, jelikož umožňují eliminovat polo-dokončovací operace a ve velké míře omezit výměny nástrojů. Čelní frézování u aplikace HFM je vhodné pro použití u dalších operací nebo dokončování. HFM se taktéž používá pro kopírovací frézy, které jsou schopny obrobít nerovné povrchy a jsou vysoce efektivní u frézování dutin forem. Hlavní výhodou HFM je možnost získání velmi malé tolerance, která umožní to, že v dalším procesním kroku nebude nutné zařadit závěrečné dokončovací operace. Správně zvolený nástroj s vhodnými vlastnostmi vede k úspěšnému obrábění díky metodě HFM.

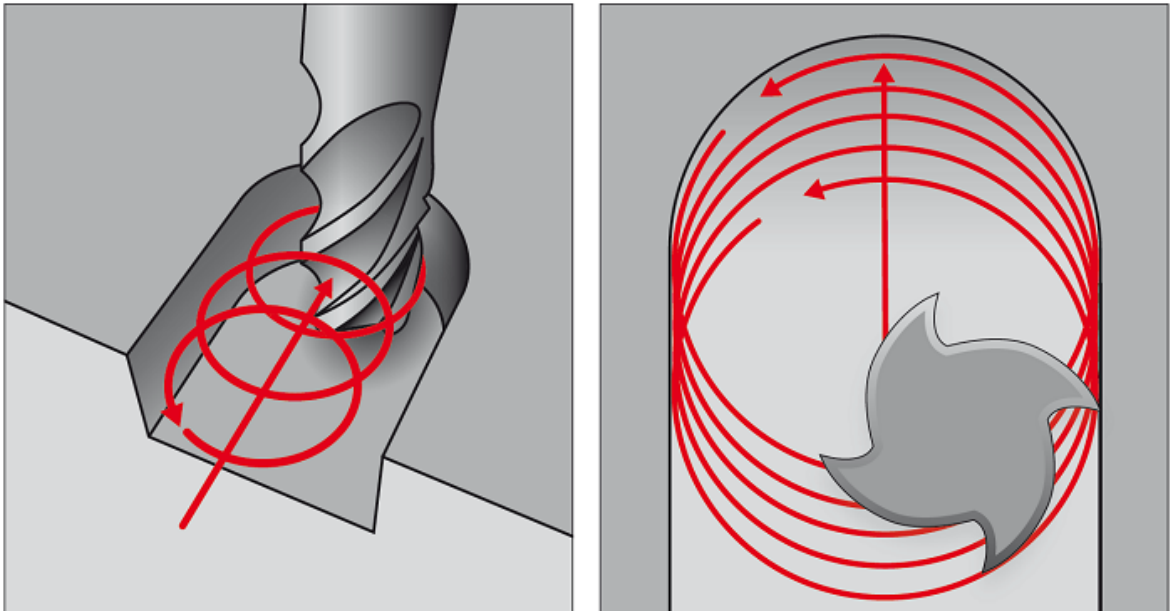
### 1.3.7 Trochoidní frézování

Princip metody trochoidního frézování spočívá v tom, že k úběru materiálu nastává díky nástroji, který se pohybuje po kruhové interpolaci s posuvem vpřed v radiálním směru současně s velkými hodnotami hloubek řezu ( $a_p$  je více než dvojnásobně vyšší než průměru nástroje). Dá se konstatovat, že trajektorie pohybu nástroje znázorňuje spirálovou geometrii. Radiální posuv ( $a_e$ ) při procesu je ovšem malý, není větší než hodnota 10 % průměru nástroje. Nástroj se ve velké hloubce ponoří do materiálu a celkový proces probíhá po celé délce nástroje. U trochoidního frézování se používá speciální nástroj s menším průměrem, než je profil kontury nebo drážky z důvodu vytvoření prostoru pro spirálový pohyb nástroje při frézování. Kruhový pohyb společně s posuvem nabízí možnost konstantní udržitelnosti menšího úhlu záběru, který je nižší než  $90^\circ$ . V porovnání s frézováním konvenčním, metoda trochoidního frézování umožňuje používání vyšších řezných parametrů při menším

zatížením nástroje a stroje. Tato strategie frézování se nejčastěji aplikuje na hrubování a polo-dokončování hlubokých drážek, kapes a obecných ploch. U frézování hlubokých drážek je třeba dodržet poměr mezi šířkou drážky k průměru frézy, který musí být menší než 70 % a podmínka volby hodnoty pro radiální posuv ( $a_e$ ) nabývá maximálních hodnot 5 % průměru nástroje.

Trochoidní metoda frézování je vhodná pro stroje, které nejsou schopny dodat vysoký výkon. Podmínkou je ovšem dodání vysokých otáček vřetena a vysokých hodnot posuvů.

Hlavní výhody trochoidního frézování: vysoká životnost nástroje, velká produktivita procesu, vysoká kvalita obroběných ploch a snížení rizika vzniku vibrací, nízký řezný odpor. [19] [20]



Obr. 14 Metoda trochoidního frézování [19]



## 2 NÁSTROJE PRO FRÉZOVÁNÍ

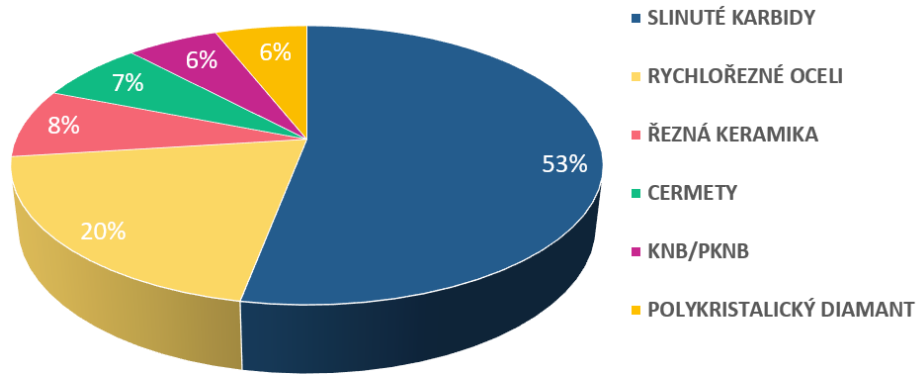
Nástroje pro frézování jsou vyráběny několika technologiemi a v několika sadách velikostí. Frézovací nástroje jsou vytvořeny a přizpůsobeny pro zvolenou operaci a liší se od sebe v několika aspektech, jako je např. tvar, počet břitů, metoda upnutí, rezným materiálem a konstrukcí.

Nejčastější typy fréz jsou:

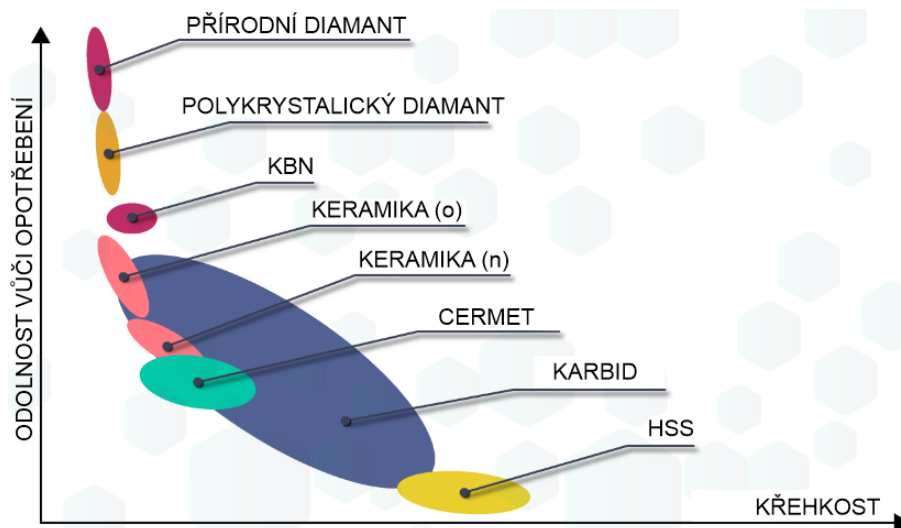
- Čelní fréza
- Rohová fréza
- Kulová fréza
- Kotoučová fréza
- Úhlová fréza
- Tvarová fréza
- Srážecí fréza
- Zahlubovací frézy
- Závitové frézy
- Fréza pro T drážky
- Frézy pro výrobu ozubení (odvalovací)

### 2.1 Břítové materiály

Na světě existuje velké množství rezných materiálů, které se liší svými vlastnostmi a nachází svá různá uplatnění. Podstatné zastoupení mají materiály rychlořezných ocelí společně se slinutými karbidy. Slinuté karbidy jsou specifické tím, že obsahují různorodé vlastnosti, které jsou doplněny povlakovacími technologiemi. Na obrázku *Obr. 15* lze vidět reznou keramiku, která funguje na bázi oxidů (o) nebo na bázi nitridů (n). Nejvyšší odolností proti opotřebení nabývají u přírodního diamantu. [21]



Obr. 15 relativní podíly řezných materiálů pro produktivní obrábění [27]



Obr. 16 Znárodnění řezných materiálů [21]

### 2.1.1 Rychlořezná ocel HSS (High Speed Steel)

Tento druh řezné oceli se používá zejména pro obrábění materiálů, které nejsou tepelně zpracované oceli. K obrábění tvrdších materiálů není vhodná. Dá se říct, že oceli HSS jsou slitinové oceli s přísadami legur, které zvyšují řezné vlastnosti.

Hlavní legující prvky jsou:

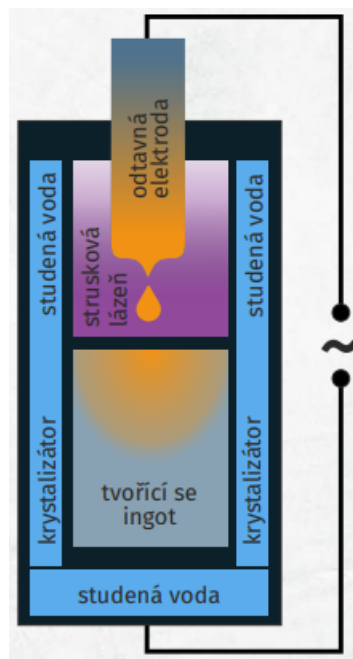
- Wolfram – zvyšuje řezivost nástroje, obsah u HSS se pohybuje mezi 5 až 20 % a ve struktuře společně s uhlíkem tvoří sloučeninu, která nese název karbid wolframu (velmi tvrdý a odolný vůči otěru).
- Chrom – zvyšuje kalitnost, obsah u HSS se pohybuje kolem 4 %. V některých HSS ocelí lze chrom nahradit molybdenem.
- Kobalt – nejvýkonnější oceli obsahují přísadu kobaltu (Co) v rozmezí 5 až 10 %.

- Vanad – obsah 1 až 4 %

Používání rychlořezných ocelí se datuje již od počátku 20. století a umožnili díky zvýšení řezné rychlosti a vyššího výkonu efektivně spořit procesní čas. Rychlořezné oceli mají vysokou tvrdost a díky své žáru-pevnosti vydrží v místě řezu, kde se teplota může pohybovat až do 600 °C. Mezi charakteristickými vlastnostmi rychlořezných ocelí patří jejich odolnost proti popuštění, velká tvrdost za tepla i studena a přiměřená houževnatost.

Jsou známy 3 postupy způsoby výroby rychlořezných ocelí:

- výroba v indukčních i elektrických obloukových pecích
- výroba v indukčních i elektrických obloukových pecích s následným elektrostruskovým přetavováním
- výroba metodou práškové metalurgie. [21] [22] [23] [24]



Obr. 17 Elektrostruskové přetavování [22]

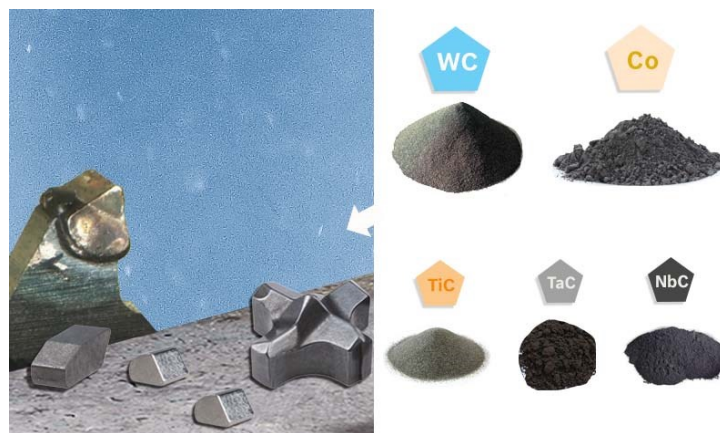
### 2.1.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy (SK) jsou řezné materiály, které jsou významné svou tvrdostí a otěruvzdorností. Tato skupina řezných materiálů odolává fyzickému namáhání, nárazům, deformacím, vysokým teplotám, korozi i vysokému tlaku. Uplatňují se předem pro aplikaci s nejhouževnatějšími materiály. SK jsou ve velké míře tvrdší než rychlořezné oceli a svou tvrdost si zachovávají i u vyšších teplot. Oproti rychlořezným ocelím jsou velmi křehké.

Slinuté karbidy se vyrábí použitím práškové metalurgie z karbidů těžkých kovů. Nejběžnější karbidové částice jsou karbid wolframu (WC), kubické karbidy titanu (TiC) a tantalu (TaC). Tyto složky jsou navzájem spojeny zejména kobaltem. Obsah daných složek karbidů a pojiva kobaltu ve výsledku určuje celkové vlastnosti (houževnatost, tvrdost, odolnost vůči otěru) slinutého karbidu.

Vlivy jednotlivých složek:

- Karbid wolframu (WC) – zachovává tvrdost při vyšších teplotách, odolnost vůči opotřebení a chemickou stálost.
- Karbid titanu (TiC) – zvyšuje tvrdost, snižuje celkovou pevnost SK v ohybu, zvyšuje křehkost, dochází ke zhoršení tepelné vodivosti, což má návazný vliv na rostoucí tepelnou roztažnost.
- Karbid tantalu (TaC) – vyznačuje se podobnými vlastnostmi jako karbidy titanu s tím rozdílem, TaC zjemňuje strukturu SK.
- karbid niobu (NbC)
- Kobalt – tvoří síťové pojivo mezi složkami karbidů. Karbidy wolframu jsou při operaci slinování v kobaltu rozpustné, což vede k vytvoření velmi houževnatém pojivu. Díky houževnatému pojivu je zajištěna pevnost slinutých karbidů v ohybu. Postupným zvyšování procentuálního množství kobaltu v slinutých karbidech se navyšuje celková tažnost a pevnost. Protikladem je to, že při zvyšování obsahu kobaltu klesá celková tvrdost SK.



Obr. 18 Složky slinutých karbidů [26]

Podle normové soustavy ISO 513 (ČSN 22 0801) se SK rozdělují dle chemického složení do tří tříd. Třídy jsou označeny písmeny P, M a K. Pro jednoduché rozpoznání jsou jednotlivé třídy označeny barvou.

1. Třída P – určena pro obrábění materiálu, které jsou houževnaté s tvářenou třískou, což jsou zejména oceli, oceli na odlitky a temperované litiny. Třída P je značena modrou barvou.
2. Třída M – určena pro universální využití k obrábění téměř všech druhů litin, ocelí a těžko obrobitelných slitin. Třída P je značena chromovou žlutí.
3. Třída K – určena pro obrábění materiálu s třískou, která se drobí. Jsou to zejména kalené oceli, šedé litiny, neželezné kovy a jejich slitiny. Třída K je označena červenou barvou.

Skupina	Podskupiny	Základní chemické složení	Efektivní aplikace pro obráběný materiál
<b>P</b>	P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50	WC (30÷82)% +TIC (8÷64)% +Co (5÷17)% + (TaC.NbC)	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající dlouhou, plynulou třísku: Nelegovaná, nízkolegovaná a vysoce legovaná ocel, litá ocel, automotivní ocel, nástrojová ocel, feritická a martenzitická korozivzdorná ocel.
<b>M</b>	M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40	WC (79÷84)% +TIC (5÷10)% +TaC.NbC (4÷7)% +Co (6÷15)%	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající dlouhou a střední třísku: Austenitická a feriticko austenitická ocel, korozivzdorná, žáruvzdorná, žárovevná, nemagnetická a otěruvzdorná ocel.
<b>K</b>	K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40	WC (87÷92)% +Co (4÷12)% + (TaC.NbC)	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající krátkou, drobnou třísku: Nelegovaná i legovaná šedá litina, tvárná litina, temperovaná litina.
<b>N</b>	N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30		Slinuté karbidy pro obrábění neželezných materiálů: Slitiny mědi a hliníku, duroplasty, fibry, plasty s vlákninou, tvrdá guma.
<b>S</b>	S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30		Slinuté karbidy pro obrábění: Žáruvzdorné slitiny na bázi Fe, superslitiny na bázi Ni nebo Co, Titanu, Ti slitiny.
<b>H</b>	H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30		Slinuté karbidy pro obrábění: Zušlechťené oceli s pevností nad 1500 MPa, kalené oceli HRC 48÷60, tvrzené kokilové litiny HSh 55÷58

Obr. 19 Rozdělení skupin slinutých karbidů dle ISO 513

K písmenu dané třídy je přiřazeno také dvoumístné číslo, které udává obsah pojícího kovu, houževnatost a pevnost v ohybu. Čím vyšší je dvoumístné číslo, tím jsou tyto parametry vyšší. Opakem je pouze tvrdost a otěruvzdornost, u kterých hodnoty s postupně zvyšujícím číslem klesají.

Výroba SK začíná s přípravou jednotlivých složek. V první řadě se vyrobí karbid wolframu, ke kterému se po sléze přimísí kobalt a další kovy dle požadavků (TiC, TaC, NbC). Výsledkem je získání prášku, jenž se získá drcením a sušením směsi. Následuje lisování, kde se prášek vloží do formy. Lisováním se získá předběžný tvar. Vytvarované karbidové prvky se umístí do slinovací pece, kde na ně působí teplota (1600 °C) a tlak (2000 barů). Po slinování materiál slinutého putuje na brousící zařízení, kde získá přesný geometrický tvar. Po úspěšné kontrole měření se může slinutý karbid připevnit na zvolené příslušenství. [25] [26] [27] [28] [29]



Obr. 20 Schéma výroby SK [26]

### 2.1.3 Povlakované slinuté karbidy

Na trhu byly představeny na konci 60. let břitové destičky ze SK, na kterých byl nanesen povlak. Povlakované slinuté karbidy přinesly velký technický a ekonomický progres díky výborné kombinaci řezných parametrů. Povlakované SK nabízí až trojnásobně vyšší řezné rychlosti než SK, na kterých není nanesen žádný povlak.

Povlaky zcela ovládly řezné vlastnosti soudobých řezných materiálů a všechny nástroje ze slinutých karbidů jsou až v 90 % povlakované. Povlaky tvoří u SK různé chemické a fyzikální vazby. Aktuálně se vrstvy povlaků rozdělují na jednovrstvé, vícevrstvé, gradientní a nanovrstvy o tloušťkách od 2 do 5  $\mu\text{m}$ . Vícevrstvé povlaky jsou více odolné vůči šíření trhlin a dokážou lépe kompenzovat zbytkové tahové napjatosti v daných vrstvách. Povlakovací technologie PVD a CVD jsou schopné vytvořit povlaky 3 druhů povlaků:

- Tvrdé povlaky (tvrdost nad 20 GPa)
- Velmi tvrdé povlaky (tvrdost nad 40 GPa)

- Ultratvrdé povlaky (nad 80 GPa).

Profesor Vepřek s jeho výzkumným týmem dokázali zhotovit nanopovlak (nc-TiN/ $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) o tvrdosti až 105 GPa, což je téměř totožná hodnota tvrdosti diamantu s perfektní řeznou rychlostí. U tvrdých povlaků se v největší míře jedná o povlaky nitridu kovů titanu, hliníku, chrómu, křemíku a wolframu. [27] [29]

#### 2.1.4 Cermety

Cermet je slinutý karbid, který je tvořen tvrdými částicemi na bázi titanu. Dalo by se říct, že cermet je kompozitním materiálem, který je složen z keramiky a kovového materiálu. Název vznikl spojením tří počátečních písmen hlavních materiálů, **ceramics** (keramika) a **metal** (kov). Cermet je navržený tak, aby vlastnil optimální keramické parametry, které vedou k odolnosti vůči vysokým teplotám a velké tvrdosti. Druhým aspektem je doplnění kovových vlastností jako je schopnost podstoupení plastické deformace. Obsahové zastoupení kovových složek činí u cermetů méně než 20 %.

Složení cermetů bylo původně z velké části karbidu titanu (TiC) a niklu (Ni). V novodobých cermetech není obsažen nikl a jejich obvyklé a základní složení je tvořeno z prvků karbidů, karbonitridů a nitridů titanu Ti (C, N). Sekundární částice cermetů jsou (Ti, Nb, W, C, N). Pojivem je molybden (Mo) a kobalt (Co) obohacený o W.

Hlavní prvky složení cermetu Ti (C, N) dodává příslušné skupině vyšší odolnost vůči oděru. Sekundární tvrdé fáze navyšují odolnost vůči plastické deformaci. Pojivo (kobalt) má rozhodující dopad na houževnatost. Cermety lze rovněž jako slinuté karbidy povlakovávat.

Cermety se v porovnání se slinutými karbidy vyznačují těmito vlastnostmi:

- Umožnění rozsáhlejšího používání řezných rychlostí
- Vyšší chemická stálost a ořezu
- Velká tvrdost, která vylepšuje odolnosti vůči abrazivnímu ořezu hřbetu břitů nástroje
- Vyšší houževnatost u cermetů TaC a NbC
- Při použití nízkých řezných rychlostí nevznikají nárůstky na čelech břitů nástroje, což vede k nižší drsnosti obrobenej plochy.
- Cermety se vyznačují nižší úrovní tlakového pnutí. Díky této vlastnosti jsou cermety známy svou nízkou odolností proti vzniku tepelných trhlinek.

Ve srovnání s běžnými slinutými karbidy má cermet vyšší odolnost vůči otěru a menší tendence k ulpívání materiálu obrobku na břitu. Na druhou stranu má cermet také nižší úroveň vnitřních tlakových pnutí, a z toho důvodu i nižší odolnost proti vzniku tepelných trhlin. Za účelem zvýšení jejich odolnosti proti otěru lze rovněž cermety opatřit PVD povlakem.

Cermety se v největší míře používají tam, kde se vyskytují problémy s ulpíváním materiálu obroku. Cermety zvládají taktéž vyřešit problém, kde se objevují nárůstky na čelech břitu nástroje.

Typickou aplikací cermetu je obrábění korozivzdorných ocelí, ocelí s nízkým obsahem uhlíku a feritických ocelí. Cermety nachází své velké uplatnění tam, kde se objevují problémy u obrábění materiálu na bázi železa. [30] [31] [32]



Obr. 21 Břítová destička z cermetu [30]

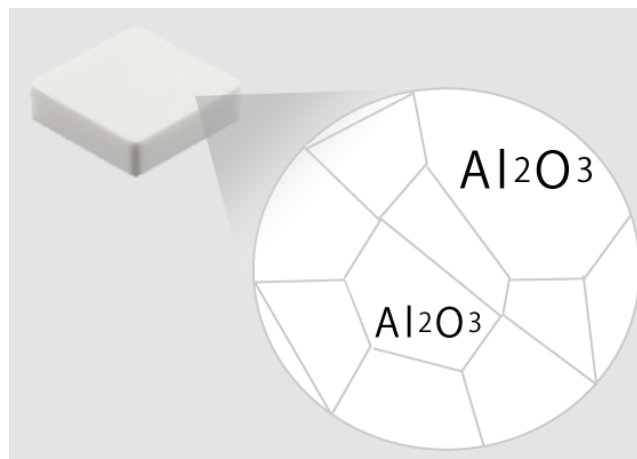
### 2.1.5 Řezná keramika

V širším slova smyslu keramika představuje směs kovu/nekovu s kyslíkem (O), dusíkem (N) a uhlíkem (C). Tato směs se vypálí a následně používá jako řezný nástroj. Jsou známy dva základní typy řezné keramiky. Jeden z nich je keramika s oxidem hlinitým ( $Al_2O_3$ ) a druhý je keramika s nitridem křemíku ( $Si_3N_4$ ), která je vyrobena smícháním různých přísad s hlavními složkami za účelem získání vyžadujících vlastností. Aktuálně je používáno 5 druhů řezné keramiky. [33]



## 1. Bílá keramika

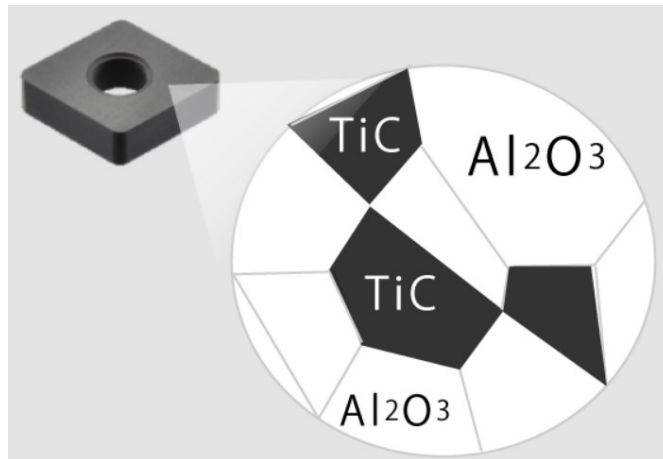
Hlavní složkou této keramiky je oxid hliníku ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a pro svou typickou barvu se označuje jako bílá keramika. Ve skutečnosti jsou totožné složky obsaženy v drahokamech (rubíny a safíry). Zřetelný rozdíl spočívá v tom, že drahokamy jsou materiály s jednotlivými krystaly, zatímco oxidy hliníku jsou látky polykrystalické. Oxid hliníku je tvrdý a chemicky stabilní. Skrze své vlastnosti se používá při vysokorychlostním obrábění litiny a v místech, kde dochází k vysoké teplotě jsou nástroje velmi stabilní (stabilita při teplotách až  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ ). Hlavní složka oxidu hlinitého lze doplnit přísadou oxidu zirkoničitého ( $\text{ZrO}_2$ ). Tato kombinace brání vzniku a zvětšování trhlin. Bílá keramika je známá svou vysokou odolností proti oxidaci a také odolností proti usazování. Nevýhodou bílé keramiky je špatná rezistence vůči tepelným šokům.



Obr. 22 Diagram složení bílé keramiky [33]

## 2. Černá keramika

Tato skupina keramiky je obdobně tvořena, jako bílá keramika, na bázi oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Do oxidu hliníku je přidáno množství karbidu titanu ( $\text{TiC}$ ). Tento typ keramiky nese název černá keramika, jelikož výsledná barva skupenství ( $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\text{TiC}$ ) má ryze černou barvu. Přídavek  $\text{TiC}$  ve výsledku zvyšuje tvrdost, zlepšuje tepelnou vodivost a potlačuje deformaci břitů vůči tepelné energii. Oproti bílé keramice se černá keramika vyznačuje vyšší tvrdostí a možností aplikace při vyšších pracovních teplotách. Skrze své vlastnosti lze černou keramiku využívat při vysokorychlostním dokončovacím kalených materiálů až do tvrdost HRC 65. Hlavní výhodou černé keramiky je cena. Např. cena břitové destičky kubického nitridu bóru je až dvacetinásobně dražší. [30] [33] [34] [35]



Obr. 23 Diagram složení černé keramiky [33]

### 3. Keramika na bázi Whiskerů

Do oxidu hlinitého jsou přidány aditiva v podobě Whiskerů karbidu křemíku (SiC), což jsou základní stavební materiály této soustavy keramiky. Whiskery jsou velmi jemnozrné krystaly karbidy křemíku, které mají jehlicovitý tvar (šířka od 0,1 do 1  $\mu\text{m}$ , délka od 5 do 100  $\mu\text{m}$ ) v podobě zvířecích vousů (whisker znamená v překladu z angličtiny do češtiny vous). Kombinace SiC je odolnější vůči tepelným šokům, eliminuje tvorbu trhlin v důsledku nárazů při řezání, zvyšuje pevnost (až 550 GPa), houževnatost, tepelnou vodivost, odolnost vůči opotřebení. Tato soustava keramiky je ze všech keramik na bázi oxidu hlinitého nejtvrdší a nejlépe odolává tepelným šokům. Tento typ keramiky se využívá při vysokorychlostním dokončování superslitin na bázi niklu a kobaltu (řezná teplota se pohybuje kolem 1 800 °C). Na druhou stranu se nedoporučuje obrábět železné slitiny s tvrdostí, která je nižší než HRC 42, protože dochází k chemické reakci mezi železem a uhlíkem (uhlík je obsažen ve výztuže karbidu křemíku). Řeznou strategií je naprogramování větších hloubek řezu, které břitovou destičku nasměrují hluboko do obráběného materiálu. [30] [33] [34] [35]



Obr. 24 Diagram složení keramiky na bázi Whiskerů [33]

#### 4. Keramika na bázi nitridu křemíku

Jak už z názvu vyplývá, hlavním prvkem této keramiky je nitrid křemíku ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), který je v soustavě obsažen ve tvaru jehlic (odlišný oproti whiskerům oxidu hlinitého). Tyto podlouhlé jehlice utváří materiál se schopností samovyztužení. Propletené jehlicovité krystaly výrazně potlačují zvětšování trhlin, které mohou vzniknout při nárazech u obrábění. Keramika na bázi nitridu křemíku je velmi odolná vůči tepelným šokům (nízká tepelná roztažnost), má vysokou pevnost v lomu (obdobné hodnoty pevnosti jako u slinutých karbidů) a lomová houževnatost je ve srovnání s keramikou na bázi oxidu hlinitého dvojnásobně vyšší. Své největší uplatnění tento typ keramiky nachází tam, kde není vhodné použití klasické rezné keramiky. Nejčastěji se tato keramika aplikuje u hrubování šedých litin při vysokých rezných rychlostech ( $v_c$  až 1000 m/min a  $f$  může nabývat až 1 mm/ot). Slabá chemická stabilita omezuje využití této keramiky při obrábění dalších typů materiálů. [27] [30] [33] [34] [35]



Obr. 25 Diagram složení keramiky na bázi nitridu křemíku [33]

## 5. Sialon

Dalším keramickým řezným materiálem na bázi křemíku je Sialon ( $\text{SiAlON}$ ). Tento keramický materiál má ze všech řezných materiálů nejvyšší odolnost vůči odpevnění a creepu v rozmezí  $700 - 1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ , kde si současně zachovává tvrdost ( $1\,500 - 1\,600\text{ HV}$ ). Na rozdíl od nitridu křemíku ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) jsou ve směsi přidány složky oxidu hlinitého, díky kterým dochází ke zlepšení tepelné odolnosti. Sialony jsou chemicky stabilnější než keramika na bázi nitridu křemíku, na druhou stranu jsou méně houževnaté a nejsou tak odolné vůči tepelným šokům. Dá se konstatovat, že Sialon je kompozitní materiál, jelikož obsahuje tvrdou matici (fáze alfa) a jehlice (fáze beta) zajišťující houževnatost. Sialon patří mezi nejodolnější materiály a jsou vhodné pro vysokorychlostní obrábění superslitin, šedé litiny a žáruvzdorných slitin (HRSA). [27] [30] [33] [34]



Obr. 26 Diagram složení Sialonu [33]

Materiál obrobku	KERAMIKA				
	 Bílá keramika	 Černá keramika	 Whisker	 Nitrid křemíku	 Silaon
Litiny	●	●		●	
Žárovzdorné slitiny			●		●
Kalené materiály		●			

Obr. 27 Prioritní využití řezné keramiky [33]

### 2.1.6 Kubický nitrid bóru

Kubický nitrid bóru (KBN) je po diamantu nejtvrdějším řezným materiálem. Základní složení KBN je z prvků dusíku a bóru. Při působení velkého tlaku a teploty vzniká kubický nitrid bóru přeměnou z hexagonálního nitridu bóru na kubický nitrid bóru. Lze konstatovat, že za působení teploty a tlaku dochází ke spojení kubických krystalů bóru s pojivem (keramické nebo kovové). Částice, které jsou neuspořádané vytváří hustou polykrystalickou strukturu a krystal KNB je téměř totožný jako krystal syntetického diamantu. KBN se vyznačuje chemickou stabilitou, poměrně velkou houževnatostí, dobrou tepelnou vodivostí a oproti diamantu má mnohonásobně větší odolnost vůči vysokým teplotám.

KBN nachází své uplatnění převážně u obrábění kalených materiálů (kovaná ocel, kalená litina, žárovzdorné slitiny, martenzitické korozivzdorné oceli a kovy na bázi kobaltu a železa).

Britové destičky KBN lze povlakovat metodou CVD nebo PVD. [25] [36]

### 2.1.7 Polykrystalický diamant (PKD)

Tato skupina řezných materiálů představuje krystalickou modifikaci, jenž je založena na bázi čistého uhlíku. Atomy jsou spojeny v kovalentně plošně středěné kubické mřížce. Krystalizace je uskutečněna za působení vysokého tlaku (přes 700 000 MPa) a teplotě (vyšší než 1 300 °C). Podobně jako u KBN, syntetický diamant z grafitu vzniká přeměnou hexagonální mřížky na kubickou mřížku diamantu. Při metodě HPHT (*High Pressure – High Temperature*) se používají katalyzátory, jenž rozpouští uhlík v grafitu nebo diamantovém prášku a dopravuje jej na místo nárůstku, ve kterém dochází k precipitaci na diamantové zárodky. Katalyzátory jsou kovové nebo nekovové. Nejvíce využívanými katalyzátory jsou přechodové kovy (Cr, Mn, Fe, Ni, Co).

Hlavní předností diamantu jsou mimořádné fyzikální vlastnosti (nejvyšší tvrdost z přírodních nerostů, vynikající tepelná vodivost a nízká elektrická vodivost). Díky těmto unikátním vlastnostem je diamant vhodný jako materiál pro řezné nástroje. [37]

Vlastnosti	Diamant				Kubický nitrid bóru			
	M		P		M		P	
Měrná hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	3,515	3,520	3,42	4,50	3,43	3,50	3,42	4,40
Délka strany kubické mřížky [nm]	0,3567				0,3615			
Pevnost v tlaku [GPa]	6,90	16,53	4,2	8,0	6,9		2,7	3,5
Pevnost v ohybu [MPa]	1350		1200	1700	700		500	800
Tvrdost [HV]	5700	13000	5000	8000	4000	7500	2700	3500
Modul pružnosti v tahu [GPa]	820	1250	776	925	650	850	587	800
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	507		430				280	
Lomová houževnatost $K_{IC}$ [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]	3,4	4,2	6,0	11,0			3,5	6,7
Poissonovo číslo [-]	0,10	0,29	0,20				0,20	0,22
Součinitel délkové roztažnosti [ $10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	0,8	4,8	3,2	4,6	3,5	5,8	4,6	4,9
Měrná tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	500	2200	120	550	13	200	44	200
Teplotní stálost [°C]	600	700			1200	1400		
<i>Pozn.: M – monokrystalický, P - polykrystalický</i>								

Obr. 28 Srovnání vlastností KBN a diamantu [25]

### 3 JAKOST POVRCHU

Dodržování jakosti povrchu patří mezi základní zásady a požadavky výrobních technologií. Z obecného hlediska lze konstatovat, že jakost povrchu je celková rozměrová přesnost. Do dané charakteristiky jakosti povrchu lze blíže popsat geometrickou, rozměrovou přesnost a charakteristiku povrchové vrstvy. Tento soubor se nazývá texturou povrchu, který se projevuje vlnitostí, drsností a změnou v materiálu, jenž se objevuje u technologických metod pod povrchem materiálu. Při vyhodnocování těchto změn se vyjadřuje hodnota zbytkového napětí. Všechny součásti po technologickém procesu mají vlastní rozměr, drsnost a tvar, což se rovná celkové jakosti povrchu. U jakosti se projevuje přesnost strojních součástí, přestup tepla, odolnost vůči korozi, a ztráty, které vznikly třením. Na vyhotovené součásti lze naměřit a následně vyhodnotit průběhy nerovností povrchu (výška vrcholů, rozteče bodů profilu nebo tvar nerovností).

Na opracované ploše při výrobním procesu může vzniknout několik změn:

- vznik mikro a makrotrhlin
- zbytková napětí ve vrstvě povrchu
- dochází k rekrystalizaci
- dochází ke změně tvrdosti povrchové vrstvy
- povrch součástky je plasticky deformován vůči mechanickým a tepelným účinkům.

[38]

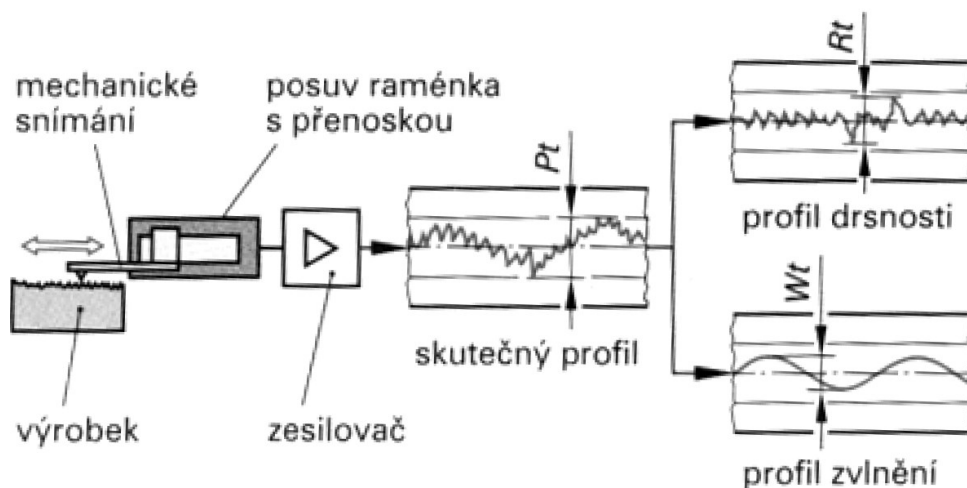
#### 3.1 Vlastnosti textury povrchu

Povrchy součástí a části strojů vlastní funkční charakteristiku, jenž ve vysoké míře závisí na vlastnostech povrchu. Vhodná volba a splnění daných požadavků má vliv při vyhotovení součásti povrchové vlastnosti, životnost konstrukcí a celkové spolehlivosti. Vyhodnocení charakteru povrchu vychází z profilové metody, jenž se hodnotí z profilu povrchu čáry.

Geometrické požadavky, jež jsou vztaženy na výrobu GPS (*Geometrical Product Specification*), jsou zahrnuty v normách ČSN EN ISO 4285 – 4288, kde se zabývají strukturou povrchu, termíny, definicí, pravidly pro posouzení této plochy a parametry struktury povrchu.

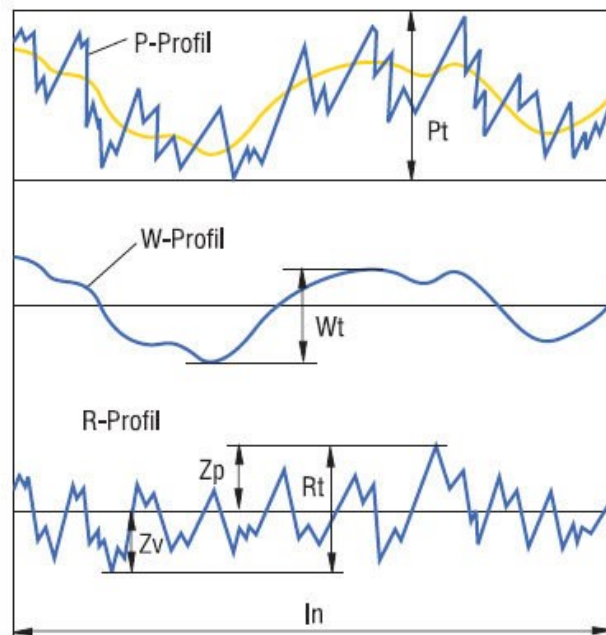
Reálný povrch součástky vykazuje navzdory struktuře daného výkresu odchylky, které jsou závislé na výrobním postupu. Odečtený primární profil je profil, který obsahuje nejmenší detaily. Je naměřen podle vysoce přesného diamantového hrotu nebo laseru. Primární profil je referenčním základem pro určení nerovností různých řádů. Křivku je možno složit z křivek různých vlnových délek. Určení profilu pro první řád, což je křivka s největší vlnovou délkou, se jemné vlnění vyšších řádů prokládá čarou tak, aby se uchovala střední hodnota. Měření je ve většině případech prováděno v místech plochy, kde je největší pravděpodobnost největšího zvlnění a největší drsnosti. Na plochách, které jsou viditelně poškozeny, nemá smysl celkové měření povrchu podstupovat.

U kontaktního drsnoměru posuvné ramenu s přenoskou mění pohyb diamantového hrotu (viz. obr) na elektrické signály, z kterých se následně určují parametry ( $P_t$ ,  $W_t$ ,  $R_t$  atd.). Pomocí normy DIN EN ISO 11562 se provede filtrace, díky které se z nefiltrovaného profilu (P-profil) získá profil vlnitosti ( $W$ -profil) a profil drsnosti ( $R$ -profil). [32] [38] [39]



Obr. 29 Princip měření drsnosti povrchu [32]





Obr. 30 Získání profilu vlnitosti a drsnosti filtrací [39]

**Hloubka profilu  $P_t$**  – je nejmenší rozteč mezi rovnoběžnými mezními přímkami z profilu, který je nefiltrovaný uvnitř měřené délky  $l_n$ .  $P_t$  je velmi závislý na měřené délce  $l_n$ . Hloubka profilu je významná k vyhodnocení jednotlivých chyb povrchu.

**Hloubka vln  $W_t$**  – je vzdálenost mezi nejnižším a nejvyšším bodem srovnaného profilu vlnitosti uvnitř měřené délky  $dl$ . Hloubka vln se využívá ke kontrole výrobního postupu, kde vlnitost představuje kritérium  $R_t$ , což je největší hloubka drsnosti.

Hloubku vln ( $W_t$ ) a hloubku profilu ( $P_t$ ) popisuje norma DIN EN ISO 4287.

Mezní vlnové délky – získaný profil drsnosti je složen z elementů oddělených dle vlnové délky profilovým filtrem  $l_c$ . Metoda filtrace k oddělení vlnitosti a drsnosti charakterizuje mezní vlnová délka. **Délka celková ( $l_t$ )** je délka trajektorie, po níž se pohybuje snímač (hrot, světelný paprsek) a snímá úchytky tvaru povrchu. Celková délka musí být delší než **délka měřená  $l_n$**  (vyhodnocovaná délka), z které se po sléze pomocí filtru získá tížený profil drsnosti. Všechny parametry drsnosti ( $R$ ) jsou definovány na **základní délce  $l_r$** . Výjimkou jsou pouze parametry  $R_t$  a  $R_{mr}(c)$ , jenž jsou definovány na základní délce  $l_r$ . [39]

### Tvar povrchu

Je obecný tvar povrchu při vyloučení vlnitosti a drsnosti. Úchytky mohou vzniknout nedokonalou tuhostí, nestabilní přímostí vodících ploch nebo vzniklým teplem během

výroby (deformace obrobené plochy). Tvarová odchylka je posouzení odchylky jednotlivého tvarového prvku od ideálního geometrického tvaru. Odchylky jsou nejčastěji způsobeny navzdory:

- Obráběcího stroje (vibrace, pružné deformace stroje a nepřesnost chodu)
- Obrobku (zbytkové napětí a nehomogenní materiál)
- Nástroje (nevhodný posuv, opotřebení nástroje a nevhodná geometrie)
- Prostředí (nestálá teplota okolí, vibrace přenášené ze strojů)

### Drsnost

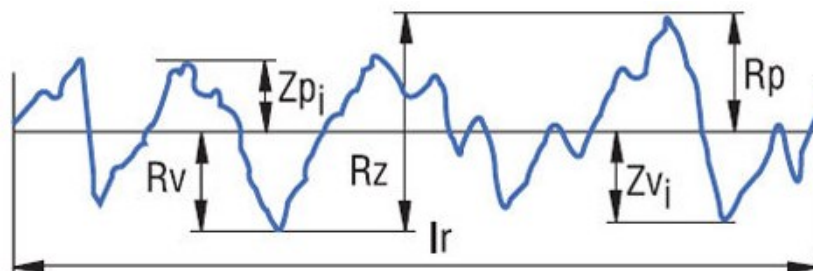
Drsností se rozumí nepravidelnosti na povrchu, jenž jsou způsobeny metodami výrobního procesu při pohybu mezi obrobkem a nástrojem. Povrch je též ovlivňován způsobem tvoření třísky, což se projevuje např. vytrháváním částic materiálu. Redukce do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu je náležitým řešením problému hodnocení nerovností. Profil je získán v rovině řezu, který je hlavním a důležitým zdrojem informací pro výsledné posouzení textury povrchu.

### Vlnitost

Vlnitost je úsek textury, na které je vytvořena drsnost. Je to soubor periodických a neperiodických výstupků. Vlnitost je ve velké míře způsobována chvěním, deformací obrobku a zpevněním materiálu. [32]

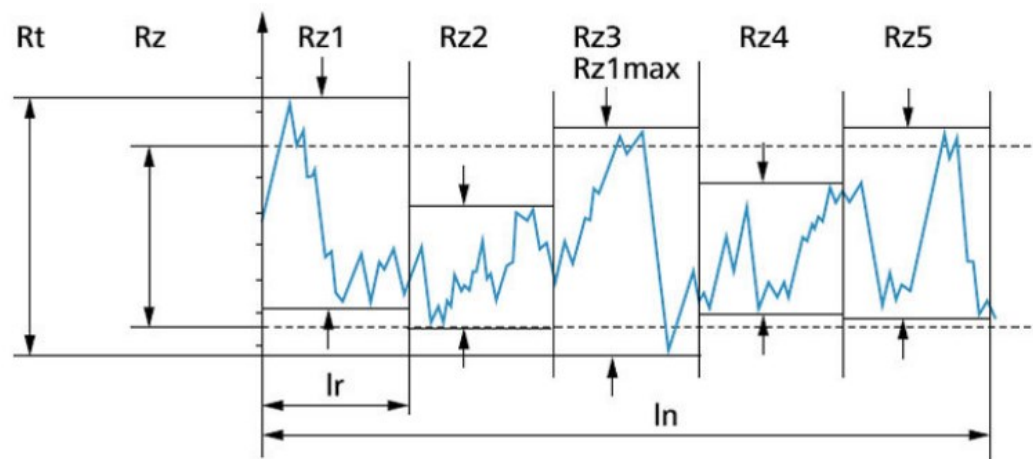
## 3.2 Hodnocení textury povrchu

- **R<sub>a</sub>** (střední aritmetická hodnota drsnosti) – aritmetický střed absolutních odchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř základní délky  $l_r$ . Vypovídací schopnost parametru je nízká,  $R_a$  nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu. (DIN EN ISO 4287)



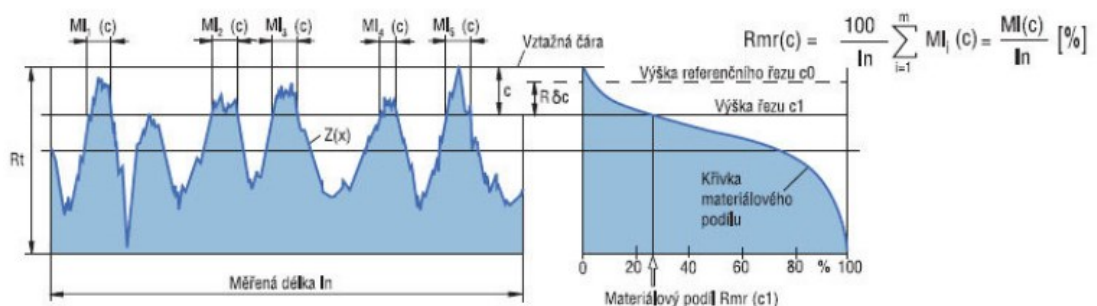
Obr. 31 Znáznornění střední aritmetická honota drsnosti  $R_a$  [39]

- **Parametr Rz** (střední hloubka drsnosti) – střední hloubka drsnosti je určena z pěti základních délek  $l_r$ .
- **Rz1max** (maximální hloubka drsnosti) je největší hodnota Rz z pěti základních délek  $l_r$ .
- **Rt** (celková výška profilu drsnosti) je vertikální vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem profilu na měřené délce  $l_n$ . (DIN EN ISO 4287)



Obr. 32 Znárodnění střední hloubky Rz, maximální hloubky Rz1max a celkové výšky profilu drsnosti Rt [39]

- **Rmr (c)** (materiálový podíl drsnosti profilu) – je procentuální podíl součtu délek materiálových přímek  $M_l(c)$  v dané výšce profilu k měřené délce  $l_n$ . Křivka podílu materiálu udává podíl materiálu jako funkci hladiny (výšky) řezu. Je doporučeno měřit nosný podíl v jedné výšce řezu relativně k výšce referenčního řezu  $c_0$ . Výška referenčního řezu je dána posunutím vztahné čáry do profilu k definovanému materiálovému podílu. [39]

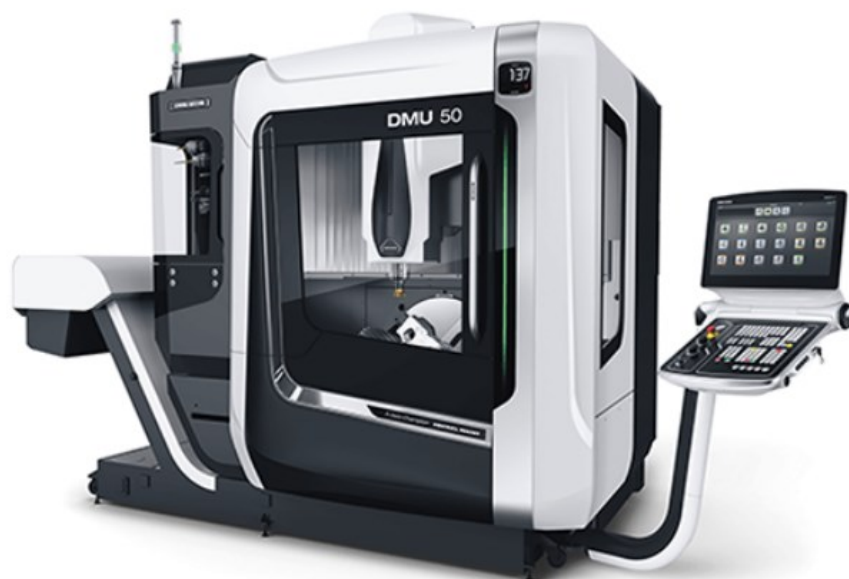


Obr. 33 Znárodnění materiálového poměru profilu Rmr (c) [39]

## 4 CNC OBRÁBĚNÍ

Klasické obrábění se liší od CNC obrábění v systému řízení stroje, kde se od původního ručního ovládání dostává k číslcovému řízení počítačem (CNC – *Computer Numerical Control*), u kterého jsou postupy stroje ovládány počítačem podle vytvořeného vstupního programu. Programy jsou nazývány CAM (*Computer Aided Manufacturing*), což v překladu do češtiny znamená počítačem podporovaná výroba. Tato výroba vychází z 3D CAD modelu (*Computer Aided Design*) počítačem podporovaní konstrukce. Díky vývoji počítačových technologií se stává CNC obrábění jednou z nejdůležitějších technologií aktuální doby. CNC metody jsou velmi přené, vhodné k automatizaci, nabízí velkou škálu výrobních operací, možnosti kontroly rozměrů a jakosti povrchu.

Mezi moderní generace CNC strojů jsou obráběcí centra, jenž disponují těmito vlastnostem a stávají se tak univerzálními obráběcími stroji. Obráběcí centra se v největší míře rozdělují podle počtu pracovních os. [40]



Obr. 34 Pětiosé obráběcí centrum třetí generace DMU 50 [43]

### 4.1 CNC programování

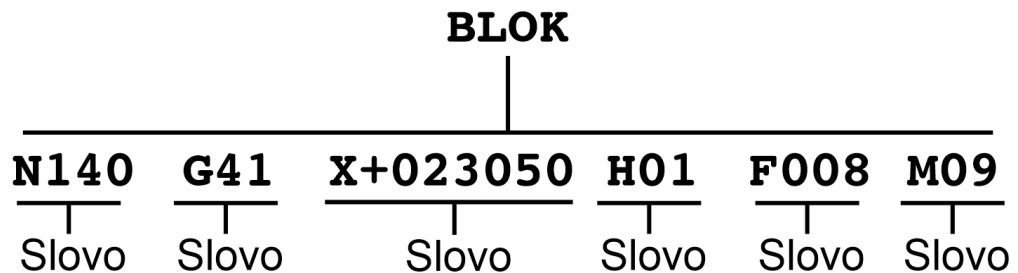
NC program je soubor zakódovaných informací s definovanou strukturou. Tyto informace vytváří pracovní cyklus, které obsahují všechny funkce a činnosti NC stroje, které musí být vykonány, aby došlo k výkonu výrobního procesu.

Programování rozděluje tři hlavní pojmy:

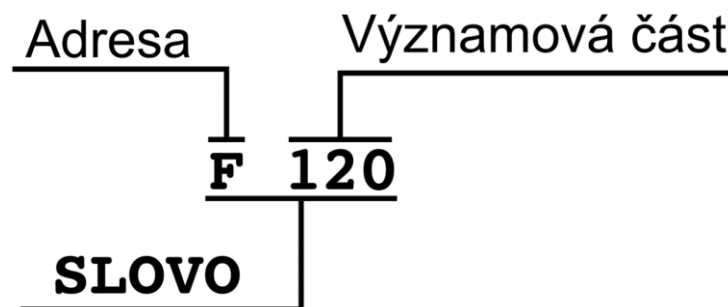
- Slovo – je základní pojem programu (funkce)
- Blok – je blok několika slov (věta)
- NC program – je uspořádaná posloupnost vět tvořící NC program

Slovo je definováno jako jedna funkce nebo příkaz, který je tvořeno pomocí dvou údajů:

- Číslo (významová část)
- Adresa (povelová část)



Obr. 35 Struktura programovaného bloku [41]



Obr. 36 Struktura programovaných slov [41]

Slova jsou nadále dělena na slova rozměrová a bezrozměrová

- Rozměrová slova jsou složena ze znamének (+ a -) a počtu číslic. Rozměrová slova vyjadřují geometrickou informaci (souřadnice, úhly a pootočení)
- Bezrozměrová slova jsou složena ze znaku a počtu číslic, řídí operační funkce stroje (otáčky, posuv, výměna nástroje atd.)

Bezrozměrná slova užívají tyto zkratky:

- A, B, C – úhel kolem os x, y, z
- D – úhlový rozměr
- F – posuvová síla

- G – přípravná funkce
- H – korekce nástrojů
- I, J, K – stoupání závitů rovnoběžně s osou x, y, z
- M (Make – udělej) - pomocná funkce
- N (Number – číslo) – číslo bloku
- R – rychloposuv
- S (Speed – rychlost) – hlavní řezný pohyb
- T (Tool – nástroj) – funkce nástroje
- U, V, W – udává rozměr sekundárního pohybu rovnoběžně s osou x, y, z
- X, Y, Z – udává rozměr hlavního pohybu.

Formáty bloku jsou rozděleny na formáty s proměnlivou a pevnou délkou.

Formáty s pevnou délkou obsahují jen číselné znaky. Pořadí znaků je stále stejné a nemůže se měnit. Hodnoty, které nejsou zadané se musí zapsat jako 0. [41]

N	G	G	G	G	G	G	G
003	40		-003150		99		08

*Obr. 37 Formát bloku s pevnou délkou [41]*

Formát s proměnlivou délkou se skládají ze dvou částí (čísla a adresy), proto je možné vynechávat hodnoty, které jsou prázdné.

N	G	G	G	G	G	G	G
N003	G40		Y-003150		F99		M08

*Obr. 38 Formát bloku s proměnlivou délkou [41]*

NC programy se generují pomocí několika způsobů, které závisí na stavu výpočetní a NC techniky. Rozdělují se mnoho způsobů vytvoření NC programu.

- 1) – ruční programování, strojní programování

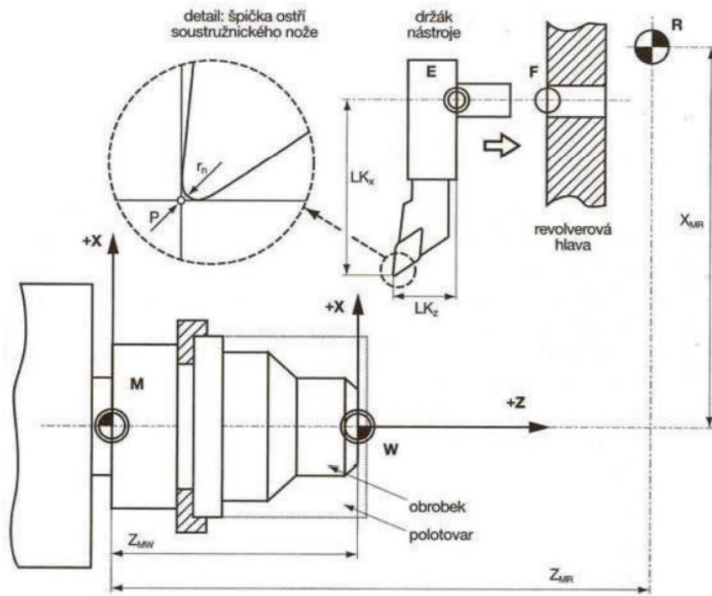
- 2) – programování přímým zápisem NC kódu, programování pomocí geometrických programovacích jazyků, programování pomocí CAD systému a programování pomocí CAD/CAM systému.
- 3) – online programování probíhá přímo na stroji, offline program je vytvořen mimo řídicí systém stroje. [41]

## 4.2 Pracovní body CNC strojů

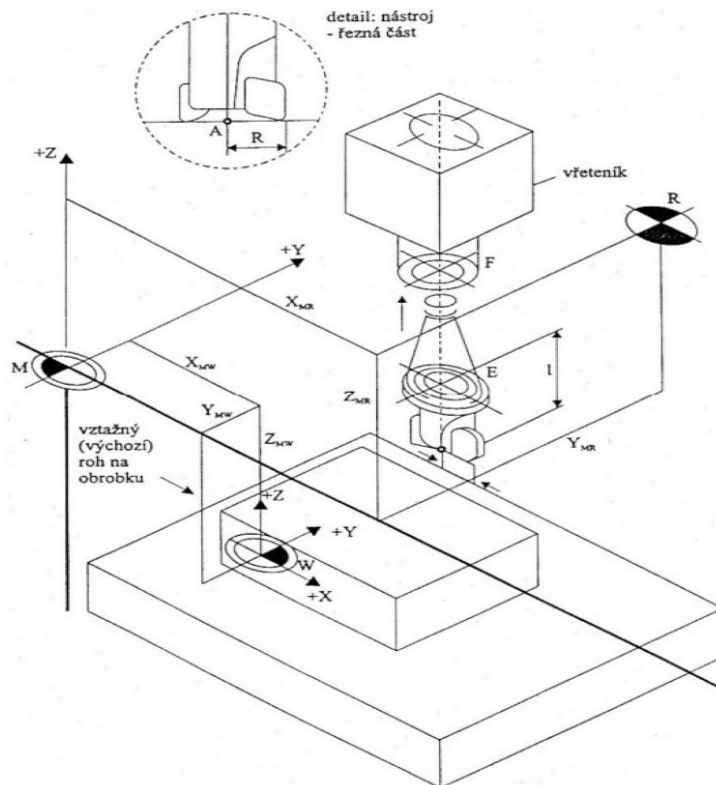
U tvorby CNC programu se pracuje s několika výchozími body. Některé jsou pevně dány z konstrukce stroje a jiné se musí určit. Tyto body se nachází na samotném nástroji i na obrobku. Určení polohy bodů je velmi důležité a v případě chyby by mohlo dojít k vyrobení chybového výrobku nebo by mohla vzniknout kolize nástroje se strojem. [41]

Výchozí body:

- Nulový bod obrobku (W) – tento bod se nachází na obrobku, programátor si může libovolně zvolit polohu tohoto bodu. Zpravidla se volí bod na čele obrobku. Následné programování by mělo být díky poloze jednodušší. Nulový bod obrobku určuje počátek souřadnicového systému.
- Nulový bod stroje (M) – tento bod je fixně zadán a závisí na povaze stroje, např. u soustruhu je umístěn v ose obrobku.
- Referenční bod (R) – poloha referenčního bodu je dána výrobcem. Při spuštění stroje si stroj do referenčního bodu najede samostatně, aby přesně zjistil svou polohu.
- Bod vřetene (F) – poloha bodu vřetene závisí na druhu stroje. U frézek se bod nachází na čele vřetene, u soustruhu je tento bod určen jako bod výměny nástroje.
- Bod držáku nástroje (E) – bod držáku nástroje nastavuje zvolený nástroj. Bod držáku by se měl nacházet v bodu vřetene (F).
- Bod špičky nástroje (P) – tento bod udává polohu špičky nástroje. Bod špičky nástroje se ovšem určuje složitě, jelikož soustružnické nože nemají dokonalou špičku (špička je ve tvaru rádiusu). [41]



Obr. 39 Souřadnicový systém a pracovní body soustruhu [40]



Obr. 40 Souřadnicový systém a pracovní body frézky [40]

### 4.3 Rozdělení CNC strojů

CNC stroje lze rozdělit dle různých kritérií do několika skupin. Jednotlivé stroje jsou voleny v závislostech na požadavcích výroby, počtu kusů, celkové ceně atd.



1) Podle druhu technologické operace:

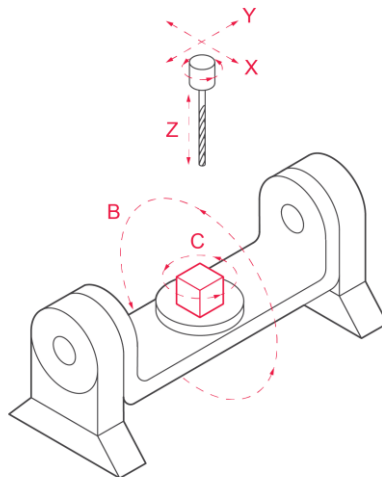
- Frézování
- Soustružení
- Vrzání (vyvrtávání, závitování, vyhrubování, vystružování atd.)
- Broušení.

2) Podle počtu technologických operací, které se provádí na jednom stroji:

- Jednoprocesní – jsou to stroje, které jsou schopny vykonat jen jeden výrobní proces na jediné upnutí.
- Víceprocesní – jsou to obráběcí centra, která jsou schopny na jedno upnutí obrobku vykonat více výrobních procesů (vrtání a frézování).

3) Podle počtu os: Výrobní procesy složitých tvarů vyžadují schopnost stroje pracovat ve více osách současně. Předpokládá se, že stroj, který nabízí pracovat ve více osách dokáže vyhotovit složitější a přesnější tvary. Nepsaným pravidlem je to, že s narůstajícím počtem pracovních os roste celková cena stroje.

- dvouosé
- dvouapůlosé
- tříosé
- čtyřosé
- pětiosé. [25]



Obr. 41 Schéma pětiosého uspořádání frézky [42]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem diplomové práce je zjištění vlivu dokončovacích **soudečkových fréz** na jakost povrchu formy a zjištění vlivu způsobu metody obrábění na vzniklé řezné síly a na tvorbu řezných třísek.

Prvním cílem je vytvoření zkušebních vzorků, na které budou navazovat další dílčí cíle diplomové práce. Jeden z cílů práce je **vyhodnocení drsnosti** tvarových ploch po obráběcím procesu dokončování. Povrch obrobených ploch je vyhodnocován třemi parametry drsnosti, a to aritmetickým průměrem absolutních hodnot skutečného profilu ( $R_a$ ), střední hloubkou drsnosti ( $R_z$ ) a tří hodnot materiálového podílu ( $R_{\delta c}$ ). Dalším cílem je zjistit u dokončování vliv volby nástroje soudečkových fréz na **velikost řezných sil** ( $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ ) a odlišnost řezných sil při použití metod sousledného a nesousledného obrábění. Stejně tak je cílem **porovnání velikosti a tvaru vzniklých řezných třísek**. V realizaci experimentu jsou voleny dvě metody frézování, ke kterým je voleno několik řezných parametrů.

- **Metody frézování:**
  - a) Sousledné
  - b) Nesousledné
- **Proměnné řezné parametry:**
  - a) Posuv na zub  $f_z$  [mm]
  - b) Šířka řezu (boční posuv)  $a_e$  [mm]
- **Konstantní řezné parametry:**
  - a) Hloubka řezu  $a_p$  [mm]
  - b) Řezná rychlost  $v_c$  [m/min]

## 6 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ

K realizaci experimentu bylo použito celkově pět zařízení, které vlastní Fakulta technologická Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

V první řadě bylo nutno vytvořit samotné vzorky. Vstupním materiálem pro výrobu vzorků byla konstrukční ocel 12 050 (C45, 1.1191, EN 10083) s rozměry 15 x 70 x 300 (*Obr. 57*). Z tohoto bloku konstrukční oceli byly na pásové pile PPK-175 T nařezány další dílce, na kterých byly provedeny frézovací operace, díky kterým byly vzorky připraveny na experiment. Všechny frézovací operace proběhly na univerzální CNC frézce DMG MORI DMU 50 3. generace. Detailnější postup tvorby vzorků a průběh tvarového obrábění je zmíněn v kapitole **8** (strana 70).

V neposlední řadě bylo nutné vyhodnotit naměřená data. Jak už bylo v kapitole **5** (strana 51) uvedeno, měřily se tři parametry drsnosti obroběných povrchů, vzniklé řezné síly při obrábění a velikost třísek. Pro tato měření byl použit kontaktní drsnoměr, dynamometr a mikroskop.

## 6.1 Pásová pila PPK-175 T

Tato pásová pila disponuje s maximální řeznou rychlostí 65 m/min a příkonem 750 W. Na pásové pile PPK-175 T lze při úhlu řezání 90° řezat materiály s rozměry až 180 x 300 mm. Pro řezání byl použit řezný pás o rozměrech 20 x 0,9 x 2360 mm.

Pásová pila PPK-175 byla použita pro nařezání vstupního materiálu, jenž byl rozdělen na 4 dílčí části. Po vytvoření podélných drážek a zarovnání stěn se každý ze 4 kusů rozřezal na 2 části.

Tab. 2 Technické parametry pásové pily PPK-175 T

Rok výroby	2004
Řezná rychlost	22/33/45/65 m/min
Rozměr pásu	20 x 0,9 x 2360 mm
Max. rozměr řezaného materiálu při 90°	180 x 110 mm
Max. rozměr řezaného materiálu při 45°	180 x 110 mm
Napětí	AC/ 400 V; 50 Hz
Příkon	750 W
Hmotnost	130 kg



Obr. 42 Pásová pila PPK-175 T při řezání vstupního materiálu

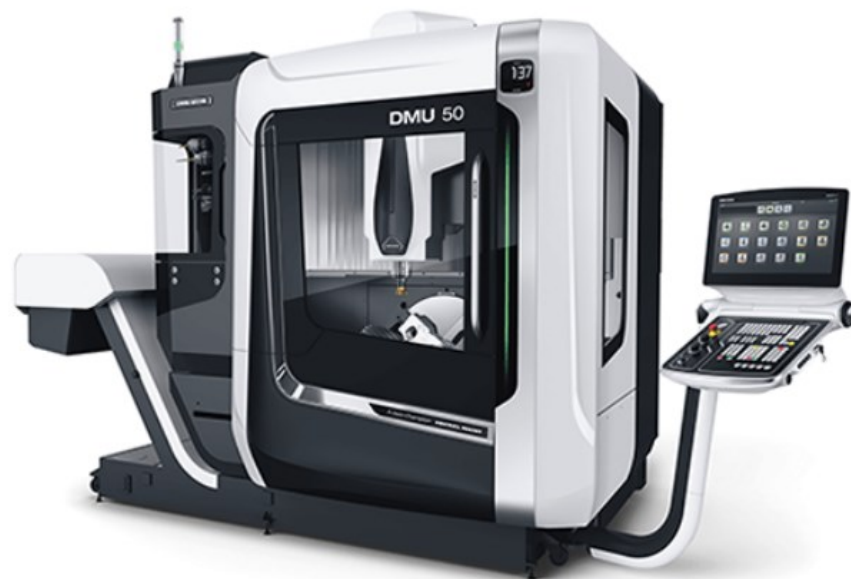
## 6.2 Univerzální CNC frézka s naklápěcím rotačním stolem DMG MORI DMU 50 3. generace

Obráběcí centrum DMG MORI DMU 50 v základní verzi nabízí zásobník nástrojů se třiceti pozicemi, chlazená ložiska stolu pro nejvyšší možnou přesnost, přímý pohon s kuličkovými šrouby, lože, které je z celistvého kusu, systém přímého měření dráhy ve všech osách stroje a řídicí/operační systém CELOS.

Na tomto pětiosém obráběcím centru bylo provedeno hned několik operací. Pomocí ručního programování byly sraženy na obrobcih stěny, dále byly vytvořeny podélné drážky pro upnutí k dynamometru, vybrání pro lepší manipulaci s obrobkem a v neposlední řadě bylo provedeno hrubování tvarových ploch. Na hrubovací proces navázal proces dokončování, kde bylo využito pětiosé obrábění monolitními frézami.

*Tab. 3 Technické parametry univerzální CNC frézky DMG MORI DMU 50*

Počet os	5
Max. pojezd v ose X	650 mm
Max. pojezd v ose Y	520 mm
Max. pojezd v ose Z	475 mm
Max. zatížení stolu	300 kg
Průměr stolu	630 mm
Max. otáčky vřetene	15 000 min <sup>-1</sup>
Řízení a SW	Siemens/Celos
Max. průměr obrobku	630 mm
Max. výška obrobku	600 mm
Rozsah naklápění v ose B	-35 / 110°
Řízení	SIEMENS, HEIDENHAIN, MAPPS Fanuc



Obr. 43 Pětiosé obráběcí centrum třetí generace DMU 50 [43]

### 6.3 Dynamometr KISTLER Typ 9129AA

Dynamometr KISTLER Typ 9129AA je vícesložkový dynamometr, jenž umožňuje měření tří složek výsledného vektoru síly a tří složek výsledného vektoru momentu. Tento typ dynamometru se vyznačuje velkým rozsahem měření, malou teplotní chybou a disponuje menšími rozměry. Tento dynamometr je složen ze tříložkových snímačů síly, jenž se nachází mezi krycí deskou a dvěma základními deskami. Malé teplotní chyby jsou zajištěny speciální montáží senzorů. Každý snímač síly obsahuje tři krystalové kotouče, ze kterých je jeden citlivý na zatížení ve směru osy Y a zbývající dva jsou citlivé na smykovou sílu buď v ose X, nebo v ose Z. Síly jsou měřeny téměř bez posunu a výstupy ze čtyř vestavěných snímačů sil se přenáší do devítipólové zásuvky. Dynamometr KISTLER Typ 9129AA je odolný vůči korozi a je ochraňován vůči vniknutím chladicí kapaliny. K tomuto dynamometru jsou kompatibilní dva kabely (1687B a 1677A).

Toto zařízení bylo využito pro měření řezných sil ( $F_z$ ,  $F_y$  a  $F_x$ ) u dokončovacích operacích a po sléze byly informace o velikosti naměřených sil zpracovávány v softwaru DynoWare.

Tab. 4 Technické dynamometru KISTLER Typ 9129AA

Max. rozsah měření vektorů sil ( $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ )	-10 až 10 kN
Max. rozsah měření vektorů momentů ( $M_x$ , $M_y$ , $M_z$ )	-500 až 500 N.m

Kalibrovaný rozsah měření 100 % ( $F_x, F_y, F_z$ )	0 až 10 kN
Kalibrovaný dílčí rozsah měření 10 % ( $F_x, F_y, F_z$ )	0 až 1 kN
Kalibrovaný dílčí rozsah měření 1 % ( $F_x, F_y, F_z$ )	0 až 0,1 kN
Přetížení ( $F_x, F_y, F_z$ )	20 %
Jmenovitá citlivost $F_x; F_y; F_z$	$\approx -8,1; \approx -4,1; \approx -8,1$ pc/N
Rozsah provozních teplot	0 až 70 °C
Hmotnost dynamometru	3,2 kg
Hmotnost krycí desky	2 kg
Montážní plocha	90x105 mm
Připojení	Zásuvka o devíti pinech

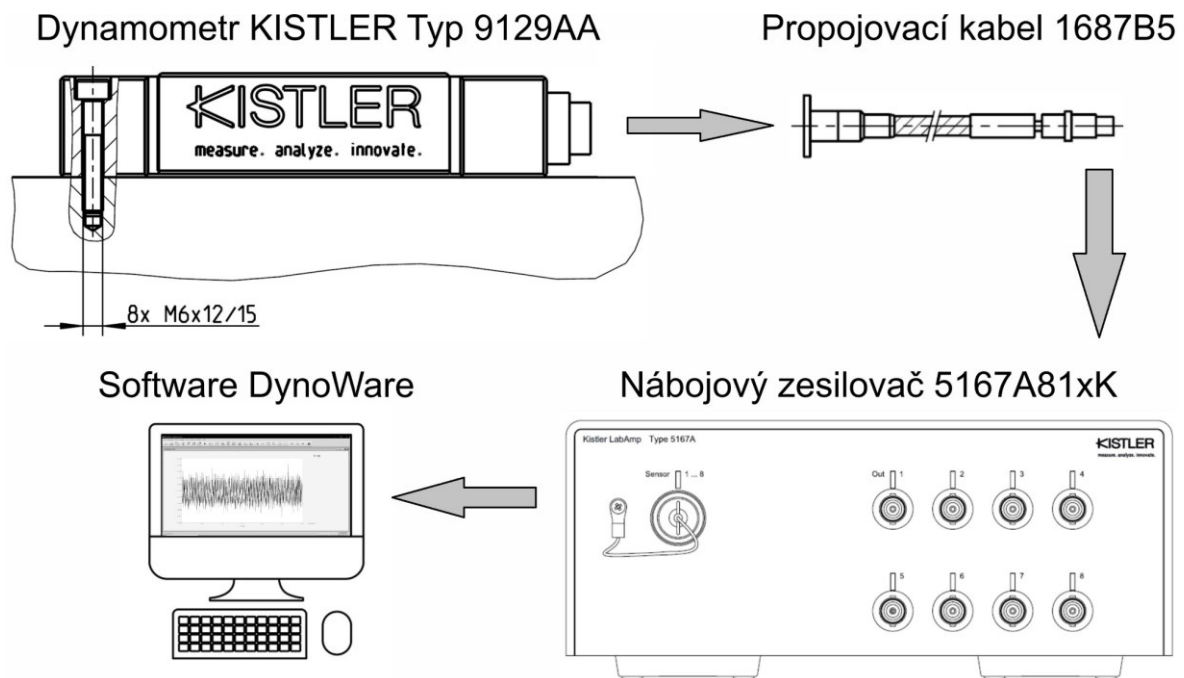


Obr. 44 Dynamometr KISTLER Typ 9129AA

### 6.3.1 Příslušenství dynamometru

Nezbytnou součástí při měření rezných sil byl nábojový zesilovač Typ 5167A81xK, který sloužil k převodu měřicího signálu na elektrické napětí, které je úměrné působící síle. K propojení mezi dynamometrem a nábojovým zesilovačem posloužil kabel s označením 1687B5, jenž je opatřen kovovým ocelovým pláštěm o délce 5 m. Celé schéma zapojení lze vidět na obrázku níže (Obr. 45).





Obr. 45 Schéma sestavy dynamometru

#### 6.4 Kontaktní drsnoměr Mitutoyo SJ410

Pro měření drsností povrchů obrobených ploch byl využit kontaktní drsnoměr Mitutoyo SJ 410. Jedná se o přesně měřící přístroj, jenž dokáže umožnit jednoduché a velmi přesné měření drsnosti povrchů. Drsnoměr Mitutoyo SJ410 je vybaven tiskárnou, barevným a dotykovým LCD displejem (15,5 cm) a je schopen měřit bez patky. Snímač tohoto drsnoměru umožňuje měřit skutečný profil (P), profil vlnitosti (W), profil drsnosti (R) a je schopen povrchové kompenzace zakřivení, R-ploch a kompenzace sklonu. Tento drsnoměr je v souladu hned s několika normami (EN ISO, ANSI, VDA, JIS, DIN) a podporuje až 16 jazyků. [44]

Tab. 5 Technické parametry kontaktního drsnoměru Mitutoyo SJ410 [44]

Rozsah měření – osa x	800 $\mu\text{m}$ ; 80 $\mu\text{m}$ ; 8 $\mu\text{m}$
Princip měření	Diferenciální indukčnost
Rozlišení	0,01 $\mu\text{m}$ – rozsah 800 $\mu\text{m}$
	0,001 $\mu\text{m}$ – rozsah 80 $\mu\text{m}$
	0,0001 $\mu\text{m}$ – rozsah 8 $\mu\text{m}$
Měřicí síla	0,75 mN; 4 mN; 0,75 mN; 4 mN
Metoda měření	Měření s patkou / bez patky
Rychlost měření posuvové jednotky v ose x	0,05 až 1 mm/s
Rychlost pojezdu posuvové jednotky v ose x	0,5 až 5 mm/s

Přímost posuvové jednotky v ose x	0,3 $\mu\text{m}$ / 25 mm
Normy	ISO 1997, JIS 1982, JIS 1994, JIS 2001, VDA, ANSI
Měřitelné profily	R-Motif, W-Motif, filtrovaná křivka vlnitosti, drsnost, DF
Analýzy grafů	Křivky ADC a BAC
Filtry	Gaussův filtr, 2CR, PC75
Délka cut-off $\lambda$	0,008; 0,25; 0,8; 2,5; 8,0 mm
Délka cut-off $\lambda^{*5}$	2,5; 8,0; 25 $\mu\text{m}$
Příkon	50 W
Rozměry zobrazovací jednotky	275 x 198 x 109 mm
Rozměry posuvové jednotky	128 x 35,8 x 46,6
Hmotnost zobrazovací jednotky	1,7 kg
Hmotnost posuvové jednotky	0,6 kg



Obr. 46 Přístroj pro měření drsnosti povrchu Mitutoyo SJ-410 [44]

## 6.5 Mikroskop Carl Zeiss Jena

Pomocí mikroskopu Carl Zeiss Jena Spitzenhöhe 43,19 mm byly naměřeny a porovnány řezné třísky. Ke zpracování informací řezné třísky byl využit software Dinocapture 2.0. V tomto programu byla provedena délková kalibrace, díky které bylo umožněno přesné měření délek řezných třísek. Po naměření se výsledné délky vyhodnotily v programu Excel.

Tento mikroskop je vybaven otočným stolem (360°), který je krytý skleněnou tabulkou o průměru  $\varnothing 180$  mm. Celkové rozměry stolu činí 300 x 240 mm. Vertikální výšku mikroskopu je možné nastavit až do 120 mm a u měření lze použít volitelný okulár. Stolem mikroskopu je možné pohybovat ve směru osy X, Y a A (Obr. 47). Napájení pro osvětlení, okuláry a různé příslušenství je 220 V.



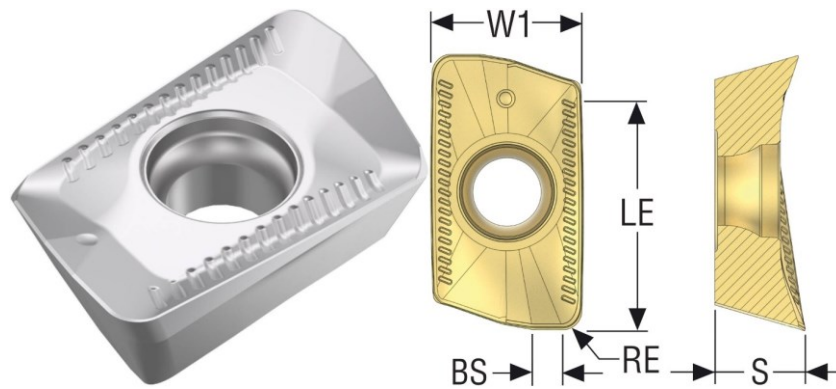
Obr. 47 Carl Zeiss Jena Spitzenhöhe 43,19 mm

## 7 POUŽITÉ NÁSTROJE

Pro experiment, kde se obráběly tvarové plochy, byly využity soudečkové frézy od výrobce Seco Tools. Tvarové plochy byly obráběny metodou frézování PPC (*Parabolic Performance Cutting*). Metoda PPC využívá u obrábění velký profilový rádius frézy (u *Obr. 54* označené jako PRFRAD2), jenž umožňuje větší kontaktní plochu s obrobkem. Díky tomuto faktu je možné využívat u obrábění velkých hodnot hloubky řezu ( $a_p$ ). Soudečkové frézy, někdy nazývané i jako barelové, jsou známy vyšším počtem břitů (nejčastěji 4 a 6), což s kombinací s vysokou hodnotou hloubky řezu maximalizuje produktivitu obrábění (nízké doby obrábění). Soudečkové frézy v praxi nachází své velké uplatnění u dokončovacích operacích složitých tvarových ploch (dutiny forem), kde se využívá pětiosé obrábění.

### 7.1 Břítové destičky XOMX10T308TR-ME07 MS2050

Tyto břítové destičky od výrobce Seco Tools byly použity v operacích pro přípravu vzorků (zarovnání všech stěn a hrubování). Všechny technické a rozměrové parametry jsou zapsány v tabulce níže. K fríze bylo zasazeno celkově 5 břítových destiček tohoto typu.



Obr. 48 Břítová destička XOMX10T308TR-ME07 MS2050

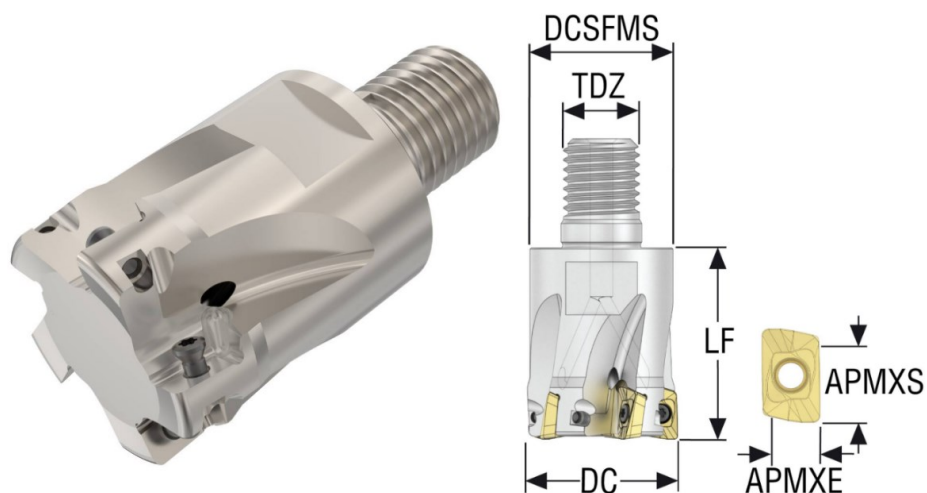
Tab. 6 Technické a rozměrové parametry břítové destičky XOMX10T308TR-ME07 MS2050

Hlavní úhel hřbetu	15,00 deg
Velikost hladicí plošky (BS)	1,30 mm
Počet břitů	2
Typ řezné geometrie	ME07
Tvar a velikost	XOMX10T3
Úhel čela	20,40 deg
Třída řezného materiálu	MS2050

Povlakování	Carbide PVD
Směr řezu	Pravý
Efektivní délka břitu (LE)	9,30 mm
Rohový rádius (RE)	0,80 mm
Tloušťka destičky (S)	3,83 mm
Šířka (W1)	6,90 mm
Hmotnost destičky	2 g

## 7.2 Nástroj R127.69-1632.RE-10-5A

Do tohoto nástroje bylo upevněno 5 břitových destiček XOMX10T308TR-ME07 MS2050 (Obr. 48). Tento nástroj byl v diplomové práci využíván v malé míře, jelikož byl použit pouze pro přípravné operace vzorků. Technické a rozměrové parametry nástroje jsou popsány v tabulce níže.



Obr. 49 Nástroj R127.69-1632.RE-10-5A

Tab. 7 Technické a rozměrové parametry nástroje R127.69-1632.RE-10-5A

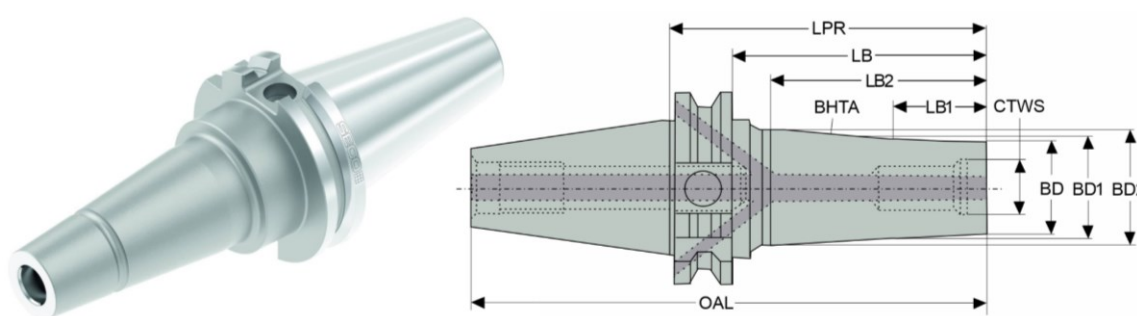
Maximální hloubka řezu v čelním směru posuvu (APMXE)	6,0 mm
Maximální hloubka řezu v bočním směru posuvu (APMXS)	9,0 mm
Průměr stykové plochy ze strany stroje (DCSFMS)	30,0 mm
Velikost závitu (TDZ)	M16
Funkční délka (LF)	40,0 mm
Obráběcí průměr (DC)	32,0 mm
Maximální otáčky	20800 ot/min
Maximální úhel zafrézování	2,0 deg

Úhel nastavení ostří v čelním směru posuvu	90,0 deg
Úhel nastavení ostří v bočním směru posuvu	90,0 deg
Typ stopky	Combimaster
Radiální úhel čela	-6,5 deg
Ortogonální úhel čela	-6,5 deg
Axiální úhel čela	8,0 deg
Celková hmotnost	0,198 kg

### 7.3 Rotační držák E3476582016110

Rotační držák E3476582016110 byl využit pro upnutí frézy R127.69-1632.RE-10-5A (Obr. 49).

Tento rotační držák umožňuje díky své přední části upnutí frézovacích nástrojů s rozhraním, které nese název *Combimaster*. Jednoduše lze konstatovat, že držáky s rozhraním *Combimaster* využívají k upnutí modulární systém se závitovými spoji. Zadní konec stopky konvekčního adaptéru umožňuje upnutí do vřetene SK40.



Obr. 50 Rotační držák E3476582016110

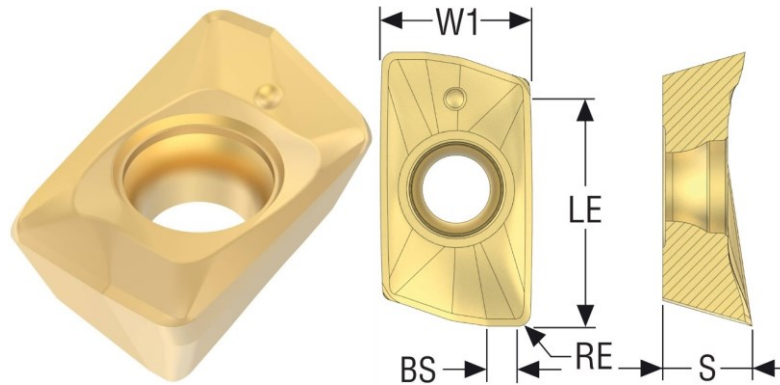
Tab. 8 Technické a rozměrové parametry nástroje R127.69-1632.RE-10-5A

Vyčnívající délka (LPR)	110,0 mm
Délka tělesa (LB)	91,0 mm
Délka tělesa 1 (LB1)	25,0 mm
Délka tělesa 2 (LB2)	75,0 mm
(BHTA) Úhel kužele	3,9 deg
Připojení – strana obrobku (CTWS)	M16
Připojení – strana stroje	DIN40 ADB/ CAT40
Průměr tělesa (BD)	30,0 mm
Průměr tělesa 1 (BD1)	31,7 mm
Průměr tělesa 2 (BD2)	38,5 mm



Celková délka (OAL)	178,4 mm
Celková hmotnost	1,406 kg

#### 7.4 Břitové destičky XOMX060204R-M05 F40M



Obr. 51 Břitová destička XOMX0660204R-M05 F40M

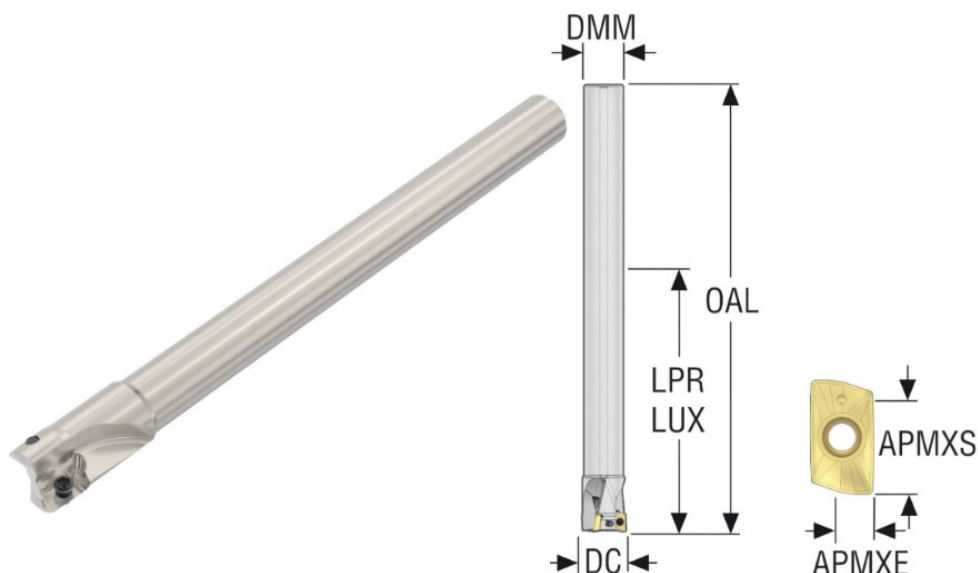
Tento typ břitových destiček byl použit, stejně jako v předchozím případě, pro přípravné operace vzorků. Pomocí těchto destiček byly vytvořeny podélné drážky, které sloužily k upnutí vzorů do dynamometru (viz. Obr. 61). Všechny technické a rozměrové parametry břitové destičky jsou zapsány v tabulce níže. K fríze byly zasazeny celkově 2 břitové destičky.

Tab. 9 Technické a rozměrové parametry břitové destičky XOMX0660204R-M05 F40M

Hlavní úhel hřbetu	15,00 deg
Velikost hladicí plošky (BS)	0,90 mm
Počet břitů	2
Typ řezné geometrie	M05
Tvar a velikost	XOMX0602
Úhel čela	20,20 deg
Třída řezného materiálu	F40M
Povlakování	Carbide PVD
Směr řezu	Pravý
Efektivní délka břitu (LE)	5,50 mm
Rohový rádius (RE)	0,40 mm
Tloušťka destičky (S)	2,45 mm
Šířka (W1)	4,10 mm
Hmotnost destičky	1 g

## 7.5 Nástroj R127.69-0810.0-06-2N

V tomto nástroji byly uloženy 2 břitové destičky XOMX0660204R-M05 F40M (Obr. 51), které vyfrézovaly podélné drážky na vzorcích pro upnutí do dynamometru.



Obr. 52 Nástroj R127.69-0810.0-06-2N

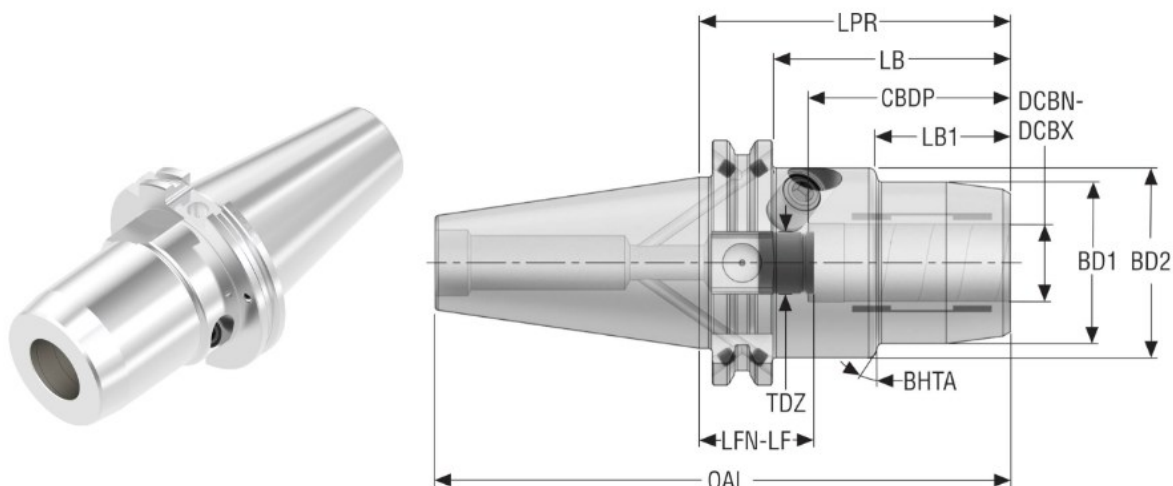
Tab. 10 Technické a rozměrové parametry nástroje R127.69-0810.0-06-2N

Maximální hloubka řezu v čelním směru posuvu (APMXE)	3,0 mm
Maximální hloubka řezu v bočním směru posuvu (APMXS)	5,0 mm
Průměr stopky / otvoru pro trn (DMM)	8,0 mm
Vyčnívající délka (LPR)	64,0 mm
Maximální využitelná délka (LUX)	64,0 mm
Celková délka (OAL)	100 mm
Obráběcí průměr (DC)	10,0 mm
Maximální otáčky	60000 ot/min
Maximální úhel zafrézování	10,0 deg
Úhel nastavení ostří v čelním směru posuvu	90,0 deg
Úhel nastavení ostří v bočním směru posuvu	90,0 deg
Typ stopky	Válcová
Radiální úhel čela	-11,8 deg
Ortogonální úhel čela	-11,8 deg
Axiální úhel čela	2,8 deg
Celková hmotnost	0,074 kg



## 7.6 Rotační držák DIN40ADB-HC08-080

Na Obr. 53 lze vidět hydraulické sklíčidlo, které upnulo frézu R127.69-0810.0-06-2N. Konstrukce hydraulického sklíčidla zaručuje bezpečné upnutí s minimální házivostí. Tento rotační držák je vhodný pro upnutí do vřetene SK40.



Obr. 53 Rotační držák DIN40ADB-HC08-080

Tab. 11 Technické a rozměrové parametry nástroje R127.69-0810.0-06-2N

Vyčnívající délka (LPR)	80,5 mm
Délka tělesa (LB)	61,5 mm
Hloubka centrálního otvoru (CBDP)	38,5 mm
Délka tělesa 1(LB1)	30 mm
Minimální a maximální průměr otvoru pro nástroj (DCBN; DCBX)	8,0 mm
Průměr tělesa 1 (BD1)	28,0 mm
Průměr tělesa 2 (BD2)	49,3 mm
Úhel kužele (BHTA)	20,0 deg
Velikost závitu (TDZ)	M6
Funkční délka (LF)	53,5
Funkční minimální délka (LFN)	43,5 mm
Celková délka (OAL)	148,8 mm
Připojení – strana stroje	DIN40 ADB
Celková hmotnost	1,286 kg

### 7.7 Soudečková fréza tvaru kapka (JH734100X2R2R85.0Z4 SIRA)

Tato vysokovýkonná monolitní karbidová fréza (HPM) má obráběcí průměr (DC) 10 mm a průměr stopky (DMM) 10 mm. Odolnost břitů je zvýšena díky povlaku SIRON-A. V dalších kapitolách praktické části měla tato fréza, podle svého profilového rádiusu (PRFRAD2), zkratku **R85**.



Obr. 54 Soudečková fréza JH734100X2R2R85.0Z4

Tab. 12 Technické a rozměrové parametry frézy JH734100X2R2R85.0Z4

Obráběcí průměr (DC)	10,0 mm
Průměr stopky (DMM)	10,0 mm
Rádus profilu 2 (PRFRAD2)	85,0 mm
Rádus profilu 1 (PRFRAD1)	2,0 mm
Počet obvodových břitů	4
Celková délka (OAL)	72,0 mm
Úhel šroubovice břitů	20,0 deg
Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu (APMXS)	22,3 mm
Typová řada nástroje	JH734
Třída přesnosti průměru stopky	h5

### 7.8 Soudečková fréza tvaru kužele (JH746100T2R2R250.0Z6 SIRA)

Druhým dokončovacím nástrojem byla vysokovýkonná monolitní karbidová fréza (HPM), která má rovněž obráběcí průměr (DC) 10 mm a průměr stopky (DMM) 10 mm. Pro vyšší odolnost břitů je použit stejný povlak jako u předešlé frézy, tedy SIRON-A. Tato soudečková fréza byla v dalších kapitolách praktické části značena zkratkou **R250**.



Obr. 55 Soudečková fréza JH746100T2R2R250.0Z6

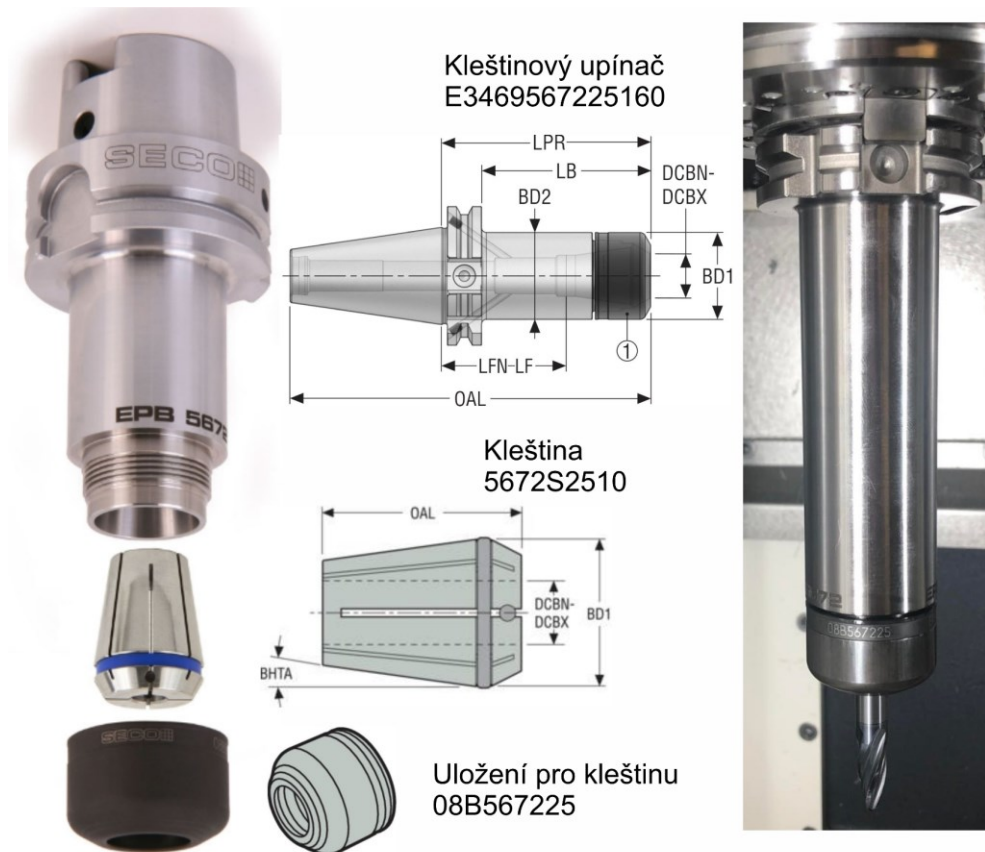
Tab. 13 Technické a rozměrové parametry frézy JH746100T2T2T250.0Z6

Obráběcí průměr (DC)	10,0 mm
Průměr stopky (DMM)	10,0 mm
Rádus profilu 2 (PRFRAD2)	250,0 mm
Rádus profilu 1 (PRFRAD1)	2,0 mm
Rádus profilu 3 (PRFRAD3)	5,0 mm
Počet obvodových břitů	6
Celková délka (OAL)	75,0 mm
Úhel šroubovice břitů	20,0 deg
Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu (APMXS)	9,0 mm
Typová řada nástroje	JH746
Třída přesnosti průměru stopky	h5
Úhel profilu dělený 2 (PRFA/2)	20,0 deg

## 7.9 Upnutí soudečkových fréz

Dokončovací nástroje byly upnuty do upínacího sklíčidla EBP 5672. Jedná se o sklíčidlo, jenž kombinuje přesnost hydraulických sklíčidel s flexibilitou kleštinových sklíčidel. Tato kombinace vlastností snižuje házivost a celkově zvyšuje hodnoty kroutícího momentu. Tento upínač je zkonstruován tak, aby se maximalizovala upínací, jež je při upnutí rozložena po celé délce kleštiny. Kombinace matice s lichoběžníkovým závitem a přesného výbrusu matice zaručuje delší životnost nástroje a házení nástroje se pohybuje v maximálních hodnotách 3  $\mu\text{m}$ . Na *Obr. 56* **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je na levé straně zobrazen uložení kleštiny a na pravé straně jsou zobrazeny reálné komponenty, které

byly použity pro upnutí soudečkových fréz. Pod zmiňovaným obrázkem jsou zmíněny technické a rozměrové parametry kleštiny a upínače. [45]



Obr. 56 Sklíčidlo EBP 5672

Tab. 14 Technické a rozměrové parametry sklíčidla 5672S2510

Průměr tělesa 1 (BD1)	26,0 mm
Úhel kužele (BHTA)	8,0 deg
Připojení – strana stroje	HP 25
Připojení – strana obrobku	10,0 mm
Minimální a maximální otvor pro stopku nástroje (DCBN; DCBX)	10,0 mm
Celková délka (OAL)	34,0 mm
Celková hmotnost	0,074 kg

Tab. 15 Technické a rozměrové parametry kleštinového upínače E3469567225160

Průměr tělesa 1 (BD1)	40,0 mm
Průměr tělesa 2 (BD2)	40,0 mm

Připojení – strana stroje	DIN40 ADB
Připojení – strana obrobku	HP 25
Minimální a maximální průměr otvoru pro nástroj (DCBN; DCBX)	1,00; 16,0 mm
Délka tělesa (LB)	140,9 mm
Délka tělesa 1	141,0 mm
Funkční délka (LF)	122,0 mm
Minimální funkční délka (LFN)	104,0 mm
Vyčnívající délka (LPR)	160,0 mm
Celková délka (OAL)	228,4 mm
Celková hmotnost	1,86 kg

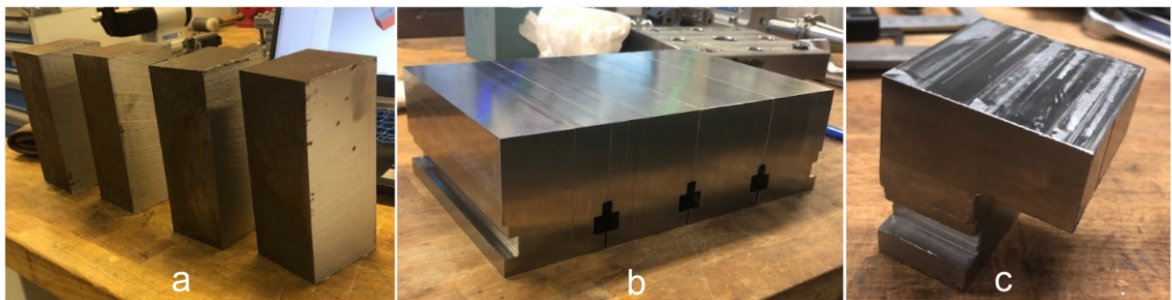
## 8 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Vstupním materiálem pro výrobu vzorků byla konstrukční ocel 12 050 o rozměrech 15 x 70 x 300 mm (šířka x výška x délka).



*Obr. 57 Konstrukční ocel 12 050*

Polotovar byl následně rozdělen na 4 části (na *Obr. 58* část **a**), na kterých byly zarovnány všechny strany ploch a následně byly vyfrézovány podélné drážky (na *Obr. 58* část **b**), které sloužili k upnutí do dynamometru. V další etapě byly vzniklé kusy opět rozděleny na několik menších částí, na kterých bylo vyfrézováno vybrání (na *Obr. 58* část **c**), jenž odlehčilo vzorek a zajistilo jednodušší manipulaci pro měření na kontaktním drsnoměru. Zarovnání všech stran polotovarů, frézování podélných drážek a frézování vybrání bylo vytvořeno ručním programováním na univerzální CNC frézce DMG MORI DMU 50.



*Obr. 58 Postup přípravy vzorků*

## 8.1 Obráběný materiál ČSN 12 050

Tato konstrukční ocel pod označením **1.1191** (W.-Nr.), DIN C45 a EURO C45E je vhodná pro zušlechťování a povrchovému kalení. V tepelně nezpracovaném stavu se hodnoty pevnosti v tahu ( $R_m$ ) pohybují v rozmezí 640 až 780 MPa a hodnota meze kluzu ( $R_e$ ) nabývá 390 MPa. Nejčastější využití nachází u výroby hřídelů těžních strojů, kolíků, ozubených kol, ojnic, pístnic, čepů, kolíků, lůžek, spojovacích materiálů, západek a rotorů šroubových kompresorů. [46]

Tab. 16 Chemické složení oceli ČSN 12 050 [46]

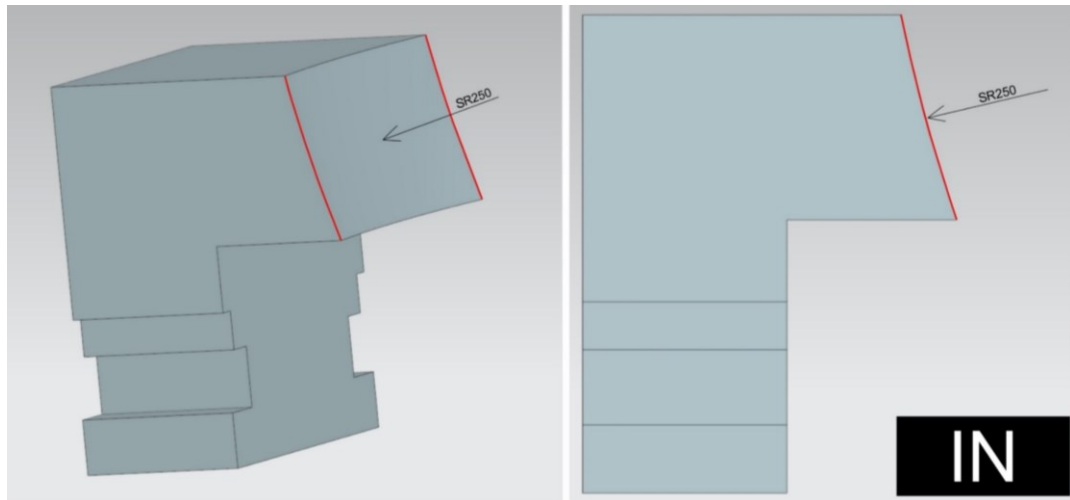
Chemické složení v procentech								
Dle ČSN	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
	0,42 až 0,50	0,50 až 0,80	0,17 až 0,37	Max. 0,25	Max. 0,30	Max. 0,30	Max. 0,40	Max 0,40

Tab. 17 Tepelné zpracování oceli ČSN 12050 [46]

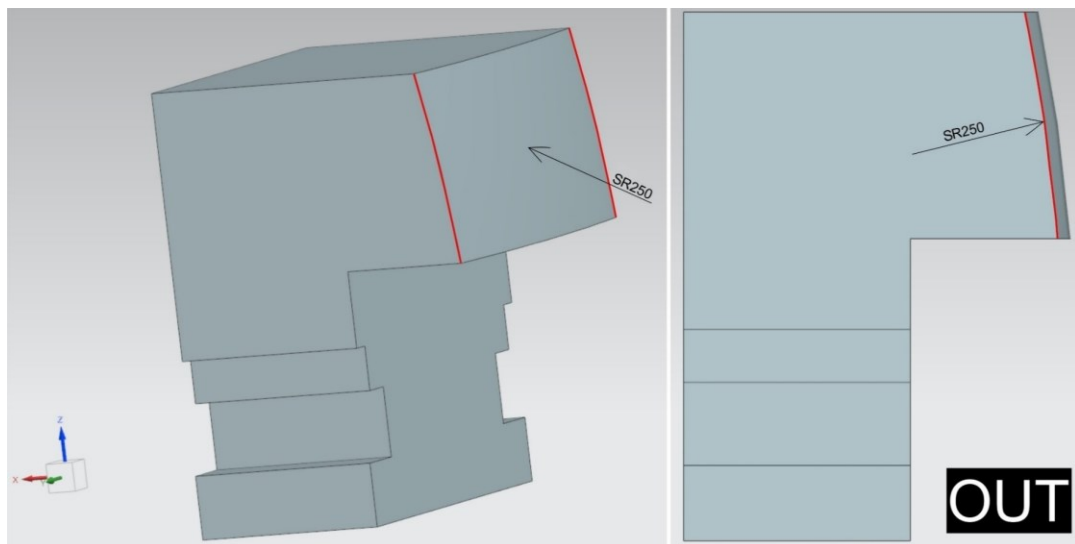
Způsob	Teplota [°C]	Postup
Normalizační žíhání	840 až 870	Chlazení na vzduchu
Kalení	830 až 860	Chlazení v oleji
	800 až 830	Chlazení ve vodě
Žíhání na měkko	680 až 720	Chlazení v peci
Popouštění	530 až 670	Ochlazovat na vzduchu

## 8.2 Tvorba tvarové geometrie

V softwaru NX byly vymodelovány na čelech vzorků celkově 2 typy tvarových geometrií, které měly za úkol simulovat povrch dutiny formy. Tyto plochy byly předurčeny k dokončování soudečkovými frézami a v průběhu obrábění byly měřeny rezné síly. Profil prvního typu připomíná **konkávní** tvar, který byl vymodelován v programu NX rotačním oddělením kružnice o poloměru 250 mm. Vzorek konkávního tvaru v nadcházejícím vyhodnocení zastupuje zkratka **IN**. Druhý typ geometrie představuje oproti svému prvnímu typu pravý opak, profil vzorku připomíná tvar **konvexní**. Geometrie druhého typu byla vymodelována obdobně jako ta předchozí, kde poloměr kružnice činil opět 250 mm. Označení konvexních vzorků nahrazuje zkratka **OUT**.



Obr. 59 Vzorek konkávního tvaru IN

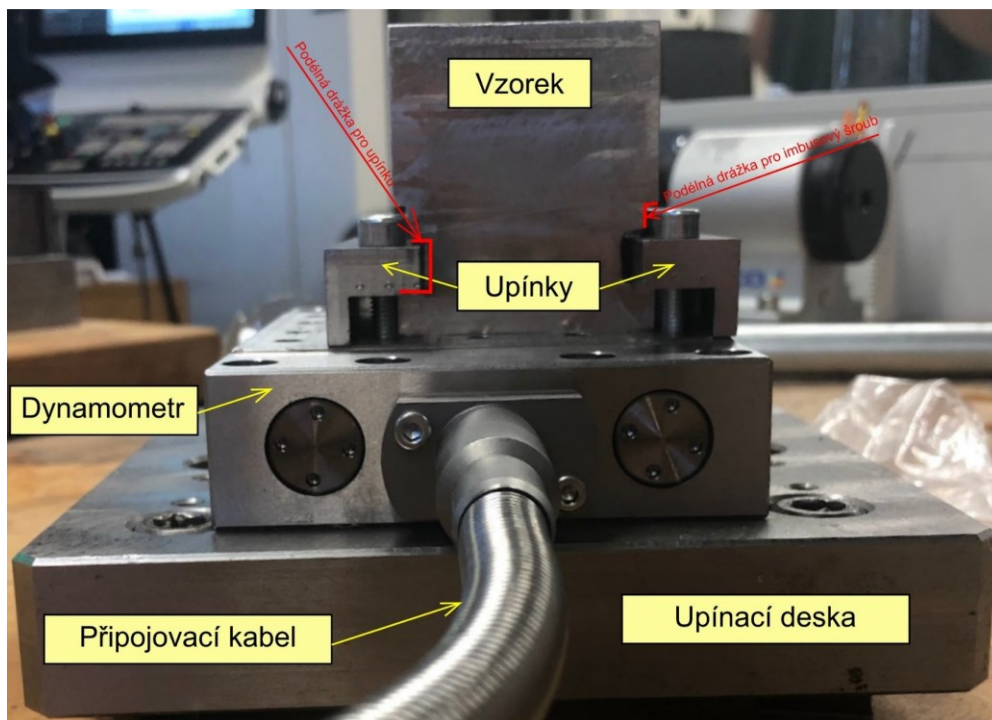


Obr. 60 Vzorek konvexního tvaru OUT

### 8.3 Upnutí vzorku v dynamometru

Na Obr. 61 je zobrazen způsob upnutí vzorku do dynamometru. Vyfrézované spodní podélné drážky na vzorku posloužily jako prostor pro uložení upínek a díky vrchním podélným drážkám byl zajištěn, jak prostor pro hlavy imbusových šroubů, tak jednodušší manipulace utahování/odtahování imbusových šroubů upínek. Sestava dynamometru se vzorek byla upnuta upínací deskou ke stolu obráběcího centra. Obr. 61 Způsob upnutí vzorku do dynamometru





Obr. 61 Způsob upnutí vzorku do dynamometru

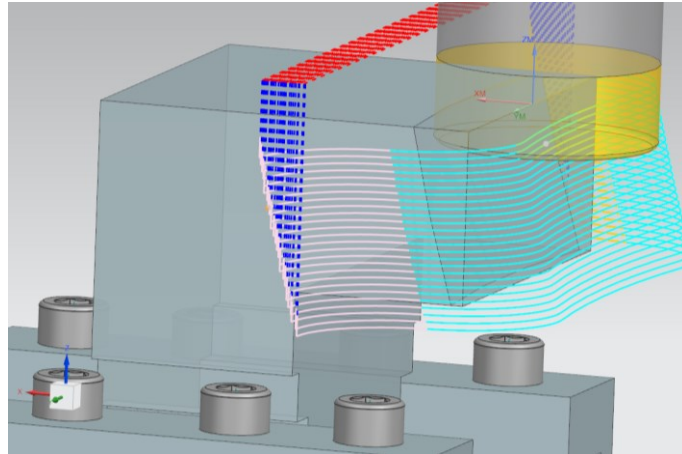
## 8.4 Tvorba G-kódu

Pro obrobení tvarových ploch (IN, OUT) bylo vygenerováno hned několik G-kódů s proměnnými reznými parametry. Všechny G-kódy byly vygenerovány softwarem NX v prostředí Manufacturing.

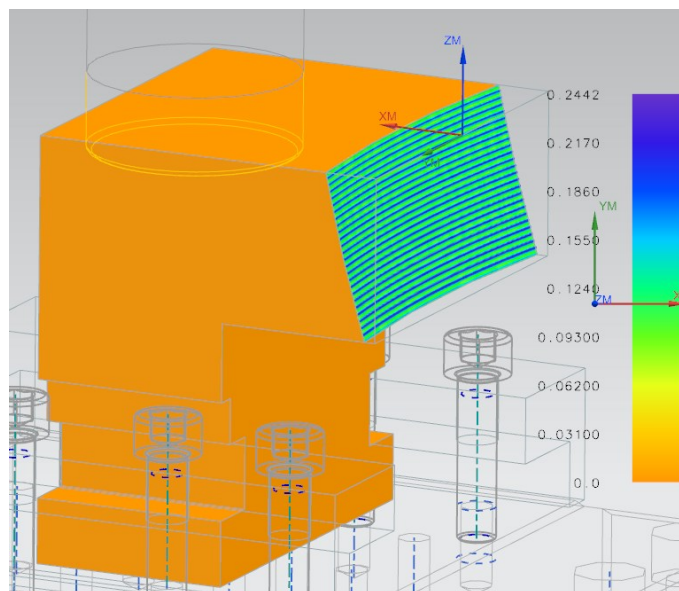
### 8.4.1 Hrubování

První operací programování bylo hrubování. Pro hrubování byla zvolena operace *Cavity Mill*, což je operace určená k hrubování tvarových ploch, kde je materiál odstraněn v rezných rovinách, které jsou kolmé na osu stroje. Operace *Cavity Mill* je nejčastěji využívána při úběrech velkých objemů materiálu v dutinách, odlitcích apod. Pro oba typy vzorků (IN, OUT) byla zvolena stejná operace hrubování se stejným nástrojem.

Operace *Cavity Mill* byla použita pro hrubování tvarových ploch typu IN i ploch typu OUT a u všech hrubovacích operacích byla využita fréza s pěti vyměnitelnými destičkami (Obr. 62). Pro nadcházející dokončovací operace byl nastaven přídavek materiálu 0,1 mm.



Obr. 62 Zobrazení trajektorie nástroje pro hrubování



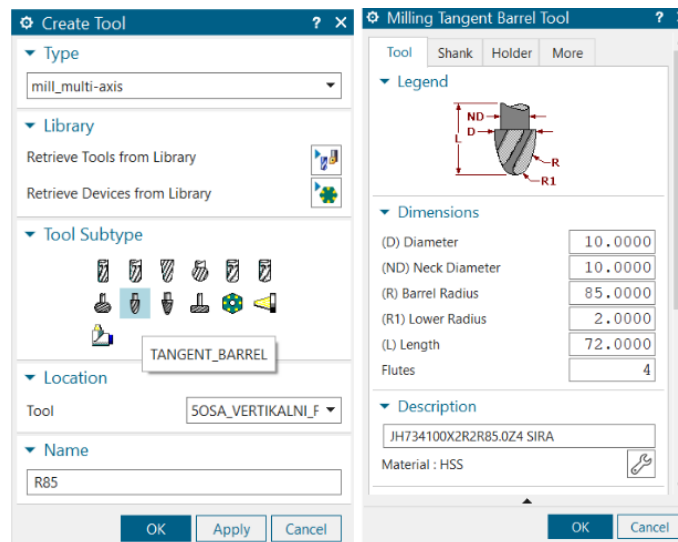
Obr. 63 Analýza zbytkového materiálu po hrubování

#### 8.4.2 Dokončování

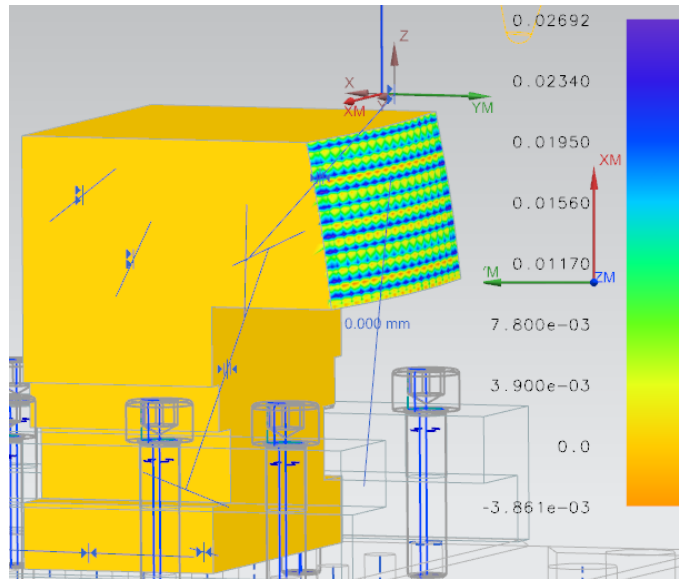
Po operaci hrubování následovalo dokončování soudečkovými frézami. V dokončovacích operacích byly vytvořeny 4 stromové programy, kde každá soudečková fréza (R85 a R250) obrobila jak tvarovou plochu typu IN, tak tvarovou plochu typu OUT. Z každého programu se v dalších krocích měnily řezné parametry ( $f_z$ ,  $a_e$ ) a směr obrábění.

K dokonalému průběhu dokončování byla využita operace *Variable Contour*, která je vhodná pro pětiosé obrábění. Operace *Variable Contour* umožňuje obrábění tvarových ploch s možností **polohování osy nástroje**.

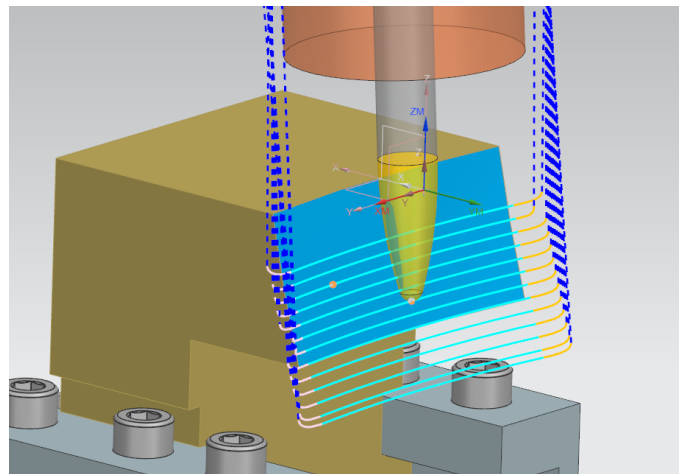
- **Polohování soudečkové frézy R85** – Nastavení úhlu nástroje vůči obrobku bylo náročnější, jelikož se jedná o soudečkovou frézu s tangenciálním tvarem. Z několika pokusů nastavení úhlu natočení nástroje byl zvolen úhel  $10^\circ$ . U úhlu natočení nástroje o  $10^\circ$  vzešla z finální analýzy obrábění nejmenší hodnota přebytkového materiálu a to 0,027 mm.
- **Polohování soudečkové frézy R250** – Díky informaci o úhlu profilu (na *Obr. 55* PRFA/2) z nástrojového katalogu Seco Tools bylo polohování nástroje vůči obrobku snazší než v předchozím případě. U tvorby nástroje v softwaru NX v sekci Manufacturing byl vybrán typ nástroje *TAPER\_BAREL* (kuželová soudečková fréza) a byl zvolen úhel profilu  $20^\circ$ . Jeho správnost byla potvrzena v následné simulaci obrobání, kde maximální hodnota přebytkového materiálu činila 0,019 mm.



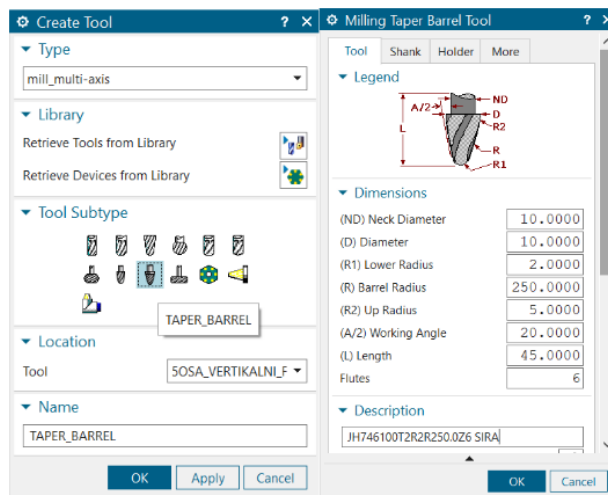
Obr. 64 Tvorba soudečkové frézy R85 v NX



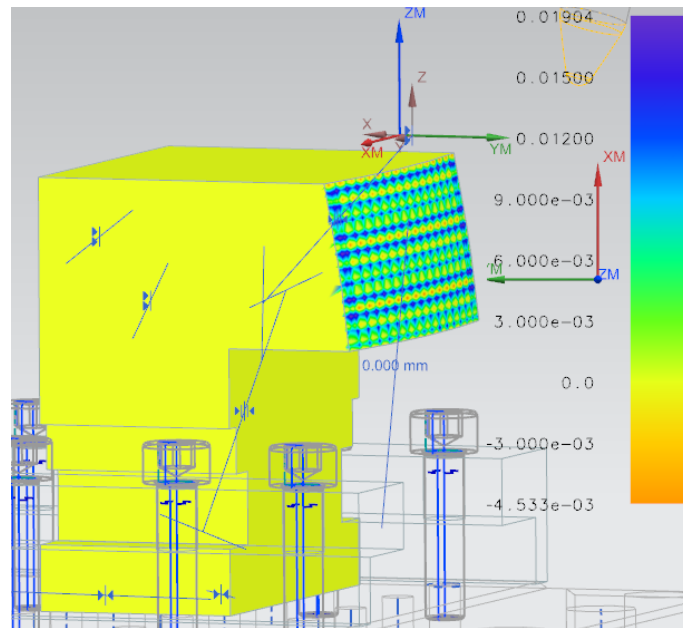
Obr. 65 Analýza zbytkového materiálu po obrobení soudečkové frézy R85



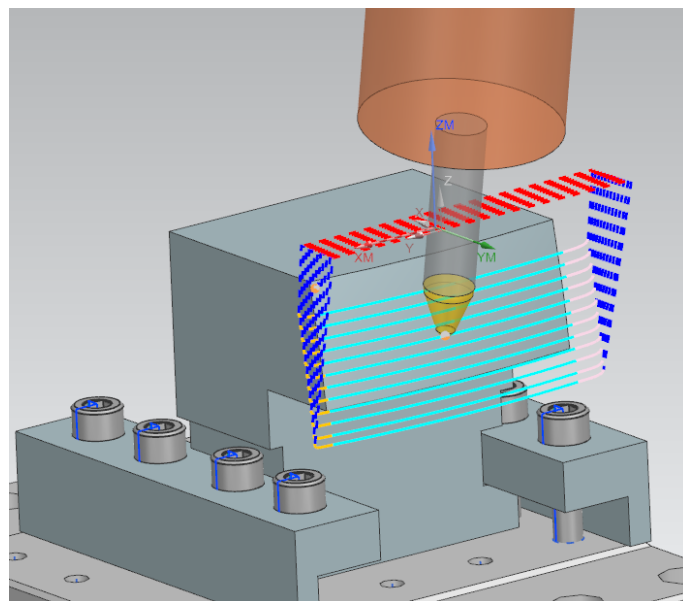
Obr. 66 Zobrazení obráběcích trajektorií u operace Variable Contour u nástroje R85



Obr. 67 Tvorba soudečkové frézy R250 v NX



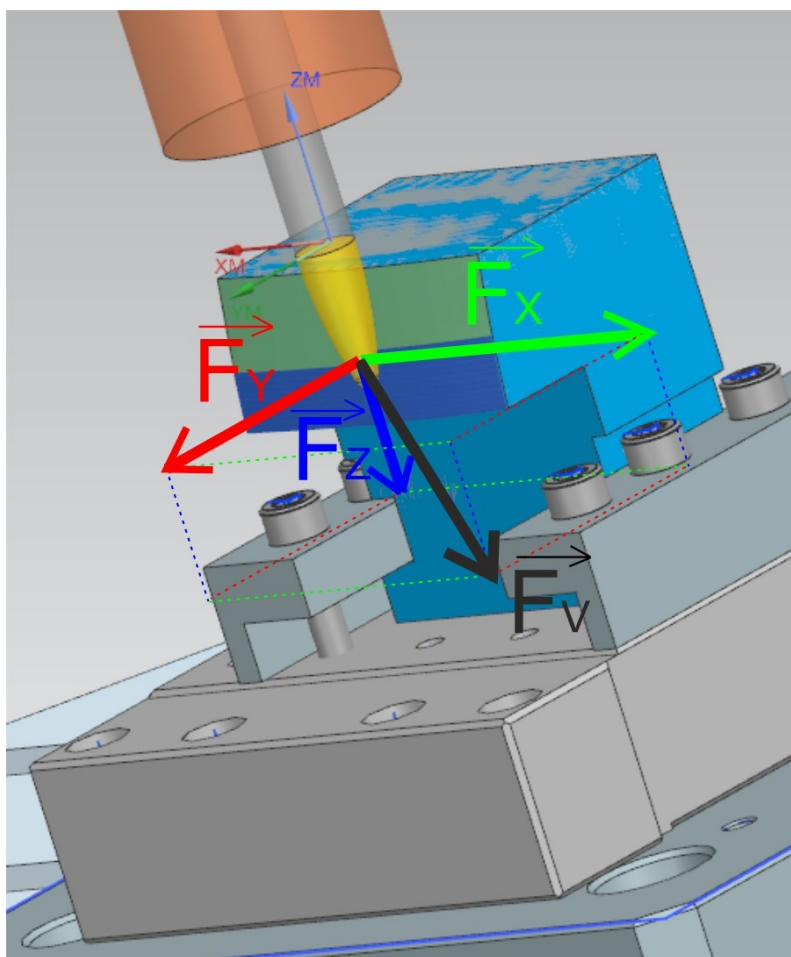
Obr. 68 Analýza zbytkového materiálu po obrobení soudečkové frézy R250



Obr. 69 Zobrazení obráběcích trajektorií u operace Variable Contour u nástroje R250

## 9 PRŮBĚH EXPERIMENTU

K celkovému vyhodnocení vlivu nástroje na jakost povrchu formy bylo potřeba vycházet z několika naměřených dat. Prioritně bylo nutné zvolit za jakých řezných podmínek bude experiment probíhat. Po zvolení řezných podmínek přišlo na řadu dokončování tvarových ploch. Byl tedy nahrán do operačního systému univerzální frézky DMG MORI DMU 50 G-kód, který byl vygenerován v softwaru NX. Před samotným obráběním bylo zapotřebí upnout správně vzorek do dynamometru, provést korekci nástroje a nastavit nulový bod. Současně s obráběním byly snímány řezné síly, které zaznamenával software DynoWare. Na závěr byly z prostředí pracovního stolu obráběcího centra odebrány řezné třísky a naměřeny parametry drsnosti povrchu vzorku na kontaktním drsnoměru.



Obr. 70 Simulace obrábění a zobrazení vektorů řezných sil

### 9.1 Volba řezných podmínek

Zpracovávané hodnoty drsností povrchů, řezných sil, velikosti řezných sil a procesních časů vznikaly za určitých řezných podmínek. V experimentu bylo obrobena celkově 72

tvárových ploch. Každé obrábění probíhalo za rozdílných řezných podmínek. Pro všechna obrábění byly řezné podmínky voleny tak, že hloubka řezu ( $a_p$ ) a řezná rychlost ( $v_c$ ) byly konstantní. Proměnlivými parametrem byl boční posuv ( $a_e$ ) a posuv na zub ( $f_z$ ).

Soudečkové nástroje (R85 a R250) dokončovaly 2 typy tvarových ploch (IN a OUT) třemi konkrétními hodnotami posuvu na zub (0,03; 0,04 a 0,05 mm), ke kterým byly přiděleny další 3 hodnoty šířky záběru (0,2; 0,4 a 0,6 mm). Důležitou zmínkou je i to, že každý soubor řezných podmínek byl frézován sousledně i nesousledně. Pro všechny řezné podmínky byla řezná rychlost nastavena na **230 m/min** a hloubka řezu na **2,5 mm**. V tabulce (Tab. 18) je názorně zobrazena jedna z celkový čtyř matic řezných podmínek.

Tab. 18 Příkladná ukázka matice zvolených řezných podmínek

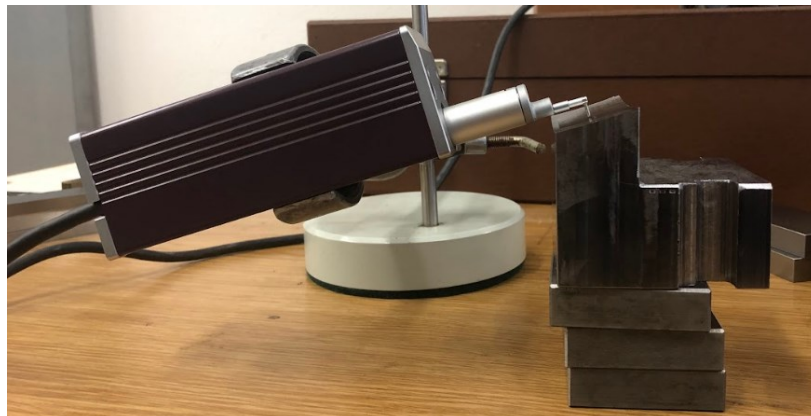
FRÉZA	TYP TVAROVÉ PLOCHY	POSUV NA ZUB $f_z$ [mm]	METODA FRÉZOVÁNÍ	ŠÍŘKA ZÁBĚRU $a_e$ [mm]	ČÍSLO MĚŘENÍ
R85	IN	0,03	SOUSLEDNÉ	0,2	1
				0,4	2
				0,6	3
R85	IN	0,04	SOUSLEDNÉ	0,2	4
				0,4	5
				0,6	6
R85	IN	0,05	SOUSLEDNÉ	0,2	7
				0,4	8
				0,6	9
R85	OUT	0,03	SOUSLEDNÉ	0,2	10
				0,4	11
				0,6	12
R85	OUT	0,04	SOUSLEDNÉ	0,2	13
				0,4	14
				0,6	15
R85	OUT	0,05	SOUSLEDNÉ	0,2	16
				0,4	17
				0,6	18



## 10 VYHODNOCENÍ JAKOSTI DOKONČENÉHO POVRCHU

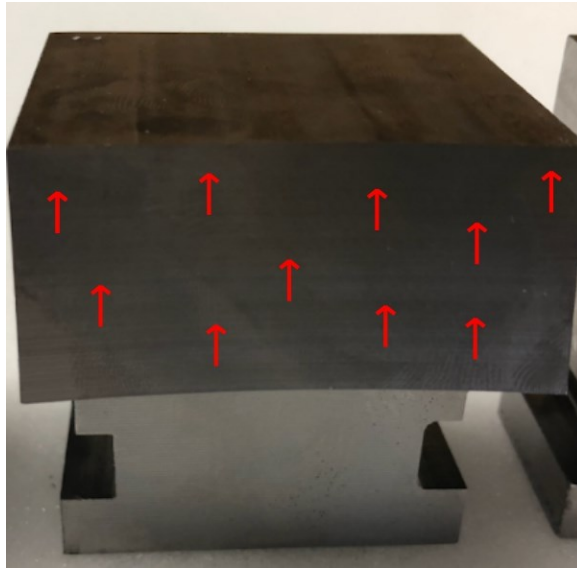
Jakost povrchu dokončených ploch byla vyhodnocena přístrojem Mitutoyo SJ 410 (viz. strana 57). Měřicí vzorky byly umístěny pod hrotem posuvné jednotky, která byla napolohována tak, aby měření bylo co nejpřesnější. Po nastavení úhlu posuvné jednotky se zvolily v prostředí operačního systému drsnoměru měřené parametry ( $R_a$ ,  $R_z$  a  $R_{\sigma c}$ ). Měření probíhalo na každém vzorku vcelku desetkrát, kde vzdálenost vyhodnocující délky byla 4 mm. Hrot snímače se pohyboval rychlostí 0,5 mm/s kolmým směrem vůči směru obrábění. Měření probíhalo vždy na jiných místech s mezní vlnovou délkou ( $\lambda_c$ ) 0,8 mm. Všechna měření se uskutečnila dle normy ISO1997.

V experimentu byly vyhodnocena jakost povrchu u vzorků, jenž byly obrobena metodou **nesousledného frézování**. V grafech jsou značeny tvarové plochy zkratkou IN a OUT. Soudečkové frézy byly v grafech odlišeny barevným ohraničením, kde tangenciální soudečkové fréze (označena jako R85) byla přidělena barva červená a soudečková fréza tvaru kapky (označena jako R250) obdržela černou barvu ohraničení.



*Obr. 71 Napolohování drsnoměru*





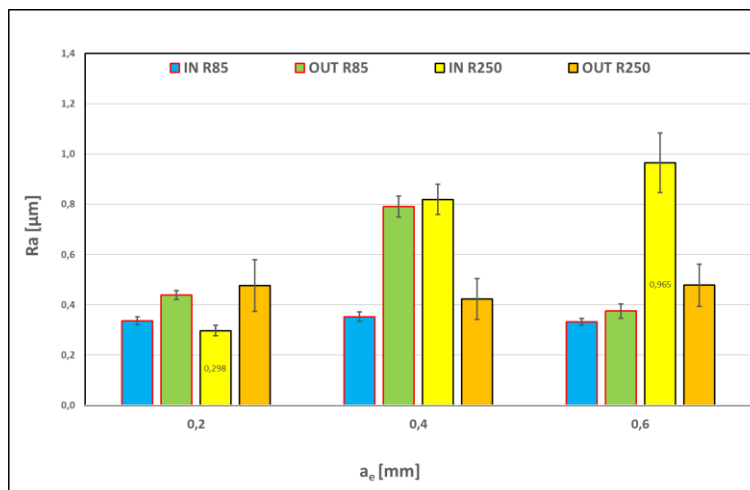
Obr. 72 Zobrazení směru měření

## 10.1 Vyhodnocení parametru drsnosti Ra

V této podkapitole je vyhodnocena průměrná aritmetická hodnota drsnosti profilu. Všechna naměřená data byla zapsána a vyhodnocena ve vytvořených tabulkách softwaru Excel. V každém grafu je číselně zvýrazněna maximální a minimální hodnota.

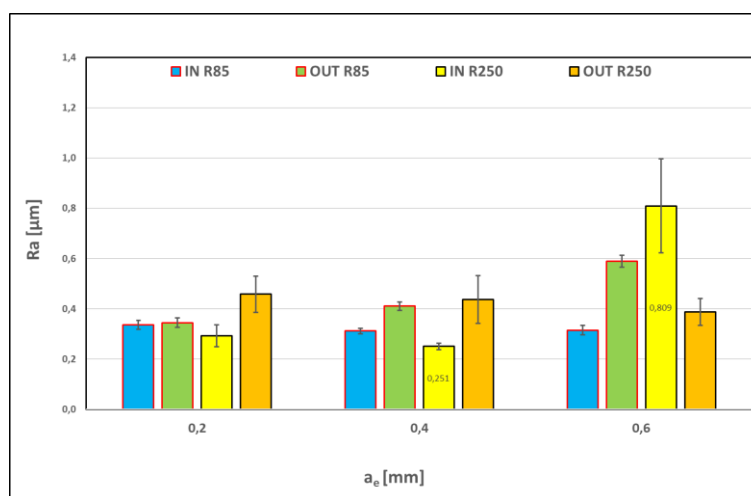
Všechny grafy středních výšek nerovností profilu ukázaly, že nejvíce hrubé povrchy se překvapivě naměřily u nejmenšího posuvu na zub ( $f_z$  0,03 mm), kde se vyskytly hned 3 hodnoty, které překračovaly interval jemného frézování ( $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$ ). Nejdrsnější povrch podle parametru Ra byl zaznamenán u plochy konkávního tvaru (IN), která byla obráběna soudečkovou kapkovou frézou (R250) při šířce záběru ( $a_e$ ) 0,6 mm. Maximální hodnota konkrétně činila 1,129  $\mu\text{m}$ .

Nejkvalitněji dokončené plochy byly vyhodnoceny při šířce záběru ( $a_e$ ) 0,2 mm. U všech posuvů na zub se hodnoty pohybovaly v intervalu od 0,293 do 0,477  $\mu\text{m}$ .



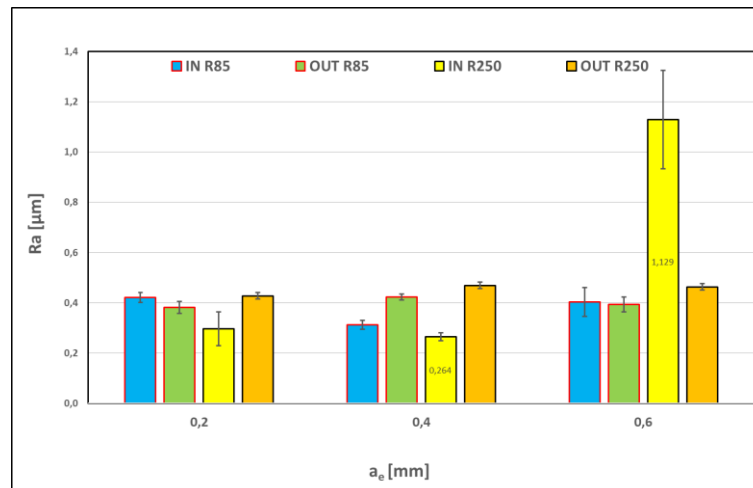
Obr. 73 Graf Ra při posuvu na zub  $f_z$  0,03 mm

Graf (Obr. 73) demonstruje naměřené hodnoty Ra, které vznikly při použití posuvu na zub 0,03 mm. Z grafu lze vyčíst, že k řeznému parametru  $f_z$  byly přiřazeny 3 hodnoty šířky záběru ( $a_e$ ). U obrábění konkávní plochy (IN) tangenciální soudečkovou frézou R250 mají hodnoty v souvislosti s použitím větší šířky záběru stoupající trend. Právě u tohoto souboru hodnot lze zpozorovat minimální (0,298 µm) a maximální hodnoty Ra (0,965 µm).



Obr. 74 Graf Ra při posuvu na zub  $f_z$  0,04 mm

Graf (Obr. 74) zobrazuje vyhodnocené hodnoty, které vznikly u obrábění, kde byl zvolen řezný parametr posuvu na zub ( $f_z$ ) 0,04 mm. V grafu nelze zpozorovat žádný výrazně stoupající nebo klesající trend. Maximální a minimální hodnoty nabývaly stejně jako v předchozím grafu u souboru hodnot s označením IN R250.

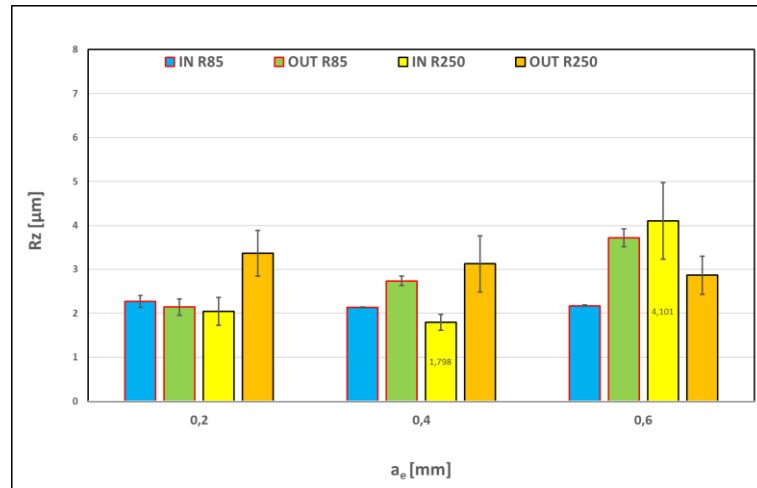


Obr. 75 Graf Ra při posuvu na zub  $f_z$  0,05 mm

Zpracované hodnoty u obrábění s nejvýše nastaveným posuvem na zub ( $f_z = 0,05$  mm) se od sebe výrazně nelišily. Výjimkou byla ovšem hodnota, která se opět nacházela u obrábění konkávní geometrie kapkovou soudečkovou frézou (IN R250;  $a_e$  0,6 mm). Tato hodnota byla nejvyšší ze všech naměřených hodnot v experimentu praktické části. S ohledem na parametr drsnosti Ra lze považovat obrábění při těchto řezných podmínkách (Obr. 75) za nejvíce stabilní, jelikož se vše hodnoty parametru Ra (s výjimkou IN R250;  $a_e$  0,6 mm) pohybovaly v rozmezí od 0,264 do 0,469  $\mu\text{m}$ .

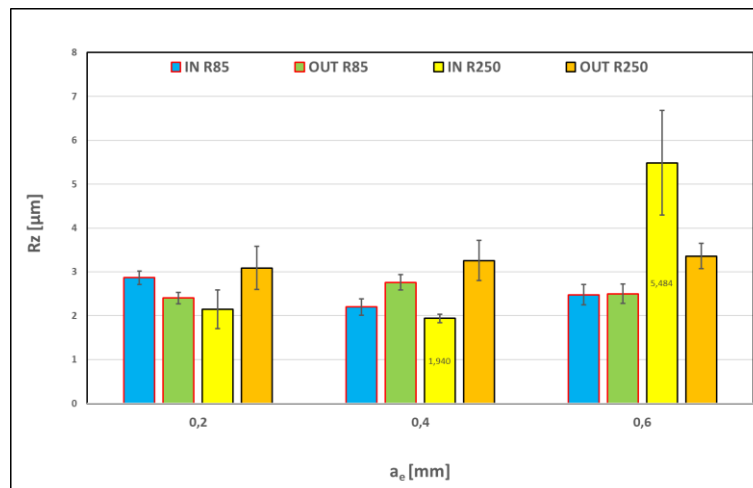
## 10.2 Vyhodnocení parametru hloubky drsnosti Rz

Vyhodnocení hloubky drsnosti probíhalo stejným způsobem jako vyhodnocení průměrné aritmetické hodnoty drsnosti. Minimální a maximální hodnoty byly, jak u hodnot Ra, analyzovány opět u konkávního tvaru vzorku, který byl obráběn kapkovitou soudečkovou frézou (IN R250). V této podkapitole není zobrazen graf, jenž demonstroval hodnoty, které byly naměřeny při obrábění u posuvu na zub 0,03 mm. Bylo to z toho důvodu, protože hodnoty u grafu pro posuv na zub 0,04 mm (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) byly téměř totožné jako hodnoty u posuvu na zub 0,03 mm. Ze všech souborů dat nabývaly nejnižší hodnoty hloubek drsnosti u konkávních ploch, které byly dokončeny soudečkovou tangenciální frézou (IN R85). U těchto ploch se hloubky drsnosti pohybovaly při všech posuvech na zub a šířek záběru pod 3  $\mu\text{m}$ .



Obr. 76 Graf Rz při posuvu na zub  $f_z$  0,04 mm

V grafu (Obr. 76) je zobrazena nejnižší naměřená hodnota hloubky drsnosti (Rz) z celého experimentu, která byla odečtena ze souboru dat IN R250 u  $a_e$  0,4 mm. Konkrétní velikost nejnižší hloubky drsnosti činila 1,798  $\mu\text{m}$ .



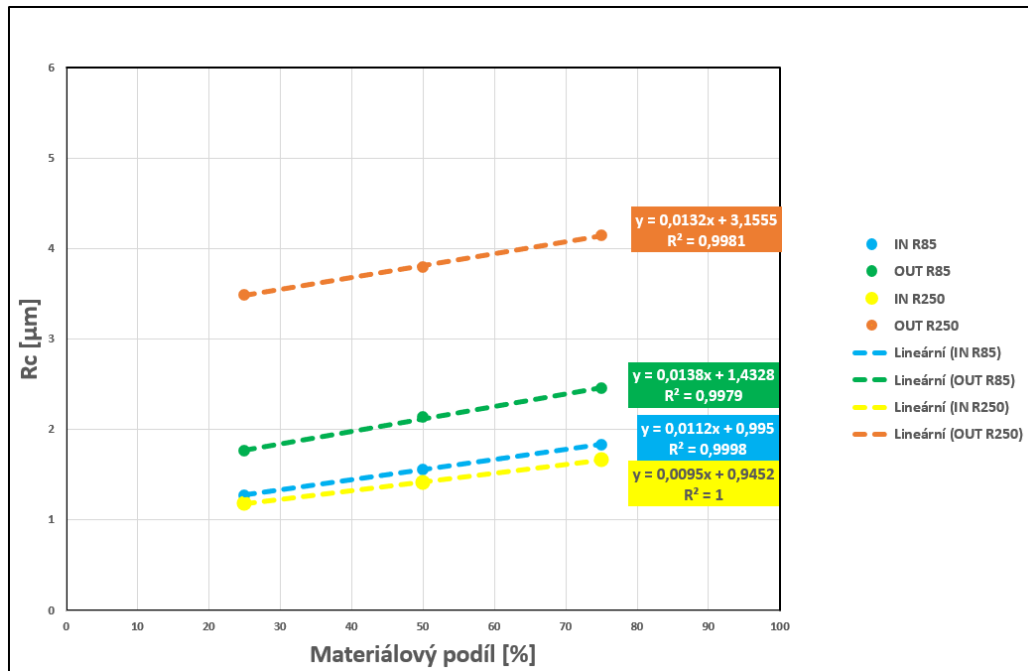
Obr. 77 Graf Rz při posuvu na zub  $f_z$  0,05 mm

V grafu (Obr. 77) je zobrazena nejvyšší naměřená hodnota hloubky drsnosti (Rz) z celého experimentu, která byla odečtena ze souboru dat IN R250 u  $a_e$  0,6 mm. Konkrétní velikost nejvyšší hloubky drsnosti činila 5,484  $\mu\text{m}$ .

### 10.3 Vyhodnocení parametru drsnosti R<sub>dc</sub>

U vyhodnocení rozdílu výšky úseku profilu byly naměřeny 3 body. Spojnice těchto bodů zobrazuje část Abbotovy křivky. Ještě před samotným měřením bylo zvoleno to, že body byly měřeny ve 25, 50 a 75 % materiálového podílu. Při vyhodnocení lze konstatovat, že u všech grafů se hodnota spolehlivosti blížila k maximální hodnotě (1). Tento fakt

dokazoval, že spojnice měly zcela lineárně stoupající trend. Na *Obr. 78* je znázorněn příkladný graf, který demonstruje zobrazuje lineární část Abbotovy křivky. V této části vyhodnocení je vložen pouze 1 graf, jelikož všechny ostatní jsou si velmi podobné. Nutno stojí také za zmínku, že i u vyhodnocení tohoto parametru drsnosti byly hodnoty měřeny z časové vytíženosti pouze u nástroje R85 při metodě sousledného frézování.



*Obr. 78* Materiálový podíl sousledného frézování nástrojem R85;  $f_z$  0,03 mm;  $a_e$  0,2 mm

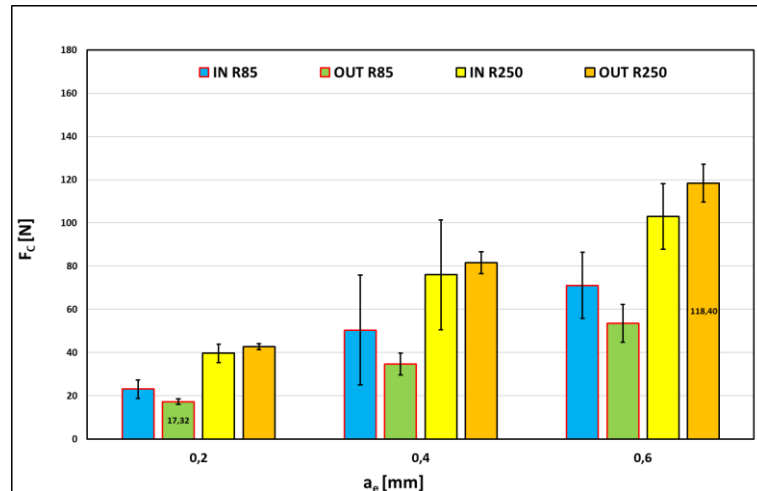
## 11 VYHODNOCENÍ ŘEZNÝCH SIL PŘI OBRÁBĚNÍ

V experimentu se během dokončování tvarových ploch soudečkovými frézami souběžně měřily (pomocí dynamometru, viz. strana 55) řezné síly, které vznikaly při kontaktu s frézou a obrobkem. Pro měření řezných sil byly využity stejné řezné parametry jako u vyhodnocování drsnosti povrchu. Jediný rozdíl byl ten, že byla přidána pro všechny řezné parametry metoda nesousledného frézování. Celkový počet měření se za použití obou metod frézování a všech zvolených řezných podmínek vyšplhal na číslo 72. K obecnému a přehlednějšímu zobrazení vyhodnocení řezných sil byl využit celkový vektor síly  $F_C$ , který se vypočetl z Pythagorovy věty, do které se dosadily složky vektorů sil  $F_X$ ,  $F_Y$  a  $F_Z$ .

$$\vec{F}_C = \sqrt{\vec{F}_X^2 + \vec{F}_Y^2 + \vec{F}_Z^2} \quad (1)$$

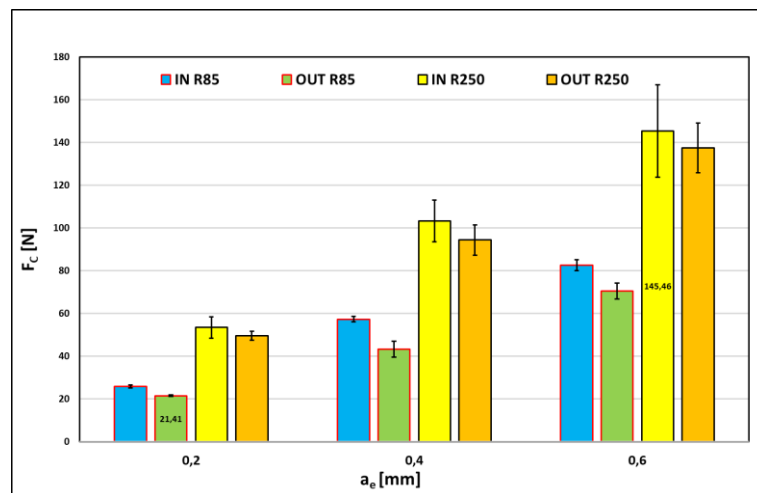
Naměřené hodnoty byly zpracovány v softwaru DynoWare od společnosti KISTLER, kde se z každého záběru odečetli průměrné hodnoty silových složek, které se následně zpracovaly v programu Excel.

Silová složka  $F_X$  (směr posuvu nástroje) měla na celkový výpočet celkové síly největší vliv. Při měření a vyhodnocení vyplynulo to, že právě složky sil ve směru  $X$  nabývají nejvyšších hodnot (rozmezí od 18 až 150 N), a to u každého měření při všech řezných podmínkách. Opačný vliv zastupovaly silové složky ve směru  $Z$ , hodnoty se pohybovaly mezi 0 až 11 N, což lze označit za zanedbatelné. Z důvodu velkého množství měření jsou v následujících obrázcích zobrazeny pouze reprezentativní grafy. Všechny vytvořené grafy vyhodnocující řezné síly byly vzájemně podobné a repetitivní.



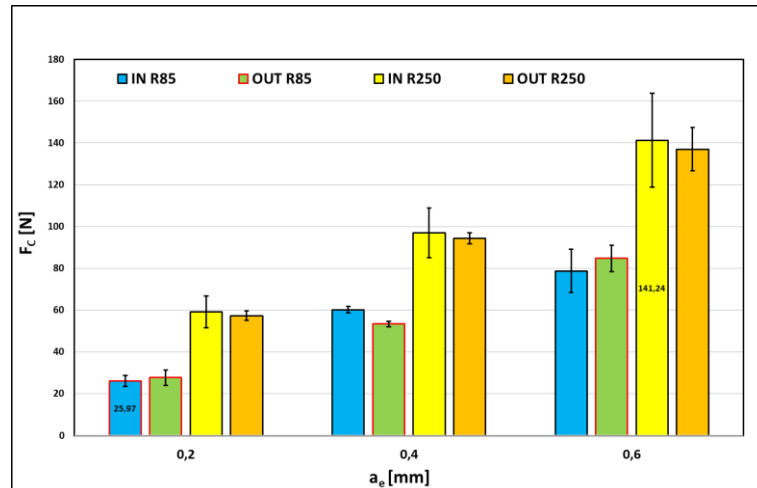
Obr. 79 Závislost celkové síly na boční posuv (nesousledné frézování při  $f_z$  0,03)

Graf na Obr. 79 demonstruje měření, které probíhalo při nejmenším posuvu na zub (0,03 mm). Hodnoty v grafu potvrdily predikci o nejnižší hodnotě celkového měření vzniklých řezných sil. Nejnižší hodnota (17,32 N) celkové řezné síly byla odečtena u obrábění soudečkovou frézou R85 tvarové geometrie IN nesouslednou metodou frézování při volbě nejmenšího bočního posuvu ( $a_e$  0,2 mm).



Obr. 80 Závislost celkové síly na boční posuv (nesousledné frézování při  $f_z$  0,05)

Graf, který je zobrazen na Obr. 80, slouží pro zobrazení maximální naměřené celkové síly (145,46 N) z celkového souboru měření. Tato veličina nastala u frézování nesouslednou metodou dokončovací nástrojem R250. Nutno dodat, že byla potvrzena předpověď, že nástroj bude maximálně zatížen při volbě nejvyšších řezných podmínek ( $f_z$  0,05;  $a_e$  0,6).



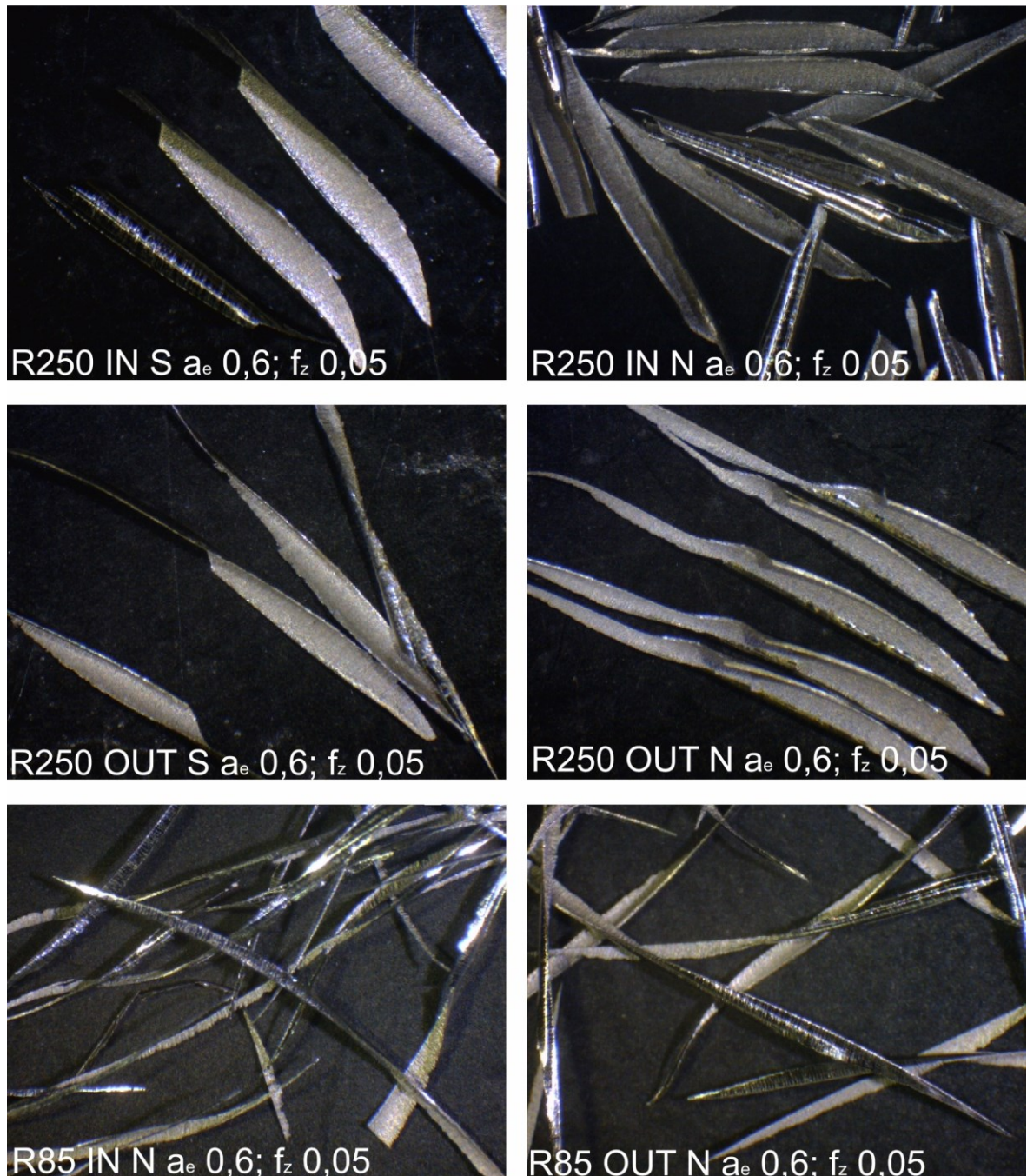
Obr. 81 Závislost celkové síly na boční posuv (sousedné frézování při  $f_z 0,05$ )

Graf na Obr. 81 je v praktické části zobrazen pouze kvůli porovnání. Poslední 2 grafy jsou určeny pro dokončování při maximálním posuvu na zub (0,05 mm). Tyto grafy jsou téměř identické. Každý soubor dat má stoupající trend a hodnoty celkových řezných sil se od sebe liší minimálně. Z porovnání tedy vyplývá, že metoda frézování (sousedné a nesousedné) u **dokončovacích operacích soudečkovými frézami** nemá na vznik řezných sil zásadní vliv. Dalším zásadním zjištěním je rozdílné zatížení nástrojů. Všechny vytvořené sloupcové grafy ukázaly, že u dokončování tangenciální soudečkovou frézou (R85) vznikají nižší řezné síly než při použítá kapkovité soudečkové frézy (R250).



## 12 VYHODNOCENÍ VELIKOSTI A TVARU TŘÍSKY

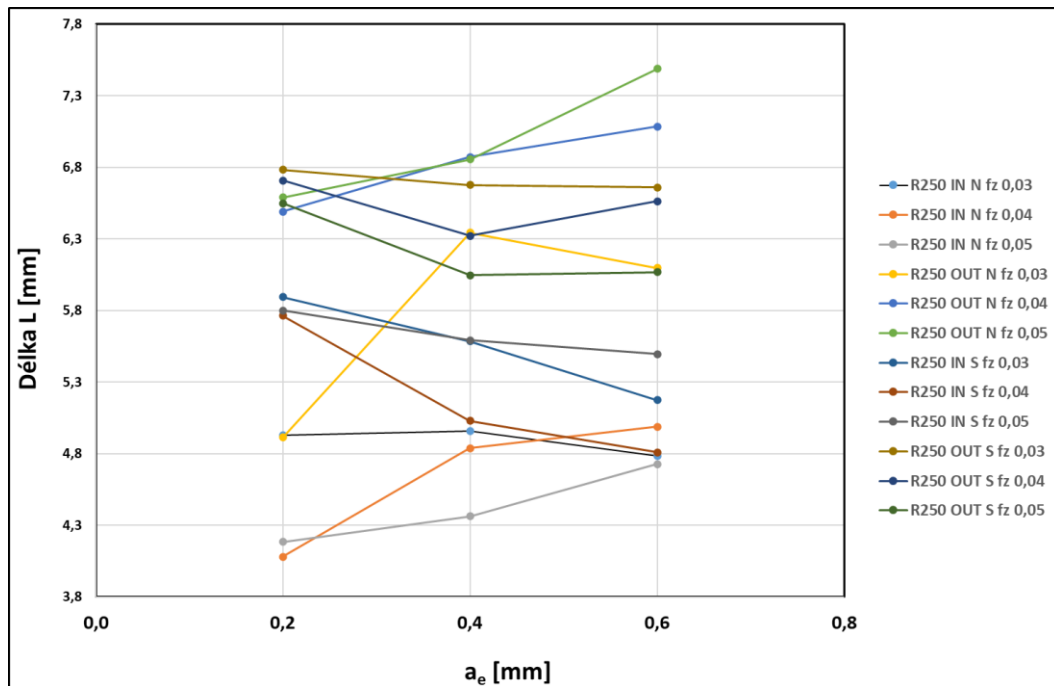
Řezné třísky byly odebrány při určitých postupech frézování. U řezných třísek se následně vyhodnocovala délka a celkový tvar. Rozměr délek a celkový tvar byl pozorován na mikroskopu s názvem Carl Zeiss Jena Spitzenhöhe (*Obr. 47*).



*Obr. 82* Řezné třísky

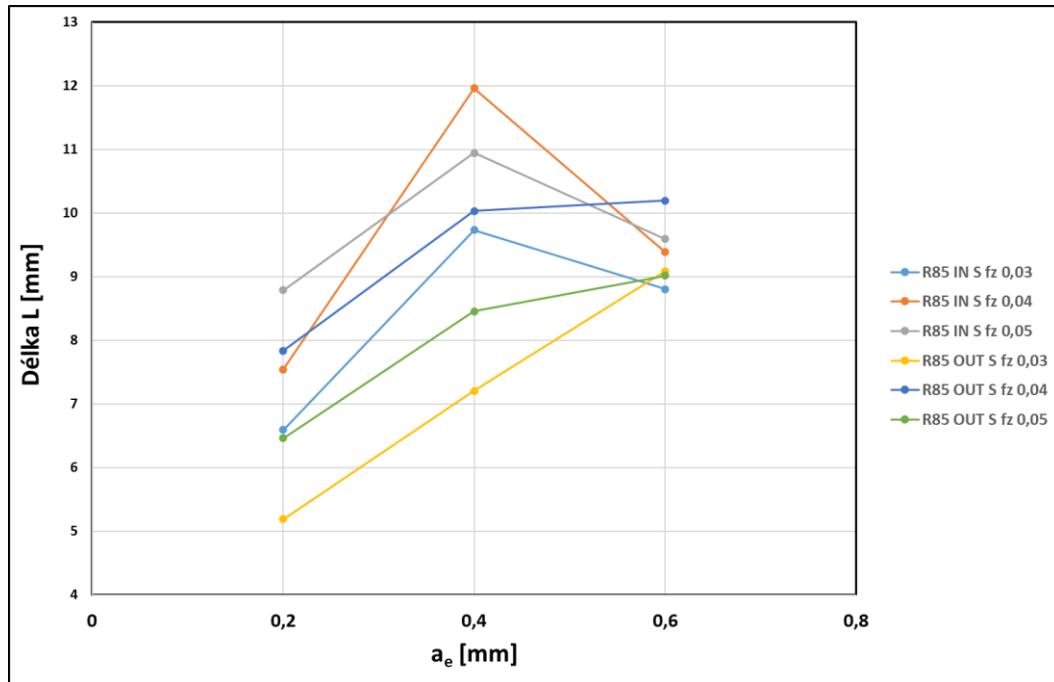
Podle matice řezných třísek (*Obr. 82*) lze spatřit detailní rozdíly tvarů třísek. Například řezné třísky (R250 IN S) mají tvarové prvky, kde se část třísky zlomí téměř v polovině své délky. U řezných třísek, které vznikly frézováním vzorku metodou

nesousledného frézování kapkovitou frézou (R250), si lze všimnout, že jejich boky mají tendenci zkroucení do tvaru U. Jsou celistvé a oproti předešlým se tvarově nelámou. Posledním typem řezných třísek byly třísky, které vznikly nesouslednou metodou frézováním tangenciální soudečkovou frézou. Jejich tvar lze přirovnat k prodloužené vrtuli. Jejich celkové délky patřily k nejdelším ze všech měřených řezných třísek.



Obr. 83 Závislost délky třísek na boční posuv

V grafu (Obr. 83) jsou zobrazeny naměřené délky řezných třísek, které vznikly působením tangenciální kapkovité frézy (R250). Bylo naměřeno celkově 10 délek jednotlivých třísek. Z těchto délek následně vzešla průměrná hodnota délky, což je znázorněno v grafech jako jeden bod dané křivky. Nejdelší naměřená tříška tohoto souboru měla délku 8,016 mm (R250 OUT S  $f_z$  0,05). Nejkratší tříška nabývala délky 3,849 mm (R250 IN N  $f_z$  0,04).



Obr. 84 Závislost délky třísek na boční posuv

Obr. 84 znázorňuje graf řezných třísek, které vznikly frézováním pomocí tangenciálního soudečkového nástroje (R85). Celkové délky třísek jsou oproti předešlému zástupci výrazně delší. Nejdelsí hodnoty vykazoval soubor dat R85 IN S  $f_z$  0,04, kde maximální délku činila konkrétně hodnota 17,231 mm.

Níže je vložena tabulka, v které jsou zmíněny průměrné hodnoty délek třísek ze všech vyhodnocených souborů dat. Průměrná hodnota vzešla ze 45 měřených délek třísek.

Tab. 19 Obecné zobrazení délek řezných třísek

Metoda frézování	Průměrná délka třísek [mm]
R250 IN N	4,649 mm
R250 OUT N	5,415 mm
R250 IN S	5,460 mm
R250 OUT S	6,486 mm
R85 IN N	9,262 mm
R85 OUT N	8,164 mm

## ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá problematikou pětiosého obrábění tvarových ploch. Cílem bylo stručné seznámení s primárními informacemi, které jsou spjaty s technologií frézování. V neposlední řadě diplomové práce bylo vytvoření experimentu na školním obráběcím centru DMG MORI DMU 50.

V experimentální části bylo cílem zjištění vlivu volby nástroje a řezných podmínek na jakost povrchu formy. Hlavní roli hrály v praktické části 2 dokončovací nástroje. Oba dva nástroje byly dodány výrobcem SECO TOOLS a v praxi je lze dohledat pod označením „soudečkové (barelové) frézy“. Nástroje se od sebe lišily rozměrem profilového rádiusu a počtem pracovních zubů. První ze dvou nástrojů měl tangenciální tvar s profilovým rádiusem 85 mm a 4 pracovními zuby. Druhý nástroj se vyznačoval kapkovitým tvarem s profilovým rádiusem 250 mm a 6 pracovními zuby. Tyto dokončovací frézy jsou obecně známy, že díky velké kontaktní ploše s obrobkem dokážou několikanásobně zvýšit produktivitu výrobního procesu.

V experimentu byly zvoleny 2 zkušební vzorky, na kterých byla vytvořena tvarová plocha pro dokončování soudečkovými frézami. Před samotným spuštěním experimentu byla zvoleny řezné podmínky, při kterých bude experiment probíhat. Byly zvoleny 2 metody frézování (sousedné a nesousedné), 2 konstantní parametry ( $v_c$  230 m/min;  $a_p$  2,5 mm) a 2 proměnlivé parametry ( $f_z$  a  $a_e$ ).

V návaznosti na experiment se vyhodnocovalo hned několik záležitostí. Vyhodnocovala se jakost povrchu (pomocí  $R_a$ ,  $R_z$  a  $R_{\delta c}$ ), řezné síly při obrábění a tvar s délkou řezných třísek.

U vyhodnocení průměrné aritmetické hodnoty drsnosti profilu ( $R_a$ ) byl zaznamenán překvapivý fakt. Nejdrsnější povrchy byly totiž vyhodnoceny u nejnižšího posuvu na zub ( $f_z$  0,03 mm). Nejlepší obrobek se vyskytoval u všech posuvů na zub se zvolenou šířkou záběru ( $a_e$ ) 0,2 mm, lze tedy říct, že se tyto řezné podmínky jeví u obou zkoumaných nástrojů a parametrů za neoptimálnější. Ostatní parametry drsnosti vycházely téměř obdobně. Obecně lze říct, že z ohledu na jakost povrchu je stabilnější nástroj s označením R85, jelikož z vyhodnocených grafů nebyly zaznamenány hodnoty, které by jednoznačně přesahovaly rozsah jemného frézování.

Vyhodnocení řezných sil ukázalo, že při dokončování tvarových ploch je při obou metodách frézování více zatěžován nástroj s označením R250. Ve všech grafech při různých řezných podmínkách nabývaly vždy větší celkové řezné síly u kapkovité soudečkové frézy.

Poslední vyhodnocující záležitostí byl tvar s délkou řezných třísek. Řezné třísky u kapkovité soudečkové frézy (R250) vykazovaly tvar, který byl charakteristický krátkou délkou a zalomením v polovině délky třísky. Řezné třísky u tangenciální frézy (R85) byly výrazně delší a měly nutkání se zkrucovat do tvaru dloužené vrtule.

Oba nástroje vykazovaly při vhodně použitých řezných podmínkách kvalitní hodnoty drsností obroběných ploch. Nutností je ovšem zmínit, že u použití kapkovité frézy (R250) hodnoty  $R_a$  při frézování maximálním bočním posuvem nejednou nečekaně vzrostly. Tento úkaz nabízí možnost dalšího výzkumné šetření, kde by mohl být například zkoumaný vliv drsnosti povrchu na zvolení vysokého posuvu na zub. U tangenciální frézy (R85) bylo zaznamenané podobné chování, avšak ne v takové míře. S ohledem na zatížení nástroje při obráběcím procesu se nižší hodnoty přikláněly k nástroji s označením R85.

Z celkového vyhodnocení vyplývá, že volba nástroje nemá vliv na velikost a tvar třísky (velikost třísek se výrazně nelišila). Při dokončování strmé tvarové plochy (IN, OUT) by byl zvolen nástroj R85, jelikož řezné síly nabývaly nižších hodnot a hodnoty drsnosti při použití několika řezných podmínek byly stabilnější. Použití nástroje R250 by náleželo u dokončování jiných tvarových ploch.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

1. KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
2. CUSTOMPART.NET: *Milling* [online]. [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/milling>
3. SABHADIYA, Jignesh. What Is Milling?- Definition, Process, And Operatio: What Is Milling?. *ENGINEERING CHOICE A JOURNEY TO EXCELLENCE* [online]. 2021 [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://www.engineeringchoice.com/what-is-milling/>
4. TOMÁŠ SKOPEČEK, PETR HOFMANN, Frézovací strategie při výrobě forem a zápusťek: Výroba a technologie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005 [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovaci-strategie-pri-vyrobe-forem-a-zapusťek>
5. What is Milling?. *SPEE3D* [online]. Melbourne, 2022 [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://www.spee3d.com/what-is-milling/>
6. Čelní frézování. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/face-milling>
7. MILLING OPERATIONS. *TOOL NOTES* [online]. [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <http://toolnotes.com/home/machining/mills-101/milling-operations/#face>
8. BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 978-80-7454-471-2.
9. Sousedné frézování nebo nesousedné frézování. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/down-milling-vs-up-milling>
10. 9 MAIN DIFFERENCE BETWEEN UP MILLING AND DOWN MILLING. *The Engineers Post* [online]. 2022 [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: <https://www.theengineerspost.com/difference-between-up-milling-and-down-milling/>
11. MISHRA, Pankaj. Difference Between Up Milling and Down Milling – Which is Better?. *MECHANICAL BOOSTER* [online]. [cit. 2022-12-09]. Dostupné z:

- <https://www.mechanicalbooster.com/2018/05/difference-between-up-milling-and-down-milling.html>
12. Dynamické frézování jako optimální strategie frézování v náročných procesních podmínkách. *Technický týdeník* [online]. 2018 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/obrabeci-stroje-a-prislusenstvi/dynamicke-frezovani-jako-optimalni-strategie-frezovani-v-narocnych-procesnich-podminkach\\_45233.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/obrabeci-stroje-a-prislusenstvi/dynamicke-frezovani-jako-optimalni-strategie-frezovani-v-narocnych-procesnich-podminkach_45233.html)
  13. VYSOKORYCHLOSTNÍ PŘESNÉ OBRÁBĚNÍ. *ISCAR LTD* [online]. 2020 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: [https://www.iscardobrasil.com.br/MediaR/pdf/High\\_Speed\\_Accurate\\_Machining\\_CZ\\_2020.pdf](https://www.iscardobrasil.com.br/MediaR/pdf/High_Speed_Accurate_Machining_CZ_2020.pdf)
  14. TOM PYLE, High Speed Machining vs. HEM. *HARVEY PERFORMANCE* [online]. 2017 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/high-efficiency-milling-vs-high-speed-machining/>
  15. ALEŠ POLZER, Akademie CNC obrábění (13). *Technický týdeník* [online]. 2009 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc/akademie-cnc-obrabeni-13\\_8548.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc/akademie-cnc-obrabeni-13_8548.html)
  16. VLADIMÍR ROČEK, Suché obrábění snižuje výrobní náklady: *Výroba a technologie. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/suche-obrabeni-snizuje-vyrobní-naklady>
  17. The benefits of dry machining: *Advanced Manufacturing. The Engineer* [online]. 2016 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.theengineer.co.uk/content/advanced-manufacturing/the-benefits-of-dry-machining>
  18. DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Jak dosáhnout vysoké produktivity při frézování?: *Výroba a technologie, Výzkum, vývoj a inovace. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-dosahnout-vysoke-produktivity-pri-frezovani>

19. Proč používat strategii trochoidního frézování?: Moderní nástroje a progresivní metody obrábění – cesta k prosperitě. *Oneindustry* [online]. 2018 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/nastrojarna/proc-pouzivat-strategii-trochoidniho-frezovani-2/>
20. Trochoidní frézování. *Oneindustry* [online]. 2021 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/obrabeni/trochoidni-frezovani/>
21. Cemented tungsten carbide: material properties. *Matmach* [online]. [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://matmatch.com/suppliers/cera-ceratizit/examples/cemented-tungsten-carbide-properties>
22. RYCHLOŘEZNÉ NÁSTROJOVÉ OCELI. *Bolzano* [online]. [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: [https://bolzano.cz/wp-content/uploads/2020/01/bolzano\\_web\\_listy\\_nastrojove\\_oceli\\_rychlorezne\\_nastrojove\\_oceli.pdf](https://bolzano.cz/wp-content/uploads/2020/01/bolzano_web_listy_nastrojove_oceli_rychlorezne_nastrojove_oceli.pdf)
23. Rychlořezná ocel. *Oneindustry* [online]. 2019 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/rychlorezna-ocel/>
24. Druhy rychlořezných ocelí (HSS). *TumliKOVO* [online]. 2010 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/druhy-rychloreznych-oceli-hss/>
25. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
26. CO JE TO KARBID?. *Robert Bosch Power Tools GmbH – Impressum* [online]. [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: [https://ac-elearning.bosch-pt.com/mlearning/bcarbide/pageone\\_cz.html](https://ac-elearning.bosch-pt.com/mlearning/bcarbide/pageone_cz.html)
27. PÍŠKA, Miroslav a Katrin BUČKOVÁ. Řezné materiály současnosti: *Výroba a technologie*. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2018 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-materialy-soucasnosti>
28. Nástrojové řezné materiály. *COPTel* [online]. Kroměříž, 2019 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://coptel.cz/mod/page/view.php?id=7793>
29. Slinuté karbidy. *Ostravská univerzita* [online]. [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/03007.html>



30. Nástrojové materiály. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting-tool-materials>
31. Řezné materiály. *Eluc* [online]. [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1814>
32. DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN ISBN978-80-86706-19-1.
33. 5 Types of Ceramics Used to Make Cutting Tools. *Next Generation Tooling* [online]. 2021 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.nextgentooling.com/technical/category/silicon-nitride>
34. Tech Tips for Machining Hardened Materials with Ceramic and CeramiX. *Next Generation Tooling* [online]. 2021 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.nextgentooling.com/technical/category/ceramic-oxide>
35. Cutting Tools: GENERAL CATALOG, vol.6. NTK Cutting Tools [online]. 2019 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.ntk-cuttingtools.com/en/products/ceramics/overview-ceramic>
36. KOUŘIL, Karel. Vystružovací nástroje s břity z CBN: *Výroba a technologie. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vystruzovaci-nastroje-s-brity-z-cbn>
37. FIALA, Stanislav a Karel KOUŘIL. Nová generace průmyslového diamantu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nova-generace-prumysloveho-diamantu>
38. BUMBÁLEK, Leoš. *Kontrola a měření: pro SPŠ strojní*. Praha: Informatorium, 2009. ISBN 978-80-7333-072-9.
39. Parametry drsnosti. *JENOPTIK: MORE LIGHT* [online]. [cit. 2022-12-31]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
40. ŠTULPA, Miloslav. *CNC obráběcí stroje a jejich programování*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0207-8.

41. ČUBOŇOVÁ, Naděžda. *Počítačová podpora programovania cnc strojov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2012. ISBN 978-80-554-0514-8
42. SMOOTHY, Luke. A Guide to 5-Axis CNC Machining. *Get It Made* [online]. 2022 [cit. 2022-12-31]. Dostupné z: <https://get-it-made.co.uk/resources/the-what-how-and-why-of-5-axis-cnc-machining>
43. DMU 50 3rd Generation. *DMG MORI CO* [online]. 2021 [cit. 2022-12-31]. Dostupné z: <https://www.dmgmori.co.jp/en/products/machine/id=1440>
44. Přenosný přístroj na měření drsnosti povrchu Mitutoyo SJ-410. GAMIN [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: [https://www.gamin.cz/fileadmin/user\\_upload/Prenosny\\_pristroj\\_na\\_mereni\\_drsnost\\_i\\_povrchu\\_Mitutoyo\\_SJ\\_410.pdf](https://www.gamin.cz/fileadmin/user_upload/Prenosny_pristroj_na_mereni_drsnost_i_povrchu_Mitutoyo_SJ_410.pdf)
45. EBP 5672 Collet Chuck. CUTTING TOOL ENGINEERING [online]. USA, Northfield, 2013 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.ctemag.com/products/ebp-5672-collet-chuck>
46. ČSN 12050 – ocel k zušlechťování. CZ FERRO STEEL [online]. Napajedla [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-12050.pdf>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

CNC	Počítačem numericky řízené ( <i>Computer Numerical Control</i> )
NC	Numericky řízené ( <i>Numerical Control</i> )
CAD	Software, počítačem podporované projektování ( <i>Computer Aided Design</i> )
CAM	Software, počítačem podporované obrábění ( <i>Computer Aided Machining</i> )
CAE	Software, počítačem podporované analyzování ( <i>Computer Aided Engineering</i> )
2D	Označení dvoudimenzionálního prostoru
3D	Označení trojdimenzionálního prostoru
G-kód	Programovací jazyk obráběcího stroje
HDC	Dynamické obrábění ( <i>High Dynamic Cutting</i> )
HSM	Vysokorychlostní obrábění ( <i>High Speed Machining</i> )
HPM	Vysokovýkonné obrábění
DM	Suché obrábění ( <i>Dry Machining</i> )
SiAlON	Označení keramického materiálu Sialon
ZrO <sub>2</sub>	Oxid zirkoničitý
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Keramika s nitridem křemíku
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Keramika s oxidem hlinitým
Nb	Niobium
W	Wolfram
Cr	Chróm
Fe	Železo
Ti	Titan
C	Uhlík
N	Dusík
SiC	Karbid křemíku
HRSA	Žárovzdorná litina

KBN	Kubický nitrid bóru
PKD	Polykrystalický diamant
Ni	Nikl
Co	Kobalt
SK	Označení slinutých karbidů
WC	Karbid wolframu
TiC	Kubický karbid titanu
TaC	Kubický karbid tantalu
PVD	Způsob povlakování ( <i>Physical Vapour Deposition</i> )
CVD	Způsob povlakování ( <i>Chemical Vapour Deposition</i> )
$a_e$	Radiální šířka
$a_p$	Hloubka řezu
$\varphi_s$	Úhel záběru
HV	Označení tvrdosti materiálu dle Vickerse
HRC	Označení tvrdosti materiálu dle Rockwella
HM	Tvrdé obrábění
HFM	Frézování vysokým posuvem ( <i>High Feed Milling</i> )
HSS	Označení rychlořezných ocelí ( <i>High Speed Steel</i> )
Pt	Hloubka profilu
Wt	Vzdálenost mezi nejnižším a nejvyšším bodem srovnaného profilu
dl	Měřená délka
Rt	Největší hloubka drsnosti
lc	Profilový filtr
ln	Celková délka
Rmr(c)	Materiálový podíl
Ra	Střední aritmetická hodnota drsnosti

- Rz Střední hloubka drsnosti
- Rt Celková výška profilu drsnosti
- IN Označení vzorku s konkávním tvarem
- OUT Označení vzorku s konvexním tvarem
- R85 Označení tangenciální soudečkové frézy s profilovým rádiusem R85
- R250 Označení tangenciální soudečkové frézy s profilovým rádiusem R250

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Válcové a čelní frézování [5]</i> .....	11
<i>Obr. 2 Čelní frézování [5]</i> .....	12
<i>Obr. 3 Dokončování hladícími břitovými destičkami [6]</i> .....	12
<i>Obr. 4 Válcové frézování [5]</i> .....	13
<i>Obr. 5 Schéma sousledného frézování [9]</i> .....	14
<i>Obr. 6 Schéma nesousledného frézování</i> .....	15
<i>Obr. 7 Frézování úkosů</i> .....	17
<i>Obr. 8 Vrtání otvorů</i> .....	17
<i>Obr. 9 Vyvrtávání</i> .....	18
<i>Obr. 10 Zahlubování</i> .....	19
<i>Obr. 11 Závitování</i> .....	19
<i>Obr. 12 Schéma dynamického frézování (HDC) [12]</i> .....	20
<i>Obr. 13 Frézování pomocí metody suchého obrábění [17]</i> .....	22
<i>Obr. 14 Metoda trochoidního frézování [19]</i> .....	24
<i>Obr. 15 relativní podíly řezných materiálů pro produktivní obrábění [27]</i> .....	26
<i>Obr. 16 Znázornění řezných materiálů [21]</i> .....	26
<i>Obr. 17 Elektrostruskové přetavování [22]</i> .....	27
<i>Obr. 18 Složky slinutých karbidů [26]</i> .....	28
<i>Obr. 19 Rozdělení skupin slinutých karbidů dle ISO 513</i> .....	29
<i>Obr. 20 Schéma výroby SK [26]</i> .....	30
<i>Obr. 21 Břítová destička z cermetu [30]</i> .....	32
<i>Obr. 22 Diagram složení bílé keramiky [33]</i> .....	33
<i>Obr. 23 Diagram složení černé keramiky [33]</i> .....	34
<i>Obr. 24 Diagram složení keramiky na bázi Whiskerů [33]</i> .....	35
<i>Obr. 25 Diagram složení keramiky na bázi nitridu křemíku [33]</i> .....	36
<i>Obr. 26 Diagram složení Silaonu [33]</i> .....	36
<i>Obr. 27 Prioritní využití řezné keramiky [33]</i> .....	37
<i>Obr. 28 Srovnání vlastností KBN a diamantu [25]</i> .....	38
<i>Obr. 29 Princip měření drsnosti povrchu [32]</i> .....	40
<i>Obr. 30 Získání profilu vlnotisti a drsnosti filtrací [39]</i> .....	41
<i>Obr. 31 Znázornění střední aritmetická honota drsnosti Ra [39]</i> .....	42
<i>Obr. 32 Znázornění střední hloubky Rz, maximální hloubky RzImax a celkové výšky profilu drsnosti Rt [39]</i> .....	43
<i>Obr. 33 Znázornění materiálového poměru profilu Rmr (c) [39]</i> .....	43

<i>Obr. 34</i>	<i>Pětiosé obráběcí centrum třetí generace DMU 50 [43]</i> .....	44
<i>Obr. 35</i>	<i>Struktura programovaného bloku [41]</i> .....	45
<i>Obr. 36</i>	<i>Struktura programovaných slov [41]</i> .....	45
<i>Obr. 37</i>	<i>Formát bloku s pevnou délkou [41]</i> .....	46
<i>Obr. 38</i>	<i>Formát bloku s proměnlivou délkou [41]</i> .....	46
<i>Obr. 39</i>	<i>Souřadnicový systém a pracovní body soustruhu [40]</i> .....	48
<i>Obr. 40</i>	<i>Souřadnicový systém a pracovní body frézky [40]</i> .....	48
<i>Obr. 41</i>	<i>Schéma pětiosého uspořádání frézky [42]</i> .....	49
<i>Obr. 42</i>	<i>Pásová pila PPK–175 T při řezání vstupního materiálu</i> .....	53
<i>Obr. 43</i>	<i>Pětiosé obráběcí centrum třetí generace DMU 50 [43]</i> .....	55
<i>Obr. 44</i>	<i>Dynamometr KISTLER Typ 9129AA</i> .....	56
<i>Obr. 45</i>	<i>Schéma sestavy dynamometru</i> .....	57
<i>Obr. 46</i>	<i>Přístroj pro měření drsnosti povrchu Mitutoyo SJ-410 [44]</i> .....	58
<i>Obr. 47</i>	<i>Carl Zeiss Jena Spitzenhöhe 43,19 mm</i> .....	59
<i>Obr. 48</i>	<i>Břítová destička XOMX10T308TR-ME07 MS2050</i> .....	60
<i>Obr. 49</i>	<i>Nástroj R127.69-1632.RE-10-5A</i> .....	61
<i>Obr. 50</i>	<i>Rotační držák E3476582016110</i> .....	62
<i>Obr. 51</i>	<i>Břítová destička XOMX0660204R-M05 F40M</i> .....	63
<i>Obr. 52</i>	<i>Nástroj R127.69-0810.0-06-2N</i> .....	64
<i>Obr. 53</i>	<i>Rotační držák DIN40ADB-HC08-080</i> .....	65
<i>Obr. 54</i>	<i>Soudečková fréza JH734100X2R2R85.0Z4</i> .....	66
<i>Obr. 55</i>	<i>Soudečková fréza JH746100T2R2R250.0Z6</i> .....	67
<i>Obr. 56</i>	<i>Skličidlo EBP 5672</i> .....	68
<i>Obr. 57</i>	<i>Konstrukční ocel 12 050</i> .....	70
<i>Obr. 58</i>	<i>Postup přípravy vzorků</i> .....	70
<i>Obr. 59</i>	<i>Vzorek konkávního tvaru IN</i> .....	72
<i>Obr. 60</i>	<i>Vzorek konvexního tvaru OUT</i> .....	72
<i>Obr. 61</i>	<i>Způsob upnutí vzorku do dynamometru</i> .....	73
<i>Obr. 62</i>	<i>Zobrazení trajektorie nástroje pro hrubování</i> .....	74
<i>Obr. 63</i>	<i>Analýza zbytkového materiálu po hrubování</i> .....	74
<i>Obr. 64</i>	<i>Tvorba soudečkové frézy R85 v NX</i> .....	75
<i>Obr. 65</i>	<i>Analýza zbytkového materiálu po obrobení soudečkové frézy R85</i> .....	76
<i>Obr. 66</i>	<i>Zobrazení obráběcích trajektorií u operace Variable Contour u nástroje R85</i> .....	76
<i>Obr. 67</i>	<i>Tvorba soudečkové frézy R250 v NX</i> .....	76
<i>Obr. 68</i>	<i>Analýza zbytkového materiálu po obrobení soudečkové frézy R250</i> .....	77

<i>Obr. 69 Zobrazení obráběcích trajektorií u operace Variable Contour u nástroje R250...</i>	77
<i>Obr. 70 Simulace obrábění a zobrazení vektorů řezných sil .....</i>	78
<i>Obr. 71 Napolohování drsnoměru .....</i>	80
<i>Obr. 72 Zobrazení směru měření .....</i>	81
<i>Obr. 73 Graf Ra při posuvu na zub <math>f_z</math> 0,03 mm .....</i>	82
<i>Obr. 74 Graf Ra při posuvu na zub <math>f_z</math> 0,04 mm .....</i>	82
<i>Obr. 75 Graf Ra při posuvu na zub <math>f_z</math> 0,05 mm .....</i>	83
<i>Obr. 76 Graf Rz při posuvu na zub <math>f_z</math> 0,04 mm .....</i>	84
<i>Obr. 77 Graf Rz při posuvu na zub <math>f_z</math> 0,05 mm .....</i>	84
<i>Obr. 78 Materiálový podíl sousledného frézování nástrojem R85; <math>f_z</math> 0,03 mm; <math>a_e</math> 0,2 mm</i>	85
<i>Obr. 79 Závislost celkové síly na boční posuv (nesousledné frézování při <math>f_z</math> 0,03) .....</i>	87
<i>Obr. 80 Závislost celkové síly na boční posuv (nesousledné frézování při <math>f_z</math> 0,05) .....</i>	87
<i>Obr. 81 Závislost celkové síly na boční posuv (sousledné frézování při <math>f_z</math> 0,05) .....</i>	88
<i>Obr. 82 Řezné třísky .....</i>	89
<i>Obr. 83 Závislost délky třísek na boční posuv .....</i>	90
<i>Obr. 84 Závislost délky třísek na boční posuv .....</i>	91



**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Srovnání sousledného a nesousledného frézování [9] [10] [11].....</i>	15
<i>Tab. 2 Technické parametry pásové pily PPK-175 T.....</i>	53
<i>Tab. 3 Technické parametry univerzální CNC frézky DMG MORI DMU 50.....</i>	54
<i>Tab. 4 Technické dynamometru KISTLER Typ 9129AA.....</i>	55
<i>Tab. 5 Technické parametry kontaktního drsnoměru Mitutoyo SJ410 [44] .....</i>	57
<i>Tab. 6 Technické a rozměrové parametry břitové destičky XOMX10T308TR-ME07 MS2050 .....</i>	60
<i>Tab. 7 Technické a rozměrové parametry nástroje R127.69-1632.RE-10-5A.....</i>	61
<i>Tab. 8 Technické a rozměrové parametry nástroje R127.69-1632.RE-10-5A.....</i>	62
<i>Tab. 9 Technické a rozměrové parametry břitové destičky XOMX0660204R-M05 F40M .</i>	63
<i>Tab. 10 Technické a rozměrové parametry nástroje R127.69-0810.0-06-2N .....</i>	64
<i>Tab. 11 Technické a rozměrové parametry nástroje R127.69-0810.0-06-2N .....</i>	65
<i>Tab. 12 Technické a rozměrové parametry frézy JH734100X2R2R85.0Z4 .....</i>	66
<i>Tab. 13 Technické a rozměrové parametry frézy JH746100T2T2T250.0Z6 .....</i>	67
<i>Tab. 14 Technické a rozměrové parametry skličidla 5672S2510.....</i>	68
<i>Tab. 15 Technické a rozměrové parametry kleštinového upínače E3469567225160 .....</i>	68
<i>Tab. 16 Chemické složení oceli ČSN 12 050 [46].....</i>	71
<i>Tab. 17 Tepelné zpracování oceli ČSN 12050 [46].....</i>	71
<i>Tab. 18 Příkladná ukázka matice zvolených řezných podmínek.....</i>	79
<i>Tab. 19 Obecné zobrazení délek řezných třísek.....</i>	91

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Vyhodnocení všech dat v programu Excel

