



VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## **Obrábění hliníkové slitiny**

## **Machining of Aluminum Alloy**

Student:

Bc. Šimon Vlk

Vedoucí diplomové práce:

Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Šimon Vlk, DiS.**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: **Obrábění hliníkové slitiny  
Machining of Aluminum Alloy**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky obrábění hliníkové slitiny.
2. Návrh experimentální části práce.
3. Realizace experimentu.
4. Zpracování naměřených dat.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábani*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [4] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



  
Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty



### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18.05.2015

podpis studenta

### Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18.05.2015



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Šimon Vlk

Adresa trvalého pobytu autora práce: Adolfa Kašpara 8, Mohelnice 789 85



## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VLK, Š. *Obrábění hliníkové slitiny: diplomová práce*. Ostrava VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 70s. Vedoucí práce: Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá kvalitou opracované hliníkové slitiny EN AW-6082, speciálně drsností povrchu a měřením a vyhodnocením složek řezných sil. Teoretická část objasňuje základní pojmy věnované čelnímu frézování, obrobitelnosti hliníku, obráběným materiálům, řezným podmínkám a geometrii obrábění. V návrhu experimentální části práce je popsáno použití stroje, nástroje a vyměnitelných břitových destiček, přístrojů na měření drsnosti, velikosti řezných sil a navržené řezné podmínky. V experimentální části práce jsou změřeny drsnosti povrchu a prezentovány výsledky naměřených hodnot drsnosti Ra a Rz. Řezné síly byly měřeny na piezoelektrickém dynamometru.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

VLK, Š. *Machining of Aluminum Alloy: Master Thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering metrology, 2015, 70p. Thesis head: Jana Petru, Ph.D., multi MSc. M. A.

This master thesis is concerned with the quality of machined aluminium alloy EN AW-6082, especially surface roughness and the measurement and evaluation components of the cutting forces. The theoretical part explains the basic concepts of frontal milling, machinability aluminium, machined material, cutting conditions and geometry processing. In the proposal of the experimental part is described the using of machine, tool and indexable inserts, devices for measuring roughness, cutting forces and proposed cutting conditions. In the experimental part of the work are measured surface roughnesses and presented the results of the measured values of roughness Ra and Rz. Cutting forces were measured on the piezoelectric dynamometer.



## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů .....	8
Úvod.....	11
1. Úvod do problematiky obrábění hliníkové slitiny .....	12
1.1. Rozdělení a označení hliníkové slitiny .....	13
1.2. Obrobitelnost hliníkové slitiny .....	15
1.3. Rozdělení obráběných materiálů .....	17
1.4. Obecné vlivy na obrábění .....	19
1.4.1. Řezné podmínky .....	21
1.4.2. Tvar a utváření třísky .....	27
1.4.3. Geometrie.....	29
1.4.4. Řezné síly .....	31
1.5. Frézování .....	33
1.6. Drsnost povrchu.....	34
2. Návrh experimentální části práce .....	37
2.1. Použitý obráběný materiál .....	37
2.2. Použitý stroj.....	38
2.3. Použitý nástroj .....	39
2.4. Použité břitové destičky.....	40
2.5. Použitý přístroj pro měření drsnosti .....	40
2.6. Použitý přístroj pro měření řezných sil.....	41
2.7. Řezné podmínky .....	42
3. Realizace experimentu.....	45
4. Zpracování naměřených dat .....	46
4.1. Stanovení vyhodnocení drsnosti povrchu .....	46
4.1.1. Označení vzorků pro měření drsnosti .....	46
4.1.2. Hrubé chyby měření.....	47
4.1.3. Nejistota měření .....	49
4.2. Vyhodnocení drsnosti povrchu .....	51
4.2.1. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro $v_c = 600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	52
4.2.2. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu s rozšířenou kombinovanou nejistotou $U_c$ pro $v_c = 600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	52



4.2.3. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu s rozšířenou kombinovanou nejistotou $U_c$ pro $f_z = 0,1$ mm.....	54
4.2.4. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu s rozšířenou kombinovanou nejistotou $U_c$ pro $f_z = 0,2$ mm.....	56
4.3. Vyhodnocení naměřených dat výsledných složek řezných sil .....	58
4.3.1. Vypočtené hodnoty složky řezné síly $F_{fn}$ , $F_f$ a $F_p$ pro posuv $f_z = 0,1$ .....	60
4.3.2. Vypočtené hodnoty složky řezné síly $F_{fn}$ , $F_f$ a $F_p$ pro posuv $f_z = 0,2$ .....	62
4.3.3. Kolize frézování při řezné rychlosti $v_c = 600$ m·min <sup>-1</sup> a posuvu $f_z = 0,4$ mm..	63
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.....	65
Závěr .....	67
Seznam použité literatury .....	68



## Seznam použitých značek a symbolů

Zkratka	Význam
A	tažnost [%]
$A_{Di}$	jmenovitý průřez třísky [ $\text{mm}^2$ ]
B	šířka obrobku [mm]
$C_{Fc}$	konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu [-]
$D, D_1$	průměr nástroje [mm]
$D_{eff}$	efektivní průměr [mm]
E	modul pružnosti [MPa]
$F_x$	síla ve směru osy $x$ [N]
$F_y$	síla ve směru osy $y$ [N]
$F_z$	síla ve směru osy $z$ [N]
$F_{fn}$	normálová síla k síle posuvu [N]
$F_f$	síla ve směru posuvu [N]
$F_p$	pasivní síla [N]
$F_i$	celková síla řezání [N]
$F_{ci}$	řezná složka [N]
$F_{cNi}$	kolmá řezná složka síly řezání [N]
$F_{fi}$	posuvová složka síly řezání [N]
$F_{fNi}$	kolmá posuvová složka síly řezání [N]
H	výška obrobku [mm]
HB	stupeň tvrdosti podle Brinella
L	dráha nástroje ve směru posuvového pohybu [mm]
QM	řízení jakosti
$R_a$	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$R_p$	největší výška výstupku profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$R_q$	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$R_t$	celková výška profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$R_v$	největší hloubka prohlubně profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	největší výška profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$R_m$	mez pevnosti v tahu [MPa]
$R_{p0,2}$	mez kluzu v tahu [MPa]
RO	rychlořezná ocel





SK	slinuté karbidy
$U_C$	rozšířená kombinovaná nejistota
VBD	vyměnitelná břitová destička
$Z_p$	výška výstupku profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$Z_v$	hloubka prohlubně profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$Z_{(x)}$	hodnota pořadnic [mm]
$a_e$	šířka záběru [mm]
$a_p$	hloubka řezu [mm]
$b_i$	jmenovitá šířka třísky [mm]
$f_n$	posuv na otáčku [mm]
$f_z$	posuv na zub [mm]
$h_{ex}$	minimální tloušťka třísky [mm]
$h_i$	okamžitá hloubka řezu [mm]
$h_{max}$	maximální hloubka řezu [mm]
$k_U$	koeficient rozšíření
$k_{ci}$	měrná řezná síla [MPa]
$l$	délka obrobku [mm]
$l_n$	dráha potřebná pro nájezd frézy do obrobku [mm]
$l_p$	dráha potřebná pro výjezd frézy od obrobku [mm]
$l_r$	základní délka [mm]
$l_n$	vyhodnocovaná délka [mm]
$n$	otáčky nástroje [ $\text{min}^{-1}$ ]
$s(x)$	výběrová směrodatná odchylka [-]
$t_{As}$	jednotkový strojní čas [min]
$u_A$	standardní nejistota typu A
$u_B$	standardní nejistota typu B
$u_C$	kombinovaná standardní nejistota C
$v_c$	řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]
$v_e$	efektivní řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]
$v_f$	rychlost posuvu [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]
$x$	exponent vlivu tloušťky třísky [-]
$\bar{x}$	aritmetický průměr
$Z, Z_c$	počet zubů (břitů) nástroje [-]
$\alpha_o$	úhel hřbetu v ortogonální rovině [ $^\circ$ ]
$\gamma_f$	úhel čela v boční rovině [ $^\circ$ ]



$\gamma_o$	úhel čela v ortogonální rovině [°]
$\gamma_p$	úhel čela v zadní rovině [°]
$\varepsilon_r$	úhel špičky [°]
$\kappa_r, \chi_r$	úhel nastavení hlavního ostří [°]
$\lambda_s$	úhel sklonu hlavního ostří [°]
$\varphi_i$	úhel posuvového pohybu [°]

## Úvod

V diplomové práci bude řešena problematika obrábění hliníkové slitiny a vliv řezných podmínek na kvalitu povrchu respektive na drsnost povrchu.

Obrábění hliníku je stále více preferováno na trhu a jeho dobrá obrobitelnost přispívá k jeho velkému rozšíření napříč spektrem všech odvětví průmyslu. Nacházením vhodných řezných podmínek, které přispívají k lepší obrobitelnosti hliníku je i cílem této práce.

Cílem diplomové práce je přiblížit výhody a problémy při obrábění hliníku. Obecné vlivy, které působí na obrobitelnost hliníku, jako jsou řezné podmínky, tvar a utváření třísky, geometrie nástroje, kvalita povrchu a jaké síly působí na proces frézování. Tyto parametry značně ovlivňují životnost nástroje a ekonomické aspekty obrábění.

Pro experiment byl vybrán materiál hliník EN AW-6082 [AlSi1MgMn], který byl obráběn čelním frézováním 4 zubou frézou s vyměnitelnými břitovými destičkami na stroji HURCO VMX t30. Experiment byl navržen pro tyto proměnné řezné parametry: řezná rychlost 600;700;800;900 a 1000 m·min<sup>-1</sup>, posuvu na zub 0,1;0,2 a 0,4 mm.

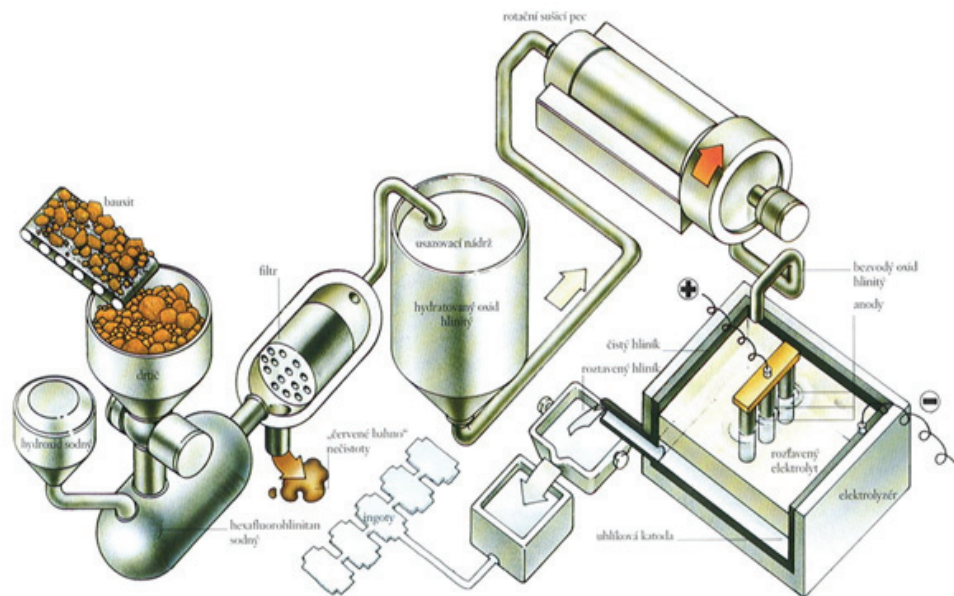
Experimentální částí byla vyhodnocena kvalita povrchu pomocí drsnoměru SurfTest SJ – 210. Každý vzorek byl změřen 10 krát a to ve dvou kolmých osách, v ose posuvu (x-osa) a v ose kolmé na posuv (y-osa). Řezné síly byly změřeny pomocí piezoeletrického dynamometru KISTLER typ 9255B přímo při frézování. Tyto síly byly měřeny ve třech osách  $F_{fn}$ ,  $F_f$  a  $F_p$ , které jsou :  $F_{fn}$  je síla normálová k síle posuvové,  $F_f$  je síla posuvu a  $F_p$  je pasivní síla.

V závěru byly zhodnoceny výsledky drsnosti povrchu a změřených sil při zadaných řezných podmínkách a doporučeny nejvhodnější řezné parametry.

## 1. Úvod do problematiky obrábění hliníkové slitiny

Hliník je velmi lehký kov bělavě šedé barvy, jeho chemická značka je Al (lat. Aluminium). Hliník je neušlechtilý, nestálý, kujný kov a je třetím nejvíce zastoupeným prvkem v zemské kůře. Vyznačuje se vysokou elektrickou a tepelnou vodivostí s vysokou hodnotou měrného tepla tání. V čistém stavu je velmi reaktivní, na vzduchu se však rychle pokryje pasivační vrstvou oxidu, která následně chrání kov před jeho další oxidací. Hliník byl objeven roku 1825 dánským fyzikem Hansem Christianem Oerstedem. [6]

V přírodě se hliník vyskytuje zejména ve formě sloučenin. Technicky čistý hliník se vyrábí z bauxitu ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2 \text{H}_2\text{O}$  dihydrát oxidu hlinitého) a kryolitu ( $\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$  – hexafluorohlinitan sodný) elektrolýzou jejich taveniny o teplotě asi  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ . Čistý hliník nelze jednoduše metalurgicky tepelně vyredukovat z jeho rudy jako např. železo koksem ve vysoké peci. Právě zavedení průmyslové elektrolýzy taveniny kovových rud umožnilo současnou výrobu čistého hliníku (viz obr. 1.1). Elektrolýzou lze vyrobit hliník o čistotě 99,3 až 99,8 %. Čistota takto vyrobeného hliníku závisí na podmínkách elektrolýzy a na čistotě vstupních surovin. Mezi hlavní nečistoty patří zejména železo, křemík a měď. Hliník vyšší čistoty se vyrábí rafinací elektrolytického hliníku, je možno dosáhnout velmi vysoké čistoty překračující 99,99 %. Další významnou možností výroby hliníku je zpracování druhotných surovin. [6] [8] [10]



Obr. 1.1 – Výroba hliníku [9]

Hliník má vysoký poměr meze pevnosti v tahu a tlaku. Pevnost v tahu hliníku o čistotě 99,5 % je zhruba 70 MPa. Čím je vyšší obsah nečistot, tím pevnost a tvrdost hliníku roste, ale naopak klesá tažnost, elektrická a tepelná vodivost. Největší nečistoty v čistém hliníku jsou považovány železo a křemík. Tyto příměsi se dostanou do hliníku v průběhu výroby nebo se je nepodaří zcela odstranit z výchozích surovin. Pevnost může být zvýšena tvářením za studena, legováním nebo tepelným zpracováním (vytvrditelné slitiny hliníku). Při vzrůstající čistotě hliníku jeho pevnost klesá a tažnost stoupá. [10] [11]

### 1.1. Rozdělení a označení hliníkové slitiny

**Slitina** je směs kovu a dalších složek, kde jedna složka je převažující a tu nazýváme základní. Potom vznikají slitiny pojmenované podle této základní složky nebo mají své originální pojmenování.

Hliník nemá dostatečné mechanické vlastnosti, proto je lze vylepšovat změnou chemického složení. Toho se docílí přidáním legujících prvků do čistého hliníku. Vhodnou kombinací legujících prvků a způsobu použití slitiny dochází ke změně původních vlastností hliníku. Dochází tak ke zlepšení pevnostních, chemických, technologických a fyzikálních vlastností. Nejvýznamnějšími prvky, které se vyskytují ve slitinách s hliníkem, jsou měď, hořčík, mangan, křemík a zinek. Měď zvyšuje tvrdost i pevnost, nepříznivě ovlivňuje tvárnost a odolnost proti korozi. Hořčík zajišťuje vytvrditelnost a zlepšuje odolnost proti korozi a pevnost. Mangan zvyšuje tvárnost, pevnost, houževnatost a odolnost proti korozi. Křemík zvyšuje odolnost proti korozi a pevnost. [6]

**Rozdělení slitin hliníku** je možné z několika hledisek a záleží na kritériu, které je pro nás nejdůležitější:

- dle chemického složení
- dle odolnosti proti korozi
- dle způsobu zpracování
  - tvářené slitiny
  - slévárenské slitiny – hlavně slitiny Al-Si (siluminy)
- dle tepelného zpracování
  - tepelně vytvrditelné (slitiny typu Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu)
  - tepelně nevytvrditelné (slitiny Al-Mg, Al-Mn)

Slitiny určené k tváření se následně dělí dle toho, zda jsou možné jejich vlastnosti zvyšovat precipitačním vytvrzováním. Vytvrzování se rozumí tepelné zpracování, kterým lze zlepšit některé mechanické vlastnosti, zejména pevnost. Pomocí tohoto tepelného zpracování jsou hliníkové slitiny vytvrzitelné, že mohou dosáhnout pevnosti 400 až 700 MPa. Poměr pevnost ke hmotnosti převyšuje i ty nejpevnější oceli. [11] [13]

**Označení slitin hliníku** dle normy ČSN EN 573. Norma je rozdělena na čtyři části. Pro označení je nejdůležitější část ČSN EN 573-1: *Hliník a slitiny hliníku. Chemické složení a druhy tvářených výrobků. Část 1: Číselné označování*. Může se použít jako doplnění, dodatečné označení chemickými značkami v hranaté závorce podle části ČSN EN 573-2. Za těmito chemickými značkami se uvádí čísla, která udávají hmotnostní procentuální obsah těchto prvků. [13] [14]

Slitiny hliníku jsou rozděleny dle normy ČSN EN 573-1 do 8 řad, které je rozdělují dle obsahu převládajících chemických prvků. Příklad označení:

Příklad označení: EN AW-6082 [AlSi1MgMn]

- EN - úvodní předpona
- A - číslice určující hliník
- W - číslice určující tvářené výrobky
- XXXX - čtyři číslice určující chemické složení

Označení 1xxx je vyhrazeno čistému hliníku, kde je minimální obsah stanoven na 99,0% a vyšší. Označení ve skupinách řady 2xxx až 8xxx je určeno slitinovým prvkem, který se vyskytuje největším procentuálním obsahem. [13] [14]

- hliník 99,00% a více 1xxx - řada 1000
- měď 2xxx - řada 2000
- mangan 3xxx - řada 3000
- křemík 4xxx - řada 4000
- hořčík 5xxx - řada 5000
- hořčík a křemík 6xxx - řada 6000
- zinek 7xxx - řada 7000
- jiné prvky 8xxx - řada 8000
- neobsazená řada 9xxx - řada 9000 [14]

Vytvrzitelné slitiny hliníku jsou slitiny hliníku z řad 2000, 6000 a 7000. [13]

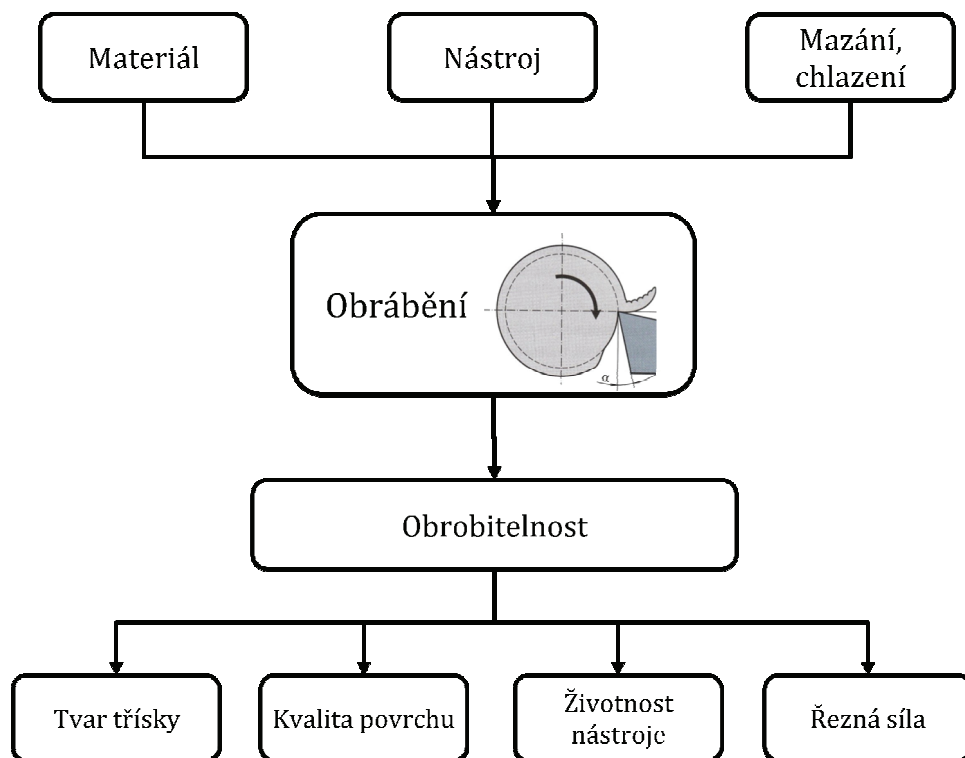
## 1.2. Obrobitelnost hliníkové slitiny

Technologické vlastnosti materiálu jsou souborem mechanických a fyzikálních vlastností materiálů, které umožňují vyrobit předem definovaným způsobem. Ty nejdůležitější technologické vlastnosti jsou řazeny slévatelnost, tvárnost, svařitelnost a obrobitelnost. [16]

Termín obrobitelnost ukazuje jak snadno je možné kov oddělit a jak je možné z něj odstranit materiál s co nejmenšími náklady. Je to vlastnost materiálu udávající vhodnost k obrábění. Pod pojmem obrobitelnost lze zahrnout řadu vlastností a parametrů (viz obr. 1.2). Materiály s dobrou obrobitelností se vykazují malou řeznou silou, dobrou řeznou rychlostí, požadovaným tvarem třísky a lze očekávat dobrou kvalitu povrchu po obrábění. [16]

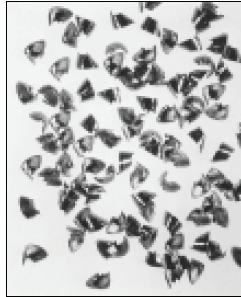
Faktory, které obvykle zlepšují vlastnosti materiálu, často naopak zhoršují jeho obrobitelnost. Proto se k výrobě dílů vyhledávají materiály, které mají zlepšovat obrobitelnost bez zhoršení výsledných vlastností materiálů. [5] [16]

Obrobitelnost není posuzována jen z pohledu stavu obráběného materiálu a jeho fyzikálních a mechanických vlastností jako jsou například tvrdost, houževnatost a struktura. Závisí i na geometrii a materiálu řezného nástroje, stavu techniky a na řezných podmínkách - mazání a chlazení. [5] [16]



Obr. 1.2 – Parametry charakterizující obrobitelnost

Existuje mnoho faktorů, které ovlivňují obrobiteľnosť, ale žádný široce prijímaný spôsob, jak to vyčíslit. Miesto toho, obrobiteľnosť je často hodnotena prípad od prípadu, a testy jsou prízpůsobeny potrebám konkrétneho výrobného procesu. Nejdôležitejši parametry při hodnotení obrobiteľnosti jsou životnosť nástroje, síly pôsobící na nástroj a spotřeba energie, kvalita výsledného povrchu a popisu tvaru třísky (viz obr. 1.3). [5] [16]



*Obr. 1.3 – Ideální tvar třísky pro hliník [5]*

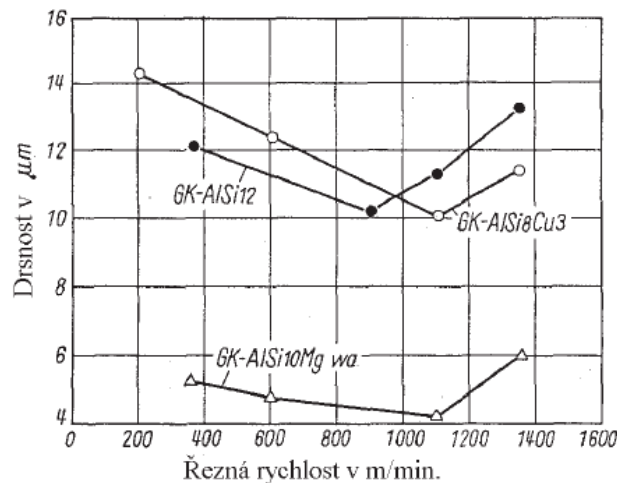
Obecně lze říci, že hliníkové slitiny patří ve srovnání s ostatními kovovými konstrukčními materiály mezi ty lépe obrobiteľné. Například ve srovnání s ocelí stejné pevnosti jsou řezné síly u hliníkových slitin výrazně menší. Zatímco obrobiteľnosť čistého hliníku je velmi špatná, obrobiteľnosť hliníkových slitin je velmi dobrá. Výrazný rozdíl mezi obrobiteľností čistého hliníku a slitinami hliníku spočívá ve struktuře. [16]

Pro zvýšení obrobiteľnosti jsou slitiny hliníku legovány různými chemickými prvky a příměsemi, aby bylo dosaženo požadovaných optimálních řezných podmínek. Hlavní legující prvky jsou olovo a bismut, které zlepšují mechanickou obrobiteľnosť

Slitiny hliníku lze z hlediska obrobiteľnosti rozdělit do tří skupin. Na slitiny slévárenské, tvářené a slitiny určené pro obrábění - automatové.

**Slévárenské slitiny**, které obsahují měď, hořčík nebo zinek jakožto hlavní legující prvky, jsou dobře obrobiteľné a jejich obrobiteľnosť je srovnatelná s tvářenými slitinami. Slitiny obsahující jako hlavní legující prvek křemík je nutné obrábět při nižších rychlostech a posuvech a platí, že opotřebení nástroje vzrůstá s obsahem křemíku. Při obrábění slitin legovaných křemíkem se tvoří většinou krátká dobře lámavá tříška. Drsnost povrchu  $R_a$  podeutektických a eutektických Al-Si slitin klesá s rostoucí řeznou rychlostí, avšak od určité rychlosti se kvalita povrchu opět zhoršuje (viz obr. 1.4). [16]





Obr. 1.4 – Závislost kvality povrchu na řezné rychlosti pro slévárenské slitiny Al-Si [16]

**Tvářené slitiny** mají výborné charakteristiky obrábění. Pro dosažení optimálních podmínek obrábění jednotlivých slitin je nutné zajistit dobré parametry obrábění a geometrii řezných nástrojů. U nevytvrzovatelných slitin je tvořena dlouhá spojitá tříska, kterou je nutné odstraňovat. Naopak u vytvrzovatelné slitiny se obrábí velmi dobře, kvalita povrchu je výborná. Tříska je obvykle dlouhá a stočená, většinou se snadno láme.

**Automatové slitiny** jsou legovány prvky s nízkou teplotou tání. Vznik drobné lámavé třísky při obrábění je pomocí legur jako jsou Pb, Bi, Sb a Cd. Z pohledu opotřebení nástroje jsou automatové slitiny srovnatelné a tvářenými slitinami a to i při vysokých řezných rychlostech, které se pohybují kolem  $1000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Řezné síly a kvalita povrchu odpovídají parametrům dosahovaných u tvářených vytvrzovatelných slitin. Nejčastěji jsou pro automatové slitiny používány vytvrzovatelné slitiny řady 2xxx a 6xxx, do kterých jsou nalegovány prvky Pb a Bi. Olovo však má nepříznivý vliv na lidské zdraví a životní prostředí a to vede k vývoji slitin, které jej neobsahují. Proto je olovo v těchto slitinách nahrazováno cínem. [16]

Nejčastější zástupci automatových slitin: AlMgSiPb, AlCu4PbMg a AlCu6BiPb.

### 1.3. Rozdělení obráběných materiálů

Při volbě vhodného nástroje a vhodných startovních řezných podmínek je jednou z nejdůležitějších věcí správná identifikace obráběného materiálu. Norma ISO 513 definuje základní rozdělení obráběných materiálů do šesti základních skupin. Tyto skupiny se rozlišují velkým písmenem P, M, K, N, S, H a barvou (viz obr. 1.5). [17] [18]

<b>P</b>  Ocel	<b>M</b>  Korozivzdorná ocel	<b>K</b>  Litina
<b>N</b>  Hliník	<b>S</b>  Žárovzdorné slitiny	<b>H</b>  Tvrzená ocel

Obr. 1.5 – Základní přehled značení obráběných materiálů [19]

Tyto skupiny jsou rozděleny do podskupin, které vyvolávají kvalitativně stejný typ zatížení (namáhání) břitu a tudíž vyvolávají i podobný typ opotřebení. Podskupina použití je označena písmenem podskupiny a číslem klasifikace (viz tab. 1.1). Čím je klasifikační číslo menší, tím vyšší řeznou rychlostí je možné obrábět s vyšší otěruvzdorností nástroje. Pokud je klasifikační číslo větší roste i posuvová rychlost a pevnost nástroje. [17] [18]

Výrobci řezných materiálů dosazují do tohoto systému skupin a podskupin své produkty podle toho, jaké jsou vlastnosti řezných materiálů - zejména s důrazem na opotřebení nástroje a stupeň houževnatosti. [17]

Tab. 1.1 – Přehled skupin a podskupin obráběcích materiálů dle ISO 513

Skupiny			Podskupiny	
Identifikační písmeno	Identifikační barva	Obráběné materiály	Tvrdé řezné materiály	
P	Modrá	<b>Ocel:</b> Uhlíkové, legované, feritické a nástrojové oceli, uhlíková ocelolitina skupiny, nízko a střednělegované ocelolitinové skupiny, feritické a martenzitické korozivzdorné oceli.	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45
M	Žlutá	<b>Korozivzdorná ocel:</b> austenitické a austeniticko-feritická ocel korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné.	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35
K	Červená	<b>Litina:</b> šedá litina nelegovaná i legovaná, tvárná litina, temperovaná (kujná) litina.	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35
N	Zelená	<b>Neželezné kovy:</b> hliníkové slitiny, hořčikové slitiny, slitiny mědi, bronz, mosaz, keramika a jiné vysoce abrazivní nekovové materiály.	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25

Skupiny			Podskupiny	
Identifikační písmeno	Identifikační barva	Obráběné materiály	Tvrdé řezné materiály	
S	Hnědá	<b>Superslitiny a titan:</b> žáruvzdorné speciální slitiny na bázi niklu a kobaltu, titan a slitiny titanu.	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25
H	Šedá	<b>Tvrdé materiály:</b> Kalené oceli, litinové materiál, tvrzená litina.	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25

**Materiály skupiny ISO N** – jedná se o neželezné kovy zejména měkké kovy, jako například hliník, měď, slitiny mědi, slitiny hořčíku, bronz nebo mosaz atd. v podstatě se jedná o neželezné kovy a nekovové materiály, které mají vysoce abrazivní vlastnosti.

Nejrozsáhlejší skupina těchto materiálů představují slitiny hliníku (Al) obsahující méně než 12-13% křemíku (Si), hliník s obsahem Si 13% je velice abrazivní. Do této skupiny patří neželezné měkké kovy s tvrdostí do 130 HB, ale výjimku tvoří vysokopevnostní bronz (>225 HB).

U použití břitových destiček s ostrými břity u této skupiny materiálů je možné předpokládat požívání vysokých řezných rychlostí a dlouhou životnost nástroje. [17] [19]

#### 1.4. Obecné vlivy na obrábění

Obrábění je realizováno v soustavě obrábění (SNOP), která se skládá ze čtyř těchto částí:

- obráběcí stroj (S),
- řezný nástroj (N),
- obrobek (O),
- přípravek (P).

Podle charakteristických znaků břitové geometrie nástroje dělíme obrábění:

- obrábění s definovanou geometrií břitu (soustružení, frézování, vrtání, vyhrubování, vystružování, vyvrtávání, hoblování a obrážení, aj.),
- obrábění s nedefinovanou geometrií (broušení, honování, lapování aj.),
- nekonveční metody obrábění (např. elektroerozivní, chemické, ultrazvukem, laserem, soustředěným paprskem),
- úpravy obrobených ploch (např. válečkování, leštění, hlazení). [1]

Vlivy působící na jednotlivé složky soustavy SNOP jsou znázorněny (viz tab. 1.2).

[21]

Tab. 1.2 – Vlivy působící na SNOP

Tuhost Výkon Přesnost	⇒	<b>Stroj</b>	⇐ Řezné podmínky Chlazení NC řízení
Tuhost Otupeň Upnutí	⇒	<b>Nástroj</b>	⇐ Materiál bříty Geometrie bříty Trvanlivost
Tuhost Polotovar Přesnost	⇒	<b>Obrobek</b>	⇐ Obrobitelnost Tuhost, pevnost Geometrický tvar
Tuhost Přesnost Rozměr	⇒	<b>Přípravek</b>	⇐ Počet stupňů volnosti

Pro obrábění hliníku, jeho slitin a neželezných kovů je třeba vytvořit optimální pracovní podmínky, a to hlavně z hlediska použitého řezného materiálu, řezných podmínek, obráběcích nástrojů a jejich geometrie břitů. Největší skupinou neželezných kovů jsou slitiny hliníku s obsahem křemíku do 12 %, které vytvářejí dlouhou, relativně snadno kontrolovatelnou třísku. [23] [25]

Z pohledu obráběcích materiálů k dosažení úspěšných výsledků při obrábění hliníku, ale i dalších neželezných kovů, je nutnost použití vhodných řezných materiálů pro výrobu obráběcích nástrojů. K tomu účelu se používají vyměnitelné břitové destičky (VBD) ze slinutých karbidů (SK) s pozitivní geometrií a ostrými břity, které se vyrábějí buď povlakované pro hrubování anebo lze použít i nepovlakované pro dokončovací operace. Slitiny Al s vyšším obsahem křemíku jsou extrémně abrazivní, a proto se k jejich opracování používají nástroje na bázi PCD. Vyměnitelné břitové destičky musejí vykazovat velkou odolnost proti rychlému opotřebení břitů otěrem i při velkých řezných rychlostech. [23] [25]

VBD se vyznačují velmi ostrými řeznými hranami s pozitivní geometrií břitů s úhlem čela 20 až 30° a s návaznými utvařeči třísek. Destičky mají mikroleštěný povrch a kvalitní provedení řezných hran, což zmenšuje koeficient tření a snižuje adhezi k hliníku. Proto je omezena možnost "nalepování" obráběného materiálu na nástroj. [25]

Při tomto provedení a použité geometrie břitů VBD vznikají velmi malé řezné odpory a dosahuje se optimálních pracovních výsledků i při obrábění méně tuhých nebo tenkostěnných obrobků. Velmi účinné utvařeče třísek umožňují vznik krátkých šroubovitých třísek a jejich spolehlivý a plynulý odchod z oblasti řezu. [25]

Při obrábění slitin hliníku je hlavní funkcí řezné kapaliny znesnadnění ulpívání částic materiálu na břitu a odvádění třísek z pracovního prostoru. Řezné rychlosti při nasazení nepovlakovaných tříd dosahují  $1000 - 2000 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , při nasazení PCB až  $3000 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . [23]

#### 1.4.1. Řezné podmínky

Volba řezných podmínek je v širším měřítku závislá na vlastnostech nástroje, stroje, obrobku i prostředí a dále na požadovaných vlastnostech výsledného obrobeného dílu (přesnost rozměrů a tvaru, drsnost obrobeného povrchu, ovlivnění povrchové vrstvy obrobené plochy apod.). Při obrábění vysokými řeznými rychlostmi vzniká v místě řezu značné množství tepla; při intenzivním obrábění je proto ve většině případů nutné přivádět do místa obrábění dostatečné množství řezné kapaliny. [22]

Řezná kapalina splňuje tři základní funkce:

- odvod části tepla, vzniklého obráběním,
- snižuje tření v místě řezu a tím i množství vzniklého tepla,
- odplavuje vzniklé třísky. [22]

Vhodnou volbou řezných podmínek lze minimalizovat náklady na výrobu jednoho kusu a zkrátit výrobní čas na výrobu jednoho kusu. Proto je dobré se zaměřit na nejdůležitější vlivy řezných podmínek.

**Řezná rychlost**  $v_c$  je vyjádřena jako okamžitá rychlost hlavního řezného pohybu, a to v uvažovaném bodě ostří vzhledem k obrobku. Řeznou rychlost lze chápat jako pohyb rozložený do dvou složek, kterými jsou hlavní pohyb a posuv U frézování se pro zjednodušení pokládá za řeznou rychlost, obvodová rychlost nástroje. Řezné rychlosti se pro frézování obvykle pohybují v rozsahu  $20$  až  $570 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a jsou závislé zejména na druhu obráběného materiálu, na materiálu nástroje a na způsobu frézování. [1] [2] [22]

Pro středně těžké frézování pomocí nástrojů z rychlořezné oceli a slinutých karbidů jsou v následující tabulce (viz tab. 1.3) uvedeny orientační hodnoty řezných rychlostí:

Tab. 1.3 – Řezné rychlosti pro těžké frézování [22]

Materiál	Rychlořezná ocel	Slinuté karbidy
Ocel, šedá litina	20 až 40 m·min <sup>-1</sup>	120 až 200 m·min <sup>-1</sup>
Měď	40 až 60 m·min <sup>-1</sup>	240 až 280 m·min <sup>-1</sup>
Hliník	120 až 250 m·min <sup>-1</sup>	450 až 570 m·min <sup>-1</sup>

Vzorec pro výpočet řezné rychlosti  $v_c$ :

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$$

Efektivní neboli skutečná řezná rychlost  $v_e$  se stanoví jako obvodová rychlost na efektivním průměru  $D_{\text{eff}}$ . Hodnota efektivní řezné rychlosti je nutná pro stanovení optimálních a správných řezných podmínek pro danou hloubku řezu  $a_p$ . Tato hodnota se uplatňuje při použití fréz s kruhovými břitovými destičkami, stopkových fréz s kulovým čelem a všech typů fréz s většími poloměry rohů, stejně jako fréz s úhlem nastavení menším než 90°. [19]

V některých případech pomocí naklonění nástroje se zvýší efektivní průměr frézy a tím i výsledná efektivní řezná rychlost. Toto naklonění zlepšuje kvalitu povrchu a zvyšuje trvanlivost nástroje. Pokud je směr a způsob posuvu nástroje tažený, má nástroj tišší chod a zlepšuje se i povrch obráběného materiálu, oproti tlačnému posuvu. Také použití sousledného či nesousledného způsobu frézování má velký vliv na kvalitu povrchu a životnost nástroje. [24]

Výhody:

- podstatné zlepšení drsnosti povrchu v příčném i podélném směru,
- snížení času obrábění z důvodů možnosti použití většího posuvu na zub a větší šířky řezu (kroku frézy),
- zvýšení trvanlivosti nástroje,
- zvýšení přesnosti obrábění,
- zajištění konstantního průřezu třísky a neměnné řezné podmínky. [24]

**Posuv na otáčku**  $f_n$  je délka dráhy obrobku za dobu jedné otáčky nástroje.

Pro frézování **posuv na zub**  $f_z$  je základní jednotkou posuvového pohybu. Je to délka dráhy obrobku za dobu jedné otáčky nástroje dělená počtem zubů nástroje (viz obr. 1.6). [2]

Posuv na zub by neměl být menší než 0,05 mm, protože pak se začíná projevovat vliv poloměru ostří břitu nástroje, a to zejména pro nástroje s břity z povlakovaných slinutých karbidů. Posuv na zub se obvykle pohybuje v rozsahu 0,05 až 0,4 mm. Pro běžné a tvarové frézování se posuv na zub obvykle volí v rozsahu: [22]

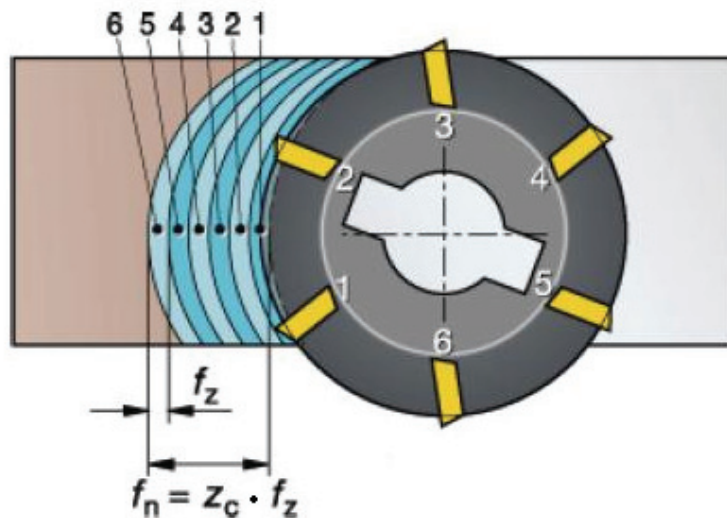
- běžné frézování 0,1 až 0,4 mm,
- frézování tvarovými frézami 0,05 až 0,2 mm. [22]

Vzorec pro výpočet posuvu na otáčku  $f_n$ :

$$f_n = f_z \cdot z \quad [\text{mm}]$$

Vzorec pro výpočet posuvové rychlosti  $v_f$ :

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$$



Obr. 1.6 – Grafické znázornění posuvu na zub [19]

### Hloubka řezu

Hloubka záběru při frézování se pohybuje v rozsahu 0,5 až 20 mm i více. Pro jednotlivé fáze frézování se volí obvykle v rozsahu: [22]

- pro hrubování 10 až 20 mm i více,
- pro středně těžké obrábění 2 až 10 mm,
- na čisto 0,5 až 2 mm. [22]

Tenká tříska, která má nízkou tloušťku třísky, představuje nejčastější příčinu nízké výkonnosti, která má za následek malou produktivitu. To může negativním způsobem ovlivňovat životnost nástroje a utváření třísek. Naopak velká tloušťka třísky vede k přetížení břitu, což může způsobit jeho lom. [19]

Při válcovém frézování nesousledném se tloušťka třísky mění od nulové do maximální hodnoty a při sousledném frézování od maxima do nuly. Okamžitá **tloušťka třísky**  $h_i$  je v libovolné fázi odřezávání vyjádřena následujícím vztahem. [2]

Vzorec pro výpočet tloušťky třísky  $h_i$ :

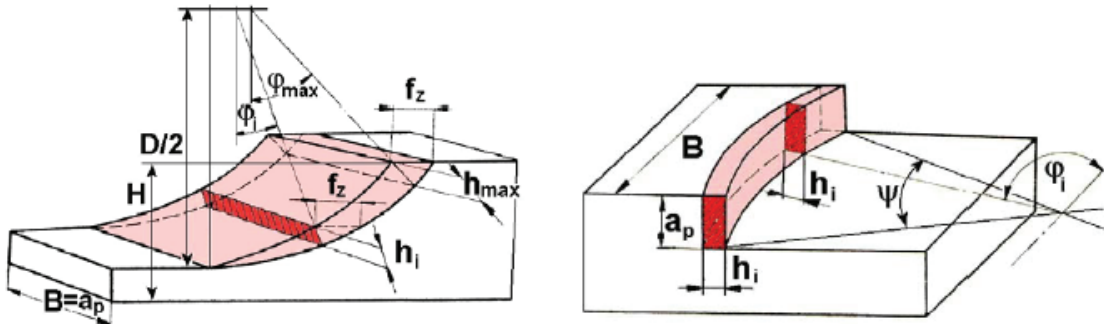
$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{mm}]$$

Úhel posuvového pohybu  $\varphi_i$  se mění nejen v závislosti na poloze řešeného zubu, ale u fréz se šikmými zuby nebo zuby ve šroubovici, i podél příslušného ostří. [2]

Jmenovitý **průřez třísky** pro polohu frézy  $i$  je  $A_{Di}$ .

Vzorec pro výpočet průřezu třísky  $A_{Di}$ :

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{mm}^2]$$



Obr. 1.7 – Průřez třísky při válcovém a čelním frézování [2]

Při čelním frézování platí, že **tloušťka třísky** se mění v závislosti na úhlu posuvového pohybu  $\varphi_i$ . U čelního frézování záleží na vstupu do záběru, výstupu ze záběru, oblouku záběrového břitu trajektorie najetí nástroje do obrobku a poloze obrobku a frézy. Vliv na něj má úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$ . [2]



Vzorec pro výpočet okamžité hloubky řezu  $h_i$ :

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_i \quad [\text{mm}]$$

Jmenovitá **šířka třísky**  $b_i$  je pro libovolné  $\varphi_i$  konstantní.

Vzorec pro výpočet jmenovité šířky třísky  $b_i$ :

$$b_i = \frac{a_p}{\sin \kappa_i} \quad [\text{mm}]$$

Vzorec pro výpočet jmenovitého **průřezu třísky**  $A_{Di}$  pro  $\kappa_r = 90^\circ$ :

$$A_{Di} = b \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{mm}^2]$$

V následující tabulce (viz tab. 1.4) je přehled základních řezných podmínek pro různé typy obrábění.

Tab. 1.4 – Orientační přehled základních řezných podmínek

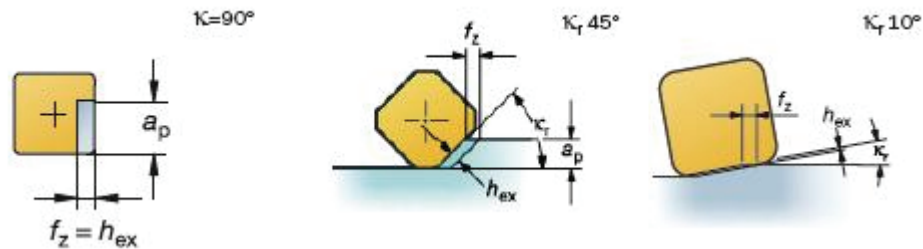
Způsob obrábění	Řezná rychlost	Posuv	Hloubka řezu
Soustružení	10 až 600 m·min <sup>-1</sup>	0,05 až 2 mm	0,03 až 30 mm
Frézování	20 až 570 m·min <sup>-1</sup>	0,05 až 0,4 mm	0,5 až 20 mm i více
Vrtání	10 až 300 m·min <sup>-1</sup>	0,05 až 1,1 mm	-
Vyhrubování	15 až 45 m·min <sup>-1</sup>	-	0,3 až 1 mm
Vystružování	3,5 až 15 m·min <sup>-1</sup>	-	0,1 až 0,3 mm
Broušení	20 až 120 m·s <sup>-1</sup>	8 až 35 m·min <sup>-1</sup>	0,001 až 0,075 mm

**Úhel nastavení hlavního ostří**  $\kappa_r$  je rozhodujícím faktorem ovlivňujícím směr a velikost řezné síly, tloušťku třísky a životnost nástroje. Jde o úhel mezi hlavním ostřím břitové destičky a povrchem obrobku. Nejčastěji používané úhly nastavení jsou 90°, 45°, 10° a takové, které vyplývají z použití kruhových břitových destiček.

- Zmenšení úhlu nastavení  $\kappa_r$ , v případě přímého břitu, znamená snížení tloušťky třísky  $h_{ex}$  při dané rychlosti posuvu  $f_z$ . Vliv takového snížení tloušťky třísky se projeví tak, že se celkový účinek odřezávaného materiálu rozloží na větší délku břitu.

- Menší úhel nastavení zajišťuje plynulejší zahájení řezu, snižuje radiální tlak a chrání ostří.
- Axiální řezné síly, narůstající se snižující se hodnotou úhlu nastavení, způsobují zvýšení tlaku na obrobek.

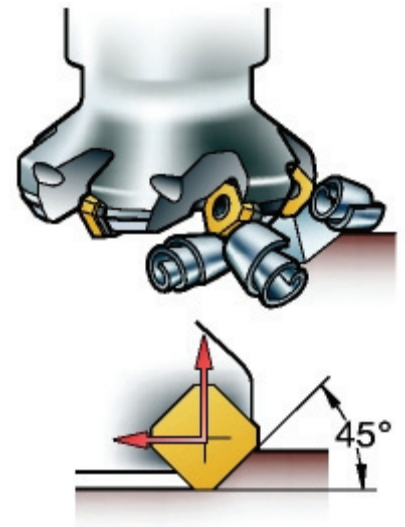
Pro břitové destičky s přímými břity platí, že okamžitá tloušťka třísky  $h_i$ , se pro úhel nastavení  $90^\circ$  rovná  $f_z$ . Jak se úhel nastavení  $\kappa_r$  snižuje,  $f_z$  je možné zvyšovat (viz obr. 1.8). [19]



Obr. 1.8 – Tloušťka třísky a úhel nastavení hlavního ostří [19]

Nejčastěji používaný úhel nastavené hlavního ostří  $45^\circ$  (viz obr. 1.9), který se používá pro čelní frézování, má tyto výhody:

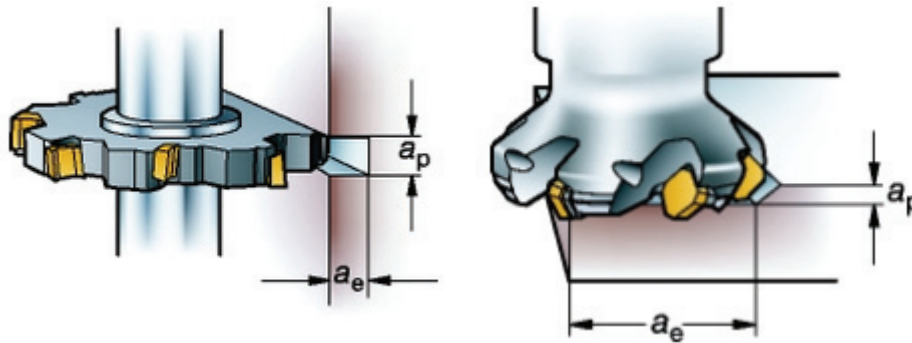
- vyvážené radiální a axiální řezné síly,
- plynulé zahájení řezu,
- malé tendence k vibracím,
- vhodné pro frézování obrobků z materiálů tvořících krátkou třísku
- tvorba tenkých třísek umožňuje zvýšení produktivity, protože dovoluje zvýšení rychlosti posuvu stolu. [19]



Obr. 1.9 – Úhel nastavení hlavního ostří  $45^\circ$  [19]

**Hloubka řezu**  $a_p$  je rozdíl mezi neobrobeným a obrobeným poloměrem díry (viz obr. 1.10). Maximální hodnota  $a_p$  je omezena zejména velikostí břitové destičky a výkonem obráběcího stroje. Důležitým kritickým faktorem je krouticí moment u hrubovacích operací a vibrace u dokončovacích operací. [19]

**Šířka záběru**  $a_e$  je šířka frézy v radiálním směru zapojená do řezu (viz obr. 1.10). Tento ukazatel je kritický zejména při ponorném frézování a z pohledu vibrací také při frézování rohů, potom je kritická zejména maximální hodnota  $a_e$ . tady je také možno rozlišit pojem radiální zanoření  $a_e/D$  - je to poměr šířky záběru vůči průměru frézy. [19]



Obr. 1.10 – Hloubka záběru a šířka řezu [19]

#### 1.4.2. Tvar a utváření třísky

Utváření třísky je způsobeno plastickou deformací. Tento proces generuje teplo v důsledku tření, které vzniká při obrábění. Teplo přispívá ke zvýšení tvárnosti obráběného materiálu, ale má negativní efekt na opotřebení nástroje. Při dosažení bodu zlomu se při obrábění třísky oddělí od materiálu. [20]

Tvar a utváření třísky závisí na různých faktorech:

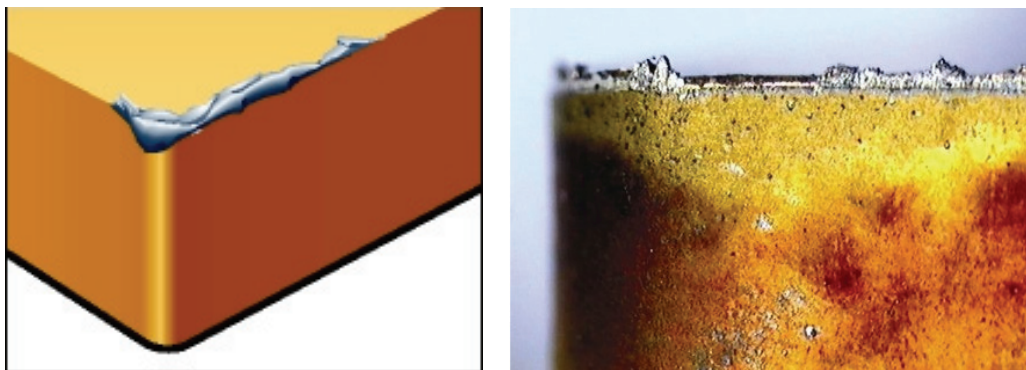
- vlastnosti obráběného materiálu zejména z pohledu jeho obrobitelnosti,
- geometrie nástroje a tvaru břitu (úhel čela  $\gamma$ , lamače, utvařeče třísek),
- materiálu nástroje (řezivost a koeficient tření - bez nebo s povlakem),
- řezné podmínky (rychlost řezání, posuv, množství odebíraného materiálu),
- fyzikálněchemická kompatibilita mezi nástrojem a obrobkem,
- operace obrábění,
- mazání. [1] [20]

Správný tvar a utváření třísky předchází poškození obrobku, nástroje a poranění operátora, předchází prostojům ve výrobě a problémům s odvodem třísek. Obecně by se dalo říci, že nejlepší třísky jsou ty krátké. Na druhou stranu ale je nutno podotknout, že třísky by neměly být příliš krátké, protože pak je snížena i životnost nástroje. Velmi krátké třísky způsobují mikrotrhliny na řezné hraně, a to vede k předčasnému vylomení hrany. Při zvážení těchto dvou faktorů vyplývá, že ideální jsou třísky typu krátké spirály. [27]

Dle tvaru třísky je možno přiřadit i kvalitu povrchu:

- |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| • velmi krátká a lámavá tříška | vynikající kvalita povrchu     |
| • stočená nebo dělená tříška   | dobry až výborný povrch        |
| • plynulá tříška               | dobrá kvalita povrchu          |
| • dlouhá šroubovitá            | vyhovující povrch              |
| • pásové třísky                | zlepšit podmínky obrábění [26] |

Při realizaci řezného procesu za určitých řezných podmínek (v daném intervalu řezné rychlosti - cyklické tvoření) se tvoří na čele nástroje spěchovaná tvrdá vrstva kovu, která ulpívá na břitu ostří, tzv. **nárůstek** (viz obr. 1.11). Nárůstek je silně spěchovaná vrstva obráběného materiálu, která má v důsledku probíhajících pochodů odlišnou strukturu a je charakterizována vysokou pevností a tvrdostí. Nárůstek neroste pouze směrem ven, ale i směrem dovnitř. Při tvorbě nárůstku u hliníku a jeho slitin má třecí napětí na břitu nástroje a dochází tak díky nízké teplotě tavení ke komplikacím s utvářením třísky a jejím následným odvodem. Potom dochází k nalepování na břit anebo na čelo nástroje a tím vzniká nárůstek. [19] [23] [29]



Obr. 1.11 – Opotřebení nástroje - nárůstek [19] [29]

Zabránění nebo omezení tvorby nárůstků:

- použitím jakéhokoliv povlaku na břitové destičce,
- zvýšení řezné rychlosti a/nebo posuvu ke zvýšení teploty v místě řezu,
- použití řezného nástroje s ostřejším břitem a pozitivní řeznou geometrií,
- použití mikro leštění ke zlepšení adheze (zlepšení drsnosti povrchu),
- použít vhodné chlazení, zvýšit koncentraci chlazení. [19] [23] [29]

### 1.4.3. Geometrie

Geometrie řezného nástroje má velký vliv na velikost síly řezání a následné rozložení do jednotlivých složek, na utváření, tvar a odvod třísky, drsnost, přesnost a kvalitu výsledné obrobene plochy, trvanlivost břitu a tím i životnost nástroje a hospodárnost obráběcího procesu. [1]

Chceme-li při využívání nástroje minimalizovat ztráty, je při konstrukci nástroje a jeho ostření nezbytná dokonalá znalost vhodné pracovní geometrie břitu a jaký má vliv na proces obrábění. Nástrojové i geometrické parametry jsou charakterizovány pomocí úhlů, které jsou definovány v příslušných rovinách. Pro jednoznačnou identifikaci úhlů řezné části se definují dvě souřadnicové soustavy:

- nástrojová - v této rovině se definuje geometrie řezné části ve statickém pojetí. Uplatní se zejména při konstrukci, výrobě, kontrole a ostření nástroje. Roviny používané v této rovině se nazývají **nástrojové roviny**.
- pracovní - tato soustava se nazývá také jako efektivní nebo kinetická. Identifikuje se zde geometrie v procesu řezání. Roviny používané v této soustavě se nazývají **pracovní roviny**. [1]

Úhly jsou důležité pro identifikaci geometrické polohy ostří, čela a hřbetu. **Nástrojové úhly** jsou definovány v nástrojové souřadnicové soustavě a mají index totožný s indexem nástrojové roviny, ve které jsou měřeny. [1]

Nástrojové úhly obecně ovlivňují:

- velikost síly řezání a její složky,
- teplotu řezání,
- tvorbu a odvod třísky,
- hospodárnost obrábění,
- strukturu povrchu,
- vlastnosti povrchové vrstvy. [1]

#### **Volba geometrických parametrů břitu**

Při správné volbě geometrie nástroje lze výrazně ovlivnit pevnost břitu, trvanlivost nástroje, stabilitu procesu řezání, tepelné i silové zatížení, spotřebu vynaložené energie a splnit požadavky kladené na přesnost rozměrů i kvalitu obrobene plochy. [1]

Konstrukční uhly slouží k základní orientaci polohy lůžka, do kterého je upnuta břitová destička a má význam především pro konstrukci tělesa frézky. Jde o dva uhly čela, úhel čela v zadní rovině  $\gamma_p$  a úhel čela v boční rovině  $\gamma_f$ . [17]

Pracovní (funkční) uhly jsou následující:

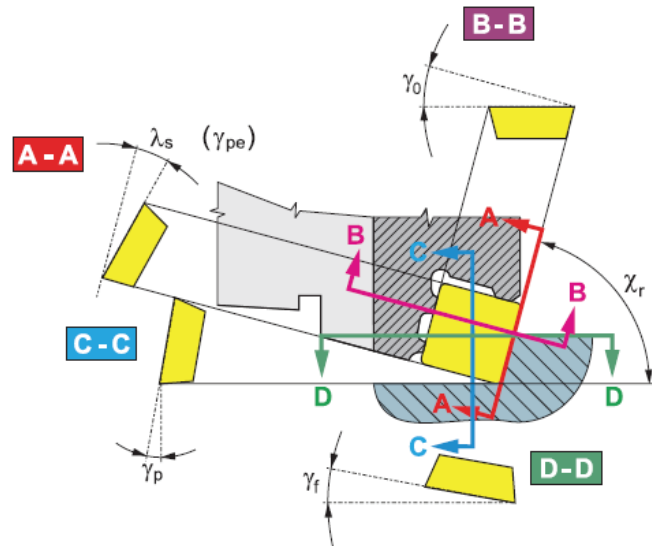
**Úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$** , většinou se pohybuje v rozsahu  $45^\circ - 90^\circ$  a ovlivňuje zejména tvar třísky. Zmenšující se úhel hlavního ostří  $\kappa_r$  při konstantním posuvu  $f_z$  má za následek zmenšení tloušťky třísky  $h$ . Ovlivňuje délku ostří v záběru, závisí na něm poměr složek síly řezání, tedy řezné síly, specifické zatížení, opotřebení a trvanlivost břitu. Vliv hodnoty úhlu se projevuje i v tuhosti špičky nástroje a jejím opotřebením, což má v neposlední řadě vliv na drsnost obrobeného povrchu součásti. [1] [17]

**Úhel čela v ortogonální rovině  $\gamma_o$**  se běžně volí od  $-8^\circ$  do  $+8^\circ$ . Hodnota úhlu se projevuje na utváření třísek, poměry velikosti složek síly řezání i opotřebení nástroje. Současně s úhlem hřbetu působí i na tuhost a pevnost břitu nástroje. Čím větší je úhel  $\gamma_o$ , tím menší jsou řezné síly a tím menší je i potřebný výkon hnacího motoru frézky a naopak. Zmenšující se úhel  $\gamma_o$  má za následek růst řezné síly i řezné teploty. [1] [17]

**Úhel sklonu hlavního ostří  $\lambda_s$**  zpravidla nabývá hodnoty  $-6^\circ$  do  $+6^\circ$ , včetně nulové hodnoty a ovlivňuje především směr odchodu třísky z místa řezu a tuhost špičky nástroje, proto má vliv na odolnost břitu vůči křehkému porušení při obrábění přerušovaným řezem. Spolu s úhlem nastavení  $\kappa_r$  a úhlem čela  $\gamma_o$  určuje místo prvního dotyku břitu s obrobkem při vníkaní břitu. [1] [17]

**Úhel hřbetu v ortogonální rovině  $\alpha_o$**  je obvykle konstrukčně navrhován v rozmezí od  $+8^\circ$  do  $+12^\circ$ . Hodnota úhlu ovlivňuje podmínky tření nástroje o obrobek, poměry velikosti složek síly řezání, vznik tepla zejména třením, tuhost břitu a trvanlivost nástroje. [1]

**Úhel špičky  $\varepsilon_r$**  je zpravidla zvolen v rozsahu od 0,2 mm do 5 mm. Platí zásada, že čím je vyšší poloměr špičky, tím je možno využít vyšší posuvové rychlosti nástroje při zvýšené trvanlivosti nástroje. Poloměr špičky výrazně ovlivňuje strukturu povrchu. [1]



Obr. 1.12 – Nástrojové úhly břítu [17]

Nelze navrhnout ideální geometrii nástroje a každá konstrukce a volba je vždy jistým kompromisem mezi tím co je požadováno na snadné a energeticky výhodné obrábění a tím co je požadováno na dostatečnou tuhost, trvanlivost a výkon nástroje. Lze se jí však významně přiblížit. [1]

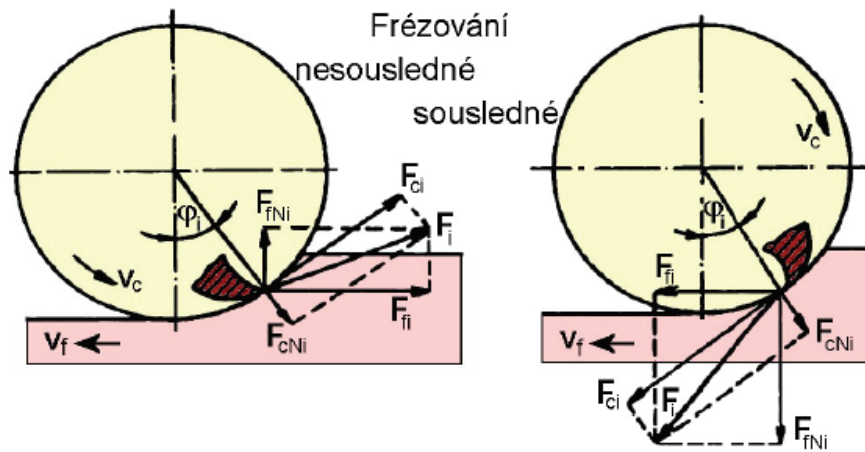
V následující tabulce (viz tab. 1.5) lze vidět výhody a nevýhody různých úhlů čela.

Tab. 1.5 – Porovnání výhod a nevýhod různých velikostí úhlů čela [20]

Úhel čela	Výhody / využití	Nevýhody
Negativní nebo malý (-5° až 5°)	Pevná geometrie, pevná řezná hrana. Dobře funguje v litině a tvrdých ocelích.	Nefunguje v měkkých a tažných materiálech. Velké řezné síly.
Střední (8° – 14°)	Dobrá řezivost. Funguje dobře do většiny materiálů, například v oceli ale i v korozivzdorné oceli.	
Velký (20° – 30°)	Nízká řezná síla. Nejlépe funguje v hliníku a měkkých materiálech.	Ostrý břit se často může vyštípnout.

#### 1.4.4. Řezné síly

Při určování složek síly frézování se vychází ze silového poměru na jednom břítu, který je pod úhlem  $\varphi_i$ . Na obrázku (viz obr. 1.13) je znázorněno válcové frézování nástrojem s přímými zuby. Celková síla řezání působící na břit  $F_i$  se rozkládá na složky  $F_{ci}$  a  $F_{cNi}$ , respektive na složky  $F_{fi}$  a  $F_{fNi}$ .



Obr. 1.13 – Rozklad síly řezání na zubu válčové frézy v pracovní rovině  $P_{fe}$  [1]

$F_i$  - celková síla řezání,  $F_{ci}$  - řezná složka,  $F_{cNi}$  - kolmá řezná složka síly řezání,  
 $F_{fi}$  - posuvová složka síly řezání,  $F_{fNi}$  - kolmá posuvová složka síly řezání

Na řeznou složku síly  $F_{ci}$  má vliv měrná řezná síla  $k_{ci}$  a průřez třísky  $A_{Di}$ :

Vzorec pro výpočet řezné složky síly  $F_{ci}$ :

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{N}]$$

Vzorec pro výpočet měrné řezné síly  $k_{ci}$ :

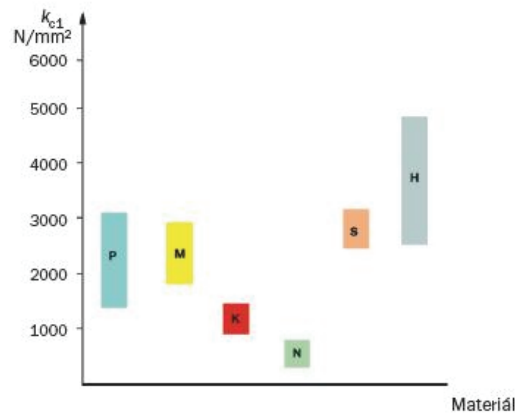
$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi)^{1-x}} \quad [\text{MPa}]$$

Po dosazení z předchozích vztahů:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \quad [\text{N}]$$

Pro výpočet výkonu, krouticího momentu a řezné síly se využívá charakteristika nazývaná měrná řezná síla a označovaná  $k_{ci}$ , Lze ji vyjádřit jako sílu,  $F_c$ , působící ve směru obrábění, potřebnou pro oddělení třísky o průřezu  $1 \text{ mm}^2$ , která má tloušťku  $1 \text{ mm}$ . Hodnota  $k_{ci}$  se liší pro všech šest materiálových skupin, a mění se také v rámci každé skupiny (viz obr. 1.14). [19]





Obr. 1.14 – Závislost měrné řezné síly na druhu materiálu [19]

## 1.5. Frézování

Frézování je proces, kdy je odebírán stanovený přídavek materiálu frézou, která rotuje kolem své osy a zároveň se posouvá do řezu. Hlavní pohyb vykonává nástroj a je rotační a vedlejší pohyb je posuv, který je obvykle přímočarý a vykonáván obrobkem. U moderních strojů jsou posuvy plynule měnitelné a mohou se realizovat ve více směrech zároveň (víceosá obráběcí centra). Fréza je obvykle vícebřítý nástroj, proto řezný proces je přerušovaný, protože každý zub odřezává krátké třísky většinou proměnlivé tloušťky. [2] [20]

Rozlišujeme tři základní druhy frézovacích operací a tím i druhů fréz:

- **válcové** (obvodové) – osa nástroje je rovnoběžná s obráběnou plochou,
- **čelní** – osa nástroje je kolmá na obráběnou plochu,
- frézování **stopkovými frézami** - osa frézy vertikálně kolmá na povrch obrobku

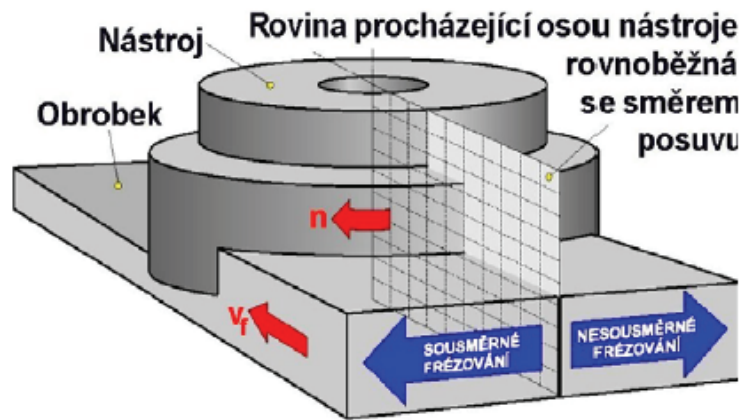
V závislosti na smyslu otáčení nástroje rozlišujeme dva druhy válcového frézování:

- nesousledné
- sousledné

Při čelním frézování (viz obr 1.15) je osa otáčení frézy kolmá na povrch obráběné součásti. Hloubka řezu se nastavuje ve směru osy nástroje. Frézování probíhá na břitech, které jsou na čele a na obvodu frézy. Čelní frézování má výhodu, protože fréza pracuje současně sousledně i nesousledně. [20]

Podle polohy osy otáčení frézy vzhledem k obráběné ploše rozlišujeme:

- symetrické frézování – osa nástroje prochází středem frézované plochy,
- nesymetrické frézování – osa nástroje je mimo střed frézované plochy.



Obr. 1.15 – Čelní frézování [1]

### 1.6. Drsnost povrchu

Drsnost povrchu závisí na tvaru břitu použitého nástroje, na řezných podmínkách, nejvíce na velikosti posuvu a řezné rychlosti, na fyzikálních a mechanických vlastnostech obráběného materiálu, na kvalitě, tvaru a geometrii nástroje. Dále dosažitelná přesnost záleží významně na tuhosti a přesnosti obráběcího stroje. Drsnost povrchu obrobené plochy je zpravidla různá v příčném a v podélném směru. Potom je tedy kvalita povrchu funkčních ploch součástí posuzována podle jejich geometrického tvaru a drsnosti. Při měření kvality povrchu se vyhodnocení obvykle provádí na jediné předepsané referenční délce. [22] [29]

Rámcově lze dosáhnout těchto hodnot přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu (viz tab. 1.6): [22]

Tab. 1.6 – Rámcové hodnoty přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu [20]

Způsob obrábění	Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Přesnost rozměrů IT
Hrubování	> 6,3	$\geq 12$
Obrábění načisto	1,6 - 6,3	9 - 11
Jemné obrábění	0,2 - 1,6	5 - 8
Speciální dokončovací obrábění	< 0,2	< 5

Základní výškové parametry dle normy ČSN EN ISO 4287:

- největší výška výstupku profilu  $R_p$ ,
- největší hloubka prohlubně profilu  $R_v$ ,
- největší výška profilu  $R_z$ ,
- celková výška profilu  $R_t$ ,
- průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu  $R_a$ ,
- průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu  $R_q$ .

#### Největší výška výstupku profilu $R_p$

Výška největšího výstupku profilu  $Z_p$  v rozsahu základní délky  $l_r$  (viz obr. 1.15).

[3]

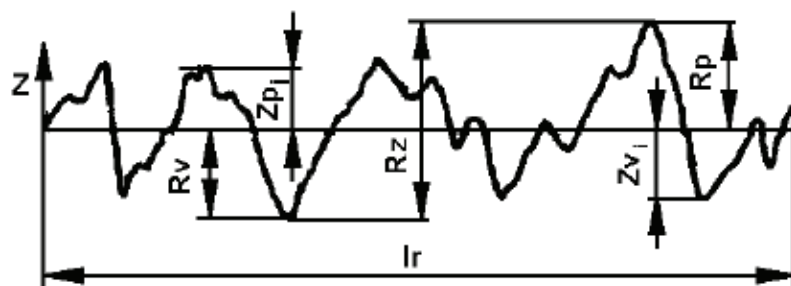
#### Největší hloubka prohlubně profilu $R_v$

Hloubka  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky  $l_r$  (viz obr. 1.15).

[3]

#### Největší výška profilu $R_z$

Součet výšky  $Z_p$  největšího výstupku a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně v rozsahu základních délek  $l_r$ . (viz obr. 1.16). [3]



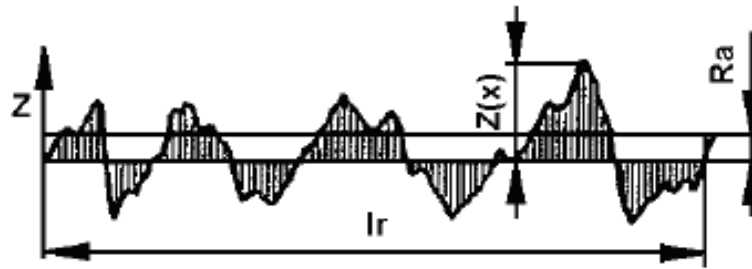
Obr. 1.16 – Parametry  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$  [3]

#### Celková výška profilu $R_t$

Součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky  $l_n$ . [3]

#### Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu $R_a$

Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky  $l_r$ . Vypovídací schopnost parametru  $R_a$  je nízká,  $R_a$  nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu. (viz obr. 1.17). [3]

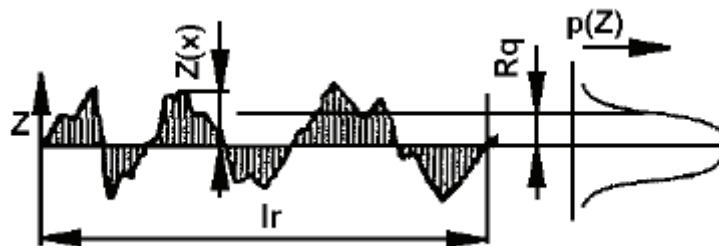


Obr. 1.17 – Parametr  $R_a$  [3]

Struktura povrchu se může jevit velmi odlišně, ale přesto může vykazovat stále stejnou hodnotu  $R_a$  a jinou, rozdílnou hodnotu  $R_z$ .

### Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu $R_q$

Průměrná kvadratická hodnota pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky  $l_r$ . Parametr  $R_q$  má význam při statickém pozorování profilu povrchu, neboť zároveň odpovídá standardní odchylce z profilových souřadnic (viz obr. 1.18). [3]



Obr. 1.18 – Parametr  $R_q$  [3]

## 2. Návrh experimentální části práce

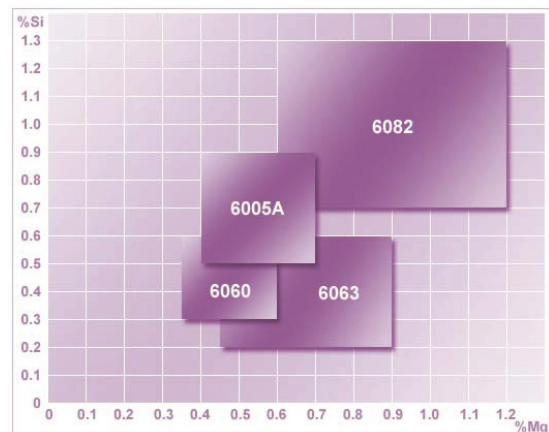
Experimentální část diplomové práce řeší problematiku vyhodnocení vlivu frézovaných hliníkových obrobků na kvalitu obrobeneho povrchu. Experiment byl proveden na univerzálním 3-osém stroji CNC frézovací centrum HURCO VMX 30t s použitím frézovacích nástrojů od firmy ISCAR. Pro experiment byla zvolena testovaná slitina hliníku EN AW-6082 [AlSi1MgMn] ČSN EN 573-1-2.

Experiment se zaměřuje na vyhodnocení řezných sil a drsnosti povrchu ze získaných výsledků. Experiment byl proveden při změnách řezných rychlostí  $v_c$  a posuvů na zub  $f_z$ , avšak šířka záběru frézy  $a_e$  a hloubka záběru  $a_p$  zůstali během experimentu konstantní. Během experimentu byly otáčky přizpůsobeny změnám řezných podmínek.

### 2.1. Použitý obráběný materiál

V experimentální části byl použit materiál o EN AW-6082 [AlSi1MgMn], jedná se o vytvrditelnou hliníkovou slitinu, kde jsou hlavními legujícími prvky hořčík a křemík (viz obr. 2.1).

Tento materiál se používá jako konstrukční a dekorační materiál na středně namáhané konstrukce. Materiál se vyznačuje dobrou tvářitelností (za teplot 450 - 500°C), svařitelností, obrobitelností, lešitelností a odolností proti korozi - neprojevuje se sklon ke koroznímu praskání pod napětím. Je vhodný pro eloxování, má chemickou stálost, dobrou schopnost elektrolytické oxidace a může se zpevňovat buď tvářením za studena, nebo tepelným zpracováním. Má dobré plastické vlastnosti v žíhaném stavu, vyhovující ve vytvrzeném stavu. Obrobitelnost řeznými nástroji je vyhovující ve vytvrzeném stavu, avšak nevyhovující v žíhaném stavu. [30] [31]



Obr. 2.1 – Hlavní legující prvky EN AW 6082 [13]

Materiál má využití pro součásti se střední pevností ( $R_m = 300$  MPa) dlouhodobě pracující při teplotách +50 až -70°C, ve stavebnictví, potravinářství, na letadla, vozidla, pro jemnou mechaniku, pro mlékárenský a jiný potravinářský průmysl, krytiny, rámy dveří, eskalátory, nábytek, nýtované mosty, mostové jeřáby, stožáry atd. [30] [31]

Chemické složení EN AW-6082 dle ČSN EN 573-3:

Tab. 2.1 – Chemické složení slitiny EN AW 6082

Značka prvku	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Další prvky	Celkem ostatních
Obsah v hmotnosti [%]	0,7 - 1,3	Max 0,50	Max 0,10	0,4 - 1,0	0,6 - 1,2	Max 0,25	Max 0,20	Max 0,10	≤0,05	≤0,15

Mechanické vlastnosti EN AW-6082:

Tab. 2.2 – Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6082

Mechanické vlastnosti	$R_p 0,2$ [MPa]	$R_m$ [N·mm <sup>2</sup> ]	$A_5$ [%]	HB	$E$ [MPa]
EN AW-6082	240 – 260	275 – 310	6 – 10	84 – 94	70

Způsoby tepelného zpracování a doporučené parametry: [16]

Tab. 2.3 – Způsoby tepelného zpracování EN AW 6082

Označení slitiny	Slitina	Způsob tepelného zpracování	Doporučené parametry tepelného zpracování
EN AW 6082	AlSi1MgMn(A)	Žihání na měkko Rozpouštěcí žihání Umělé stárnutí	350 °C/4 hod. -> ochlazovat rychlostí max. 100 °C/hod. do 200 °C -> vzduch 510 °C/1 hod. -> voda (20 – 40 °C) 170 °C/6 hod. -> vzduch

## 2.2. Použitý stroj

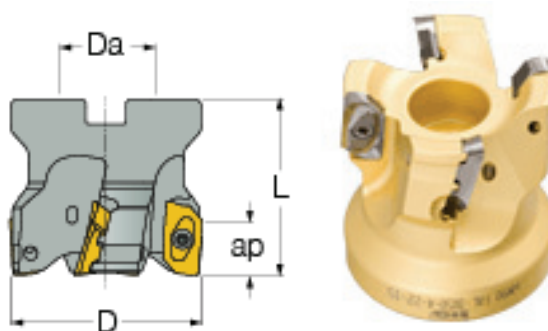
Při experimentu bylo využito univerzální 3 - osé CNC frézovací centrum HURCO VMX 30t. Firma HURCO GmbH, která byla založena roku 1968 je mezinárodní společnost zabývající se výrobou vysoce výkonných obráběcích center. Typ tohoto frézovací centra se používá pro hrubování a další technologické vlastnosti při nižších investičních nákladech. Stroj zvládne obrovský nárůst síly při vysokých výkonech a rychlostech. Centrum je vybaveno řídicím systémem je software WinMax.

Tab. 2.4 – Vybrané technické parametry stroje HURCO VMX 30t [32]

Funkce	Technické parametry
Otáčky	10 - 12 000 min <sup>-1</sup>
Rychloposuv v osách X, Y, Z	35, 35, 30 m·min <sup>-1</sup>
Výkon vřetene	13,5 kW
Rozměry stolu	1020 x 510 mm
Počet nástrojů	40
Pojezdy v osách X, Y, Z	760 x 510 x 610 mm
Maximální zatížení stolu	1360 kg
Hmotnost stroje	5200 kg
Točivý moment	214 Nm
Vzdálenost vřetena - stůl	150 – 760 mm

### 2.3. Použitý nástroj

Jako nástroj pro experiment byla použita fréza se čtyřbřitou frézovací vyměnitelnou destičkou o průměru 50 mm. Výrobce frézy je firma ISCAR a typové označení frézy dle katalogu je HM90 FAL-D050-4-22-15 (viz obr. 2.2). Její technické parametry jsou v tabulce (viz tab. 2.5). [33]



Obr. 2.2 – Fréza HM90 FAL-D050-4-22-15 [33]

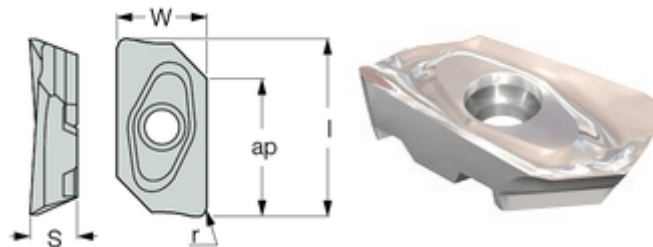
Tab. 2.5 – Parametry frézy [33]

D <sub>1</sub> [mm]	z [počet zubů]	a <sub>p</sub> [mm]	L [mm]	D <sub>a</sub> [mm]
50	36	13,5	40	22

## 2.4. Použité břitové destičky

Pro experiment byly použity vyměnitelné břitové destičky od firmy ISCAR, které mají označení dle katalogu HM90 AXCR 150525R-P (viz obr. 2.3). Tyto superpozitivní destičky jsou určeny pro obrábění hliníku a jsou typovou řadou HELIALU. Tato řada se vyznačuje následujícími vlastnostmi: [34]

- ostrá, broušená řezná hrana snižuje řezný odpor a řez je klidnější,
- leštěné čelo pro bezproblémový odchod třísky,
- pozitivní řezné úhly,
- určené pro hrubování a polodokončovací operace,
- vydrží řezání vysokou rychlostí a odstředivé zatížení. [34]



Obr. 2.3 – Břitová destička HM90 AXCR 150525R-P [34]

Tab. 2.6 – Parametry břitové destičky [34]

W [mm]	S [mm]	$a_p$ [mm]	r [°]	$f_z$ [mm]	$v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]
10	5	6 - 14	2,5	0,10 - 0,20	100 - 600

## 2.5. Použitý přístroj pro měření drsnosti

Povrch ofrézovaných vzorků byl změřen pomocí přístroje pro měření drsnosti povrchu Mitutoyo Surftest SJ – 210. Jedná se o dotykový (hrotový) měřicí přístroj pro měření drsnosti povrchu, který je přenosný s vyjímatelnou posuvovou jednotkou. Výrobce přístroje je firma Mitutoyo Corporation, která je předním celosvětovým výrobcem a dodavatelem v oblasti metrologie. Přístroj umí zobrazit drsnost povrchu pomocí barevného 2,4“ velkého LCD displeje. Naměřené hodnoty lze přenášet do počítače přes rozhraní USB nebo ukládat na kartu Micro SD. V měření je použit snímací dotek, který má profil snímacího hrotu 2  $\mu$ m a měřicí síla 0,75 Nm. [7]





Obr. 2.4 – Měřicí přístroj SurfTest SJ-210 pro měření drsnosti povrchu [7]

Tab. 2.7 – Parametry měřicího přístroje SurfTest SJ-210 [7]

Funkce přístroje	Technické parametry
Rychlost měření	0,25 mm·s <sup>-1</sup> ; 0,5 mm·s <sup>-1</sup> ; 0,75 mm·s <sup>-1</sup>
Návrat měření	1 mm·s <sup>-1</sup>
Provozní teplota	5 °C až 35 °C
Rozsah měření	16 mm
Přítlačná síla	Méně než 400 mN
Měřicí rozsah v ose X (posuv)	17,5 mm
Měřicí rozsah v ose Z (zdvih)	360 μm (-200 μm až +160 μm)
Výstup dat	SB I/F, Výstup Digimatic, Výstup tiskárny, RS-232C I/F. Vstup pro nožní snímač
Použitelné normy	JIS '82 / JIS '94 / ISO '97 / ANSI / VDA

## 2.6. Použitý přístroj pro měření řezných sil

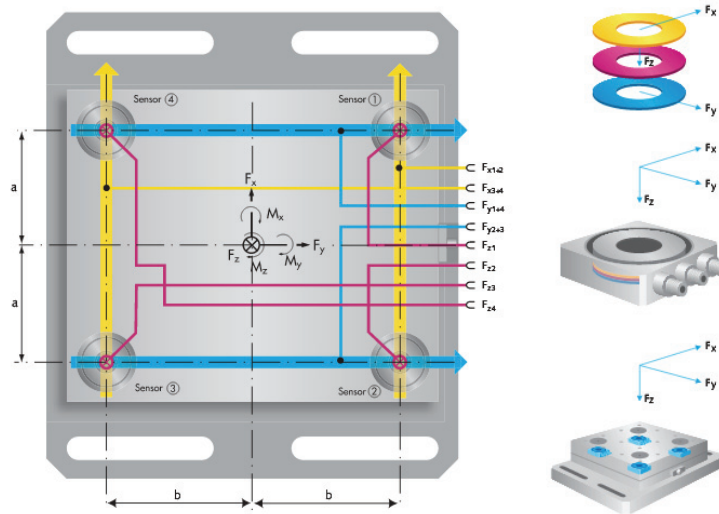
Při frézování byl zkušební materiál upnut na dynamometru Kistler 9255B, který zaznamenává velikost řezných sil v reálném čase. Jedná se o piezoelektrický dynamometr, který využívá piezoelektrického jevu. Při tomto jevu dochází k vytvoření elektrického náboje při působení síly na krystal respektive při deformaci krystalu, jeho mezikrystalové mřížky. Tento náboj generuje napětí, které je vedeno kabelem k zesilovači KISTLER typ 5006 a tento signál je převeden pomocí analogovo - digitálním převodníkem Advantech

PCL 818HG na digitální signál. Tento signál je dále zpracováván v softwaru Dasy Lab verze 3.5.



Obr. 2.5 – Trojsložkový piezoelektrický dynamometr KISTLER typ 9255B [4]

Pomocí tohoto dynamometru byly změřeny velikosti tří složek řezné síly v kartézských souřadnicích X,Y,Z. Dynamometr zaznamenává síly ve směrech  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ , které odpovídají silám  $F_{fn}$ ,  $F_f$  a  $F_p$ . Řezné síly  $F_{fn}$  jsou normálové síly k síle posuvu  $F_f$  a jsou ve shodné se silami  $F_x$ . Řezné síly  $F_f$  působí ve směru posuvu a shodují se s řeznými silami ve směru  $F_y$ . Řezné síly  $F_p$  jsou v záporném směru a shodují se s řeznými silami ve směru  $F_z$ .



Obr. 2.6 – Piezoelektrický dynamometr pro tři osy měření řezných složek [4]

## 2.7. Řezné podmínky

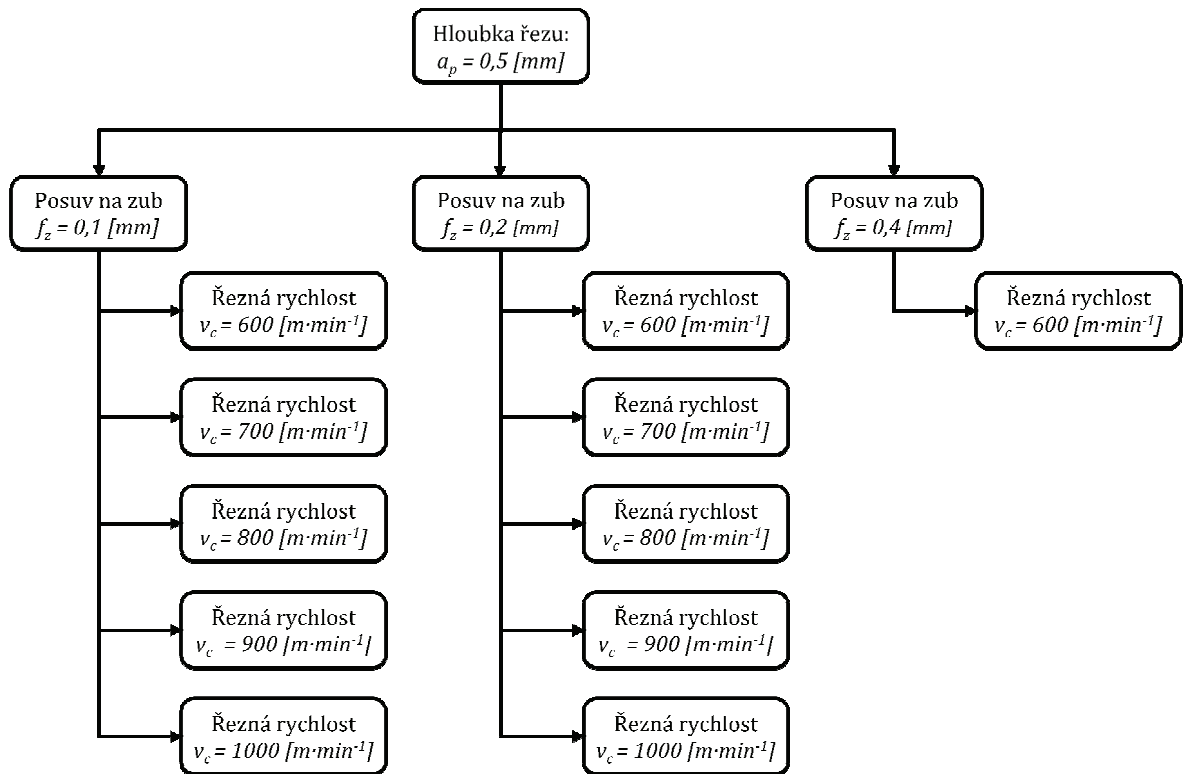
Pro experimentální část práce byly navrženy řezné podmínky pro čelní frézování na stroji HURCO VMX 30t. V průběhu experimentu byly nastaveny konstantní parametry frézování:

- hloubka řezu  $a_p = 10$  [mm]
- průměr frézy  $D_f = 50$  [mm]
- počet zubů  $z = 4$  [počet zubů].

Během experimentu byly různě nastavovány následující parametry:

- řezná rychlost  $v_c$   $[m \cdot min^{-1}]$
- posuv na zub  $f_z$   $[mm]$

Přehled všech kombinací parametrů je ve schématu (viz obr. 2.7). Z těchto parametrů byly pomocí vzorců vypočítány rychlost posuvu  $v_f [m \cdot min^{-1}]$  a otáčky  $n [min^{-1}]$ , pro frézu s průměrem 50 mm a počtem zubů 4. Navržené a vypočítané podmínky jsou uvedeny v tabulce (viz tab. 2.8).



Obr. 2.7 – Schéma použitých řezných podmínek

### Příklad výpočtu pro otáčky

Pro výpočet otáček  $n$  při frézování hliníku známe průměr frézy  $D_1 = 50 \text{ mm}$  a volíme řezná rychlost  $v_c = 600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Vypočteme dle následujících kroků:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{1000} \quad [m \cdot min^{-1}]$$

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_1} \quad [min^{-1}]$$

$$n = \frac{600 \cdot 1000}{\pi \cdot 50}$$

$$n = 3819 \text{ min}^{-1}$$

### Příklad výpočtu pro rychlost posuvu

Pro výpočet rychlosti posuvu  $v_f$ , známe počet zubů frézy  $z = 4$ , vypočtené otáčky  $n = 3819 \text{ min}^{-1}$  (viz výše) a volíme parametr posuv na zub  $f_z = 0,1 \text{ mm}$ .

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$$

$$v_f = 0,1 \cdot 4 \cdot 3819$$

$$v_f = 1527,6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} = 1,527 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

Tab. 2.8 – Přehled řezných podmínek

Obráběný materiál	Řezná rychlost $v_c$ [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	Posuv na zub $f_z$ [mm]	Otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]
EN AW 6082	600	0,1	3820	1528
	700	0,1	4456	1783
	800	0,1	5093	2037
	900	0,1	5730	2292
	1000	0,1	6366	2546
	600	0,2	3820	3056
	700	0,2	4456	3565
	800	0,2	5093	4074
	900	0,2	5730	4584
	1000	0,2	6366	5093
	600	0,4	3820	6112

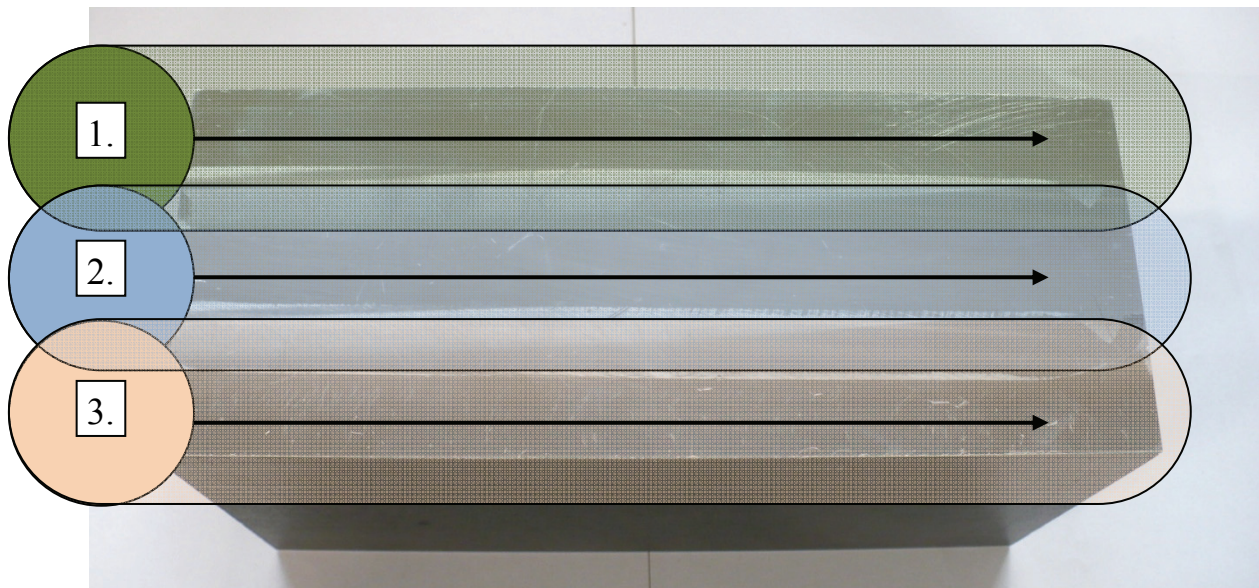
### 3. Realizace experimentu

Experiment byl zaměřen na následné vyhodnocení dat z naměřených drsností povrchu vzorků a řezných sil při změně řezné rychlosti  $v_c$  a posuvu  $f_z$ .

Experiment byl proveden ve spolupráci Katedrou obrábění a výrobní techniky Strojírenské fakulty na Žilinské univerzitě v Žilině. Materiál pro experiment byl použit hliník EN AW 6082 a před testováním drsnosti povrchu a měřením řezných sil byl opracován pomocí čelního frézování na stroji HURCO VMX 30 s frézou HM90 FAL-D050-4-22-15 a vyměnitelnými břitovými destičkami HM90 AXCR 150525R-P od firmy ISCAR. Pro měření složek řezných sil při frézování byl použit přístroj dynamometr KISTLER 9255B a zesilovač náboje KISTLER typ 5006.

Drsnost povrchu hliníkové slitiny byla měřena v laboratoři na katedře 346 - obrábění, montáže a strojírenské metrologie VŠB – TUO. Pro měření drsnosti byl použit drsnoměr SurfTest SJ - 210, který byl upnut ve stojánku.

Velikost frézované plochy na vzorcích byla 200x80 mm. Pro tento experiment byla zvolena strategie frézování se třemi nájezdy frézy do materiálu se šířkou záběru a překrytím 70%.



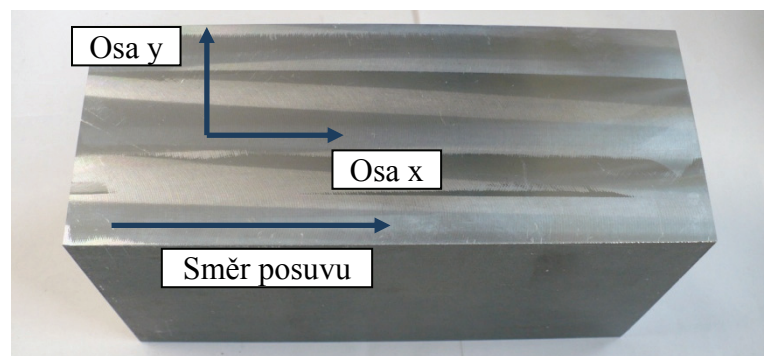
Obr. 3.1 – Strategie frézování

## 4. Zpracování naměřených dat

Ke zpracování a vyhodnocení výsledků drsnosti povrchu a řezných sil byl použit software Microsoft Excel sady Microsoft Office, který sloužil k vyhodnocení naměřených dat, archivaci a vytvoření grafů.

### 4.1. Stanovení vyhodnocení drsnosti povrchu

Povrch vzorků byl měřen ve směru podélném 10 krát a ve směru příčném také 10 krát. Směr podélný je označen jako osa x a je stejný jako směr posuvu při frézování a směr příčný je označen jako osa y a je to směr kolmý na směr posuvu (viz obr. 4.1)



Obr. 4.1 – Osy pro měření drsnosti povrchu

#### 4.1.1. Označení vzorků pro měření drsnosti

Označení vzorků vychází z konstantních a proměnných parametrů měření. Konstantní parametry jsou zvolený materiál EN AW-6082 [AlSi1MgMn] a počet zubů frézy a navržené proměnné parametry řezná rychlost  $v_c$ , posuv na zub  $f_z$ , směr měření (X, Y) a pořadové číslo měření. Příklad označení vzorku:

#### **6082-4-600-0,1-X1**

6082	druh materiálu,
4	počet břitů frézy,
600	řezná rychlost $v_c$ [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ],
0,1	posuv na zub $f_z$ [mm],
X	měření v ose X respektive v ose Y,
1	pořadové číslo měření.

### Příklad zaznamenání drsností a jejich následné počítání.

Jako příklad jsou uvedeny hodnoty drsnosti povrchu pro vzorek 6082-4-600-0,1-X (viz tab. 4.1). Byla použita řezná rychlost  $v_c = 600 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ , posuv na zub  $f_z = 0,1 \text{ [mm]}$ . Rychlost posuvu a otáčky byly vypočteny v předchozí kapitole 2.7 a přehled v tabulce 2.8.

Tab. 4.1 – Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro vzorky 6082-4-600-0,1- $X_i$

Číslo měření: $i$	Označení měření $x_i$	Měřené parametry drsnosti povrchu	
		$Ra \text{ [}\mu\text{m]}$	$Rz \text{ [}\mu\text{m]}$
1	6082-4-600-0,1-X1	0,386	2,309
2	6082-4-600-0,1-X2	0,362	1,975
3	6082-4-600-0,1-X3	0,317	1,895
4	6082-4-600-0,1-X4	0,397	2,972
5	6082-4-600-0,1-X5	0,400	2,125
6	6082-4-600-0,1-X6	0,382	2,542
7	6082-4-600-0,1-X7	0,374	2,074
8	6082-4-600-0,1-X8	0,315	1,755
9	6082-4-600-0,1-X9	0,426	2,463
10	6082-4-600-0,1-X10	0,371	2,106
Aritmetický průměr $\bar{x}$		<b>0,373</b>	<b>2,222</b>
Směrodatná odchylka výběrová $s(x)$		<b>0,035</b>	<b>0,359</b>

#### 4.1.2. Hrubé chyby měření

Naměřené hodnoty byly zkontrolovány na možný výskyt hrubých chyb. Tyto hrubé chyby mohli vzniknout při nesprávně provedeném měření, nesprávným odečet údajů, nesprávným způsobem zpracování, vadou přístroje, nesprávnou manipulací s měřidlem apod. Pokud je výsledek měření ovlivněn hrubou chybou, je takovýto výsledek nepoužitelný a hodnoty zatížené hrubou chybou se ze souboru naměřených hodnot vylučují. [3]

Postup zjištění hrubé chyby [3]:

1. Ze souboru naměřených hodnot  $x_1 < x_2 \dots < x_n$  se vypočítá jejich **průměrná hodnota**:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$x_i$  naměřené hodnoty veličiny;

$n$  počet měření.

Příklad výpočtu aritmetického průměru dle tab. 4.1 pro  $R_a$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{3,73}{10} = 0,373 [\mu m]$$

**Výběrová směrodatná odchylka  $s(x)$ :**

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$x_i$  naměřené hodnoty veličiny;

$\bar{x}$  průměrná hodnota;

$n$  počet měření.

Příklad výpočtu směrodatné odchylky dle tab. 4.1 pro  $R_a$ :

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0,01099}{10 - 1}} = 0,035$$

2. Pro posouzení odlehlosti podezřelých hodnot souboru ( $x_2, x_n$ ) se vypočítají normované hodnoty  $H_2, H_n$  :

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} \quad \text{případně} \quad H_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)}$$

$x_i$  naměřené hodnoty veličiny;

$\bar{x}$  průměrná hodnota;

$s(x)$  výběrová směrodatná odchylka.



3. Z tabulek se určí mezní hodnota  $H$  pro předem stanovenou pravděpodobnost  $p$  a počet měření v souboru  $n$ . Mezní hodnota  $H$  pro pravděpodobnost  $p=95\%$  a pro počet měření  $n = 10$  je  $H = 2,18$ .

Pokud  $H_2 < H$  a zároveň  $H_n < H$  potom hodnoty  $x_2$  nejsou zatíženy hrubou chybou a ponechávají se v souboru hodnot. Pokud jsou větší jak  $H$  potom se ze souboru vyloučí.

$$H_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)} = \frac{0,426 - 0,373}{0,035} = 1,52$$

Hodnota  $H_n < 2,18$ , tak hodnota  $x_n$  není zatížena hrubou chybou a zůstává v souboru hodnot pro další vyhodnocení.

#### 4.1.3. Nejistota měření

Nejistota měření je parametr, který charakterizuje rozsah hodnot kolem výsledku měření, které můžeme přiřadit k naměřené veličině. Každé měření charakterizuje standardní nejistota typu A ( $u_A$ ), standardní nejistota typu B ( $u_B$ ) a kombinovaná standardní nejistota ( $u_C$ ). [3]

##### Standardní nejistota typu A $u_A$ .

Je získaná z opakovaných měření a s počtem měření klesá. Zjistí se pomocí výpočtu směrodatné odchylky  $s(\bar{x})$ , neboť se váže na výběrový průměr. [3].

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}}$$

$x_i$  naměřené hodnoty veličiny;

$\bar{x}$  průměrná hodnota;

$n$  počet měření.

Příklad výpočtu nejistoty  $u_A$ :

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} = \sqrt{\frac{0,01099}{10 \cdot (10 - 1)}} = 0,011 [\mu m]$$

### Standardní nejistota typu B $u_B$ .

Je to hodnota, která není závislá na počtu měření a je vázaná na výběrový průměr, ale nikoliv výpočtem směrodatné odchylky. Ovlivňuje ji především prostředí měření (teplota, vlhkost, vibrace), měřený materiál, obsluha měřicího zařízení, stav a přesnost měřicího zařízení atd. [3]

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2}$$

$u_{B1}$  nejistota vlivu opěrné paty snímacího hrotu;

$u_{B2}$  nejistota měřicího přístroje.

Hodnota nejistoty vlivu  $u_{B1}$  byla stanovena vztahem:

$$u_{B1} = \frac{Z_{1max}}{k}$$

$Z_{1max}$  nejistota vlivu opěrné patky, hodnota stanovena na  $\pm 3\%$  z naměřené hodnoty pro daný měřicí přístroj;

$k$  součinitel vycházející ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistoty řídí, pro rovnoměrné rozdělení je  $k = \sqrt{3}$ .

Hodnota nejistoty měřicího přístroje  $u_{B2}$  byla stanovena na úrovni  $\pm 3\%$  z naměřené hodnoty pro daný měřicí přístroj.

Příklad výpočtu nejistoty  $u_B$ :

$$u_{B1} = \frac{\bar{x} \cdot 0,03}{k} = \frac{0,373 \cdot 0,03}{\sqrt{3}} = 0,00646 [\mu m]$$

$$u_{B2} = \bar{x} \cdot 0,03 = 0,373 \cdot 0,03 = 0,01119 [\mu m]$$

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} = \sqrt{0,00646^2 + 0,01119^2} = 0,01292 [\mu m]$$

**Kombinovaná standardní nejistota  $u_c$**  dána vztahem:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Příklad výpočtu nejistoty  $u_c$ :

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,011^2 + 0,0129^2} = 0,017 [\mu m]$$

**Rozšířená kombinovaná nejistota  $U_C$  je dána vztahem:**

$$U_C = k_U \cdot u_c$$

$k_U$  koeficient rozšíření nebo pokrytí

Koeficient byl stanoven na  $k_U=2$  pro úroveň spolehlivosti 95%.

$$U_C = k_U \cdot u_c = 2 \cdot 0,017 = 0,034 \text{ } [\mu\text{m}]$$

#### 4.2. Vyhodnocení drsnosti povrchu

Během experimentu byla měřena drsnost povrchu a odečítány parametry  $Ra$  a  $Rz$  v podélném směru (osa x), který je totožný se směrem posuvu a v příčném směru (osa y), který je kolmý na směr posuvu. Měření bylo v každém směru provedeno 10 krát. Měřený parametr drsnosti  $Ra$  je průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu a parametr  $Rz$  je největší výška profilu. Všechny hodnoty byly vyšetřeny na hrubé chyby měření a byla vypočtena nejistota měření. Poté byly vypočteny průměry jednotlivých sad vzorků (viz tab. 4.2) a následně jsou výsledky prezentovány v tabulkách a grafech.

Tab. 4.2 – Průměrné hodnoty drsností povrchu vzhledem k různým podmínkám.

Řezná rychlost $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Posuv na zub $f_z$ [mm]	Otáčky $n$ [min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Aritmetický průměr hodnot měřených drsností povrchu			
				Podélná osa x		Příčná osa y	
				Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
600	0,1	3820	1,53	0,37	2,22	0,29	1,83
700	0,1	4456	1,78	0,39	2,39	0,22	1,32
800	0,1	5093	2,04	0,36	2,10	0,23	1,51
900	0,1	5730	2,29	0,34	2,02	0,31	1,85
1000	0,1	6366	2,55	0,36	2,15	0,26	1,46
600	0,2	3820	3,06	0,45	2,48	0,25	1,47
700	0,2	4456	3,57	0,48	2,66	0,26	1,48
800	0,2	5093	4,07	0,45	2,50	0,26	1,60
900	0,2	5730	4,58	0,44	2,36	0,25	1,47
1000	0,2	6366	5,09	0,44	2,47	0,22	1,43
600	0,4	3820	6,11	0,74	3,93	0,27	1,47

#### 4.2.1. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro $v_c = 600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Vyhodnocení a vynesení do grafu parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  v závislosti na řezných podmínkách při konstantní řezné rychlosti  $v_c=600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  naměřených v podélné ose x a příčné ose y.

Tab. 4.3 – Průměrné hodnoty parametrů drsnosti při řezných podmínkách: konstantní řezné rychlosti  $v_c=600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a posuv na zub  $f_z = 0,1 \div 0,4 \text{ mm}$

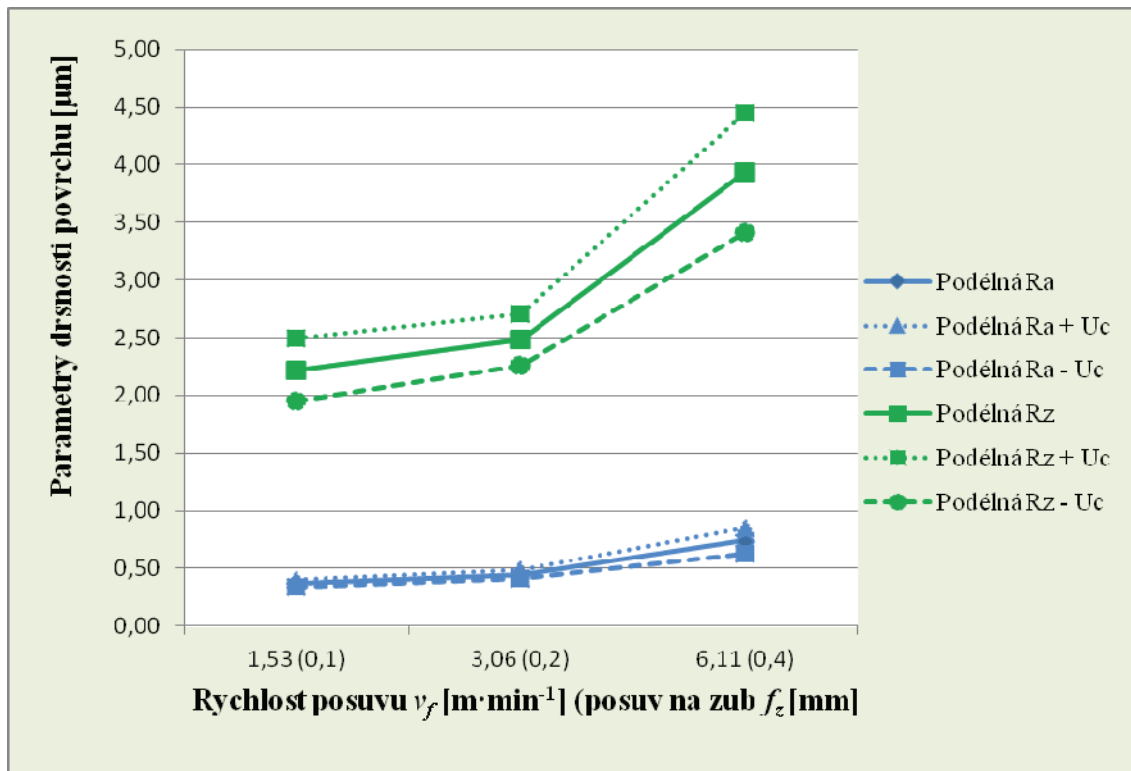
Označení vzorku	Posuv na zub $f_z$ [mm]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	Průměrné hodnoty drsností povrchu			
			Podélná osa x		Příčná osa y	
			Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]
6082-4-600-0,1	0,1	1,53	0,37	2,22	0,29	1,83
6082-4-600-0,2	0,2	3,06	0,45	2,48	0,25	1,47
6082-4-600-0,4	0,4	6,11	0,74	3,93	0,27	1,47

#### 4.2.2. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu s rozšířenou kombinovanou nejistotou $U_c$ pro $v_c = 600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Vyhodnocení a vynesení do grafu parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  s rozšířenými kombinovanými nejistotami  $U_c$  v závislosti na řezných podmínkách při konstantní řezné rychlosti  $v_c=600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  naměřených v podélné ose x.

Tab. 4.4 – Průměrné hodnoty parametrů drsnosti s rozšířenou kombinovanou nejistotou při řezných podmínkách ve směru měření osy x: konstantní řezné rychlosti  $v_c=600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a posuvu na zub  $f_z = 0,1 \div 0,4 \text{ mm}$

Označení vzorku	Posuv na zub $f_z$ [mm]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	Průměrné hodnoty drsností povrchu					
			Podélná osa x					
			Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Ra + $U_c$ [ $\mu\text{m}$ ]	Ra - $U_c$ [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rz + $U_c$ [ $\mu\text{m}$ ]	Rz - $U_c$ [ $\mu\text{m}$ ]
6082-4-600-0,1	0,1	1,53	0,37	0,41	0,34	2,22	2,50	1,95
6082-4-600-0,2	0,2	3,06	0,45	0,48	0,41	2,48	2,71	2,26
6082-4-600-0,4	0,4	6,11	0,74	0,85	0,63	3,93	4,45	3,42

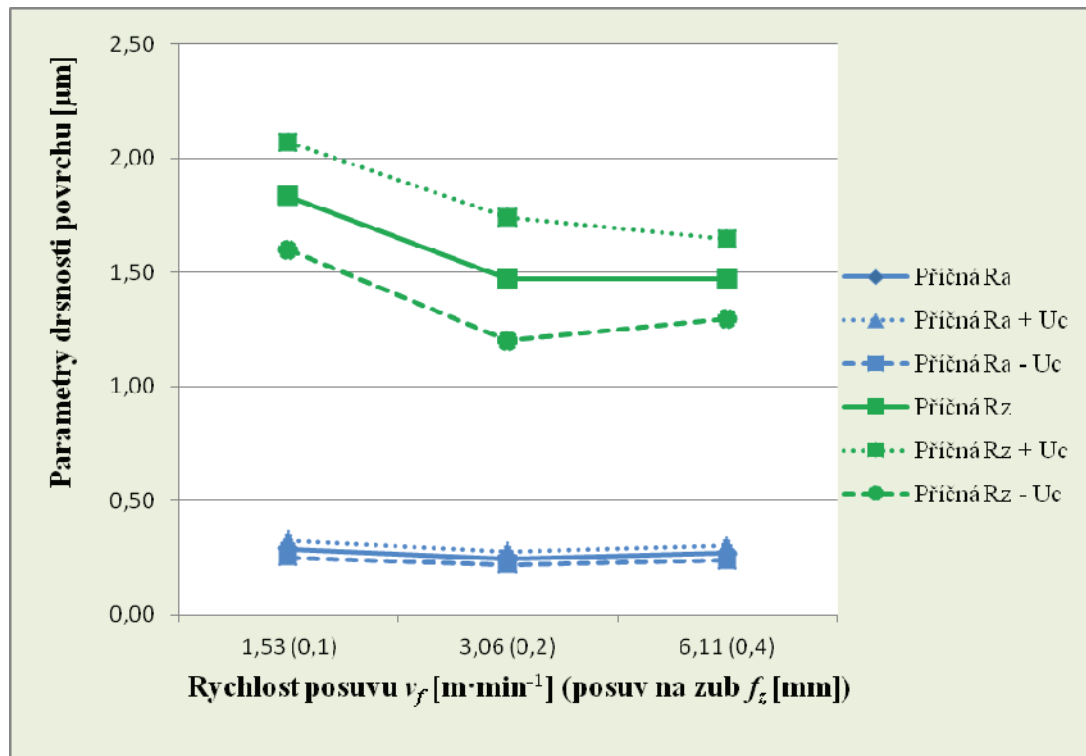


Graf 4.1 – Průměrné hodnoty drsností povrchu s rozšířenou kombinovanou nejistotou v závislosti na rychlosti posuvu  $v_f$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] a posuvu na zub  $f_z$  [mm] ve směru měření osy x při konstantní řezné rychlosti  $v_c=600 m \cdot min^{-1}$

Vyhodnocení a vynesení do grafu parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  s rozšířenými kombinovanými nejistotami  $Uc$  v závislosti na řezných podmínkách při konstantní řezné rychlosti  $v_c=600 m \cdot min^{-1}$  naměřených v podélné ose y.

Tab. 4.5 – Průměrné hodnoty parametrů drsnosti s rozšířenou kombinovanou nejistotou při řezných podmínkách ve směru měření osy y: konstantní řezné rychlosti  $v_c=600 m \cdot min^{-1}$  a posuvu na zub  $f_z = 0,1 \div 0,4 mm$

Označení vzorku	Posuv na zub $f_z$ [mm]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Hodnoty měřených drsností povrchu					
			Příčná osa y					
			Ra [ $\mu m$ ]	Ra + Uc [ $\mu m$ ]	Ra - Uc [ $\mu m$ ]	Rz [ $\mu m$ ]	Rz + Uc [ $\mu m$ ]	Rz - Uc [ $\mu m$ ]
6082-4-600-0,1	0,1	1,53	0,29	0,32	0,25	1,83	2,07	1,60
6082-4-600-0,2	0,2	3,06	0,25	0,28	0,22	1,47	1,74	1,20
6082-4-600-0,4	0,4	6,11	0,27	0,30	0,24	1,47	1,65	1,30



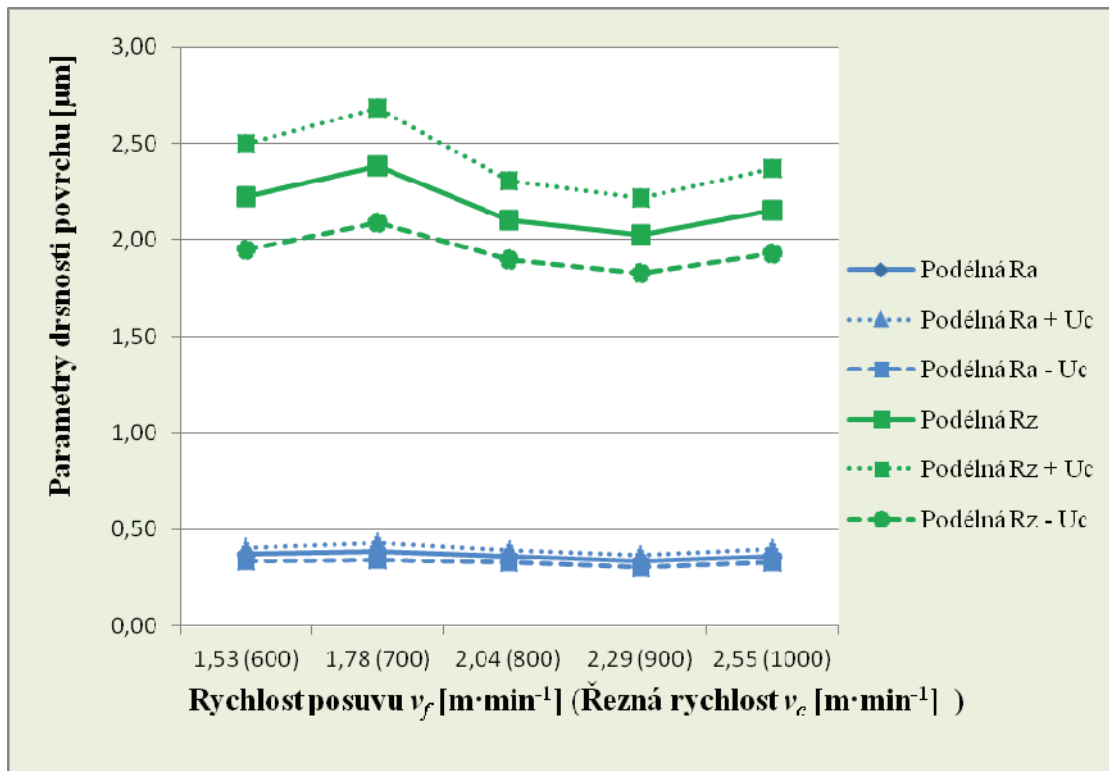
Graf 4.2 – Průměrné hodnoty drsnosti povrchu s rozšířenou kombinovanou nejistotou v závislosti na rychlosti posuvu  $v_f$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] a posuvu na zub  $f_z$  [mm] ve směru měření osy y při konstantní řezné rychlosti  $v_c = 600 m \cdot min^{-1}$

#### 4.2.3. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu s rozšířenou kombinovanou nejistotou $U_c$ pro $f_z = 0,1$ mm

Vyhodnocení a vynesení do grafu parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  s rozšířenými kombinovanými nejistotami  $U_c$  v závislosti na řezných podmínkách při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,1$  mm naměřených v podélné ose x.

Tab. 4.6 – Průměrné hodnoty parametrů drsnosti s rozšířenou kombinovanou nejistotou při řezných podmínkách ve směru měření osy x: konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,1$  mm a řezné rychlosti  $v_c = 600 \div 1000 m \cdot min^{-1}$

Označení vzorku	Řezná rychlost $v_c$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Hodnoty měřených drsností povrchu					
			Podélná osa x					
			Ra [ $\mu m$ ]	Ra + $U_c$ [ $\mu m$ ]	Ra - $U_c$ [ $\mu m$ ]	Rz [ $\mu m$ ]	Rz + $U_c$ [ $\mu m$ ]	Rz - $U_c$ [ $\mu m$ ]
6082-4-600-0,1	600	1,53	0,37	0,41	0,34	2,22	2,50	1,95
6082-4-700-0,1	700	1,78	0,39	0,43	0,35	2,39	2,68	2,09
6082-4-800-0,1	800	2,04	0,36	0,39	0,33	2,10	2,31	1,90
6082-4-900-0,1	900	2,29	0,34	0,37	0,31	2,02	2,22	1,83
6082-4-1000-0,1	1000	2,55	0,36	0,40	0,33	2,15	2,37	1,93

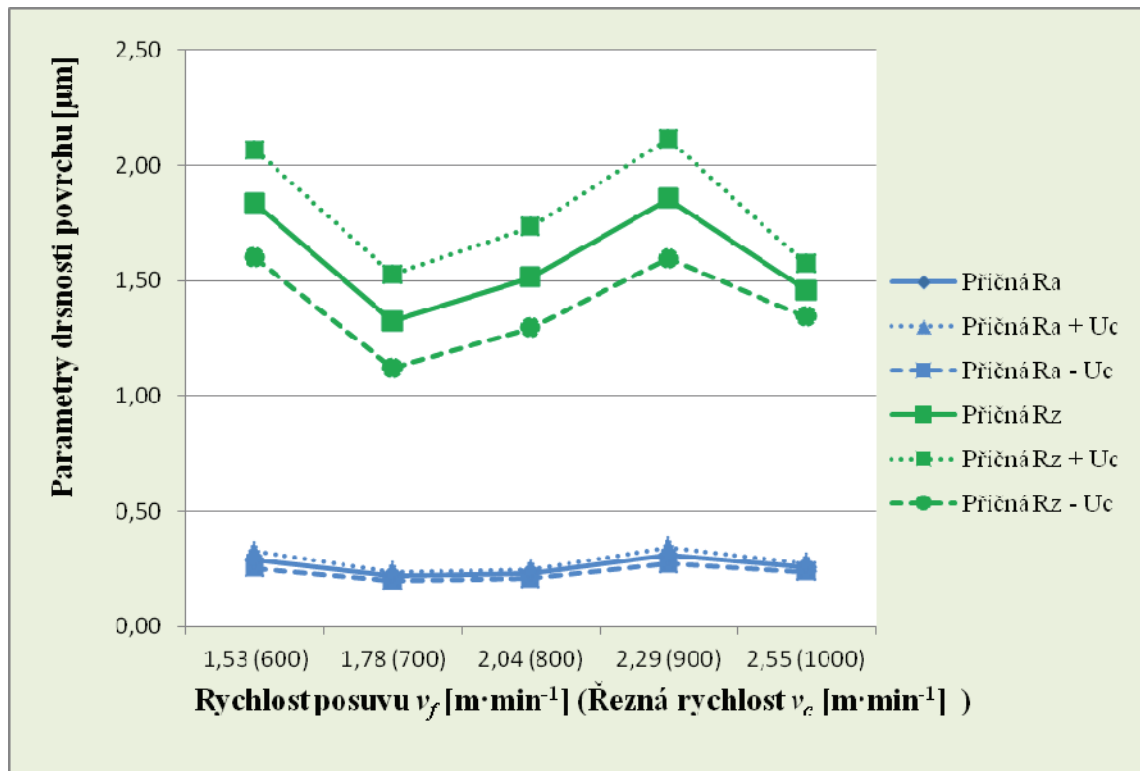


Graf 4.3 – Průměrné hodnoty drsností povrchu s rozšířenou kombinovanou nejistotou v závislosti na rychlosti posuvu  $v_f$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] a řezných rychlostí  $v_c$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] ve směru měření osy  $x$  při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,1$  mm

Vyhodnocení a vynesení do grafu parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  s rozšířenými kombinovanými nejistotami  $U_c$  v závislosti na řezných podmínkách při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,1$  mm naměřených v podélné ose  $y$ .

Tab. 4.7 – Průměrné hodnoty parametrů drsnosti s rozšířenou kombinovanou nejistotou při řezných podmínkách ve směru měření osy  $y$ : konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,1$  mm a řezných rychlostí  $v_c = 600 \div 1000$   $m \cdot min^{-1}$

Označení vzorku	Řezná rychlost $v_c$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Hodnoty měřených drsností povrchu					
			Podélná osa $y$					
			Ra [ $\mu m$ ]	Ra + $U_c$ [ $\mu m$ ]	Ra - $U_c$ [ $\mu m$ ]	Rz [ $\mu m$ ]	Rz + $U_c$ [ $\mu m$ ]	Rz - $U_c$ [ $\mu m$ ]
6082-4-600-0,1	600	1,53	0,29	0,32	0,25	1,83	2,07	1,60
6082-4-700-0,1	700	1,78	0,22	0,24	0,20	1,32	1,53	1,12
6082-4-800-0,1	800	2,04	0,23	0,25	0,21	1,51	1,73	1,29
6082-4-900-0,1	900	2,29	0,31	0,35	0,27	1,85	2,11	1,60
6082-4-1000-0,1	1000	2,55	0,26	0,27	0,24	1,46	1,57	1,34



Graf 4.4 – Průměrné hodnoty drsností povrchu s rozšířenou kombinovanou nejistotou v závislosti na rychlosti posuvu  $v_f$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] a řezné rychlosti  $v_c$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] ve směru měření osy y při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,1$  mm

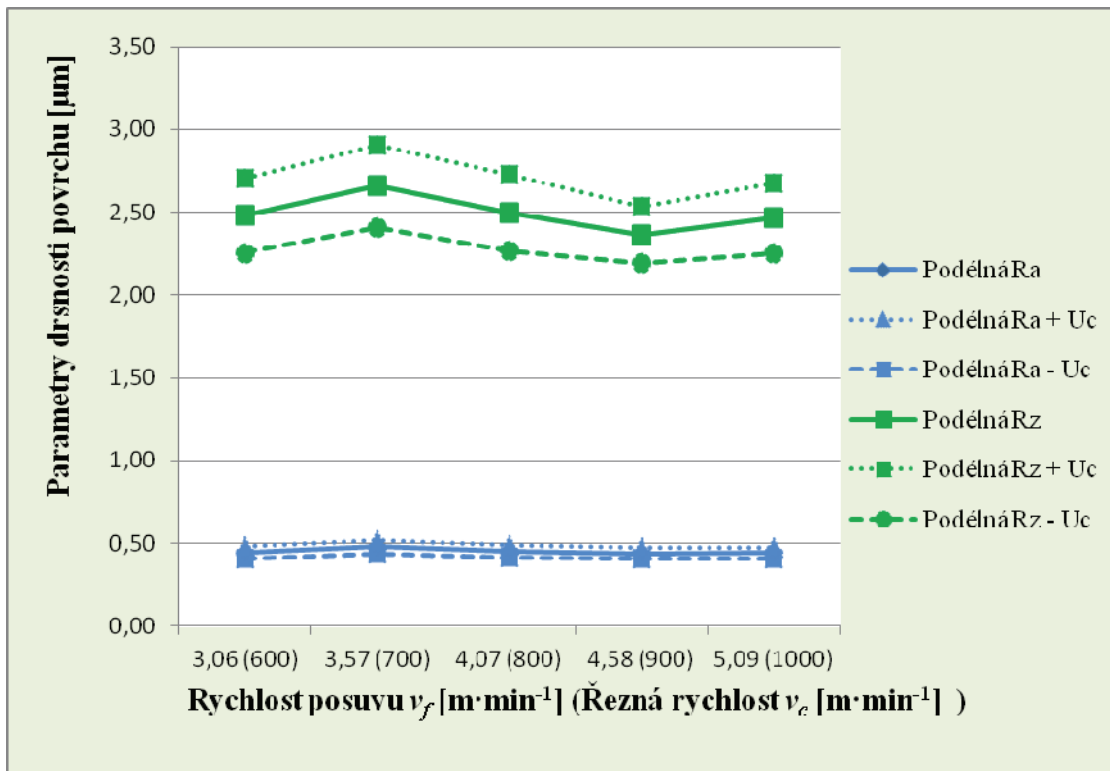
#### 4.2.4. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu s rozšířenou kombinovanou nejistotou $U_c$ pro $f_z = 0,2$ mm

Vyhodnocení a vynesení do grafu parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  s rozšířenými kombinovanými nejistotami  $U_c$  v závislosti na řezných podmínkách při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,2$  mm naměřených v podélné ose x.

Tab. 4.8 – Průměrné hodnoty parametrů drsnosti s rozšířenou kombinovanou nejistotou při řezných podmínkách ve směru měření osy x: konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,2$  mm a řezné rychlosti  $v_c = 600 \div 1000$   $m \cdot min^{-1}$

Označení vzorku	Řezná rychlost $v_c$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Hodnoty měřených drsností povrchu					
			Podélná osa x					
			Ra [ $\mu m$ ]	Ra + Uc [ $\mu m$ ]	Ra - Uc [ $\mu m$ ]	Rz [ $\mu m$ ]	Rz + Uc [ $\mu m$ ]	Rz - Uc [ $\mu m$ ]
6082-4-600-0,2	600	3,06	0,45	0,48	0,41	2,48	2,71	2,26
6082-4-700-0,2	700	3,57	0,48	0,52	0,44	2,66	2,91	2,41
6082-4-800-0,2	800	4,07	0,45	0,49	0,42	2,50	2,73	2,26
6082-4-900-0,2	900	4,58	0,44	0,47	0,41	2,36	2,54	2,19
6082-4-1000-0,2	1000	5,09	0,44	0,47	0,41	2,47	2,68	2,25



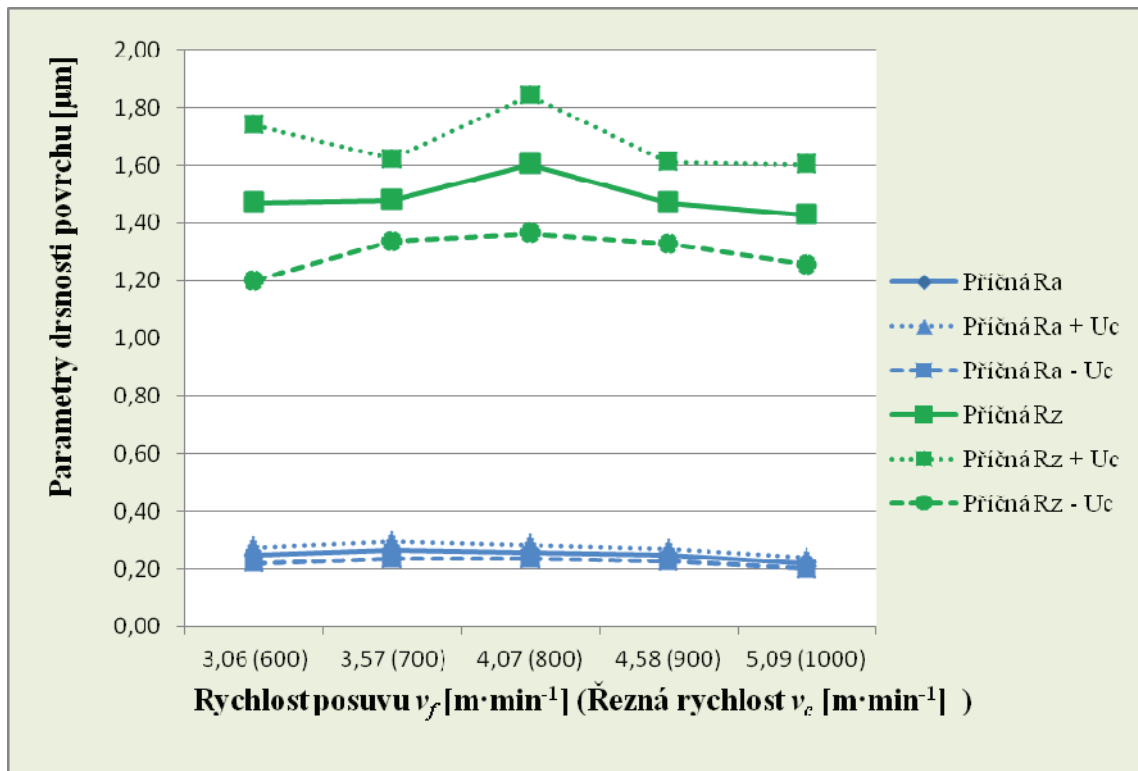


Graf 4.5 – Průměrné hodnoty drsností povrchu s rozšířenou kombinovanou nejistotou v závislosti na rychlosti posuvu  $v_f$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] a řezné rychlosti  $v_c$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] ve směru měření osy  $x$  při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,2$  mm

Vyhodnocení a vynesení do grafu parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  s rozšířenými kombinovanými nejistotami  $Uc$  v závislosti na řezných podmínkách při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,2$  mm naměřených v podélné ose  $y$ .

Tab. 4.9 – Průměrné hodnoty parametrů drsnosti s rozšířenou kombinovanou nejistotou při řezných podmínkách ve směru měření osy  $y$ : konstantní posuv na zub  $f_z = 0,2$  mm a řezné rychlosti  $v_c = 600 \div 1000$   $m \cdot min^{-1}$

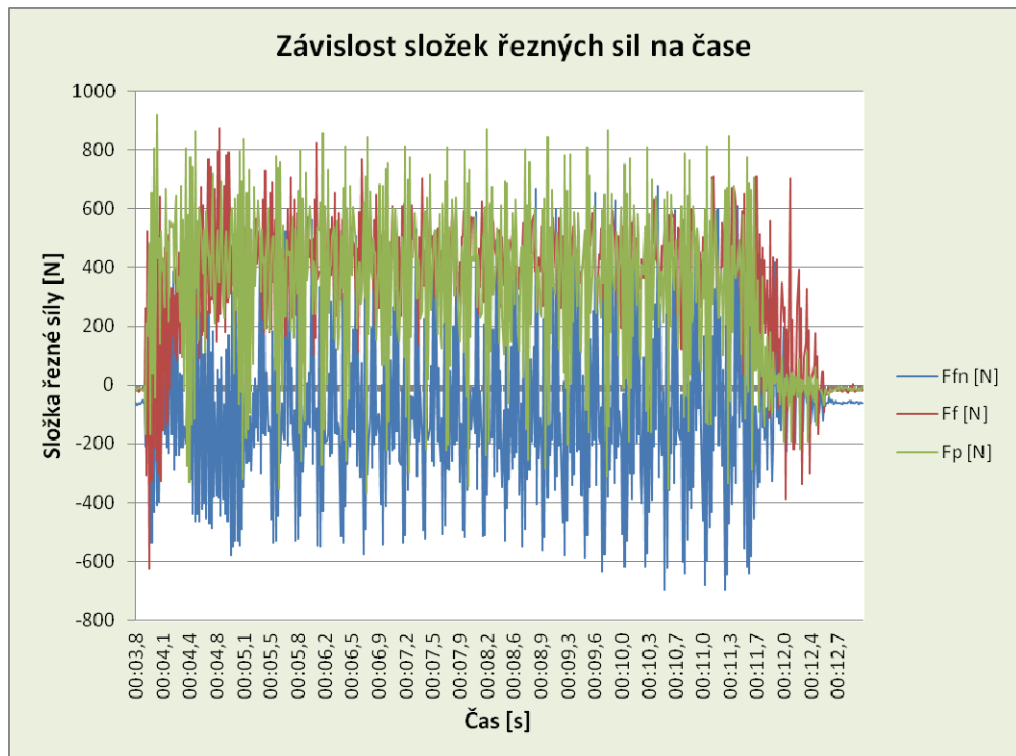
Označení vzorku	Řezná rychlost $v_c$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Hodnoty měřených drsností povrchu					
			Podélná osa $y$					
			Ra [ $\mu m$ ]	Ra + Uc [ $\mu m$ ]	Ra - Uc [ $\mu m$ ]	Rz [ $\mu m$ ]	Rz + Uc [ $\mu m$ ]	Rz - Uc [ $\mu m$ ]
6082-4-600-0,2	600	3,06	0,25	0,28	0,22	1,47	1,74	1,20
6082-4-700-0,2	700	3,57	0,26	0,29	0,24	1,48	1,62	1,34
6082-4-800-0,2	800	4,07	0,26	0,28	0,23	1,60	1,84	1,36
6082-4-900-0,2	900	4,58	0,25	0,27	0,23	1,47	1,61	1,33
6082-4-1000-0,2	1000	5,09	0,22	0,24	0,20	1,43	1,60	1,25



Graf 4.6 – Průměrné hodnoty drsností povrchu s rozšířenou kombinovanou nejistotou v závislosti na rychlosti posuvu  $v_f$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] a řezné rychlosti  $v_c$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] ve směru měření osy  $y$  při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,2$  mm

#### 4.3. Vyhodnocení naměřených dat výsledných složek řezných sil

Pro měření řezných sil byl použit dynamometr KISTLER typ 9255B, který snímá síly v osách X, Y a Z pomocí softwaru Dasy Lab verze 3.5. Tyto síly jsou  $F_z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$  odpovídají v tomto případě silám  $F_{fn}$ ,  $F_f$  a  $F_p$ , které jsou prezentovány jako:  $F_{fn}$  je síla normálová k posuvové síle,  $F_f$  je síla posuvu a  $F_p$  je pasivní síla. Tyto síly jsou zaznamenávány v reálném čase a výstupem je soubor, který byl zpracován v programu Excel a následně vyhotoveny grafy. Jako příklad je uveden graf 4.7, na kterém je závislost složek řezných sil na čase. Parametry pro tento graf byly: řezná rychlost  $v_c = 600$   $m \cdot min^{-1}$ , rychlost posuvu  $v_f = 1,53$   $m \cdot min^{-1}$ , posuv na zub  $f_z = 0,1$  mm.



Graf 4.7 – Závislost složek řezných sil na čase při čelním frézování materiálu EN AW 6082 pro  $v_c = 700 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , rychlost posuvu  $v_f = 3,57 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , posuv na zub  $f_z = 0,2 \text{ mm}$ .

Z grafů následně byly odečteny průměrné maximální hodnoty  $\bar{\sigma}_{\text{Max}}$  každé složky řezné síly a průměrné minimální hodnoty  $\bar{\sigma}_{\text{Min}}$  každé složky řezné síly. Tyto hodnoty jsou v přehledové tabulce (viz tab. 4.10). Poté byly spočítány z maximálních a minimálních hodnot průměrné absolutní odchylky a tyto byly vepsány do tabulek a vyneseny do grafů.

Tab. 4.10 – Hodnoty složek řezných sil odečtených z grafů

Řezná rychlost $v_c$ [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	Posuv na zub $f_z$ [mm]	Otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	Ø Max složek řezné síly			Ø Min složek řezné síly		
				$F_{fn}$ [N]	$F_f$ [N]	$F_p$ [N]	$F_{fn}$ [N]	$F_f$ [N]	$F_p$ [N]
600	0,1	3820	1,53	515	610	790	-584	224	-210
700	0,1	4456	1,78	995	403	1050	-715	-313	-720
800	0,1	5093	2,04	324	905	995	-431	-372	-132
900	0,1	5730	2,29	420	926	1055	-383	-219	-172
1000	0,1	6366	2,55	410	795	863	-472	-105	-36

Řezná rychlost $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Posuv na zub $f_z$ [mm]	Otáčky $n$ [min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Ø Max složek řezné síly			Ø Min složek řezné síly		
				$F_{fn}$ [N]	$F_f$ [N]	$F_{fn}$ [N]	$F_f$ [N]	$F_{fn}$ [N]	$F_f$ [N]
600	0,2	3820	3,06	710	960	1170	-780	393	-23
700	0,2	4456	3,57	952	1070	930	-988	-410	117
800	0,2	5093	4,07	1710	1355	1455	-1594	113	-681
900	0,2	5730	4,58	820	1215	1620	-1031	23	-648
1000	0,2	6366	5,09	940	2112	1952	-839	-1452	-638
600	0,4	3820	6,11	1950	2580	1038	305	245	-1428

Příklad výpočtu složek řezných sil z průměrné maximální hodnoty a průměrné minimální hodnoty. Výsledné hodnoty složek řezných sil se počítají v absolutní hodnotě.

Výpočet složky řezné síly  $F_f$  (použité hodnoty viz tab. 4.10):

$$Dyn. = |\varnothing Max| - |\varnothing Min|$$

$$Dyn. = |610| - |224|$$

$$Dyn. = 386$$

$$F_{fn} = \frac{Dyn}{2} + \varnothing Min$$

$$F_{fn} = \frac{386}{2} + 224$$

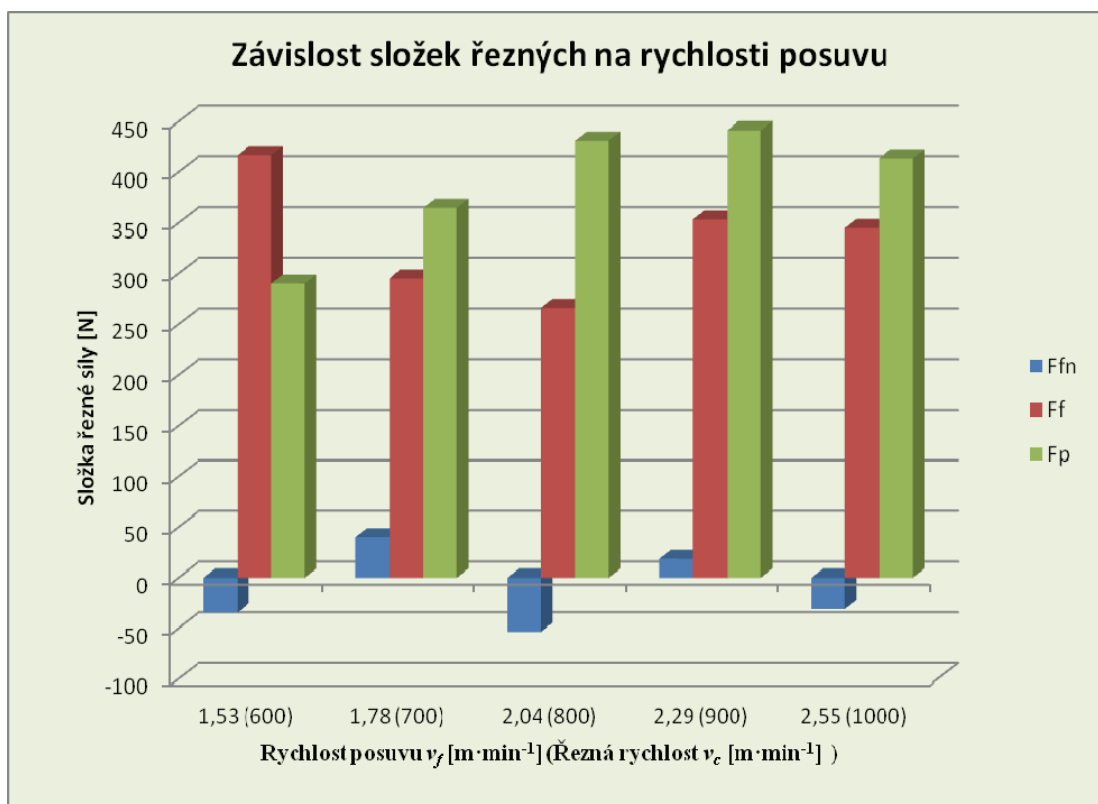
$$F_{fn} = 417 \text{ N}$$

#### 4.3.1. Vypočtené hodnoty složky řezné síly $F_{fn}$ , $F_f$ a $F_p$ pro posuv $f_z = 0,1$

V následující tabulce a grafu jsou vypočteny a vyobrazeny vypočtené hodnoty složek řezných sil pro konstantní posuv na zub  $f_z = 0,1 \text{ mm}$  při různých rychlostech posuvu.

Tab. 4.11 – Vypočtené hodnoty složek řezných sil při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,1 \text{ mm}$  a různých rychlostech posuvu  $v_f [\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$

Řezná rychlost $v_c$ [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	Posuv na zub $f_z$ [mm]	Otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	Vypočtené složky řezných sil		
				$F_{fn}$ [N]	$F_f$ [N]	$F_p$ [N]
600	0,1	3820	1,53	-35	417	290
700	0,1	4456	1,78	40	295	365
800	0,1	5093	2,04	-54	267	432
900	0,1	5730	2,29	19	354	442
1000	0,1	6366	2,55	-31	345	414



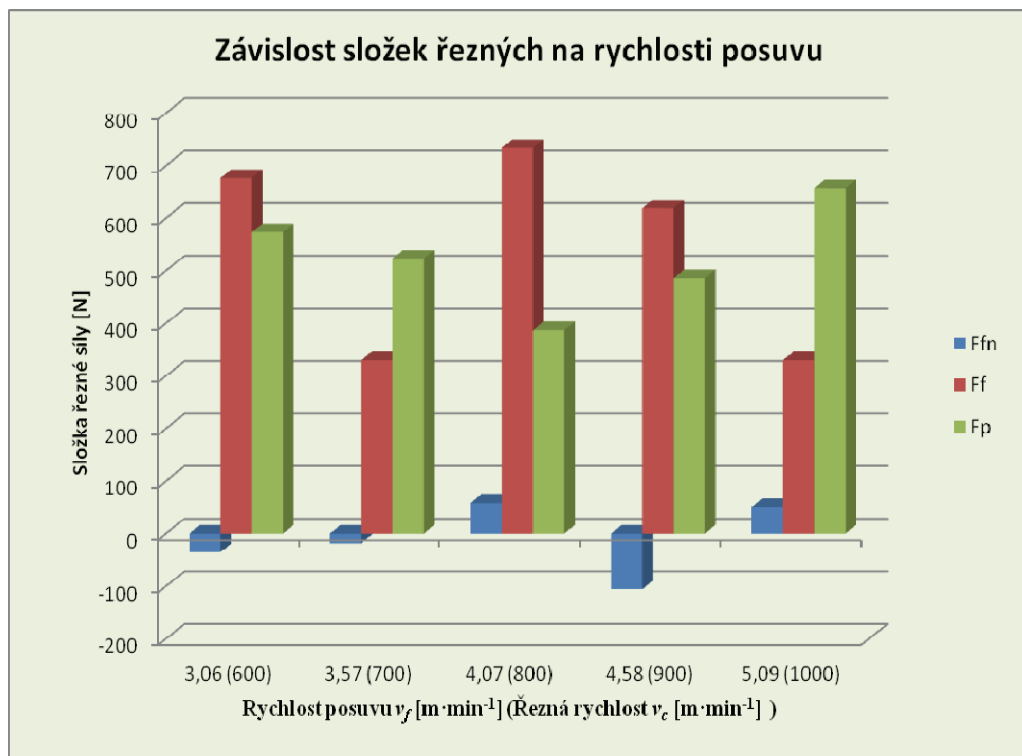
Graf 4.8 – Závislost složek řezných sil na rychlosti posuvu  $v_f$  respektive na řezné rychlosti  $v_c$  při čelním frézování materiálu EN AW 6082 pro posuv na zub  $f_z = 0,1 \text{ mm}$

#### 4.3.2. Vypočtené hodnoty složky řezné síly $F_{fn}$ , $F_f$ a $F_p$ pro posuv $f_z = 0,2$

V následující tabulce a grafu jsou vypočteny a vyobrazeny vypočtené hodnoty složek řezných sil pro konstantní posuv na zub  $f_z = 0,2 \text{ mm}$  při různých rychlostech posuvu.

Tab. 4.12 – Vypočtené hodnoty složek řezných sil při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,2 \text{ mm}$  a různých rychlostech posuvu  $v_f [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$

Řezná rychlost $v_c$ [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	Posuv na zub $f_z$ [mm]	Otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	Vypočtené složky řezných sil		
				$F_{fn}$ [N]	$F_f$ [N]	$F_p$ [N]
600	0,2	3820	3,06	-35	677	574
700	0,2	4456	3,57	-18	330	524
800	0,2	5093	4,07	58	734	387
900	0,2	5730	4,58	-106	619	486
1000	0,2	6366	5,09	51	330	657



Graf 4.9 – Závislost složek řezných sil na rychlosti posuvu  $v_f$  respektive na řezné rychlosti  $v_c$  při čelním frézování materiálu EN AW 6082 pro posuv na zub  $f_z = 0,2 \text{ mm}$

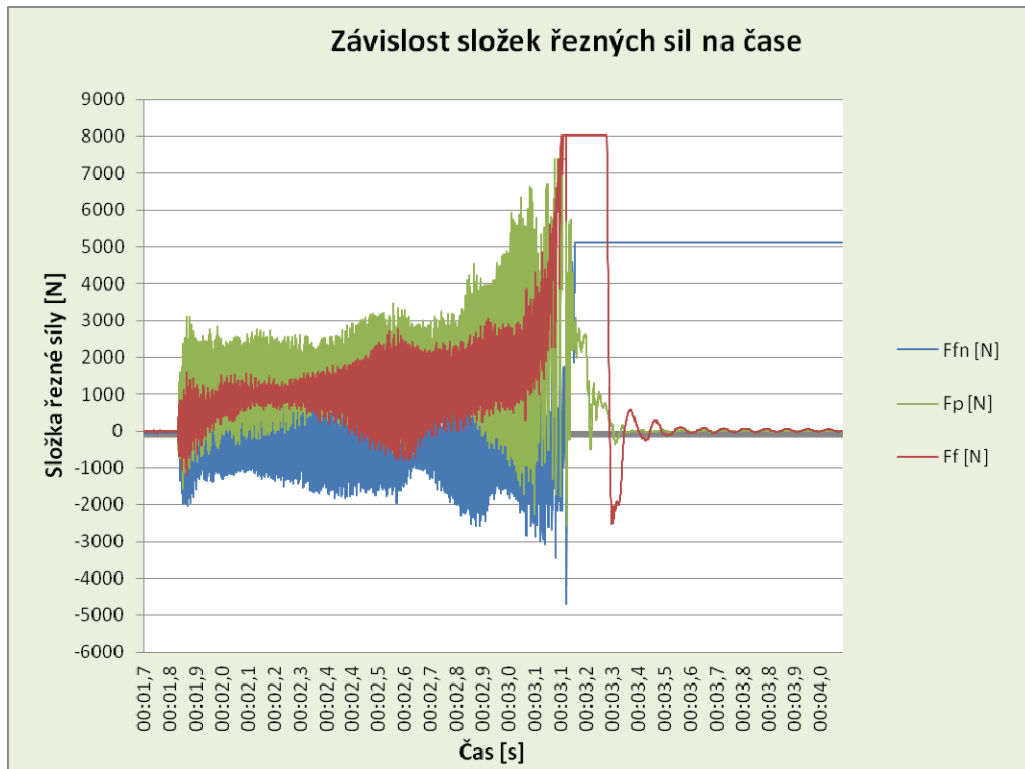
### 4.3.3. Kolize frézování při řezné rychlosti $v_c = 600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $f_z = 0,4 \text{ mm}$

Při frézování vzorku 6082-4-600-0,4 došlo ke kolizi frézy s obrobkem. Řezné podmínky byly: řezná rychlost  $v_c = 600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , posuv na zub  $f_z = 0,4 \text{ mm}$ , rychlost posuvu  $v_f = 6112 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a otáčky  $3820 \text{ min}^{-1}$ , při hloubce řezu  $a_p = 10 \text{ mm}$ .

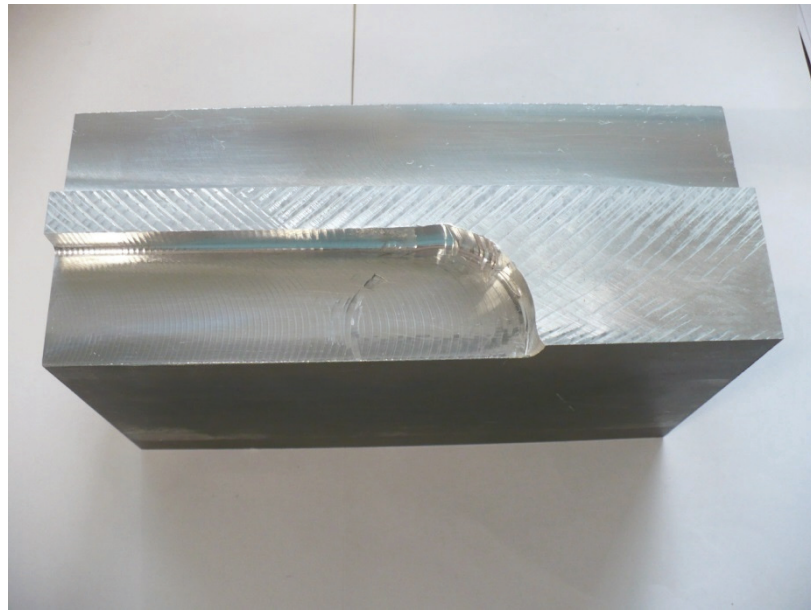
Tato kolize se stala při záběru materiálu, neboť byl překonán výkon vřetene a stroj se zastavil a nedovolil pokračovat ve frézování. Kolize nastala 1,3 sekundy po vstupu frézy do materiálu a vyznačovala se okamžitým nárůstem všech složek řezných sil.

Hodnoty jednotlivých složek řezných sil při kolizi byly:  $F_{fn} = 5098 \text{ N}$ ,  $F_f = 8026 \text{ N}$  a  $F_p = 7396 \text{ N}$ . Průběh sil během frézování obrobku a jejich průběh při následné kolizi lze vidět na grafu níže (viz graf 4.12). Výsledný povrch obrobku a jeho výsledná podoba po kolizi lze vidět na obrázcích níže (viz obr. 4.2 a 4.3)

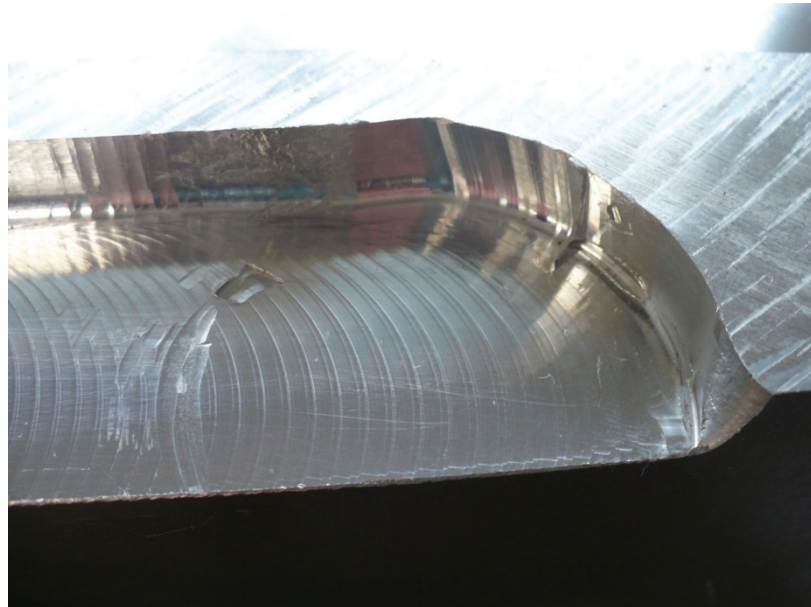
Tato kolize rozhodla o tom, že nebude experiment dokončen pro posuv na zub  $f_z = 0,4 \text{ mm}$ .



Graf 4.10 – Závislost složek řezných sil na čase při čelním frézování materiálu EN AW 6082 pro řeznou rychlost  $v_c = 600 [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$  a posuv na zub  $f_z = 0,4 \text{ mm}$ .



*Obr. 4.2 – Celkový pohled na obrobek při kolizi frézy s obrobkem*



*Obr. 4.3 – Detailní pohled na obrobek při kolizi frézy s obrobkem*



## 5. Technicko-ekomonické zhodnocení

Na vzorcích byla měřena drsnost 10 krát v podélném směru v ose x a 10 krát v příčném směru v ose y. U hodnot pro drsnost byla vypočítána rozšířená kombinovaná nejistota a zohledněna v grafech.

Při měření drsnosti pro konstantní řeznou rychlost  $v_c = 600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  vyplývá z grafu 4.1 pro měření v podélném směru, že se zvyšujícím se posuvem na zub se zhoršuje i kvalita obrobeného povrchu. Pro posuv na zub  $f_z = 0,4 \text{ mm}$  dosahuje drsnost  $R_z$  hodnot  $3,93 \pm 0,52$ . Pro měření drsnosti v příčném směru (viz graf 4.2) jsou hodnoty podobné a naopak dochází k mírnému zlepšení drsnosti povrchu se vzrůstajícím posuvem na zub. V příčném směru je kvalita povrchu lepší než v podélném směru.

Při vyhodnocení drsnosti povrchu pro konstantní posuv na zub  $f_z = 0,1 \text{ mm}$  lze z grafů 4.3 a 4.4 vyčíst, že se vzrůstající posuvovou rychlostí respektive řeznou rychlostí se kvalita povrchu nějak výrazně nemění, a to jak v podélném, tak i v příčném směru. Stejně tendence vykazují i grafy 4.5 a 4.6 pro posuv na zub  $f_z = 0,2 \text{ mm}$ . Ale i tady platí, že kvalita povrchu v příčném směru je lepší než podélném směru. Například průměrná hodnota  $R_z$  pro konstantní posuv  $f_z = 0,2 \text{ mm}$  je  $2,49 \text{ } \mu\text{m}$  v podélném směru a  $1,49 \text{ } \mu\text{m}$  ve směru příčném.

Při hodnocení vlivu řezných sil na obrobiteľnost lze z grafů 4.8 a 4.9 vyčíst, že menší síly působí při obrábění pro posuv na zub  $f_z = 0,1 \text{ mm}$ . Při tomto posuvu síly nepřekročí  $450 \text{ N}$ . Naopak při posuvu na zub  $f_z = 0,2 \text{ mm}$  dosahují síly až  $734 \text{ N}$ .

Cena jedné břitové destičky byla  $608 \text{ Kč}$  bez DPH. Pro osazení 4-břité frézy je cena destiček  $2\,432 \text{ Kč}$  bez DPH. Celková cena s DPH je  $2\,943 \text{ Kč}$ .

V případě zvýšení řezné rychlosti  $v_c$  z  $600$  na  $1000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , které nemá vliv na drsnost povrchu, se zkrátí jednotkový strojní čas  $t_{As}$  téměř na polovinu (viz tab. 5.1). Výpočet jednotkového času:

$$t_{As} = \frac{L}{v_f}$$

kde  $L$  je dráha nástroje ve směru posuvového pohybu [mm] vyjádřená vzorcem:

$$L = l + l_n + l_p + D$$

Dráha nástroje je součet délky obrobku  $l = 200 \text{ mm}$ , dráha potřebná pro nájezd  $l_n = 10 \text{ mm}$ , dráha potřebná pro výjezd  $l_p = 10 \text{ mm}$  a průměru frézy  $D = 50 \text{ mm}$ .

Celková dráha je  $L = 270 \text{ mm}$ , kterou vy násobíme počtem přejezdů - 3.

Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1.

V případě posuvu  $f_z = 0,1$  mm a při změně řezné rychlosti  $v_c$  z 600 na 1000  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$  je rozdíl jednotkového času na ofrézování jednoho obrobku:

$$\Delta t_{As} = 0,212 \text{ min}$$

V případě posuvu  $f_z = 0,2$  mm a při změně řezné rychlosti  $v_c$  z 600 na 1000  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$  je rozdíl jednotkového času na ofrézování jednoho obrobku:

$$\Delta t_{As} = 0,106 \text{ min}$$

V případě, že bychom počítali strojovou hodinu 800 Kč na jednu hodinu, ušetříme:

- Pro posuv  $f_z = 0,1$  mm                    2,83 Kč na jednom obrobku.
- Pro posuv  $f_z = 0,2$  mm                    1,41 Kč na jednom obrobku

Tyto výpočty jsou vztaženy na experimentální vzorky, ale za předpokladu, že tyto poznatky aplikujeme do sériové výroby, kde se opracovává například několik stovek obrobků za směnu lze dojít k nemalým úsporám.

Tab. 5.1 – Vypočtené hodnoty jednotkového strojního času.

Označení vzorku	Řezná rychlost $v_c$ [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	Posuv na zub $f_z$ [mm]	Otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	Rychlost posuvu $v_f$ [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	Jednotkový strojní čas $t_{As}$ [min]
6082-4-600-0,1	600	0,1	3820	1,53	<b>0,530</b>
6082-4-700-0,1	700	0,1	4456	1,78	<b>0,454</b>
6082-4-800-0,1	800	0,1	5093	2,04	<b>0,398</b>
6082-4-900-0,1	900	0,1	5730	2,29	<b>0,353</b>
6082-4-1000-0,1	1000	0,1	6366	2,55	<b>0,318</b>
6082-4-600-0,2	600	0,2	3820	3,06	<b>0,265</b>
6082-4-700-0,2	700	0,2	4456	3,57	<b>0,227</b>
6082-4-800-0,2	800	0,2	5093	4,07	<b>0,199</b>
6082-4-900-0,2	900	0,2	5730	4,58	<b>0,177</b>
6082-4-1000-0,2	1000	0,2	6366	5,09	<b>0,159</b>
6082-4-600-0,4	600	0,4	3820	6,11	<b>0,133</b>

## Závěr

Diplomová práce se zabývá obráběním hliníkových slitin a následným vlivem na kvalitu povrchu respektive na jeho drsnost a vyhodnocení řezných sil.

V experimentální části práce byla testována vyměnitelná břitová destička HM90 AXCR 150525R-P při použití čelního frézování 4-zubou frézou. Byla frézována hliníková slitina EN AW-6082 [AlSi1MgMn]. Tato destička má následující parametry stanovené výrobcem: posuv na zub  $f_z = 0,1 \div 0,2$  mm a řeznou rychlost  $v_c = 100 \div 600$  m·min<sup>-1</sup>.

Původně byl experiment naplánován i pro posuv na zub  $f_z = 0,4$  mm, ale při tomto posuvu nastala kolize materiálu s frézou a zastavení stroje, proto se testy s tímto posuvem dále neprováděly.

Během experimentu byla měřena drsnost na obrobené hliníkové slitině EN AW-6082 [AlSi1MgMn] a vyhodnoceny měřené parametry drsnosti Ra a Rz, které byly měřené na každém vzorku 10 krát v ose x, která je rovna směru posuvu a v ose y, která je kolmá na směr posuvu. Z uvedených výsledků vyplývá, že na kvalitu povrchu nemá vliv řezná rychlost a je zajištěna dobrá mikro geometrie povrchu v celé škále nastavovaných řezných parametrů. Proto lze využít obrábění s vyšší řeznou rychlostí až  $v_c = 1000$  m·min<sup>-1</sup> a rychlostí posuvu  $v_f = 5,09$  m·min<sup>-1</sup>, než je doporučena výrobcem, avšak při posuvu na zub  $f_z = 0,2$  mm. Vyšší rychlost obrábění nám zkrátí strojní časy a čas potřebný pro obsluhu stroje. Opotřebení břitové destičky při tomto experimentu nevykazovalo výrazné známky opotřebení. Ale pro stanovení závislosti opotřebení na doporučených řezných parametrech by bylo zapotřebí dalšího experimentu, aby bylo opotřebení jasně prokazatelné. Tento experiment nebyl implicitně zaměřen na opotřebení břitových destiček.

Při vyhodnocování řezných sil bylo využito dynamometru, který snímal síly ve třech osách X, Y a Z přímo při obrábění materiálu. Z uvedených výsledků vyplývá, že nejvhodnější podmínky pro obrábění z pohledu nejmenších sil jsou pro posuv na zub  $f_z = 0,1$  mm při rychlosti posuvu  $v_f = 1,78$  m·min<sup>-1</sup> a řezné rychlosti  $v_c = 700$  m·min<sup>-1</sup>.

## Seznam použité literatury

- [1] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ, Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II. 1. díl.* Ostrava: VŠB-TU Ostrava 2007, 119s. ISBN 978-80-248-1641-8
- [2] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ, Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II. 2. díl.* Ostrava: VŠB-TU Ostrava 2007.142 s. ISBN 978-80-248-1822-1
- [3] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie – část 1.* Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 112s., ISBN 80-248-0672-X
- [4] Kistler katalog. *Dynamometr Kistler 9255B* [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.technovolt.ro/catalogue/kistler/DINAMOMETRE%20%20FIXE%20SI%20ROTATIVE.pdf>
- [5] SCHMEIDER, George. *Cutting Tool Applications: Chapter 3 Machinability of Metals* [online]. Soutfield: gmrs, 2002 [cit. 2015-04-19]. ISBN 0-615-12191-8. Dostupné z [http://web.archive.org/web/20061130091912/http://www.manufacturingcenter.com/online\\_book/chap\\_3.pdf](http://web.archive.org/web/20061130091912/http://www.manufacturingcenter.com/online_book/chap_3.pdf)
- [6] SEDLÁČEK, Vladimír. *Neželezné kovy: Hutnické výrobky a jejich použití: Určeno výrobcům a spotřebitelům hutnických výrobků: Učeb. pomůcka pro prům. školy a vys. školy techn. směru.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1957. 219, [1] s. Řada hutnické literatury.
- [7] Drsnoměr SurfTest SJ-210. *Microtes* [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.microtes.cz/Mitutoyo/drsnomery-SJ210aSJ301-M.pdf>
- [8] About aluminium. *Hydro* [online]. 2015 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.hydro.com/en/About-aluminium/>
- [9] Výroba hliníku. *Obrázky Němeček* [online]. 2015 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://web.quick.cz/nemecek/obrazky.htm>
- [10] Periodická tabulka. *Hliník* [online]. 2009-2015 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/13.html>
- [11] KOUTNÝ, J., *Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování.*[online]. [cit. 2015-04-19], Dostupné z: < <http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf>>
- [12] Břítová destička HM90 AXCR 150525R-P. *ISCAR* [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5696622&fnum=1710&mapp=IT&app=90&GFSTYP=M>

- [13] Aluminium alloys. *Aluminium design* [online]. 2015 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.aluminiumdesign.net/design-support/aluminium-alloys/>
- [14] ČSN EN 573-1. *Hliník a slitiny hliníku. Chemické složení a druhy tvářených výrobků. Část 1: Číselné označování*. Panenské Břežany: Český normalizační institut, 2005.
- [15] KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [16] MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁČ, Vladivoj OČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ, Jaromír DRÁPALA, Heinz SCHNEIDER. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, s. r. o., 2005, 700 s. ISBN 80-890-4188-4.
- [17] Frézování: Katalog frézování. Šumperk: *Pramet Tools*, 2014. Dostupné z: <http://www.pramet.cz/download.php?id=628>
- [18] ČSN ISO 513. *Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů určeným ostrím - Označování skupin a podskupin použití*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [19] Znalosti a zkušenosti. *SANDVIK coromat* [online]. 2015 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/pages/default.aspx>
- [20] Technická příručka. *Dormer* [online]. 2013 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: [http://www.mav.cz/dormer/Technicka\\_prirucka\\_2013.pdf](http://www.mav.cz/dormer/Technicka_prirucka_2013.pdf)
- [21] JERSÁK, Jan. Navrhování hospodárných řezných podmínek při obrábění. *Technická univerzita v Liberci: Katedra obrábění a montáže* [online]. 2001 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: [http://www.kom.tul.cz/soubory/tob\\_nhrp.pdf](http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_nhrp.pdf)
- [22] JERSÁK, Jan. Řezné podmínky při obrábění. *Technická univerzita v Liberci: Katedra obrábění a montáže* [online]. 2001 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: [http://www.kom.tul.cz/soubory/tob\\_rp.pdf](http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf)
- [23] Seriál Řezné nástroje: Technický týdeník. *T-support* [online]. 2012 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.t-support.cz/kat/serial-rezne-nastroje-technicky-tydenik-2012>
- [24] SADÍLEK, Marek. Strategie frézování naklopeným nástrojem. In: *MMSpektrum* [online]. 2005 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/strategie-frezovani-naklopenym-nastrojem.html>
- [25] Britové destičky pro obrábění hliníku a jeho slitin. *Hospodářské noviny* [online]. 2005, [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://ihned.cz/c1-17370090-britove-desticky-pro-obrabeni-hliniku-a-jeho-slitin>



- [26] Tvar třísky a geometrie nástroje. *Elektronická učebnice* [online]. 2015, [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://eluc.cz/verejne/lekce/1816>
- [27] DE VOS, Patrick *Jak rozpoznat správné utváření třísek? MM spektrum* [online]. 2012, č. 1 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-rozpoznat-spravne-utvareni-trisek.html>
- [28] DE VOS, Patrick *Opotřebení se nevyhneme! MM spektrum* [online]. 2012, č. 1 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
- [29] Kontrola drsnosti povrchu. *Elektronická učebnice* [online]. 2015, [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://eluc.cz/verejne/lekce/1102>
- [30] Technický datový list EN AW 6082. *Gleich Aluminium* [online]. 2015 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://gleich.de/cz/produkty/vlcovan-desky/vlcovan-desky-en-aw/-/en-aw-6082?pdf>
- [31] Informace EN AW 6082. *PROAL* [online]. 2009 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424400.htm>
- [32] Hurco VMX 30 t [online]. [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://kharkov.prom.ua/p9378495-frezernyj-obrabatyvayuschij-tsentr.html>
- [33] Nástroj HM90 FAL-15. *ISCAR* [online]. [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=3105020&fnum=2684&mapp=ML&app=61&GFSTYP=m>