



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE CAD/CAM SOFTWARE HYPERMILL PŘI OBRÁBĚNÍ

APPLICATION CAD/CAM SOFTWARE HYPERMILL FOR MACHINING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vít Šebesta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Vít Šebesta
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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

Aplikace CAD/CAM softwaru hyperMILL při obrábění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V dnešních strojírenských podnicích se velmi úspěšně prosazuje příprava programů pro CNC stroje prostřednictvím CAM softwarů. HyperMILL umožňuje dokončovat stěny kapes speciálním nástrojovým vybavením. Tato práce je zaměřena na srovnání výhod a případně i nevýhod dostupných programovacích funkcí. Jedná se o řešení problematiky progresivního pětiosého frézování s nekonstantním nakloněním řezného nástroje vzhledem k normále obráběné plochy.

Cíle diplomové práce:

- stručná charakteristika softwaru hyperMILL ve srovnání s vybranými CAD/CAM softwary,
- návrh experimentálního obrobku a zpracování nezbytné technické dokumentace,
- vytvoření experimentálních NC programů pro výrobu vzorků,
- zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

GRZESIK, W. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. Second edition. Boston: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-444-63711-6.

GUPTA, K. (ed.). Advanced manufacturing technologies. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-56098-4.

Autodesk PowerMill 2017: Getting Started. 1. United Kingdom, 2016.

MAREK, J. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. 684 s. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem práce je seznámit se s CAM programem hyperMILL 2019 spolu s porovnáním kulové a soudečkové frézy, ekonomickým zhodnocením experimentu a silovou analýzou plochy ze slitiny hliníku. Tato práce se také zaměřuje na směry a velikosti silového působení frézy při obrábění, výhod obrábění soudečkovou frézou, nejčastějších typů slitin hliníku a jejich mechanických vlastností a dále porovnání CAM programu hyperMILL s jiným vybraným programem.

Klíčová slova

hyperMILL, soudečková fréza, NC programování, slitiny hliníku, obrobený povrch

ABSTRACT

The main aim of this thesis is to acquire basic knowledge of CAM program hyperMILL 2019 with comparison of the ball nose end mill and circle segment end mill with taper form, economical evaluation and then make force analysis of specimen from aluminium alloy by milling with spindle moulder. Another aim of this thesis is also an analysis of force effects and force directions of the milling tool, advantages by using the circle segment end mill with taper form, the most common types of aluminium alloys and their mechanical properties and next comparison of CAM program hyperMILL with other selected program in the theoretic part.

Key words

hyperMILL, milling cutter, NC programming, aluminum alloy, processed surface

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠEBESTA, Vít. *Aplikace CAD/CAM softwaru hyperMILL při obrábění*. Brno 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 73 s. 9 příloh. Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Aplikace CAD/CAM softwaru hyperMILL při obrábění** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Vít Šebesta

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D., Ing. Michalu Křížkovi, Zdeňku Popovi a Ing. Jirímu Čechovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji své rodině za prokázanou trpělivost a podporu při studijích.

OBSAH

ABSTRAKT.....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ.....	10
1.1 Geometrie břitu frézy.....	13
1.2 Průřez třísky.....	13
1.3 Rozložení sil při frézování:.....	14
1.4 Změna velikosti zatížení nástroje v závislosti na jeho opotřebení.....	15
1.5 Kmitání při obrábění.....	18
1.5.1 Vlastní kmitání.....	18
1.5.2 Vynucené kmitání.....	18
1.5.3 Samobuzené kmitání.....	18
2 HLINÍK A JEHO SLITINY.....	19
2.1 Hliník.....	19
2.2 Mechanické a chemické vlastnosti hliníku.....	19
2.3 Tepelné zpracování slitin hliníku.....	20
2.3.1 Nevytvrditelné.....	20
2.3.1.1 Zotavení žiháním.....	20
2.3.1.2 Rekrystalizační žihání.....	21
2.3.2 Vytvrditelné.....	22
2.3.2.1 Precipitační vytvrzování.....	22
2.3.2.2 Rozpouštěcí žihání.....	23
2.3.2.3 Vytvrzení.....	23
2.4 Slitiny hliníku.....	24
2.4.1 Slitiny hliníku 7xxx série.....	25
2.4.2 Typ slitiny hliníku EN-AW 7075 a jeho vlastnosti.....	25
3 OBRÁBĚNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN.....	27
3.1 Povrchové změny slitiny hliníku při obrábění.....	27
3.2 Charakteristické vlastnosti při obrábění hliníkových slitin.....	28
3.3 Nárůstek.....	28
3.4 Charakteristické vlastnosti při vysokorychlostním obrábění.....	29
3.5 Vibrace nástroje.....	29
3.6 Volba typu a materiálu nástroje.....	30

3.7 Deformace třísky.....	30
4 CAM PROGRAMY.....	32
4.1 Program hyperMILL.....	35
4.1.1 Soustružnicko-frézovací operace.....	37
4.1.2 2D obrábění.....	37
4.1.3 3D obrábění.....	37
4.1.4 5-osé obrábění.....	38
4.2 Program PowerMill.....	38
4.3 Porovnání programů.....	40
5 NÁVRH EXPERIMENTU.....	42
5.1 Volba stroje.....	42
5.2 Rozměry a technické parametry nástrojů:.....	43
5.3 Doporučené hodnoty a výpočty.....	44
5.4 Vypočítané a zvolené řezné podmínky:.....	45
5.5 Teoretický výpočet řezné síly.....	46
5.6 Měřicí aparatury řezných sil.....	48
5.6.1 Cejchování dynamometrů.....	50
5.6.2 Dynamometr Kistler 9257B.....	50
6 PROVEDENÍ EXPERIMENTU.....	55
7 EKONOMICKO-TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ.....	66
ZÁVĚR.....	69
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	70
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ a ZKRATEK.....	73
SEZNAM PŘÍLOH.....	76

ÚVOD

V oboru technologie obrábění je nejen velmi důležitá znalost technologických postupů vyráběných kusů, ale i schopnost tyto technologické postupy uskutečnit vytvořením NC programů, které se následně nahrají do strojů, jež obrobky zpracují. Jedna z nejdůležitějších metod obrábění je frézování, kde se musí přihlížet na správný výběr nástroje a rezných podmínek pro optimální efektivitu práce.

Taková práce by bez CAM programů jako hyperMILL byla velmi obtížná, pokud je bráno na zřetel, že některé výrobky nelze vyrobit bez použití 5-osých frézovacích center. V této práci lze zjistit, že program hyperMILL obsahuje i modelovací část, v níž lze přímo vytvořit model součásti, se kterým se pracuje, nebo upravit importovanou výslednou součást. Dále je tento program srovnáván s dalším významným CAM programem PowerMill od firmy Autodesk.

Slitiny hliníku jsou používány stále více, z důvodu nízké hmotnosti a velmi dobrých mechanických vlastností. Jsou často využívány v stavebním, leteckém a automobilovém průmyslu. Tato práce se v teoretické části zaměřuje i na rozdělení slitin hliníku a jejich tepelných zpracování.

Obrábění pomocí soudečkové frézy je novinkou, která dokáže vyfrézovat stěny kapes s mnohem nižším stupněm drsnosti povrchu než u konvenčního frézování. Právě z toho důvodu se tato práce zaměřuje na ekonomičnost využití a rozbor silového působení soudečkové frézy oproti fréze kulové.

1 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ

Frézování je metoda oddělování materiálu od obrobku pomocí rotujícího břitového nástroje. Posuv většinou koná stůl s obrobkem, nejčastěji ve směru kolmém na osu nástroje. U nových frézovacích center lze nastavit plynule měnitelné posuvové pohyby ve všech směrech (zejména u víceosých CNC frézek a obráběcích center). Řezný proces je u frézování přerušovaný, každý zub odřezává třísky různé tloušťky. Z technologického hlediska se dělí frézování na válcové (obrábění obvodem nástroje – obr. 1.0) a čelní (obrábění čelem nástroje – obr. 1.1) v závislosti na použitém nástroji.

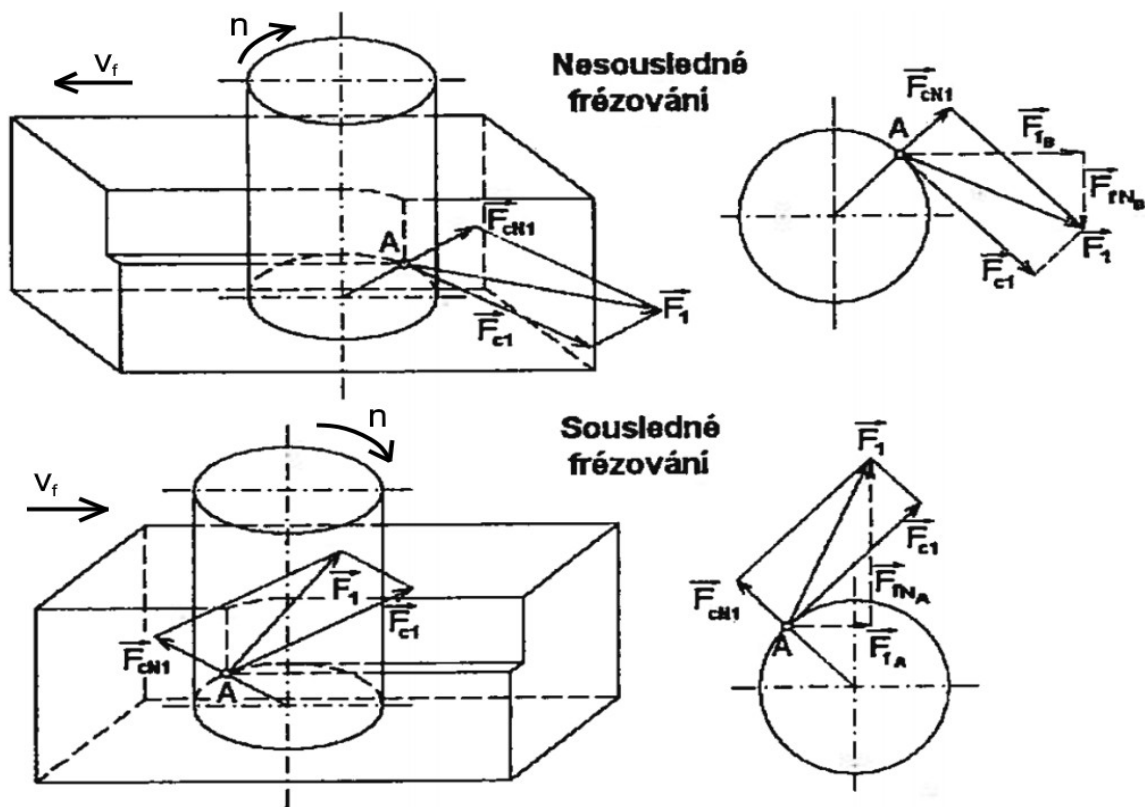
U nesousledného frézování dochází k rotaci nástroje ve směru proti směru posuvu obrobku. Tloušťka třísky se mění od nulové hodnoty po maximální. Tříška se oddělí od obrobku až po určitém skluzu břitu po ploše, která je vytvořena předcházejícím zubem. Při tomto oddělování vznikají silové účinky a deformace, jež jsou výraznější, pokud je nástroj opotřebovaný, a samy opotřebování nástroje způsobují. Jedna složka řezné síly u nesousledného frézování směřuje směrem nahoru, a tím odtahuje obrobek od stolu stroje.

U sousledného frézování je smysl rotace nástroje ve stejném směru jako posuv obrobku. Při vniknutí zubu do materiálu má tříška maximální tloušťku. Řezné síly směřují většinou dolů ke stolu stroje. Sousledné frézování lze provádět pouze na přizpůsobených strojích, které mají vymezenou vůli a předpětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézy. Jinak by mohlo dojít k nestejněměrnému posuvu, přičemž by se poškodil nástroj nebo i stroj [1].

Tab.1.0 Porovnání sousledného a nesousledného frézování [1,2].

	Výhody	Nevýhody
Sousledné frézování	Vyšší jakost obrobeného povrchu	Rázy
	Vyšší trvanlivost břitů	Nutnost vymezení vůle pohybových šroubů
	Menší potřebný řezný výkon	Nevhodné při obrábění polotovarů s tvrdým a znečištěným povrchem
	Menší sklon ke kmitání nástroje	Silová zátěž každého zubu při záběru
Nesousledné frézování	Žádné rázy	Horší kvalita obrobeného povrchu
	Není nutné vymezovat vůli mezi posuvovým šroubem a maticí	Horší směr řezné síly vzhledem k upnutí
	Trvanlivost nástroje nezávisí na okujích, písčitém povrchu a pod.	Rychlejší opotřebení břitu nástroje
	Menší opotřebení pohybového mechanismu stroje (kuličkového šroubu a matice)	Nutné pevné upnutí

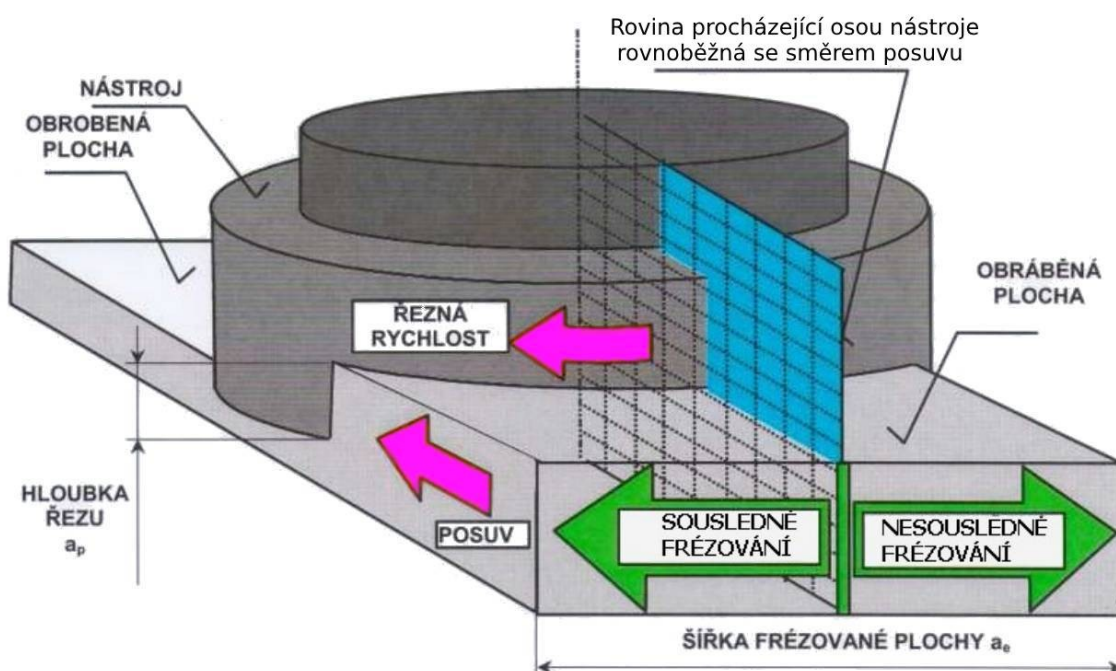
U čelního frézování jsou břity umístěny na obvodu i čele nástroje. Podle polohy osy vůči frézované ploše se rozlišuje frézování symetrické a nesymetrické. U symetrického frézování prochází osa nástroje středem frézované plochy, zatímco u nesymetrického frézování osa středem plochy neprochází. Používá-li se čelní frézování, dochází pak současně k souslednému i nesouslednému frézování (viz obr. 1.1 a tab. 1.0) [3].



Obr.1.0 Silové zatížení nástroje při sousledném a nesousledném frézování [4],

kde

n [min^{-1}]	otáčky nástroje	F_{fs} [N]	posuvová síla
v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	posuvová rychlost	F_{fn_s} [N]	kolmá posuvová síla
F_1 [N]	celková řezná síla	F_{cn1} [N]	kolmá řezná síla
F_{c1} [N]	řezná síla		



Obr.1.1 Čelní frézování [1].

Při frézování koná hlavní rotační pohyb nástroj, zatímco posuvový pohyb koná stůl, na kterém je připevněn obrobek. Posuvový pohyb bývá většinou přímočarý. Velikost řezné rychlosti se vypočítá dle vztahu 1.0 [3]:

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3} [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}], \quad (1.0)$$

kde

n [min^{-1}] otáčky obrobku,

D [mm] průměr nástroje.

Nejdůležitější hodnotou posuvového pohybu je posuv na zub f_z [mm]. Jedná se o délku dráhy, již vykoná obrobek po dobu záběru. Z posuvu na zub je možno určit posuv na otáčku f_n podle vzorce 1.1 (jedná se o délku dráhy, kterou vykoná obrobek po dobu jedné otáčky) [1]:

$$f_n = f_z \cdot z [\text{mm}], \quad (1.1)$$

kde

z [-] počet zubů.

Posuvová rychlost se vypočítá podle vztahu 1.2 [1]:

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}], \quad (1.2)$$

kde

n [min^{-1}] otáčky nástroje.

1.1 Geometrie břitu frézy

Pokud je vyžadováno efektivní odebrání třísky, musí být břit nejdříve náležitě upraven. Zuby jsou klínové a zakončeny břitem, jenž je tvořen dvěma plochami (čelem a hřbetem). V místě, kde se protnou, vznikne ostří jež odděluje třísku od obrobku [1].

Čím je klín ostřejší, tím lépe vniká do materiálu. Vzájemná poloha obrobku a ploch břitu nástroje vytváří úhly, které jsou známy jako geometrie břitu. Velikosti úhlů jsou závislé na typu obráběného materiálu, ale je známo, že úhel břitu β je větší u tuhých materiálů (čím tužší materiál, tím větší úhel β) [1].

1.2 Průřez třísky

U nesousledného frézování se tloušťka třísky h_i zvětšuje (od nuly do maxima), zatímco při sousledném frézování se zmenšuje (od maximální hodnoty do nuly). Jmenovitá tloušťka třísky se vyjádří vztahem 1.3 pro jakoukoli fázi jejího odřezávání [1]:

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i [\text{mm}], \quad (1.3)$$

kde

f_z [mm] posuv na zub,

φ_i [°] úhel posuvového pohybu.

Úhel posuvového pohybu φ_i se mění jak podle závislosti na poloze řešeného zubu tak i podél příslušného ostří (u fréz se šikmými zuby nebo zuby do šroubovice). Průřez třísky u čelního frézování (viz. obr. 1.2) se mění v závislosti na posuvovém úhlu φ_i a také na úhlu nastavení hlavního ostří κ_r (mění se tloušťka třísky), tudíž není konstantní ani průřez třísky, ani silové zatížení, jež působí při jejím odebrání. Musí být také bráno v potaz, že v záběru může být více zubů a že řez je periodicky přerušovaný, tudíž tříška je dělená. Okamžitá hodnota tloušťky třísky se spočítá pomocí vztahu 1.4 [1,4]:

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r [\text{mm}], \quad (1.4)$$

kde

f_z [mm] posuv na zub,

φ_i [°] úhel posuvového pohybu,

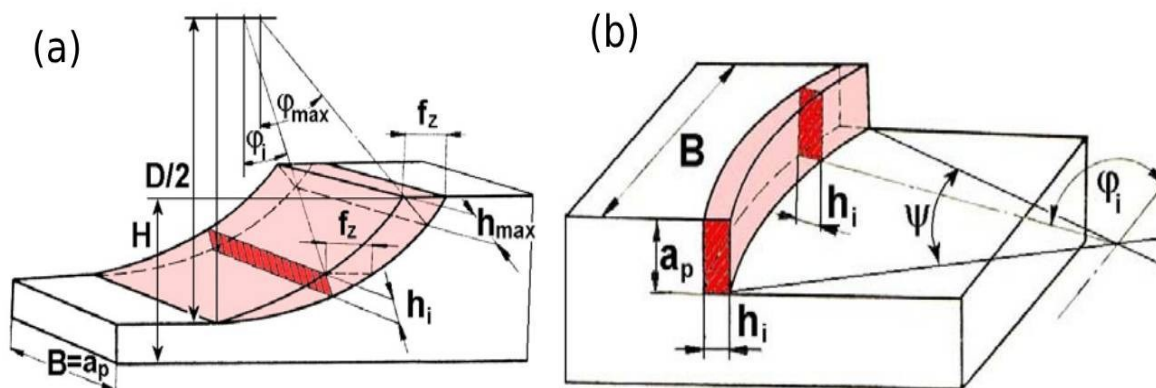
κ_r [°] nastavení hlavního ostří.

Jmenovitá šířka třísky b_i se spočítá dle vztahu 1.5 a je pro jakékoli φ_i konstantní [1]:

$$b_i = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} [\text{mm}], \quad (1.5)$$

Je-li zub frézy v poloze (i), pak se jmenovitý průřez třísky označí A_{Di} a vyjádří se podle grafického znázornění na obr. 1.2 vzorcem 1.6 [1]:

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i [\text{mm}^2]. \quad (1.6)$$



Obr.1.2 Průřez třísky při válcovém (a) a při čelním (b) frézování [1].

Při maximální velikosti A_{Di} bude $\varphi_i = \varphi_{max}$, tzn. A_{Dmax} se počítá dle vzorců 1.7 – 1.9 [1]:

$$A_{Dmax} = a_p \cdot h_{max} = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_{max} [mm^2], \quad (1.7)$$

$$\sin \varphi_{max} = \frac{2}{D} \cdot \sqrt{D \cdot H - H^2} [-]. \quad (1.8)$$

Maximální velikost A_{Di} je v případě když $\varphi_i = 90^\circ$, takže [1]:

$$A_{Dmax} = a_p \cdot f_z [mm^2]. \quad (1.9)$$

1.3 Rozložení sil při frézování:

Zatížení řezného nástroje vzniká působením řezného odporu obrobku proti břitu nástroje. Síly působí po celé délce břitu v axiálním směru a odvíjí se od jeho polohy. Tyto síly vytvářejí deformaci nástroje, jež se projevuje jako rozměrová chyba vytvořeného povrchu. Rovnice vyjadřující tyto síly, které jsou uvedeny níže tuto deformaci neuvažují, počítají s ideálně tuhým nástrojem. Celkovou sílu F_j , jež působí na nástroj, lze vyjádřit v různě orientovaných souřadných systémech [4]:

- souřadný systém řezného nástroje (F_c , F_{cN} , F_p),
- souřadný systém obráběcího stroje (F_x , F_y , F_z),
- souřadný systém měřicí aparatury Kistler (F_x , F_y , F_z),
- souřadný systém uvažující bod ostří a ortogonální rovinu hl. ostří (F_{sh} , F_{shN} , F_{tr}).

Celková síla, která působí na nástroj, se dělí na jednotlivé složky (viz obr. 1.3), použité souřadné systémy vyhovují dle ČSN ISO 3002 [4].

Při použití nástroje se zuby do šroubovice jsou frézovací řezné síly závislé na úhlu záběru φ , poloměru nástroje a sklonu šroubovice λ_s . Tyto veličiny ovlivňují průřez třísky A_D a pro vyjádření elementární síly pro j-tý zub nástroje se využívá vztahů 1.10 a 1.11 [4]:

$$dF_c(\varphi, a_p) = K_t \cdot h_j(\varphi, a_p) da_p [N], \quad (1.10)$$

$$dF_{cNj}(\varphi, a_p) = K_r \cdot F_{cj}(\varphi, a_p) da_p [N], \quad (1.11)$$

kde tloušťku třísky h_j jde vyjádřit podle vzorce 1.12 za předpokladu, že a_p je axiální hloubka řezu [4]:

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_j(a_p) [mm]. \quad (1.12)$$

Velikost úhlu φ_j je závislá jak na pootočení frézy, tak i na pozici vyšetřovaného elementu v axiálním směru na šroubovici zubu. Závislost lze potom vyjádřit pomocí vzorce 1.13 [4]:

$$\varphi_j(a_p) = \varphi + j\varphi_p - k_\beta [\text{rad}], \quad (1.13)$$

kde $\varphi_p = \frac{2 \cdot \pi}{z}$ a $k_\beta = \frac{\tan \beta}{R}$, β je úhel stoupání šroubovice, z je počet zubů a R je poloměr nástroje.

K_t , K_r ze vztahů 1.10 a 1.11 jsou závislé na jmenovité tloušťce třísky h_i , na materiálu nástroje a typu obrobku. Koeficienty K_t , K_r se spočítají pomocí vzorců 1.14 a 1.15 [4]:

$$K_t = K_T \cdot h_i^{-p} [-], \quad (1.14)$$

$$K_r = K_R \cdot h_i^{-q} [-]. \quad (1.15)$$

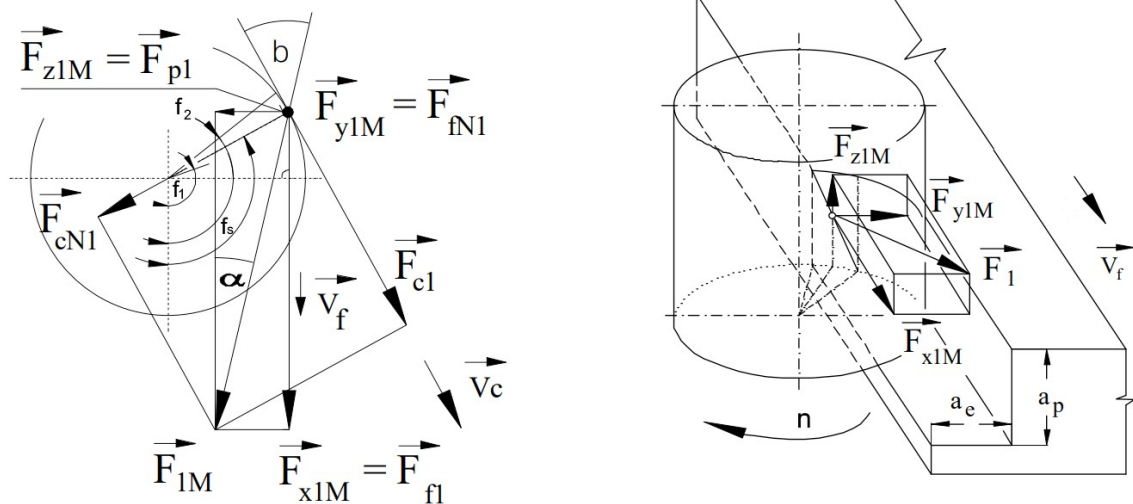
Konstanty K_T , K_R , p a q se zjišťují experimentálně pro daný stroj a obrobek. Elementární řeznou sílu lze přesunout do stejného souřadnicového systému, v jakém se nachází posuv nástroje, což lze vyjádřit dle vzorců 1.16 a 1.17 [4]:

$$dF_{xj}(\varphi, a_p) = -dF_{cj}(\varphi, a_p) \cdot \cos \varphi_j(a_p) - dF_{cnj}(\varphi, a_p) \cdot \sin \varphi_j(a_p) [N], \quad (1.16)$$

$$dF_{yj}(\varphi, a_p) = dF_{cj}(\varphi, a_p) \cdot \sin \varphi_j(a_p) - dF_{cnj}(\varphi, a_p) \cdot \cos \varphi_j(a_p) [N]. \quad (1.17)$$

Zjednodušené vztahy mezi složkami řezných sil pro frézy se zuby do šroubovice uvádí Tlustý, dle vzorce 1.18, jehož předpoklad je [5]:

$$\Delta F_c = 0,3 \cdot \Delta F_{cN} [N]. \quad (1.18)$$



Obr. 1.3 Rozložení sil při frézování [4].

1.4 Změna velikosti zatížení nástroje v závislosti na jeho opotřebení

Opotřebení vzniká u všech strojních součástí, jež jsou ve vzájemném silovém kontaktu a relativním pohybu. Nástroj-obrobek a nástroj-tříška jsou při obrábění v neustálém relativním pohybu a dochází také k fyzickému styku mezi nástrojem s třískou (odchází

po čele) a nástrojem s obrobkem (na hřbetě a špičce nástroje), což vede k opotřebení nástroje. Podmínky práce nástroje se výrazně liší od pracovních podmínek součástí stroje [4].

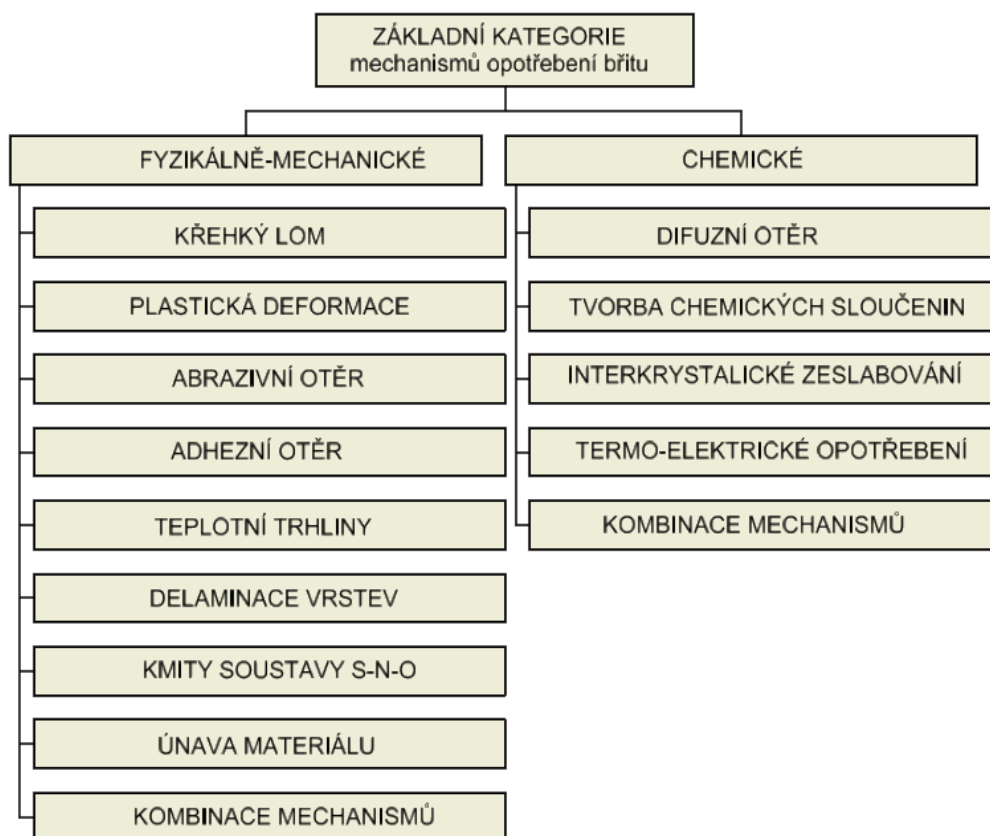
Proces opotřebování nástroje je složitý proces, do něhož zasahuje mnoho proměnných zejména fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného a nástrojového materiálu, druh obráběcí operace, geometrie nástroje, řezné podmínky atd. Základní rozdělení opotřebení lze spatřit na obr. 1.4 [4].

Pomocí rovnic (1.10) a (1.11) lze vyjádřit řeznou sílu v čase t . Jelikož dochází při procesu obrábění k opotřebování nástroje, změní se jeho geometrie břitu a tím se změní jeho řezná síla. Tato změna v průběhu životnosti nástroje dosahuje hodnot 200 %, výjimečně až 300 %. Složky sil se mění nerovnoměrně a tím pádem se mění i směr působících sil v průběhu obrábění (viz obr. 1.5). Na začátku řezu může být geometrie břitu navržena tak, aby byl nástroj vtahován do obrobku díky pozitivnímu úhlu čela, ale na konci řezu se může kvůli opotřebení od obrobeného povrchu výrazně odtlačovat. Tuto změnu lze kvantifikovat pomocí rovnic 1.19 a 1.20 v závislosti na souřadném systému a čase t [6]:

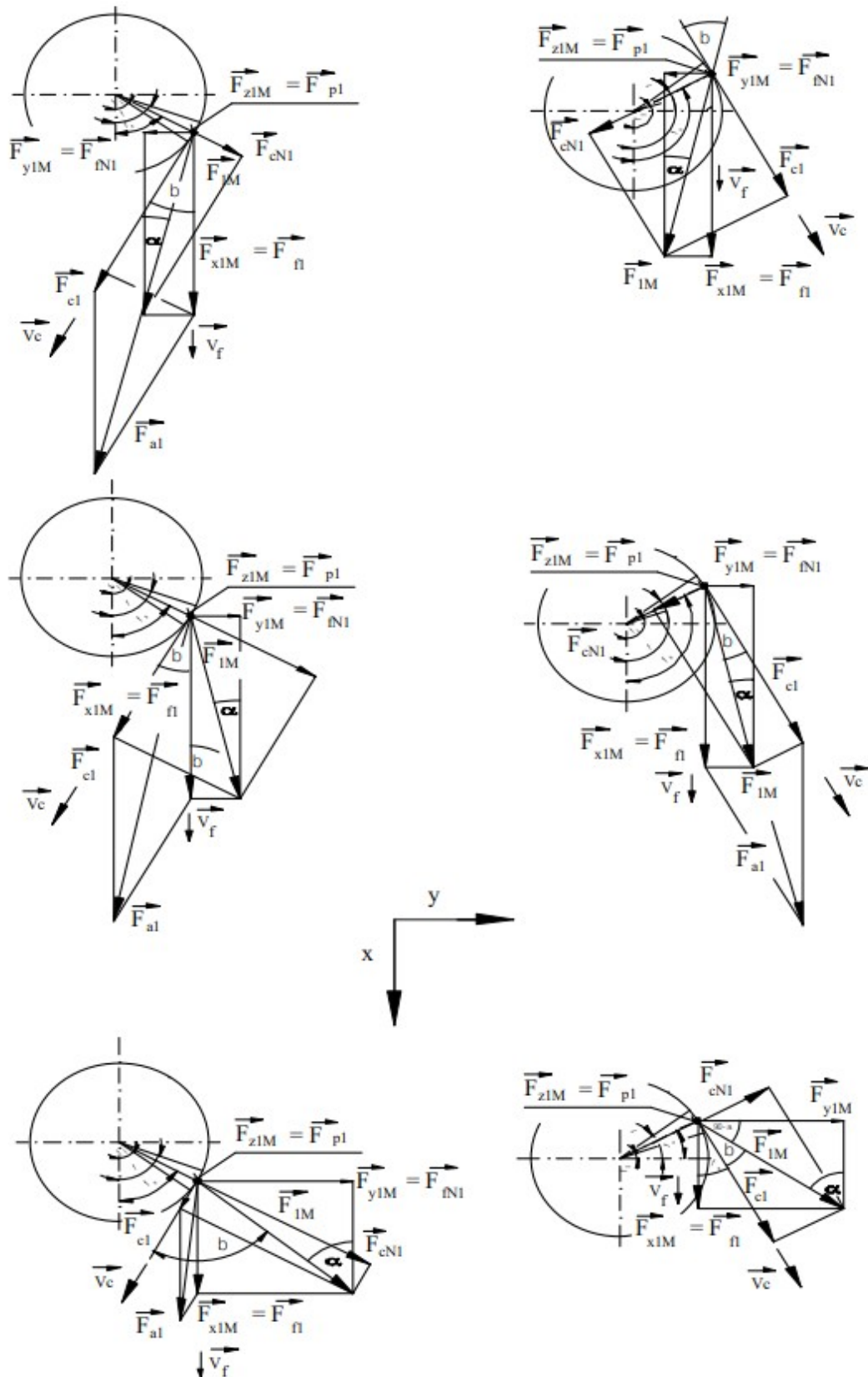
$$dF_h = \frac{\delta F_h}{\delta t} \cdot dt = \frac{\delta F_h}{\delta \gamma_0} \cdot d\gamma_0 + \frac{\delta F_h}{\delta r_\epsilon} \cdot dr_\epsilon + \mu \cdot dF_v + \frac{\delta F_h}{\delta R_a} \cdot dR_a [N], \quad (1.19)$$

$$dF_v = \frac{\delta F_v}{\delta t} \cdot dt = \frac{\delta F_v}{\delta VB} \cdot dVB + \frac{\delta F_v}{\delta r_\epsilon} \cdot dr_\epsilon [N], \quad (1.20)$$

přičemž γ_0 je ortogonální úhel čela, r_ϵ je zaoblení řezné hrany, μ je Newton - Colombův třecí koeficient a VB je šířka opotřebení hřbetu nástroje [6].



Obr. 1.4 Základní rozdělení opotřebení dle [4].



Obr. 1.5 Znázornění směrů sil vzhledem k průběhu opotřebení při sousledném (vpravo) a nesousledném (vlevo) frézování [4].

1.5 Kmitání při obrábění

V průběhu obrábění často dochází ke kmitání. Kmitání jednotlivých prvků může vést ke vzniku vlnitosti a zhoršení drsnosti obrobené plochy, stejně tak ovlivňuje i opotřebení nástroje (vylamování břitu nebo celkové zničení nástroje), opotřebovává stroj a zhoršuje kvalitu pracovního prostředí. Podle působení silových impulzů se kmitání dělí na vlastní, vynucené a samobuzené [4].

1.5.1 Vlastní kmitání

Jedná se o rozkmitání části nebo několika částí soustavy na vlastní frekvenci. Vlastní kmitání může být způsobeno rázem např. při zapnutí spojky nebo záběru nástroje do materiálu. Tyto kmity se udržují pomocí pružných sil, proto se dají obvykle zanedbat, jelikož vlivem odporů se utlumí [4].

1.5.2 Vynucené kmitání

Vzniká, působí-li na soustavu periodicky proměnlivá budící síla a je-li frekvence kmitání s touto silou na stejné frekvenci. Kmitání může být třech typů [4]:

- kmitání není vyvolané řezným procesem (je způsobeno z technologické soustavy):
 - nevyváženost rotujících součástí,
 - setrvačné síly, jež vznikají vratným rotačním či přímočarým pohybem součásti,
 - rotace nesymetrických hřídelí (např. s drážkou),
- kmitání vyvolané řezným procesem:
 - přerušovaný řez,
 - kolísání hloubky řezu,
- kmitání přenášené do technologické soustavy z okolí (interference od jiných strojů).

1.5.3 Samobuzené kmitání

Kmitání vzniká bez opakujících se budících účinků, ale pouze jedním počátečním impulzem, jenž zajistí výchylku z rovnovážné polohy. Potom kmitání probíhá bez přidávání energie z vnějších zdrojů a jeho periodická proměnlivost je závislá na vlastnostech kmitající soustavy. Počátečním impulzem může být náraz nástroje na tvrdou strukturální částici v obrobku. Samobuzené kmitání můžou vyvolat [4]:

- vlivy nesouvisející s procesem řezání:
 - relaxační kmitání (trhavé pohyby při malých posuvech),
 - kmitání kopírovacího systému se zpětnou vazbou,
- vlivy související s řezným procesem:
 - reprodukce předchozí vlnitosti povrchu,
 - postupné oddělování elementů třísky,
 - nestabilita nárůstku,
 - změna součinitele tření v závislosti na rychlosti posuvu.

2 HLINÍK A JEHO SLITINY

Rychlý růst výroby i spotřeby hliníku a jeho slitin je v posledním desetiletí neúprosný zejména z důvodu skvělých mechanických, fyzikálních (tepelná vodivost), chemických (tvorba vrstvy Al_2O_3 jenž zvyšuje odolnost vůči korozi a má tloušťku od 5-20 nm) a technologických vlastností (dobrá schopnost k tváření za studena). V této kapitole jsou rozebrány vlastnosti hliníku a některých vybraných slitin a jejich použití [7].

2.1 Hliník

Hliník (latinsky aluminium) je lehký kov stříbřitě šedé barvy, jehož objevitelem se stal v roce 1825 fyzik Hans Christian Oersted [8].

Tab. 2.0 Vlastnosti čistého hliníku dle [8].

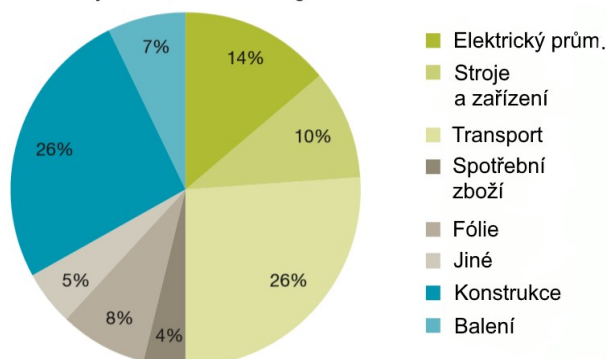
Chemická značka	Atomové číslo	Teplota tání [°C]	Teplota varu [°C]	Hustota [$g \cdot cm^{-3}$]
Al	13	660,32	2519	2,70

V přírodě se s hliníkem lze setkat pouze ve formě jeho sloučenin z důvodu jeho vysoké reaktivity. Z hlediska obsahu hliníku je nejvýznamnější horninou bauxit, pro snížení jeho teploty tání se při průmyslové výrobě hliníku používá minerál kryolit. Během elektrolýzy směsi čištěného bauxitu a kryolitu, která probíhá při 950 °C, se na anodě z grafitu vylučuje kyslík a na katodě se vylučuje čistý hliník. Čistý hliník se používá jako fólie, obalové materiály pro potraviny, střešní krytiny a jako tvarované plechy. Podrobnější data o množství spotřeby pro určité odvětví lze nalézt na obr. 2.0 [8].

Hliník má kubickou plošně centrovanou mřížku, z toho důvodu má velmi dobré plastické vlastnosti za tepla i za studena. Skluzové roviny hliníku jsou {111} a skluzové směry $\langle 110 \rangle$ [7].

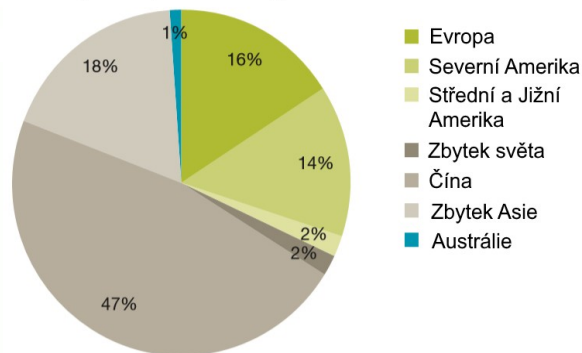
Celosvětová spotřeba hliníku podle koncového použití 2017

Celkový trh 87,5 milionů megatun



Celosvětová spotřeba hliníku podle oblasti 2017

Celkový trh 87,5 milionů megatun



Obr. 2.0 Celosvětová spotřeba hliníku podle odvětví spotřeby a podle oblasti dle [9].

2.2 Mechanické a chemické vlastnosti hliníku

Čistý hliník a jeho neměděné slitiny jsou velmi odolné vůči mnoha prostředím. Právě proto jsou tyto neměděné slitiny často používány ve stavebnictví, chemickém průmyslu, potravinářském průmyslu, automobilovém průmyslu aj. Důkazem o odolnosti vůči atmosferickým vlivům je používání hliníku a jeho slitin s manganem pro výrobu vedení

vysokého napětí a střešních krytin. V mořském nebo lehce alkalickém prostředí je vhodné používat hliníkové slitiny na bázi hliníku a hořčíku (nebo hliníku, hořčíku a manganu). Jelikož u hliníku může dojít k anodickému oxidování, což je povrchová úprava, může být navíc zvýšena odolnost vůči korozi [8, 10].

V porovnání s ostatními kovy má hliník skvělou elektrickou vodivost, která je u čistého hliníku (Al 99,5 %) přibližně $36 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$. Také proto se používají slitiny hliníku (jako např. AlMgSi) a nelegovaný hliník pro výrobu elektrických vodičů. Hliník a jeho slitiny také vynikají svou tepelnou vodivostí, která je stanovena normou mezi 80 a $230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, což se odvíjí od typu a složení slitiny [8, 10].

Změny chemického složení lze dosáhnout nalegováním jedním či více prvky, tím lze zlepšit určité vlastnosti [7]:

- pevnostní vlastnosti – lze zvýšit pomocí Cu a Mg (také známé pod názvem duraly),
- chemické vlastnosti – např. Ag u některých slitin zlepšuje odolnost vůči korozi pod napětím,
- technologické vlastnosti – Si zlepšuje slévárenské vlastnosti (tyto slitiny jsou známy pod názvem siluminy), Sc zlepšuje svařitelnost,
- fyzikální vlastnosti – B zlepšuje elektrickou vodivost čistého hliníku Al.

Aplikace fyzikální metalurgie se z velké části zaměřuje na zvýšení pevnostních vlastností, jelikož hliník má v čistém a vyžíhaném stavu R_m pouze 40-50 MPa při $A=70-90 \%$, což omezuje jeho rozsah použití. Z pohledu fyzikální metalurgie existují tyto metody zvýšení pevnostních vlastností [7]:

- substituční zpevnění mřížky, vytvoření tuhého roztoku α ,
- precipitačním zpevněním (koherentní precipitáty),
- disperzním zpevněním (nekoherentní precipitáty).

2.3 Tepelné zpracování slitin hliníku

Tepelným zpracováním lze výrazně změnit vlastnosti hliníku a jeho slitin tak, aby vyhovovaly požadavkům výsledné kvality. Podle tepelného zpracování se dají tyto slitiny rozdělit do dvou skupin [10]:

- nevytvrditelné slitiny (Al, AlMg, AlMn),
- vytvrditelné slitiny (AlCu, AlMgSi, AlMgZn).

2.3.1 Nevytvrditelné

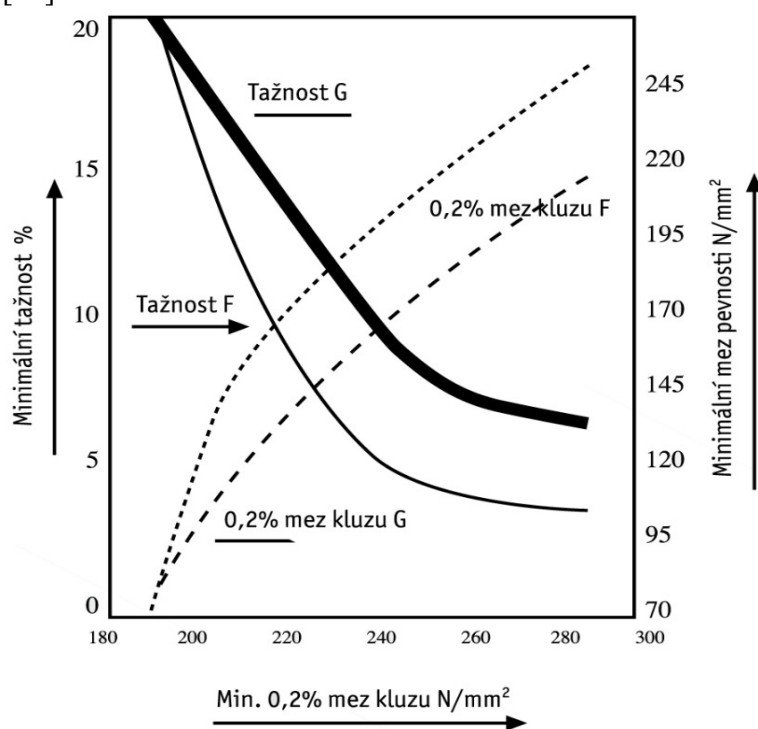
Vycházíme-li ze stavu tváření za studena, tak se nejčastěji využívá těchto tepelných zpracování [10]:

- zotavení žíháním,
- rekrytalizační žíhání.

Uvedená tepelná zpracování se běžně provádějí pouze na prefabrikátech, nikoli na konečných výrobcích.

2.3.1.1 Zotavení žháním

Pracuje-li se se zpracovaným materiálem jenž je vytvrzený za studena, dochází k úbytku tvrdosti beze změn struktury, které by bylo možno snadno pozorovat mikroskopem. Zatímco pevnost v tahu a hranice průtažnosti 0,2 % klesají, pružnost zdatelně roste. Úbytek vytvrzení po tomto tepelném zpracování je velmi důležitý pro tvorbu prefabrikátů s průměrnou tvrdostí. Zotavení žháním silně vytvrzených prefabrikátů lze získat takovou pevnost v tahu, jako při tváření za studena. Stav při zotavení žháním má při určité pevnosti v tahu o trochu nižší mez průtažnosti a o něco vyšší pružnost. Z toho důvodu je vhodnější pro tváření než stav po vytvrzení za studena (viz obr. 2.1). Je tudíž lepší dávat přednost u tvářecích procesů materiálům s tepelnou úpravou zotavení žháním (např. u ohýbání). Zotavení žháním se značí písmenem H, po němž následuje číslice 2 – H2x [10].



Obr. 2.1 Mechanické vlastnosti po zotavení žháním [10].

2.3.1.2 Rekrystalizační žhání

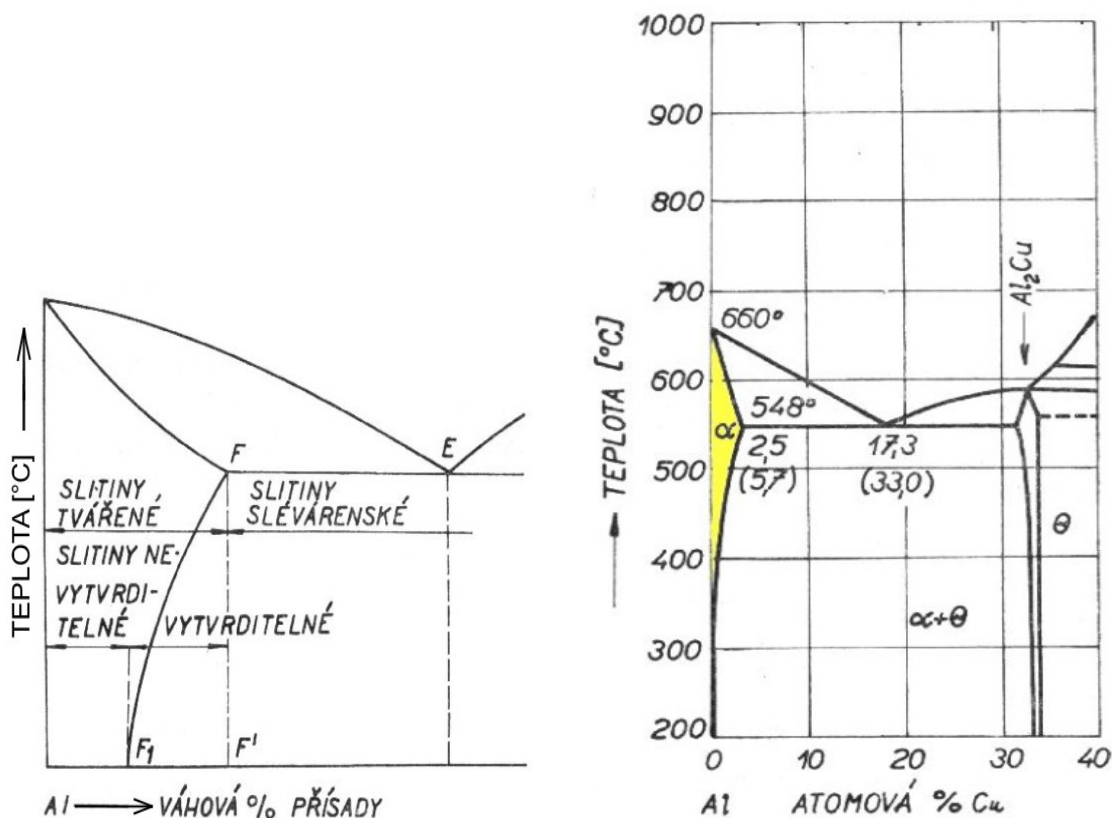
Provádí se za vyšších teplot, než jaké se dosahují při zotavovacím žhání. Dochází zde k úplné rekrystalizaci zrn, což znamená změnu struktury, a tím jakékoli předchozí formování zcela vymizí. Ve výsledku dostaneme slitinu, u které můžeme očekávat, že se pevnost v tahu a tvrdost výrazně sníží, zatímco tažnost a houževnatost bude vyšší. Takto upravená slitina má skvělou formovatelnost. Teplota a doba prodlevy se liší podle upravované slitiny a jejího stavu. Je-li struktura slitiny heterogenní, není problém zaručit heterogeničnost i nadále, jelikož rekrystalizační pochody jsou rychlejší než difuzní změny. Lehce zahřátý stav slitiny se označuje písmenem O a za ním čtyřciferným označením [7, 10].

2.3.2 Vytvrditelné

Pro vytvrditelné slitiny jsou nejběžnější tyto úpravy:

- precipitační vytvrzování,
- žihání naměkko.

Za obvyklých okolností by tato ošetření měli provádět výrobci polotovarů. Rovnovážný diagram hliníku je na obr. 2.2. Vycházíme-li ze stavu měkkého žihání, je následně obvykle nutné s ohledem na oblast použití výrobku provést vytvrzení [10].



Obr. 2.2 Rovnovážný diagram hliníku Al s legujícími prvky dle [7].

2.3.2.1 Precipitační vytvrzování

Při tomto procesu dochází k precipitaci prvků v materiálu za účelem zvýšení tvrdosti. Aby materiál mohl být vytvrzen, musí splňovat následující podmínky [10]:

- slitina ze základního materiálu, do které je, v relativně malém množství, přidán jeden nebo více legovacích elementů,
- při zvýšení teploty musí být dosaženo zvýšené rozpustnosti legovacích elementů přidaných do základní mřížky hlavního komponentu.

Celkové tepelné zpracování se sestává z:

- rozpouštěcího žihání,
- vytvrzení (také stárnutí).

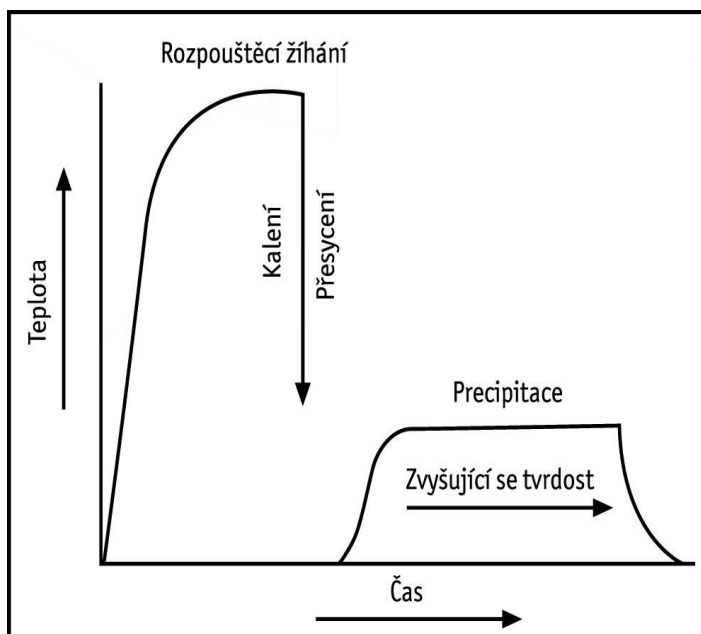
2.3.2.2 Rozpouštěcí žhání

Jedná se o tepelné ošetření, které se u většiny slitin provádí při teplotě 500 °C, jenž přivede materiál do vhodného stavu pro další vytvrzení (viz obr. 2.3). Dochází k rozpouštění základních částí do základní mřížky a tím vzniká více méně homogenní struktura. Tato struktura je stabilní pouze za konstantní teploty, nikoli při teplotě pokojové. Zkalením (většinou ve vodě) homogenní struktury se stav vysoké teploty jakoby zmrazí – jedná se o přesycený stav. Tímto ošetřením se tvrdost nijak výrazně nezmění, ale materiál bude ve vhodném výchozím stavu pro vytvrzení [10].

2.3.2.3 Vytvrzení

Výsledkem rozpouštěcího žhání je nestabilní stav, který má tendenci vracet se zpátky do stabilního stavu. Tímto jevem se dosáhne zvýšení tvrdosti, od toho je vyvozen název vytvrzení. Tato reakce může nastat u vytvrzitelných slitin i při pokojové teplotě (vytvrzení za studena) i při teplotě zvýšené (vytvrzení za tepla, nejčastěji <200 °C). V číselném systému značení je tepelná úprava značena písmenem T a jednou nebo více číslicemi, jenž označují typ tepelné úpravy a jeho průběh. Výsledek tepelného zpracování závisí na typu slitiny a na [10]:

- výšce teploty rozpouštěcího žhání,
- rychlosti kalení,
- výši teploty vytvrzení,
- době při teplotě vytvrzení.



Obr. 2.3 Schématické znázornění celkového tepelného ošetření [10].

2.4 Slitiny hliníku

Nejširší uplatnění je ve formě hliníkových slitin, zejména slitiny s přídavkem mědi a hořčíku, známé též jako dural. Oproti čistému hliníku má výrazně vyšší tvrdost a přitom si zachovává svou nízkou měrnou hmotnost $2,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ i svou odolnost proti korozi. Kromě duralu existuje mnoho jiných slitin hliníku, které mají na rozdíl od duralu, jenž se používá v automobilovém a leteckém průmyslu, příměsi např. s hořčíkem či křemíkem, tyto slitiny se používají ke stavbě strojů, lodí atd. [8].

Široké spektrum hliníkových slitin mají rozmezí pevností od 60 do $530 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$. Pokud je zapotřebí zohlednit i jiný faktor, jako např. nižší modul elasticity vzhledem k oceli, téměř vždy se dá najít vhodné řešení. Rozdělení spotřeby slitin hliníku podle zpracování připadá 21 % na odlitky, 46 % na válcované produkty a 27 % lisované produkty. Zbytek spadá do kategorie ostatní tvářené polotovary. Výborná tvářitelnost umožňuje výrobu profilů a tyčí s téměř jakýmkoli průměrem. Umožňuje také tvorbu prefabrikátů za tepla i za studena [7,8,10].

Slitiny hliníku se dělí se na několik skupin podle množství a typu přídavných prvků na [7]:

- řada 1xxx – Al minimálně 99 % a více,
- řada 2xxx – slitina AlCu,
- řada 3xxx – slitina AlMn,
- řada 4xxx – slitina AlSi,
- řada 5xxx – slitina AlMg,
- řada 6xxx – slitina AlMgSi,
- řada 7xxx – slitina AlZn,
- řada 8xxx – slitina Al s různými prvky.

Tyto slitiny se legují různými prvky s různými dopady na výslednou strukturu a vlastnosti slitiny. Mezi tyto prvky patří např.: Si, Fe, Cu, Mn, Pb, Mg, Cr, Zn, Ti, B, Bi, Ni [7].

B – svou přítomností zlepšuje strukturu, zvyšuje schopnost Al zachytávat neutrony, zvyšuje elektrickou vodivost,

Bi – zlepšuje mechanickou obrobiteľnosť,

Cr – sníží náchylnost růstu zrn u Al – Mg slitin, u vytvrditelných slitin zvyšuje kalitelnost, ztěžuje proces rekrytalizace u Al – Mg – Si a Al – Mg – Zn,

Cu – zvýší pevnostní vlastnosti vytvzováním, sníží odolnost proti korozi, většinou se leguje spolu s Mg,

Fe – je nečistotou v Al, kvůli své malé rozpustnosti je v Al přítomen jako intermetalická sloučenina. U slitin typu Al – Cu snižuje množství Cu v roztoku α a tím snižuje pevnostní vlastnosti. Blokuje růst zrna pokud se disperzně vyloučí částice bohaté na Fe ve struktuře. U slitin typu Al – Cu – Ni zvyšuje pevnostní vlastnosti za vyšších teplot spolu s creepem,

Pb – toxický prvek, zlepšuje mechanickou obrobiteľnosť, ve slitinách Al–Cu–Mg může být příčinou tvorby trhlin za tepla z důvodu jeho segregace při krystalizaci,

Mg – hlavní legující prvek u slitin řady 5, dojde-li k vyloučení precipitátu Mg_5Al_3 nebo Mg_5Al_8 na hranicích zrn dochází k náchylnosti k interkrystalické korozi, běžně se používá jako legující prvek u slitin řady 2 a 6, kde se podílí na zvýšení pevnostních vlastností,

Mn – je hlavním legujícím prvkem u slitin řady 3, kde zvyšuje pevnostní vlastnosti, zjemňuje zrna, zvyšuje teplotu rekrystalizace, zvyšuje citlivost ke kalení, blokuje růst zrn, vyloučí-li se ve formě disperzních precipitátů, a potlačuje vyloučení Fe v destičkovém tvaru,

Ni – má nízkou rozpustnost v tuhém stavu, legují se jím slitiny Al – Cu a Al – Si kde zvyšuje pevnostní vlastnosti zejména při zvýšených teplotách, zlepšuje odolnost vůči korozi a snižuje koeficient teplotní roztažnosti. Není vhodný pro jadernou techniku z důvodu své vysoké absorpce neutronů,

Si – zejména u slévarenských slitin Al – Si, slitiny řady 6 jsou schopny díky Mg_2Si vytvrzení,

Ti – leguje se spolu s B, s nímž zjemňuje strukturu tvorbou fází TiB_2 při krystalizaci, nachází se také např. v drátech pro svařování,

Zn – u tepelně upravených slitin 7 řady spolu s Mg vytvářejí intermetalickou fázi $MgZn_2$.

2.4.1 Slitiny hliníku 7xxx série

Slitiny hliníku sedmé série patří k nejpevnějším mezi hliníkovými slitinami. Hlavním legovacím prvkem je Zn a jeho množství se pohybuje od 1 % do 8 %. Vytvrditelnými slitinami se stávají po přidání hořčíku; poté se přidávají i jiné prvky jako měď a chrom. Duraly s vysokou pevností jsou náchylné ke korozi pnutí, proto se používají v zestárnutém stavu. Využití mají v leteckém průmyslu, v mobilních aparaturách atd. [10].

2.4.2 Typ slitiny hliníku EN-AW 7075 a jeho vlastnosti

Vlastnosti duralu EN-AW 7075 (někdy podle jeho chemického složení $AlZn5,5MgCu$), na které se odkazuje v této práci, lze nalézt v tabulkách tab. 2.1 a tab. 2.2, další materiály a jejich chemické a mechanické vlastnosti lze nalézt v příloze 1. Tato slitina se používá ve vytvrzeném stavu, má sníženou odolnost vůči korozi (vzhledem ke slitině EN - AW 6082, příčinou je legování mědí), je dobře obrobitelná a lešitelná a dominuje svou vysokou pevností vůči ostatním slitinám hliníku [11].

Tab.2.1 Chemické složení duralu EN-AW 7075 podle dle [10].

Si	Fe	Cu		Mn	Mg		Cr		Zn		Ti	Al
max	max	min	max	max	min	max	min	max	min	max	max	-
0,4	0,5	1,2	2	0,3	2,1	2,9	0,18	0,28	5,1	6,1	0,2	Zbytek

Tab.2.2 Fyzikální vlastnosti duralu EN-AW 7075 dle [10].

Min. povolená mez kluzu $Rp0,2$ [MPa]	Min. pevnost v tahu Rm [MPa]	Min. Tažnost [%]	Tvrdość podle Brinella [HBS]	Měrná hmotnost [g/cm ³]	Tepelná vodivost [W/K*cm]	Koef. tepelné roztažnosti [cm ³ *K] (20-100°C)	Modul elasticity [GPa]	Teplota tavení [°C]	Elektrická vodivost při 20°C [ohm*mm ²]	Svařitelnost
440	525	4	155	2,81	1,3-1,6	23,3	72	500-640	17-20	Nízká

Vytvrzení této slitiny dosáhneme pomocí ohřevu na teplotu 115-125 °C po dobu 12-24 hodin a poté zvýšením teploty na 165-180 °C po dobu 4-6 hodin.

Dural EN AW-7075 se dodává odběrateli již tepelně upraven (vytvrzen za tepla) a má tepelné zpracování T6. Je-li nutno materiál tvářet, je vhodné použít stav žíhaný naměkko. Za normálních okolností odběratel nemusí provádět žádné tepelné změny, ale původní vlastnosti materiálu lze získat tepelnou úpravou nebo tvářet ihned po rozpouštěcím žíhání. Doba mezi tvářením a žíháním musí být velmi krátká, jelikož dochází ke studenému tvrdnutí duralu – tvrdnutí při nízkých teplotách [10]:

- žíhání naměkko: 470 až 480 °C, následované kalením do vody,
- rozpouštěcí žíhání: 470 až 480 °C, následované kalením do vody.

3 OBRÁBĚNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN

Prvky, které zlepšují obrobiteľnosť hliníkových slitin jsou měď, hořčík, mangan, zinek, chrom a vřzmut. Na druhou stranu křemík obrobiteľnosť zhoršuje. Z chemického hlediska lze slitiny hliníku rozřadit podle obrobiteľnosti na 3 skupiny:

- nejlépe obrobiteľné – duraly, slitiny Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Zn-Mn,
- obrobiteľné – slitiny hliníku Al-Si, Al-Si-Cu (Si<5 %),
- těžko obrobiteľné – slitiny Al-Si (až 12 %), slitiny s přísadou Ni, Fe, Mn, Cu aj..

Z hlediska mikrostruktury obrobiteľnosť zlepšují prvky, jež tvoří s hliníkem tuhý roztok (to platí do jisté meze, poté vytvářejí měkké sloučeniny jako Mg_2Al_3 , $TiAl_3$ popř. eutektikum jako olovo a vřzmut). Tvrdá eutektika, která tvoří prvky jako Si a Mn, mají na obrobiteľnosť velmi negativní vřiv. Rozdíl v obrobiteľnosti těchto třř skupin by se dal charakterizovat indexem poměrné obrobiteľnosti kde, první skupina má hodnotu 1, druhá skupina 0,67 a třřtř skupina 0,25 [4].

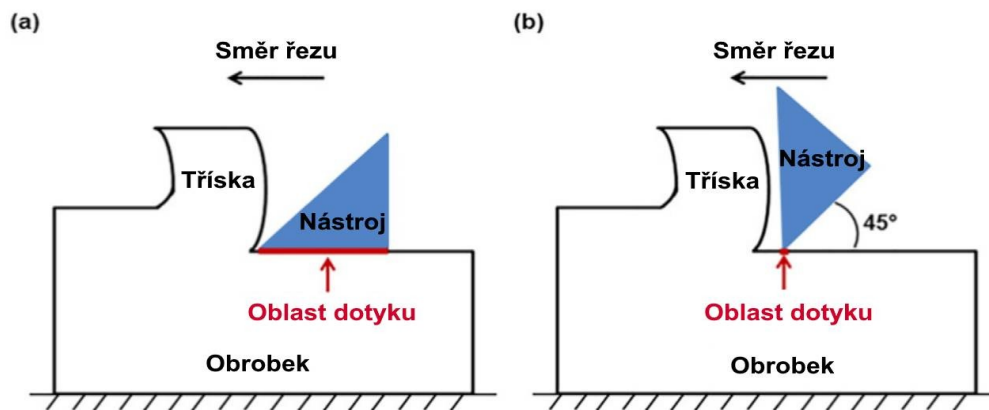
3.1 Povrchové změny slitiny hliníku při obrábění

Při obráběcích operacích vzniká značná třřecí síla mezi nástrojem a obrobkem a ta představuje značnou střiřovou zátěž na oblast slitiny těsně pod nástrojem. Studie ukázaly, že procesy s vysokou střiřovou deformací, jako např. válcování, broušení nebo mechanické leštění, vnášejí rozsáhlé plastické deformace do povrchové oblasti slitin a způsobují tvorbu povrchových deformovaných vrstev slitiny. Povrchové deformované vrstvy jsou charakteristické svou jemnozrnnou strukturou. Je známo, že rozsáhlá plastická deformace vede k vytváření dislokační sítě, která následně vede k zjemnění zrna dynamickou rekrystalizací [12,13].

V průběhu obrábění se zesilující precipitáty ($MgZn_2$), jež jsou přítomny v T6 tepelně upravené slitině, převážně rozpadají v povrchové vrstvě, která je deformována nástrojem. Jak bylo popsáno, když se nástroj pohybuje po povrchu obrobku, generuje se střiřové napětí v povrchové vrstvě obrobku, které ve výsledku způsobuje třřecí dotyk. Také vysoká teplota je generována během střiřové deformace. Kombinace vysokého stupně střiřového napětí a zvýšené teploty způsobuje dynamickou rekrystalizaci, což vede ke zjemnění zrna v blízkosti povrchu obrobku, přičemž jak střiřné napětí, tak gradient teploty klesají od obráběcí plochy směrem do obrobku. Jak teplotní gradient postupně klesá od obráběného povrchu do těla obrobku, rozpuštění precipitátů ve větší hloubce je méně pravděpodobné vřhledem k relativně nižší teplotě. Tyto jemné precipitáty se tak udržují v relativně hluboké oblasti deformované vrstvy a v oblasti objemové části obrobku [12,13].

Z toho lze vyvodit, že na obrobku jsou tvořeny povrchové deformované vrstvy, jež jsou charakteristické jemnými zrny s průměrem menším než 100 nm. Bylo zjištěno že se tloušťka deformované vrstvy zvyšuje s rostoucí hloubkou řezu nebo s řeznou rychlostí nebo s menším řezným úhlem hřbetu nástroje. Toto je spojeno se silami působícími nástrojem na obrobek. Tloušťka deformované vrstvy leží v rozsahu zhruba od 200 do 400 nm v závislosti na parametrech obráběcí operace [12,13].

Na obrobku jenž je obráběn s úhlem hřbetu 0° je tvořena tlustší deformovaná vrstva, než u obrobku, jehož obráběcí nástroj má úhel hřbetu 45° (viz obr 3.0) [12,13].



Obr. 3.0 Řezný proces s různými řeznými úhly hřbetu podle [13].

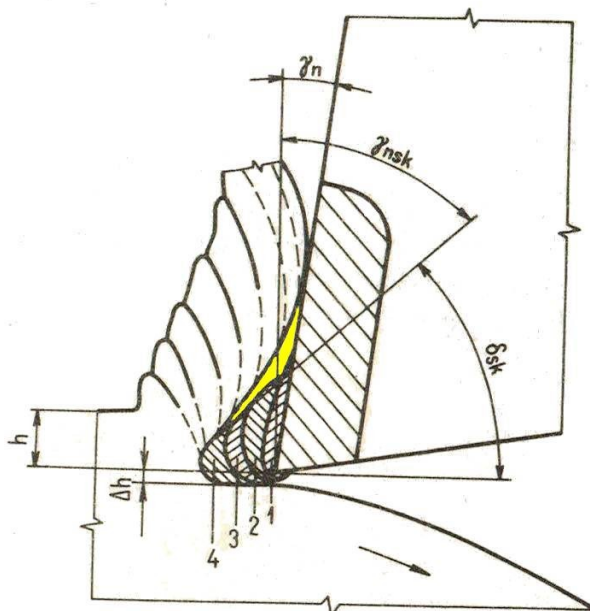
3.2 Charakteristické vlastnosti při obrábění hliníkových slitin

- Malý modul elasticity – obrobený povrch má velkou oblast elastického zotavení, dochází zde k velkému tření mezi nástrojem a obrobkem, což výrazně ovlivňuje životnost nástroje,
- nízký bod tání – tříska se snadno lepí na nástroj při jejím oddělování od obrobku a tím vzniká nárůstek, jenž ovlivňuje kvalitu obráběného povrchu,
- vysoký koeficient tepelné roztažnosti – řezná teplota rychle roste, velikost dílů se zvětšuje s rostoucí teplotou a smršťuje se při ochlazení, což vnáší problémy při řízení rozměrové přesnosti,
- obrobený povrch rychle oxiduje se vzduchem a tvoří povrchovou vrstvu Al_2O_3 , která má vysokou tvrdost (při pokojové teplotě HV2500 až HV3000), opotřebování této vrstvy na povrchu ovlivňuje trvanlivost nástroje [15].

3.3 Nárůstek

Nárůstek se nejčastěji tvoří u hliníku a jeho slitin a je tvořen plasticky zdeformovanými částicemi obrobeného materiálu. Jeho velikost, tvar a stabilita jsou určeny řeznými podmínkami a vlastnostmi obráběného materiálu. Nárůstek je tvrdší než obráběný materiál a částečně funguje jako břit. Postupem času se zvětšuje a tím upravuje úhel řezu, dokud nedojde k rozrušení, kdy se jeho část ulomí a vtláčí se do již obrobeného povrchu, kde vytvoří nerovnost. Tím pádem se nárůstek stále zvětšuje a zmenšuje, při jeho zvětšování ovlivňuje i skutečnou hloubku řezu. Tento efekt má vliv na výslednou drsnost povrchu. Nárůstek se obvykle neobjevuje při řezných rychlostech do $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a nad $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Rychle odcházející tříska zvyšuje tření s rostoucím opotřebením ostří a čela nástroje. Snížením drsnosti povrchu čela lze dosáhnout snížení třecího odporu. Tudiž hrubost čela nástroje a povrch hliníkové slitiny by měl být nižší, než u normálního obrábění [14,15].

Nárůstek lze odstranit lapováním čelní plochy nástroje, použitím vhodné řezné kapaliny a nebo změnou řezných podmínek (řezné rychlosti). Čím pevnější materiál je obráběn, tím menší je velikost nárůstku. V obr. 3.1 představuje h velikost hloubky řezu, Δh relativní zvětšení hloubky vlivem nárůstku, δ_{sk} skutečný úhel řezu a γ_{nsk} zvětšený normálový úhel čela. Pozice 1-4 značí vrstvy nárůstku a žlutě označená plocha vyjadřuje vzduchovou kapsu mezi třískou a čelem nástroje [14,15].

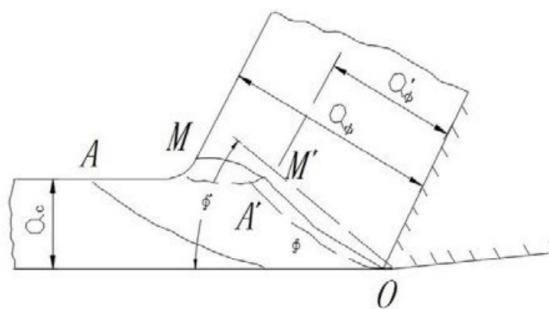


Obr. 3.1 Tvorba nárůstku dle [14].

3.4 Charakteristické vlastnosti při vysokorychlostním obrábění

Při vysokorychlostním obrábění se zvýšenou řeznou rychlostí nemá tříska dostatek času na zdeformování a odchod po čele nástroje. Nejen že se sníží deformační odolnost a deformační práce, ale také většina tepla je odvedena odcházející třískou. Jelikož se sníží deformační odolnost a tepelná deformace je minimální, tak je snadné zaručit přesnost obrábění [15].

Tříska hliníkových slitin má obvyčejně rozvinutý tvar ale s rostoucí řeznou rychlostí se deformace třísky snižuje (koeficient deformace se blíží 1), střížný úhel se stává větším viz obr. 3.2, tříska na čele nástroje zvyšuje působící tlak. Zároveň díky vysoké relativní rychlosti mezi řezným nástrojem a obrobkem se třecí rychlost mezi čelem, hřbetem a obráběným povrchem zvyšuje a třecí teplo se stává hlavním zdrojem řezného tepla, lokální teplota vzrůstá. Tudiž klíčem k tvaru vysokorychlostní frézy je efektivní snížení generování třecího tepla [15].



Obr. 3.2 Deformace třísky při vysokorychlostním obrábění [15].

3.5 Vibrace nástroje

Experimentální studie řezných sil a kvality obráběného povrchu vysokorychlostním frézováním typických hliníkových slitin hranolových obrobků ukazuje, že excentricita

dynamické rovnováhy nástroje je hlavní příčinou roztržení nástroje v osové směru způsobenou vysokorychlostním frézováním. Navíc když je směr posuvu materiálu změněn při vysokoposuvovém frézování, pak zrychlovací-zpomalovací charakteristika stroje způsobí snížený úběr materiálu v rozích, zvýšení řezného úhlu nástroje, zvýšení řezné síly a vibrací při obrábění [15].

Při vysokorychlostních obráběcích procesech je nástroj konzolový, dostředivá síla generovaná dynamickou excentrickou rovnováhou a obráběcí silou je způsobena vibrační nástroje, a fréza vytváří malé množství ohybových deformací, osové vibrace zvlní povrch, což vede ke snížení kvality povrchu. Velikost deformace má přímý dopad na kvalitu povrchu, může být vyjádřena pomocí vzorce 3.0 [15]:

$$\delta = \frac{64 \cdot F \cdot L^3}{3 \cdot \pi \cdot E \cdot D^4} \quad [-] \quad (3.0)$$

kde

F [N] okamžitá síla vzniklá řeznými a odstředivými silami,

L [mm] délka vyložení nástroje (délka břitu a stopky),

E [MPa] modul elasticity slitiny,

D [mm] průměr nástroje.

Ze vzorce 3.0 je zřejmé, že E a π jsou konstantní. Velikost průměru D je limitována konstrukcí nástroje, ale měla by být co nejvyšší, čímž se zaručí snížení ohybové deformace δ . Sníží-li se délka vyložení, dojde ke snížení napětí δ , což je vhodné pro hladký průběh obrábění a zvýšení kvality obrobeneho povrchu. Snížení výkyvů řezné a odstředivé síly může mít přímý dopad na snížení δ [15].

3.6 Volba typu a materiálu nástroje

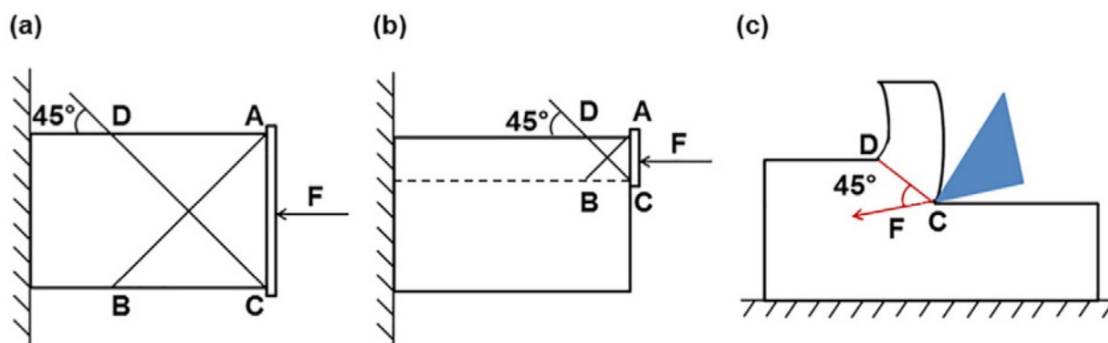
Aby se účinně zabránilo předčasnému selhání vysokorychlostního nástroje, měl by být z materiálu s dobrou odolností proti nárazu, odolností proti opotřebení, se strukturou po tepelné únavě s jemnozrnnými karbidy nebo z jemnozrnné matrice a také s povlakem s vysokou odolností proti opotřebení (příčemž povlak TiAlN není vhodný, jelikož vytváří chemickou reakci s hliníkem). Když je velikost zrna WC snížena pod sub-mikroskopickou velikost, lze zvýšit tvrdost, houževnatost, pevnost, odolnost proti opotřebení atd. Zrno obyčejné tvrdé slitiny má velikost asi 3–5 μm , velikost zrna karbidu je 1–1,5 μm , velikost zrna ultrajemného karbidu může dosáhnout 0,5 μm nebo méně. Ve srovnání s obyčejnou tvrdou slitinou lze tvrdost jemnozrnného cementovaného karbidu zvýšit o více než 2·HRA a pevnost v ohybu může být zvýšena o 600 až 800 MPa.

Pro obrábění hliníkových slitin se doporučuje používat dvoubřité nástroje. Příliš mnoho břítů snižuje místo pro odvod třísky a tím může snadno způsobit, že se tříška přichytí na frézu. Jako prevence nebezpečí rezonance se používají tříbřité nástroje, které zvyšují frekvenci nárazů [15].

3.7 Deformace třísky

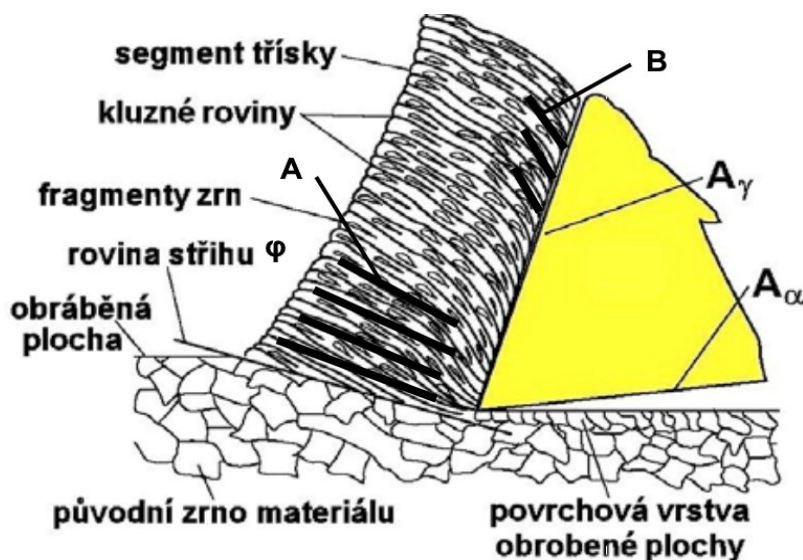
Maximální stříhová deformace se objevuje při působení tlakové síly F při náklonu 45°, jenž působí na obrobek, tj. podél spojnice AB nebo CD, jak je zaznačeno na obr. 3.3 (a). Následně se vytváří stříhové roviny na spojnicích AB nebo CD a materiál se posouvá podél těchto rovin. Nicméně když tlaková síla působí pouze na části obrobku, viz obr. 3.3 (b),

pak maximální stříhová napětí a stříhové roviny vznikají podél AB a CD; ale stříhová deformace vzniká na obrobku pouze na spojnici CD, jelikož stříhová deformace mezi AB je utlumena velkým objemem materiálu obrobku. Obráběcí proces zobrazený na obr. 3.3 (c) je podobný průběhu na obr. 3.3 (b), jakmile je určen směr řezné síly F , maximální stříhová deformace je generována s odchýlením o 45° od směru řezné síly. Tak může být také určena poloha primární smykové zóny, která je nakloněna o 45° vůči řezné síle, jak je to naznačeno pomocí CD na obr. 3.3 (c), což vede ke vzniku kluzných rovin v tříске (viz obr. 3.4) [15].



Obr. 3.3 Směry střížných rovin [15].

Z řezu jsou zřetelné kluzné roviny, označené dvěma čarami A a B. Kluzné roviny typu A jsou přítomné napříč celou tloušťkou třísky. Tyto roviny jsou způsobeny stříhovou deformací slitiny uvnitř primární střížné zóny. Směr náklonu rovin typu A je indikován rovinou stříhu, označenou jako φ . Zvyšující se objem slitiny byl během dalšího obrábění odřezán a silně deformován podél čela stříhu a následně se vytvořila zkroucená tříska, která nakonec odpadla od povrchu obrobku. Kluzné roviny typu B se vyskytují pouze podél okraje třísky, jsou skloněné jiným směrem než roviny typu A a naznačují přítomnost kluzných rovin v oblasti rozhraní nástroje a třísky. Takové kluzné roviny jsou způsobeny výraznou stříhovou deformací v sekundární stříhové zóně jako důsledek tření mezi třískou a čelem řezného nástroje (viz obr. 3.4) [15].



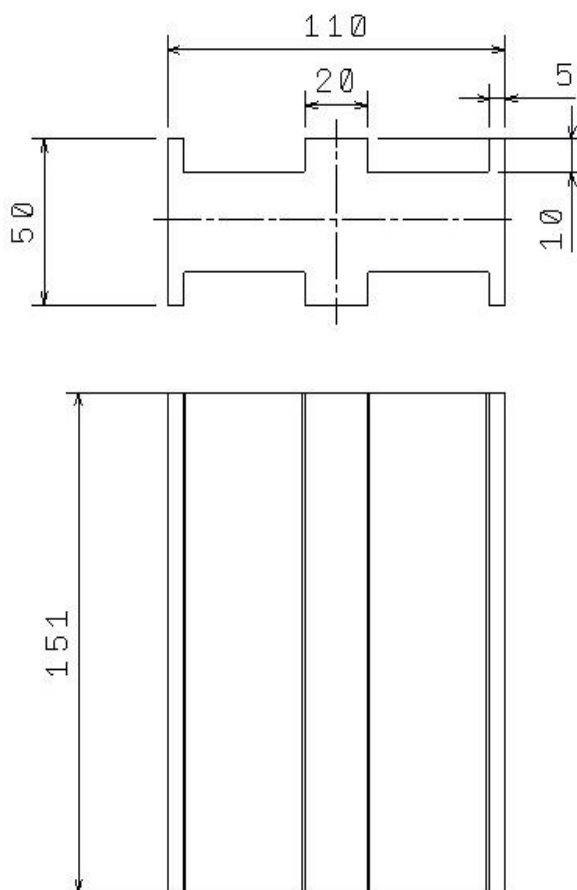
Obr. 3.4 Znázornění deformace třísky dle [1].

4 CAM PROGRAMY

CAM programy jsou v dnešní době téměř nepostradatelné, pokud je požadováno bezpečně a efektivně obrábět. Nejen že tyto programy nabízí možnost model vytvořit (pomocí ploch nebo objemů), ale po naprogramování drah zvoleného nástroje lze ověřit, zda v některém místě nedochází ke kolizi stroje, svěráku nebo obrobku a nástroje (či jeho upínače).

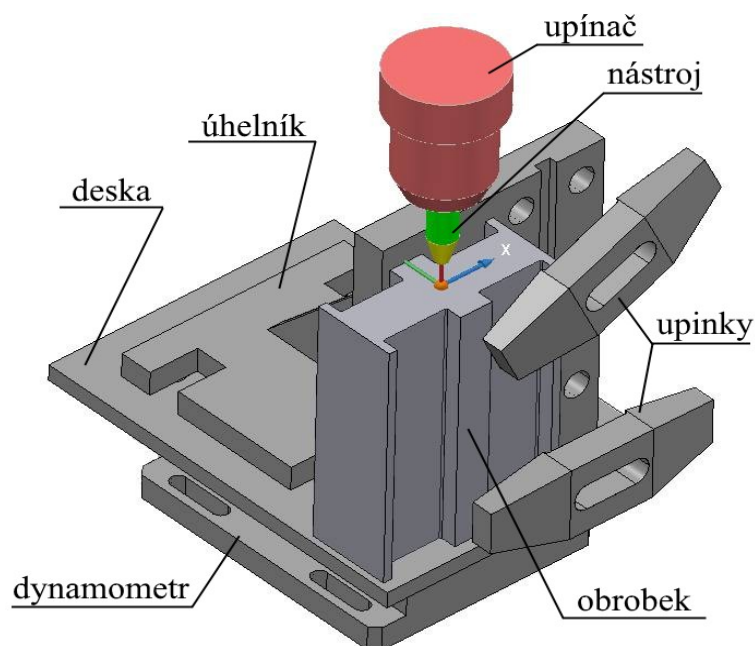
Postprocessor je ve zkratce ovladač, který překládá CLDATA, což jsou již vytvořené dráhy nástroje, do takové formy, aby je řídicí systém stroje po nahrání dokázal vyhodnotit. Každý stroj potřebuje specifický postprocessor, aby byl kompatibilní s určitým CAM programem. Postprocessor nejen překládá CLDATA, která vytvoří CAM program, ale dokáže i spočítat rychlostní limity, velikost záběru, čas obrábění nebo navrhnout nejvhodnější vřeteno pro obrábění dané plochy. Musí také brát v potaz kinematiku stroje zejména u 5-osých frézovacích center, pohyb a rotaci všech os [16].

Jako polotovary pro experiment byl zakoupen přířez z obdélníkové tyče o rozměrech 50x110x151 ze slitiny hliníku se značkou EN-AW 7075. Model výsledné součásti byl tvořen v CAD programu CATIA v5, viz obr. 4.0. Vnitřní zaoblení hran v kapsách není kótováno, všechny hrany mají stejnou hodnotu R1. Upnutý model s dílčími částmi sestavy je na obr. 4.1.



Obr. 4.0 Výkres obráběné součásti.

Pro oba programy platí jisté omezení, co se týče optimálního obrábění rohů. Rohy se obvykle obrábějí lineárním pohybem nástroje, to se ovšem děje při nerovnoměrných záběrových podmínkách. Nejčastěji se obrábí rohy nástrojem s odpovídajícím poloměrem zaoblení špičky k poloměru zaoblení rohu. Taková kombinace ovšem přináší komplikace. Při lineárním pohybu dojde ve zlomovém bodě k zastavení nástroje kvůli změně směru posuvu (za stejných otáček) a tím se namáhá pohon stroje. Tento stav vnáší do místa řezu nadprůměrné třecí teplo a výrazně se zvýší náchylnost k vibracím. Za takové situace je poškozován nástroj i obráběný povrch, a to z hlediska kvality povrchu, drsnosti a dokonce i vlastní integrity, zejména u materiálu s citlivostí na procesní teplo. Použije-li se nástroj se stejným poloměrem zaoblení jako je poloměr rohu, může dojít k extrémním záběrovým podmínkám v porovnání s rovinnými plochami, což vyústí v nerovnoměrné namáhání nástroje a při vysokém přídávku v rohu i v lom nástroje. Z toho důvodu se většinou na zbytkové obrábění používá fréza s menším poloměrem, než je poloměr rohu. Zde je možno použít kruhovou interpolaci a tím obejít zlomový bod a zastavení nástroje se všemi jeho komplikacemi [17].



Obr. 4.1 Rozpoložení dílčích částí sestavy pomocí programu PowerMill.

Obvodové najíždění do řezu

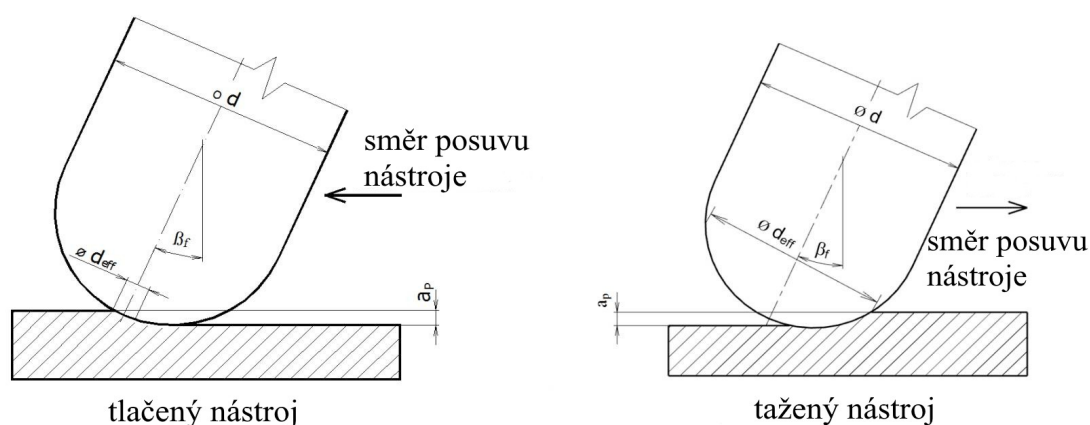
Vždy když břit nástroje vchází do záběru, je vystaven šokovému zatížení, jehož velikost se liší podle druhu frézování, obráběného materiálu a průřezu odřezávané vrstvy. Počáteční kontakt mezi obrobkem a břitem může negativně ovlivnit následný průběh řezání a nebo dokonce poškodit nástroj. Všeobecně je vhodné, je-li kontaktní místo na středu destičky resp. ploše čela, což je ovlivněno radiální hloubkou řezu [17].

Obvodové vyjíždění z řezu

Břítová destička může být výrazně namáhána i při výjezdu z řezu. Jedná-li se o tlakové namáhání, potom je břitová destička ze slinutého karbidu velmi odolná, pokud se ovšem vyskytuje namáhání tahové či ohybové, může dojít k překročení meze pevnosti slinutého karbidu a tím pádem dojde k poškození nebo zničení břitové destičky. Veličina, která rozhoduje, zda k takovému poškození dojde, je velikost radiální hloubky řezu [17].

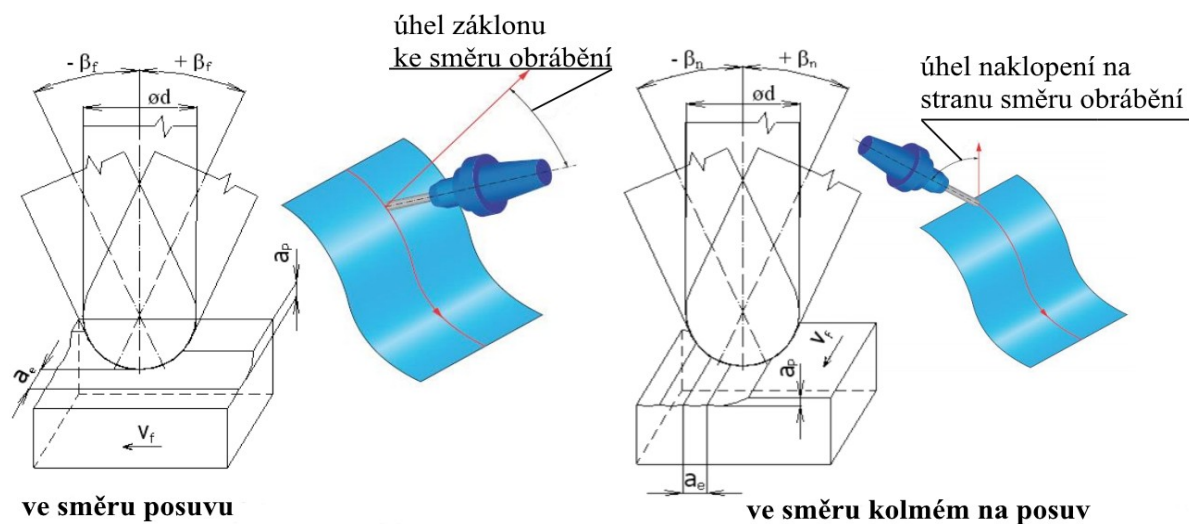
Víceosé frézování

Při konvenčním 3D obrábění je osa nástroje pevná. Interpolace při frézování prostorových ploch je uskutečněna pouze prostřednictvím tří lineárních pohybů, což výrazně zjednoduší způsob programování NC dat, ale při použití kulových nástrojů při dokončování dochází k nepříznivým záběrovým podmínkám. Tyto nevhodné podmínky spolu s nulovou řeznou rychlostí v ose nástroje mají neblahý vliv na celý řezný proces tím, že se nástroj vtlačuje do obrobku. Tím vzniká pěchování třísky, zvyšování teploty řezání a zvýšená tvorba nárůstku, což má za důsledek zhoršení jakosti povrchu a snížení trvanlivosti nástroje (může dojít k vyštípnutí břitu). Tento negativní efekt lze eliminovat víceosým frézováním, tzv. nakloněním nástroje ve směru čtvrté, popř. páté osy (viz obr. 4.3). Optimální naklonění nástroje z hlediska opotřebení břitu, procesní spolehlivosti, přesnosti a drsnosti obráběné plochy bylo zjištěno jako 10° až 20° do směru posuvu (jedná-li se o sousledné frézování) [17,18].



Obr. 4.2 Rozdíl D_{eff} podle směru frézování dle [18].

U tlačeného nástroje je výrazně nižší D_{eff} , což se projeví snížením v_{ceff} a vznikne tak větší oblast primární plastické deformace (viz obr. 4.2). Dochází také ke zvětšování řezných složek sil, konkrétně složky síly působící ve směru vřetená [18].



Obr. 4.3 Naklonění nástroje při 5-osém obrábění dle [18].

4.1 Program hyperMILL

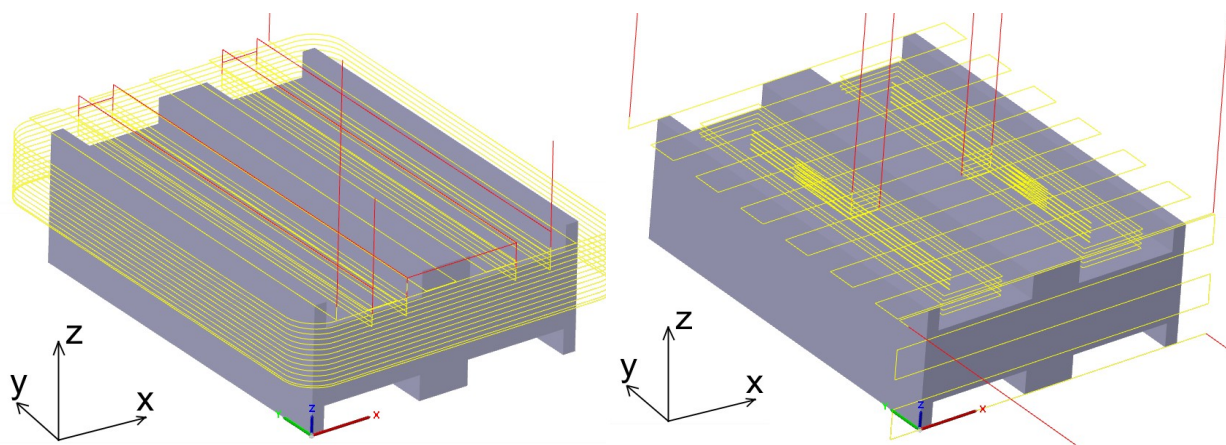
Program *hyperMILL*® je modulární a flexibilní CAM řešení pro soustružnicko-frézovací operace a technologie, jako například vysokorychlostní obrábění (HSC) a vysoko výkonné obrábění (HPC). Dokáže také vytvářet dráhy nástroje pro 2D, 3D a 5-osé frézování [19].

Program je hybridní, tzn. že v něm lze vytvářet jak CAD modely, přes plochy i objemy, tak je může následně i zpracovávat a vytvářet výslednou dráhu nástroje. Jen pro samotné hrubování, což není cílem této práce, lze použít různé metody tvorby kapsy jako např. operaci frézování kapes a operaci frézování kontur na 3D tělese (viz obr. 4.4). Při správném programování se docílí plynulého přechodu sil bez rázů, které by mohly způsobit trhliny na nástroji.

Software se začíná zabývat i problematikou additive manufacturing, které se vyznačuje tím, že se na povrch materiálu navaňuje přídavný materiál. V tomto směru ovšem existuje mnoho problémů zejména kvůli teplotním pnutím.

Program *hyperMILL* umožňuje použití různých obráběcích operací, v nichž jsou odlišné strategie, jak upravit polotovar do finálního tvaru. Nejdůležitější z těchto operací jsou [20]:

- soustružnicko-frézovací operace,
- 2D obrábění,
- 3D obrábění,
- 5-osé obrábění.

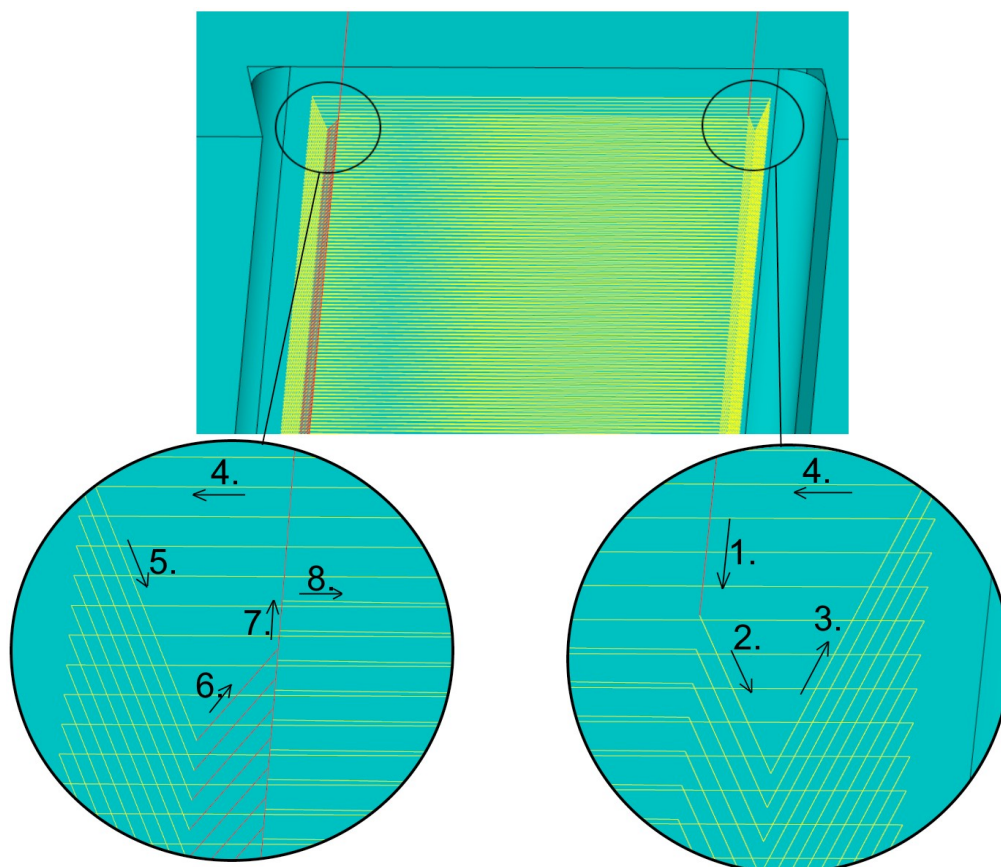


Obr. 4.4 Ukázka hrubování obrobku rozdílnými metodami.

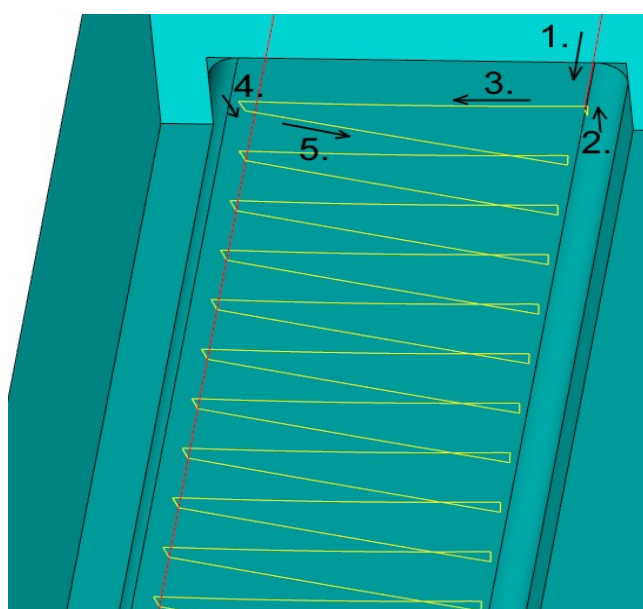
Pro výsledné dráhy v programu *hyperMILL* potřebné pro vyfrézování drah s drsností $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ byly využity metody 5X tangenciální rovinné frézování pro soudečkovou frézu a frézování kavit pro frézu kulovou (dokončování po hladinách Z). Při frézování dna se obvykle používá fréza s nástrojovým úhlem náklonu $\alpha > 45^\circ$, zatímco při obrábění strmých ploch s úhlem $\alpha < 45^\circ$. Jedná se o frézy s inovativní geometrií vyvinuté ve spolupráci s firmou OPEN MIND (více v příloze 4).

Na obr. 4.5 a 4.6 je šipkami naznačen směr pohybu nástroje, jeho nájezdy a odjezdy od obráběného vzorku. Při pohybu využívá program 5-osé frézování a v rozích se naklání tak, aby se špičkou co nejvíce přiblížil k rohu kapsy. Jelikož je ovšem rádius kapsy menší než rádius špičky nástroje, zůstane v rozích zbytkový materiál, který ovšem není důležitý pro silovou analýzu. Tento zbytkový materiál se bere v potaz v ekonomicko-technickém

zhodnocení a proto se upravila dráha soudečkovým nástrojem tak, aby byl obroben i roh kapsy pro reálný strojní čas obrábění celé kapsy. U kulové frézy takové opatření nebylo nutné jelikož kulová fréza se dostala i do rohu.

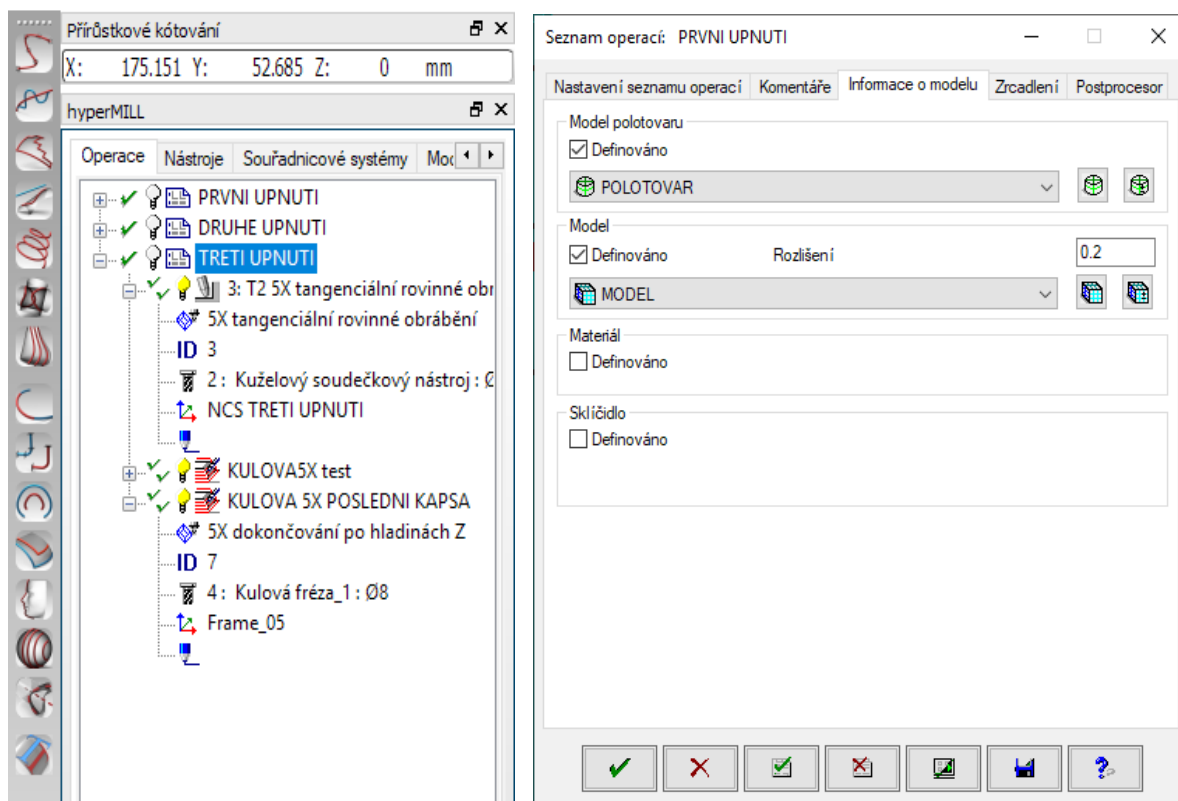


Obr. 4.5 Znázornění drah kulové frézy pomocí programu hyperMILL.

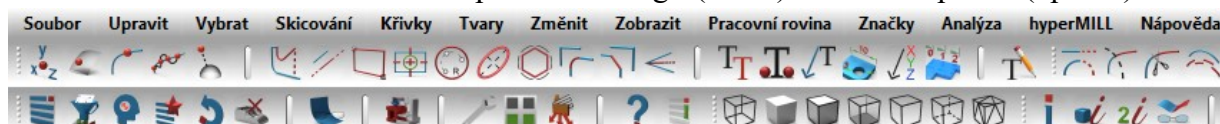


Obr. 4.6 Znázornění drah soudečkové frézy pomocí programu hyperMILL.

V obr. 4.7 a 4.8 jsou zobrazeny části systémového prostředí softwaru hyperMILL, pomocí kterých se specifikuje polotovar a model výsledného obrobku.



Obr. 4.7 Stromová struktura operací a strategií (vlevo) a seznam operací (vpravo).



Obr. 4.8 Hlavní nabídka menu.

4.1.1 Soustružnicko-frézovací operace

Soustružnicko-frézovací modul millTURN, jenž obstarává kombinování jednotlivých frézovacích a soustružnických operací, je plně integrován v programu hyperMILL. Modul millTURN umožňuje využívat soustružnické operace pro hrubování, dokončování, zapichování, vrtání a soustružení závitu. Směry, jež se nabízí k hrubování, jsou: radiálně, axiálně nebo rovnoběžně s konturou. U dokončování je možnost vybrat různé nájezdy a odjezdy nástroje, které zajistí optimalizované obrábění. Lze také zohlednit podkoso a padající kontury [20].

4.1.2 2D obrábění

Programování 2D úloh se provádí pomocí strategií jako jsou: rovinné frézování, obrábění kapes, frézování kontur, obrábění zbytkového materiálu, vrtání a 5-osé vrtání. Veliká výhoda je podpora cyklů řídicího systému stroje, jako např. u frézování kapes. Za pomoci konstrukčních prvků a úprav lze kapsy a díry hospodárně obrábět. Díry je možno určit navrtáním, jednoduchým nebo hlubokým vrtáním, vyvrtáváním, vystružováním a jinými operacemi [20].

4.1.3 3D obrábění

Pomocí strategií obsažených v této operaci lze efektivně obrábět jednoduché i složité díly. Do této operace spadají strategie jako hrubování polotovaru, dokončování po Z hladinách a profilem, obrábění zbytkového materiálu a speciální strategie. Pokud program vyhodnotí kolizi s obrobkem, odsadí nástrojové dráhy do boku. Pomocí funkce pro vysoko-productivní obrábění lze podstatně snížit strojní časy u hrubování polotovaru [20].

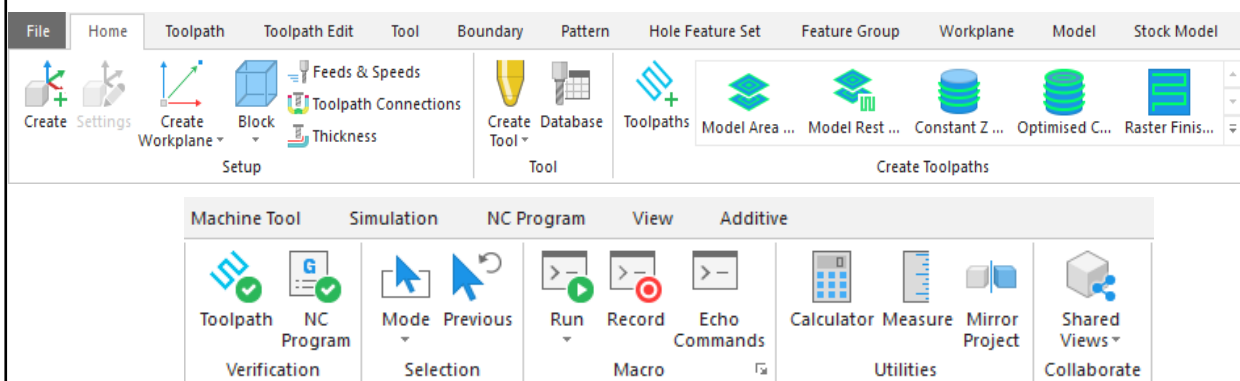
4.1.4 5-osé obrábění

hyperMILL 5AXIS je celosvětově známý díky své pokrokové, procesně bezpečné a uživatelsky jednoduché technologii. V závislosti na kinematice stroje a úkolu obrábění lze zvolit pro dané strategie nejvhodnější způsob 5-osého obrábění jako jsou: frézování s pevným ustavením 3+2, s automatickou indexací a 5-osé souvislé obrábění. Tato operace umožňuje zvolení 3D strategie rozšířené o nastavení pro 5-osé frézování. Do této sekce spadá řada speciálních strategií jako např. 5-osé obrábění čelem, 5-osé obrábění kontur, 5 - osé obrábění řezné hrany a 5-osé odvalování bokem nástroje. Při obrábění velmi složitých tvarů je možno nastavit vodící křivky, podél kterých se nástroj pohybuje. Při nutnosti vrtání hlubokých děr je možno využít strategii 5-osé vrtání, která pracuje s rychlým a efektivním vnořením nástroje bez nutnosti předvrtání a s bezpečným odvodem třísek. Tato strategie spadá do podskupiny vysoko-výkonostního obrábění (MAXX Machining), jejímž cílem je dosáhnout úspory času díky vysoké účinnosti a přitom zachovat vysokou kvalitu povrchu. [20].

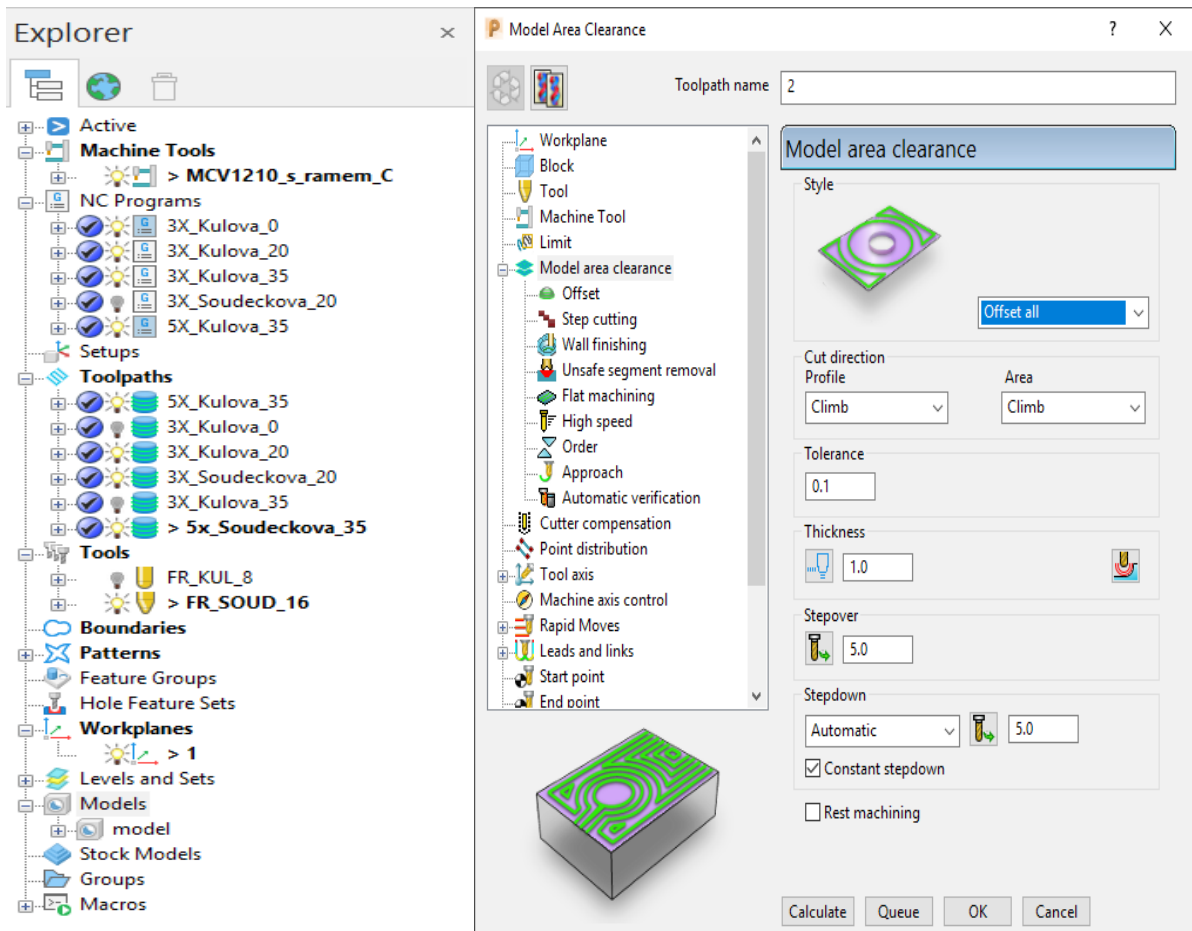
4.2 Program PowerMill

Autodesk PowerMill Ultimate je CAM program vysoké kvality pro programování frézovacích CNC center, včetně možnosti zobrazení obráběcích drah na CNC centrech. Na rozdíl od některých jiných CAM softwarů se liší svou rychlostí, možností pracovat s méně kvalitními 3D daty a možnostmi editování drah, spojek, přejezdů a nájezdů. Jelikož neumožňuje mít otevřena dvě okna s různými součástmi, dokáže pracovat i s datově objemnými CAD modely. Tento program umožňuje 5-osé programování, kde má uživatel možnost úpravy drahy nástroje a detailního nastavení. Strategie pro 5-osé obrábění umožňuje vyklonění nástroje při hrozcí kolizi o nejmenší automaticky vypočítaný odklon. Program také obsahuje verifikaci drah nástroje bez nutnosti spuštění 3D simulace, která by při velikých modelech mohla být časově náročná [21].

Na obr. 4.9 a 4.10 jsou vyobrazeny části softwaru PowerMill a na obr. 4.11 a 4.12 vytvořené dráhy nástroje vytvořené pomocí programu PowerMill.



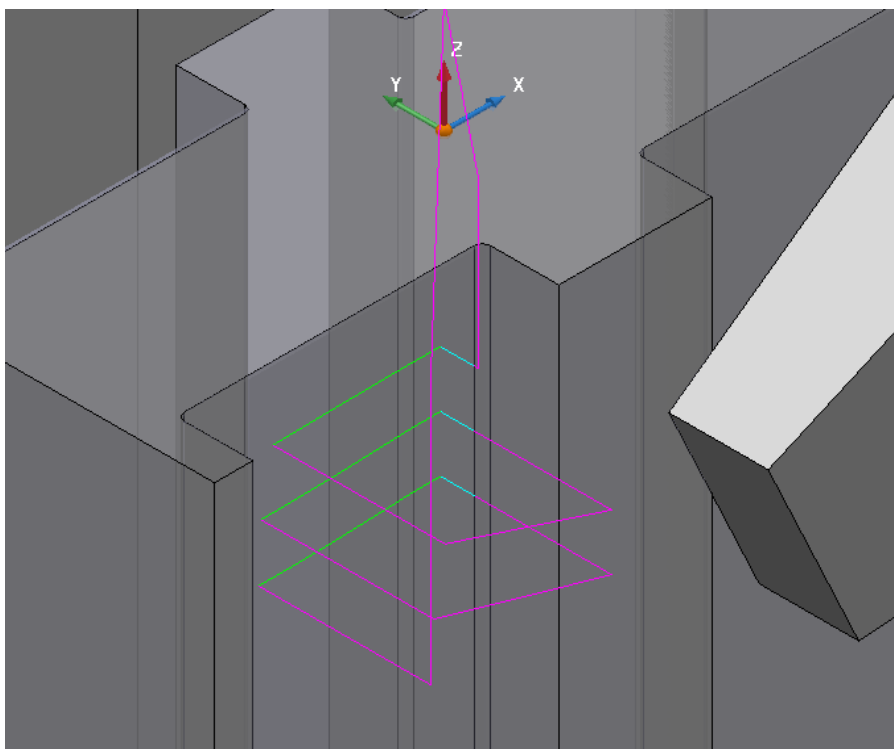
Obr. 4.9 Nabídka menu softwaru PowerMill.



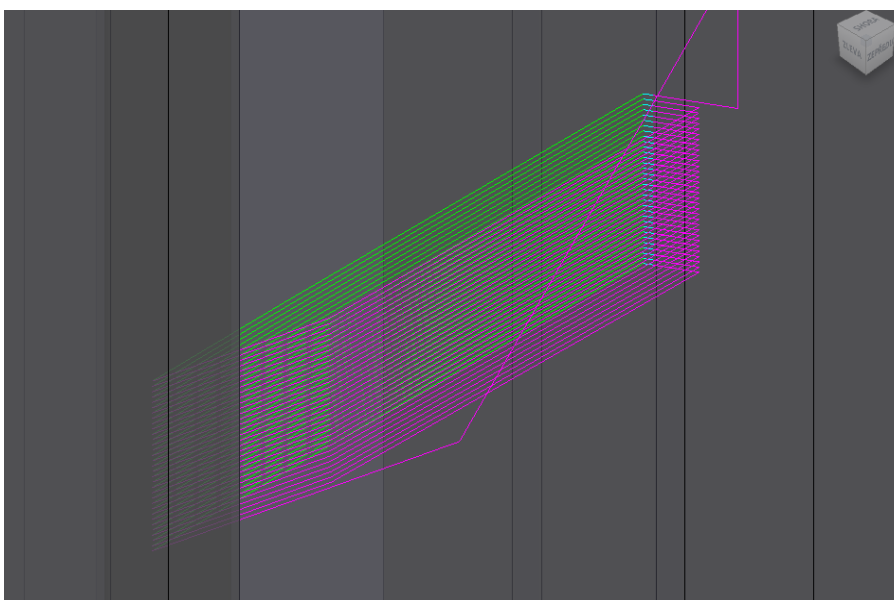
Obr. 4.10 Stromová struktura operací (vlevo) a nabídka vybrané strategie (vpravo).

Software PowerMill obsahuje 11 tématických skupin obráběcích operací, v nichž jsou obsaženy různé strategie vhodné pro různé typy součástí. Program obsahuje stromovou strukturu, do které lze zasahovat. Možnost upravovat nájezdy a výjezdy nástrojů jsou podrobně specifikovány v příslušných kartách. V uvedeném softwaru lze vytvořit téměř jakoukoli dráhu a obsahuje mnoho možností úprav. Do skupin obráběcích operací spadají:

- hrubování,
- obrábění křivky,
- obrábění prvků,
- dokončení,
- vrtání,
- metody vrtání,
- kanálky,
- lopatky,
- žebra,
- soustružení,
- měření.



Obr. 4.11 Znáornění drah soudečkové frézy pomocí softwaru PowerMill.



Obr. 4.12 Znáornění drah kulové frézy pomocí softwaru PowerMill.

4.3 Porovnání programů

Z technologického hlediska jsou oba programy schopny splnit zadání. Software PowerMill se dělí do více podkategorií a nabízí veliký rozsah možností k práci s obrobkem, tím pádem se ovšem stává pro nezaučenou obsluhu nepřehledným a složitým. Co se týče jeho možností pohybu v prostoru a možností výběru metod řešení problému, byly odvozeny z programů firmy Autodesk ve formě prostorové navigační krychle a panelů pod hlavní menu.

Podle mého subjektivního hodnocení je z hlediska úspory času při porovnání lepší program PowerMill, nabízí několik cest pro stejný výsledek, a to jak při specifikaci dané obráběcí technologie, tak i na hlavním panelu pro jednoduchý přístup oprav a úprav nejčastějších chyb jako, např. změny řezných rychlostí či nastavení polotovaru.

V programu hyperMILL není tolik možností zvolení různých cest, zato programování je prostší a mnohem lépe se v něm orientuje. Co se týče programování 5-osých drah nástroje, je vhodnější použít software hyperMILL z důvodu propracovanějšího způsobu využití soudečkových fréz pro tangenciální rovinné frézování.

Součástí software hyperMILL jsou integrované CAD funkce, pomocí nichž je v modelu snadno opravitelné zkosení či zaoblení, aniž by bylo nutné součást upravovat v CAD programu. Tímto způsobem snižuje pracovní čas potřebný na zhotovení nástrojových drah. Program PowerMill tento problém řeší pomocí přídatného programu Autodesk PowerMill Modeling, který je spjatý se softwarem PowerMill Ultimate a umožňuje upravovat model. Programy hyperMILL i PowerMill obsahovaly tvorbu maker, pomocí kterých bylo možno usnadnit tvorbu většího počtu uzavřených jednotlivých tvarů. Software hyperMILL v sobě obsahuje specializovanou strategii pro tvorbu forem pneumatik, která dokáže zredukovat strojní čas výroby, stejně tak i strategii pro soustružení, při které je možné použít specializovaný nástroj ve tvaru kapky a dosáhnout hladkého povrchu a sníženého tepla v místě řezu (porovnávaný software PowerMill takové strategie neobsahuje). Subjektivní výčet pozitivních parametrů je v tab. 4.0.

Tab. 4.0 Subjektivní výčet pozitivních parametrů.

Program hyperMILL	Program PowerMill
Přehlednější prostředí	Více možností specifikování dráhy
Možnost úpravy modelu	Rychlejší přístup k detailním úpravám nájezdů, výjezdů a řezných podmínek
Možnost automatického generování částečně obrobeneho obrobku	Možnost rychlého nahrání stroje a upínače s možností testování vzájemných kolizí
Jednodušší programování	Integrovaný panel simulací ViewMill
Možnost koupení jednotlivých obráběcích skupin	Možnost použití libovolných fréz pro dané obráběcí strategie

Vytvořené dráhy lze porovnat na obr. 6.1, kde jsou dráhy vytvořené jak programem PowerMill, tak softwarem hyperMILL. Z obrázku lze usoudit, že samotné dráhy špičky nástroje se tvoří stejně pro oba nástroje, ovšem možnosti najetí a vyjetí do řezu se liší. Pro kulovou frézu jsou řezné dráhy téměř identické, avšak u soudečkové frézy si lze všimnout rozdílů, jelikož program PowerMill nemá na rozdíl od programu hyperMILL specializované strategie pro obrábění ploch s využitím soudečkové frézy.

5 NÁVRH EXPERIMENTU

Experiment se zaměřuje na porovnání soudečkové a kulové frézy při použití 5-osého frézování tak, aby výsledné povrchy po frézování načisto měly přibližně stejnou drsnost povrchu R_a za použití různého kroku v Z ose. Následně se porovnají řezné síly, jež při frézování vznikají.

5.1 Volba stroje

Některá vybraná technická data portálového obráběcího centra MCV 1210 jsou uvedena níže v tab. 5.0 spolu s fotografií stroje na obr. 5.0, veškeré technické údaje lze nalézt v příloze 3.

Tab. 5.0 Technické data obráběcího centra MCV 1210 [22].

Pracovní pojezd	[mm]	Osa X	1000
		Osa Y	800
		Osa Z	600
Provozní elektrický příkon stroje	[kVA]	45	
Pracovní posuv	[m·min ⁻¹]	20	
Rychloposuv	[m·min ⁻¹]	40	
Maximální zatížení stolu	[kg]	3000	
Maximální rozměry obrobku	[mm]	1000x800x700	
Maximální otáčky	[min ⁻¹]	18 000	
Výkon vřetena	[kVA]	31	
Maximální délka nástroje	[mm]	250	
Maximální průměr nástroje	[mm]	80	
Maximální hmotnost nástroje	[kg]	6,5	



Obr. 5.0 Portálové obráběcí centrum MCV 1210 [22].

5.2 Rozměry a technické parametry nástrojů:

K provedení testu byly vybrány kuželová soudečková fréza a kulová fréza, obě s průměrem špičky 8mm. Tyto frézy byly dodány firmou EMUGE-FRANKEN, jedná se o kruhové koncové frézy, jež umožňují frézování s větší plochou dotyku při hrubování a dokončování. Tyto nástroje jsou používány především při výrobě forem, lopatek turbín a lopatek oběžných kol.

Technickou specialitou těchto koncových fréz je velký rádius ve řezné oblasti příslušného nástroje, jenž umožňuje zcela nové možnosti v oblasti obrábění. Velký rádius simuluje kulovou koncovou frézu s řezným průměrem 12-3000 mm nebo větší dle zakázky.

K dispozici jsou 4 různé typy kruhových koncových fréz:

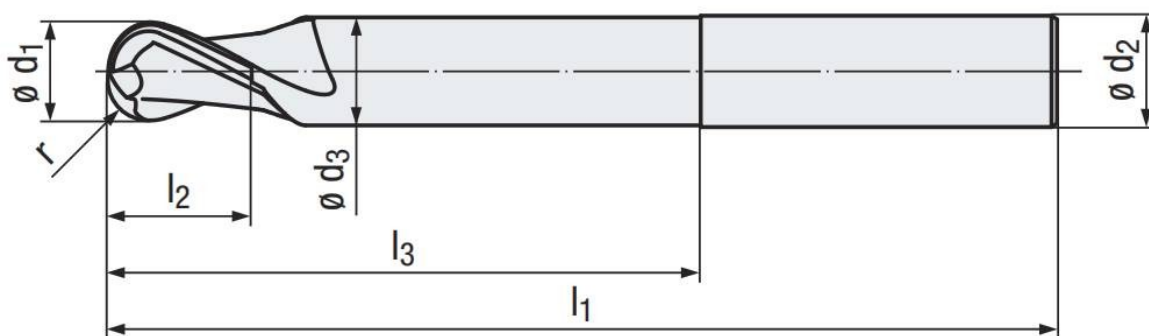
- soudečkový tvar,
- oválný tvar,
- kuželový tvar,
- čočkový tvar.

Další informace o frézách lze nalézt ve vybraných stranách katalogu od firmy EMUGE - FRANKEN (viz příloha 4). Základní rozměry nástrojů a jejich tvary jsou v tab. 5.1 a 5.2 a na obr. 5.1 a 5.2 [23].

Kulová fréza 2550A.008:

Tab. 5.1 Základní rozměry kulové frézy 2550A.008 dle [23].

$\varnothing d_1 \pm 0,01$	$r \pm 0,005$	l_2	l_3	l_1	$\varnothing d_3$	l_4	$\varnothing d_2$	α	β	Z
8	4	7	25	63	7,6	-	8	-	-	2

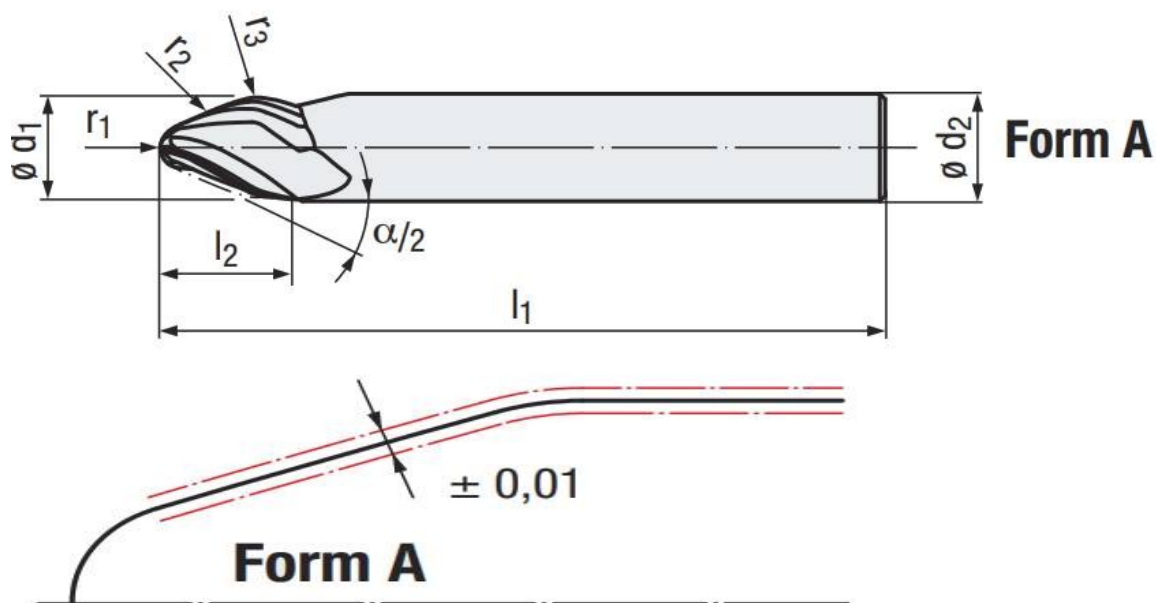


Obr. 5.1 Kulová fréza 2550A.008 [23].

Kuželová soudečková fréza 3540L.1615AA:

Tab. 5.2 Základní rozměry kuželové frézy 3540L.1615AA dle [23].

$\alpha/2$	$\varnothing d_1$	r_1	r_2	r_3	l_2	l_1	$\varnothing d_2$	Z
20°	16	4	1500	8	18,5	108	16	3



Obr. 5.2 Kuželová soudečková fréza 3540L.1615AA [23].

5.3 Doporučené hodnoty a výpočty

Kategorie pro frézování hliníkových slitin je N 1.3 (neželezné kovy), jedná se o tepanou hliníkovou slitinu s mezí pevnosti $R_m \leq 550 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ jako např. dural EN AW - 7022. Tyto informace jsou dostupné v příloze 4. Doporučené hodnoty od výrobce jsou v tab. 5.3.

Tab. 5.3 Doporučené hodnoty od výrobce dle [23].

Doporučené hodnoty					
Hrubovací operace			Dokončovací operace		
Kuželová soudečková fréza	v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	600	Kuželová soudečková fréza	v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	600
	f_z [mm]	0,08		f_z [mm]	0,064
	n [min^{-1}]	11936		n [min^{-1}]	11936
Kulová fréza	v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	900	Kulová fréza	v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	1200
	f_z [mm]	0,136		f_z [mm]	0,096
	a_p [mm]	0,6		a_p [mm]	0,16
	n [min^{-1}]	35810		n [min^{-1}]	47746

Pro tento případ je relevantní pouze frézování na čisto, jelikož hrubování materiálu se řeší pomocí třízubé válcové koncové frézy série 134 od firmy M. A. Ford. Z důvodu omezených otáček stroje a jeho výkonu bylo nutno upravit hodnoty doporučené výrobcem viz tab. 5.4.

Pro výpočet efektivního průměru frézy, jenž je v záběru při obrábění, lze použít vzorec 5.0 za předpokladu, že fréza není nakloněná (normála povrchu je stejná jako osa nástroje),

a pro nakloněnou frézu je možno využít vzorce 5.1 (normála povrchu a osa nástroje svírají úhel záklonu ke směru obrábění β_f) [33,18].

$$D_{eff} = \sqrt{D_3^2 - (D_3 - 2 \cdot a_p)^2} [mm], \quad (5.0)$$

$$D_{eff} = D \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{D - 2 \cdot a_p}{D} \right) + \beta_f \right] [mm]. \quad (5.1)$$

5.4 Vypočítané a zvolené řezné podmínky:

Řezné podmínky mají zásadní vliv na opotřebení nástroje, výslednou kvalitu povrchu obrobku, produktivitu a výšku nákladů na výrobu. Při všech řezných procesech je cílem dosáhnout optima pro efektivitu výroby z hlediska produktivity nebo minimálních ekonomických výdajů. Při použití vysokých řezných parametrů nastane vyšší opotřebení nástroje, ale také se zvýší produktivita, zatímco při použití nízkých parametrů se šetří nástroj a produktivita klesne. Většinou se u řezných podmínek nástroje vychází z hodnot doporučených od výrobce, které se následně upravují pro zvolený stroj a řezný proces. Zvolené řezné podmínky v tabulce 5.4 byly odvozeny z doporučených hodnot od výrobce a upraveny s ohledem na výkon stroje a jeho maximální otáčky.

Ověření, zda má obráběcí centrum dostatečný výkon pro obrábění daného obrobku, řeší vzorec 5.2. Nastane-li stav, kdy je výkon obráběcího centra nedostatečný, tak se primárně redukuje řezná rychlost, jenž zvýší čas řezného procesu, ale zajistí vyšší životnost nástroje. Se zmenšující se tloušťkou třísky ovšem měrný řezný odpor roste, a proto je nutno tento vzorec považovat za orientační [34].

$$P_{c0} = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f \cdot k_c}{60 \cdot 10^6 \cdot \eta} [kW], \quad (5.2)$$

Tab. 5.4 Zvolené řezné podmínky.

Typ frézy	v_c [$m \cdot min^{-1}$]	n [min^{-1}]	a_p [mm]	a_e [mm]	f_z [mm]	D [mm]
Válcová fréza	150	4800	3	10	0,08	10
Kulová fréza	352	14000	0,32	0,5	0,03	8
Kuželová soudečková fréza	503	10000	6,197	0,5	0,03	16

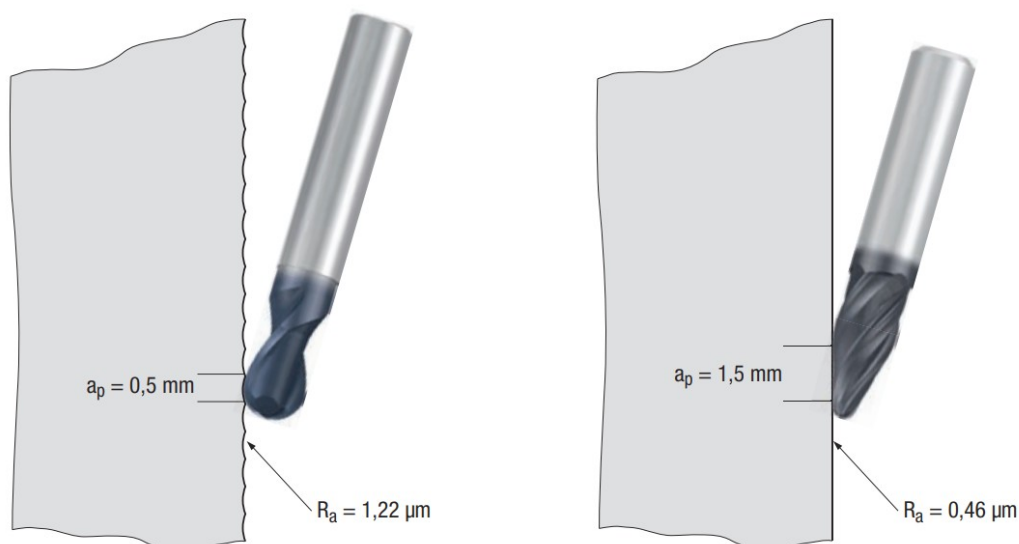
5.5 Teoretický výpočet řezné síly

Řezná síla F_c kterou lze spočítat podle vzorce 5.4 a nebo podle (pro tento případ vhodnějšího) vzorce 5.5, vychází zejména z řezného odporu, jenž se mění s tloušťkou třísky, dále z rychlosti posuvu f a nakonec z hloubky řezu a_p jež se dají upravit pro optimální chod stroje.

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} [N], \quad (5.4)$$

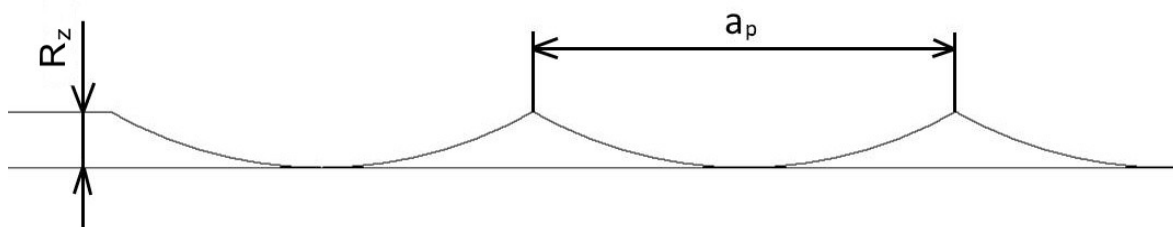
Pro výpočet řezných sil je zapotřebí znát průřez třísky, jež se zjistí dle vzorce 1.9, dále za předpokladu, že je určena měrná řezná síla k_c , lze snadno určit výslednou sílu potřebnou na oddělení třísky od obrobku (dle vzorce 5.5). Pro tento případ lze použít měrný řezný odpor k_c roven $850 N \cdot mm^{-2}$ podle Tlustého (změna měrného řezného odporu je nepatrná, takže ji lze v tomto případě zanedbat) [5].

$$F_c = A_{Dmax} \cdot k_{c11} [N], \quad (5.5)$$



Obr. 5.3 Porovnání kuželové a kulové frézy [23].

Cílem experimentu je dosáhnout povrchu kapsy $R_z = 3,2 \mu\text{m}$ pomocí různých strategií frézování. Aby obě frézy vytvořily stejnou drsnost, bylo potřeba graficky spočítat krok a_p , jenž je u kulové frézy podstatně menší než u soudečkové z důvodu menšího poloměru zakřivení obráběcí plochy (viz obr. 5.3 a 5.4).

Obr. 5.4 Schématické znázornění kroku a_p .

Výpočet teoretické drsnosti vychází z premisy, že obráběný vzorek je naprosto nedeformovaný, ostří nástroje vytváří geometrické křivky a že sestava stroj-nástroj-obrobek je absolutně tuhá [24,25].

Teoretický výpočet vlnitosti (v tomto případě je krok a_p dostatečně malý, aby bylo možno nazývat vlnitost výškou nerovností profilu R_z) lze provést pomocí vzorce 5.7. Pro teoretický výpočet drsnosti R_a pro kulovou frézu lze využít vzorce 5.8 nebo vzorec 5.10 [24,26]:

$$R_z = r_\epsilon \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{a_p^2}{4 \cdot r_\epsilon^2}\right)}\right) [\text{mm}], \quad (5.7)$$

$$R_a = \frac{10^3 \cdot r_\epsilon^2 \cdot (2 \cdot \alpha_A - \sin(2 \cdot \alpha_A))}{a_p} [\text{mm}], \quad (5.8)$$

kde α_A lze spočítat dle vzorce 5.9 jako:

$$\alpha_A = \arccos\left[\frac{r_\epsilon}{a_p} \cdot \left(\arcsin\left(\frac{a_p}{2 \cdot r_\epsilon} + \frac{a_p}{4 \cdot r_\epsilon^2} \cdot \sqrt{4 \cdot r_\epsilon^2 - a_p^2}\right)\right)\right] [\text{mm}], \quad (5.9)$$

$$R_a = \frac{1000 \cdot a_p^2}{18 \cdot \sqrt{3} \cdot r_\epsilon} [\mu\text{m}], \quad (5.10)$$

Tab. 5.5 Vypočítané hodnoty teoretické drsnosti povrchu a efektivního průměru frézy.

	D_{eff} [mm]	R_a [μm]	R_z [μm]
Kulová fréza	6,79	0,8211	3,201
Soudečková fréza	14,44	0,8212	3,201

Z praxe je známo, že při hrubování je standard a_p jako $2/3$ z délky řezné části frézy, radiální krok frézy při hrubování čela přibližně $0,75 \cdot D_3$ (při dokončování $0,1 \cdot D_3$) a při konvenčním frézování je vhodnější používat nástroje s více břitovými destičkami. V tab. 5.5 jsou vypočítané teoretické hodnoty drsností a efektivního průměru, v tab. 5.6 teoretické řezné síly a průřezy třísek.

Měření sil pomocí přímých a nepřímých metod:

- Přímé metody spoléhají na piezoelektrické dynamometry a nebo na tenzometrické měřicí sestavy. Není zde měřena vyvolaná řezná síla ale reakční odezva obrobku, která je následně transformována na síly které působí na nástroj [6].
- Nepřímé metody se měří rozdílem příkonu a výkonu stroje. Při měření se využívá ampérmetru nebo měřících aparatur. Použije-li se tento způsob měření, tak se z odečtených hodnot vypočítá celková síla. Nevýhodou je fakt, že nelze zjistit směr jejího působení [6].

Přibližnou hodnotu výsledné síly lze odvodit ze vzorce 5.11, je-li známý užitečný výkon stroje $P_{už}$ a řezná rychlost v_c [2].

$$P_{už} = F_c \cdot v_c [W]. \quad (5.11)$$

Užitečný výkon lze vypočítat jako rozdíl celkového výkonu stroje a výkonu při chodu naprázdno (viz vzorec 5.12). Poté lze tangenciální složku síly vyjádřit pomocí vzorce 5.13 [2].

$$P_{už} = P_c - P_0 [W], \quad (5.12)$$

$$F_c = \frac{P_{už}}{v_c} [N]. \quad (5.13)$$

Tab. 5.6 Výsledek teoretického výpočtu řezné síly a průřezu třísek.

	Fréza kuželová soudečková	Fréza kulová
A_D [mm^2]	0,1859	0,0096
F_c [N]	158,02	8,16

5.6 Měřicí aparatury řezných sil

Vlastní měření síly zajišťuje dynamometr, ten se může dělit na několik skupin (mechanické, pneumatické, hydraulické, elektrické aj.) přičemž nejčastěji používaný je piezoelektrický pro měření dynamických sil. Tento typ dynamometru využívá snímání deformace piezoelektrického jevu, což je schopnost krystalu generovat na povrchu elektrický náboj úměrný silovému napětí, jež na něj působí. Dynamometr má lineární závislost tvorby náboje na zatížení a při nulovém zatížení zcela vymizí generování náboje. Piezoelektrický jev se může vyskytovat pouze u krystalů, jež nemají střed symetrie

(např. monokrystalický křemen, Seignettovy soli a materiály na bázi titaničitanu barnatého). Základním dílem piezoelektrických dynamometrů je vyříznutá tenká měřicí destička z daného krystalu [2].

Dynamometry se dělí [2]:

- podle počtu měřených složek řezné síly – dynamometry jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření kroutících momentů,
- podle použité měřicí metody (podle způsobu přenosu síly z deformačního na indikační člen). V tomto případě se jedná o dynamometry hydraulické, elektrické, pneumatické, optické, mechanické apod.,
- podle metody obrábění – dynamometry pro soustružení, frézování, vrtání, broušení atd., nebo univerzální dynamometry.

Pro cejchování jiných druhů dynamometrů se nejčastěji používají mechanické dynamometry, jelikož jsou charakteristické svým lineárním vztahem mezi pozorovanou silou a vlastními naměřenými údaji. U tohoto typu dynamometru lze také většinou eliminovat nežádoucí vlivy měření [2].

U kovových tenzometrů se často používá konstantan (slitina Cu-Ni) jako odporový materiál, který má vysoký měrný odpor a hodnota součinitele deformační citlivosti je u tohoto tenzometru $k=2$. Tenzometry se rozdělují podle technologie výroby na drátkové, fóliové a napařované [2].

Další možností je využití tenzometrů polovodičových. Jejich podstatou je využití piezorezistentních vlastností některých materiálů (křemík, germanium) obohacených o jiné příměsi prvků. Měřicí pásek, jenž je vyříznut z daného monokrystalu polovodiče, silně mění svůj odpor v závislosti na deformaci, která na něj působí. Tyto tenzometry jsou známé svým vysokým součinitelem deformační citlivosti, který může nabývat hodnot až o dva řády vyšší než u odporových snímačů. Výroba polovodičových tenzometrů je obvykle nákladná a velmi pracná, z toho důvodu jsou ceny tohoto typu tenzometrů vysoké [2].

Odporové změny se měří pomocí využití můstkového zapojení nebo potenciometricky. Metoda můstková se používá pro měření malých změn odporů, při této metodě má skupina odporů R_1 a R_2 , stejně jako skupina R_3 a R_4 nebo obě skupiny, stejné hodnoty odporu. Při takovém zapojení je zapojení symetrické. Jelikož na deformační člen dynamometru působí předpětí, logicky po zapojení tenzometrů do obvodu vzniká jistá hodnota napětí, která je obvykle vyšší než hodnota napětí vzniklá vlastním měřením. Z toho důvodu se můstek vyvažuje. Tenzometrické aparatury jsou opatřeny vyvažovacími obvody, jimiž se vyvažování provádí. Rozvážení můstku vzniká změnou odporu o hodnotu ΔR , způsobenou deformací tenzometru. Velikost změny odporu se zjišťuje pomocí metody nulování nebo výchylkové metody [2].

Tab. 5.7 Srovnání typů dynamometrů [2].

metoda měření	zkreslení	rozměry	rozsah	přesnost	poruchovost	setrvačnost	cejchování	spolehlivost	náklady	obsluha
piezoelektrická	+	+	+	+	0	++	-	--	--	--
kapacitní	+	-	+	+	0	++	+	0	--	--
uhlíkového odporu	+	+	+	+	0	++	0	-0	+	++
kapalinového odporu	+	+	+	0	0	0	0	0-	+	+
indukční	+	++	+	+	+	++	+	+	+	+
magnetická	+	++	+	+	+	++	+	+	+	+
tenzometrická	+	++	+	+	+	++	+	+	+	++

+ výhodná charakteristika 0 středně výhodná charakteristika - nevýhodná charakteristika

Nejrozšířenější jsou piezoelektrické dynamometry z důvodu jejich přesnosti (viz obr. 5.5). Výstupem z dynamometru mohou být tři silové složky F_x , F_y , F_z a tři kroutící momenty M_x , M_y a M_z . Nejčastěji se používají typy, které měří tři silové a jednu momentovou složku. Kvůli zjednodušení se jejich konstrukce dělí na dvě skupiny, a to stacionární a rotační [6].

Jeden z hlavních výrobců dynamometrů je firma Kistler, jenž vyrábí přístroje pro analýzu řezných sil. Pro experimentální zkoušku této práce byl použit dynamometr Kistler 9257B a nábojový zesilovač 5070A1100. Tento typ zařízení umožňuje měřit tři silové složky ve směrech X, Y, Z. Matematická výslednice se vyjádří vztahem 5.14 [6]:

$$F_1 = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} = F_{c1}^2 + F_{f1}^2 + F_{p1}^2 [N]. \quad (5.14)$$

Silové složky jsou rozděleny do intervalů, ve kterých se zjišťují maxima, ve kterých byl maximální průřez třísky. Z těchto maximálních hodnot se následně spočítá silová výslednice pro daný interval [6].

5.6.1 Cejchování dynamometrů

Preciznost měření sil a momentů je závislá na celé řadě faktorů, ale i na správném cejchování dynamometru. Cejchování dynamometru je srovnávání dat dynamometru se skutečnou naměřenou hodnotou dané veličiny [2].

Dynamometr je zatěžován předem známou měnicí se silou, která se odečte na měřidle, a tím se zjistí výsledná výchylka. Výsledky se zaznamenávají porovnáním změřených hodnot a skutečným zatížením dynamometru v místě složky řezné síly. Výsledkem je vytvoření cejchovní křivky, která graficky znázorňuje závislost mezi řeznou silou a danou veličinou (např. mA, mV, aj.). Z důvodu eliminace určitých nepřesností jako hystereze nebo nelinearity dynamometru se cejchování vykonává v celém rozsahu měření (při zatěžování i při odlehčování). Cejchování vícesložkových dynamometrů probíhá tak, že je nutné cejchovací metodu použít pro každou řeznou složku síly a každý točivý moment. Podle vzájemného ovlivňování složek řezných sil (které se určují odděleným cejchováním) se odvíjí výsledná přesnost měření [2].

Cejchování lze provést na pracovišti, kde se nachází obráběcí stroje. Zatěžující síly se nastavují pomocí závaží a pákového mechanismu. Pro vytvoření větších sil je možno využít ručních lisů (mechanických či hydraulických). Klíčové je dynamometr zatěžovat v místě působení složky řezné síly. Při soustružení je možno použít různé vyložení soustružnických nožů, a proto se složky obráběcích sil F_c a F_f musí přepočítávat v poměru vyložení nože a cejchovacího hranolu. Třmenový mechanický dynamometr se vkládá mezi zatěžovací šroub a cejchovací hranol, deformaci na dynamometru lze odvodit zatěžovacím šroubem [2].

5.6.2 Dynamometr Kistler 9257B

Jedná se o křemíkový dynamometr určený pro měření tří ortogonálních složek síly. Dynamometr má vysokou tuhost a tudíž i vysokou vlastní frekvenci. Jeho vysoké rozlišení umožňuje změření i malých dynamických změn ve velikých silách [27].

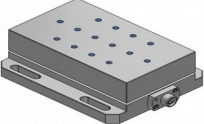
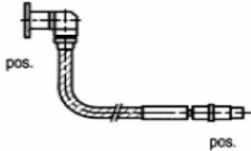

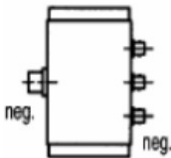
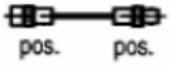
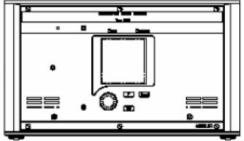
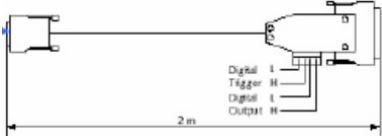
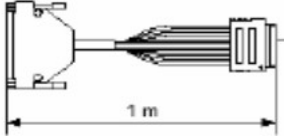

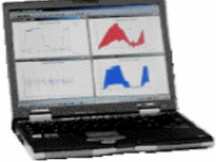
Dynamometr se skládá ze čtyř tří-komponentových silových senzorů umístěných s vysokým předpětím mezi základovou a horní desku. Každý senzor se skládá ze tří párů křemíkových destiček, jeden je citlivý na tlak v ose Z, zbylé dva reagují na střih v X a Y směru. Silové složky jsou měřeny téměř bez posunutí [27].

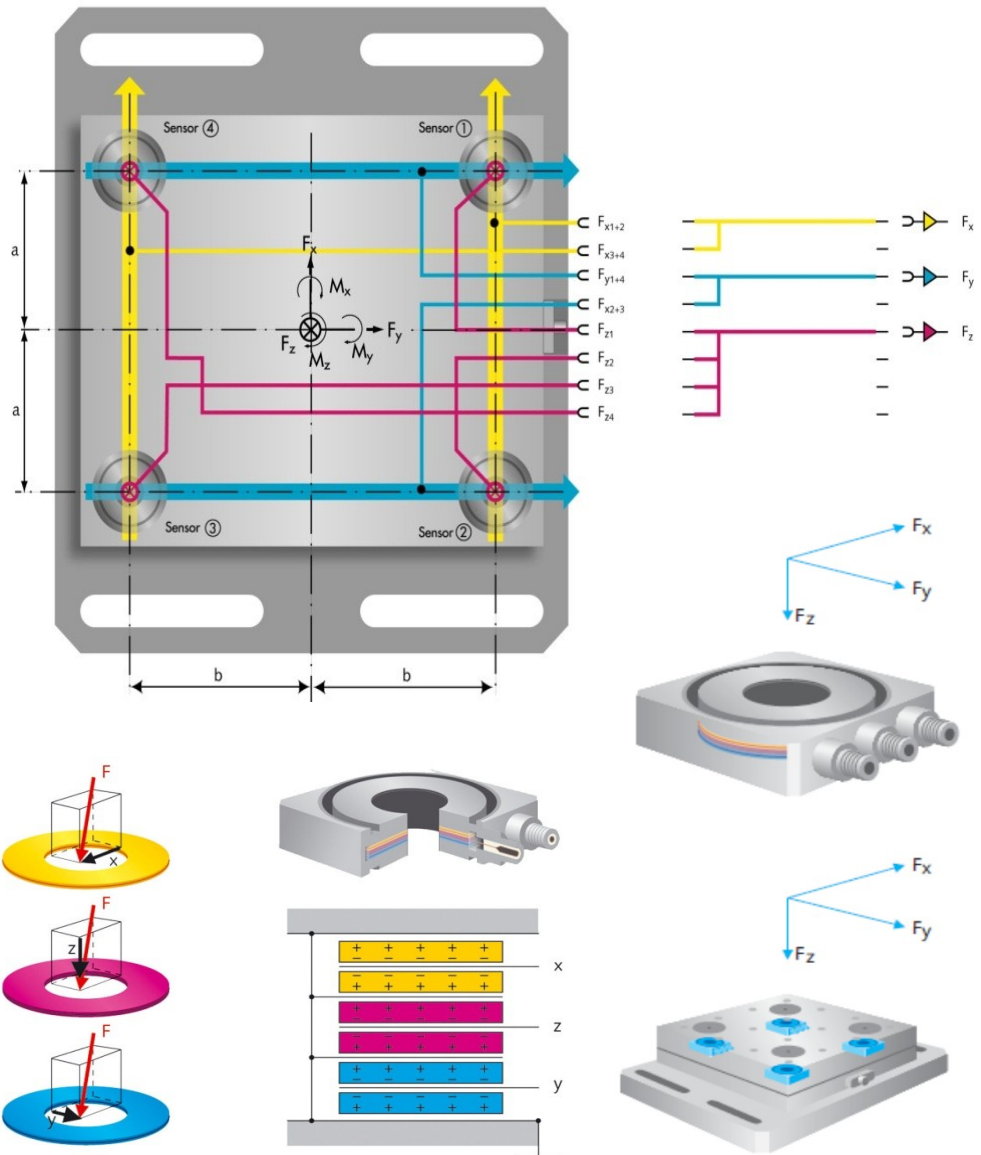
Výstupy čtyř zabudovaných silových senzorů jsou připojeny v dynamometru takovým způsobem, aby umožňovaly vícesložkové měření sil a momentů, které mají být provedeny. Osm výstupních signálů je k dispozici na konektoru s devíti výstupy. Dynamometr je odolný proti korozi a chráněn proti pronikání stříkající kapaliny a řezné kapaliny. Speciální tepelná izolační vrstva je integrována do horní desky, což činí dynamometr z velké části imunní vůči tepelným vlivům [27].

Rozměry dynamometru Kistler 9257B jsou v příloze 5 (a), technické data dynamometru jsou k nalezení v příloze 5 (b) dle [27,28]. V tabulce 5.8 je souhrn použitých pomůcek pro měření síly při experimentu a na obr. 5.6 je vyobrazeno zapojení měřicí aparatury.

K měření sil během tohoto experimentu by bylo vhodnější využít rotačního vícedílného dynamometru z důvodu přesnějšího silového záznamu. Při použití stacionárního dynamometru bylo nutné odfiltrovat od naměřených údajů hodnoty dynamiky stolu.

Tab. 5.8 Použité pomůcky pro měření síly při experimentu [28,29].

Název komponenty	Grafické znázornění
Dynamometr Kistler 9257B	
Propojovací kabel 1631C5	
Prodlužovací kabel 1688B5	
Distribuční box 5407A s konektory typu BNC	
BNC kabel 1601B2	
Osmikanálový nábojový zesilovač 5070A11000	
Propojovací kabel 1500A7	
Redukční kabel 1500B69	
Karta PC-CARD-DAS16/16 2855A5	
Notebook se softwarem Dynoware	



Obr. 5.5 Schéma dynamometru Kistler dle [30].

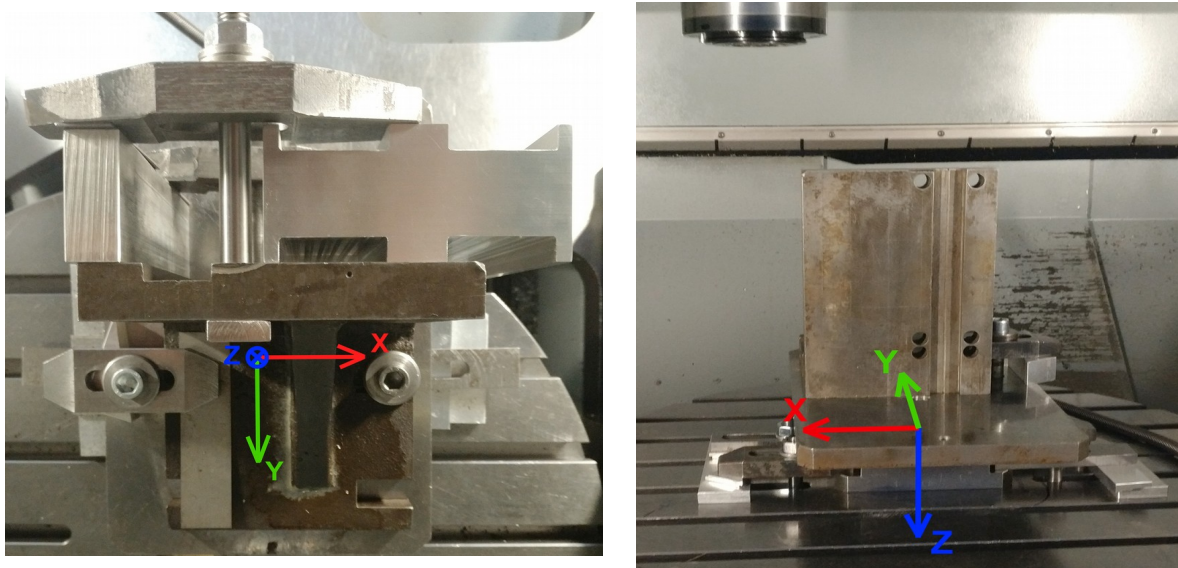
Dynamometr	Prodlužovací kabel	Distribuční box	Propojovací kabel	Nábojový zesilovač	Notebook s programem Dynoware
Typ 9257B	Typ 1688B5	Typ 5407A	Typ 1500A7 Typ 1631C5	Typ 5070A11000	

Obr. 5.6 Ukázka zapojení měřící aparatury Kistler dle [27,29].

6 PROVEDENÍ EXPERIMENTU

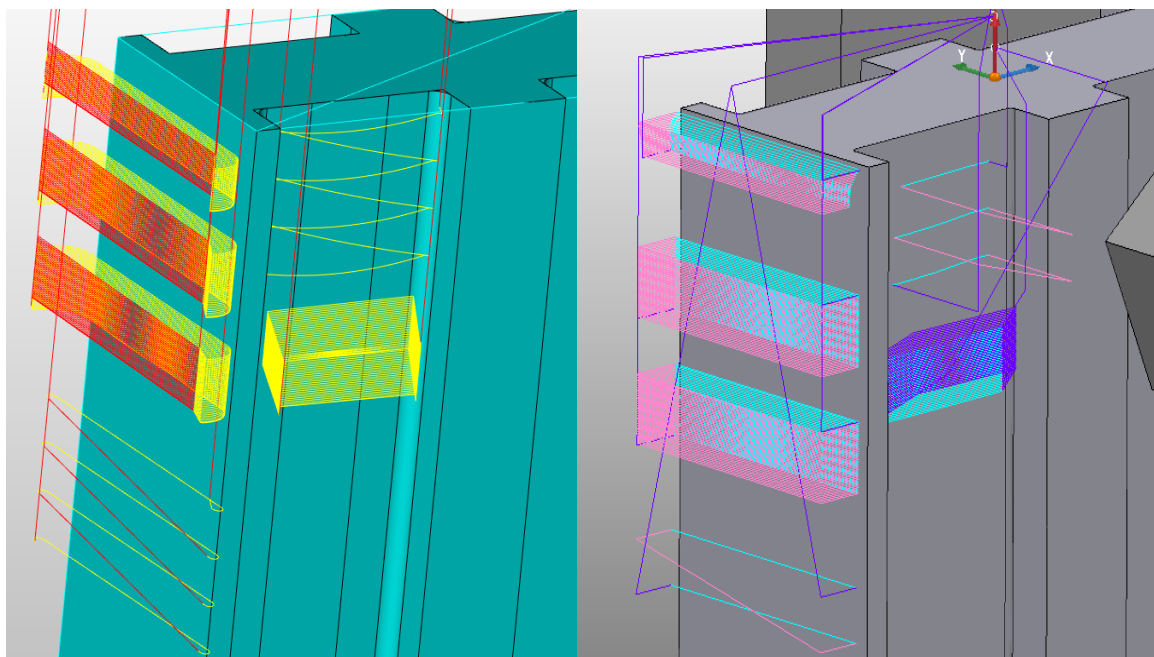
Když jsou známy všechny vstupní parametry experimentu, postoupí se k provedení pokusu, ve kterém je možno zjistit pomocí dynamometru výslednou sílu, jenž působí na obrobek při frézování. Dále je možno posoudit pomocí mikrometru, zda metoda použití soudečkové frézy je vhodnější než při použití kulové frézy z hlediska rozměrových nepřesností způsobených vibracemi.

Experiment byl proveden v dílnách C2/210 VUT v Brně. Před samotným experimentem byly polotovary vyhrubovány kapsy válcovou koncovou frézou série 134 od firmy M. A. Ford s přídávkem na stěnách 0,5 mm, které se následně obráběly načisto na 5-osé frézce. Obrobek by upnut do úhelníku s vyztužením pomocí žebra z důvodu zvýšení tuhosti sestavy a snížení výsledných vibrací při obrábění. Úhelník s vyznačeným souřadným systémem lze spatřit na obr. 6.0. Polotovary i s upínačem obrobku byly usazeny na dynamometr do 5-osé frézky MCV 1210.



Obr. 6.0 Ukázka použitého úhelníku s vyznačeným souřadným systémem dynamometru.

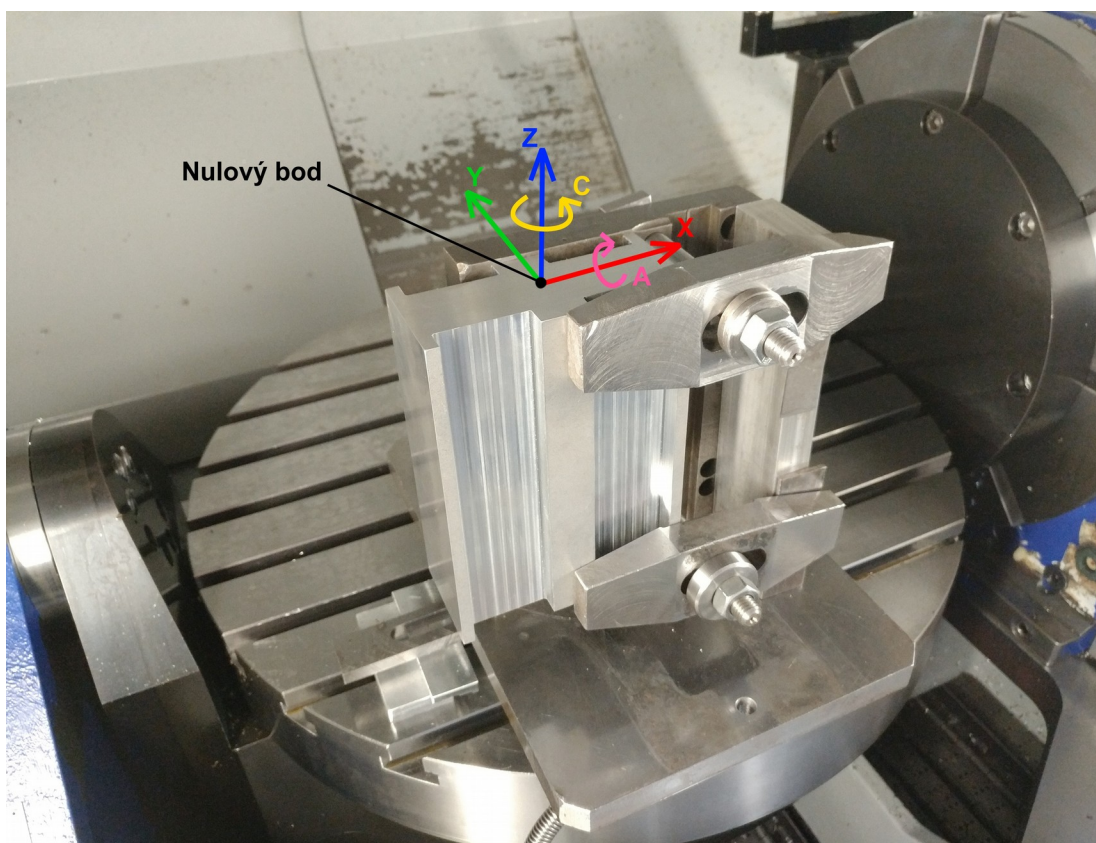
Pro experiment bylo určeno, aby se vytvořil program pro frézování kapsy pomocí programu hyperMILL a programu PowerMill – pro každý software porovnání kulové a soudečkové frézy – pro možnost porovnání způsobu tvoření výsledných drah nástroje (viz obr. 6.1). Nejdůležitějším parametrem bylo zajistit rozměrovou stabilitu a drsnost povrchu, z toho důvodu bylo vhodnější vybrat sousledné frézování.



Obr. 6.1 Znáznornění drah pomocí programů hyperMILL (vlevo) a PowerMill (vpravo).

Dokončovací frézy byly uchyceny do hydraulických upínačů s označením HSK 63A HC 2090 od firmy Pramet (číslo upínače 3122) pro průměr stopky 16 mm a GM 300 od firmy Gühring pro průměr 8 mm. Jelikož se využívalo vysokorychlostního frézování (HSC), bylo zapotřebí upevnit nástroje s malým vyložením tak, aby nedocházelo k nežádoucím vibracím, jež by mohly vést k poruše nástroje. Jak je známo, při vysokorychlostním frézování se většinou nechladí řeznou kapalinou, takže proces probíhal bez chlazení. Tím vznikl problém při simulaci drah nástroje, jelikož při použití kulové frézy docházelo ke kolizi mezi nástrojovým upínačem a obrobkem. Soudečková fréza měla podstatně vyšší hodnotu vyložení, takže nebylo nutné provádět jakékoli změny. Tento problém u kulové frézy byl odstraněn za pomoci využití funkce vyklonění nástroje při hrozící kolizi. Tím byl zjištěn maximální úhel náklonu nástroje β_r , který byl nastaven jako primární, aby byl proces konstantní (zůstal na hodnotě $35,242^\circ$).

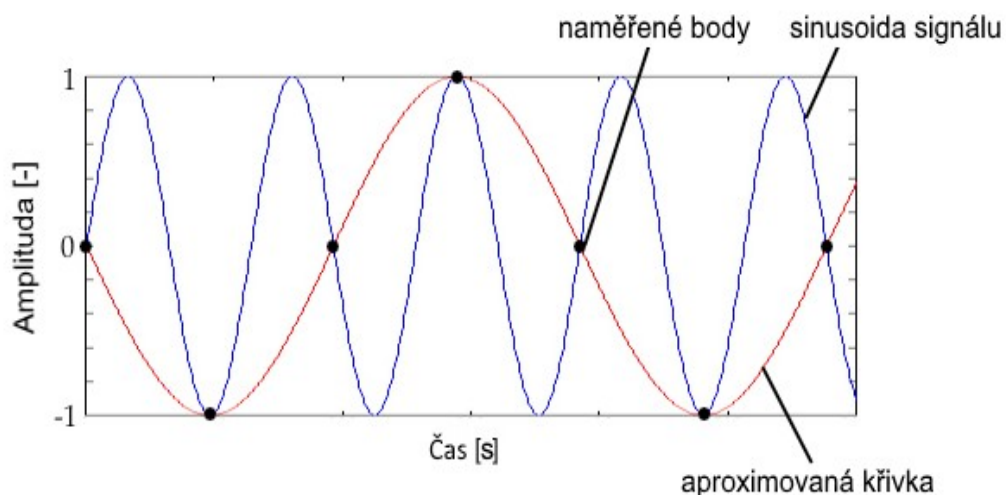
Za účelem vyrovnání obrobku do souřadného systému stroje v rovinách XY a XZ bylo využito indikátorových hodinek. Naměřená odchylka na zmíněných rovinách byla 0,06 mm. Pro stanovení nulového bodu byla použita sonda od firmy Renishaw s označením OMP400, jež má odchylku měření do $1 \mu\text{m}$ (opakovatelnost $0,25 \mu\text{m}$, 2σ). OMP400 používá pro komunikaci mezi sondou a CNC centrem infračervenou technologii, takže je vyžadováno mít čistý výhled mezi sondou a přijímačem. Z toho lze usuzovat, že nastavení nulového bodu do středu horní plochy obrobku bylo přesné viz obr 6.2. Souřadný systém nastavený v CAM programu musel být stejný jako souřadný systém stroje, viz obr. 6.2, aby přepočítávací cyklus nastavil správné souřadnice posuvu nástroje [31].



Obr. 6.2 Souřadný systém stroje.

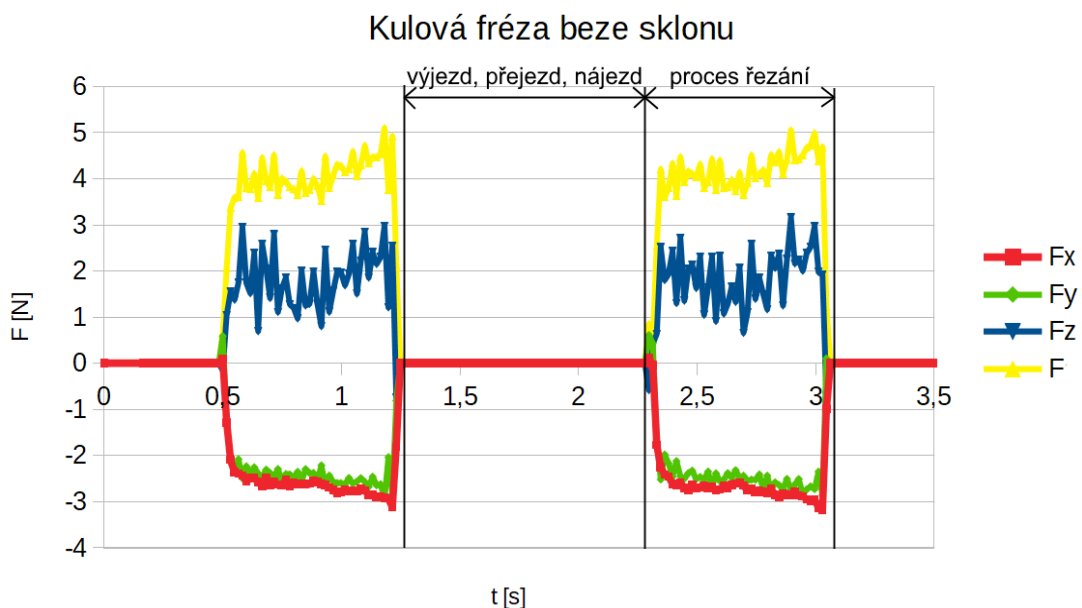
Před samotnou zkouškou bylo nutno provést kinematickou zkoušku stroje pro ověření, zda v žádném místě nedochází ke kolizi (stroj s upínačem, stroj s nástrojem a nebo nástroj s upínačem). Po ustanovení obrobku, jeho upínače a dynamometru byl zahájen řezný proces, kde pro zjednodušení upínání byly dráhy kulové i soudečkové frézy nastaveny uvnitř jedné kapsy. Pro referenci silového výstupu dynamometru bylo nutné provést stacionární měření pomocí 3+2D obrábění na boční straně obrobku viz obr. 6.14.

Vzorkovací frekvence je počet změřených hodnot za jednu sekundu. Tuto frekvenci bylo nutno správně nastavit, aby nedocházelo k zapisování zkreslených hodnot při nízké vzorkovací frekvenci a nebo aby nebylo naměřeno zbytečně mnoho hodnot při frekvenci vysoké (viz obr. 6.3). Vzorkovací frekvence pro tento pokus byla nastavena na 6 kHz a tím bylo při nastaveném čase 50 s získáno $3 \cdot 10^5$ hodnot.

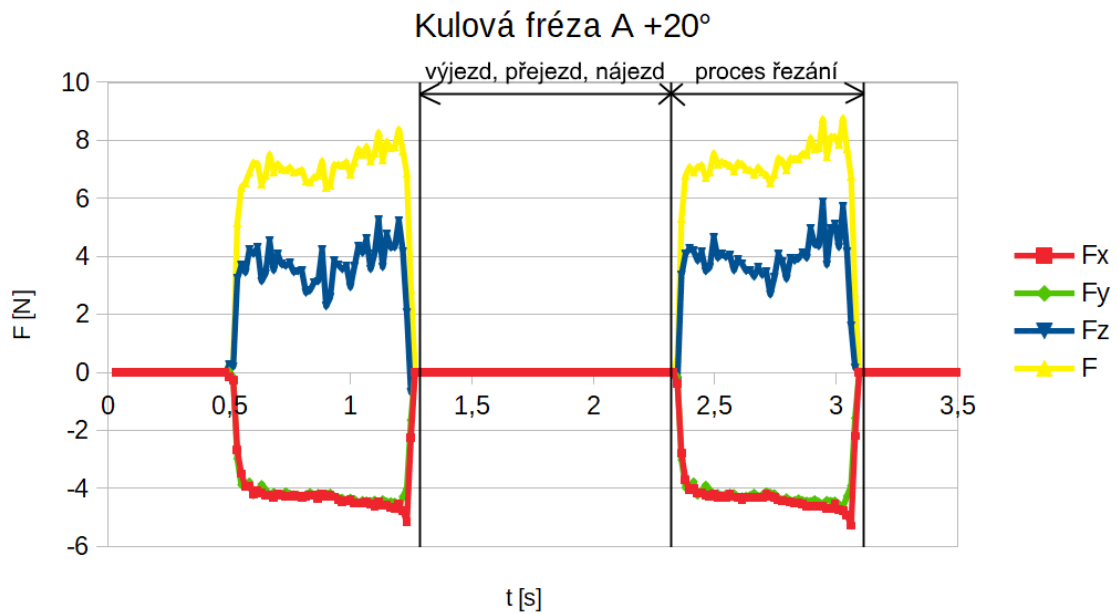


Obr. 6.3 Ukázka špatně zvolené vzorkovací frekvence dle [32].

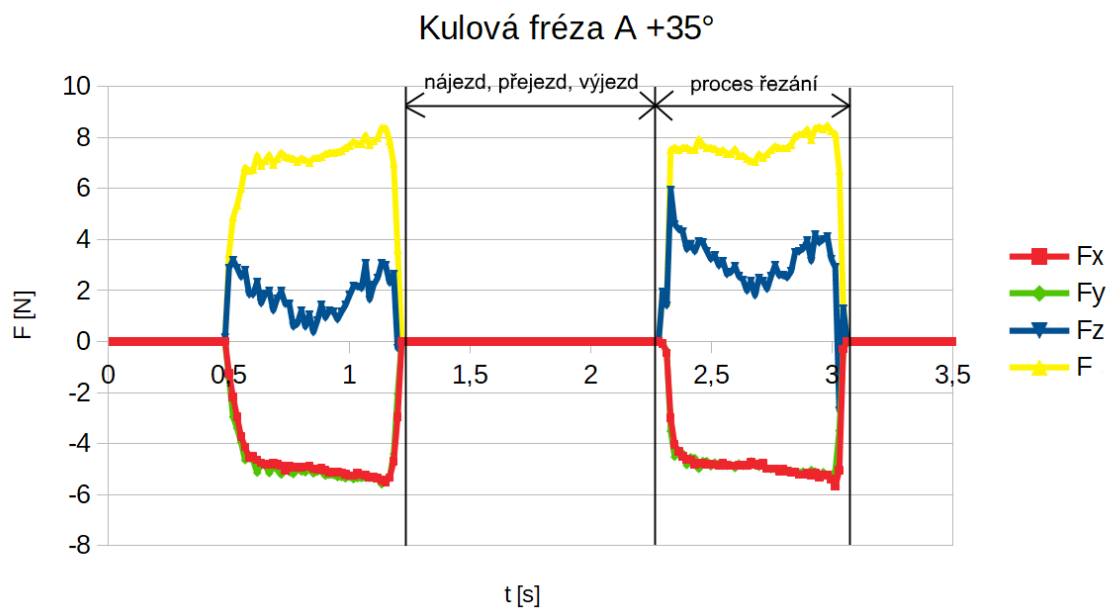
Silový výstup z dynamometru byl do jisté míry ovlivněn hodnotami naklonění stolu, které bylo nutno odečíst (zejména u 5-osých strategií) a dále vzniklým silovým momentem, jenž působil v ose Z z důvodu použitého upnutí vzorku. Ze silových průběhů níže lze vyvodit, že se vskutku jednalo o sousledné frézování, jelikož u frézování kulovou frézou bez naklonění lze spatřit síly směřující do záporných směrů v osách X a Y, tudíž byl vzorek namáhán silami dle obr.1.0. U silových výstupů 3+2D strategií (viz obr. 6.4 – 6.6 a 6.9) je nutno brát v úvahu změnu os z důvodu frézování boční stěny (dojde k záměně X a Y osy, je-li bráno 5-osé frézování jako referenční prvek).



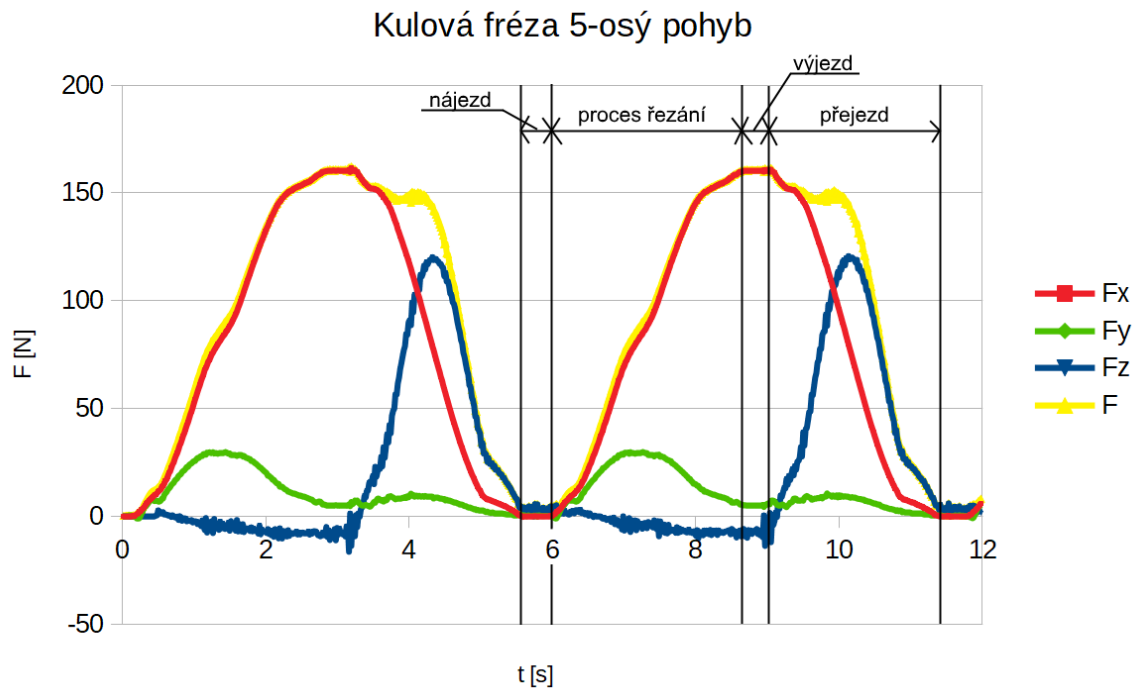
Obr. 6.4 Silový průběh pro kulovou frézu beze sklonu.



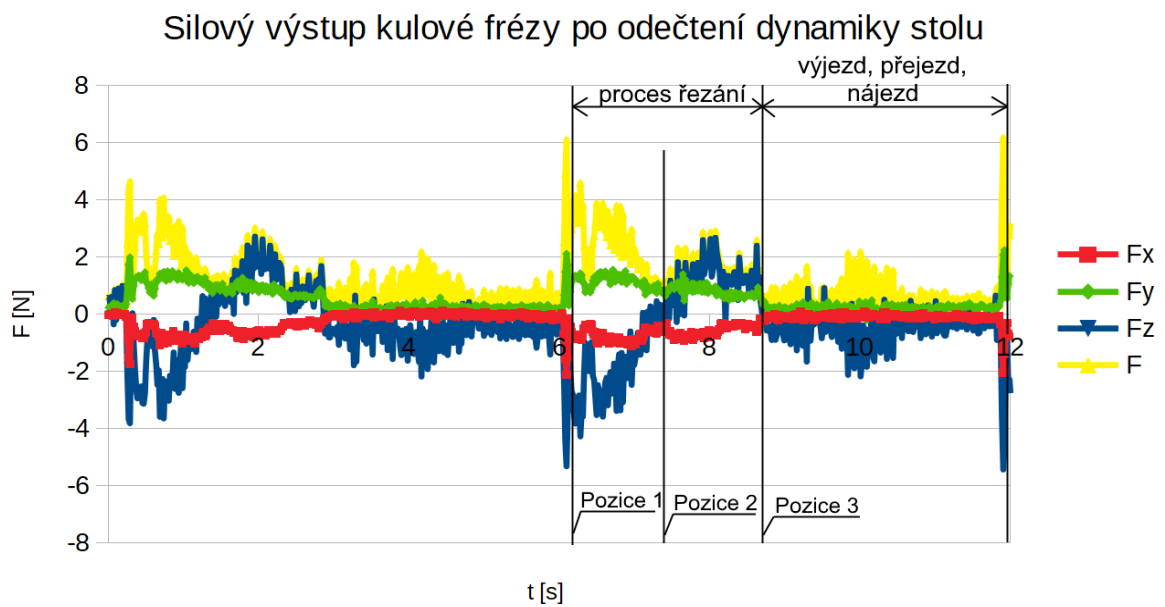
Obr. 6.5 Silový průběh pro kulovou frézu se sklonem 20° v ose A.



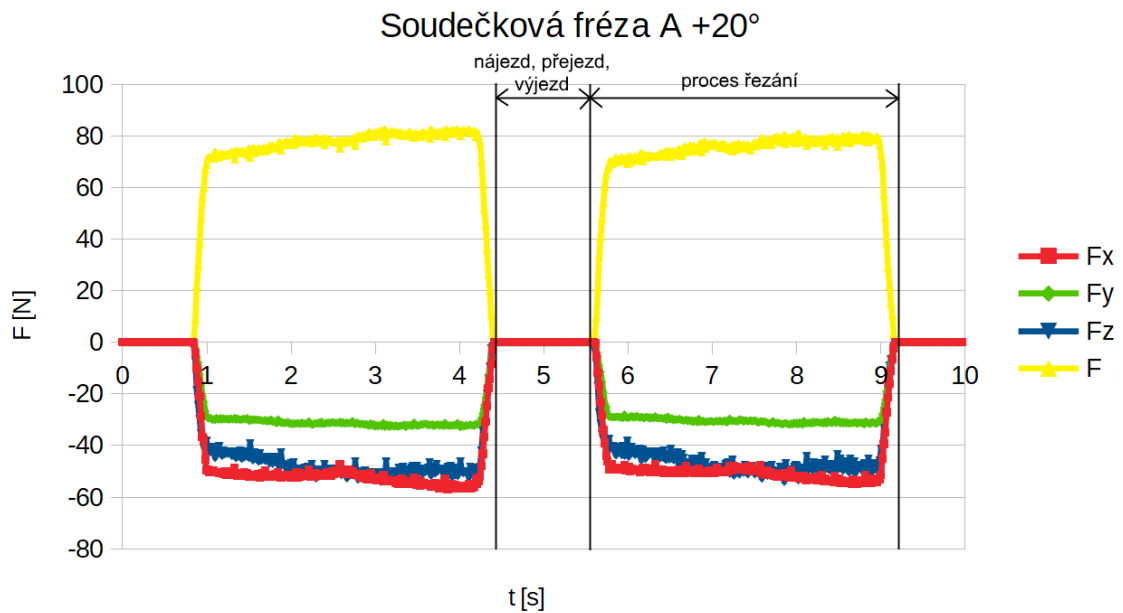
Obr. 6.6 Silový průběh pro kulovou frézu se sklonem 35° v ose A.



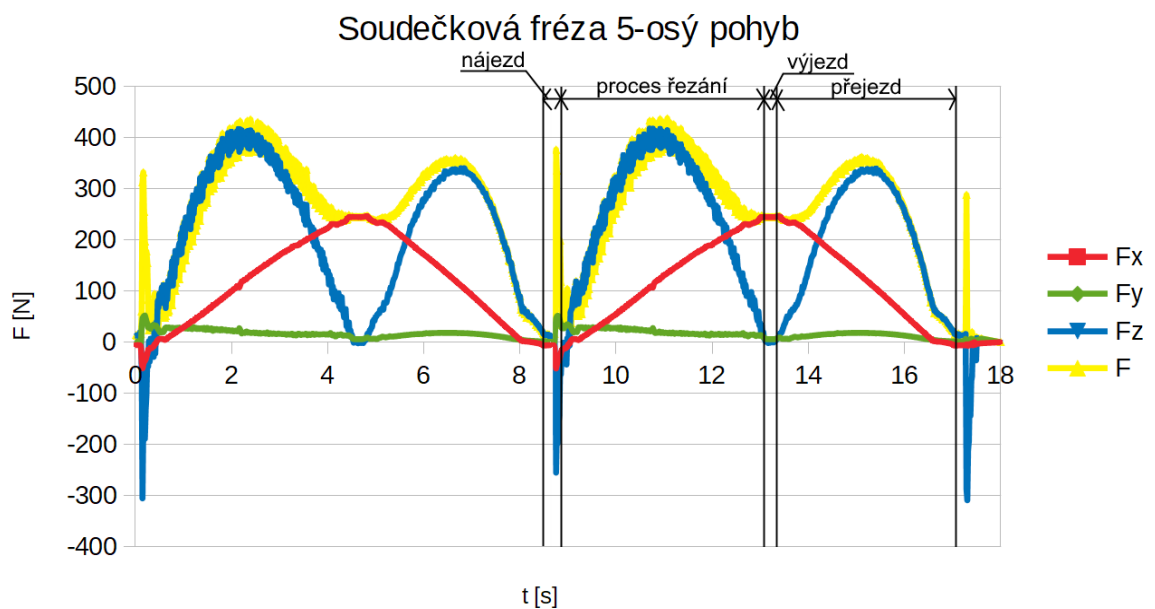
Obr. 6.7 Silový průběh 5-osého pohybu pro kulovou frézu s dynamikou stroje.



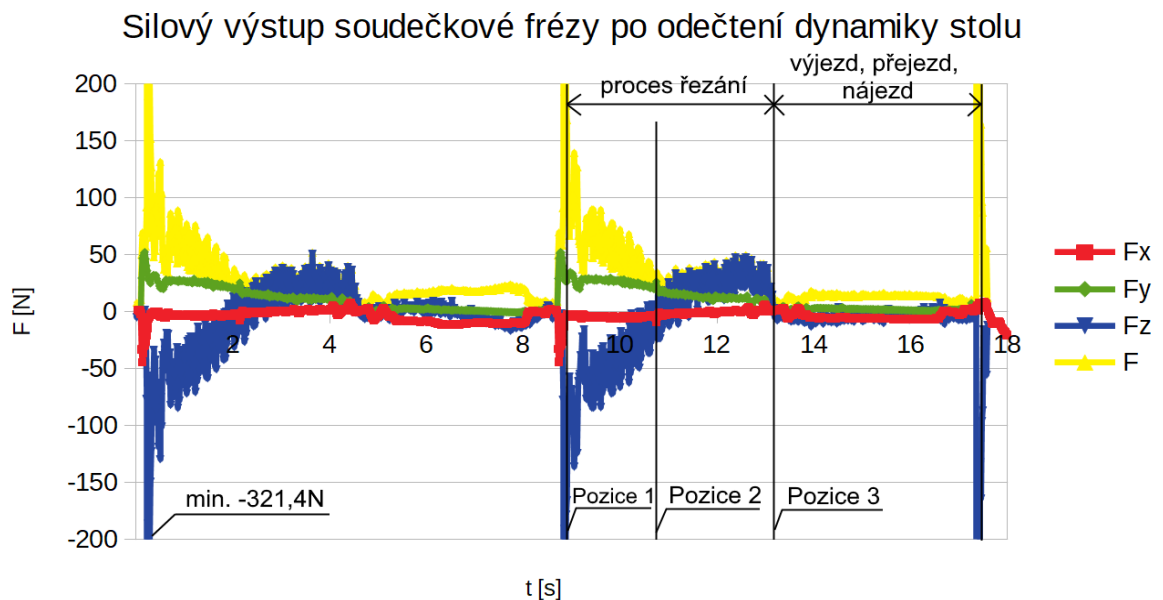
Obr. 6.8 Silový výstup pro 5-osý pohyb kulové frézy po odečtení dynamiky stolu.



Obr. 6.9 Silový průběh pro soudečkovou frézou se sklonem 20° v ose A.



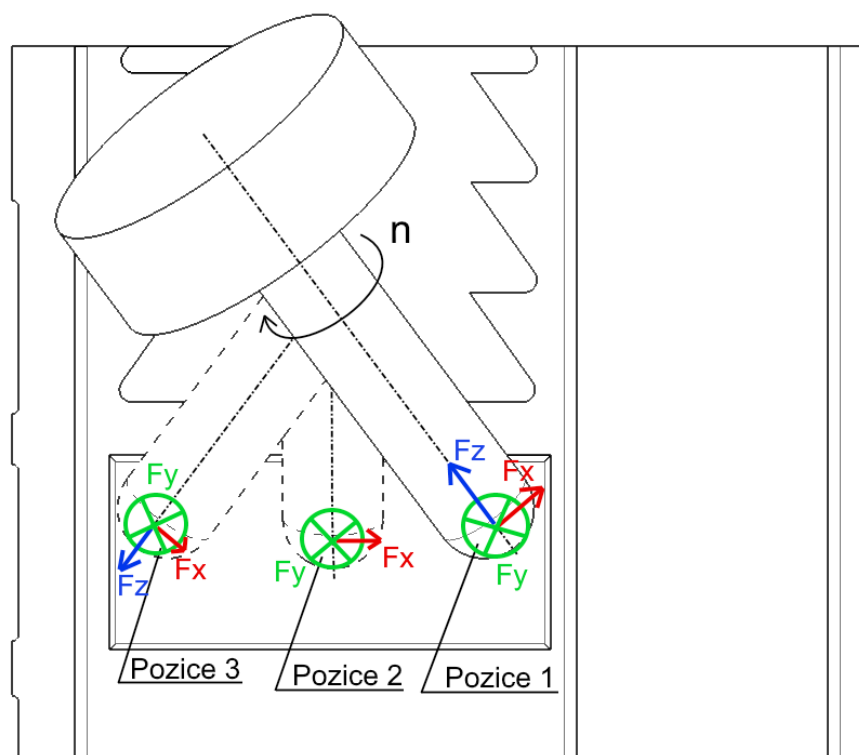
Obr. 6.10 Silový průběh 5-osého pohybu pro soudečkovou frézou s dynamikou stroje.



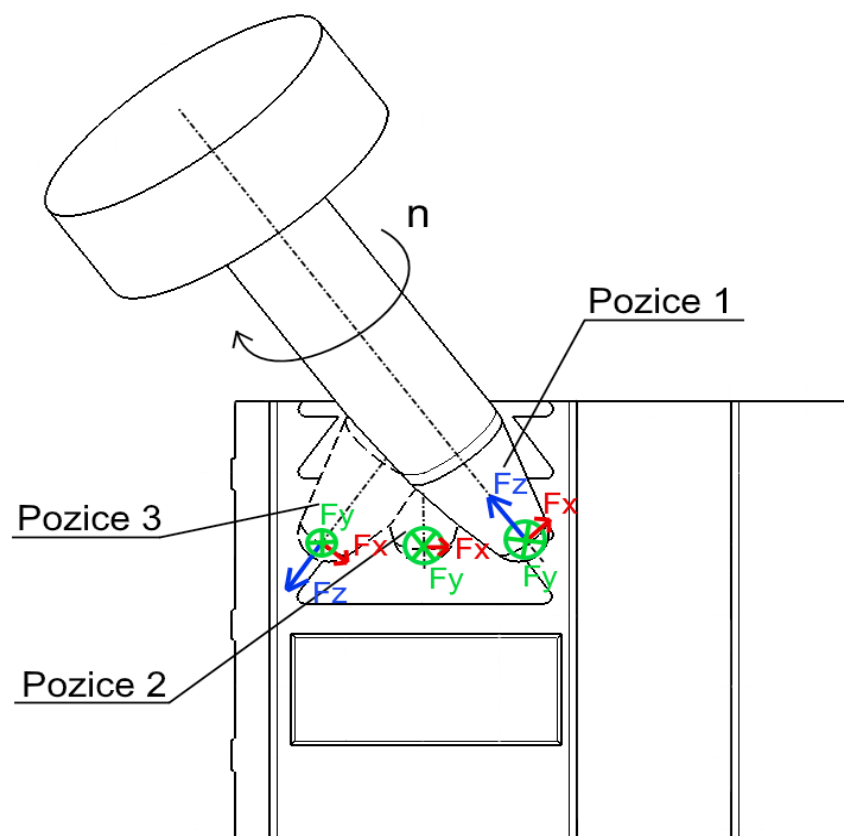
Obr. 6.11 Silový průběh 5-osého pohybu soudečkové frézy po odečtení dynamiky stolu.

Pozice nástrojů jsou vyznačeny na obr. 6.12 a 6.13, jež jsou svázány s obr. 6.8 a 6.11. K drobným výkyvům sil (např. pozice 2 na obr. 6.11) docházelo z důvodu reverzace stolu a jeho prudkého zrychlování. Při rozboru 3+2D frézování kulových fréz nedocházelo z důvodu malého průřezu třísky k tažení třísky po šroubovici nástroje (obr. 6.4 – 6.6), jako se stalo u soudečkové frézy (obr. 6.9), a z toho důvodu byla tříska tlačena směrem $+F_z$. Při rozboru 5-osého frézování docházelo ke komplexnímu pohybu naznačeném v obr. 6.12 a 6.13, při kterém byla síla F_x velmi nízká (docházelo k odečítání její složky se silou F_z) avšak nejvýraznější silový dopad byl způsoben silami F_y a F_z , kde u síly F_z docházelo k reverzaci směru silového působení. Při porovnání silového výstupu kulové a soudečkové frézy si lze všimnout podobnosti průběhu sil, ovšem jejich velikost je rozdílná úměrně průřezu odebírané třísky. Vzhledem k vyššímu silovému působení soudečkové frézy ji není vhodné používat na tenkostěnné součásti z důvodu možného prohnutí stěny a zvýšených vibrací.

V obr. 6.11 (vyznačeno také v obr. 6.14) si lze všimnout náhlého nárůstu síly ve směru záporné F_z , způsobené dotknutím frézy o boční stěnu viz obr. 6.14, a následného nájezdu nástroje na efektivní průřez. Ke kontaktu mezi nástrojem a stěnou kapsy došlo z důvodu nastavení nízké bezpečnostní vzdálenosti od stěn kapsy a z důvodu nepřesnosti upnutí součásti.



Obr. 6.12 Schématické naznačení polohy a sil kulové frézy při frézování.



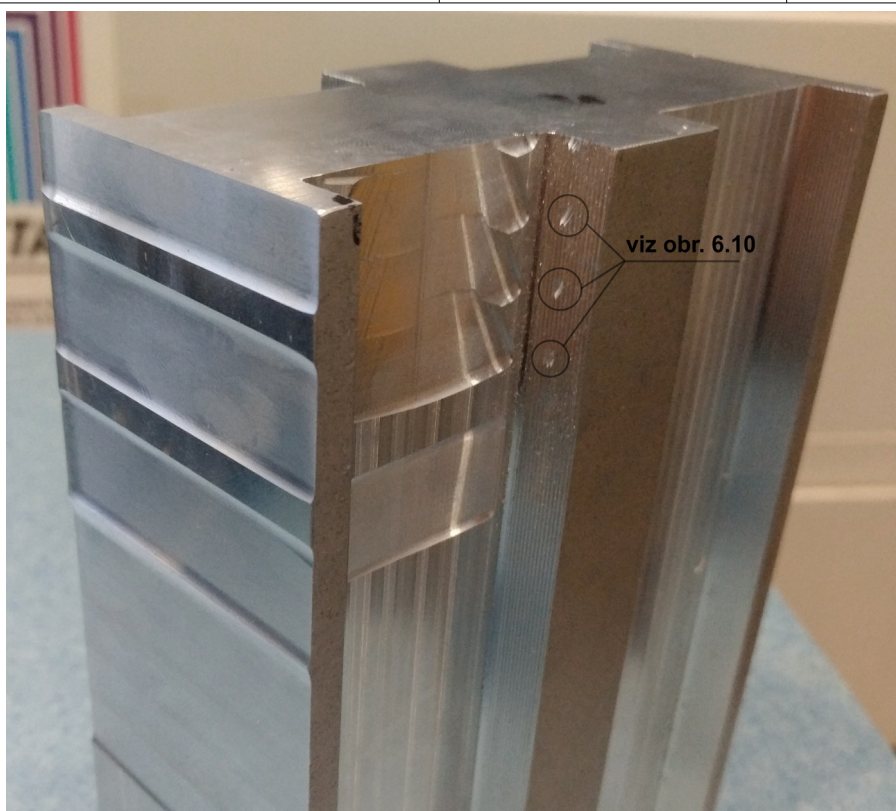
Obr. 6.13 Schématické naznačení polohy a sil soudečkové frézy při frézování.

Střední výška nerovnosti profilu R_a odečítá všechny odchylky od střední čáry profilu na vyhodnocované délce, bez ohledu na jejich vertikální směr. Z toho lze vyvodit, že pomocí hodnoty R_a nelze určit, zda výškové odchylky mají charakter výstupků nebo prohlubní. Hodnota R_a není výrazně ovlivňována osamocenými odchylkami, což znamená, že existuje riziko zanedbání velkého výstupku nebo rýhy. Všeobecně platí, že čím je nižší hodnota R_a , tím hladší bude povrch ($0,02 \mu\text{m}$ = zrcadlově hladký povrch) [4].

Pro ověření drsnosti povrchu obrobku bylo použito zařízení pro měření drsnosti TR100, kterým se následně potvrdila přibližná drsnost povrchu $R_z = 3,2 \mu\text{m}$ s přesností dle ISO třídy 3 viz tab. 6.2. Ze zmíněné tabulky lze také vyvodit, že při použití soudečkové frézy se dosáhne nejen vyššího kroku a_p , ale ve většině případů i zvýšení kvality povrchu oproti fréze kulové.

Tab. 6.2 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu.

	R_a [μm]	R_z [μm]
Kulová fréza beze sklonu	0,31	1,7
Kulová fréza s 20° sklonem v ose A	0,82	4,4
Kulová fréza s 35° sklonem v ose A	0,96	4,6
Soudečková fréza s 20° sklonem v ose A	0,45	2,3
Soudečková fréza s 5-osým pohybem	0,72	2,9
Kulová fréza s 5-osým pohybem	0,81	4,3



Obr. 6.14 Výsledná součást po obrobení.

7 EKONOMICKO-TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ

Při použití soudečkové frézy typu 3D Finish na dokončovací opracování zkušební vzorku s použitím daných řezných podmínek je zřejmé, že strojní časy tzn. výsledná cena frézování bude nižší než při použití kulové frézy. Celkové časy frézování lze spočítat součtem dílčích posuvů (vzorec 7.0) a nebo odečtením z CAM softwaru (viz tab. 7.0). Při počítání strojních časů se bralo v úvahu nedokončeného obrobení v rozích kapsy při použití soudečkové frézy a proto byl CAM program patřičně upraven. Při použití kulové frézy toto opatření nebylo nutné (viz obr. 6.14). Strojní čas frézy lze vypočítat pomocí vzorce 7.0:

$$t_{AS} = \frac{L_c \cdot i}{f_z \cdot n \cdot z} [min]. \quad (7.0)$$

Tab. 7.0 Počáteční náklady na pořízení nástroje a strojní čas na obrobení jedné kapsy.

	Kulová fréza	Kuželová soudečková fréza
Náklady [Kč]	1404	8647
Strojní čas [s]	2021	106

Vychází se z předpokladu že při porovnávání se vztahy mohly zjednodušit o zanedbání ceny obrobku, jelikož pro obě metody se používal obrobek stejný. Hodinové náklady na provoz stroje jsou závislé na více proměnných a bez znalosti, o jakou výrobu by se jednalo, je není možné určit přesně. Místo toho lze zavést strojní minutovou sazbu N_{sm} nastavenou jako $20 \text{ Kč} \cdot \text{min}^{-1}$. Porovnání strojních časů nástrojů řeší vzorec 7.1:

$$P_{ts} = \frac{t_{AS1}}{t_{AS2}} = \frac{2021}{106} = 19,06. \quad (7.1)$$

Rovnice pro výpočet celkových operačních výrobních nákladů na 1 kus N_C (vzorec 7.2) lze rozepsat ve tvaru [4]:

$$N_C = N_S + N_N + N_V [Kč], \quad (7.2)$$

kde N_S jsou náklady na strojní práci, N_N jsou náklady na nástroj a jeho výměnu a N_V jsou náklady na vedlejší práci.

Náklady na strojní práci lze vyjádřit pomocí vzorce 7.3 [4]:

$$N_S = t_{AS} \cdot N_{sm} [Kč], \quad (7.3)$$

kde t_{AS} vyjadřuje strojní čas a N_{sm} minutovou sazbu stroje.

Potom náklady na řezné nástroje lze spočítat dle vzorce 7.4 [4]:

$$N_N = \frac{N_T}{Q_T} [Kč], \quad (7.4)$$

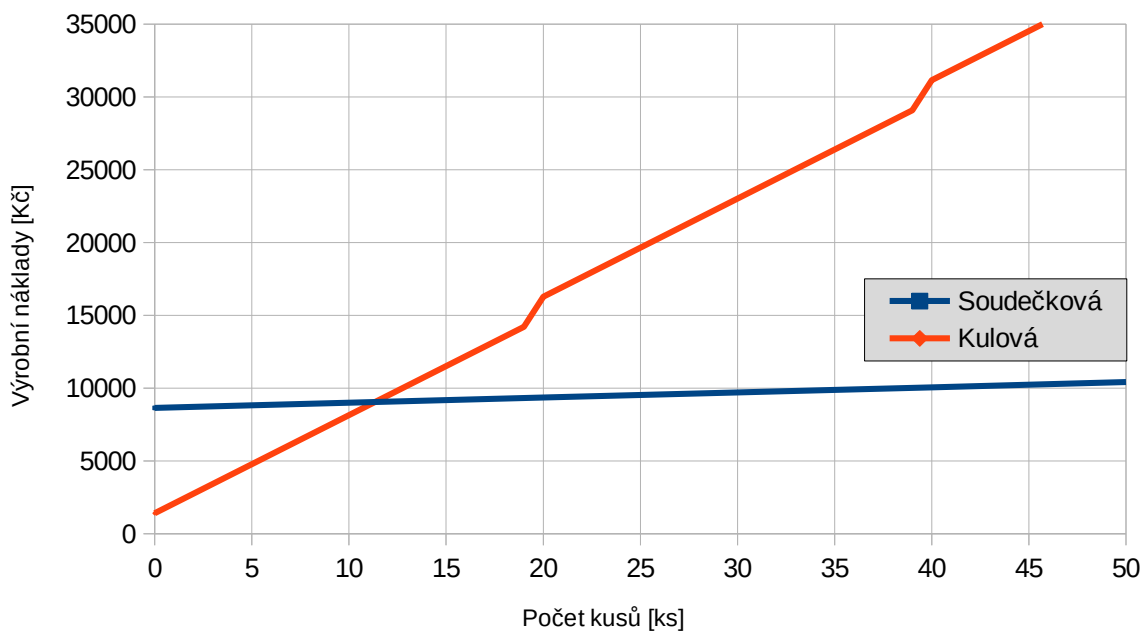
kde N_T jsou náklady na nástroj a jeho výměnu vztaheným na jednu trvanlivost břitu a Q_T odpovídá počtu obrobků, než je nutno nástroj vyměnit.

Obdobně lze vyjádřit i náklady na vedlejší práci N_V pomocí vzorce 7.5 [4]:

$$N_V = t_{AV} \cdot N_{vm} [Kč]. \quad (7.5)$$

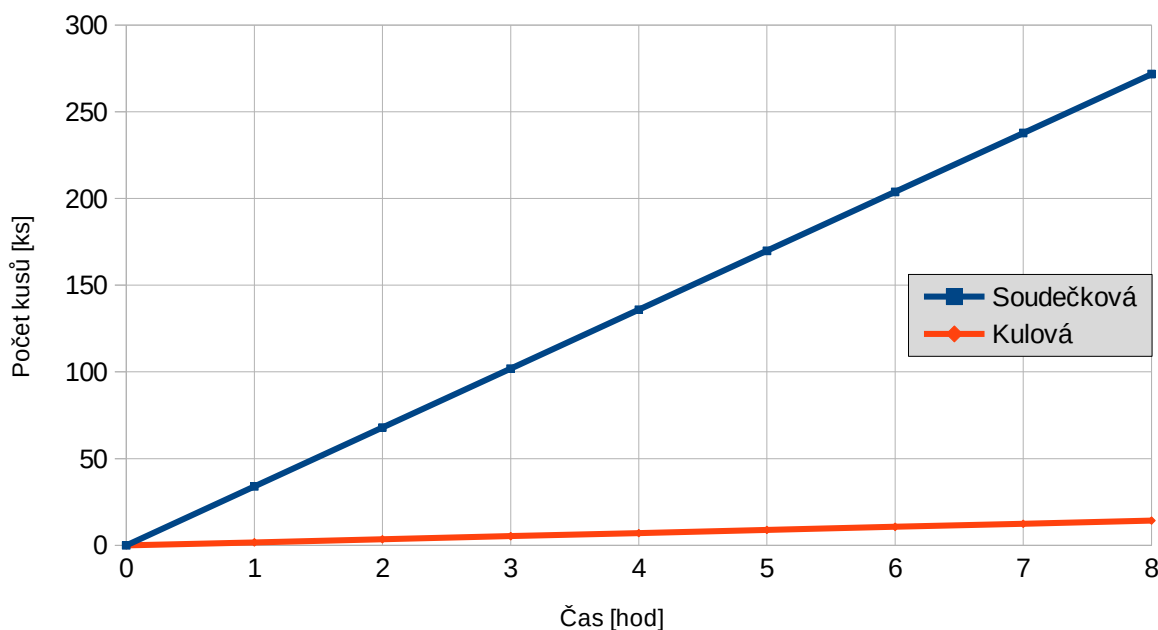
Pro zjednodušení výpočtů a z důvodu, že se jedná o testovací vzorek, bylo určeno, že náklady na vedlejší práce vyjdou pro obě metody stejně.

Graf. 7.0 Ekonomické porovnání soudečkové a kulové frézy.



Ekonomický rozbor v grafu 7.0 byl specifikován frézováním celé kapsy při použití soudečkové a kulové frézy s životností 300 minut a strojní časy získány programem hyperMILL. Graf 7.1 pojednává o počtu vyrobených drážek v závislosti na čase podle použitého nástroje.

Graf 7.1 Porovnání počtu vyrobených drážek soudečkové a kulové frézy na čase.



Výsledná hodnota celkových operačních nákladů N_C vyšla pro soudečkovou frézu jako 91,91 Kč a pro kulovou frézu 744,36 Kč. Z toho lze snadno odvodit, že použití soudečkové

frézy je jednoznačně vhodnější řešení, je-li zapotřebí využít 5-osé frézování při požadavku na vysokou jakost povrchu.

Při použití referenčních hodnot poskytnutých firmou Westcam, které počítají s životností nástroje 300 min a hodinovou sazbou 65 euro·hod⁻¹, jsou ceny pro nástroje a stroj dle tab. 7.1.

Tab. 7.1 Referenční hodnoty firmy Westcam.

	Kulová fréza	Kuželová soudečková fréza
Strojní čas [s]	921	125
Náklady na stroj [euro·hod ⁻¹]	16,48	2,22
Náklady na nástroj [euro·hod ⁻¹]	2,54	1,07

ZÁVĚR

Tato práce se zaměřila na silovou analýzu kulové a soudečkové frézy při podobných řezných podmínkách vzhledem k požadované výsledné jakosti povrchu a ekonomické porovnání obou fréz. Po provedení experimentu byly změřeny drsnosti povrchu a porovnány s teoreticky vypočtenými hodnotami. Součástí práce je subjektivní hodnocení vlastností použitých CAM programů.

Při použití ve výrobním procesu by bylo nutné provést optimalizaci řezných podmínek. Rovněž je třeba mít na zřeteli, že z důvodu velkého silového působení soudečkové frézy ji není vhodné použít pro obrábění tenkostěnných obrobků.

Shrnutí dosažených výsledků:

- experimentální měření hodnot drsností a sil potvrdilo teoreticky vypočtené hodnoty,
- pro výslednou drsnost povrchu R_z pro obě frézy přibližně $3,2 \mu\text{m}$, bude krok a_p pro kulovou frézu více jak 19krát menší než pro frézu soudečkovou,
- v daném případě by použití kuželové soudečkové frézy přineslo 19násobnou úsporu času na rozdíl od frézy kulové, tudíž je použití soudečkové frézy levnější od 12 vyrábění kapsy,
- se zvyšujícím se axiálním krokem přináší kuželová soudečková fréza ještě větší úsporu času,
- z ekonomického hlediska je výhodnější využití soudečkové frézy, jelikož při použití kulové frézy byly dosaženy vyšší výrobní náklady na jeden kus kde velikost úspory výrobních nákladů při použití soudečkové frézy je více než 8násobná,
- byly zhodnoceny dva CAM programy hyperMILL a PowerMill, kdy pro zvolený experiment byl jako vhodnější zvolen program hyperMILL,
- tento model s úhelníkem, upínkami a dynamometrem byl použit v edukačních hodinách a jeho prostřednictvím se studentům vysvětlovala problematika 5-osého programování a použití nového typu frézy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMÁR, Anton. Technologie I - Technologie obrábění - 1.část: Studijní opory pro magisterskou formu studia [online]. 2003 [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
2. BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Marek SADÍLEK, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. 2007. Ostrava: Ediční středisko VŠB-TUO, 2007 [cit. 2019-03-02]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archived/FS/NSPO/texty.pdf>
3. Inovace projektu Mechatronik. *Centrum odborné přípravy technické* [online]. Kroměříž [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=24307&revision=-1&instance=2>
4. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-2114-2374-9.
5. TLUSTÝ, J. Manufacturing Process and Equipment. 1st edition. Prentice Hall, 1999. 928 p. ISBN-10: 0201498650.
6. ZOUHAR, J. *Vývoj výkonných frézovacích nástrojů s využitím CAD/CAM a analýzy mechanismu tvorby třísky*: Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2009. 104s, 7s příloh. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.
7. HLINÍK A JEHO SLITINY. *DocPlayer* [online]. 2016 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10192980-Hlinik-a-jeho-%20slitiny.html>
8. Vlastnosti hliníku. *Fajners s.r.o* [online]. Frýdek-Místek: Fajners s.r.o, 2019 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <http://www.fajners.cz/pictures/pdf/Vlastnosti%20hlin%C3%AAdku.pdf>
9. Previous reports. *Hydro* [online]. Norsk Hydro, 2017 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.hydro.com/en/investors/reports-and-presentations/quarterly-reports/previous-reports/>
10. Technické údaje. *ALUNET: Hliníkové profily na míru* [online]. Pardubice: ALUCAD Bohemia s.r.o, 2019 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/technicke-udaje>
11. Slitiny hliníku: Základní technické informace k prodáváním slitinám. *Ehlinik* [online]. Pardubice: A + A Pardubice, 2019 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/prilohy/zakladni-technicke-informace.pdf>
12. LIU, Bing, Xiaorong ZHOU, Teruo HASHIMOTO, Xinxin ZHANG a Junjie WANG. Machining introduced microstructure modification in aluminium alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018, **757**, 233-238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.082>. ISSN 0925-8388. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838818317675>
13. LIU, Bing, Xiaorong ZHOU a Xinxin ZHANG. Orthogonal machining introduced microstructure modification in AA7150-T651 aluminium alloy. *Materials Characterization*. 2017, **123**, 91-98. DOI:

- <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.11.015>. ISSN 1044-5803. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580316309251>
14. DRIENSKY, Dušan, Pavel FÚRIK, Terézia LEHMANOVÁ a Josef TOMAIDES. *Strojní obrábění I*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986. s. 424. ISBN 042-38-86.
 15. CHANG, Hongbin, Suyun LI a Runping SHI. Design and Manufacturing Technology of High Speed Milling Cutter for Aluminum Alloy. *Procedia Engineering*. 2017,174,630-637. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.200>. ISSN 1877-7058. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581730200X>
 16. MM spektrum: odborně-vzdělávací zpravodajský portál. *Postprocesor: Informační technologie* [online]. Praha: www.mmspektrum.com, 2005 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/postprocesor-slabe-misto-cam-systemu.html>
 17. MM spektrum: odborně-vzdělávací zpravodajský portál. *Frézovací strategie při výrobě forem a zápusťek: Obrábění* [online]. Praha: www.mmspektrum.com, 2005 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovaci-strategie-pri-vyrobe-form-a-zapusstek.html>
 18. Hodnocení stavu obrobeného povrchu po víceosém frézování. *Integrita* [online]. Plzeň: Sadílek, 2013 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.integrita.zcu.cz/download/skola2/ostrava_prez1.pdf
 19. HyperMILL: CAM systém. *WESTCAM: The Know-WOW Company* [online]. Tábor: Westcam czech s.r.o, 2019 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <https://www.westcam.cz/produkty/cam/hypermill/>
 20. *HyperMILL: Pro automatizované programování a efektivní výrobu*. Wessling: OPEN MIND Technologies, 2017.
 21. Autodesk PowerMILL. *CAD/CAM Systems* [online]. Brno: CAD CAM Systems s.r.o, 2014 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <https://www.cadcam-systems.cz/cad-cam-software/powermill/>
 22. TAJMAC-ZPS. Návod k používání pro vertikální obráběcí centrum MCV 1210. 2007.
 23. *EMUGE-FRANKEN: End Mills*. Germany: EMUGE-FRANKEN, 2017.
 24. POTÁCEL, Václav. *Technologické aspekty struktury povrchu při dokončovacím obrábění: Technological standpoints of surface texture at finish machining: zkrácená verze Ph.D. Thesis: obor strojírenská technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojírenského inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2004. ISBN 8021426918.
 25. Měření jakosti povrchu obrobku. *Sandvik Coromant* [online]. Sandviken: Sandvik Coromant, 2019 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-surface-measurement.aspx>
 26. Davim, J. P. *Surface Integrity in Machining*. London: Springer, 2010. ISBN 978-1-84882-873-5

27. Products. *Kistler: measure, analyse, innovate* [online]. Praha: Kistler Group, 2019 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://www.kistler.com>
28. CAD Catalog. *Kistler: measure, analyse, innovate* [online]. Praha: Kistler Group, 2019 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/products/cad-catalog/>
29. ROZVOJ INFORMAČNÍCH A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ PODPORUJÍCÍCH AKREDITOVANÉ STUDIJNÍ PROGRAMY A ŘÍZENÍ VYSOKÉ ŠKOLY: Dílčí zpráva k projektu č. 456. Vysoké učení technické v Brně, 2006. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/rozvoj/Vybaveni_CNC_KISTLER_JC.pdf
30. Kistler: Test&Measurement Force and Strain. *Kistler: measure, analyse, innovate* [online]. Winterhur: Kistler Group, 2018 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/%20type=669&fid=361&model=download&callee=frontend>
31. OMP 400 high-accuracy machine probe. *RENISHAW: apply innovation* [online]. Renishaw (UK): Renishaw, c2001-2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/omp400-high-accuracy-machine-probe--6089>
32. Sampling Theory. *MUSIC AND COMPUTERS* [online]. Burk, 2011 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: http://sites.music.columbia.edu/cmc/MusicAndComputers/chapter2/02_03.php
33. Výpočtové vztahy a definice pro frézování. *Sandvik Coromant* [online]. Sanviken: Sandvik Coromant, 2019 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
34. Příručka obrábění. *Pramet* [online]. Šumperk: Dormer Pramet, 2004 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: http://stachura.cz/novy/data/prirucka_obrabeni_pramet.pdf
35. Autodesk PowerMill 2017: Getting Started. 1. United Kingdom, 2016. MAREK, J. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. 684 s. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
36. GUPTA, K. (ed.). Advanced manufacturing technologies. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-56098-4.
37. GRZESIK, W. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. Second edition. Boston: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-444-63711-6.

Způsoby citací jednotlivých zdrojů, členění, odkazy v textu, příklady, uvádí norma ČSN ISO 690 v aktualizovaném vydání ze dne 1. března 2011, dostupná k nahlédnutí v areálové knihovně FSI VUT v Brně.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ a ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
BNC	[-]	Bayonet Neill Concelman
CAD	[-]	Computer aided design
CAM	[-]	Computer aided machining
CNC	[-]	Computer numeric control
HSC	[-]	High speed cutting
NC	[-]	Numeric control
PC	[-]	Personal computer

Symbol	Jednotka	Popis
A_{Di}	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky
A_{Dmax}	[mm ²]	maximální průřez třísky
a_p	[mm]	axiální hloubka řezu
a_e	[mm]	radiální hloubka řezu
C	[Kč·hod ⁻¹]	cena energie za hodinu
C_{Fc}	[-]	materiálová konstanta
D	[mm]	průměr nástroje
D_{eff}	[mm]	efektivní průměr nástroje
E	[MPa]	modul elasticity slitiny
F	[N]	okamžitá síla
F_1	[N]	celková řezná síla
F_c	[N]	tangenciální složka síly
F_{c1}	[N]	řezná síla působící na jeden břit
F_{cN1}	[N]	kolmá řezná síla
F_{f1}	[N]	posuvová síla působící na jeden břit frézy
F_{fNs}	[N]	kolmá posuvová síla
F_{fs}	[N]	posuvová síla
F_h	[N]	síla působící na obrobek s vtlačovacím charakterem
F_{p1}	[N]	pasivní složka řezné síly působící na jeden břit
F_v	[N]	síla působící na obrobek s odtlačovacím charakterem
F_x	[N]	síla působící ve směru x
F_y	[N]	síla působící ve směru y

F_z	[N]	síla působící ve směru z
f_n	[mm]	posuv na otáčku
f_z	[mm]	posuv na zub
HV	[-]	tvrdost dle Vickerse
h	[mm]	velikost hloubky řezu
h_i	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
Δh	[mm]	relativní zvětšení hloubky
I	[mm ⁴]	kvadratický moment setrvačnosti
i	[-]	počet opakování
K_R	[-]	konstanta
K_T	[-]	konstanta
k_c	[N·mm ⁻²]	měrný řezný odpor
L	[mm]	délka vyložení
L_C	[mm]	Délka řezné dráhy
M_x	[N·m]	moment působící ve směru x
M_y	[N·m]	moment působící ve směru y
M_z	[N·m]	moment působící ve směru z
n	[min ⁻¹]	otáčky za minutu
N_c	[Kč]	celkové operační výrobní náklady na jeden kus
N_N	[Kč]	náklady na nástroj a jeho výměnu
N_s	[Kč]	náklady na strojní práci
N_{sm}	[Kč·min ⁻¹]	minutová sazba stroje
N_T	[Kč]	náklady na nástroj a jeho výměnu na jednu trvanlivost
N_v	[Kč]	náklady na vedlejší práci
N_{vm}	[Kč·min ⁻¹]	minutová sazba vedlejších prací
P_c	[W]	celkový výkon stroje
P_{co}	[W]	celkový řezný výkon
P_o	[W]	výkon při chodu naprázdno
$P_{už}$	[W]	užitečný výkon
p	[-]	konstanta
Q_T	[-]	počet obrobených kusů do výměny nástroje
q	[-]	konstanta
R	[mm]	poloměr nástroje
R_a	[μm]	střední velikost drsnosti povrchu

R_m	[MPa]	mez pevnosti
R_z	[μm]	maximální velikost drsnosti povrchu
r_e	[mm]	zaoblení řezné hrany
t	[s]	čas
t_{AS}	[s]	strojní čas
t_{AS1}	[s]	strojní čas kulové frézy
t_{AS2}	[s]	strojní čas soudečkové frézy
t_{AV}	[s]	čas vedlejších prací
VB	[mm]	šířka opotřebení hřbetu
V_c	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	řezná rychlost
V_f	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	posuvová rychlost
x_{Fc}	[-]	exponent pro hloubku třísky
y_{Fc}	[-]	exponent pro posuv
z	[-]	počet zubů
α	[$^\circ$]	nástrojový úhel náklonu
β	[$^\circ$]	úhel stoupání šroubovice
β_n	[$^\circ$]	úhel naklopení nástroje na stranu
β_f	[$^\circ$]	úhel záklonu ke směru obrábění
δ	[MPa]	ohybová deformace
δ_{sk}	[$^\circ$]	skutečný úhel řezu
φ_i	[$^\circ$]	úhel posuvového pohybu
γ	[$^\circ$]	ortogonální úhel čela
γ_n	[$^\circ$]	normálový úhel čela
γ_{nsk}	[$^\circ$]	zvětšený normálový úhel čela
κ_r	[$^\circ$]	úhel nastavení hlavního ostří
λ_s	[$^\circ$]	úhel sklonu šroubovice
μ	[-]	Newton-Colombův třecí koeficient
η	[%]	účinnost

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Chemické složení slitin hliníku
Příloha 2 Mechanické vlastnosti slitin hliníku
Příloha 3 Technické data o stroji MCV 1210
Příloha 4 Technické údaje o nástrojích 2550A.008 a 3540L.1615AA
Příloha 5 Grafické znázornění a technické informace dynamometru Kistler 9257B

PŘÍLOHA 1

Označení		Složení %											poznámka		ostatní	
EN-AW	DIN	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	V	Ti			každý	celkem	
1050A	Al99,5	≤0,25	≤0,40	≤0,05	≤0,05	≤0,05	-	-	≤0,07	-	≤0,05	-	-	≤0,03	-	
1080A	Al99,8	≤0,15	≤0,15	≤0,03	≤0,02	≤0,02	-	-	≤0,06	-	≤0,02	-	Ga 0,03	≤0,02	-	
1350	EA199,5	≤0,10	≤0,40	≤0,06	≤0,01	-	≤0,01	-	≤0,05	-	-	-	B 0,05 V+Ti 0,02 Ga 0,03	≤0,03	≤0,10	
2007	AlCuMgPb	≤0,80	≤0,80	3,3-4,6	0,5-1,0	0,4-1,8	≤0,10	≤0,20	-	-	≤0,20	-	Bi 0,20 Pb 0,8-1,5 Sn 0,20	≤0,10	≤0,30	
2011	AlCuBiPb	≤0,40	≤0,70	5,0-6,0	-	-	-	-	≤0,30	-	-	-	Bi 0,2-0,6 Pb 0,2-0,6	≤0,05	≤0,15	
2014	AlCuSiMn	0,50-1,2	≤0,70	3,9-5,0	0,4-1,2	0,2-0,8	≤0,10	-	≤0,25	-	≤0,15	-	-	≤0,05	≤0,15	
2017A	AlCuMg1	0,20-0,80	≤0,70	3,5-4,5	0,4-1,0	0,4-1,0	≤0,10	-	≤0,25	-	-	-	Zr+Ti 0,25	≤0,05	≤0,15	
2024	AlCuMg2	≤0,50	≤0,50	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	≤0,10	-	≤0,25	-	≤0,15	-	-	≤0,05	≤0,15	
2117	AlCu2,5Mg0,5	≤0,80	≤0,70	2,2-3,0	≤0,20	0,2-0,5	≤0,10	-	≤0,25	-	-	-	-	≤0,05	≤0,15	
3003	AlMnCu	≤0,60	≤0,70	0,05 – 0,20	1,0-1,5	-	-	-	≤0,10	-	-	-	-	≤0,05	≤0,15	
3004	AlMn1Mg1	≤0,30	≤0,70	≤0,25	1,0-1,5	0,8-1,3	-	-	≤0,25	-	-	-	-	≤0,05	≤0,15	
3005	AlMn1Mg0,5	≤0,60	≤0,70	≤0,30	1,0-1,5	0,2-0,6	≤0,10	-	≤0,25	-	≤0,10	-	-	≤0,05	≤0,15	
3103	AlMn1	≤0,50	≤0,70	≤0,10	0,9-1,5	≤0,30	≤0,10	-	≤0,20	-	-	-	Zr+Ti 0,1	≤0,05	≤0,15	
3105	AlMn0,5Mg0,5	≤0,60	≤0,70	≤0,30	0,3-0,8	0,2-0,8	≤0,20	-	≤0,40	-	≤0,10	-	-	≤0,05	≤0,15	
5005	AlMg1	≤0,30	≤0,70	≤0,20	≤0,20	0,5-1,1	≤0,10	-	≤0,25	-	-	-	-	≤0,05	≤0,15	
5049	AlMg2Mn0,8	≤0,40	≤0,50	≤0,10	0,5-1,1	1,6-2,5	≤0,30	-	≤0,20	-	≤0,10	-	-	≤0,05	≤0,15	
5062	AlMg2,5	≤0,25	≤0,40	≤0,10	≤0,10	2,2-2,8	0,15-0,35	-	≤0,10	-	-	-	-	≤0,05	≤0,15	
5083	AlMg4,5Mn	≤0,40	≤0,40	≤0,10	0,4-1,0	4,0-4,9	0,05-0,25	-	≤0,25	-	≤0,15	-	-	≤0,06	≤0,15	
5754	AlMg3	≤0,40	≤0,40	≤0,10	≤0,50	2,6-3,6	≤0,30	-	≤0,20	-	≤0,15	-	Mn+C 0,10-0,60	≤0,05	≤0,15	
6005A	AlMgSi1,7	0,50-0,90	≤0,35	≤0,30	≤0,50	0,4-0,7	≤0,30	-	≤0,20	-	≤0,10	-	Mn+C 0,12-0,50	≤0,05	≤0,15	
6012	AlMgSiPb	0,60-1,4	≤0,50	≤0,10	0,4-1,0	0,6-1,2	≤0,30	-	≤0,30	-	≤0,20	-	Bi 0,70 Pb 0,4-2,0	≤0,05	≤0,15	
6060	AlMgSi0,5	0,30-0,60	0,10 – 0,30	≤0,10	≤0,10	0,35-0,6	≤0,05	-	≤0,15	-	≤0,10	-	-	≤0,05	≤0,15	
6061	AlMg1SiCu	0,40-0,80	≤0,70	0,15-0,4	≤0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	-	≤0,25	-	≤0,15	-	-	≤0,05	≤0,15	
6082	AlMgSi1	0,70-1,3	≤0,50	≤0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	≤0,25	-	≤0,20	-	≤0,10	-	-	≤0,06	≤0,15	
6101B	E-AlMgSi0,5	0,30-0,60	0,10 – 0,30	≤0,05	0,35-0,6	-	-	≤0,10	-	-	-	-	-	≤0,03	≤0,10	
7020	AlZn4,5Mg1	≤0,35	≤0,40	≤0,20	0,05-0,5	1,0-1,4	0,10 – 0,35	-	-	-	-	-	-	≤0,05	≤0,15	
7075	AlZnMgCu1,5	≤0,40	≤0,50	1,2-2,0	≤0,30	2,1-2,9	0,18-0,28	-	-	-	≤0,20	-	-	≤0,05	≤0,15	

PŘÍLOHA 2

Slitina	Min. povolená mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Min. pevnost v tahu Rm [MPa]	Min. Tažnost [%]	Tvrdost podle Brinella [HBS]	Měrná hmotnost [g/ cm ³]	Tepelná vodivost [W/ K*cm]	Koef. tepelné roztlačnosti [cm ³ *K] (20- 100°C)	Modul elasticity [GPa]	Teplota tavení [°C]	Elektrická vodivost při 20°C [ohm*mm ²]	Obrobitelnost	Odolnost proti korozi
5754 H111	80	190	12	52	2,66	1,3-1,7	23,7	70	610-640	18-23	C/D	A
5083 H111	125	275	12	75	2,66	1,1-1,2	23,8	71	580-640	17	C/D	A
6082 T651	240	295	8	89	2,7	1,5-1,9	23,4	70	585-650	24-32	C/D	A
2017 A	245	390	12	110	2,8	1,3-1,7	22,8	72	512-650	21-28	B/D	C
2024 T3	290	440	13	110	2,77	1,3-1,7	22,8	73	505-640	18-26	B/D	C
2014 T651	400	460	6	133	2,8	1,6	23	72	510-640	23-29	B/D	C
7020 T651	270	340	8	101	2,77	1,2-1,6	23	70	580-650	18-24	D	B
7022 T651	350	430	5	127	2,78	1,3-1,5	23,6	71	515-640	17-19	C/D	D
7075 T651	440	525	4	155	2,8	1,3-1,6	23,3	72	500-640	17-20	C/D	D
7050	532	757	7,8	180	2,83	1,54	23,5	70,3	560-600	23	C/D	E

A = Velmi dobrá

B = Dobrá

C = Průměrná

D = Špatná

E = Velmi špatná

PŘÍLOHA 3

MCV 1210



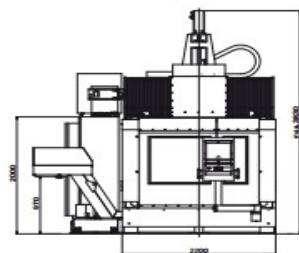
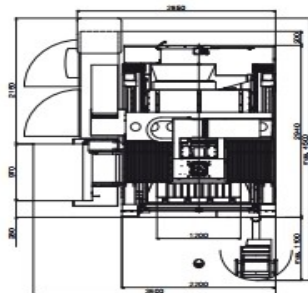
TECHNICKÁ DATA

STANDARDNÍ VYBAVENÍ

- Řídicí systém HEINDEHAIN iTNC 530
- Digitální pohony
- Přímé lineární odměřování HEIDENHAIN
- Tepelná stabilizace vřetena
- Automatické ofukování držáku nástroje
- Vnější chlazení nástroje
- Kompletně zakrytovaný pracovní prostor
- Doprník třísek s integrovanou nádrží chladicí kapaliny
- Signalizace ukončení pracovního cyklu

VOLITELNÉ VYBAVENÍ

- Chlazení středem vřetena
- Chlazení min. množstvím maziva
- Měřicí sonda nástroje
- Měřicí sonda obrobku
- Otočný dvouosý stůl



Pracovní pojezd

osa X – křížový suport	1 000 mm
osa Y – příčník	800 mm
osa Z – smykadlo	600 mm

Pracovní stůl

Pracovní plocha	1 200 x 1 000 mm
Počet T-drážek	10
Rozměr drážek – druhá drážka zprava	18H7 mm
– ostatní drážky	18H8 mm
Rožtek drážek	100 mm
Maximální zatížení	3 000 kg
Max. rozměry obrobku	1 000 x 800 x 700 mm

Vzdálenosti

Čelo vřetena od stolu	150 – 750 mm
Pracovní stůl od podlahy	750 mm

Posuvy v osách X, Y, Z

Max. pracovní posuv	20 m/min
Rychloposuv	40 m/min
Maximální zrychlení os	5 m/s ²

Přesnost

Odměřovací systém v ose X, Y, Z	přímý
Přesnost polohování – VDI/DGQ 3441 v ose X, Y, Z	0,008 mm
Opakovaná přesnost – VDI/DGQ 3441 v ose X, Y, Z	0,006 mm

Vřetenová jednotka

Typ	Weiss	Kessler	Kessler
Maximální otáčky	18 000 min ⁻¹	15 000 min ⁻¹	18 000 min ⁻¹
Upínací kužel	HSK-A63	ISO 40	HSK-A 63
Polohování	elektrické	elektrické	elektrické
Jmenovité otáčky	4 390 min ⁻¹	1 000 min ⁻¹	1 500 min ⁻¹
Výkon S1/S4-60%	30/32 kW	25/31 kW	25/31 kW
Krouticí moment S1/S4-60%	80/90 Nm	159/197 Nm	159/197 Nm

Automatický zásobník nástrojů

Počet zásobníků nástrojů	1
Počet nástrojů v zásobníku	30
Čas výměny nástroje (nástroj – nástroj)	3,5 s
Maximální průměr nástroje	
– při obsazených sousedních místech v zásobníku	80 mm
– při neobsazených sousedních místech v zásobníku	115 mm
Maximální délka nástroje	250 mm
Maximální hmotnost nástroje včetně držáku	6,5 kg

Pohony

Posuvové motory	– jmenovitý moment	v ose X a Y	38 Nm
		v ose Z	18,5 Nm
– jmenovité otáčky	v ose X a Y		2 000 min ⁻¹
		v ose Z	3 000 min ⁻¹
– axiální síla	v ose X a Z		13 kN
		v ose Y	16 kN

Pneumatický agregát

Tlak vzduchu na vstupu	0,6 – 0,8 MPa
Spotřeba vzduchu přibližně	6 m ³ /hod
Provozní tlak	0,55 MPa

Požadavky na elektrickou energii

Připojovací napětí	3x400V/50Hz	3x480 V/60Hz
Příkon provozní		45 kVA
Proud při plném zatížení stroje		125 A

Nádrž chladicí kapaliny

Čerpadlo vnějšího chlazení nástroje	50 l/min
Čerpadlo oplachu pracovního prostoru (volitelné vybavení)	100 l/min
Čerpadlo přečerpávání chladicí kapaliny do filtrační stanice (volitelné vybavení)	35 l/min
Čerpadlo chlazení nástroje osou vřetena s průtokovým filtrem (volitelné vybavení)	20 l/min
– varianta A	5,5 MPa
– varianta B	2,5 MPa

Hmotnosti

Stroj (včetně zásobníku nástrojů)	11 500 kg
Dopravník třísek článkový včetně nádrže chladicí kapaliny s čerpadly (bez kapaliny)	800 kg
Samostatný zásobník nástrojů GIFU	350 kg
Filtrační stanice (bez chladicí kapaliny)	270 kg

Doplňkové údaje

Půdorysná plocha stroje	
– bez dopravníku třísek a panelu ŘS	3 140 x 2 850 mm
– s dopravníkem třísek, bez panelu ŘS	3 140 x 3 600 mm
Půdorysná plocha stroje při otevřených dveřích (včetně panelu řídicího systému)	4 500 x 3 600 mm
Šířka otvoru v krytech při otevřených dveřích	1 300 mm
Vzdálenost mezi pevnou překážkou a základnou, nutná pro zasunutí dopravníku třísek	3 600 mm
Nejvyšší pracovní výška stroje (včetně stavěcích klínů)	3 830 mm
Transportní rozměry stroje s demontovanou konzolou Z (d x š x v)	3 000 x 2 200 x 3 000 mm

Popis vyobrazení a číselné údaje nemusí vždy souhlasit s posledním provedením stroje.

Výrobce TAJMAC-ZPS, a. s. Třída 3. května 1180 764 87 Zlín, Malenovice CZECH REPUBLIC Tel.: +420 577 532 072 Fax: +420 577 533 626 www.tajmac-zps.cz e-mail: info@tajmac-zps.cz	Holding TAJMAC-MTM, s. p. a. Via Gran Sasso 15 20092 Cinisello Balsamo (MI) ITALY Tel.: + 39 02 66017878 Fax: + 39 02 66011457 www.tajmac-mtm.it e-mail: tajmac@tajmac-mtm.it
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

PŘÍLOHA 4 (A)

FRANKEN Hartmetall-Kugelfräser · Solid Carbide Ball Nose End Mills
TOP-Cut

- Multifunktionales Hochleistungswerkzeug
 - Patentierte Querschneide
 - 2 Baulängen verfügbar

- Multi-functional, high performance tool
 - Patented chisel edge
 - 2 lengths available

Design I₁:

N

HM

DIN 6535
 HA
 HB

30°

Kugel

V_c/f_z

Optional

≤ 55 HRC

Allround

Beschichtung · Coating
TIALN

Einsatzgebiete – Material (siehe Seite 4)
 - In fast allen Werkstoffen einsetzbar
 - Zum Schruppen, Schlichten sowie zum HSC-Schlichten geeignet

Applications – material (see page 4)
 - For almost all materials
 - Suitable for roughing, finishing and HSC finishing

P 1.1-5.1
M 1.1-4.1
K 1.1-4.2
N 2.1-2.8, 5.2 | 1.2-1.4
S 2.1-2.3 | 2.4-2.6
H 1.1-1.2

Kurze Ausführung · Short design

Bestell-Code · Order code											2550A				
$\varnothing d_1$ $\pm 0,01$	r $\pm 0,005$	l_2	l_3	l_1	$\varnothing d_3$	l_4	$\varnothing d_2$ h5	α	β	Z (Flutes)	Dimens.- Code				
0,5	0,25	1	2	57	0,45	20	6	10°	8,5°	2	.0005	●			
1	0,5	2	4	57	0,95	20	6	10°	8°	2	.001	●			
1,5	0,75	2,5	7,5	57	1,4	20	6	12,5°	7°	2	.0015	●			
2	1	3	8	57	1,8	20	6	12°	6,5°	2	.002	●			
3	1,5	3,5	10	57	2,8	20	6	11,5°	5°	2	.003	●			
4	2	4	12	57	3,8	20	6	11°	3,5°	2	.004	●			
5	2,5	5	14	57	4,7	20	6	10°	2°	2	.005	●			
6	3	6	20	57	5,6	—	6	—	—	2	.006	●			
8	4	7	25	63	7,6	—	8	—	—	2	.008	●			
10	5	8	30	72	9,6	—	10	—	—	2	.010	●			
12	6	10	35	83	11,5	—	12	—	—	2	.012	●			

PŘÍLOHA 4 (B)

Schnittwerte · Cutting Conditions

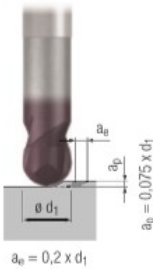


Hartmetall-Kugelfräser – kurze Ausführung Solid carbide ball nose end mills – short design

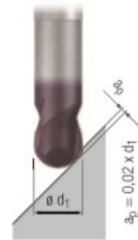
N

Gültig für · Valid for
2550A

Schruppen
Roughing



Schlichten
Finishing



	Vc [m/min]	fz [mm]	Vc [m/min]	fz [mm]					
					<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
P	1.1	220	0,014 x d ₁	300	0,010 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.1	190	0,013 x d ₁	260	0,009 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	3.1	160	0,011 x d ₁	220	0,008 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	4.1	130	0,010 x d ₁	180	0,007 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	5.1	110	0,008 x d ₁	150	0,006 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
M	1.1	110	0,008 x d ₁	150	0,006 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.1	90	0,008 x d ₁	120	0,006 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	3.1	70	0,006 x d ₁	90	0,005 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	4.1	50	0,006 x d ₁	70	0,005 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
K	1.1	220	0,014 x d ₁	300	0,010 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
	1.2	220	0,014 x d ₁	300	0,010 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
	2.1	200	0,011 x d ₁	260	0,008 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
	2.2	200	0,011 x d ₁	260	0,008 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
	3.1	160	0,011 x d ₁	220	0,008 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
	3.2	160	0,011 x d ₁	220	0,008 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
	4.1	130	0,008 x d ₁	180	0,006 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
	4.2	110	0,008 x d ₁	150	0,006 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
N	1.1								
	1.2	900	0,020 x d ₁	1200	0,014 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	1.3	900	0,017 x d ₁	1200	0,012 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	1.4	600	0,020 x d ₁	800	0,014 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	1.5								
	1.6								
	2.1	200	0,014 x d ₁	260	0,010 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.2	200	0,014 x d ₁	260	0,010 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.3	200	0,014 x d ₁	260	0,010 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.4	160	0,011 x d ₁	220	0,008 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.5	160	0,011 x d ₁	220	0,008 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.6	160	0,011 x d ₁	220	0,008 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.7	100	0,008 x d ₁	130	0,006 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.8	100	0,008 x d ₁	130	0,006 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	3.1								
	3.2								
4.1									
4.2									
4.3									
4.4									
5.1									
5.2	110	0,008 x d ₁	150	0,006 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5.3									
S	1.1								
	1.2								
	1.3								
	2.1	80	0,008 x d ₁	110	0,006 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.2	30	0,006 x d ₁	50	0,004 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.3	30	0,006 x d ₁	40	0,004 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2.4	30	0,006 x d ₁	40	0,004 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2.5	20	0,006 x d ₁	30	0,004 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2.6	30	0,006 x d ₁	40	0,004 x d ₁			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
H	1.1			150	0,006 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	1.2			130	0,005 x d ₁	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	1.3								
	1.4								
	1.5								

v_c = Schnittgeschwindigkeit · Cutting speed
f_z = Vorschub pro Zahn · Feed per tooth

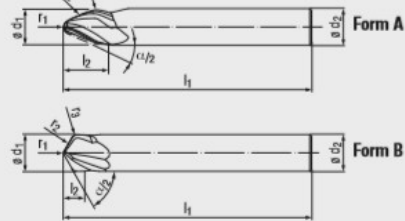
■ = sehr gut geeignet · very suitable
□ = gut geeignet · suitable



PŘÍLOHA 4 (C)

FRANKEN Expert Hartmetall-Kreissegment-Fräser mit Kegelform - Solid Carbide Circle Segment End Mills with Taper Form

- Hochleistungswerkzeug
- Kegelform
- Mit 2 oder 3 Schneiden
- Vibrationsarme Bearbeitung
- Hocheffiziente Schlichtbearbeitung
- Formtoleranz $\pm 0,01$ mm
- High performance tool
- Taper form
- With 2 or 3 flutes
- Low-vibration machining
- Highly efficient finishing
- Form tolerance ± 0.01 mm



N

HM

DIN 6535

HA HB

Form $\pm 0,01$

20-30°

V_c / f_z

10/13

Optional



Allround

Beschichtung - Coating

Einsatzgebiete - Material (siehe Seite 6)

- Speziell für hochfeste Werkstoffe geeignet
- In fast allen Werkstoffen einsetzbar
- Zum HSC-Schlichten geeignet
- Form A: bis 45° Anstellwinkel für steile Bereiche
- Form B: über 45° Anstellwinkel für flache Bereiche

Applications - material (see page 6)

- Especially suitable for high-strength materials
- For almost all materials
- Suitable for HSC finishing
- Form A: up to 45° tilt angle for steep areas
- Form B: more than 45° tilt angle for flat areas

ALCR

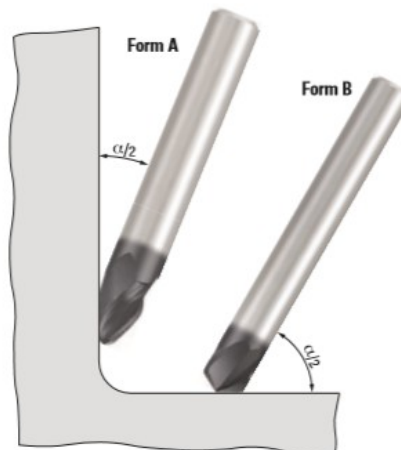
P	1.1-5.1
M	1.1-2.1 3.1-4.1
K	1.1-2.1 2.2
K	3.1-4.1 4.2
N	1.1-1.4
N	2.1-3.2 4.1-4.2 5.2
S	1.1-2.2 2.3
S	2.4 2.5-2.6
H	1.1-1.2

Bestell-Code - Order code

$\alpha/2$	$\varnothing d_1$	r_1	r_2	r_3	l_2	l_1	$\varnothing d_2$ h6	Z (Flutes)	Dimens.- Code	3540L		
12,5°	16	2	1000	5	31	108	16	3	.1610AA	•		
12,5°	16	4	1000	5	24	108	16	3	.1610AB	•		
17,5°	6	1	250	3	9,5	62	6	3	.06250A	•		
20°	8	1,5	250	4	10,5	68	8	3	.08250A	•		
20°	10	2	250	5	12,5	80	10	3	.10250A	•		
20°	12	3	250	6	13,5	93	12	3	.12250A	•		
20°	16	4	500	8	18,5	108	16	3	.16500A	•		
20°	16	4	1500	8	18,5	108	16	3	.1615AA	•		
42,5°	12	1	200	1	8	93	12	3	.12200A	•		
60°	10	1	200	1,5	6	80	10	2	.10200A		•	
70°	10	1	200	2	6	80	10	2	.10200B		•	

Die CAD-Daten (2D) der Werkzeuge können Sie per E-Mail an info@emuge-franken.com anfordern
You can request the CAD data (2D) of the tools via email from info@emuge-franken.com

Nur mit Anstellwinkel $\alpha/2$ einsetzen!
Only use with tilt angle $\alpha/2$!



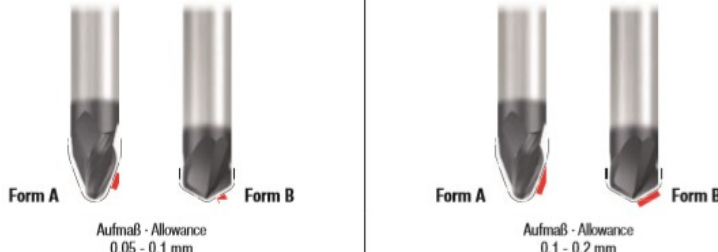
PŘÍLOHA 4 (D)

Schnittwerte · Cutting Conditions

FRANKEN
Expert

Hartmetall-Kreissegment-Fräser mit Kegelform
Solid carbide circle segment end mills with taper form

N



Gültig für · Valid for
3540L

Für die Berechnung der Drehzahl n muss mit dem Durchmesser d_1 gerechnet werden.
In order to calculate the rotational speed n , the diameter d_1 has to be used.

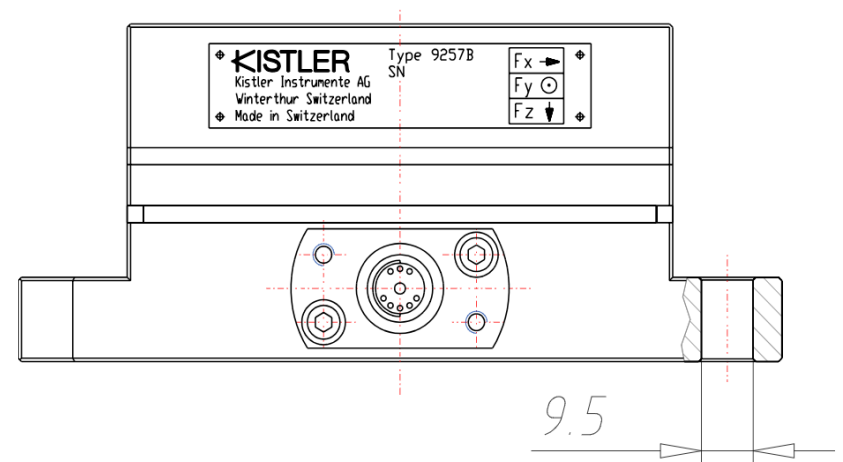
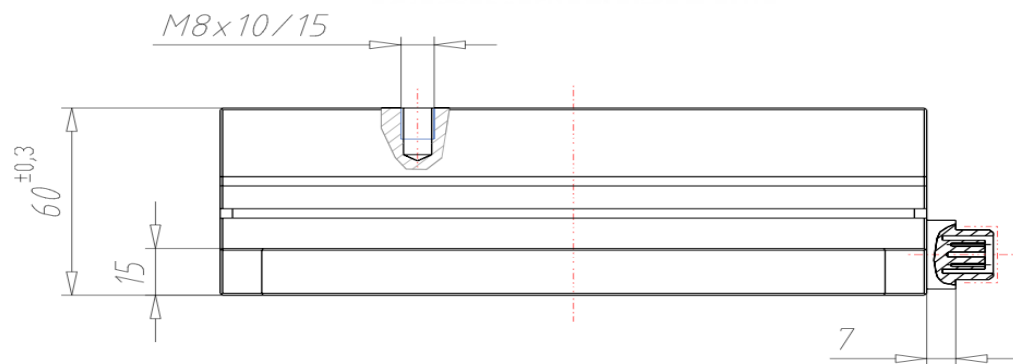
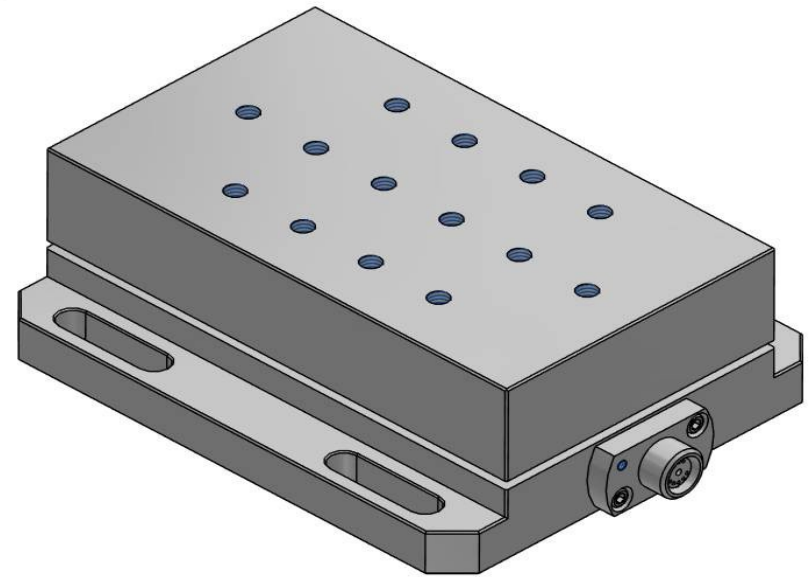
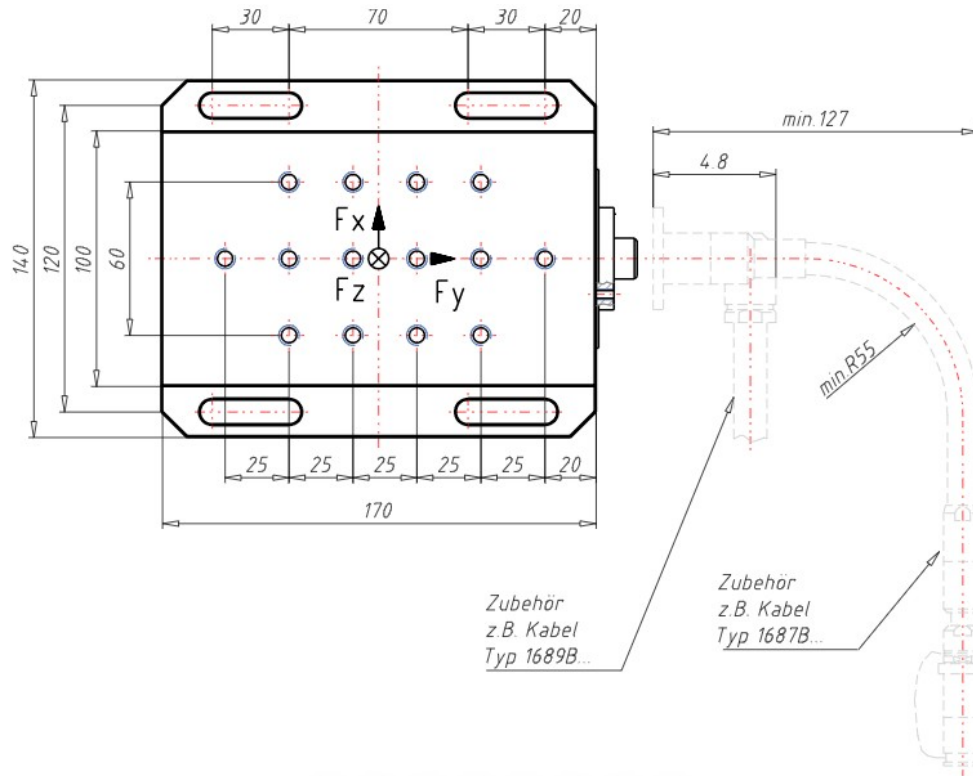
	V_C [m/min]	f_z [mm]	V_C [m/min]	f_z [mm]				
					<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
P	1.1	$0,006 \times d_1$	280	$0,004 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.1	$0,006 \times d_1$	250	$0,004 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	3.1	$0,005 \times d_1$	210	$0,003 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	4.1	$0,004 \times d_1$	200	$0,003 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	5.1	$0,004 \times d_1$	180	$0,003 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
M	1.1	$0,004 \times d_1$	100	$0,003 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.1	$0,004 \times d_1$	80	$0,003 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	3.1	$0,003 \times d_1$	60	$0,002 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	4.1	$0,003 \times d_1$	40	$0,002 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
K	1.1	$0,007 \times d_1$	280	$0,005 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	1.2	$0,007 \times d_1$	280	$0,005 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	2.1	$0,006 \times d_1$	250	$0,005 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	2.2	$0,006 \times d_1$	250	$0,005 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	3.1	$0,006 \times d_1$	210	$0,005 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	3.2	$0,006 \times d_1$	210	$0,005 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	4.1	$0,004 \times d_1$	180	$0,003 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	4.2	$0,003 \times d_1$	140	$0,002 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
N	1.1	$0,007 \times d_1$	600	$0,005 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	1.2	$0,006 \times d_1$	600	$0,004 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	1.3	$0,005 \times d_1$	600	$0,004 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	1.4	$0,006 \times d_1$	410	$0,004 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	1.5						<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	1.6							
	2.1	$0,006 \times d_1$	180	$0,005 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.2	$0,006 \times d_1$	180	$0,005 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.3	$0,006 \times d_1$	180	$0,005 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.4	$0,005 \times d_1$	170	$0,004 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.5	$0,005 \times d_1$	170	$0,004 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.6	$0,005 \times d_1$	170	$0,004 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.7	$0,004 \times d_1$	100	$0,003 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.8	$0,004 \times d_1$	100	$0,003 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	3.1	$0,010 \times d_1$	410	$0,008 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	3.2	$0,010 \times d_1$	410	$0,008 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	4.1	$0,010 \times d_1$	410	$0,008 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	4.2	$0,010 \times d_1$	600	$0,008 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	4.3							
	4.4							
5.1								
5.2	100	$0,004 \times d_1$	100	$0,003 \times d_1$				<input checked="" type="checkbox"/>
5.3								
S	1.1	$0,005 \times d_1$	100	$0,004 \times d_1$				<input checked="" type="checkbox"/>
	1.2	$0,004 \times d_1$	80	$0,003 \times d_1$				<input checked="" type="checkbox"/>
	1.3	$0,004 \times d_1$	60	$0,003 \times d_1$				<input checked="" type="checkbox"/>
	2.1	$0,003 \times d_1$	80	$0,002 \times d_1$				<input checked="" type="checkbox"/>
	2.2	$0,003 \times d_1$	30	$0,002 \times d_1$				<input checked="" type="checkbox"/>
	2.3	$0,003 \times d_1$	30	$0,002 \times d_1$				<input checked="" type="checkbox"/>
	2.4	$0,003 \times d_1$	30	$0,002 \times d_1$				<input checked="" type="checkbox"/>
2.5	$0,003 \times d_1$	30	$0,002 \times d_1$				<input checked="" type="checkbox"/>	
2.6	$0,003 \times d_1$	30	$0,002 \times d_1$				<input checked="" type="checkbox"/>	
H	1.1	$0,004 \times d_1$	130	$0,003 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	1.2	$0,005 \times d_1$	100	$0,003 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	1.3							
	1.4							
	1.5							

v_c = Schnittgeschwindigkeit · Cutting speed
 f_z = Vorschub pro Zahn · Feed per tooth

■ = sehr gut geeignet · very suitable
□ = gut geeignet · suitable

SMUGE
FRANKEN

PŘÍLOHA 5 (A)



PŘÍLOHA 5 (B)

Tab. 5.6 Technické data dynamometru KISTLER 9257B dle [26]

Rozsah Fz je Fx a platí $F_y \leq 0,5F_z$	Fx, Fy, Fz Fz	kN kN	-5...5 -5...10 ¹⁾
Kalibrovaný částečný rozsah 1	Fx, Fy Fz	N N	0...500 0...1000
Kalibrovaný částečný rozsah 2	Fx, Fy, Fz Fz	N N	0...50 0...100
Přetížení Fz je Fx a $F_y \leq 0,5F_z$	Fx, Fy, Fz Fz	kN kN	-7,5/7,5 -7,5/15
Prahová hodnota		N	<0,01
Citlivost	Fx, Fy Fz	pC/N pC/N	≈-7,5 ≈-3,7
Lineárnost, všechny směry		%FSO	≤±1
Hystereze, všechny směry		%FSO	≤0,5
Nepřesnost měření		%	≤±2
Tuhost	cx, cy cz	kN/μm kN/μm	>1 >2
Vlastní frekvence	fn(x,y,z)	kHz	≈3,5 ²⁾
Vlastní frekvence (nasazeno na příruby)	fn(x,y) fn(z)	kHz kHz	≈2,3 ²⁾ ≈3,5 ²⁾
Rozsah pracovních teplot		°C	0-70
Kapacita	Fx,Fy,Fz	pF	≈220
Izolační odpor (odolnost)		Ω	>10 ¹³
Zemní izolace		Ω	>10 ⁸
Váha		kg	7,3
Měřicí plocha		mm	100x170
Ochrana dle EN60529		-	IP67 ³⁾
Zapojení	Fischer flange, 9 pol. neg.		

¹⁾Pro soustružení

²⁾Bez použití držáku typu 9403

³⁾Použije-li se kabel typu 1687B5, 1689B5, 1677A5 nebo 1679A5