

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie  
obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie  
obrábění

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vliv frézování na stabilitu upnutí nástroje v tepelném upínači

Autor: **Bc. Petr ZEMENE**

Vedoucí práce: **Ing. Jan ŘEHOŘ, Ph.D.**

Akademický rok 2011/2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr ZEMENE**  
Osobní číslo: **S10N0058P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**  
Název tématu: **Vliv frézování na stabilitu upnutí nástroje v tepelném upínači.**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod a cíle DP
2. Teoretické poznatky k řešené problematice.
3. Charakteristika experimentální část
4. Vyhodnocení experimentální části
5. Technicko-ekonomické zhodnocení
6. Závěr, celkové zhodnocení výsledků DP.

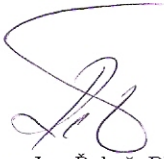
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **50 - 70 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**  
Seznam odborné literatury:

KOCMAN, K., PROKOP J. Technologie obrábění. Brno: CERM, 2005.  
AMBROŽ, P. Upínače stopkových nástrojů. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2008.  
DVOŘÁK, L.- SK TECHNIK. Ekonomické a přesné tepelné upínání. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2009.  
SKOPEČEK, L. Podklady ke zkoušce z KTO/DTO. Plzeň: 2008.  
STANĚK, J., NĚMEJC, J. Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací ZČU. Plzeň: 2005.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění  
Konzultant diplomové práce: **Dr. Ing. František Plánička**  
GÜHRING s.r.o.  
Ostatní konzultanti: **Ing. Lukáš Skopeček**  
Katedra technologie obrábění  
Datum zadání diplomové práce: **20. října 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Ing. Jan Řehoř, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 12. prosince 2011



## **Garance a vedení diplomové práce**

Vedoucí katedry:	Ing. Jan Řehoř, Ph.D.	ZČU v Plzni, FST-KTO
Vedoucí oddělení:	Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.	ZČU v Plzni, FST-KTO
Vedoucí dip. práce:	Ing. Jan Řehoř, Ph.D.	ZČU v Plzni, FST-KTO
Konzultant dip. práce:	Ing. Lukáš Skopeček	ZČU v Plzni, FST-KTO
Konzultant z praxe:	Dr. Ing. František Plánička	GÜHRING spol. s r.o.

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## **Poděkování za pomoc při zpracování diplomové práce**

Rád bych poděkoval všem pedagogickým pracovníkům Západočeské univerzity v Plzni a všem pracovníkům společnosti GÜHRING spol. s r.o., kteří mě během studia a vypracovávání diplomové práce vedli a předávali mi své znalosti a zkušenosti.

Poděkování patří především vedoucímu diplomové práce:

Ing. Janu Řehořovi, Ph.D., ZČU Plzeň, FST-KTO

Konzultantům diplomové práce:

Ing. Lukáši Skopečkovi, ZČU Plzeň, FST-KTO

Dr. Ing. Františku Pláničkovi, GÜHRING spol. s r.o.

Dále bych rád poděkoval:

Ing. Martinu Melicharovi, Ph.D., ZČU Plzeň, FST-KTO

Ing. Jiřímu Vyšatovi, Ph.D., ZČU Plzeň, FST-KTO

Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D., ZČU Plzeň, FST-KTO

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> ZEMENE	<b>Jméno</b> Petr		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2303T004 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Řehoř, Ph.D.	<b>Jméno</b> Jan		
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>		
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vliv frézování na stabilitu upnutí nástroje v tepelném upínači			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>	99	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	76	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	23
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Cílem této diplomové práce je zaměřit se na problém vytahování nástroje, upnutého v tepelném upínači. Zmapování faktorů, které mají vliv na stabilitu upnutí nástroje v tepelném upínači a určení jejich významu. Práce se zaměřuje na upínání nástrojů menších průměrů. Významným přínosem práce je především spolupráce s firmou GÜHRING spol. s r.o., rozšíření teoretických, ale i experimentálních znalostí týkající se problematiky upínání rotačních nástrojů.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p>	<p style="text-align: center;">tepelné upínací pouzdro, stabilita upnutí, stabilita řezného procesu, vytahování nástroje, upínací síla, plošný tlak, řezné síly, vibrace, moderní metody obrábění</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname ZEMENE	Name Petr		
<b>FIELD OF STUDY</b>	2303T004 “ Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Řehoř, Ph.D.	Name Jan		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>		
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The effect of milling on the stability of the clamping tool in the thermal chuck.			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2012
----------------	---------------------------	-------------------	-------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	99	<b>TEXT PART</b>	76	<b>GRAPHICAL PART</b>	23
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The main aim of this thesis is to focus on a problem of removing tool clamped in the thermal chuck. Mapping all of the factors which have some influences on the stability of the clamping tool and to determine their significance. The thesis focuses on the clamping tools of smaller diameters. The most important contribution of this thesis is the possibility of cooperation with GÜHRING Inc., the extension of theoretical and experimental knowledge concerning the issues of clamping rotating tools.
<b>KEY WORDS</b>	thermal chuck, clamping stability, the stability of the cutting process, removing tools, clamping force, surface pressure, cutting forces, vibrations, modern machining methods

## Obsah

Seznam příloh:.....	- 9 -
Seznam použitých zkratk.....	- 10 -
Seznam použitých symbolů a značek.....	- 11 -
1 ÚVOD .....	- 13 -
1.1 Obecné poznatky o řešené problematice .....	- 14 -
1.2 Představení zadávající firmy .....	- 15 -
2 TEORETICKÉ POZNATKY K ŘEŠENÉ PROBLEMATICE .....	- 18 -
2.1 Technologie obrábění – frézování.....	- 19 -
2.1.1 Upínání frézovacích nástrojů .....	- 20 -
2.2 Systémy upínání stopkových nástrojů.....	- 21 -
2.2.1 Základní požadavky na systémy upínání .....	- 22 -
2.2.1.1 Požadavky na vyvážení upínacího pouzdra .....	- 22 -
2.2.1.2 Vyvažování upínacích pouzder .....	- 23 -
2.2.2 Základní konstrukční provedení upínacího pouzdra .....	- 25 -
2.2.2.1 Typy kuželových stopek.....	- 26 -
2.2.2.2 Typy přírub.....	- 26 -
2.2.3 Jednotlivé systémy upínání .....	- 27 -
2.2.3.1 Mechanické upínání .....	- 27 -
2.2.3.2 Hydraulické upínání .....	- 29 -
2.2.3.3 Tepelné upínání .....	- 30 -
2.2.3.4 Speciální upínací pouzdra .....	- 33 -
2.2.3.4.1 Tepelný upínač s radiálními zápichy pro tlumení vibrací (HAIMER)..	- 33 -
2.2.3.4.2 Tepelný upínač s plastickými kroužky pro tlumení vibrací (HAIMER)-	34 -
2.2.3.4.3 Upínací systém POWER (HAIMER).....	- 34 -
2.2.3.4.4 Upínací systém SAFELOCK (HAIMER).....	- 35 -
2.2.3.4.5 Upínací systém ALBRECHT APC (ROYAL PRODUCTS).....	- 36 -
2.2.3.4.6 Upínací systém TSG 3000 (GÜHRING) .....	- 37 -
2.3 Stabilita řezného procesu při frézování.....	- 38 -
2.3.1 Vliv řezných podmínek .....	- 38 -
2.3.1.1 Vliv hloubky odřezávané vrstvy $a_p$ a posuvu na zub $f_z$ .....	- 39 -
2.3.1.2 Vliv řezné rychlosti $v_c$ .....	- 39 -
2.3.2 Vliv upnutí a vyložení nástroje .....	- 40 -
2.3.3 Vliv řezných sil .....	- 40 -

2.3.3.1 Nepřímé metody určení řezných sil .....	41 -
2.3.3.2 Přímé metody určení řezných sil .....	42 -
2.3.3.2.1 Dynamometry .....	42 -
2.3.4 Vliv opotřebení nástroje .....	44 -
2.3.5 Vliv chvění .....	44 -
2.3.5.1 Samobuzené kmitání .....	45 -
2.3.5.2 Měření chvění .....	46 -
3 CHARAKTERISTIKA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI .....	48 -
3.1 Představení experimentu .....	48 -
3.1.1 Upínací síla tepelných upínacích pouzder .....	50 -
3.2 Charakteristika experimentu .....	52 -
3.2.1 Návrh a členění experimentu .....	53 -
3.2.2 Technická charakteristika experimentálního zařízení .....	55 -
3.2.2.1 Obráběcí stroj .....	55 -
3.2.2.2 Řezný nástroj .....	55 -
3.2.2.3 Upínací pouzdro .....	55 -
3.2.2.4 Obrobek .....	56 -
3.2.2.5 Zařízení pro měření řezných sil .....	56 -
3.2.2.6 Optický mikroskop Multicheck PC500 .....	57 -
3.2.2.7 Zařízení pro měření zvukových efektů .....	57 -
3.2.2.8 Zařízení pro měření drsnosti .....	57 -
3.2.3 Postup frézování a charakteristika záběrových podmínek .....	58 -
4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI .....	59 -
4.1 Vyhodnocení upínací síly .....	59 -
4.2 Vyhodnocení řezných sil .....	61 -
4.2.1 EXPERIMENT I. ....	61 -
4.2.2 EXPERIMENT II. ....	64 -
4.3 Vyhodnocení zvukové analýzy .....	67 -
4.4 Vyhodnocení opotřebení a změny geometrie břitu nástroje .....	67 -
4.5 Vyhodnocení drsnosti obrobeného povrchu .....	68 -
5 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	70 -
6 ZÁVĚR .....	72 -
Seznam použité literatury: .....	74 -

## **Seznam příloh:**

- PŘÍLOHA P1 ..... Charakteristika obráběcího stroje MCV 750 A
- PŘÍLOHA P2: .... Charakteristika řezného nástroje *RATIO 100 U-Standard*
- PŘÍLOHA P3: .... Výkres tepelného upínacího pouzdra *SF-10 ISO SK 40*
- PŘÍLOHA P4: .... Charakteristika obrobku + výkres
- PŘÍLOHA P5: .... Zařízení pro měření řezných sil
- PŘÍLOHA P6: .... Optický mikroskop *MULTICHECK PC500*
- PŘÍLOHA P7: .... Zařízení pro měření drsnosti povrchu
- PŘÍLOHA P8: .... Řezné podmínky pro jednotlivé přejezdy
- PŘÍLOHA P9: .... Technické prostředí experimentu
- PŘÍLOHA P10: ... Výstupy z *MKP – SIEMENS NX 8.0*
- PŘÍLOHA P11: ... Program frézování (řídící systém Heidenhain)
- PŘÍLOHA P12: ... Teorie frézování

## Seznam použitých zkratk

<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
FST	Fakulta strojní
ZČU	Západočeská univerzita
KTO	Katedra technologie obrábění
HSC	Vysokorychlostní obrábění
HPC	Vysoko-výkonové obrábění
S-U-N-O	Soustava stroj-upínač-nástroj-obrobek
SK	Slinutý karbid (strmý kužel)
o.H.G.	Veřejná obchodní společnost
HSK	Dutý upínací kužel
ČSN	Česká státní norma
DIN	Německá norma
W.Nr.	Norma (nástupce normy DIN)
CNC	Počítačově řízený stroj
OMNO´	Oblast primární plastické deformace
HMD	Hydromechanické upínání
SF	Tepelné upínání
PVD	Fyzikální depozice tenké vrstvy
RO	Rychlořezná ocel
FRVŠ	Fond rozvoje vysokých škol
HRC	Tvrдост dle Rockwella
MKP	Metoda konečných prvků

## Seznam použitých symbolů a značek

$n$	[ot./min]	otáčky
$v_c$	[m/min]	řezná rychlost
$v_f$	[mm/min]	posuvová rychlost
$a_p$	[mm]	hloubka řezu
$a_e$	[mm]	šířka řezu
$f_z$	[mm/zub]	posuv na zub
$f$	[mm]	pracovní posuv
$\varphi_i; \varphi_{max}$	[°]	úhel záběru frézy (maximální)
$F_f$	[N]	síla ve směru posuvu
$F_{fN}$	[N]	síla kolmá na směr posuvu
$F_{CN}; F_p$	[N]	normálová (pasivní) řezná síla na břitu
$F_C$	[N]	tangenciální složka řezné síly na řezném břitu - maximální hodnota
$F$	[N]	výsledná síla
$F_x$	[N]	složka řezné síly ve směru osy x
$F_y$	[N]	složka řezné síly ve směru osy y
$F_z$	[N]	složka řezné síly ve směru osy z
$\Phi_N; \Phi_M; \Phi$	[°]	úhly smykové roviny
$\delta_0$	[°]	úhel řezu
$b; B$	[mm]	šířka odebírané vrstvy (šířka žebra)
$h_i$	[mm]	tloušťka odebírané vrstvy
$A_{Di}$	[mm]	jmenovitý průřez třísky
$\kappa_r$	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
$\kappa_r'$	[°]	úhel nastavení vedlejšího ostří
$\phi d; \phi D$	[mm]	průměr nástroje (frézy)
$\alpha$	[°]	úhel hřbetu
$\gamma$	[°]	úhel čela
$\lambda_s$	[°]	úhel sklonu ostří
$\omega$	[1/s]	úhlová rychlost
$F_u$	[N]	odstředivá síla, síla potřebná k upnutí nástroje
$e$	[mm]	excentricita
$U$	[kg.mm]	míra nevyvážení
$m$	[g]	hmotnost nevyvážku
$G$	[mm/s]	index kvality vyvážení
$F_v$	[N]	vnější síla
$A$	[ $\mu$ m]	amplituda (intenzita kmitání)
$P_{řez}$	[W]	řezný výkon
$P_0$	[W]	ztrátový výkon
$P_{celk}$	[W]	celkový výkon
$P_b$	[W]	příkon při zatěžování vřetena brzdou



$Q$	[C]	elektrický náboj
$k_p$	[C/N]	piezoelektrická konstanta
$\delta$	[mm]	požadovaný přesah
$p$	[MPa]	plošný tlak
$R$	[mm]	průměr čepu (nástroj)
$r_0$	[mm]	průměr náboje (pouzdra)
$F_{up}$	[N]	upínací síla
$E_0; E_i$	[MPa]	Youngův modul pružnosti (pouzdro a nástroj)
$\mu_0; \mu_i$	[-]	Poissonova konstanta (pouzdro a nástroj)
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	styková plocha
$l$	[mm]	délka spoje
$B$	[μm]	nejhorší hodnota přesahu
$G$	[μm]	nejlepší hodnota přesahu
$Y$	[μm]	střední hodnota přesahu
$R_a; R_z; R_{max}$	[μm]	charakteristiky drsnosti povrchu
$l_3$	[mm]	řezná délka nástroje
$l_1$	[mm]	délka řezného nástroje
$R$	[mm]	radius špičky břitu nástroje

## 1 ÚVOD

Cílem této diplomové práce je zaměřit se na způsoby upnutí rotačních nástrojů a zkoumat je z hlediska jejich stability při procesu obrábění. V tomto případě tak při upnutí stopkové frézy do tepelně smrštitelného upínacího pouzdra při frézování. Hlavním úkolem je tedy zaměřit se na problém vytahování nástroje upnutého v tepelně smrštitelném upínacím pouzdře, najít závislosti mezi parametry řezného procesu a jejich vlivem na stabilitu řezného procesu, popř. navrhnout takové konstrukční řešení daného pouzdra, aby se zamezilo nežádoucímu jevu v podobě vytahování řezného nástroje z upínacího pouzdra. Hlavním přínosem práce je především rozšíření spolupráce mezi Katedrou technologie obrábění FST ZČU v Plzni a společností GÜHRING s.r.o., která je vnímána jako světová jednička v produkci špičkových řezných nástrojů, ale i upínacích pouzder ve všech režimech průmyslového obrábění. Neméně významným přínosem je rozšíření znalostní základny týkající se problematiky upínání rotačních nástrojů nejen po teoretické stránce, ale i po stránce experimentální. Řešením diplomové práce je navázáno na bakalářskou práci, která byla vypracována na téma: „*Moderní trendy v oblasti upínací techniky rotačních nástrojů pro HSM aplikace.*“

Velká světová konkurence a neustálý tržní boj nutí strojírenský průmysl zajišťovat a udržovat vysokou produktivitu výroby. Pro splnění některých vysokých požadavků zákazníků by měli jednotlivé společnosti používat moderních metod obrábění, jako jsou například HSC (High Speed Cutting) nebo HPC (High Performance Cutting) technologie. Při těchto moderních metodách obrábění je obvykle využíván potenciál a výkon vřetena obráběcího stroje až na samotné maximum. Pro zajištění dokonalé stability řezného procesu je zde tedy velmi důležitá tuhost celého stroje, ale zejména tuhost celé soustavy S-U-N-O (stroj-upínač-nástroj-obrobek). Řezné nástroje pro takovéto podmínky obrábění jsou již zkonstruovány a na trhu jsou dostupné již řadu let. Avšak problematice a vývoji upínání stopkových nástrojů pro frézovací operace se současní výrobci nástrojů a upínacích pouzder intenzivně věnují až v posledních letech. Přitom o celkové úspěšnosti daného výrobního procesu má upínací pouzdro rozhodující slovo. Můžeme mít špičkový produktivní nástroj i obráběcí stroj, ale jestliže nebude upínací pouzdro splňovat všechny požadavky pro tyto náročné podmínky, tak může být výrobní proces neúspěšný a náklady vynaložené na nástroj i stroj budou tak zbytečné. Při HPC technologii snášejí nástroje zatížení vysokými krouticími momenty a osovými silami při velkých posuvech, aniž by docházelo k jejich poškození. Tyto náročné podmínky jsou však kladeny i na samotná upínací pouzdra, které musí tyto náročné podmínky opakovaně snášet až do konce jejich životního cyklu [6], [36].

Upínací pouzdra jsou konstruována tak, aby přenášela výkon ze stroje na nástroj, a musí přitom pojmout odstředivé síly, veškeré tahové a tlakové síly, torzní zatížení, namáhání v ohybu a stejně tak i chvění vznikající při záběru zubů frézy do obráběného materiálu. Ke zmenšení těchto vyjmenovaných vlivů je třeba splnit velké množství technologických, konstrukčních i ekonomických požadavků. Nejdůležitější parametry, které mají přímý vliv na výrobu upínacích pouzder, se týkají přenosu točivého momentu a axiálních sil, pevnosti v ohybu, vlastnosti přesnosti a kvality vyvážení, vlastnosti tlumení vibrací a schopnosti upnout dostatečnou upínací silou různé typy stopky nástroje. Všechny tyto

parametry mají zásadní vliv na stabilitu upnutí stopkového nástroje v upínacím pouzdře, ale i na celkovou stabilitu řezného procesu. Je velmi důležité, aby všechny vyjmenované faktory a parametry zůstaly při daném řezném procesu v určitých mezích, jinak dochází u velmi zatěžovaných nástrojů upnutých v tepelně smrštitelném upínacím pouzdře k nebezpečí pootočení a dále pak k povytažení z jejich upnutí. Právě tzv. vývrtkové vytahování, které vzniká následkem velkých řezných sil při příliš nízkých upínacích silách, vede během obrábění k vytahování frézovacího nástroje z upínacího pouzdra. Tento jev se potom projevuje během řezného procesu razantní změnou kvality a přesnosti obráběného povrchu, kolísáním velikostí řezných sil, vznikem samobuzeného chvění a celkovým snížením stability řezného procesu. Tyto vyjmenované problémy a rizika vznikají hlavně při používání upínacích pouzder, které zajišťují velmi přesné upnutí nástroje s minimální deklarovanou házivostí, jako jsou například svěrná HSK, hydraulická, ale hlavně tepelně smrštitelná upínací pouzdra.

## 1.1 Obecné poznatky o řešené problematice

Požadavky každého zákazníka jsou obvykle jasně stanoveny daným výrobním procesem. To se týká nejen výběru správné technologie opracování, výběru optimálního nástroje či řezných podmínek, ale také správného výběru upínacího systému. Pro každou aplikaci je nutné vybrat optimální upínací systém, neboť každý typ se vyznačuje určitými odlišnými vlastnostmi, výhodami a nevýhodami. Většina firem zabývajících se výrobou a vývojem nástrojových upínacích pouzder, nabízí široký a ucelený výrobní program přesných upínacích systémů pro stopkové nástroje. Jedná se o program tzv. *Total Tooling*, který umožňuje zákazníkovi výběr z různých typů upínacích pouzder. Tento program zahrnuje hydraulické, polygonální, univerzální, přesné mechanické a tepelně smrštitelné upínače. Jednotlivé systémy jsou ještě v určité míře doplňovány o přístroje a zařízení, které jsou pro ten daný systém nutné k optimálnímu upnutí nástroje či dokonalému vyvážení soustavy upínacího pouzdra s nástrojem [6].

Na celosvětovém trhu se pohybuje celá řada společností, které systémy upínacích pouzder vyrábějí a zabývají se jejich vývojem. Ať už se jedná o ty významnější společnosti, jakou jsou např. GÜHRING, SCHUNK, HAIMEER, ISCAR, nebo o ty méně známé např. GEWEFA či POKOLM, atd. S ohledem na relativně vysoký počet těchto společností roste i počet vyrobených a nově vyvinutých systémů upínacích pouzder. Pro běžného koncového spotřebitele je tedy mnohdy velmi obtížné se ve všech těchto produktech správně zorientovat a získat tak systém upínání nástrojů vhodný pro jeho výrobní produkci. Ve většině případů tak dochází k neefektivnímu, nebo dokonce k chybnému používání daného systému upínání stopkových nástrojů a tím i např. k poškození nástroje, upínacího pouzdra, nebo konkrétních částí obráběcího stroje. Volba konkrétního systému upínání nástrojů by tak měla vycházet z přesně definovaných požadavků zákazníka na daný výrobní proces.

Z hlediska ekonomického je cena upínacího pouzdra zanedbatelná vzhledem k ceně kompletního obráběcího stroje i použitých řezných nástrojů. Jak již bylo zmíněno v úvodní části, upínací pouzdra jsou velmi důležitým a rozhodujícím prvkem mezi řezným nástrojem

a samotným vřetenem stroje. Výběr správného upínacího systému tak velmi výrazně ovlivní výsledek celého výrobního procesu [6].



*Obr.č.1.1-1 – Různé typy upínacích pouzder stopkových nástrojů s SK upínacím kuželem – hydraulická, mechanická a tepelně smrštitelná (zleva) [6]*

## 1.2 Představení zadávající firmy

- zpracováno s pomocí [7], [8]

Německý koncern GÜHRING o.H.G. je jedním z předních světových výrobců a dodavatelů nejen řezných nástrojů, speciálních výrobních strojů a zařízení, ale i upínacích prvků pro rotační nástroje a jejich příslušenství. Nicméně jeho hlavní výrobní sortiment tvoří řezné nástroje pro vrtání, řezání závitů, frézování, vystružování a zahlubování. Zabývá se i výrobou a vývojem speciálních nástrojových systémů určených pro kompletní obrábění tvarově složitých dílů. Jeho současný výrobní sortiment zahrnuje více než 1 620 různých typů nástrojů a přesahuje 44 000 různých provedení. Úspěšná historie firmy je v rukou rodiny GÜHRING již více než jedno století a další vývoj ukazuje, že si udržuje stále stejný trend i v nadcházejících letech. Základem úspěchu společnosti jsou spokojení zaměstnanci, kterých je celkem více než 4 000 – z toho asi 2 300 pracujících v Německu a zbytek v dalších centrech rozmístěných po celém světě. Spokojení zaměstnanci poskytují společnosti denně své know-how, kreativitu, schopnost dále se vyvíjet, vyrábět a distribuovat své výrobky, které jsou ve velké míře inovativní a obohacují tak trh o stále nové a lepší výrobky.

Vývoj velkého množství produktů probíhá v ultra-moderním výzkumném a vývojovém centru. Nicméně i mnoho dalších produktů přichází na svět v celkem 15-ti produkčních centrech a to nejen v Německu. Za účelem poskytování dokonalých služeb zákazníkům po celém světě společnost GÜHRING otevřela celkem 32 servisních středisek, které jsou rozmístěny po všech kontinentech. Dále je GÜHRING představován celosvětově více než 37 pobočkami a distribučními sítěmi rovněž po celém světě. V těchto centrech a střediscích GÜHRING vyrábí, distribuuje a renovuje všechny své produkty. Všechny závody používají pro výrobu stejné materiály a jsou vybaveny identickými stroji. Na celém světě se tedy zákazník může spolehnout na stejně vysokou kvalitu značky GÜHRING. U nás v České republice je od roku 1996 GÜHRING reprezentován dceřinou společností GÜHRING spol. s r.o., která sídlí jihozápadně asi 10 km od Plzně v obci Líně-Sulkov a je tak strategicky umístěna v blízkosti dálnice D5, která spojuje Českou republiku se Západní Evropou.

# GÜHRING



Obr.č.1.2-1 – Sídlo společnosti GÜHRING spol. s r.o. v České republice – Lině-Sulkov (vlevo) [7] a hlavní sídlo koncernu GÜHRING o.H.G. v německém Albstattu (vpravo) [8]



Obr.č.1.2-2 – Certifikát ČSN ISO 9001:2008 [7]

Obr.č.1.2-3 – Certifikát ČSN ISO14001:2005 [7]

Hlavní prioritou firemní strategie společnosti GÜHRING je důraz na spokojenost zákazníka. Z tohoto pohledu vyplývají silné stránky společnosti: výrobní a praktické zkušenosti, schopnost inovace, celosvětový servis, důraz kladený na kvalitu produkce a služeb a v neposlední řadě také ochrana životního prostředí. Díky vlastní výrobě slinutých karbidů a know-how technologii povlakování, vlastní výrobě strojů a zařízení s vývojevým

oddělením, má společnost přímý vliv na jednotlivé parametry nástroje, kterými jsou: materiál nástroje, geometrie a mikrogeometrie břitu nástroje a samozřejmě také systém povlakovaných vrstev. Ke správné realizaci těchto parametrů mají pracovníci veškeré vědomosti a zkušenosti, které shromáždili během více než 100 leté existence společnosti. Zároveň celé výzkumné a vývojové centrum pracuje na inovacích a optimalizacích nástrojů a upínacích pouzder ve vlastní zkušební pomoci nejmodernějších technologií. Více než 130 aplikačních techniků a produktových manažerů zprostředkovává tyto informace a pomáhá zvyšovat produktivitu koncovým uživatelům všech vyráběných produktů společnosti GÜHRING. GÜHRING jako první výrobce nástrojů v roce 1980 použil u vrtáků povlak TiN a dosáhl tak výrazného zvýšení výkonu nástrojů. Rovněž vývoj systému upínání nástrojů se systémem HSK dokazuje výkonnost výzkumného a vývojového centra. V současné době je GÜHRING průkopníkem v oblasti obrábění s chlazením olejovou mlhou (systém MMS) a v oblasti obrábění nových materiálů, jako je litina s vermikulárním grafitem a ADI.

Vyrábět a dodávat vysoce kvalitní výrobky znamená pro společnost GÜHRING také myslet a jednat v zájmu zákazníka. Společnost právě z tohoto důvodu má již od roku 2001 zavedený a pravidelně certifikovaný systém managementu kvality dle normy ČSN EN ISO 9 001, deklarovaný certifikátem (*obr.č.1.2-2*). Společnost dává veřejně najevo i svůj postoj k ochraně životního prostředí. Ochranu životního prostředí považuje za přirozenou součást všech jejích podnikatelských aktivit, a proto již v roce 2003 zavedla a od té doby pravidelně certifikuje systém environmentálního managementu dle ČSN EN ISO 14 001, deklarovaný taktéž patřičným certifikátem (*obr.č.1.2-3*).

## 2 TEORETICKÉ POZNATKY K ŘEŠENÉ PROBLEMATICE

- zpracováno s pomocí [6], [36]

Celosvětová hospodářská krize se v uplynulých letech velmi výrazně podepsala na stavu světového strojírenského průmyslu. Celá řada firem se musela a stále musí velmi pružně vyrovnat s nedostatkem zakázek. Prvním opatřením, jak čelit vysokému úbytku zakázek, je radikální snižování nákladů a hromadné propouštění zaměstnanců. Tyto opatření však nenahradí zdroj příjmů. Jednoduchým nástrojem, jak bojovat s tímto problémem a být na trhu lepší než ostatní, je hledat a odstraňovat úzká místa a zároveň investovat zbylé peněžní prostředky do inovativních technologií. Investice ve výrobních podnicích tak stále více směřují do moderních obráběcích strojů a dalšího potřebného příslušenství, které umožňuje použití moderních vysoce produktivních metod obrábění. Cílem těchto moderních metod obrábění je optimalizace hlavních výrobních ukazatelů, které jsou tvořeny ukazateli technologickými a ekonomickými. Optimalizací se v tomto směru rozumí samozřejmě zvyšování hodnot technologických ukazatelů (vyšší kvalita a přesnost výroby) a snižování hodnot ekonomických ukazatelů (snižování výrobních nákladů – snižování výrobních časů, zvyšování produktivity a efektivity práce u výrobních i nevýrobních činností tvořících výrobní proces). V dnešní době, kdy je kladen velký důraz na ochranu životního prostředí, nelze opomenout ani příslušné ekologické ukazatele. Rozšíření těchto moderních metod obrábění je samozřejmě otázkou jejich ekonomické rentability. Prioritní stránkou jsou zde náklady na jejich zavedení a jejich následný provoz. Naproti tomu jsou úspory, jakých lze pomocí aplikace těchto metod dosáhnout. Náklady na zavedení moderních metod obrábění nabývají poměrně vysokých hodnot, protože pro úspěšnost jejich použití je zapotřebí velmi dokonalé spolupráce všech prvků výroby, které se podílejí na procesu obrábění. To se týká i vedlejších časů obráběcích procesů. Klíčovou roli zde však hraje stabilita řezného procesu, která je určena vlastnostmi soustavy S-U-N-O. Mezi hlavní prvky této soustavy, které jsou předpokladem pro úspěšný obráběcí proces, patří samozřejmě daný obráběcí stroj, řezný nástroj a obrobek. Upínání nástrojů však také velmi zásadním způsobem ovlivňuje stabilitu řezného procesu. Po dlouhou dobu byla problematika upínání nástrojů věnována jen nepatrná pozornost. Ale tento pohled se změnil. Pokud není v souladu přesnost obvodového házení upínacího pouzdra s přesností ostatních rozhodujících faktorů, neodpovídá jim výsledek obrábění a ani kvalita obrobeneho povrchu. Nástroj a včetně „trpí“ a opotřebovávají se. Kromě toho je potřeba stále více se zaměřovat na jednoduchý, rychlý a opakovatelný proces obrábění.

Náklady na kvalitní upínací pouzdra jsou nepatrné. Jelikož upínací pouzdra, která se zakoupí s originálním vybavením od výrobce, zůstávají zpravidla trvale na stroji, jsou jednorázovou investicí, která se dlouhodobě vyplatí. Studie prokázaly, že celkové výdaje na upínací pouzdra tvoří méně než 0,5 procenta z celkových výdajů na daný obráběcí proces. Na upínacím pouzdře se tedy nevyplatí šetřit, zejména pokud může znatelně přispět ke kvalitě a produktivitě. Většina inovativních podniků provedla analýzu své upínací techniky a výsledek je přesvědčivý. V řadě jejich nejhodnotnějších obráběcích center lze vidět frézovací nástroje upnuté výhradně v tepelně smrštitelném pouzdře. Z toho je jasné, že upínací pouzdra



jsou velice důležitým spojujícím prvkem mezi řezným nástrojem a vřetenem stroje. Volbu daného systému upínání proto musí každý pečlivě zvážit [6].

Spolehlivost řezného procesu z hlediska upnutí nástroje v tepelném upínacím pouzdře je dána výrobní tolerancí a kvalitou povrchu stopky nástroje a dutiny upínacího pouzdra, použitými řeznými podmínkami, řeznými silami vznikajícími při procesu řezání a vznikajícím chvěním. Jedná se o dynamické faktory, které se mohou velmi razantně měnit během procesu obrábění a jejichž působením může dojít až k povytažení nástroje z upínacího pouzdra. To může být následkem nepřesností výrobního procesu, poškození obráběcího stroje nebo ohrožení bezpečnosti obsluhy obráběcího stroje. Pro bezproblémové používání tepelného systému upínání tak platí striktní podmínky, které se doporučují dodržovat. Uživatel by měl před samotným upnutím nástroje dokonale očistit a odmastit stopku nástroje a dutinu upínacího pouzdra. Různé konzervační oleje, zbytky řezné kapaliny nebo nečistoty mohou způsobit, že se sníží požadovaná upínací síla (snížení koeficientu tření ve stykové ploše) a nástroj nebude upnut s dostatečnou tuhostí. Dalším problémem je správné používání upínacího aparátu. Tělo upínacího pouzdra je během upínání zahříváno na stanovenou teplotu při které se ještě nemění mechanické vlastnosti materiálu upínacího pouzdra. Dojde-li k přehřátí pouzdra na vyšší teploty, pouzdro ztrácí své původní mechanické vlastnosti a může dojít k nepatrné změně geometrické přesnosti v dutině upínacího pouzdra. To může mít za následek taktéž pokles upínací síly. Navíc se mohou vzniklé nepřesnosti s dalším upínáním ještě dále zvětšovat, až se nástroj do pouzdra nedá upnout vůbec.

## 2.1 Technologie obrábění – frézování

Frézování je způsob obrábění rovinných nebo tvarových ploch vícebřitým nástrojem. Je to výrobní metoda, při níž odebírají materiál obrobku zuby nástroje otáčejícího se kolem pevné osy. Posuv součástí přitom probíhá převážně ve směru kolmém k této ose. U moderních frézovacích strojů jsou posuvné pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceré CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky. Možnost mnohostranné aplikace a přesnost frézování jsou hlavní příčinou jeho širokého uplatnění v praxi. Mimoto frézováním velkými řeznými rychlostmi lze až na některé případy zajistit vyšší a hospodárnější úběr obráběného materiálu, než při obrábění jednobřítým nástrojem [1], [2].

Ve strojírenské praxi se stále často setkáváme s tím, že i na obráběcích centrech podporující více-osé souvislé obrábění se přídavné osy pouze indexují a vlastní pohyb probíhá tedy jen ve třech, popřípadě dvou osách. Je tomu tak, protože některé pěti-osé stroje vznikly jen na základě přidání přídavného otočného stolu na klasickou koncepci tří-osého obráběcího stroje. Tyto pěti-osé stroje se používají především pro obrábění složitých tvarových ploch hlavně z důvodu: možnosti vyklonit nástroj a dostat se s nástrojem do těžko přístupných míst – výroba zápustek a forem, eliminace nulové řezné rychlosti na špičce kulové frézy, možnosti zkrácení vyložení nástroje a tím i snížení případných vznikajících vibrací a prodloužení životnosti celé soustavy S-U-N-O [3].



### 2.1.1 Upínání frézovacích nástrojů

- zpracováno s pomocí [1], [10], [14]

V předcházejících kapitolách jsme již byli seznámeni s různými typy frézovacích nástrojů a s jejich různými provedeními. Hlavní náplní této práce je právě zkoumání upnutí daného stopkového nástroje ve stroji pomocí tepelného upínače. Nicméně je třeba mít alespoň základní přehled o způsobech upnutí jednotlivých typů nástrojů do vřetena stroje. Na jednotlivé systémy upnutí stopkových nástrojů se ještě konkrétněji zaměříme v kapitole 3.2. Frézovací nástroje tedy dělíme dle způsobu upínání na stopkové a nástrčné. Stopkové mohou mít stopku válcovou nebo kuželovou (Morse kužel).

Upínací kužel frézovacích trnů a pracovního vřetena může být buď metrický s kuželovitostí 1:20, Morse 1:19 až 20 nebo strmý 1:3,5. Samotné upnutí může být také realizováno pomocí dutého upínacího mechanismu HSK nebo pomocí KM upínačů. Kužel metrický a Morse jsou samosvorné a mohou přenést moment z vřetena na frézovací trn nebo na upínací pouzdro. Aby byl přenos momentu dokonalý, má konec vřetena obdélníkové vybrání, do něhož zapadá zploštělý nákrůžek na konci frézovacího trnu. Trny s těmito kužely se nesnadno vyjmají z pracovního vřetena. Strmý kužel pouze středí trn v pracovním vřetenu. Krouticí moment se přenáší dvěma kameny upevněnými na čele vřetena, které zapadají do vybrání na nákrůžku frézovacího trnu. Frézovací trny se strmým kuželem se snadno vyjmají z vřetena frézky. Neshoduje-li se kužel stopky frézovacího trnu nebo kužel upínacího pouzdra s kuželem ve vřetenu frézky, používá se redukčních pouzder různého provedení.

#### Upnutí nástrčné frézy do upínacího trnu (obr.č.2.1.1-1)

Frézovací trny mají na jednom konci kuželovou stopku, pomocí které se upínají do dutiny vřetena. Krouticí moment se přenáší pérem v drážce frézovacího trnu a drážce frézy. Válcové nástrčné frézy se upínají na dlouhé frézovací trny. Čelní nástrčné frézy a frézovací hlavy se upínají na krátké frézovací trny. Poloha frézy se na trnu zajišťuje rozpěracími kroužky volně navlečenými na frézovacím trnu. Aby upnutí nástrojů v trnech bylo co nejtuzší, upínají se frézy co nejblíže k vřetenu a výsuvné rameno se přisune k fréze tak blízko, jak je to jen možné.



Obr.č.2.1.1-1 – Krátký frézovací trn pro nástrčnou frézu s upínacím kuželem SK-40 [12]

### Upnutí frézy do sklíčidla a upínací kleštiny (obr.č.2.1.1-2)

Do sklíčidla a kleštiny se upínají stopkové frézy s válcovou stopkou. Sklíčidla a kleštiny mají kuželovou stopku pro upnutí do vřetena, nebo jsou pomocí různých systémů spojeny s držákem s kuželovou stopkou.



*Obr.č.2.1.1-2 – Sada pro upínání nástrojů pomocí kleštin [13]*

### Upnutí frézy do vřetene stroje

Do vřetene se dají upnout pouze frézy s kuželovou stopkou. Mohou se upínat přímo do vřetene nebo pomocí redukčního pouzdra. Krouticí moment je potom přenášen pomocí tření vznikajícího mezi vřetenem stroje a stopkou nástroje.

### Letmé upnutí frézy

Toto upnutí slouží k upnutí stopkové frézy do vřetena s upínacím pouzdem nebo frézovací hlavy upnuté na krátkém frézovacím trnu.

### Závěsné upnutí frézy

Slouží pro upnutí nástrčné nebo stopkové frézy. Fréza je upnuta co nejbližší vřetena (minimální vyložení nástroje = minimalizace vznikajícího chvění), nebo je možné upnout frézu na dlouhý trn upnutý do horizontálního vřetene a podepřený v ložisku.

## **2.2 Systémy upínání stopkových nástrojů**

Mezi důležité předpoklady k dosažení optimálního výkonu obráběcího procesu patří pevné, tuhé, přesné a dostatečně spolehlivé upnutí použitých řezných nástrojů v každé obráběcí operaci. Dokonalé upnutí nástrojů má také významný vliv na přesnost a jakost obrobenejších ploch, trvanlivost břitů řezných nástrojů a na jejich hospodárné využívání. Každá moderní výrobní technologie potom klade svá specifika na upnutí nástroje se svými vlastními požadavky na přesnost upnutí nástroje v upínacím pouzdře [15].

Upínací pouzdra představují významný článek obráběcího uzlu, který spolurozhoduje o kvalitě výrobního procesu i výsledného produktu. Při realizaci každé operace obrábění, bez ohledu na její kinematické uspořádání, je třeba vhodným a přiměřeným způsobem upnout řezný

nástroj. Následující kapitola se bude věnovat jednotlivým systémům upínání – požadavky a charakteristika upínání, konstrukční provedení a také použití upínacích pouzder [6].

### 2.2.1 Základní požadavky na systémy upínání

Základním požadavkem na každé upínací pouzdro je vyvození dostatečné upínací síly i při vysokých řezných rychlostech procesu obrábění a zajištění přesného upnutí nástroje, tzn. zaručení minimální obvodové házivosti. Dalším velmi důležitým požadavkem je dynamické vyvážení, přívod procesní kapaliny přímo do místa řezu a dodržení vysoké pevnosti v ohybu (z důvodu působení velkých řezných sil). Nesmíme zapomenout ani na snadnou a bezpečnou obsluhu. Kromě těchto základních předpokladů mohou ještě upínací pouzdra disponovat ochrannými funkcemi. Například je žádoucí, aby mělo upínací pouzdro do určité míry schopnost tlumit chvění, které vzniká při daném obráběcím procesu. Touto ochrannou funkcí je chráněno především vřetenem obráběcího stroje, ale také se do určité míry zabraňuje vzniku nežádoucího opotřebení břitu nástroje (vzniku tzv. mikrovýlomků). Tímto dochází k prodloužení životnosti nástroje a v celkovém důsledku se tak snižují celkové náklady na obráběcí proces [6].

#### 2.2.1.1 Požadavky na vyvážení upínacího pouzdra

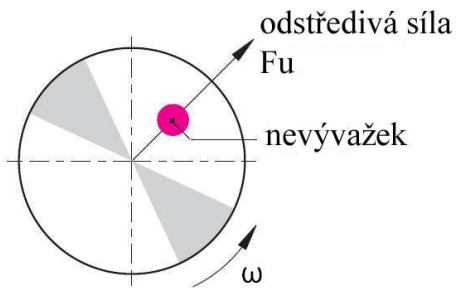
- zpracováno pomocí [6], [16], [17]

Vyvážení upínacího pouzdra, ale i celé soustavy S-U-N-O se stává kritickým faktorem při zvyšování otáček vřeten. Na upínací pouzdro i řezný nástroj působí stále větší odstředivé síly a jakákoliv nevyváženost způsobuje vznik nežádoucích vibrací. Při použití upínacího pouzdra u moderních vysokorychlostních metod obrábění musíme dbát na individuální vyvážení pouzdra přímo z výroby, ale i na vyvážení celé soustavy pouzdra s nástrojem. Základními příčinami nevyvážené soustavy upínacího pouzdra s nástrojem mohou být:

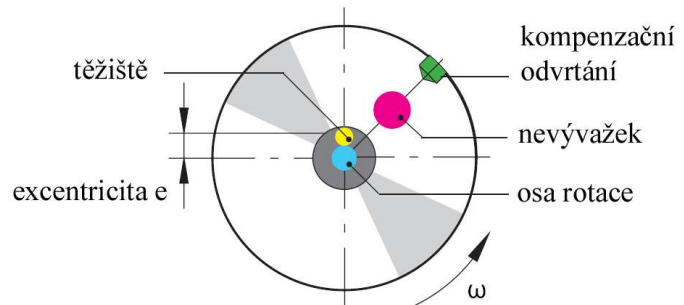
- Nerovnoměrné rozložení hmoty kolem osy rotace (drážky, otvory, atd.) - *obr.č.2.2.1.1-1*
- Excentricita (vzdálenost mezi osou rotace a těžištěm nástroje či pouzdra)
- Lícování a tolerance (mezi vřetenem stroje, upínacím kuželem a stopkou řezného nástroje)

Obecně k nevyváženosti dochází, když centrální hlavní osa setrvačnosti rotujícího tělesa není shodná s geometrickou osou daného tělesa. Nevyváženost se potom ještě rozděluje na tři druhy:

- Statická nevyváženost
- Momentová (párová) nevyváženost
- Dynamická nevyváženost – kombinace statické a momentové nevyváženosti



Obr.č.2.2.1.1-1 – Nepravidelně rozložená hmota kolem osy rotace [17]

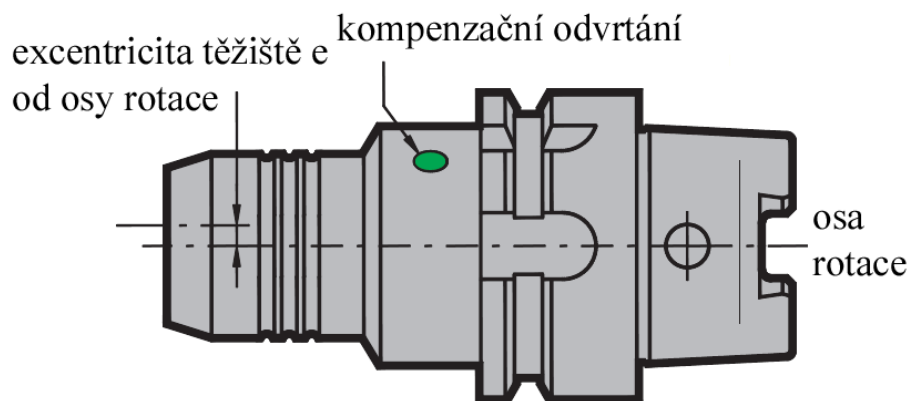


Obr.č.2.2.1.1-2 – Dynamicky vyvážená soustava pomocí odvrtání [17]

Upínací pouzdro nebo celá soustava - pouzdro s nástrojem, které se může otáčet kolem osy procházející těžištěm je ve stavu tzv. *statické vyváženosti*. Pokud potom takovéto pouzdro či soustava rotuje kolem osy, dochází v důsledku odstředivých sil ke vzniku dodatečných sil, které se snaží vychýlit osu rotace ze svého směru. Tento problém lze potom odstranit rozložením hmoty tělesa vzhledem k rotační ose tak, aby výslednice všech odstředivých sil a jejich momenty byly nulové. Takováto soustava je potom ve stavu tzv. *dynamické vyváženosti* (viz. obr.č.2.2.1.1-2). Rozložení hmoty tělesa se provádí různými způsoby – např. odvrtáním. Další způsoby jsou zmíněny v kapitole 2.2.1.2. Naším cílem je tedy mít soustavu pouzdra s nástrojem ve stavu *statické a dynamické vyváženosti*.

Vzorec pro výpočet míry nevyvážení:  $U = m \cdot e$ , kde  $m$ ...hmotnost nevyvážku  
 $e$ ...excentricita

Jednotka míry nevyvážení:  $[U] = g \cdot mm = kg \cdot mm$



Obr.č.2.2.1.1-3 – Staticky a dynamicky vyvážené upínací pouzdro s HSK kuželem [17]

### 2.2.1.2 Vyvažování upínacích pouzder

K vyvažování upínacích pouzder dnes již existuje celá řada přístrojů. Avšak všechny pracují na stejném nebo podobném principu. Vyvažovací přístroje používají rotoru ke zjištění míry nevyváženosti pouzdra. Toto místo označí a poté lze buď dodáním, nebo odebráním materiálu danou nevyváženost eliminovat. Standardně se používají tyto způsoby: odvrtání nebo odfrézování materiálu, vyvažovací šrouby a vyvažovací kroužky. Přičemž odvrtání či odfrézování materiálu z těla upínacího pouzdra provádí většinou již při výrobě pouzdra

výrobce. Lze tak snížit velké obvodové házení. Tento způsob vyvažování je však zcela nevhodný pro upínací pouzdra, která jsou určena pro vysokorychlostní obrábění. Odstraňováním materiálu z těla upínacího pouzdra dochází k jeho nevratné změně a je tím snižována celková tuhost upínacího pouzdra. Daleko více jsou využívány vyvažovací šrouby. Do upínacího pouzdra jsou vyvrtány 4 otvory (někdy i více, záleží na průměru pouzdra) a zašroubováním šroubků o určité hmotnosti se nevyváženost eliminuje. Dalo by se říci, že nejpoužívanějším prostředkem k redukci nevyváženosti jsou vyvažovací kroužky. Kroužky se vždy používají v páru a jsou vyrobeny excentricky. To znamená, že v určitém místě mají více materiálu a jsou v tomto místě těžší. Připevněny jsou k držáku jedním šroubem. Díky excentricitě lze pouhým pootočením kroužků do správné pozice eliminovat nevyváženost. Tento způsob je velice rychlý a efektivní. Ani při vysokých otáčkách se kroužky v žádném případě nepootočí ani nepovolí. Dle průměru jsou kroužky konstruovány na otáčky vřetena přes  $55\,000\text{ min}^{-1}$  [6].

Ukázka automatického CNC vyvažovacího přístroje od společnosti HAIMER na obr.č.2.2.1.2-1. Jedná se o přístroj, který je opatřen automatickou korekcí nevyvážení v jedné nebo ve dvou rovinách pomocí vrtání, frézování a broušení materiálu v horizontální či vertikální poloze.



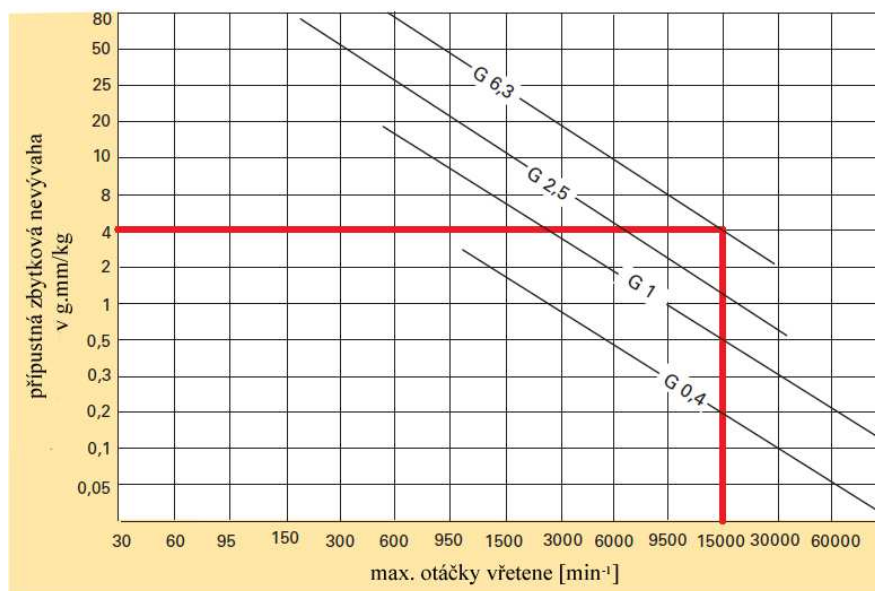
Obr.č.2.2.1.2-1 – Univerzální automatický CNC vyvažovací přístroj HAIMER TD 2010 Automatic s automatickou korekcí nevyvážení [22]

Dle normy ISO 1940 může být míra nevyvážení určena indexem kvality vyvážení  $G$ , který platí pouze pro určité provozní otáčky rotoru. Z jakosti vyvážení, provozních otáček a hmotnosti rotoru se potom vypočítává zbytková nevyváženost  $U$ . Na obr.č.2.2.1.2-2 je znázorněn diagram od společnosti GÜHRING, která garantuje vyvážení všech jejich upínacích pouzder na  $G = 6,3\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , při  $15\,000\text{ min}^{-1}$  a odpovídající hmotnosti pouzdra. Což odpovídá přibližně hodnotě vyvážení:  $U = 4\text{ g}\cdot\text{mm}$ . Takováto kvalita vyvážení upínacích

pouzder zajišťuje bezproblémové použití v oblasti moderních vysokorychlostních metod obrábění [16], [17].

Vzorec pro určení indexu kvality vyvážení:

$$G = \frac{e}{100} \cdot \omega = \frac{U}{1000 \cdot M} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$



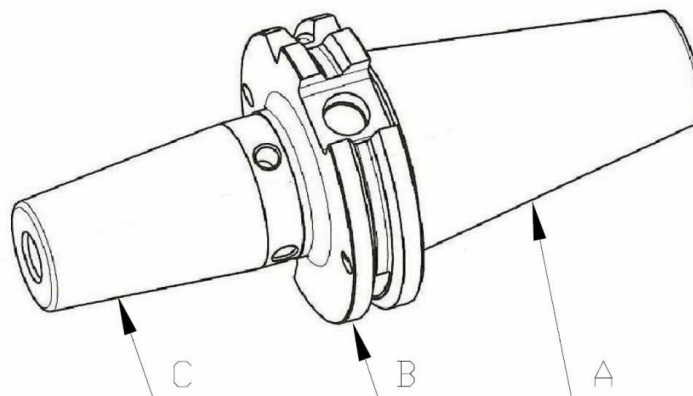
Obr.č.2.2.1.2-2 – Diagram indexu kvality vyvážení  $G$  v závislosti na otáčkách vřetene a velikosti nevyvážen $U$  [17]

## 2.2.2 Základní konstrukční provedení upínacího pouzdra

- zpracováno s pomocí [6], [18]

Konstrukční provedení upínacích pouzder se liší pouze s použitím odlišných systémů upínání. V základu je ve všech případech zachována stejná nebo podobná základní konstrukce. Každé upínací pouzdro se skládá ze 3 základních částí (viz. obr.č.2.2.2-1):

- Kužel (A)
- Příruba (B)
- Upínací část pro nástroj (C)



Obr.č.2.2.2-1 – Schéma těla upínacího pouzdra



Kužel (část **A**) zajišťuje přesné propojení upínače s vřetenem stroje, příruba (část **B**) slouží k případné regulaci nevyváženosti a přenosu krouticího momentu z vřetene stroje na další části soustavy S-U-N-O, provedení upínací části pro nástroj (část **C**) se víceméně liší s každým typem upínacího pouzdra.

Strojní vřetena u konvenčních nebo CNC obráběcích strojů jsou opatřena přesně broušeným vnitřním kuželem. Do tohoto kuželu je následovně upnuto samotné upínací pouzdro. Na upínacím pouzdře tomuto odpovídá část **A** (kužel). Na začátku kužele se přitom nachází utahovací čep nebo vyvrtaná díra se závitem, sloužící ke správnému vtažení upínacího pouzdra do vřetene stroje. Upínací pouzdro je tak do vřetene stroje vtaženo přes unášecí čep nebo přes šroub. U CNC obráběcích strojů se děje automatická výměna nástrojů výhradně přes unášecí čep.

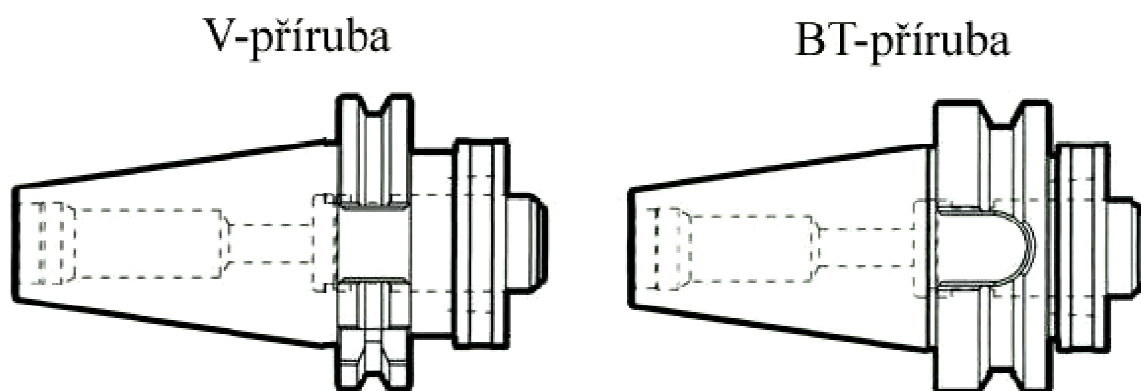
### 2.2.2.1 Typy kuželových stopek

Typy kuželových stopek určených pro frézování byly již zmíněny v kapitole o frézování. V této kapitole je poskytován základní přehled dnes nejvíce používaných kuželových stopek. Pro velmi přesné upnutí nástrojů a upínacích pouzder do vřetena lze použít především tyto kuželové stopky:

- Strmý kužel (CAT, BT, TC, ISO)
- Dutý HSK kužel (Hohlschaft-Kegel)
- Morse kužel
- Držáky s délkovou redukcí a naklápěcím pouzdrem (závitníky, výstružníky)
- Ostatní (NC-stopka, ABS stopka, válcová stopka DIN 1835 A, atd.)

### 2.2.2.2 Typy přírub

Existuje velké množství adaptérů, které jsou uzpůsobeny pro odlišné velikosti obráběcích strojů. Pomocí příruby je upínací pouzdro unášeno strojním vřetenem, ale také lze pomocí příruby do určité míry regulovat míru nevyváženosti celého upínacího pouzdra. Existují dva nejrozšířenější typy přírub: *BT* příruba a *V* příruba. Základní rozdíly mezi těmito dvěma typy přírub jsou patrné z *obr.č.2.2.2.2-1*.



Obr.č.2.2.2.2-1 – Základní rozdíly mezi V-přírubou a BT-přírubou [6]

Upínací pouzdro *V-příruby* má metrický závit pro utahovací čep. Upínací pouzdro *BT-příruby* je opatřeno taktéž metrickým závitem pro utahovací čep, ale je více rozšířeno zejména u japonských a evropských obráběcích center.

### 2.2.3 Jednotlivé systémy upínání

Zpracováno pomocí [6]. Z hlediska principu upnutí nástroje do upínacího pouzdra lze rozdělit systémy upínání do základních 4 skupin:

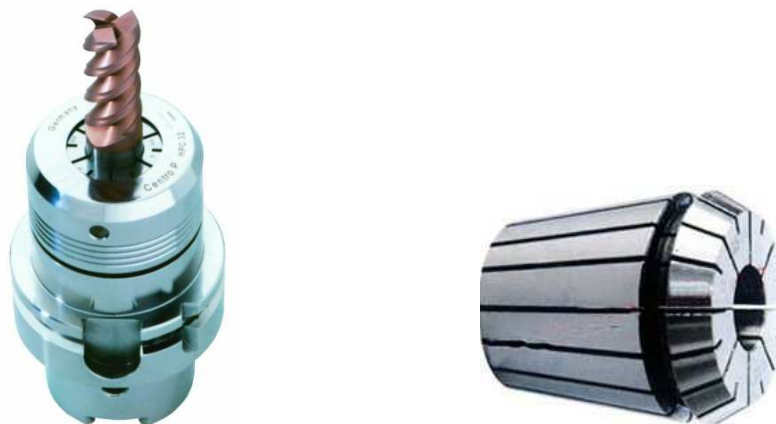
- Mechanické upínání (ER kleštiny, Weldon, Whistle Notch, TRIBOS, aj.)
- Hydraulické upínání (hydroplastické, hydromechanické)
- Tepelné upínání
- Speciální upínací pouzdra (inovace od společností GÜHRING, HAIMER, apod.)

#### 2.2.3.1 Mechanické upínání

- zpracováno s pomocí [6], [14], [18]

Mezi základní typy mechanických upínacích pouzder patří kleštinová pouzdra s ER kleštinou dle evropské normy DIN 6388 a DIN 6499. Upínací síla je u nich vyvozena zatažením kleštiny maticí do upínacího pouzdra. Jako další typy mechanických upínacích pouzder lze do této skupiny zařadit upínací pouzdra typu „Weldon“ nebo „Whistle Notch“. Upínací síla je zde vyvozena pomocí radiálního šroubu. Je tedy nutné, aby byl nástroj opatřen vyfrézovanou čelní plochou na stopce nástroje. Dále do této skupiny patří i inovace mechanických upínacích pouzder, zejména od fy. SCHUNK. Tyto systémy byly speciálně vyvíjeny pro moderní způsoby obrábění (HSC, HPC, apod.). Jsou jimi například: polygonální upínací systém *TRIBOS*, univerzální mechanické upínače nebo přesné mechanické upínače.

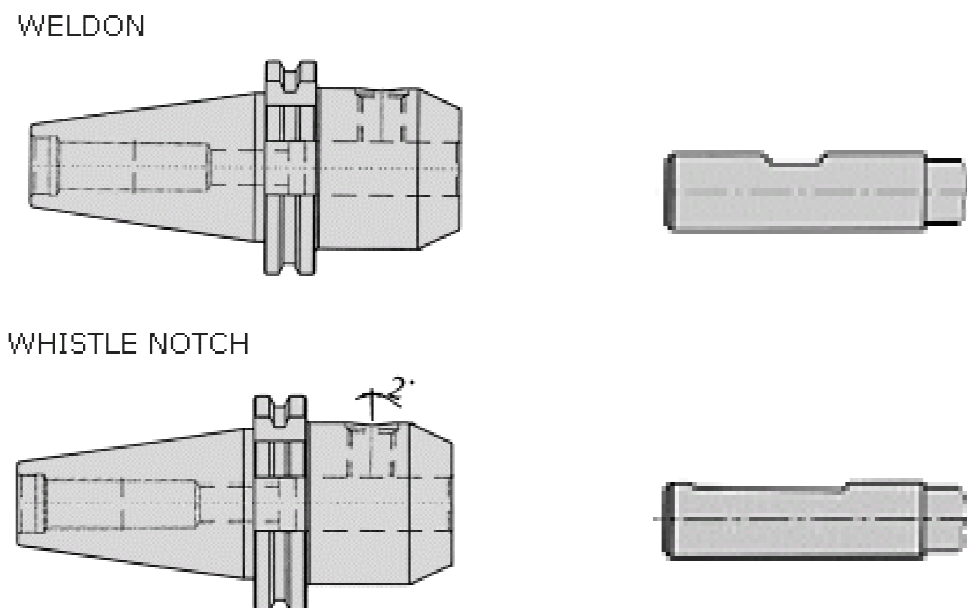
Za dobu používání kleštinových pouzder bylo dosaženo jejich maximální technické dokonalosti. Avšak i přesto jsou nevhodné pro moderní vysokorychlostní obráběcí metody. Je to hlavně z důvodu nedostatečné upínací síly a horší axiální i radiální házivosti. Použití tohoto typu upínání pro vysoce produktivní nástroje, vyrobených z moderních materiálů, tedy není optimální a při takovéto aplikaci tak nelze využít plný potenciál daného nástroje. Detail kleštinového upínacího pouzdra s příslušnou ER kleštinou je znázorněn na *obr.č.2.2.3.1-1*.



Obr.č.2.2.3.1-1 – Mechanické kleštinové upínací pouzdro a ER kleština [6]

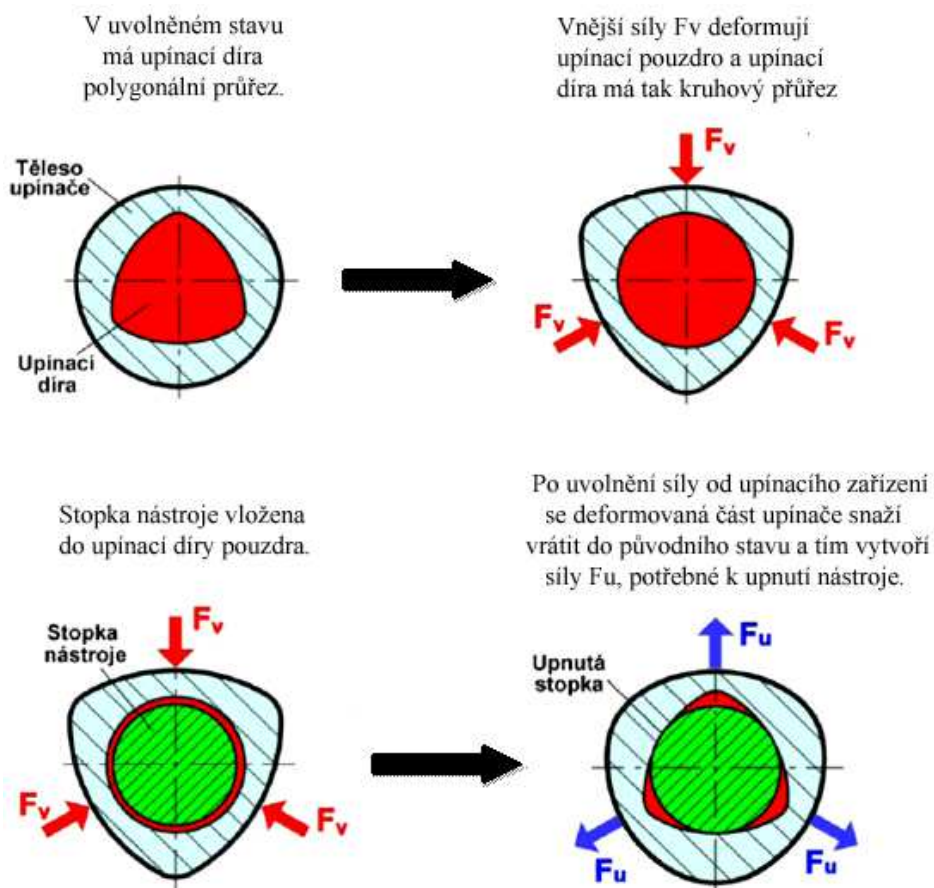


Upínací pouzdra typu Weldon a Whistle Notch jsou rovněž nevhodná pro moderní metody obrábění. Není to z důvodu nízké upínací síly, ale pro relativně vysokou hodnotu nevyváženosti. V pouzdře je vyvrtán otvor pro upínací šroub, který zajišťuje upínací sílu a je také pojistkou proti vytáhnutí nástroje. Rozložení hmoty uvnitř těla upínacího pouzdra je tak z důvodu odběru materiálu nerovnoměrné a upínač není dokonale dynamicky vyvážen. Samotný řezný nástroj je ve správné poloze držen pomocí radiálního šroubu. Pro správnou funkci tak musí být nástroj na stopce opatřen čelní plochou. Rozdílný tvar čelní plochy na nástroji u upínacích pouzder typu „Weldon“ a „Whistle Notch“ je zřejmý z obr.2.2.3.1-2.



Obr.č.2.2.3.1-2 – Mechanická upínací pouzdra „Weldon“ a „Whistle Notch“ a příslušný tvar čelních ploch na nástroji [6]

Dalším systémem mechanického upínání je polygonální systém TRIBOS od společnosti SCHUNK. Princip tohoto systému je překvapivě jednoduchý, ale naopak velice sofistikovaný. Spočívá ve vlastní pružné deformaci těla upínače, při které nedochází k žádným molekulárním změnám v materiálu. Postup upínání a uvolňování nástroje lze tedy opakovat bez omezení určitého počtu cyklů. Mezi výhody tohoto systému tedy patří: přesné upnutí nástroje (až 0,003 mm), extrémně štíhlá konstrukce, tlumení vibrací, rychlá a jednoduchá výměna nástroje bez dalších nutných periferních činností, procesní bezpečnost a v neposlední řadě také relativně nízké pořizovací náklady. Tento systém zajišťuje velmi dobrou vyváženost a vysokou upínací sílu. Princip upnutí je zřejmý z obr.č.2.2.3.1-3.



Obr.č.2.2.3.1-3 – Princip upínání polygonálního systému TRIBOS [6]

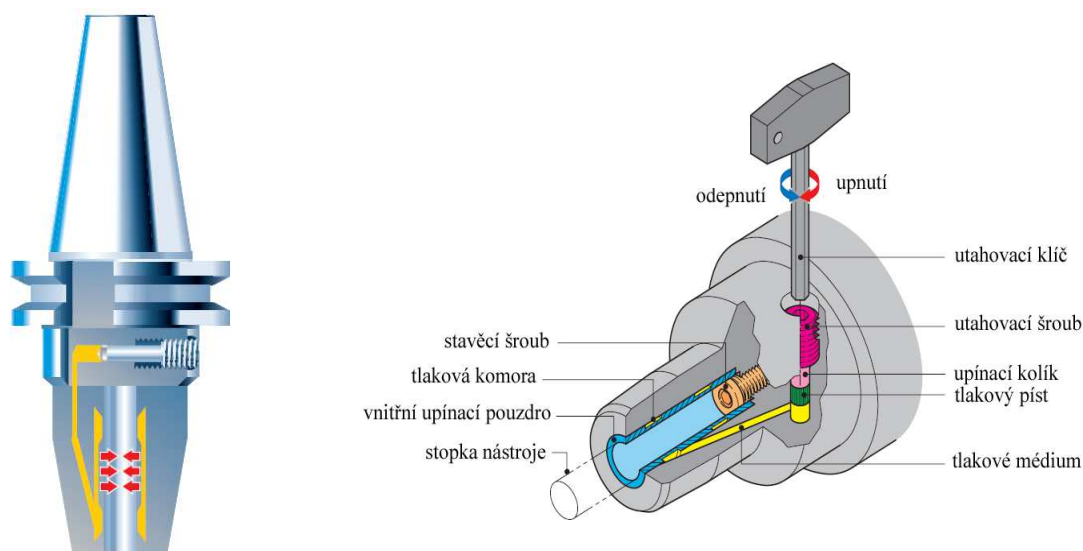
### 2.2.3.2 Hydraulické upínání

- zpracováno s pomocí [6], [14], [18]

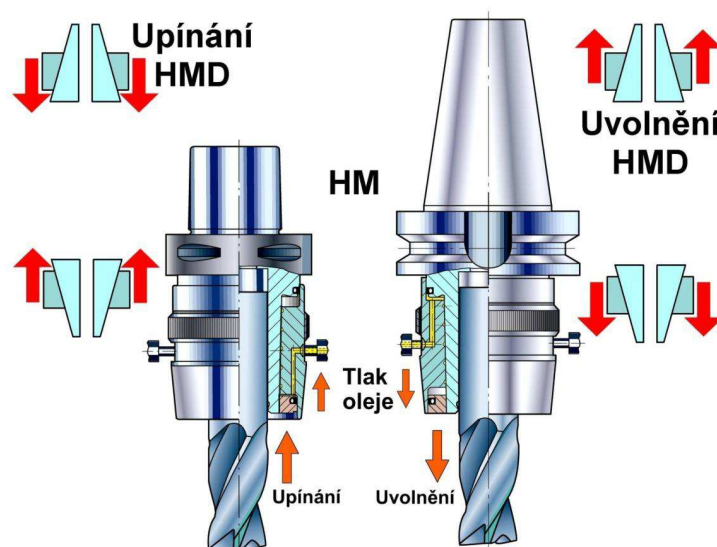
Jedná se o jeden z nejpoužívanějších systémů upínání nástrojů. Dá se říci, že hydraulická upínací pouzdra garantují optimální odebrání třísky se zaručeným prodloužením životnosti obráběcích nástrojů. Tento systém upínacích pouzder hraje významnou roli při zajištění produktivity a kvality třískového obrábění. Hydraulická upínací pouzdra jsou schopna při využití tlakového média dosáhnout vysoké síly upnutí a optimálním způsobem utlumit chvění vzniklé vnitřními i vnějšími vlivy v průběhu obrábění. Tato osově symetrické pouzdra se díky své konstrukci a rovnoměrnému rozložení upínacích sil vyznačují zaručenou vysokou a opakovatelnou přesností obvodové házivosti menší nebo rovno 0,003 mm. Tento fakt je doplňován skutečností, že při obrábění s tímto typem upínače dosáhneme vysoké kvality povrchu obráběného dílu. Díky tlumící vlastnosti olejového média a z toho vyplývajícího klidného chodu nástroje se nástrojové břity snadněji a rovnoměrněji zařezávají do obráběného materiálu, čímž se snižuje míra mikroskopického vylamování řezné hrany nástroje. Výsledkem je prodloužení životnosti nástroje a také šetrné zacházení se vřetenem stroje.

Hydraulická upínací pouzdra můžeme rozdělit do dvou skupin. Dělí se podle způsobu vyvození upínací síly na řezný nástroj. Je-li upínací síla vyvozena pomocí upínacího šroubu,

který působí na tlakové médium a přenosem tlakového signálu uvnitř tohoto média dochází k roztahování upínací stěny držáku, jedná se o tzv. *hydroplastické upínání* (obr.č.2.2.3.2-1). Je-li však tlakové médium používáno pouze na posuv mechanických segmentů, které zajišťují upnutí nástroje, vzniká tak samosvorný systém a jde o tzv. *hydromechanické upínání* (obr.č.2.2.3.2-2).



Obr.č.2.2.3.2-1 – Princip hydroplastického upínání [17]



Obr.2.2.3.2-2 – Princip hydromechanického upínání [6]

### 2.2.3.3 Tepelné upínání

Tepelná upínací pouzdra si mezi nástrojovými upínači získávají stále větší oblibu. Přispívají k vyšší přesnosti a kvalitě povrchu u obrobků a jsou přitom zpravidla ekonomičtější než alternativní nástrojové upínače. Jednoduchá konstrukce tepelných upínačů nabízí ojedinělé možnosti. Mohou být zhotoveny s téměř libovolnou geometrií. Od extra štíhlého provedení pro zpracování hlubších dutin v konstrukci forem až po tlustostěnné s extrémní

tuhostí a upínací silou pro těžké obrábění. Vysoká rychlost obrábění (HSC) nebo vysoký výkon obrábění (HPC) zde nehraje žádnou roli. Tepelnými upínači lze pokrýt celé spektrum. Vysoká přesnost upnutí umožňuje použití různých nástavců a prodloužení. Uživatel si tak může ze „stavebnice“ složit ideální upínač přímo pro své účely. S teleskopickým prodloužením může být také nastavena optimální délka. Ukázky tepelných upínačů s SK a HSK upínacím kuželem a daným adaptérem pro nepřístupná místa od společnosti GÜHRING zobrazeny na *obr.2.2.3.3-1* [6], [14], [18].

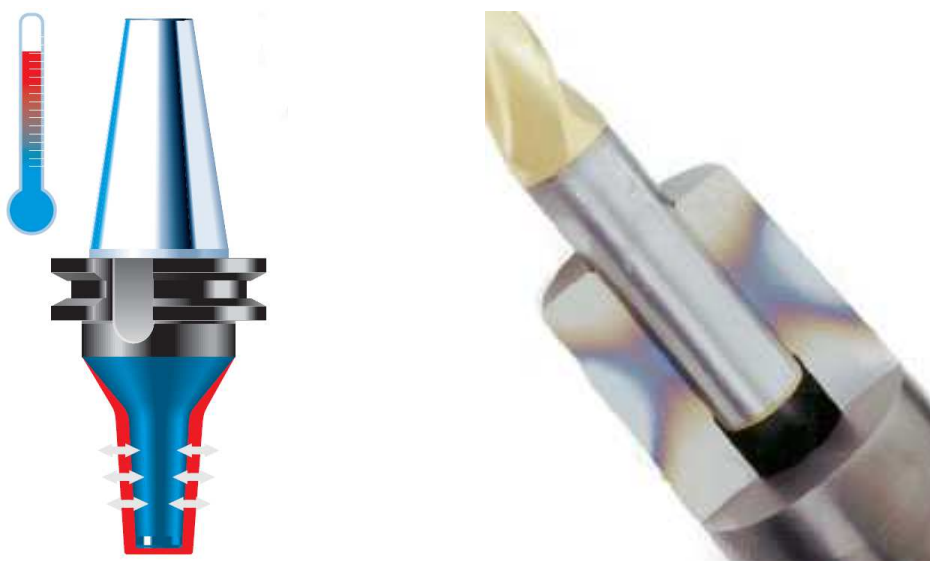


*Obr.č.2.2.3.3-1 – Tepelné upínače s odlišnými upínacími kužely od společnosti GÜHRING (zleva): SK upínací kužel, HSK upínací kužel, adaptér pro nepřístupná místa [20], [19]*

Hlavní výhodou tohoto systému upínání nástrojů je tedy zejména vysoká přesnost upnutí a jednoduchá obsluha. Nejsou zde žádné přídavné elementy, jako je tomu u kleštinových pouzder nebo pouzder typu „Weldon“ a „Whistle Notch“. Proto zde nedochází k opotřebování žádných vnitřních mechanických částí. Vysoká kvalita použitého materiálu tepelných upínačů umožňuje upínat nástroje smršťováním více než 5000-krát. Důsledkem rotačně symetrického tvaru pouzdra je také zaručeno minimální obvodové házení, které se pohybuje řádově okolo 0,003 mm [6], [14], [18].

Tepelná upínací pouzdra jsou vyrobena ze speciálních tepelně roztažných materiálů. Jsou ohřívána prostřednictvím indukční cívky. Tato indukční cívka vytváří rychle střídavé vířivé proudy – magnetické silové pole, které způsobuje teplo a působí přesně v bodě, kde je umístěna stopka nástroje. Během pár vteřin tak dojde k indukčnímu lokálnímu ohřevu pouzdra na potřebnou teplotu, při níž se otvor upínacího pouzdra rozšíří na potřebný průměr pro pohodlné vsazení nástroje. Přenášená energie na upínací pouzdro je přitom minimalizována, což má za následek rychlý ochlazovací proces. Toto je enormně důležité, jelikož u tepelného upínání se počítá s časem nejen ohřevu, nýbrž i ochlazení. Výsledkem upnutí nástroje po ochlazení vzduchem či vodou je téměř homogenní jednotka nástroje a upínacího pouzdra, jako by to byl jeden samostatný celek. Předností tohoto způsobu upnutí je především vysoká dynamická tuhost, maximální upínací síla, minimální obvodová házivost, vysoká opakovaná přesnost upnutí nástroje či abnormální kvalita vyvážení pouzdra s nástrojem, které ruku v ruce s jednoduchou a bezpečnou manipulací činí z tepelného upínání nejvyšší stupeň nadstandardní záležitosti [6], [14], [18].

Doba ohřevu upínacího pouzdra se pohybuje kolem 5 sekund. Doba nuceného chlazení potom kolem 30 s. Při chlazení pouzdra přirozenou cestou by tato doba byla samozřejmě mnohem delší. Jednalo by se o 10 až 15 minut, což je v praxi naprosto nepřijatelné. Během jednoho upínacího cyklu dochází k ohřátí pouzdra na teplotu cca 250 až 300°C. V žádném případě však nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu držáku ani k žádným změnám ve struktuře materiálu, neboť materiál začíná reagovat změnou struktury až při teplotě kolem 500°C. Je tedy vyloučena deformace držáku stálým upínáním a odepínáním nástroje. Teplotní průběh v místě řezu upínacího pouzdra je znázorněn na obr.2.2.3.3-2. Někdy se výrobci tepelných pouzder setkávají s reklamacemi, kdy zákazník prohlašuje, že nástroj šel do pouzdra upnout jen ze začátku a s přibývajícím počtem upnutí stále hůře a nakonec vůbec. Při daném materiálu pouzdra dochází kolem teploty 500°C k popouštění a materiál pouzdra tak ztrácí své mechanické vlastnosti. V takovém případě tedy může dojít ke změně geometrie samotné dutiny pouzdra a upínání nástroje je tak problematické. Pro upnutí nástroje je potom potřeba větší zahřátí upínací části pouzdra a změna tvaru se tak dále prohlubuje, až nástroj nejde upnout vůbec. Většina těchto problémů je způsobena nekvalifikovanou obsluhou, která zahřívá pouzdro indukční cívkou příliš dlouho. Výrobci tepelných pouzder o tomto problému ví a snaží se upravit zařízení pro tepelné upínání takovým způsobem, aby k tomuto nežádoucímu jevu již nedocházelo [6], [14], [18].



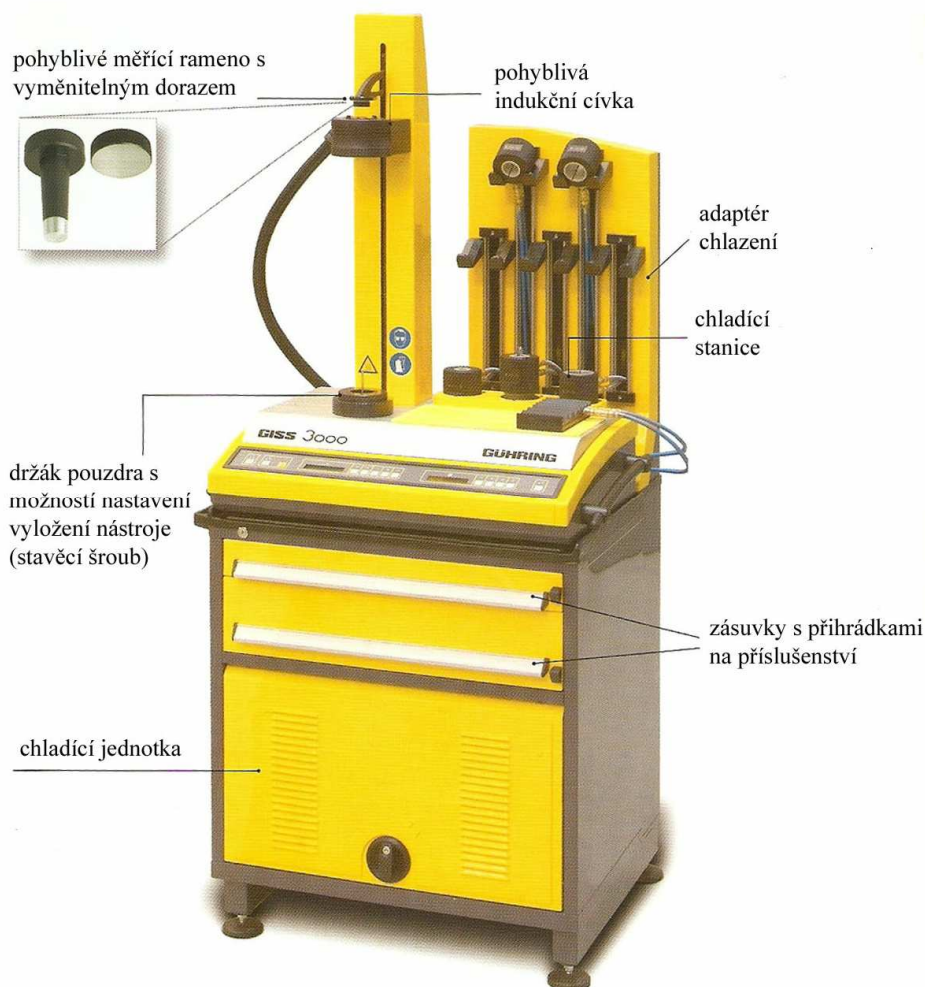
Obr.č.2.2.3.3-2 – Teplotní průběh v místě řezu upínacího pouzdra [17], [21]

Z předchozího textu je zřejmé, že pro upínání a odepínání nástrojů tepelným způsobem je potřeba přídavné zařízení. Většina firem, zabývajících se tepelným upínáním si tato zařízení vyvíjí, konstruuje a vyrábí sama. Jedná se celkem o logické vysvětlení. Každý výrobce konstruuje svá upínací pouzdra dle svého výrobního tajemství a záměrně odlišně od konkurence. Zákazník je potom donucen si pořídit indukční smršťovací a ohřívací zařízení přímo od výrobce tepelných pouzder. Všechny indukční přístroje jsou osazeny patentovaným systémem feritových kroužků, které umožňují upínání nástrojů ze slinutých karbidů i z rychlořezných ocelí a minimalizují ohřev nástroje. Lokální působení energie šetří nástroj i upínací pouzdro a snižuje vedlejší časy pro ochlazení. Jedním z výrobců je firma GÜHRING, která produkuje celou řadu těchto upínacích zařízení pod obchodní značkou



GISS – řady 2000, 2500, 3000, 4000, 5000. Pro názornost je zde uvedeno zařízení střední řady GISS 3000 (viz. obr. 2.2.3.3-3) a jeho technické parametry [6], [17]:

- Upínací čas cca. 5 sekund a ochlazení pouzdra během cca. 30 sekund
- Řízené, energeticky úsporné ohřívání upínacího pouzdra
- Integrované, elektronicky řízené vyložení nástroje s přesností  $\pm 0,02$  mm
- Vodou chlazené integrované chladicí prvky
- Jednoduché ovládání díky pokročilému systému (integrované rozhraní PC)
- Dobrá mobilita, vynikající poměr cena x výkon
- Možnost speciálního příslušenství dle specifických požadavků zákazníka



Obr.č.2.2.3.3-3 – Indukční smršťovací a ohřívací zařízení řady GISS 3000 od firmy GÜHRING [17]

## 2.2.3.4 Speciální upínací pouzdra

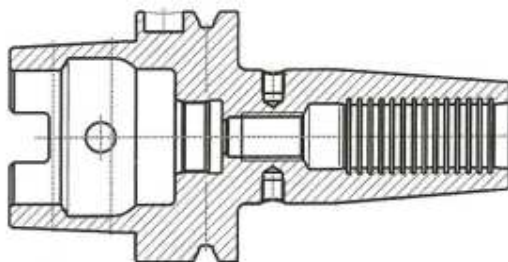
### 2.2.3.4.1 Tepelný upínač s radiálními zápichy pro tlumení vibrací (HAIMER)

- zpracováno s pomocí [6], [23]

Jedná se tepelné upínací pouzdro vyvinuté společností HAIMER, které je určeno především pro vysokovýkonné obrábění HPC. Při HPC obrábění chceme zajistit co největší

objem odebraného materiálu za jednotku času (nižší otáčky, ale vyšší posuvy, větší hloubka řezu, apod.) a mít tak co nejkratší čas samotného procesu řezání. V důsledku těchto podmínek se nám však zhoršuje kvalita obrobeného povrchu, zvyšují se vznikající vibrace a vřeteno stroje je namáháno na samotné maximum.

Díky tlumícím radiálním zápichům, které se nacházejí uvnitř dutiny upínací části pouzdra (viz. obr. č. 2.2.3.4.1-1), je i při těchto nepříznivých podmínkách obrábění upínací síla dostatečně vysoká a vibrace vznikající při procesu obrábění jsou tak do určité míry eliminovány.



Obr. č. 2.2.3.4.1-1 – Schéma tepelného upínacího pouzdra s radiálními zápichy (HAIMER) [6]

#### 2.2.3.4.2 Tepelný upínač s plastickými kroužky pro tlumení vibrací (HAIMER)

U frézování s velkým úběrem materiálu a velkým posuvem často vznikají nežádoucí vibrace, které jsou způsobeny vysokými otáčkami vřetene stroje, záběrem břitů nástroje do obrobeného materiálu a v neposlední řadě také vlastním chvěním stroje. Vlastní tuhost upínacího pouzdra potom způsobuje, že na obrobeném povrchu mohou vznikat nežádoucí rýhy. Tomuto jevu by měl zabránit tepelný upínač s plastickými kroužky pro tlumení vibrací. Součástí tohoto upínače je ocelové pouzdro, v němž se nachází plastické kroužky (viz. obr. č. 2.2.3.4.2-1). V této polymerové vložce je potom většina vibrací absorbována, aniž by se přitom narušila přesnost upnutí. Teoretické výpočty i praktické zkoušky prokázaly vynikající vlastnosti těchto pouzder [6].



Obr. č. 2.2.3.4.2-1 – Tepelné upínací pouzdro s plastovými kroužky pro tlumení vibrací (HAIMER) [6]

#### 2.2.3.4.3 Upínací systém POWER (HAIMER)

- zpracováno s pomocí [6], [24], [25]

Velká část uživatelů investuje nemalé procento do nákupu výkonných vřeten a speciálních nástrojů. Ale řada z nich si neuvědomuje, že právě upínací systémy nástrojů jsou

klíčem k plnému využití jejich potenciálu. Nástroj a upínací pouzdro musí po upnutí vytvořit dokonalou jednotku. Jen tak může být vysoký výkon vřetene přenesen i na obrobek. Když se s tradičními upínacími pouzdry začíná stroj již chvět, můžeme s použitím upínačů řady POWER výkon ještě přidat. A právě díky nárůstu hodnot posuvu, hloubky řezu a šířky záběru se stává třískové obrábění vysoce efektivním. Jedinečnost POWER série spočívá v mohutné konstrukci pouzder, kde masivní rozložení materiálu tlumí vznikající vibrace. Mezi hlavní přednosti POWER série patří:

- Vysoká přesnost házení (0,005 s vyložením nástroje 3D)
- Vysoká tuhost upnutí a vysoká upínací síla
- Klidnější chod díky tlumení vibrací
- Lepší kvalita obrobeneho povrchu
- Vhodný pro HSC i HPC obrábění



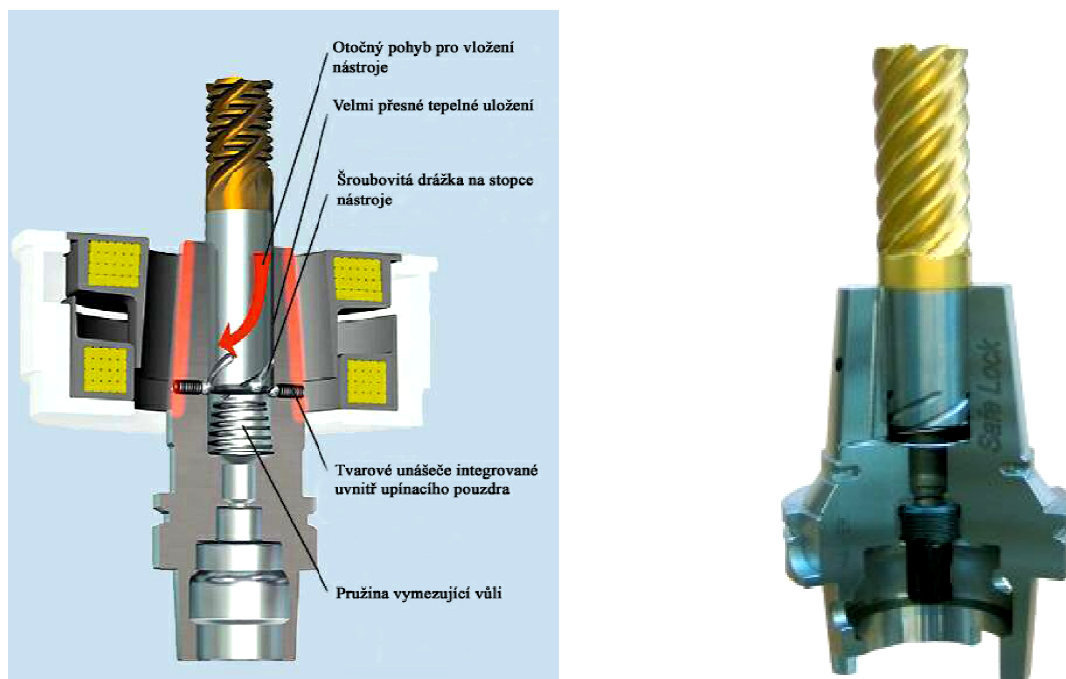
Obr.č.2.2.3.4.3-1 – Tepelný upínací systém POWER (HAIMER) [24], [25]

#### 2.2.3.4.4 Upínací systém SAFELOCK (HAIMER)

Tento systém byl vyvinut firmou HAIMER speciálně pro letecký průmysl jako dokonalý nástroj pro vysokovýkonné obrábění (HPC). Systém kombinuje tepelně upínací a jiné vysoce přesné držáky s tvarovými prvky.

Princip tohoto systému je následující: na stopce nástroje jsou vybroušeny šroubovitě drážky, do kterých zasahují tvarové unášeče. Tyto tvarové unášeče jsou integrovány v upínacím pouzdře. Mohou být tvaru kuličky nebo čepu. Díky šroubovitému tvaru drážky může být nástroj zajištěn současně proti protáčení i vytažení. Tím je dosaženo výhod vysoké přesnosti díky tepelnému upnutí se současným spojením tvarovým stykem. Navíc díky šroubovitému tvaru drážek může být nastavena i délka nástroje. Postup upínání je jednoduchý. Upínač se zahřeje a nástroj se otáčením zasune. Kulička nebo čep samy naleznou při otáčivém pohybu svou cestu v drážce. Pružina podporuje uložení nástroje bez vůle. Po několika sekundách upínač zchladne tak, že je tvarové i tepelné spojení dokončeno. Celý systém je znázorněn na obr.č.2.2.3.4.4-1 [6].





Obr.č.2.2.3.4.4-1 – Upínací systém SAFELOCK (HAIMER) [6]

#### 2.2.3.4.5 Upínací systém ALBRECHT APC (ROYAL PRODUCTS)

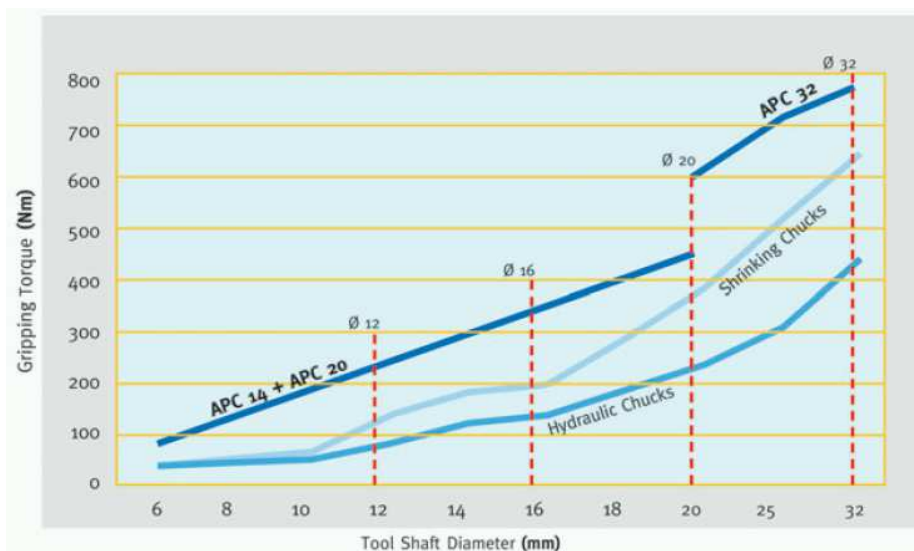
Nová řada frézovacích upínacích pouzder s názvem APC se vyznačuje vysokou přesností, upínací silou a snadnou manipulací. Tato upínací pouzdra jsou určena jak pro těžké řezy s velkým úběrem, tak i pro dokončovací přesné frézování, vysokorychlostní obrábění, frézování kalených materiálů, vrtání, vystružování a řezání závitů.

Konstrukce tohoto systému vyvozuje mimořádně velkou upínací sílu kombinací šnekového soukolí a malého úhlu kužele (viz. obr.2.2.3.4.5-1). Pouzdro je vybaveno speciálně povlakovanými kleštinami s vyšší odolností proti opotřebení. Jejich upínací síla je až 4x vyšší než u hydraulických nebo smršťovacích systémů. Funkční přesnost je popisována házením nástroje s menším než 3  $\mu\text{m}$  na délce 2,5D. Upínací pouzdra jsou připravena pro vnitřní chlazení v místě řezu. Každá kleština má osový seřizovací šroub, který umožní seřízení polohy nástroje. Výrobce nabízí řadu provedení, např. krátké, prodloužené, štíhlé nebo se zvýšenou tuhostí, která zajistí vysokou kvalitu dokončování a zvýšení trvanlivosti nástrojů o 19 až 63 % [6].



Obr.č.2.2.3.4.5-1 – Princip systému upínacího pouzdra APC ALBRECHT (ROYAL PRODUCTS)

Pro představu a porovnání vlastností tohoto mechanického systému upínání s ostatními systémy upínání nástrojů je na obr.2.2.3.4.5-2 znázorněna závislost velikosti upínacího průměru nástroje na velikosti přeneseného krouticího momentu. Z tohoto grafu je zřejmé, že systém ALBRECHT APC je schopen předčit v přenosu vysokého krouticího momentu jak hydraulické upínače, tak i tepelně smršťitelné upínače.



Obr.č.2.2.3.4.5-2 – Schopnost přenášet krouticí moment u jednotlivých upínacích systémů [6]

#### 2.2.3.4.6 Upínací systém TSG 3000 (GÜHRING)

Upínací systém TSG 3000 (Thermo-Secure-Gold 3000) je výrobkem společnosti GÜHRING a jedná se o úpravu tepelných upínacích pouzder. Především co se týče bezpečnosti a vzhledu. Díky zirkonovému PVD povlaku je pouzdro chráněno před korozí a také nežádoucím zbarvením povrchu, které je typické pro tento systém upínání. Pomocí tohoto povlaku je tak zaručena delší životnost tepelných upínacích pouzder. Společnost GÜHRING velmi dbá na bezpečnost práce. Proto jsou tyto pouzdra vybavená tepelnými indikátory v podobě kroužků, připevněných na upínací části pouzdra. Jakmile dosáhne teplota na povrchu pouzdra hodnoty 45 °C, modrý kroužek se zbarví do červena a obsluha upínacího zařízení je tak upozorněna na zvýšené riziko popálení.



Obr.č.2.2.3.4.6-1 – Upínací systém TSG 3000 (GÜHRING) [26]

## 2.3 Stabilita řezného procesu při frézování

- zpracováno s pomocí [1], [5], [9], [27]

Studium řezného procesu z hlediska jeho stability je dnes velice žádoucí téma, zejména u víceosého obrábění tvarově složitých ploch. Řezný proces s rovnoměrným řezným pohybem lze tedy považovat za dynamický proces v setrvačném stavu. Tento setrvačný, relativně klidový stav se může porušit pouze působením určité, periodicky působící síly. Tato síla pak vyvolá kmitání pružné, tlumené soustavy S-U-N-O.

Kmitání soustavy je běžným průvodním jevem při práci na obráběcích strojích a může být příčinou značného zhoršení ekonomických a kvalitativních parametrů procesu obrábění. Důsledkem uvedeného kmitání potom může být například: znemožnění využití výkonu stroje (popř. řezivosti nástroje), zvýšení nebezpečí mechanického porušení břitu nástroje (zejména u nástrojů z méně houževnatých materiálů), mechanickým porušením nástroje (vylomení břitu, apod.) či zhoršením tvarové přesnosti obrobku (integrita obrobku plochy). Nebezpečí vzniku kmitání lze potom snížit několika způsoby:

- Vyšší tuhostí soustavy S-U-N-O (vyšší vlastní frekvence)
- Lepšími tlumícími vlastnostmi soustavy S-U-N-O (vyšší relativní tlumení)
- Vyšší vlastní frekvencí členů soustavy S-U-N-O (není nebezpečí rezonance)
- Orientací řezné síly do směru vyšší tuhosti soustavy (princip polohové vazby)

Stabilita řezného procesu je především důležitá u moderních výrobních technologií, mezi které patří například technologie HSC. Podstatou metody HSC je zintenzivnění řezného procesu. Jde především o použití kvalitativně vyšších, intenzivnějších řezných podmínek, především řezných rychlostí a posuvů, které vedou ke zvýšení intenzity úběru obráběného materiálu. Tato moderní technologie také zvyšuje přesnost a kvalitu obrobku. Zlepšování integrity obrobku má za následek stabilizaci řezného procesu v režimu HSC. Na stabilitu řezného procesu nejen u technologie HSC má vliv řada podmínek. V následujících podkapitolách je dále přiblížen jejich význam.

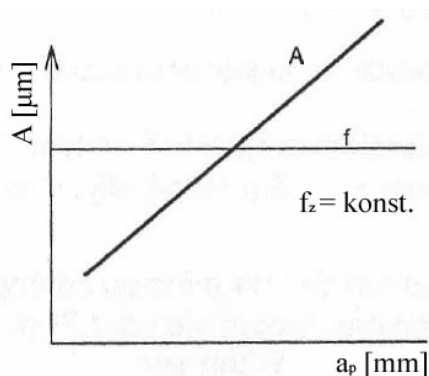
### 2.3.1 Vliv řezných podmínek

Vliv řezných podmínek na stabilitu procesu řezání nejen při frézování lze hodnotit pouze kvalitativně, poněvadž se projevuje v různých souborech řezných podmínek různě. Intenzita jejich vlivu na stabilitu řezného procesu závisí na vlastnostech určujících členů kmitající soustavy S-U-N-O, a to na jejich tuhosti, tlumících konstantách, vlastních frekvencích a směrech kmitání. V konečném důsledku lze říci, že vliv řezných podmínek na stabilitu procesu souvisí s jejich vlivem na velikost a směr řezné síly a je tak znázorněn pomocí experimentálně zjištěných závislostí, které jsou charakteristické pro každý druh použité technologie za daných technologických podmínek obrábění.

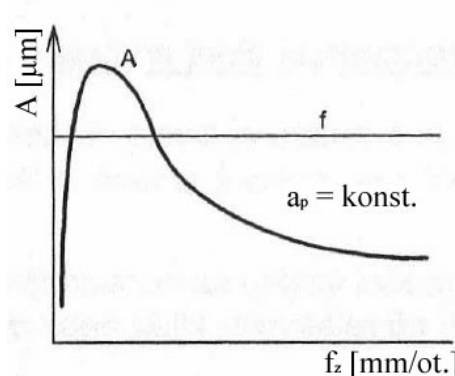
Nejvýraznější podíl na výši meze stability při frézování má šířka záběru  $a_e$ , hloubka odřezávané vrstvy  $a_p$ , řezná rychlost  $v_c$ , posuv na zub  $f_z$  a v neposlední řadě také geometrie samotného nástroje, především řezné úhly  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\kappa$ .

### 2.3.1.1 Vliv hloubky odřezávané vrstvy $a_p$ a posuvu na zub $f_z$

Hloubka odřezávané vrstvy materiálu  $a_p$  ovlivňuje rozsah meze stability ze všech řezných podmínek nejvíce. Má zásadně destabilizující účinek a její postupné zmenšování při dosažení meze stability se obecně v praxi používá k dosažení stability při nestabilním procesu řezání. Na obr.č.2.3.1.1-1 je znázorněn vliv hloubky odebírané vrstvy na intenzitu kmitání vyjádřené pomocí amplitudy  $A$ , která působí ve směru složky řezné síly.



Obr.č.2.3.1.1-1 – Vliv hloubky odebírané vrstvy na stabilitu procesu [5]

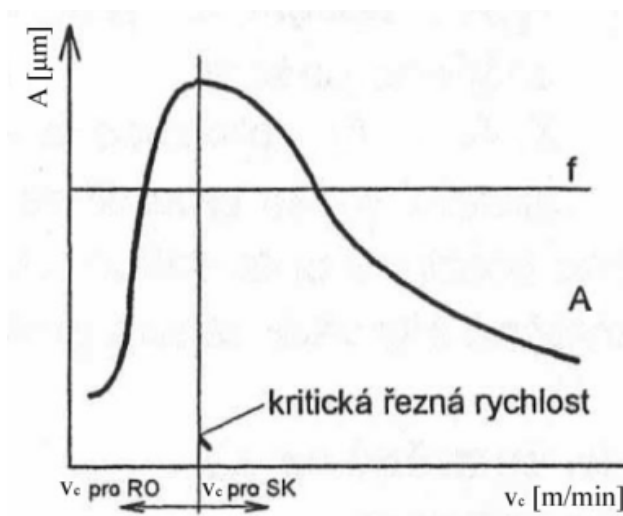


Obr.č.2.3.1.1-2 – Vliv posuvu na stabilitu procesu [5]

Na rozdíl od hloubky odřezávané vrstvy  $a_p$  má velikost posuvu na zub  $f_z$  při frézování stabilizující účinek. Je-li řezný proces za mezí stability, potom je se zvětšující se hodnotou posuvu  $f_z$  výsledná amplituda kmitů  $A$  menší. Toto tvrzení však platí jen v určitém rozsahu hodnot posuvů (viz.obr.č.2.3.1.1-2).

### 2.3.1.2 Vliv řezné rychlosti $v_c$

Vliv řezné rychlosti  $v_c$  na stabilitu řezného procesu má trochu jiný charakter v rozsahu malých, středních a vyšších rychlostí. Obecně lze říci, že v oblasti řezných rychlostí používaných při obrábění nástroji z rychlořezné oceli je účinek řezné rychlosti na stabilitu procesu negativní (viz.obr.č.2.3.1.2-1).



Obr.č.2.3.1.2-1 – Vliv řezné rychlosti na stabilitu procesu [5]

V oblasti rychlostí používaných při obrábění s nástroji ze slinutých karbidů je pozitivní. Mluví se zde o tzv. kritické rychlosti, kdy má za daných řezných podmínek, fyzikálních vlastností materiálu obrobku, tuhosti obrobku a stroje hodnota amplitudy kmitů  $A$  maximální hodnotu.

### 2.3.2 Vliv upnutí a vyložení nástroje

- zpracováno s pomocí [6], [28], [29]

Aby bylo možné využít velkého potenciálu, který nabízejí moderní řezné frézovací nástroje při použití moderních technologií obrábění, musí upínání nástrojů z hlediska stability řezného procesu splňovat některé základní požadavky: velkou upínací sílu, která eliminuje každý pohyb nástroje vyvolaný odstředivou silou a současně zajišťuje maximální axiální oporu, minimální házení, které je pro upnutí nástroje životně důležité a uspokojivé vyvážení, protože nadměrná nevyváženost vyvolává vibrace, které mohou být průvodním jevem před poškozením nástroje nebo samotného vřetene stroje. Žádný systém upínání není v tomto ohledu zcela dokonalý. Proto je vždy nutné zvážit všechny možné důsledky použití daného upnutí.

Pro upnutí nástroje při frézování platí obecné doporučení volit co nejmenší vyložení nástroje. Při takovýchto podmínkách je potom zaručena největší trvanlivost nástroje a je dosaženo co možná nejlepších kvalitativních parametrů obrobeného povrchu. Výrobci nástrojů a upínacích pouzder sice umožňují v určitém rozsahu měnit vyložení nástroje, téměř vždy je však dána maximální délka vyložení. Velmi důležitým faktorem z hlediska vyložení nástroje je poměr délky nástroje vzhledem k jeho průměru (označováno jako poměr L:D). Toto hledisko je důležité zejména kvůli snižování síly, která je potřebná k odklonění nástroje od osy vřetene. Čím větší je vyložení nástroje, tím větší bude tato síla a daný proces bude více nestabilní. Pokud je tedy nástroj upnut s minimálním vyložení, dochází potom k minimalizaci vzniku chvění, zvýšení trvanlivosti nástroje, zlepšení integrity obrobeného povrchu a možnosti zvýšení řezné rychlosti a posuvu. Všechny tyto skutečnosti tak mají za následek zvýšení produktivity daného technologického procesu.

### 2.3.3 Vliv řezných sil

- zpracováno s pomocí [3], [5], [27], [30]

Z hlediska stability řezného procesu je důležité znát průběhy a velikosti jednotlivých složek řezných sil. Je to právě z důvodu vysokých požadavků na výslednou kvalitu obrobeného povrchu, konstrukci nástrojů i obráběcích strojů. Studium řezných sil je tak nedílnou součástí dalšího výzkumu a vývoje v oblasti obrábění.

Řezné síly jsou velmi důležitým činitelem ovlivňujícím celkovou stabilitu řezného procesu. Jednotlivé závislosti složek řezných sil a krouticích momentů na řezných podmínkách řezného procesu lze pomocí teoretických znalostí a předpokladů předpovědět jen velmi přibližně, protože jsou časově proměnné vlivem: nehomogenity odebíraného materiálu, změny průřezu odebírané vrstvy, nárůstu otupení břitu, vlivem vznikajícího chvění a proměnlivosti řezného prostředí. Z toho důvodu se složky řezných sil určují ve větší míře

experimentálně. Existuje mnoho metod měření řezných sil, ale v zásadě se rozdělují na dvě kategorie:

- Nepřímá metoda a) měření příkonu do hlavního elektromotoru obráběcího stroje  
b) měření příkonu a krouticího momentu na vřetenou obráběcího stroje
- Přímá metoda

### 2.3.3.1 Nepřímé metody určení řezných sil

#### a) Měření příkonu do hlavního elektromotoru obráběcího stroje

Tato metoda spočívá v tom, že hlavní složka řezné síly  $F_c$  je určena z měření elektrického příkonu  $P_{celk}$  tekoucího do vřetenového elektromotoru. Řezný výkon  $P_{řez}$  potřebný pro řezný proces je dán součinem hlavní složky řezné síly  $F_c$  a řezné rychlosti  $v_c$ :

$$P_{řez} = F_c \cdot v_c [W]$$

Příkon, který teče do vřetenového elektromotoru při řezném procesu je  $P_{celk}$  a ten je větší než potřebný řezný výkon  $P_{řez}$  o ztráty v pohonu vřetena. Tento ztrátový výkon se určuje měřením při tzv. běhu naprázdno  $P_0$ . Ztrátový výkon se potom odečte od  $P_{celk}$  a celková řezná síla  $F_c$  se vypočte dle vztahu:

$$F_c = P_{řez} \cdot \frac{1}{v_c} = (P_{celk} - P_0) \cdot \frac{1}{v_c} [N]$$

Nespornou výhodou této varianty je jednoduchost měření, avšak při měření  $P_{celk}$  se část výkonu spotřebovává i na posuv suportu a pasivní odpory. V celkovém důsledku tak tato metoda není natolik přesná.

#### b) Měření příkonu a krouticího momentu na vřetenou obráběcího stroje

Stanovení hlavní složky řezné síly  $F_c$  pomocí krouticího momentu na vřetenou je založeno na wattmetrickém měření elektrického příkonu  $P_{celk}$  tekoucího do vřetenového elektromotoru při řezání a wattmetrickém měření elektrického příkonu  $P_b$  při zatěžování vřetena mechanickou brzdou. Výpočet vyplývá z rovnosti elektrického příkonu  $P_{celk}$  při řezání a elektrického příkonu  $P_b$  při brzdění vřetena brzdou:

$$\begin{aligned} P_{celk} &= P_b & (\omega_{řez} &= \omega_b = \omega) \\ P_{řez} + P_0 &= M_b \cdot \omega + P_0 \\ F_c \cdot v_c + P_0 &= M_b \cdot \omega + P_0 & (P_0 = P_0) \\ F_c \cdot \frac{D}{2} \cdot \omega &= M_b \cdot \omega \\ F_c &= \frac{2 \cdot M_b}{D} [N] \end{aligned}$$

Výhodou této metody je, že vylučuje rozdílnou účinnost pohonu vřetene při měření  $P_0$  a  $P_{celk}$ . Nevýhodou metody je komplikované použití brzdy, hodí se jen pro malé výkony.

### 2.3.3.2 Přímé metody určení řezných sil

Pro přímé měření se používá specifické zařízení – dynamometr. Dynamometr je měřicí přístroj, který indikuje velikost jednotlivých složek řezných sil pomocí vhodného indikátoru deformace deformačního členu. Dynamometr může být umístěn ve dvou variantách: upnutý mezi řezný nástroj a obráběcí stroj (rotační), nebo upnutý mezi obrobek a obráběcí stroj (statický). Aby byla zaručena správnost měření, musí deformační členy dynamometrů splňovat tyto základní dvě vlastnosti:

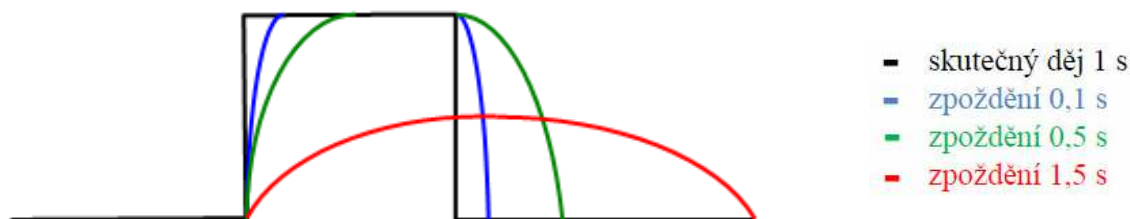
- Dostatečná tuhost (zabránění vzniku chvění a bez ovlivnění polohy břitu nástroje).
- Dostatečná neformovatelnost s ohledem na celkovou citlivost dynamometru.

#### 2.3.3.2.1 Dynamometry

Dynamometr je charakterizován pomocí několika základních charakteristik:

- Tuhost dynamometru (podle očekávané velikosti řezné síly a citlivosti deformačního členu, pohybuje se v rozsahu 10 až 500 N/ $\mu\text{m}$ ).
- Citlivost dynamometru (úměrná k očekávané velikosti řezné síly).
- Setrvačnost dynamometru.
- Rozsah dynamometru (zachycení minimální a maximální řezné síly).
- Přesnost signálu dynamometru (určená relativní chybou dynamometru).
- Neovlivňování se složek řezných sil navzájem.
- Stabilita měření a snadné cejchování dynamometru.
- Přijatelné rozměry a hmotnost dynamometru (odpovídá setrvačnosti).
- Konstrukce dynamometru (podle umístění dynamometru a čidla deformačního členu).

Pro sledování dynamických složek řezné síly je vyžadována malá setrvačnost dynamometru. To znamená, že vlastní frekvence dynamometru má být 5 až 8 krát vyšší než očekávaná frekvence řezné síly. Vlastní frekvence dynamometru by se tedy měla pohybovat v rozmezí mezi 5 až 20 kHz. Pokud je setrvačnost nevyhovující, dochází ke zpoždění signálu z dynamometru a výstupní signál je tak do určité míry zkreslen (viz. obr.č.2.3.3.2.1-1).



Obr.č.2.3.3.2.1-1 – Vliv setrvačnosti dynamometru [3]

#### Další rozdělení dynamometrů:

- Dle počtu měřených složek (popř. momentů):
  - jednosložkové ( $F_c$ )
  - vícesložkové (až 4 složky:  $F_c$ ,  $F_p$ ,  $F_f$ ,  $M_k$ )
- Dle způsobu obrábění, pro které jsou určeny:
  - soustružnické
  - frézovací

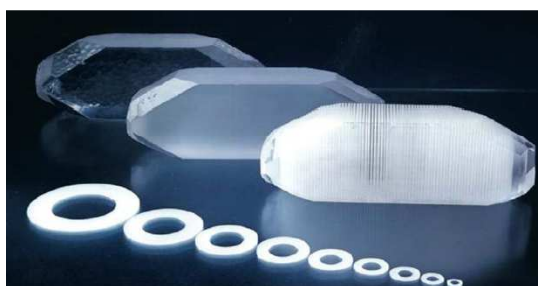


- vrtací
- brousící
- kombinované

- Dle druhů čidel pro snímání deformací def. členů:
  - mechanická čidla (pákové převody, ozubená kola)
  - hydraulická čidla (hydraulické převody)
  - pneumatická čidla
  - elektrická čidla (parametrická, generátorová)

Pro experimentální měření řezných sil používají moderní dynamometry elektrické generátorové piezoelektrické snímače. Tyto dynamometry využívají k detekci řezných sil tzv. *piezoelektrický jev*. Při piezoelektrickém jevu vzniká, vlivem zatížení na některých krystalických látkách elektrický náboj  $Q$ . Tyto krystalické látky jsou schopny v důsledku jejich deformace produkovat elektrický náboj, nebo se v opačném případě v elektrickém poli deformovat. Nejpoužívanější krystalickou látkou používanou pro tento účel je monokrystalický křemen nebo tzv. Seignettova sůl. Při zatížení krystalu v určitém směru metalografické osy vznikne na plochách osy elektrický náboj, který se dá vyjádřit pomocí vztahu:

$$Q = k_p \cdot F [C], \quad \text{kde } k_p \text{ – piezoelektrická konstanta: } k_{p(\text{křemen})} = 2,1 \cdot 10^{-12} [C \cdot N^{-1}]$$
$$k_{p(\text{Seignett. sůl})} = 3 \cdot 10^{-8} [C \cdot N^{-1}]$$



Obr.č.2.3.3.2.1-2 – Křemenné krystaly [3]



Obr.č.2.3.3.2.1-3 – Moderní piezoelektrické dynamometry KISTLER – rotační (vlevo), statický (vpravo) [3]



Dynamometry s piezoelektrickými snímači jsou vhodné pro měření statických i dynamických řezných sil. A to zejména díky jejich vysoké tuhosti, citlivosti, vlastní frekvenci (50 až 70 kHz), ale také díky dobré linearitě ve velkém rozsahu měření. Na druhou stranu zde ovšem hrají velkou roli vysoké pořizovací náklady a potřeba dalšího nákladného příslušenství. Neméně závažnou skutečností je i omezená teplota použití těchto dynamometrů (křemen do 500 °C a Seignettova sůl do 50 °C).

#### 2.3.4 Vliv opotřebení nástroje

- zpracováno s pomocí [5], [31]

Nástroj je při řezném procesu vystavován tepelným a mechanickým vlivům, kvůli kterým následně degraduje kvalita povrchu a také tvary jeho činných ploch. Při obrábění je břit nástroje ve stykových místech s obrobkem vystavován náročným podmínkám, při kterých dosahují tlaky řádově až  $10^3$  MPa a teploty v rozmezí  $10^2$  až  $10^3$  °C. Opotřebení břitu má většinou plynulý charakter, probíhá totiž v závislosti na čase obrábění. Opotřebení vzniká působením fyzikálních (abraze, adheze) a chemických (difúze, chemické reakce) činitelů, které se mohou stát za určitých okolností rozhodující.

Vlivem opotřebení nástroje se mění geometrie a mikrogeometrie břitu řezného nástroje. To může v konečném důsledku působit na stabilitu řezného procesu v dobrém i špatném smyslu. Rozhodují především hodnoty úhlů  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\kappa$ .

Se zvyšující se hodnotou úhlu řezu  $\delta$  (negativnější úhel čela  $\gamma$ ) rostou plastické deformace v oblasti OMNO' a tím se zvyšuje riziko výskytu nestabilního nárůstku. Nárůstek potom způsobuje vyšší intenzitu kmitání řezného procesu (stabilita řezného procesu se snižuje). Se zvyšující se hodnotou úhlu hřbetu  $\alpha$ , dochází ke snižování tření na hřbetní ploše břitu nástroje → nižší intenzita kmitání (stabilita řezného procesu se zvyšuje). Co se týče úhlu nastavení hlavního ostří  $\kappa$ , tak s jeho rostoucí hodnotou dochází ke zmenšení šířky a ke zvýšení hloubky odebírané vrstvy. To má za následek nižší intenzitu kmitání a stabilita řezného procesu se také tedy zlepšuje.

#### 2.3.5 Vliv chvění

- zpracováno s pomocí [5], [30], [32], [33], [34]

Chvění (vznik vibrací) je jev nežádoucí při každém řezném procesu. Vzniká působením proměnných řezných sil a jeho vlivem může docházet ke zhoršení kvality obrobeného povrchu, snížení geometrické přesnosti obrábění, zhoršení pracovního prostředí (hlučnost), zvýšení intenzity opotřebení břitu nástroje a v neposlední řadě až k poškození samotného obráběcího stroje. Z obecného hlediska lze chvění vznikající v pevných látkách rozdělit na:

- **Vlastní chvění**
- **Vynucené chvění:**
  - a) Budící síla nesouvisí s procesem řezání
  - b) Budící síla souvisí s procesem řezání
  - c) Kmitání přenášené z okolí technologické soustavy
- **Samobuzené chvění:**
  - a) Budící síla nesouvisí s procesem řezání
  - b) Budící síla vyvolaná procesem řezání

Ze samotné podstaty technologie frézování vyplývá její náchylnost ke vzniku chvění. Je to dáno přítomností přerušovaného řezu. U frézování je vždy splněna podmínka proměnných řezných sil. Vibrace tak vznikají náhle, při překročení určité mezní hodnoty. Je to okamžik, kdy se energie dodávaná do systému vznikající řeznou silou nestíhá spotřebovávat tlumením. Tehdy dochází k růstu amplitudy kmitů a řezný proces se tak stává nestabilním. Chvění je snadno rozpoznatelné podle zvuku spojeného s vibracemi, podle stopy, kterou zanechává nástroj na povrchu obráběné plochy a podle vzhledu třísky. Jelikož při frézování vzniká samobuzené kmitání, zaměříme se v dalším textu pouze na tento typ kmitání.

### 2.3.5.1 Samobuzené kmitání

- zpracováno s [5], [30], [32], [33], [34]

Samobuzené kmitání se projevuje charakteristickým zvukem a stopami zanechanými na obrobeném povrchu. Toto kmitání nepotřebuje ke svému vzniku a udržení žádnou vnější periodicky působící sílu, vzniká a udržuje se vlivem síly vznikající během kmitání. Z klidu je soustava S-U-N-O vybuzená náhodným silovým impulzem. Jestliže během procesu zanikne kmitání, zanikne i periodická síla.



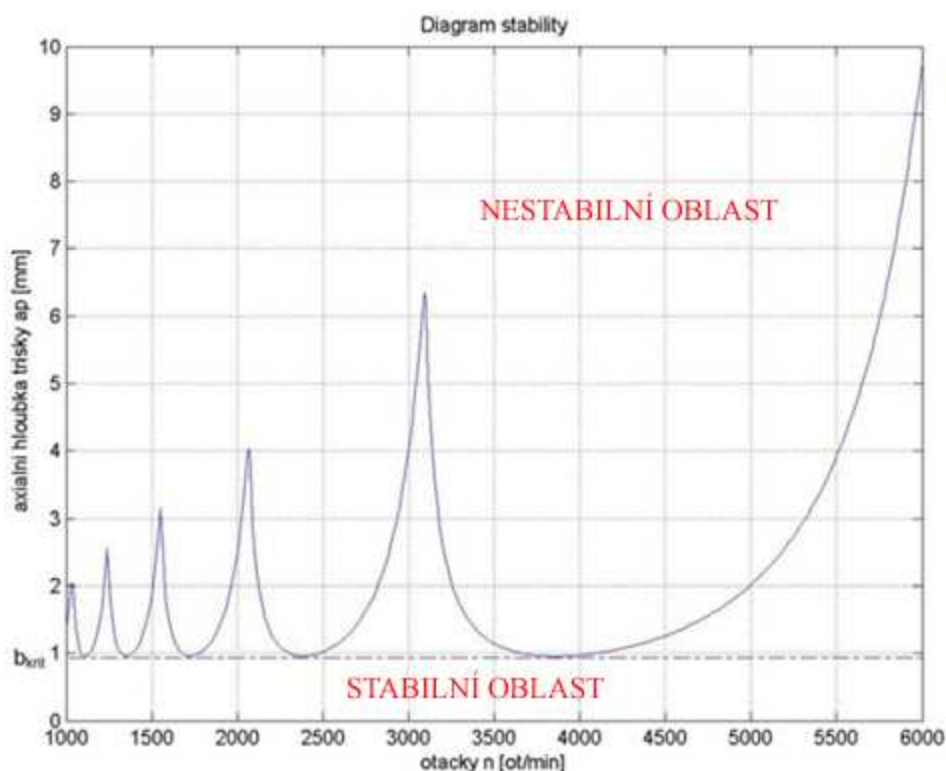
Obr.č.2.2.5.1-1 – Charakteristika samobuzeného kmitání [32]

V případě, že budící síla nesouvisí s řezným procesem, lze uvažovat se dvěma druhy vznikajícího kmitání. Jedno z nich je tzv. *relaxační kmitání*, které se vyskytuje u strojů při obrábění s velmi malými posuvovými rychlostmi. Projevuje se trhavými pohyby stolu nebo suportu stroje při velmi malých posuvech, které jsou zapříčiněné proměnlivým součinitelem tření na kluzných plochách vedení. V druhém případě je možné uvažovat kmitání vznikající v hydraulickém kopírovacím zařízení se zpětnou vazbou.

Charakteristickým znakem kmitání, kde budící síla souvisí s daným řezným procesem je, že vzniká jen v určitém rozmezí řezných podmínek. Jde o velmi častý druh kmitání udržovaný proměnlivými dynamickými silami, které vznikají při odřezávání třísky. Jeho hlavní příčinou může být tzv. *reprodukční princip*, kde ke kmitání dochází vlivem obrábění zvlněného povrchu obrobku. Další princip je tzv. *princip polohové vazby*, kde se bere v úvahu tuhost nástroje (zejména tuhost jeho upnutí). Nesmí se opomenout ani *princip střídavého*

(postupného) usmýkávání článku třísky, princip nestability nárůstu a v neposlední řadě také princip součinitele tření na čele.

S pomocí výše uvedených principů lze sestavit mezní křivky stability (tzv. *stabilizační loby*). Jde o závislost otáček vřetena a šířky třísky (hloubky odebírané vrstvy). Mezní křivky rozdělují diagram stability na dvě oblasti – oblasti stabilního a nestabilního řezného procesu. Oblast pod křivkami, kde je pro konkrétní hodnoty otáček vřetena šířka třísky menší než mezní hodnota, je řezný proces stabilní. Nad mezními křivkami se potom nachází oblast nestabilní, kde dochází k samobuzenému kmitání. Jak lze vidět z obr.č.2.2.5.1-2, stačí malá změna otáček a daný obráběcí proces může spadnout do oblasti nestabilní.



Obr.č.2.2.5.1-2 – Diagram stability (tzv. stabilizační loby) [33]

### 2.3.5.2 Měření chvění

- zpracováno s pomocí [5], [30], [32], [33], [34]

Měření chvění je relativně složitý proces a je vhodné ho kombinovat s dalšími diagnostickými metodami (např.: měření teploty, otáček, tlaku, síly, elektrické veličiny, krouticí momenty, apod.). Chvění lze měřit *absolutně* (měří se k nějakému pevnému nehybnému bodu v prostoru) nebo *relativně* (mezi dvěma kmitajícími body). Chvění je demonstrováno určitým mechanickým vlněním a je snímáno pomocí snímačů, které snímají tyto základní veličiny:

- Výchylku, polohu a posuv (vzdálenost objektu vůči referenční poloze)
- Rychlost (rychlost, se kterou se mění výchylka)
- Zrychlení (rychlost změny rychlosti)

Celkový přehled jednotlivých druhů snímání a moderních metod měření chvění je přehledně zpracován v *tab.č.2.2.5.2-1*.

<b>MĚŘENÍ CHVĚNÍ</b>			
<b>Snímače</b>			<b>Moderní metody</b>
<i>Výchytky</i>	<i>Rychlosti</i>	<i>Zrychlení (akcelerometry)</i>	
mechanické	elektrodynamické	tenzometrické	akustické emise
pneumatické		piezorezistivní	optické vláknové senzory
elektrické		akcelerometry s proměnnou kapacitou	bezdrátová technika
indukční		tepelné	stacionární ON-LINE přístroje
odporové		piezoelektrické	přenosné přístroje
fotoelektrické			minisenzory
kapacitní			
laserový vibrometr			
Hallovy snímače			

*Tab.č.2.2.5.2-1 – Přehled metod měření chvění*

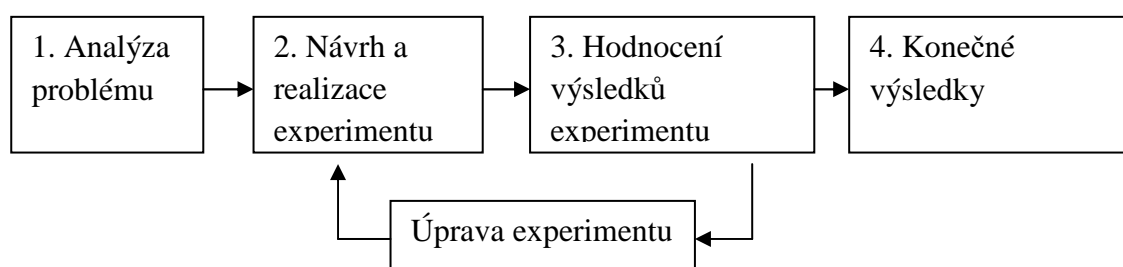
Problematika chvění a její vyhodnocování je předmětem oboru zvaného vibrodiagnostika. Jedná se o jednu z hlavních nedestruktivních metod, která významně napomáhá při péči o stroje a veškerých ostatních zařízeních. Měření je zde aplikováno za běžného provozu, bez jakéhokoliv omezení výroby.

## 3 CHARAKTERISTIKA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

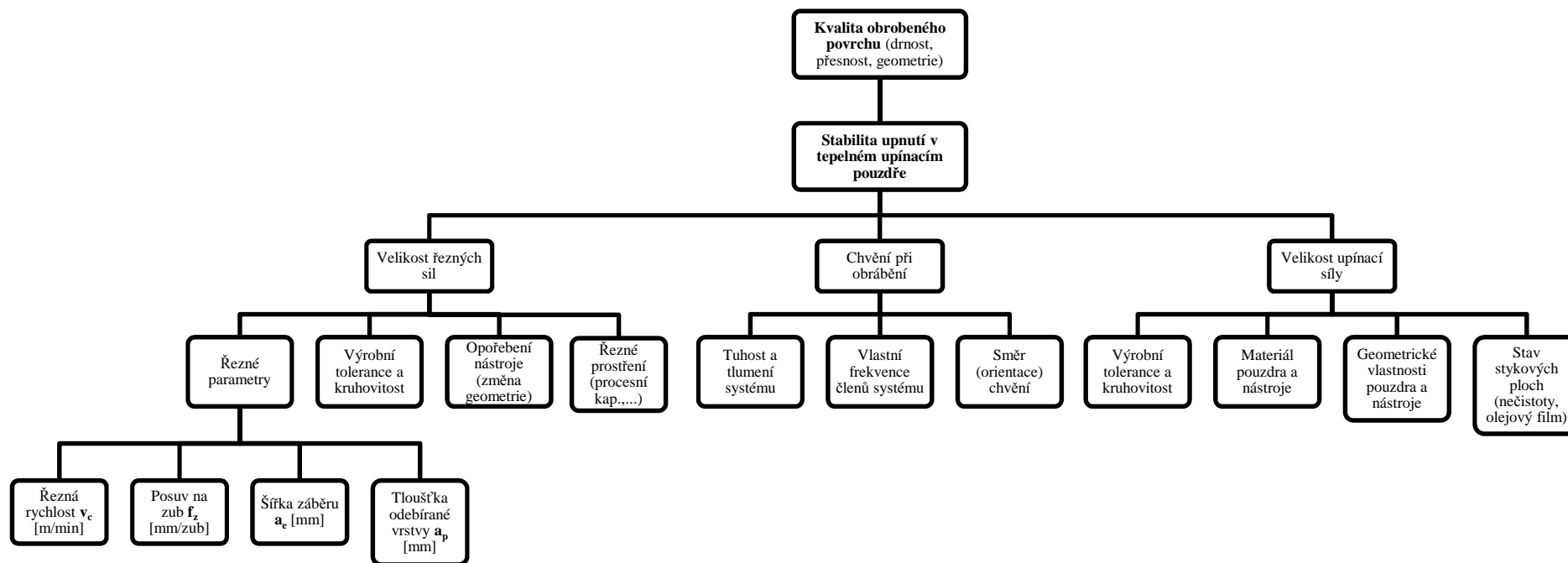
### 3.1 Představení experimentu

Hlavním úkolem experimentu bylo ověřit vlastnosti tepelného upínání ve smyslu stability řezného procesu při obrábění s nástroji menších průměrů. Principiálně využívá tepelné upínání tepelné roztažnosti materiálu upínacího pouzdra a následné kontrakce materiálu nástroje. Vlivem této kontrakce vznikne mezi dutinou pouzdra a stopkou nástroje jistý přesah, mající za následek vznik upínací síly, která působí na stopku nástroje. Z konstrukčního hlediska se jedná o nalisovaný spoj za tepla. Velikost takto vzniklé upínací síly je výrazně závislá na použitém materiálu upínacího pouzdra a nástroje, výrobních rozměrech a tolerancích dutiny upínacího pouzdra a stopky nástroje, dále také na geometrických vlastnostech upínacího pouzdra a nástroje a v neposlední řadě také na přítomnosti cizorodých látek ve stykové ploše dutiny pouzdra a stopky nástroje (např. různé konzervační prostředky, olejové emulze, třísky, apod.). Všechny tyto faktory mají z hlediska stability řezného procesu a celkové velikosti upínací síly velmi zásadní význam a jsou deklarovány i samotnými výrobci tepelných upínacích pouzder. Důsledkem nižší upínací síly je potom jistá nestabilita řezného procesu, která se projevuje zvýšením hodnoty řezné síly, vznikem chvění za doprovodu nepříjemných zvukových projevů, horší kvalitou obrobeného povrchu a celkovou nepřesností výrobního procesu. Společnost GÜHRING se jako jeden z předních výrobců tepelných upínacích pouzder snaží těmto nežádoucím jevům zabránit a ve spolupráci s akademickou půdou má za cíl vyvinout inovované tepelné upínací pouzdro, které těmto vlivům odolá ve všech oblastech. Proto je velmi důležité zmapovat a určit konkrétní význam jednotlivých faktorů ovlivňujících upnutí nástroje v tepelném upínání a to v celém rozsahu jejich použití (tzn. pro celou řadu průměrů nástrojů, pro které se upínací pouzdra vyrábějí). V rámci spolupráce společnosti GÜHRING spol. s r.o. a katedry technologie obrábění FST – ZČU v Plzni byla zadána i tato diplomová práce, která má za úkol zmapovat a určit význam všech zmíněných faktorů při obrábění pomocí nástroje o průměru 10 mm.

Samotný návrh a realizace experimentu probíhalo dle obecně platného postupu znázorněného na *obr.č.3.1-1*. Je také nutné doplnit, že počáteční podmínky experimentu byly navrženy po dokonalé analýze všech příčin týkajících se dané problematiky (viz. *obr.č.3.1-2*) a na základě výsledků ověřovacího experimentu (tzv. pre-experimentu) pro daný průměr nástroje  $\varnothing d = 10 \text{ mm}$ . Experiment jako celek také dále navazuje na výsledky experimentu, který již proběhl s nástrojem o průměru 16 mm a při kterém vlivem nestability řezného procesu docházelo k vývrtkovitému povytažení nástroje během jednoho přejezdu až o 1xD. Z velikosti této hodnoty je patrné, o jak závažný a rozsahově obsáhlý problém se jedná.



Obr.č. 3.1-1 – Obecné fáze řešení experimentu



Obr.č.3.1-2 – Analýza příčin nestability upnutí v tepelném upínači

### 3.1.1 Upínací síla tepelných upínacích pouzder

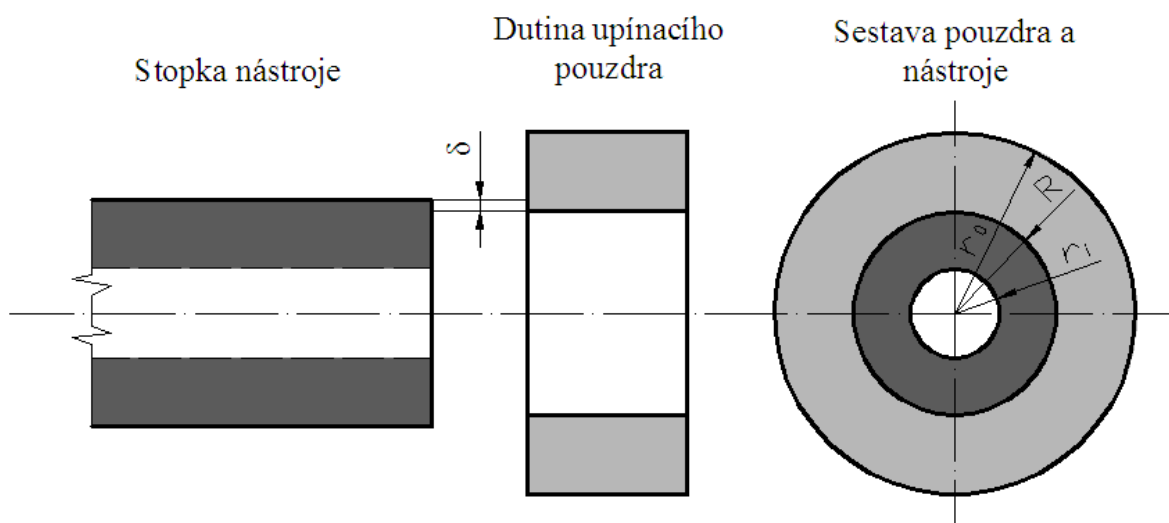
Velikost upínací síly tepelného upínacího pouzdra na řezný nástroj je výrazně závislá na jeho výrobní přesnosti, kruhovitosti a stavu vzájemných stykových ploch. Tepelné upínání se nejvíce používá pro upínání nástrojů od průměru 6 mm do průměru 32 mm a to jak ve strojírenském, tak i ve dřevozpracujícím průmyslu.

Z konstrukčního hlediska se jedná o nalisovaný spoj za tepla, kdy při upínacím procesu dochází ohřevem upínacího pouzdra vlivem tepelné roztažnosti k roztáhnutí otvoru pro řezný nástroj, zasunutí nástroje do dutiny upínacího pouzdra, následnému ochlazení celé této soustavy a vzniku dostatečného přesahu při docílení optimální upínací síly pro upnutí nástroje. Spojení mezi dutinou upínacího pouzdra a stopkou nástroje se tak dosahuje pomocí pružných deformací v dutině upínacího pouzdra a stopky nástroje uložené s přesahem. V důsledku pružných deformací vzniká ve stykové ploše rovnoměrně rozdělený radiální plošný tlak  $p$ . Plošný tlak  $p$  a výsledná upínací síla  $F_{up}$  vyvolává třecí odpor, který přenáší provozní krouticí moment z těla upínacího pouzdra na řezný nástroj. Výpočet hodnoty plošného tlaku  $p$  vychází ze všeobecně platného vztahu pro výpočet nalisovaného spoje dle vztahu:

$$\delta = \frac{pR}{E_0} \left( \frac{r_0^2 + R^2}{r_0^2 - R^2} + \mu_0 \right) + \frac{pR}{E_i} \left( \frac{R^2 + r_i^2}{R^2 - r_i^2} - \mu_i \right) \quad [\text{mm}]$$

Z této rovnice odvozené pro výpočet požadovaného přesahu lze jednoduše odvodit vztah pro plošný tlak  $p$ :

$$p = \frac{\delta}{\frac{R}{E_0} \left( \frac{r_0^2 + R^2}{r_0^2 - R^2} + \mu_0 \right) + \frac{R}{E_i} \left( \frac{R^2 + r_i^2}{R^2 - r_i^2} - \mu_i \right)} \quad [\text{MPa}]$$

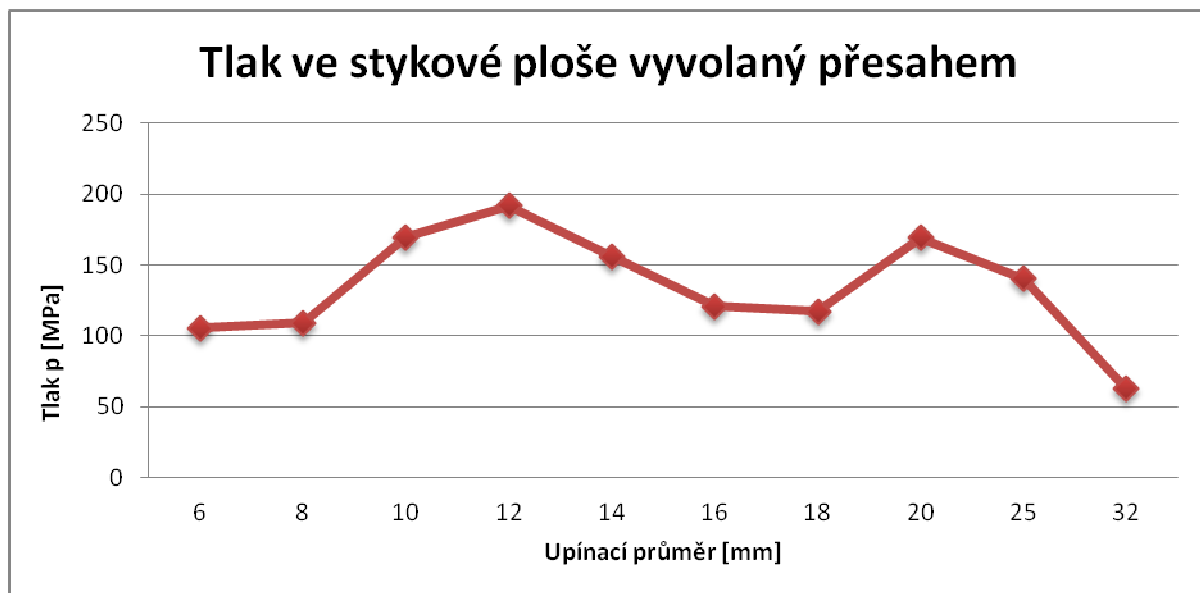


Obr.č.3.1.1-1 – Nalisovaný spoj

Aby byla zachována opakovatelnost použití tohoto systému upínání, jsou tepelná upínací pouzdra vyráběna v daných výrobních tolerancích. Pro každý průměr upnutí je tak jasně stanoven daný interval přesahů a tím i výsledná upínací síla. Pro nejvíce používané upínací průměry společnosti GÜHRING (tj. od 6 mm do 32 mm) jsou orientačně uvedeny hodnoty plošného stykového tlaku  $p$  na obr.č.3.1.1-2. Pro výpočet plošného tlaku  $p$  za použití uvedeného vzorce se vycházelo z konstant  $\mu$  (Poissonova konstanta) a  $E$  (Youngův modul pružnosti) a za předpokladu, že konstanta  $\nu_i = 0$ . Hodnoty těchto konstant pro upínací pouzdro vyrobené z nástrojové středně legované oceli a pro řezný nástroj vyrobený ze slinutého karbidu nabývají hodnot:

$$\text{Upínací pouzdro: } E_0 = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa} \\ \mu_0 = 0,3$$

$$\text{Nástroj: } E_i = 6,4 \cdot 10^5 \text{ MPa} \\ \mu_i = 0,2$$



Obr.č.3.1.1-2 – Tlak ve stykové ploše vyvolaný daným přesahem

Výpočet upínací síly  $F_{up}$  lze odvodit z obecně platného vztahu, že stykový tlak  $p$  je definován jako poměr velikosti této síly, působící kolmo a rovnoměrně spojitě na stykovou plochu  $S$ .

$$p = \frac{F_{up}}{S} \rightarrow F_{up} = p \cdot S \quad [N]$$

Velikost stykové plochy  $S$  je potom určena upínacím průměrem  $\phi d$  a délkou spojení  $l$ , která se pohybuje u nástrojů menších průměrů (tj. 6, 8, 10, 12, 14 mm) od 26 do 36 mm a u nástrojů větších průměrů (tj. 16, 18, 20, 25, 32 mm) od 39 do 51 mm. Velikost stykové plochy se určí dle vztahu:

$$S = \pi d l \quad [mm^2]$$





Obr.č.3.1.1-3 – Upínací síla ve stykové ploše vyvolaná přesahem

Z hodnot znázorněných na obr.č.3.1.1-3 se potvrzuje předpoklad, že se zvětšujícím se upínacím průměrem stoupá i hodnota upínací síly. K určité odchylce dochází u upínacích průměrů 12, 14, 16 a 18 mm, kde se velikost upínací síly udržuje přibližně na stejné hladině. U upínacího průměru 16 mm dokonce dochází k nepatrnému poklesu upínací síly. U těchto upínacích průměrů, zvláště pak u upínacího průměru 16 mm, tak bude zvýšeno riziko nestability upnutí při určitých řezných podmínkách, právě vlivem nedostatečné upínací síly. Tento předpoklad byl prakticky ověřen při již zmiňovaných experimentech s tepelným upínacím pouzdrem o upínacím průměru 16 mm. Pro upínací průměr 10 mm je tak důležité ověřit, zda výsledná upínací síla  $F_{up}$  je v tomto rozsahu dostačující a zda při určitých podmínkách obrábění může vůbec dojít vlivem nedostatečné upínací síly k nestabilitě řezného procesu a následnému poškození některého z prvků soustavy S-U-N-O.

### 3.2 Charakteristika experimentu

Experiment se zabývá stabilitou upnutí stopkového frézovacího nástroje v tepelném upínacím pouzdře o průměru 10 mm a je charakterizován 3 základními kroky:

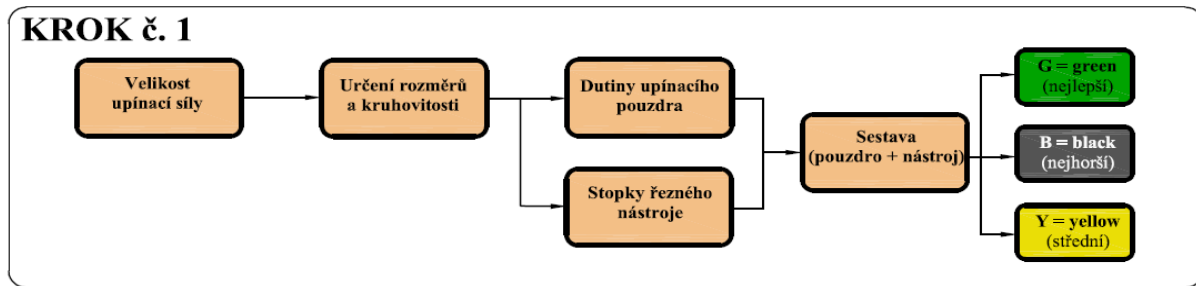
*KROK č.1* – Určení velikosti upínací síly (obr.č.3.2.1-1)

*KROK č.2* – Stanovení řezných podmínek experimentu (obr.č.3.2.1-3)

*KROK č.3* – Zpracování naměřených dat a jejich vyhodnocení (obr.č.4-1)

Prostředky k realizaci experimentu poskytla firma GÜHRING, která je zadavatelem práce, ale také katedra technologie obrábění FST – ZČU. Společnost GÜHRING dodala sadu 6-ti řezných nástrojů a sadu 5-ti tepelných upínacích pouzder. Katedra technologie obrábění uhradila ze svých prostředků materiál na obrobek a poskytla prostředí pro samotný průběh experimentu.

### 3.2.1 Návrh a členění experimentu



Obr.č.3.2.1-1 – Postup při rozdělování nástrojů a upínacích pouzder do sestav (KROK č.1)

Pro zkoumání stability upnutí řezného nástroje v tepelném upínacím pouzdře je rozhodující velikost upínací síly, pomocí které je nástroj držen v dutině upínacího pouzdra. Jelikož se z hlediska konstrukce jedná o nalisovaný spoj za tepla, rozhodující faktor pro velikost upínací síly je přesah, který vznikne mezi stopkou nástroje a dutinou upínacího pouzdra. Z tohoto důvodu bylo nutné nejdříve dodané nástroje a pouzdra dokonale proměřit a zjistit tak, v jaké výrobní toleranci se nacházejí. Měření bylo provedeno na tří-souřadnicovém měřícím stroji ve třech hladinách (5, 10 a 15 mm) a byly naměřeny absolutní rozměry a také kruhovitost daných řezů. Na základě těchto dat (viz. obr.č.3.2.1-2) došlo potom ke kombinaci nástrojů a pouzder do jednotlivých sestav.

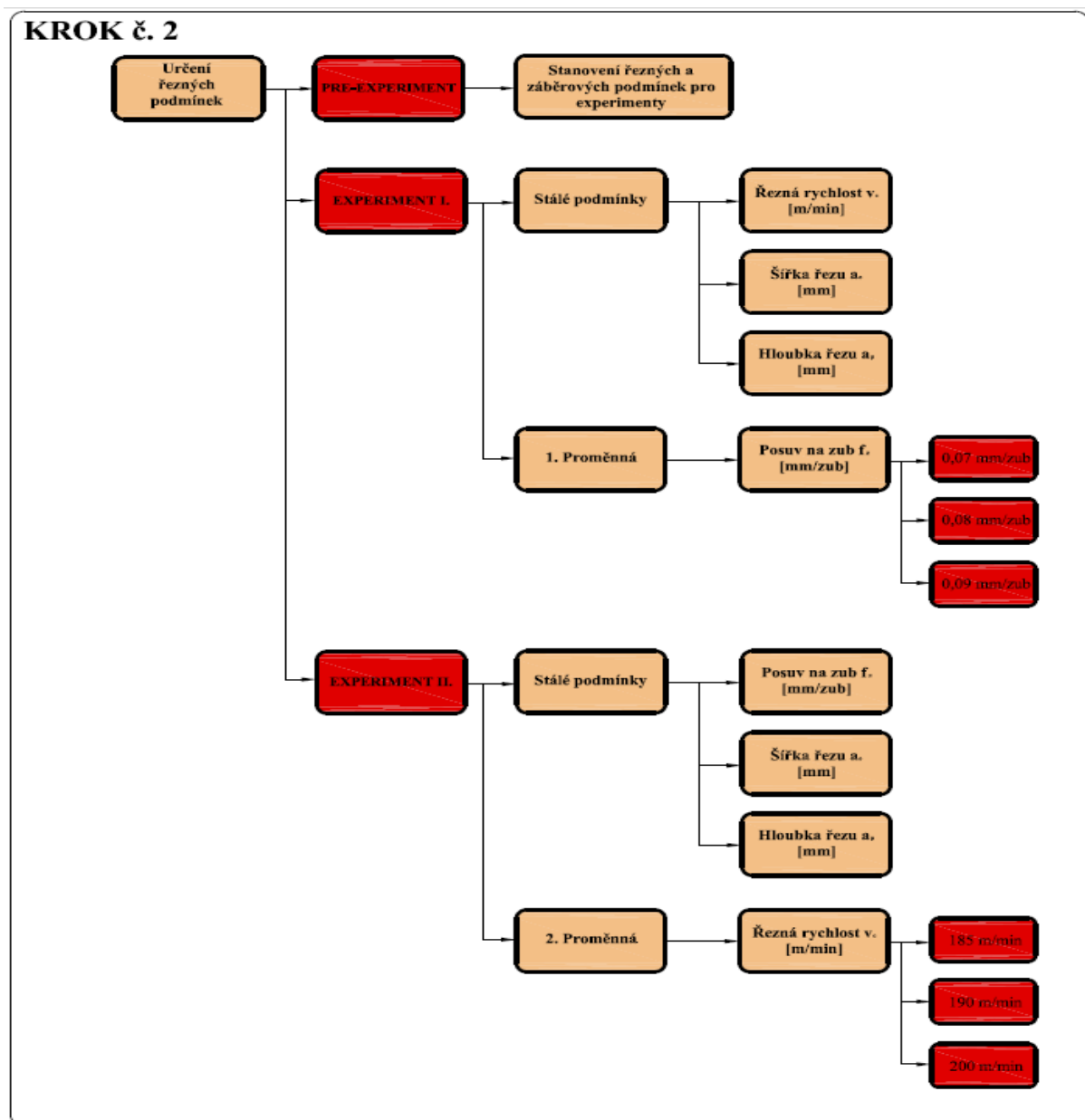
Sestava	Hladina	Nástroj		Upínací pouzdro		Vypovídající hodnoty	
		Rozměry [mm]	Kruhovitost [mm]	Rozměry [mm]	Kruhovitost [mm]	Přesah [mm]	Průměr přesahů [mm]
B13	5	9,994	0,005	9,982	0,010	0,012	0,008
	10	9,987	0,027	9,982	0,005	0,005	
	15	9,992	0,040	9,984	0,006	0,008	
B35	5	9,992	0,002	9,984	0,005	0,008	0,008
	10	9,993	0,010	9,984	0,002	0,009	
	15	9,994	0,011	9,986	0,002	0,008	
Y44	5	9,985	0,029	9,977	0,006	0,008	0,010
	10	9,987	0,026	9,979	0,003	0,008	
	15	9,992	0,005	9,978	0,003	0,014	
G21	5	9,994	0,005	9,971	0,016	0,023	0,022
	10	9,991	0,008	9,968	0,022	0,023	
	15	9,992	0,003	9,973	0,018	0,019	
G52	5	9,989	0,011	9,972	0,015	0,017	0,017
	10	9,992	0,010	9,974	0,016	0,018	
	15	9,992	0,006	9,975	0,019	0,017	

Obr.č.3.2.1-2 – Tabulka rozměrů stopky nástroje a dutiny upínacího pouzdra

Pro lepší orientaci při průběhu a vyhodnocování dat z experimentu bylo nutné tyto sestavy nějakým způsobem označit. Sestavy tak nabývají označení **B**, **Y**, **G** a jsou seřazeny od hodnot nejmenšího přesahu a tedy nejmenší upínací síly (sestavy **B**) po sestavy s největší

hodnotou přesahu a tedy i největší upínací síly (sestavy **G**). Sestavy s označením **Y** nabývají středních hodnot přesahu a upínacích sil. Čísla za těmito písmeny označují číslo nástroje a upínacího pouzdra (např. B13 = sestava s nejmenším přesahem, kterou tvoří nástroj č.1 a upínací pouzdro č.3). Princip rozdělování do sestav je *KROKEM* č. 1 a je zřejmý z obr.č.3.2.1-1.

Po zkombinování jednotlivých sestav došlo k realizaci PRE-EXPERIMENTU, při kterém byly stanoveny základní řezné a záběrové podmínky pro následující experimenty. Pro PRE-EXPERIMENT byla použita sestava Y62 - další nástroj (č.6) a upínací pouzdro č.2. Bylo tak učiněno z důvodu, aby případné opotřebení tohoto nástroje neovlivnilo výsledky samotných experimentů. Tato sestava již tedy nebude v dalším hodnocení zmiňována. Celkový postup při určování podmínek pro jednotlivé experimenty je řízen *KROKEM* č.2 (viz. obr.č.3.2.1-3).



Obr.č.3.2.1-3 – Rozdělení experimentů a určení jejich řezných podmínek (KROK č.2)

Experiment je rozdělen na dva dílčí experimenty. V každém experimentu figuruje jedna proměnná. Jednou se jedná o  $f_z$  (posuv na zub) = EXPERIMENT I., a po druhé o  $v_c$  (řezná rychlost) = EXPERIMENT II. EXPERIMENT I. je charakterizován konstantní řeznou rychlostí  $v_c = 180 \text{ m/min}$  a proměnnou  $f_z$ , která nabývá hodnot  $0,07; 0,08; 0,09 \text{ mm/zub}$ . EXPERIMENT II. je naopak charakterizován konstantním posuvem na zub  $f_z = 0,07 \text{ mm/zub}$  a proměnnou  $v_c$  nabývajících hodnot  $185, 190, 200 \text{ m/min}$ . Obě tyto proměnné mají určitý vliv na stabilitu upnutí. Úkolem dílčích experimentů je pokusit se stanovit podíl těchto proměnných na případné destabilizaci řezného procesu a také se pokusit popsat případné další nežádoucí účinky, které mohou změny těchto podmínek způsobit. Při zkoumání mezních hodnot těchto proměnných, se v rámci PRE-EXPERIMENTU vycházelo z doporučených řezných podmínek pro vybraný nástroj (viz. příloha P2). Při zjišťování únosnosti nástroje došlo vlivem vysoké řezné rychlosti a posuvu až k jeho samotné destrukci. Celkový přehled řezných podmínek jednotlivých přejezdů přehledně uveden v příloze P8.

### 3.2.2 Technická charakteristika experimentálního zařízení

#### 3.2.2.1 Obráběcí stroj

Veškeré experimenty byly prováděny na CNC vertikálním obráběcím centru MCV 750 A. Výrobce tohoto stroje je KOVOSVIT MAS, Sezimovo Ústí. Stroj je součástí laboratorního vybavení KTO FST-ZČU a je určen pro veškeré produktivní frézovací, vrtací a vyvrtávací operace. Splňuje rovněž všechny požadavky pro vysoce produktivní výrobu forem a zápustek. Bližší specifikace stroje uvedena v příloze P1.

#### 3.2.2.2 Řezný nástroj

Jako nástroj pro všechny experimenty byla zvolena monolitní stopková fréza RATIO 100 U – Ratiofräser Standard od společnosti GÜHRING (viz. obr.č.3.2.2.2-1), s typem stopky DIN 6535 - HA a o průměru  $\varnothing d = 10 \text{ mm}$ . Fréza je vyrobena ze slinutého karbidu a je osazena 4 břity s břitem přes střed. Je na ní deponován vícevrstvý povlak FIRE – TiAlN/TiN, který se vyznačuje velkou odolností proti opotřebení a má dobrou tepelnou stabilitu. Fréza je určena pro obrábění nelegovaných ocelí k zušlechťení s tvrdostí do  $700 \text{ N/mm}^2$  (např. oceli C45). Bližší technická specifikace je uvedena v příloze P2.



Obr.č.3.2.2.2-1 – Frézovací nástroj RATIO 100 U – Ratiofräser Standard (GÜHRING)

#### 3.2.2.3 Upínací pouzdro

Upínací pouzdro bylo hlavním předmětem zkoumání prováděných experimentů a bylo dodáno opět společností GÜHRING. Jedná se o tepelné upínací pouzdro pro nástroje

o průměru  $\varnothing d = 10 \text{ mm}$  s označením ISO SK 40 Shrink Fit DIN 69871 (viz. obr. č. 3.2.2.3-1). Konkrétní rozměry tepelného upínacího pouzdra jsou zřejmé z výkresu v příloze P3.



Obr. č. 3.2.2.3-1 – Tepelné upínací pouzdro ISO SK 40 Shrink Fit DIN 69871 (GÜHRING)

#### 3.2.2.4 Obrobek

Experimenty byly prováděny na zkušebním obrobku (viz. obr. č. 3.2.2.4-1) z uhlíkové oceli k zušlechtění označení ČSN 12 050 (ekv. W.Nr. 1.0503, DIN C45). Rozměry obrobku jsou přizpůsobeny rozměrům dynamometru, na který se obrobek upne pomocí upínacích šroubů. Výška obrobku je odvozena od hloubky odřezávané vrstvy  $a_p$  s dostatečnou rezervou při přejezdu nástroje nad upínacím šroubem. Konkrétní rozměry jsou zřejmé z výkresu obrobku, který je uveden v příloze P4.



Obr. č. 3.2.2.4-1 – Zkušební obrobek

#### 3.2.2.5 Zařízení pro měření řezných sil

K měření řezných sil byl použit tří-složkový dynamometr KISTLER 9225A, který snímá tři vzájemně kolmé síly pomocí piezoelektrických krystalů křemene. Výstupní veličinou dynamometru je elektrický náboj vzniklý deformací zmiňovaných krystalů, proto je nutné použít příslušný měnič náboj – napětí a zesilovač. Elektrické napětí je úměrné velikosti

náboje a podle potřeby je zesilováno. K měření řezných sil je tedy potřeba všech následujících zařízení, která jsou ještě dále technicky popsány v příloze P5 a které jsou součástí laboratorního vybavení KTO FST-ZČU:

- Tří-složkový dynamometr KISTLER 9225Asp
- Zesilovač KISTLER 5007
- Sběrnice a sběrná karta DAQCard-6062E
- PC - Software pro měření a zpracování dat LabView 8.2

### 3.2.2.6 Optický mikroskop Multicheck PC500

Pomocí optického mikroskopu Multicheck PC500 se měřilo opotřebenění a změna geometrie břitů řezného nástroje vždy po každém přejezdu. Důležité bylo zachovat přibližně stejné opotřebenění u jednotlivých nástrojů tak, aby naměřené hodnoty byly navzájem porovnatelné. Mikroskop je taktéž součástí laboratorního vybavení KTO FST-ZČU. Technická specifikace mikroskopu je uvedena v příloze P6.

### 3.2.2.7 Zařízení pro měření zvukových efektů

Záznam zvukových záznamů byl pořizován pomocí dvou nahrávacích zařízení. První z nich je rekordér ZOOM H4 (viz. obr.č.3.2.2.7-1) a druhé monofonní elektretový mikrofon YOGA EM-070 (viz. obr.č.3.2.2.7-2), který byl přímo napojen na počítač. Obě zařízení disponují elektretovými mikrofony. Elektretový mikrofon je speciálním druhem kondenzátorového mikrofону. Kondenzátorové mikrofony jsou díky svým vlastnostem považovány za nejlepší existující druh mikrofónů, tomu odpovídá jejich vysoká cena. I přes jejich vysokou cenu patří mezi nejpoužívanějších mikrofony v nahrávacích studiích.



Obr.č.3.2.2.7-1 – Rekordér ZOOM H4



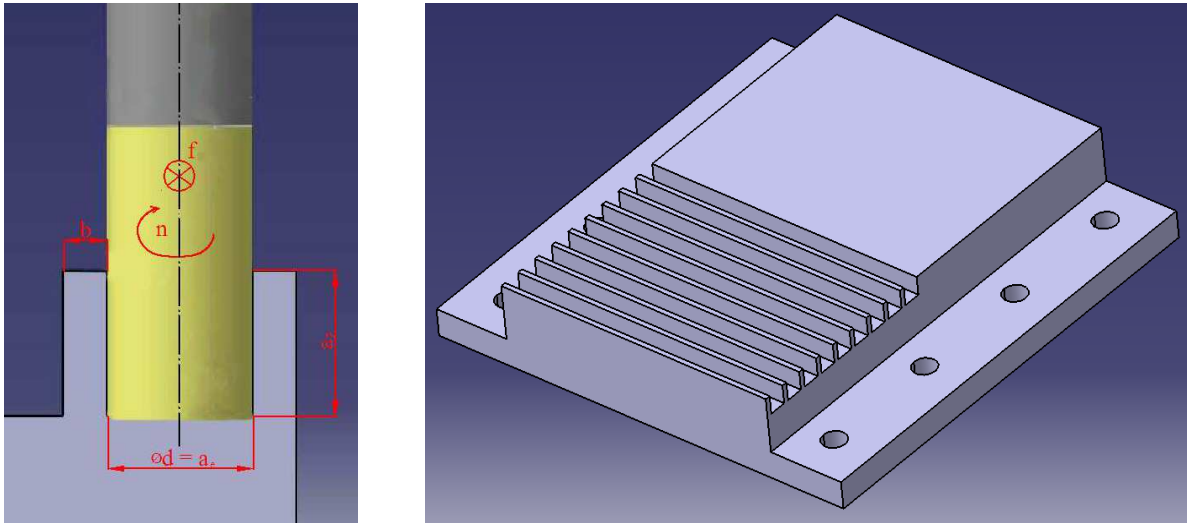
Obr.č.3.2.2.7-2 – Elektretový mikrofon  
YOGA EM-070

### 3.2.2.8 Zařízení pro měření drsnosti

Drsnost v jednotlivých drážkách byla měřena pomocí profiloměru HOMMEL ETAMIC T8000 RC, který byl pořízen katedrou technologie obrábění z projektu FRVŠ 2127/2011/A/ a patří tak k nejmodernějším měřicí zařízením katedry. Podrobná technická specifikace uvedena v příloze P7.



### 3.2.3 Postup frézování a charakteristika záběrových podmínek



Obr.č.3.2.3- 1 – Nákras obrobku (vpravo) a charakteristika záběrových podmínek (vlevo)

Průměr nástroje	$\varnothing d = 10 \text{ mm}$
Šířka řezu	$a_e = \varnothing d = 10 \text{ mm}$
Hloubka řezu	$a_p = 10 \text{ mm}$
Směr posuvu	$f$
Směr otáčení nástroje	$n$
Šířka žebra	$b = 3 \text{ mm}$
Procesní kapalina	žádná (obrábění za sucha)

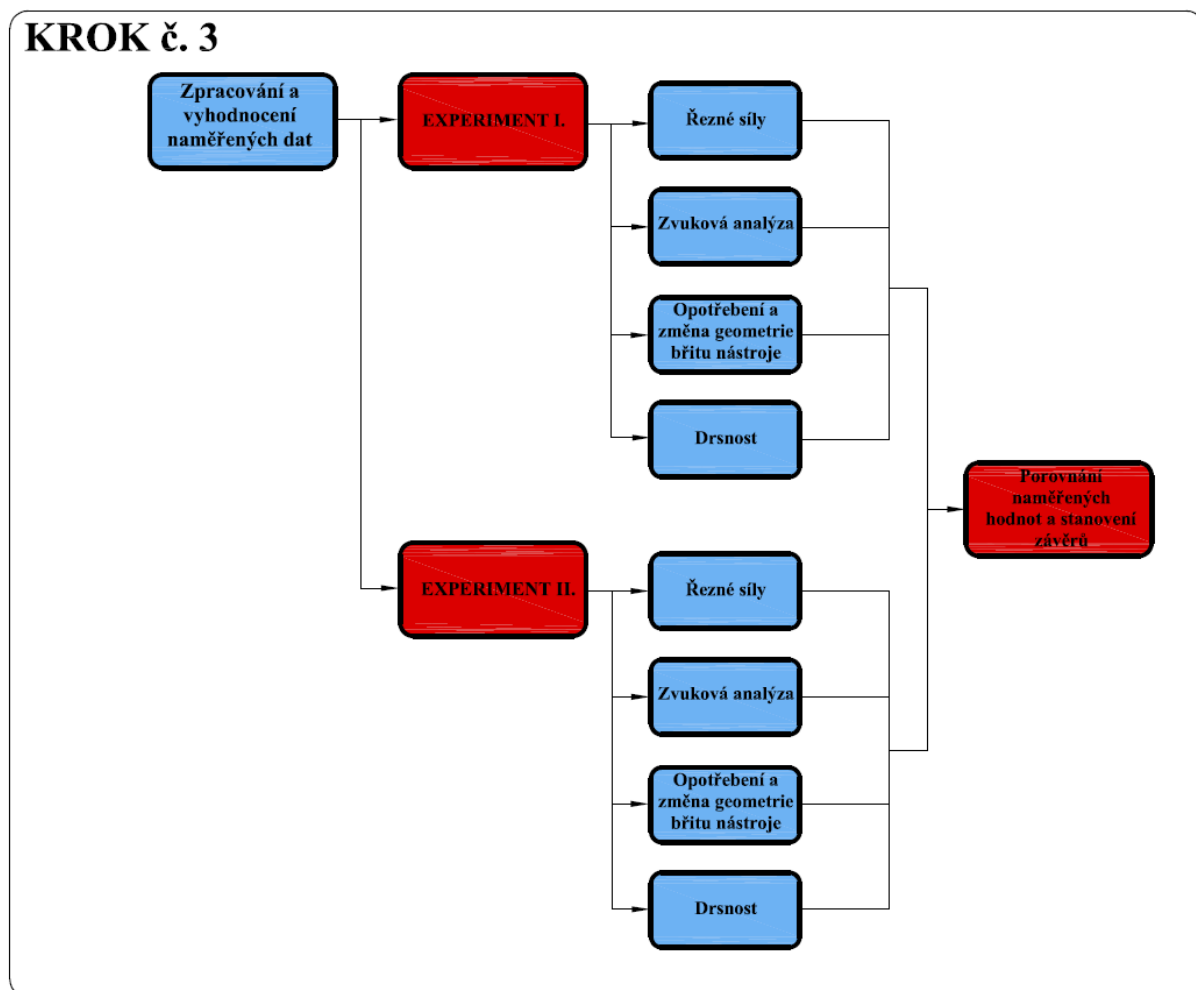
Záběrové podmínky byly navrženy takovým způsobem, aby bylo dosaženo ideálních podmínek procesu obrábění při zajištění bezproblémového měření jednotlivých veličin – řezné síly, zvukové efekty, drsnosti, apod. Velikost obrobku je dána rozměry dynamometru pro měření řezných sil. Jelikož  $a_e = \varnothing d$ , jedná se o obrábění do plného materiálu. Hodnoty  $f$  a  $n$  se odvíjí od řezných podmínek pro jednotlivé přejezdy. Šířka žebra  $b$  byla zvolena s ohledem na lepší tuhost soustavy S-U-N-O a dosažení vyšší stability obráběcího procesu při každém dalším přejezdu řezného nástroje (viz. obr.č.3.2.3-1). Jedná se o příčné frézování do plného materiálu o daném  $a_e$  a  $a_p$  s pracovním posuvem  $f$  ve směru osy  $x$ . Časová délka jednotlivých přejezdů (náměrů) je dána stanovenými řeznými podmínkami (cca. 5 až 7 sekund).

#### Postup frézování:

1) najetí nástroje před místo řezu → 2) spuštění příslušného programu pro měření řezných sil a zvukových efektů → 3) frézování v délce dané podmínkami experimentu a současně měření řezných sil a zvukových efektů → 4) vyjetí z řezu a současně uložení naměřených záznamů → 5) měření opotřebení a geometrie nástroje → 6) opakování postupu pro další sestavy

## 4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Vyhodnocení experimentální části se řídí *KROKEM č.3* (viz. *obr.č.4-1*). Zpracování a vyhodnocení naměřených dat probíhalo odděleně pro každý experiment. Následně se naměřená data dílčích experimentů porovnávala mezi sebou, aby mohlo dojít ke komplexnímu stanovení závěrů celého experimentu. Celkové závěry z experimentu jsou popsány v *kapitole 7*. Postup frézování byl stejný u obou experimentů. Dílčí experimenty se odlišují jen typem proměnné s měnícími se řeznými podmínkami. V průběhu obou experimentů byla sledována stabilita upnutí v tepelném upínacím pouzdře v podobě sledování řezných sil, zvukových efektů, opotřebení a změny geometrie břítu nástroje a také drsnosti obrobeneho povrchu.

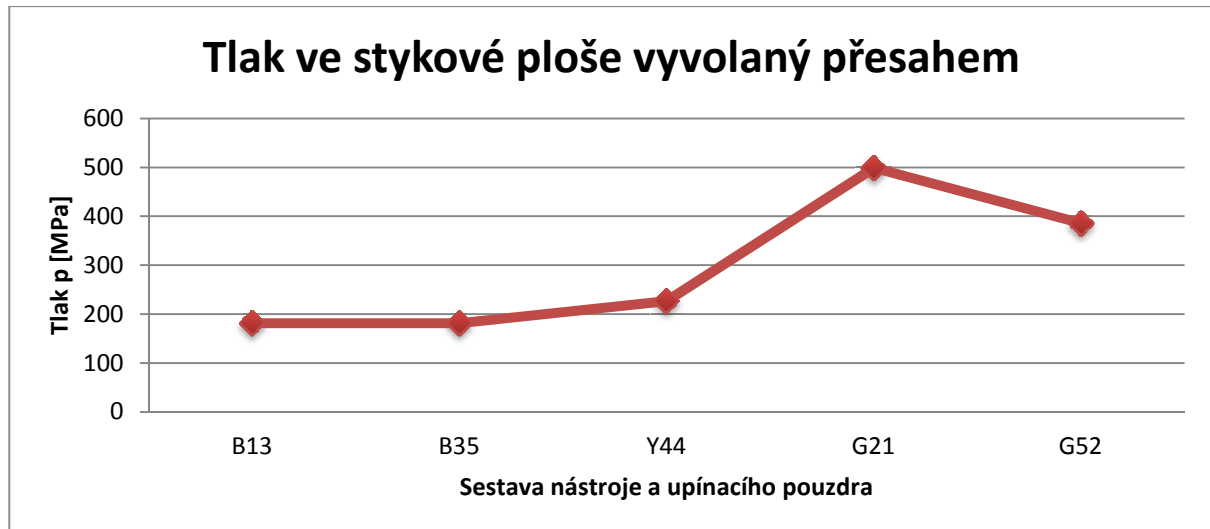


Obr.č.4-1 – Zpracování a vyhodnocení naměřených dat (KROK č.3)

### 4.1 Vyhodnocení upínací síly

Z naměřených rozměrů stopky nástroje a dutiny upínacího pouzdra (viz. *obr.3.2.1-2*) byly na základě znalosti přesahů jednotlivých sestav, pomocí vzorců uvedených v *kapitole 3.1.1*, vypočteny hodnoty plošného tlaku  $p$  a upínací síly  $F_{up}$ . Z obou grafů je zřejmé, že sestavy s označením *B13* a *B35* disponují asi polovičním plošným tlakem a poloviční upínací silou než sestavy s označením *G21* a *G52*. Sestava *Y44* se z tohoto hlediska nachází někde v dolní části intervalu mezi těmito hodnotami.





Obr.č.4.1-1 – Tlak ve stykové ploše vyvolaný přesahem (Sestavy nástrojů a pouzder)

Je nutné si uvědomit, že rozdíly mezi přesahy jsou v řádech  $\mu\text{m}$ , což není zanedbatelná hodnota. Z hlediska výroby se však všechny tyto sestavy nacházejí ve stanovené výrobní toleranci, takže by měl být zaručen jejich bezporuchový provoz. Použití takovýchto sestav by mohl být problém zejména při aplikaci moderních produktivnějších metod obrábění, kde dochází k velkému zatížení soustavy S-U-N-O. Velikost upínací síly zde má velmi zásadní vliv na stabilitu upnutí v tepelném upínacím pouzdře. Dá se tedy předpokládat, že u sestav typu **B** bude vyšší pravděpodobnost výskytu nežádoucích jevů spojených s nestabilitou řezného procesu než u sestav typu **G**.

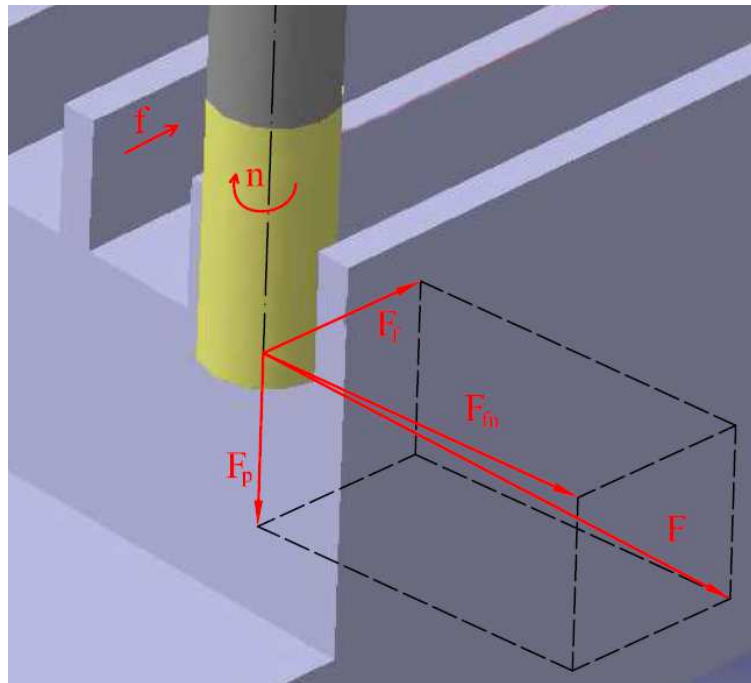


Obr.č.4.1-2 – Upínací síla ve stykové ploše vyvolaná přesahem (Sestavy nástrojů a pouzder)

Vypočtené hodnoty byly ještě dále ověřeny prostřednictvím metody konečných prvků (MKP) ve studentské verze softwaru UNIGRAPHICS NX 8.0 společnosti SIEMENS. Hodnoty plošného tlaku a upínací síly získané pomocí této metody korespondují s hodnotami určenými dle výpočtových vztahů. Ukázky výstupů z tohoto softwaru uvedeny v příloze P10.

## 4.2 Vyhodnocení řezných sil

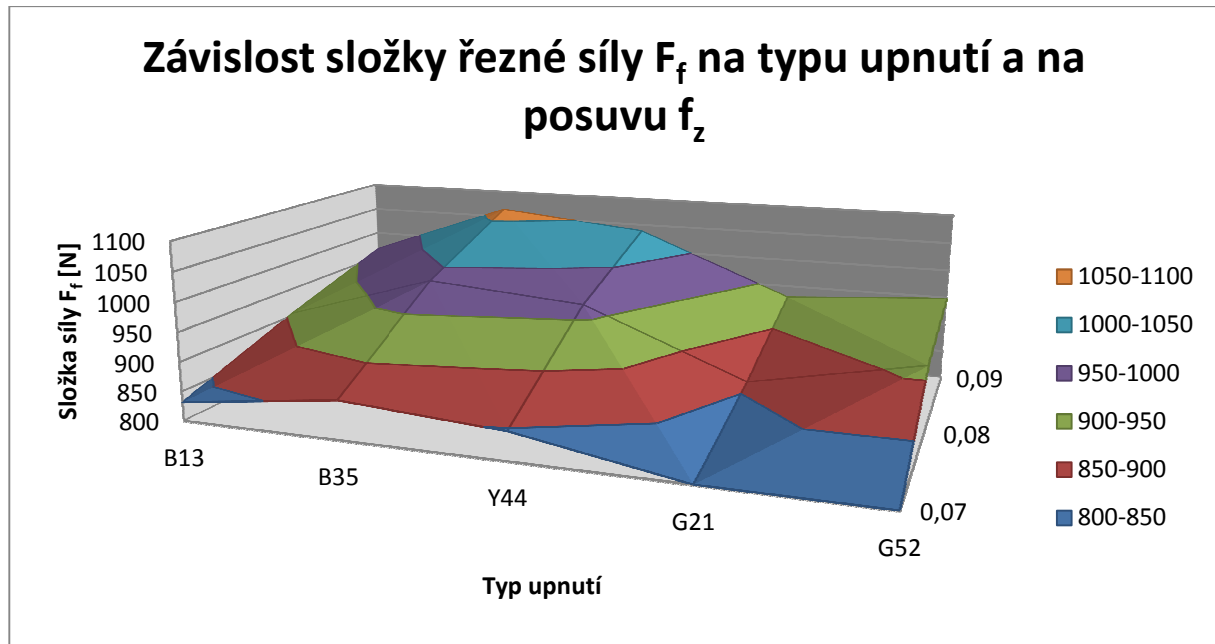
Vyhodnocení naměřených dat z měření řezných sil při frézování probíhalo pomocí softwaru pro vyhodnocování řezných sil LABVIEW 8.2. Během frézování byly zaznamenávány průběhy složek řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  ( $F_f$ ,  $F_m$ ,  $F_p$ ). Jednotlivé průběhy byly metodicky převedeny do prostředí softwaru MS EXCEL. V každém průběhu bylo rovnoměrně určeno 5 intervalů, ze kterých se potom stanovil průměr. Těchto 5 průměrných hodnot z každého průběhu složky řezné síly bylo převedeno a znázorněno do grafu v softwaru MS EXCEL. Poté došlo k porovnání jednotlivých průběhů ve dvourozměrných grafech pro kombinaci stejných řezných podmínek a všech sestav nebo různých řezných podmínek a jedné sestavy. To vše pro proměnnou  $f_z$  i proměnnou  $v_c$ . Aby byly lépe vidět všechny souvislosti, došlo ke konstrukci prostorových grafů, které kombinují vlivy typů sestav, průběhů jednotlivých složek řezných sil a vliv proměnných. Takto získané závislosti jsou dále popsány v kapitole 4.2.1 a kapitole 4.2.2.



Obr.č.4.2-1 – Základní rozložení řezných sil při experimentálním obrábění

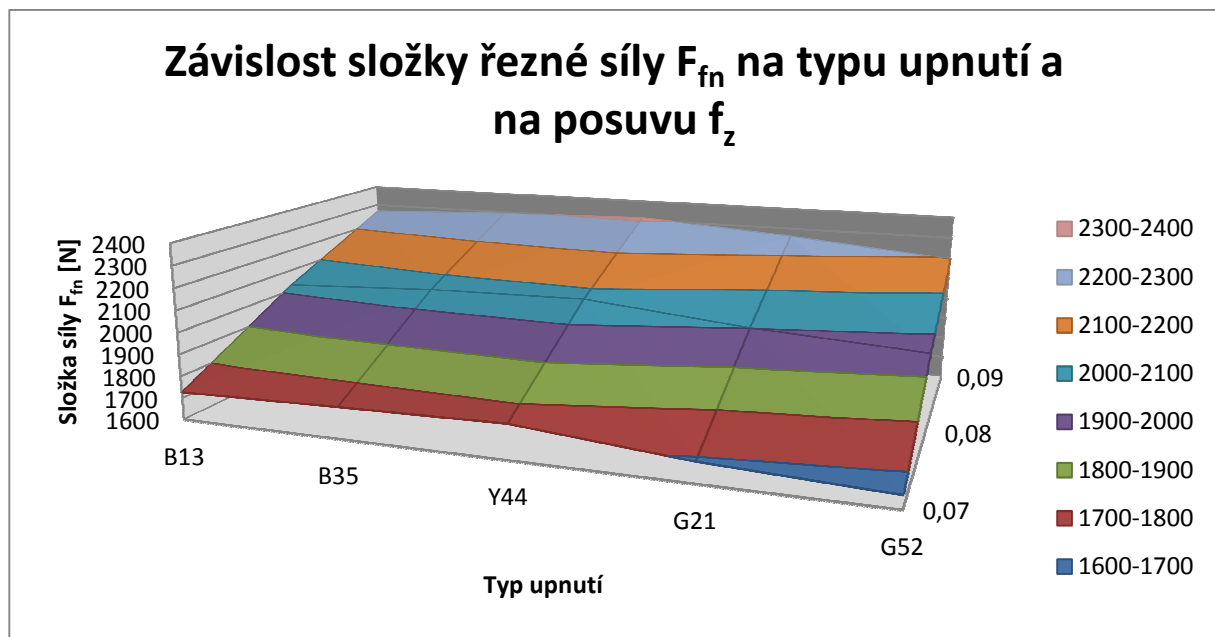
### 4.2.1 EXPERIMENT I.

Na následujícím prostorovém grafu (obr.č.4.2.1-1) jsou znázorněny průběhy složek řezné síly  $F_f$  (posuvová složka řezné síly) v závislosti na typu jednotlivých sestav a velikosti proměnné  $f_z$  [mm/zub]. Z grafu je patrné, že složka řezné síly  $F_f$  u sestav **B13** a **B35** nabývá již od nižších hodnot posuvů vyšších hodnot, než je tomu u sestav typu **G21** a **G52**. Se zvyšující se hodnotou posuvu se tento rozdíl ještě dále prohlubuje. Vyšší hodnota složky řezné síly  $F_f$  u sestav **B** je pravděpodobně způsobena menší tuhostí ve směru osy  $x$ . Řezný proces je tak více náchylný k nestabilitě. Průběh složky řezné síly  $F_f$  sestavy **Y44** se pohybuje opět někde mezi průběhy sestav **B** a **G**.



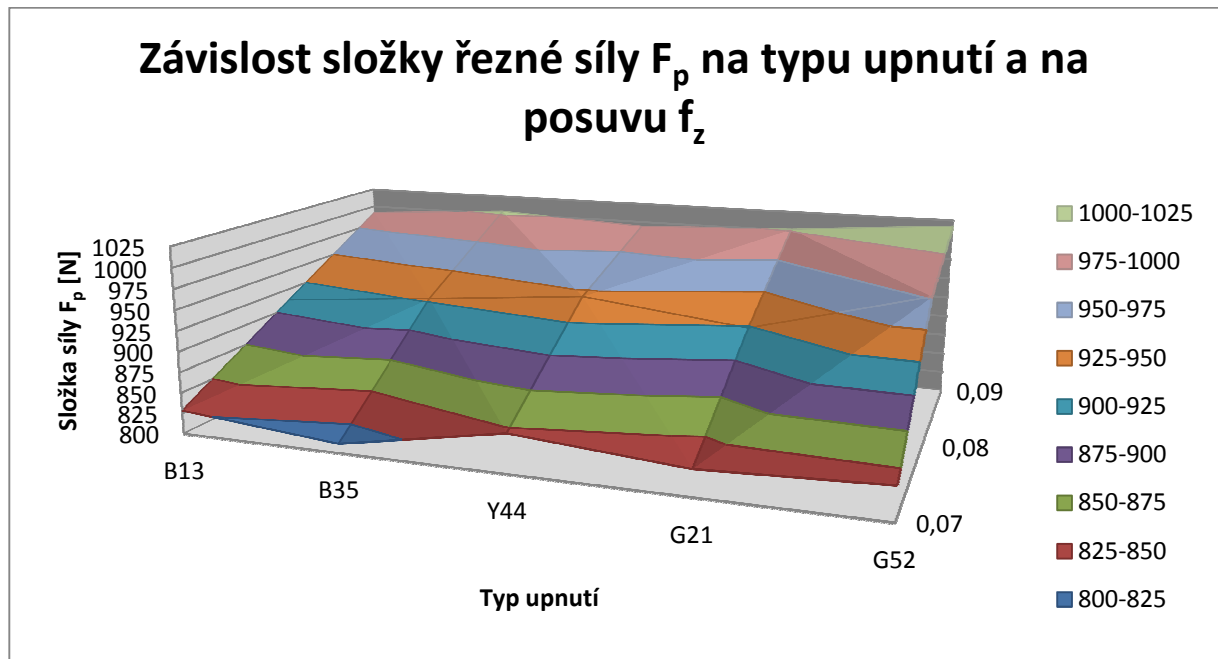
Obr.č.4.2.1-1 – Závislost složky řezné síly  $F_f$  na typu upnutí a na posuvu  $f_z$

Průběhy složky řezné síly  $F_{fn}$  (normálové na směr posuvu) v závislosti na typu sestavy a hodnoty proměnné  $f_z$  jsou znázorněny na obr.č.4.2.1-2. Opět zde hodnoty složky řezné síly  $F_{fn}$  u sestav typu **B** nabývají vyšších hodnot již od nižších hodnot posuvů. Se zvyšující se hodnotou posuvu však dochází téměř k vyrovnání všech závislostí. Dochází zde taktéž vlivem menší upínací síly u sestav typu **B** k menší tuhosti upnutí a tím možnému rozvoji vibrací, tentokrát ve směru osy  $y$ . Rozvíjející se vibrace jsou utlumovány okolním materiálem a proto rozdíly nejsou tak velké jako u složky řezné síly  $F_f$ . Lze si také všimnout, že velikost složky řezné síly  $F_{fn}$  je ve všech bodech zhruba dvojnásobná, než velikost složky řezné síly  $F_f$ . Složka této řezné síly bude mít tedy významný vliv na přesnost drážky z hlediska její šířky.

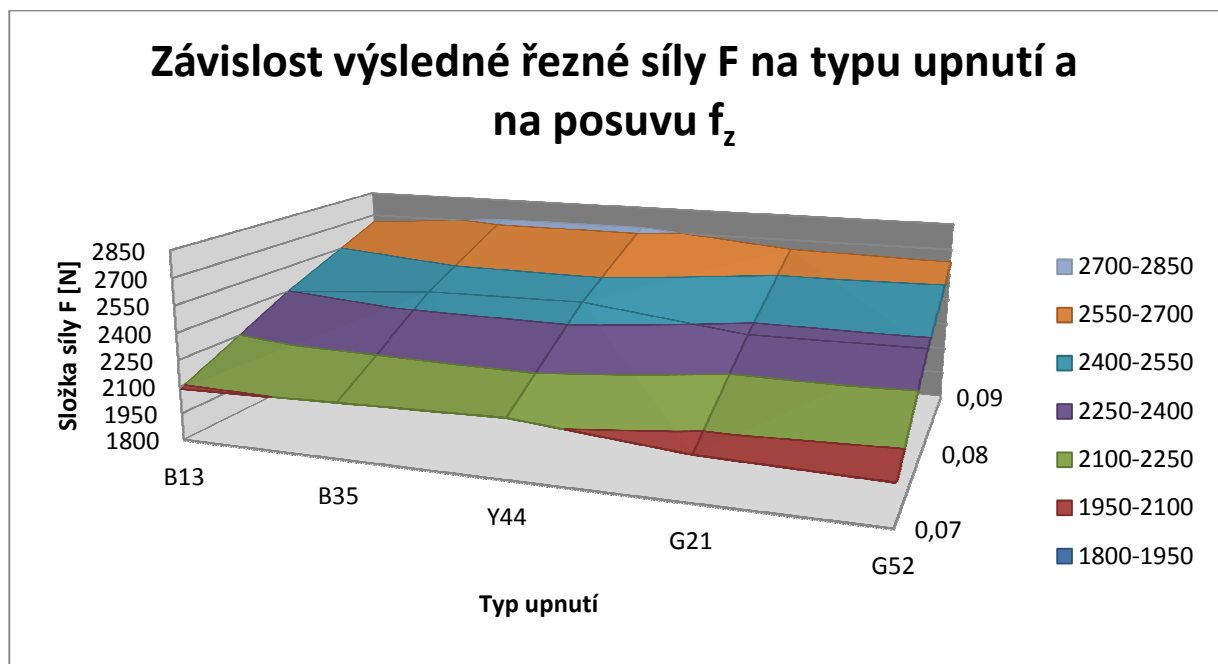


Obr.č.4.2.1-2 – Závislost složky řezné síly  $F_{fn}$  na typu upnutí a na posuvu  $f_z$

Z hlediska vytahování nástroje z dutiny upínacího pouzdra je nejdůležitější složka řezné síly  $F_p$  (pasivní složka řezné síly). Na obr.č.4.2.1-3 jsou znázorněny opět průběhy této složky v závislosti na typu upnutí a proměnné  $f_z$ . Jelikož tato složka řezné síly působí v ose nástroje a směrem ven z dutiny upínacího pouzdra, měly by být naměřené hodnoty se záporným znaménkem. Pro lepší názornost jednotlivých průběhů zde však bylo nutné udělat absolutní hodnotu z těchto záporných hodnot. Velikost upínací síly v tomto případě nemá na složku řezné síly  $F_p$  výrazný vliv, naměřené hodnoty u všech typů sestav vykazují přibližně stejné hodnoty. Průměrně nejnižších hodnot nabývá sestava **Y44**.



Obr.č.4.2.1-3 – Závislost složky řezné síly  $F_p$  na typu upnutí a na posuvu  $f_z$

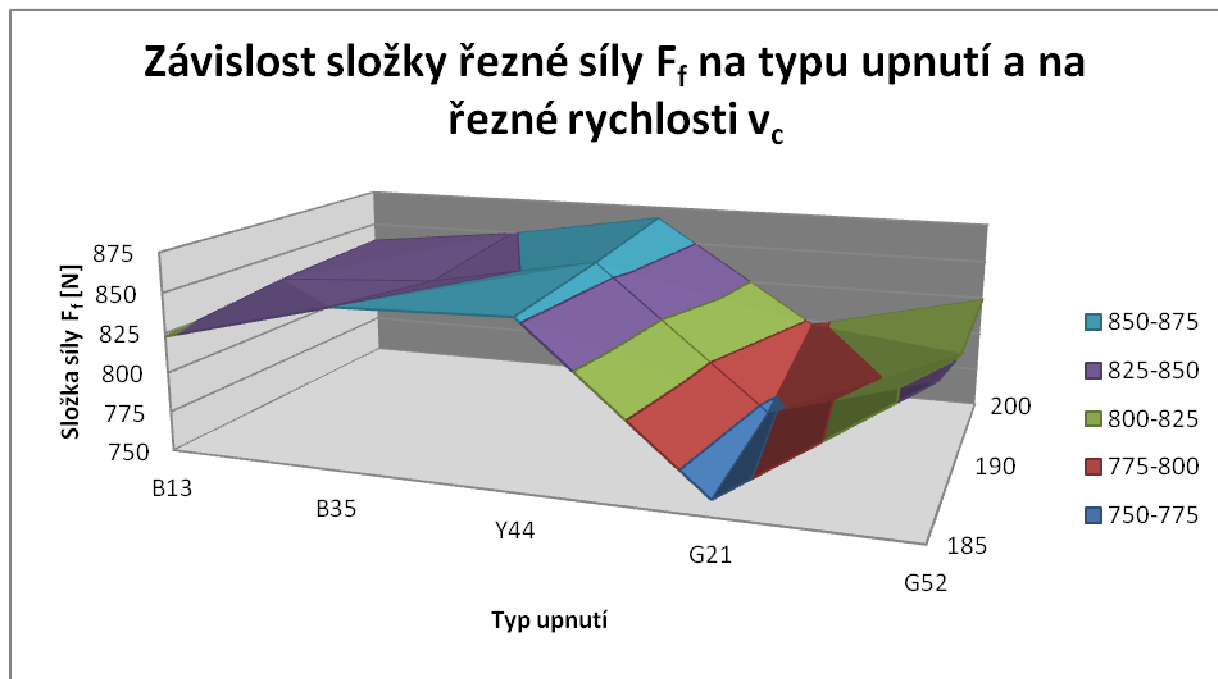


Obr.č.4.2.1-4 – Závislost výsledné řezné síly  $F$  na typu upnutí a na posuvu  $f_z$

Závislost výsledné řezné síly  $F$  na typu upnutí a proměnné  $f_z$  je znázorněna na obr.č.4.2.1-4. Výsledná síla je výslednicí zmiňovaných tří složek řezných sil a je určena dle vztahu:  $F = \sqrt{F_f^2 + F_{fn}^2 + F_p^2}$ . Z grafu je patrný rozdíl mezi sestavami typu **B** a **G**, který potvrzuje předpoklad, že sestavy typu **G** s větším přesahem (tzn. větší tuhostí) jsou zatěžovány menšími řeznými silami. Přestože se na vývrtkovitém vytahování nástroje podílí především složka řezné síly  $F_p$  (společně se vznikajícím chvěním a vysokým krouticím momentem), je třeba brát vždy v úvahu výslednou řeznou sílu  $F$ , jako komplexní veličinu silového zatížení nástroje.

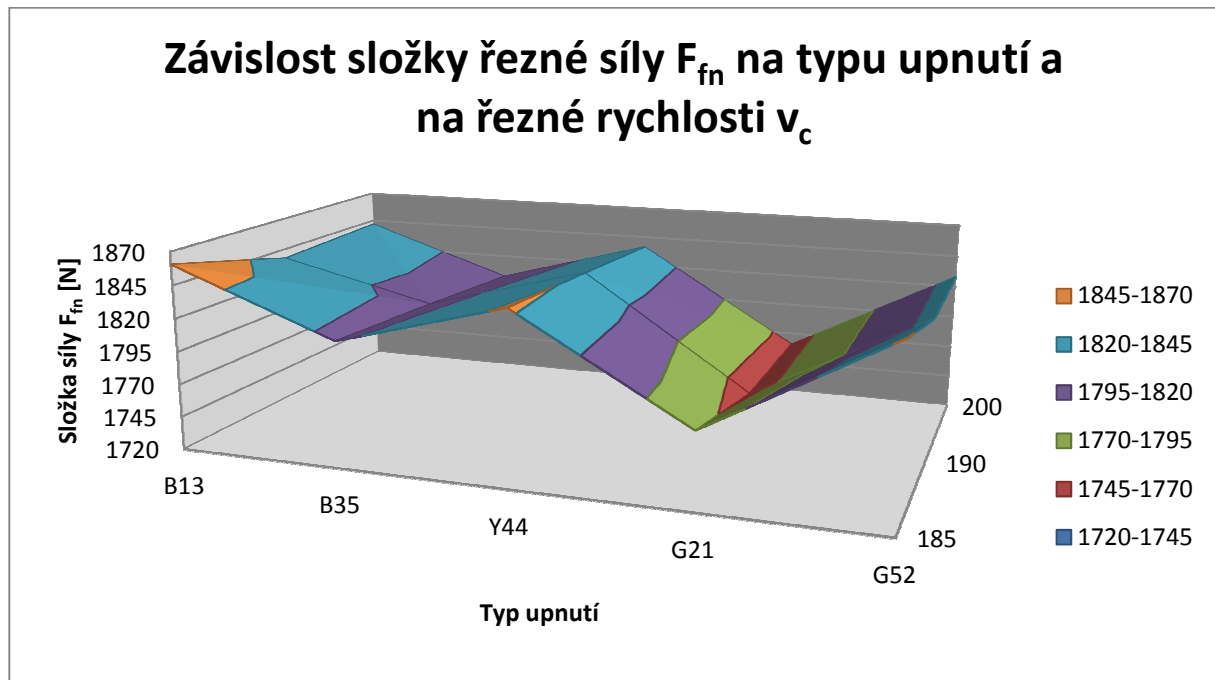
#### 4.2.2 EXPERIMENT II.

Na následujícím prostorovém grafu (obr.č.4.2.2-1) jsou znázorněny průběhy složek řezné síly  $F_f$  (posuvová složka řezné síly) v závislosti na typu jednotlivých sestav a velikosti proměnné  $v_c$  [m/min]. Z grafu je patrné, že složka řezné síly  $F_f$  u sestav **B13** a **B35** nabývá již od nižších hodnot řezné rychlosti vyšších hodnot, než je tomu u sestav typu **G21** a **G52**. Bohužel, při průběžném sledování opotřebení (před každým novým přejezdem) bylo zjištěno, že během obrábění došlo k opotřebení (vylomením) břitu nástroje č.5 a tato změna geometrie poté ovlivnila naměřené výsledky. Protože již nebyl k dispozici nový nástroj, sestava **G52** byla i nadále ponechána. Bylo tak rozhodnuto i s touto ovlivněnou sestavou dále pokračovat v experimentu pro následné porovnání naměřených řezných sil. Vypovídající hodnoty pro sestavy typu **G** tak reprezentuje již jen sestava **G21**. Z grafu je patrné, že se zvyšující se hodnotou řezné rychlosti se naměřené hodnoty jen nepatrně zvyšují. Přestože řezná rychlost nemá takový vliv na řezné síly jako posuv, není její velikost rozhodně zanedbatelná, neboť její hodnota je jedním z parametrů výrazně ovlivňujících trvanlivost nástroje.



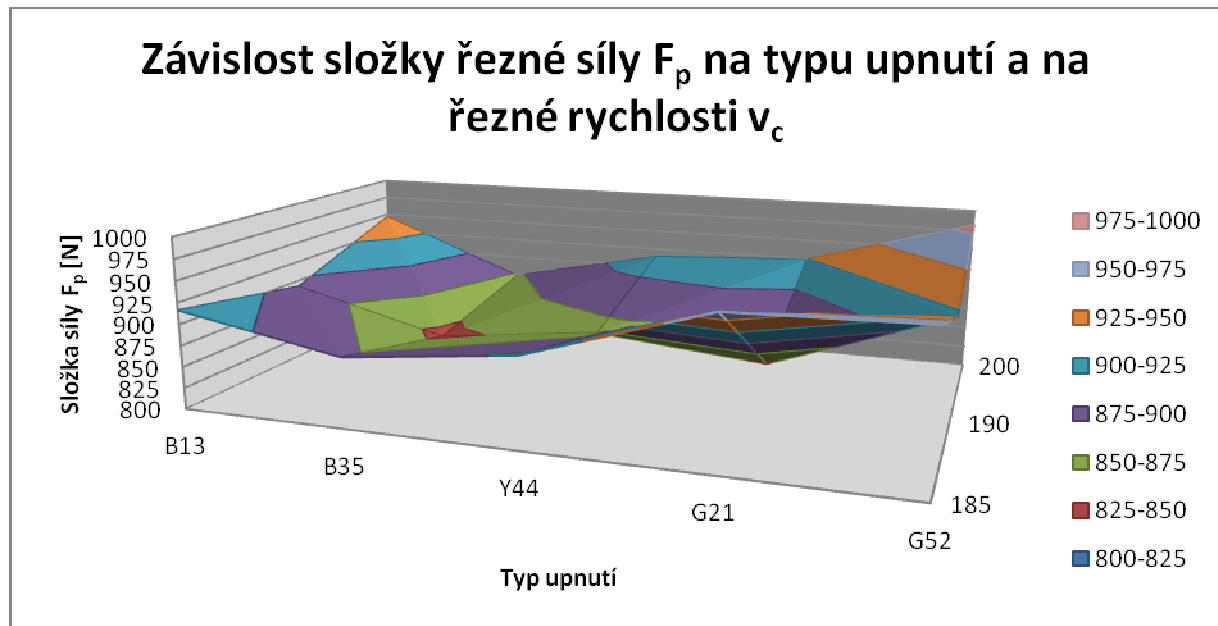
Obr.č.4.2.2-1 - Závislost složky řezné síly  $F_f$  na typu upnutí a na řezné rychlosti  $v_c$

Průběhy složky řezné síly  $F_{fn}$  (normálové na směr posuvu) v závislosti na typu sestavy a proměnné  $v_c$  jsou znázorněny na obr.č.4.2.2-2. Opět zde hodnoty složky řezné síly  $F_{fn}$  u sestav typu **B** a **Y** nabývají vyšších hodnot. Z grafu je patrné, že řezná rychlost nemá výrazný vliv na velikost této složky řezné síly a že je tato složka řezné síly u sestavy **G52** významně ovlivněná již zmiňovaným opotřebením nástroje. Lze si také všimnout, že velikost složky řezné síly  $F_{fn}$  je ve všech bodech více než dvojnásobná, než velikost složky řezné síly  $F_f$ . Složka této řezné síly bude mít tedy významný vliv na přesnost drážky z hlediska její šířky.

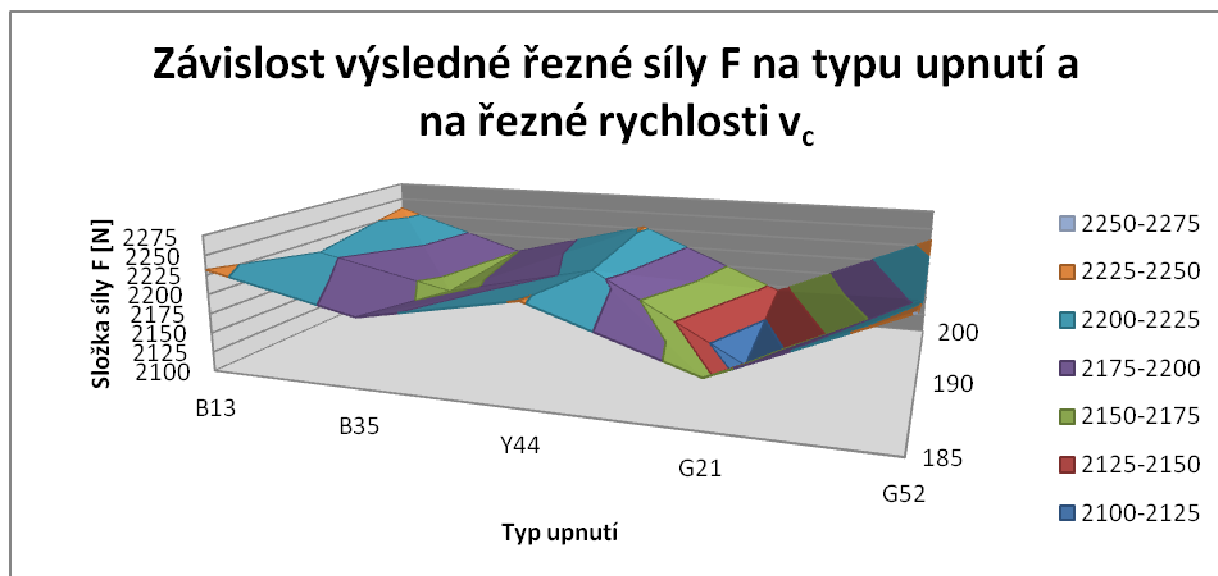


Obr.č.4.2.2-2 – Závislost složky řezné síly  $F_{fn}$  na typu upnutí a na řezné rychlosti  $v_c$

Průběhy pasivní složky řezné síly  $F_p$  v závislosti na typu upnutí a proměnné  $v_c$  jsou znázorněny na obr.č.4.2.2-3. Pro lepší názornost jednotlivých průběhů zde bylo opět nutné udělat absolutní hodnotu z naměřených záporných hodnot. Po analýze naměřených dat se lze domnívat, že při řezné rychlosti 185 m/min došlo při přejezdu u sestavy **G21** k odchylce (skok do vyšších hodnot složky řezné síly  $F_p$ ). Tato odchylka je pravděpodobně způsobena lokální nehomogenitou materiálu. Bohužel kvůli opotřebení nástroje sestavy **G52** nelze tuto domněnku potvrdit nebo vyvrátit (přejezd obdobným typem sestavy). Z grafu je ovšem zajímavé, že při řezné rychlosti 190 m/min dosahuje tato složka řezné síly nejmenších hodnot. Řezná rychlost 190 m/min se tak jeví pro hodnotu posuvu 0,07 mm jako nejpříznivější. Opět se zde potvrzuje domněnka, že hodnota řezné rychlosti nemá tak výrazný vliv na celkové silové zatížení (resp. složku řezné síly  $F_p$ ) soustavy nástroje s upínacím pouzdem.



Obr.č.4.2.2-3 - Závislost složky řezné síly  $F_z$  na typu upnutí a na řezné rychlosti  $v_c$



Obr.č.4.2.2-4 - Závislost výsledné řezné síly  $F$  na typu upnutí a na řezné rychlosti  $v_c$

Závislost výsledné řezné síly  $F$  na typu upnutí a proměnné  $v_c$  je znázorněna na obr.č.4.2.2-4. Výsledná síla je výslednicí zmiňovaných tří složek řezných sil a je určena dle vztahu:  $F = \sqrt{F_f^2 + F_{fn}^2 + F_p^2}$ . Na první pohled je patrný rozdíl mezi sestavami typu **B** a **G**,

který potvrzuje předpoklad, že sestavy typu **G** s větším přesahem (tzn. větší tuhostí) jsou zatěžovány menšími řeznými silami. Přestože se na vývrtkovitém vytahování nástroje podílí především složka řezné síly  $F_p$  (společně se vznikajícím chvěním a vysokým krouticím momentem), je třeba brát vždy v úvahu výslednou řeznou sílu  $F$ , jako komplexní veličinu silového zatížení nástroje. Z grafu je dále patrné, že hodnota řezné rychlosti nemá tak výrazný vliv na velikost výsledného silového zatížení jako hodnota posuvu a že výsledné silové zatížení je u sestavy **G52** významně ovlivněno zmiňovaným opotřebením nástroje.

### 4.3 Vyhodnocení zvukové analýzy

Stabilita řezného procesu závisí na upnutí a opotřebení řezného nástroje. Nestabilní řezný proces je doprovázen vznikem vibrací a slyšitelným zvukovým projevem. Vznik vibrací, doprovázený mnohdy nepříjemným zvukem, je vyhodnocován pomocí tzv. zvukové analýzy. Měření zvuku pak může být realizováno pomocí akcelerometru nebo mikrofону. Při použití akcelerometru jsou zvukové vibrace od tření hřbetu nástroje detekovány snímačem umístěným v blízkosti upnutí nástroje. Získané frekvence jsou rozděleny na nízké a vysoké a jejich poměr poskytuje informaci o stabilitě řezného procesu. Pomocí mikrofónu jsou zvuky z obrábění analyzovány metodou spektrální analýzy. Na spektru se vlivem destabilizace procesu začnou objevovat nárůstky amplitud na některých frekvencích.

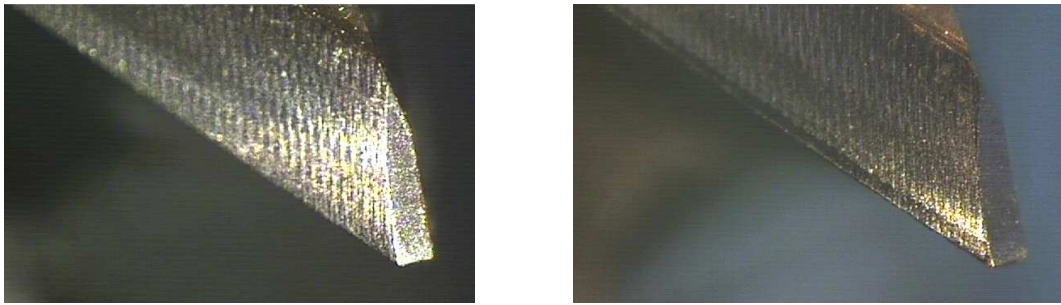
Zvuková analýza experimentu byla provedena v rámci řešení další diplomové práce na téma: „Možnosti zvukové analýzy procesu obrábění a její využití“, jejímž řešitelem je kolega J. Lerch. Jeho úkolem bylo pořídít zvukové vzorky různých režimů práce nástroje s různou mírou otupení, tuhosti a pro rozličná umístění mikrofónu. Zvukovou analýzou se dále pokusit nalézt charakteristiky příznačné pro určitou situaci obrábění, které pokud možno abstrahují ostatní vlivy a na základě těchto charakteristik navrhnout metodiku pro budoucí vyhodnocování zvuku, která by konkrétnímu vzorku zvuku přiřadila odpovídající charakter obrábění a stav nástroje. Bohužel při analýze naměřených zvukových vzorků bylo shledáno, že všechny přejezdy daných sestav nástroje s upínacem byly z hlediska této analýzy obrábění nevhodné. Naměřená data neměla potřebnou vypovídající hodnotu, a proto je nešlo pro řešení této diplomové práce použít. Z toho důvodu se v této části vyhodnocení neobjevují žádná naměřená data.

### 4.4 Vyhodnocení opotřebení a změny geometrie břítu nástroje

Opotřebení a případná změna geometrie břítu nástroje byla měřena na optickém mikroskopu Multicheck PC500 vždy po každém přejezdu. Bylo tak učiněno z důvodu vyloučení vlivu změny geometrie nástroje na velikost řezných sil. Nástroj upnutý do tepelného upínacího pouzdra byl upnut do universálního upínacího přípravku SK 40 přímo na mikroskopu. Následně bylo změřeno opotřebení na hřbetě nástroje z válcové, případně i čelní strany nástroje. Měření opotřebení probíhalo s použitím objektivu OP1-B75, který disponuje zvětšením 75x a jehož pomocí jsou k rozpoznání detailní prvky břítu. Samotné měření opotřebení probíhalo pomocí softwaru WMS, který umožňuje vytvářet obraz v digitální kvalitě ve formátech BMP a JPEG.

Ke znatelnému opotřebení řezného nástroje mezi jednotlivými přejezdy nedocházelo. Obecně pro vyhodnocení experimentu může být tedy vliv opotřebení břítu nástroje na stabilitu řezného procesu zanedbán. Ukázka břítu nového nástroje a nástroje po 6 přejezdech na obr.č.4.4.-1. Z obrázku je patrná pouze pravděpodobně tepelně ovlivněná oblast na použitém nástroji, jejíž šířka činila 0,106 mm. Z hlediska velikosti řezných sil však tato oblast nemá žádný význam.





Obr.č.4.4-1 – Opotřebení břitu nového nástroje (vlevo) a nástroje po 6 přejezdech (vpravo)

Jelikož se jedná o nástroj vyrobený ze slinutého karbidu, břit nástroje mohl být spíše postižen vylamováním. K tomuto jevu došlo u sestavy **G52**, kde vylomením břitu na čele nástroje (viz. obr.č.4.4-2) došlo k nárůstu rezných sil. Tento jev je již popsán v kapitole 4.2.2.



Obr.č.4.4.-2 – Vylomení břitu na čele nástroje u sestavy **G52**

#### 4.5 Vyhodnocení drsnosti obrobeneho povrchu

Drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Podle převládajícího směru nerovností se drsnost posuzuje v příčném nebo podélném směru.

Experimentálně byla měřena drsnost na měřícím zařízení HOMMEL ETAMIC T8000 RC. Drsnost byla měřena z důvodu nedostatku místa pouze na dně drážky a v rozsahu 15 mm na nájezdu a výjezdu z obrobku. Naměřeny byly charakteristiky  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  (viz.obr.č.4.5-1).

Charakteristiky drsnosti uvedeny v $\mu\text{m}$	<b>B13</b>						<b>B35</b>						
	Proměnná $f_z$ [mm/zub]			Proměnná $v_c$ [m/min]			Proměnná $f_z$ [mm/zub]			Proměnná $v_c$ [m/min]			
	0,07	0,08	0,09	185	190	200	0,07	0,08	0,09	185	190	200	
Nájezd	$R_a$	1,58	1,57	1,67	1,49	1,74	1,19	1,36	1,85	2,2	1,54	1,5	1,38
	$R_z$	7,43	7,38	7,8	7,69	10,49	7,84	8,47	9,45	10,36	8,65	9,15	8,71
	$R_{max}$	7,63	7,57	8,48	9,39	14,58	8,23	9,43	9,74	11	8,96	9,38	9,4
Výjezd	$R_a$	1,28	1,36	1,29	1,28	1,61	1,1	1,41	1,83	2,11	1,63	1,55	1,55
	$R_z$	7,52	7,67	7,52	6,94	9,01	7,73	8,29	9,33	10,27	8,92	8,7	8,96
	$R_{max}$	7,81	7,9	7,68	7,29	9,76	8,48	8,43	9,52	10,57	9,22	9,17	9,52

Charakteristiky drsnosti uvedeny v $\mu\text{m}$		G21						G52					
		Proměnná $f_z$ [mm/zub]			Proměnná $v_c$ [m/min]			Proměnná $f_z$ [mm/zub]			Proměnná $v_c$ [m/min]		
		0,07	0,08	0,09	185	190	200	0,07	0,08	0,09	185	190	200
Nájezd	$R_a$	1,01	1,45	1,64	1,44	1,2	1,92	1,65	1,4	1,56	1,23	1,28	1,32
	$R_z$	7,02	10,21	11,47	8,58	8,33	10,07	8,36	8,34	8,85	7,57	8,08	8,46
	$R_{max}$	8,07	10,49	11,69	8,86	9,03	10,53	8,83	9,07	9,17	7,8	8,73	8,74
Výjezd	$R_a$	1,01	1,42	1,61	1,49	1,34	1,92	1,52	1,38	1,53	1,22	1,29	1,39
	$R_z$	7,04	9,41	9,84	9,11	8,72	9,61	7,83	8,39	9,23	7,97	7,72	8,52
	$R_{max}$	7,38	9,61	10,29	10,63	9,12	9,95	8,2	8,8	10,69	8,51	7,92	11,33

Charakteristiky drsnosti uvedeny v $\mu\text{m}$		Y44					
		Proměnná $f_z$ [mm/zub]			Proměnná $v_c$ [m/min]		
		0,07	0,08	0,09	185	190	200
Nájezd	$R_a$	1,12	1,24	1,36	1,12	1,23	1,16
	$R_z$	6,47	6,28	7,15	6,94	7,34	6,32
	$R_{max}$	8,73	7,13	7,6	7,73	8,2	6,64
Výjezd	$R_a$	1,24	1,33	1,44	1,19	1,17	1,17
	$R_z$	6,81	6,7	6,93	7,06	7,31	6,36
	$R_{max}$	7,25	7,02	7,22	7,44	7,79	7,2

Obr.č.4.5-1 – Naměřené hodnoty charakteristik drsností  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$

Zajímavé je zjištění, že na výjezdu z drážky nabývají charakteristiky  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  většinou menších hodnot. Tento jev je možné vysvětlit ustálením procesu obrábění v rámci přejezdu nástroje. U sestav typu **B** se hodnota charakteristik  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  většinou zvětšuje s vyšším posuvem, naopak s vyšší řeznou rychlostí jsou tyto charakteristiky menší. U sestav typu **G** se hodnota charakteristik  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  přímo úměrně zvětšuje s vyšším posuvem, naopak s vyšší řeznou rychlostí jsou tyto charakteristiky stále přibližně na stejné úrovni. To platí i pro sestavu **Y**.

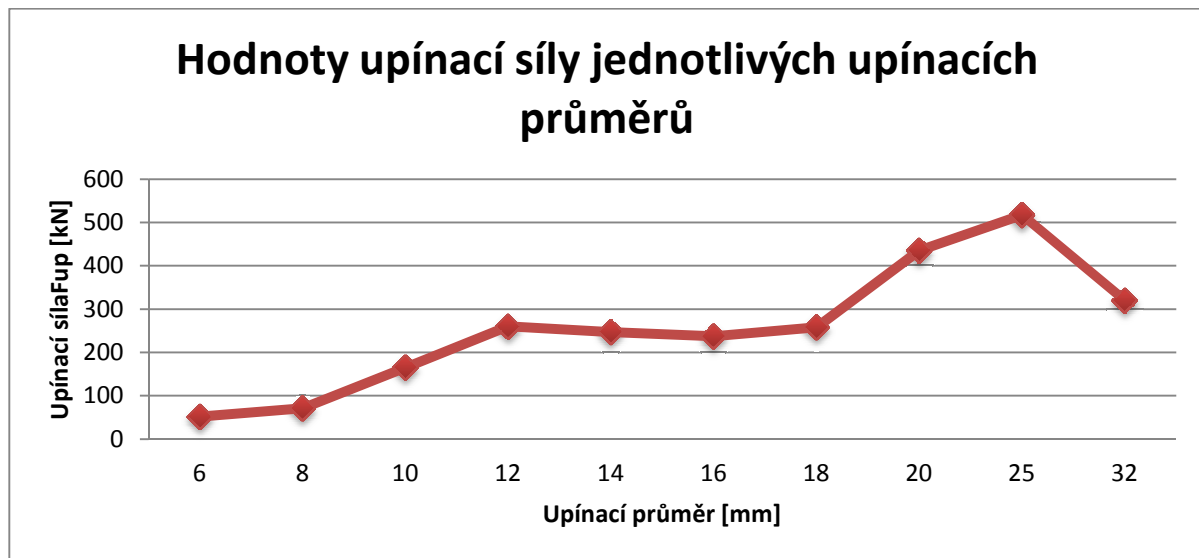
## 5 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Tepelná upínací pouzdra jsou po ekonomické stránce vhodná především pro výrobní procesy, kde je požadován velký úběr materiálu za jednotku času, při současném dodržení požadované kvality obrobeného povrchu, bez nutnosti použití dokončovacích metod. Hlavní využití tohoto systému upínání v kombinaci s moderními metodami obrábění není jenom v obrábění hliníkových a neželezných materiálů, ale i v obrábění typických a exotických materiálů používaných v automobilovém, leteckém a zdravotnickém průmyslu. Během obrábění takovýchto materiálů je nežádoucím jevem pootočení nebo vytáhnutí nástroje z dutiny upínače, což vede k poškození velmi drahých polotovarů a nedodržení stanovené geometrie a kvality obrobeného povrchu. Zamezení tohoto jevu je tak velmi důležité.

Aby se zamezilo vytahování nástroje z dutiny upínacího pouzdra během obrábění, je důležité zajistit: dokonalé vyvážení sestavy upínače s nástrojem, co největší přesnost upnutí, vyvození co největší upínací síly, minimalizování silového zatížení a možného rozvoje vibrací. Všechny tyto aspekty splňuje tepelný systém upínání, ale i některé typy mechanického upínání. Např. upínací systém Weldon, u kterého je zajištěna maximální síla upnutí pomocí upínacích šroubů, avšak s větší házivostí upnutého nástroje a s nepřesným upnutím. Aspekty způsobující vytahování nástroje razantně snižují trvanlivost břitů rezného nástroje, zvláště u výkonných metod obrábění. Jestliže jsou splněny všechny zmiňované požadavky na systém upnutí, je dosaženo vynikajících výsledků obrábění a problém vytahování nástroje je zcela eliminován. Významný rozdíl při podchycení veškerých požadavků je potom v přesnosti a kvalitě obrobeného povrchu, minimalizaci vzniku vibrací (na obrobené ploše nejsou žádné stopky po chvění nástroje) a delší trvanlivosti břitů rezného nástroje.

Z provedených experimentů je zřejmé, že velikosti přesahů (upínací síly) u dané sestavy ve spojení s proměnnými hodnotami rezné rychlosti a posuvu, mají specifický vliv na velikost výsledného silového zatížení soustavy nástroje s upínačem. Přestože je pravděpodobnost výskytu sestavy (nejmenší průměr nástroje a největší průměr dutiny pouzdra) velmi malá, je potřeba se tímto faktorem dále zabývat. A to i přesto, že je výrobní tolerance obou zmiňovaných prvků pouhých 5 mikrometrů. Cestou k řešení této problematiky, jak již i konkurence pochopila, není zpřísňování výrobních tolerancí dutiny upínacího pouzdra nebo stopky nástroje, ale určité inovativní řešení, které bude mít za následek zamezení nežádoucího vytahování nástroje. Inovativní řešení nemusí být pouze ve smyslu úpravy samotného upínače, ale i v úpravě nástroje (nestejněměrné stoupání šroubovice, nestejněměrná rozteč zubů, počet zubů, apod.) Ovšem vydání se tou či onou cestou s sebou přináší mnohá úskalí: vysoké náklady na vývoj a výzkum, časovou náročnost, problematiku konkurenčního boje (patenty, průmyslové vzory), apod. Možným méně nákladným řešením může být cesta optimalizace rezného procesu pro dané rozměrové řady (upínač - nástroj) při použití v konkrétních aplikacích (problematické aplikace stanovené na základě zkušeností zákazníků s daným systémem upnutí). Tím je myšleno, například zaměřit se na takové obráběné materiály (hůře obrobitelné materiály) a upínací průměry, u nichž je vyšší pravděpodobnost výskytu vytahování nástroje. Jak odhalila analýza výpočtu vyvozené upínací síly (viz. *obr.5-1*), jedná se především o větší průměry nástrojů (12, 14, 16, 18 mm),

kde je pokles upínací síly způsoben menším plošným tlakem (menší „masa“ materiálu upínače působící na stopku nástroje v porovnání s upínacím průměrem nástroje). Nástroj, který může být zatížen i větším silovým zatížením je tak dokonce upnut s menší upínací silou. Vzniká zde potom prostor pro nestabilitu řezného procesu v podobě rozvoje vibrací a následnému vytahování nástroje z dutiny upínače.



Obr.č.5-1 – Velikost upínací síly jednotlivých upínacích průměrů

Systém tepelného upínání je spjat s poměrně vysokou počáteční investicí. K upnutí a odepnutí nástroje je zapotřebí speciální upínací a odepínací zařízení, kde je nutné důkladné proškolení obsluhujícího personálu. Nákup tohoto zařízení, včetně proškolení obsluhujícího personálu, tvoří největší část počáteční investice. Životnost tepelných upínacích pouzder se pohybuje kolem 5000 upnutí a odepnutí, takže investice spojené s obnovou stavu upínacích pouzder je ve srovnání s investicí na upínací a odepínací zařízení mizivá. V celkovém srovnání všech systémů upínání je tedy systém tepelného upínání o něco náročnější na počáteční investici. Tato investice se však velmi rychle vrátí v podobě úspor, především z hlediska: nákladů vynaložených na geometrickou přesnost a stavu obrobeného povrchu výrobku, časové náročnosti výrobního procesu nebo trvanlivosti řezných nástrojů.

## 6 ZÁVĚR

Zadání této diplomové práce bylo iniciováno společností GÜHRING, která se velmi intenzivně zabývá výrobou a vývojem tepelných upínacích pouzder. V souvislosti s výrobou a následným používáním tohoto systému upínání došlo v posledních letech k několika negativním ohlasům od zákazníků, že tento systém upínání plně nenaplnil jejich náročné požadavky. Obecně se řeší problém tzv. vývrtkovitého vytahování nástroje z dutiny upínače, který provází tento systém upínání u náročnějších obráběcích aplikací. Tento jev způsobují silné vibrace ve spojení s vysokými axiálními silami a krouticím momentem. Konkurence v tomto směru upínání již podnikla jisté kroky a svá tepelná pouzdra vylepšila o konstrukční prvky, které by tomuto nežádoucímu jevu měly zabránit (např. inovace společnosti HAIMER, kde je vytahování nástroje z dutiny pouzdra zamezeno pomocí tvarových prvků v dutině pouzdra a drážek vybroušených na stopce nástroje). Společnost GÜHRING pochopitelně v tomto ohledu nechce dále zaostávat a snaží se taktéž inovovat svá tepelná upínací pouzdra, popřípadě provést taková inovativní řešení, která by nežádoucímu jevu vytahování nástroje zamezila. Nejdříve je však nutno zmapovat všechny vlivy ovlivňující stabilitu řezného procesu z hlediska upnutí nástroje. To je úkolem řešení této diplomové práce, která mapuje zmiňované vlivy u nástrojů menších průměrů, konkrétně nástroje o průměru 10 mm.

Hlavním přínosem této DP je zmapování a určení významu faktorů, které ovlivňují upnutí nástroje o průměru 10 mm v tepelném upínacím pouzdře a určení přibližné hranice, kdy je daný řezný proces nestabilní a tudíž i neekonomický. Při experimentálním studiu zkoumání stability řezného procesu pro daný průměr nástroje se potvrdil z větší části předpoklad, že rozdíly ve výrobních tolerancích jednotlivých sestav nástroje s upínacím pouzdem mají vliv na velikost silového zatížení a velikost jednotlivých složek řezných sil. Působí tak významným způsobem na stabilitu řezného procesu. Velikost řezných sil ve spojitosti s danou výrobní tolerancí také úzce souvisí se vznikem a rozvojem vibrací, které mají v konečném důsledku velký podíl na vytahování nástroje z dutiny upínacího pouzdra. Tuto domněnku potvrzuje i vyhodnocení naměřených řezných sil. Během experimentu se ovšem při žádných zvolených řezných podmínkách nepodařilo vyvolat výrazně nestabilní proces (následovala destrukce nástroje – viz. pre-experiment), tak aby došlo ke zmiňovanému vývrtkovitému vytahování nástroje z dutiny upínače. Po každém přejezdu byla sestava nástroje s upínačem proměřena pomocí digitálního výškoměru. Toto zjištění vede k závěru, že nástroje o průměru 10 mm a nižších průměrů, nepodléhají vlivem nestability řezného procesu vývrtkovitému vytahování nástroje z dutiny upínacího pouzdra. Zdá se tedy, že problém vytahování je spojen pouze s nástroji větších průměrů.

Z komplexního pohledu na vyhodnocené silové zatížení soustavy nástroje s upínačem lze však říci, že vliv v rozdílných přesazích daných sestav na celkové silové zatížení není tak markantní, jak by se dalo z počátku očekávat. Otázkou tedy je: jak se tyto rozdílnosti projeví při excitaci chvění ve spojení s vyšším silovým zatížením? Tuto otázku lze v tuto chvíli zodpovědět jen velmi obtížně, a proto je velice důležité zaměřit se při dalším zkoumání stability řezného procesu z hlediska upnutí nástroje v tepelném upínací na detekci vzniklého chvění a porovnat jej se silovým zatížením jednotlivých sestav. Z výsledků provedeného

experimentu plynou tedy dále závěry a doporučení, na které by měl být brán ohled při dalším plánování obdobných experimentů.

V následujících experimentech je důležité zaměřit se na zkoumání stability řezného procesu z hlediska upnutí nástroje na upínací pouzdra větších průměrů a na rozvoj vibrací vznikajících důsledkem menší tuhosti u sestav s nižší upínací silou. Z hlediska vlivu posuvu a řezné rychlosti na velikost řezných sil je dále doporučeno provést doplňující experimenty s více úrovněmi těchto proměnných (požadováno minimálně 5 úrovní) a také lépe volit rozdíly mezi hodnotami proměnné řezné rychlosti tak, aby byly zřetelnější vlivy jednotlivých typů sestav (velikosti přesahů) na silovém zatížení. Rozdíly mezi úrovněmi proměnné posuvů byly v tomto ohledu zvoleny dostatečně. Doplňující experimenty by se dále, na základě rozboru v technicko-ekonomickém zhodnocení, měly zabývat konkrétnější aplikací systému tepelného upínání. Bylo by zajímavé v tomto ohledu volit hůře obrobitelný materiál i za cenu následného většího vlivu opotřebení nástroje na naměřená data. Pro další experimenty je nutno detailněji zmapovat topografii stopky nástroje a dutiny pouzdra (odhalit případnou kuželovitost nebo soudečkovitost těchto prvků). Případně by bylo vhodné vyzkoušet větší škálu použitých nástrojů. Při provedeném experimentu byl použit nástroj s nestejným stoupáním šroubovice, což zmenšuje dopad chvění na celkovou stabilitu řezného procesu. Možná proto se nepodařilo nasimulovat takové podmínky, aby došlo k samotnému vytažení nástroje z dutiny upínacího pouzdra.

Závěrem lze říci, že v budoucnosti bude stále velice důležité zabývat se i nadále stabilitou upnutí při daném obráběcím procesu, neboť nároky na kvalitní a bezpečné upnutí nástroje se budou dále zvyšovat s rostoucími nároky (v podobě vyšších řezných rychlostí, vyšších úběrů materiálů, apod.) kladených na řezné nástroje (popř. na výkon obráběcích strojů).

## Seznam použité literatury:

- [1] VIGNER, Miloslav, Zdeněk PŘIKRYL a kolektiv. *Obrábění*. Praha: SNTL, 1984. Typové číslo: L13-E1-V-41/22658.
- [2] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [3] VANĚRKA, Oldřich. *Hodnocení řezných sil při frézování*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. ZČU v Plzni. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
- [4] MACHALOVÁ, Veronika. *Řezné síly při frézování vláknově vyztužených kompozitů*. Brno, 2008. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [5] HOFMANN, Petr. *Studijní podklady z předmětu KTO/TO*. Plzeň, 2010.
- [6] ZEMENE, Petr. *Moderní trendy v oblasti upínací techniky rotačních nástrojů pro HSM aplikace*. Plzeň, 2010. Bakalářská práce. ZČU v Plzni. Vedoucí práce Ing. Lukáš Skopeček.
- [7] Webové stránky Gühring s.r.o. *Gühring* [online]. 2011 [cit. 2012-01-24]. Dostupné z: [www.guehring.cz](http://www.guehring.cz)
- [8] Webové stránky Gühring o.H.G. *Gühring* [online]. 2011 [cit. 2012-01-24]. Dostupné z: [www.guehring.com](http://www.guehring.com)
- [9] SKOPEČEK, Lukáš, Zdeňek JANDA, Jan ŘEHOŘ a Tomáš SKOPEČEK. *Vliv HSC frézování na stabilitu řezného procesu z hlediska silového zatížení a chvění nástroje: Konference: Strojírenská technologie-Plzeň 2006*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2006.
- [10] SOVA, František. *Technologie obrábění a montáže*. 3. vydání. Plzeň: ZČU v Plzni, 2001. ISBN 80-7082-823-4.
- [11] ŘASA, Jaroslav a kolektiv. *Výpočetní metody v konstrukci řezných nástrojů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986. Typové číslo: L13-B3-IV-41f/22788.
- [12] [http://markagro.cz/eshop/start.html?page=shop.product\\_details&flypage=flypage\\_ask.tpl&product\\_id=429&category\\_id=108](http://markagro.cz/eshop/start.html?page=shop.product_details&flypage=flypage_ask.tpl&product_id=429&category_id=108)
- [13] <http://www.bow.cz/produkt/3352050-klestiny-oz25-7-25mm-7-ks-klestinovy-upinac-mk3-m12/>
- [14] HUŇKA, Radek. *Rešerše nástrojových upínacích rozhraní frézovacích strojů*. Brno, 2010. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Jan Pavlík.
- [15] VACÍN, Petr. *Analýza vlivů působících na přesnost držáku při tepelném upínání*. Plzeň, 2003. Diplomová práce. ZČU v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Česánek Ph.D.

- [16] KOVAŘÍK, Jakub. *Vyvažování rotačních nástrojů*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. ZČU v Plzni. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
- [17] GÜHRING O.H.G. *Katalog: GM 300 – HSK-/SK-werkzeugaufnahmen, HSK-Spanner und zubehör · ausgabe*. Albstadt, 2010. Dostupné z: <http://www.guehring.de/service/werbemittel/data/GM300%20DE.pdf>
- [18] SERVUS, Tomáš. *Trendy vývoje upínání řezných nástrojů*. Brno, 2009. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.
- [19] [http://www.kemmlershop.olcommerce.de/index.php/language/en/cat/c14\\_Zubehoer.html/cPath/14](http://www.kemmlershop.olcommerce.de/index.php/language/en/cat/c14_Zubehoer.html/cPath/14)
- [20] <http://www.ebay.com/itm/GUHRING-SHRINK-FIT-HOLDER-CHUCK-HSK100-GM300-11522381-/320606925046>
- [21] <http://www.tepelneupinani.cz/technika.php>
- [22] *HAIMER - Tool balancing machine TD* [online]. 2010 [cit. 2012-03-06]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/haimer/tool-balancing-machines-11597-549951.html>
- [23] *Katalog HAIMER: Innovations for HSC/HPC cutting* [online]. 2009 [cit. 2012-03-08]. Dostupné z: [http://www.haimer-usa.com/pdf/2009\\_HSC-HPC-Broschuere\\_DE-GB.pdf](http://www.haimer-usa.com/pdf/2009_HSC-HPC-Broschuere_DE-GB.pdf)
- [24] *Haimer Gmbh - Press: Power Shrink Chucks: A Shrink Chuck for All Applications* [online]. 7.2007 [cit. 2012-03-08]. Dostupné z: [http://www.haimer-usa.com/usa/pres\\_uebers.php](http://www.haimer-usa.com/usa/pres_uebers.php)
- [25] *Veletrh EMO Hannover: Fotogalerie KTO FST ZČU*. Plzeň: KTO FST ZČU, 2011.
- [26] GÜHRING O.H.G. *Katalog: Thermo Secure Gold 3000*. Albstadt, 2010.
- [27] PŘIKRYL, Zdeněk a Rosa MUSÍLKOVÁ. *Teorie obrábění*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1982. Typové číslo: L13-C3-II-41/28818.
- [28] FULEMOVÁ, Jaroslava, JANDA, Zdeněk a ŘEHOŘ, Jan. Vliv vyložení nástroje na řezné síly a jakost obrobeného povrchu při frézování austenitické oceli. In: *Strojírenská technologie Plzeň 2011: sborník IV. ročníku mezinárodní konference*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2011. [6] s. ISBN 978-80-7043-934-0.
- [29] RABASOVÁ, Marie. *Studium vlivu upnutí rotačního nástroje na řezný proces a výslednou jakost obrobeného povrchu*. Plzeň, 2008/2009. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta strojní. Vedoucí práce Jan Řehoř.
- [30] ŘEHOŘ, Jan. *Studijní podklady z předmětu KTO/EMO*. Plzeň, 2011.



- [31] ČERMÁK, Adam. *Metodika měření opotřebenění nástrojů pomocí mikroskopu Multichack PC 500*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta strojní. Vedoucí práce Miroslav Zetek.
- [32] WIZOVSKÁ, Lucie. *Chvění při obrábění - principy vzniku, způsoby detekce*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta strojní. Vedoucí práce Lukáš Skopeček.
- [33] FOJTŮ, P. Problematika samobuzeného kmitání při obrábění. *Sborník konference: Konference studentské tvůrčí činnosti - STČ 2009*, 2009, s. 1-15.
- [34] JUKL, Ondřej. *Hledání optimálního úhlu příčného vyklonění kulové frézy při vlečení z hlediska stability řezného procesu*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta strojní. Vedoucí práce Jiří Vyšata.
- [35] Webové stránky: Technické normy ČSN. *Materiálové listy* [online]. 2012 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://www.technicke-normy-csn.cz/technicke-normy/hutnictvi-materialove-listy-oceli-41>
- [36] SKOPEČEK, Lukáš. *Vibrace frézy při tvrdém frézování progresivní řeznou keramikou v režimu HSC*. Plzeň, 2007. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta strojní. Vedoucí práce Jan Řehoř.

# **PŘÍLOHY K DIPLOMOVÉ PRÁCI**

Vliv frézování na stabilitu upnutí nástroje v tepelném upínači

Autor: **Bc. Petr ZEMENE**

## **SEZNAM PŘÍLOH:**

- PŘÍLOHA P1 ..... Charakteristika obráběcího stroje MCV 750 A.
- PŘÍLOHA P2: .... Charakteristika řezného nástroje *RATIO 100 U-Standard*.
- PŘÍLOHA P3: .... Výkres tepelného upínacího pouzdra *SF-10 ISO SK 40*.
- PŘÍLOHA P4: .... Charakteristika obrobku + výkres.
- PŘÍLOHA P5: .... Zařízení pro měření řezných sil.
- PŘÍLOHA P6: .... Optický mikroskop *MULTICHECK PC500*.
- PŘÍLOHA P7: .... Zařízení pro měření drsnosti povrchu.
- PŘÍLOHA P8: .... Řezné podmínky pro jednotlivé přejezdy.
- PŘÍLOHA P9: .... Technické prostředí experimentu.
- PŘÍLOHA P10: ... Výstupy z *MKP – SIEMENS NX 8.0*.
- PŘÍLOHA P11: ... Program frézování (řídící systém Heidenhain).
- PŘÍLOHA P12: ... Teorie frézování

## Obsah příloh:

PŘÍLOHA P1: Charakteristika obráběcího stroje MCV 750 A .....	III
PŘÍLOHA P2: Charakteristika řezného nástroje <i>RATIO 100 U-Standard</i> .....	IV
PŘÍLOHA P3: Výkres tepelného upínacího pouzdra <i>SF-10 ISO SK 40</i> .....	V
PŘÍLOHA P4: Charakteristika obrobku + výkres .....	VI
PŘÍLOHA P5: Zařízení pro měření řezných sil .....	VII
PŘÍLOHA P6: Optický mikroskop <i>MULTICHECK PC500</i> .....	IX
PŘÍLOHA P7: Zařízení pro měření drsnosti povrchu .....	X
PŘÍLOHA P8: Řezné podmínky pro jednotlivé přejezdy .....	XI
PŘÍLOHA P9: Technické prostředí experimentu .....	XII
PŘÍLOHA P10: Výstupy z <i>MKP – SIEMENS NX 8.0</i> .....	XIII
PŘÍLOHA P11: Program frézování (řídící systém Heidenhain) .....	XV
PŘÍLOHA P12: Teorie frézování .....	XVI
P12.1 Základní způsoby frézování .....	XVI
P12.1.1 Nesousledné frézování .....	XVII
P12.1.2 Sousledné frézování .....	XVII
P12.2 Mechanismus tvoření třísky .....	XVIII
P12.3 Průřez třísky při frézování .....	XIX
P12.4 Řezné síly při frézování .....	XX
P12.5 Nástroje pro frézování .....	XXI
P12.5.1 Rozdělení frézovacích nástrojů .....	XXI
P12.5.2 Geometrie a mikrogeometrie nástrojů pro frézování .....	XXII

## PŘÍLOHA P1: Charakteristika obráběcího stroje MCV 750 A

### Základní technické parametry stroje:

<b>Druh:</b>	vertikální obráběcí centrum
<b>Typ:</b>	MCV 750 A
<b>Počet CNC řízených os:</b>	3
<b>Jmenovitý výkon vřetena:</b>	16 kW
<b>Rozsah otáček vřetena:</b>	20 – 13000 min <sup>-1</sup>
<b>Změna otáček:</b>	plynulá
<b>Zdvih v ose X, Y, Z:</b>	750, 500, 500 mm
<b>Rozměry upínacího stolu:</b>	1000x500 mm
<b>Pracovní posuvy X, Y, Z:</b>	1-15 m.min <sup>-1</sup>
<b>Rychloposuvy X, Y, Z:</b>	25 m.min <sup>-1</sup>
<b>Řídicí systém:</b>	Heidenhain TNC 426



Obr.č.P1-1 – Vertikální obráběcí centrum MCV 750 A [3]

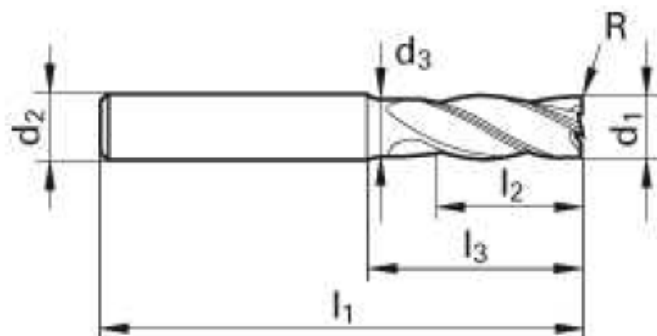
## PŘÍLOHA P2: Charakteristika řezného nástroje *RATIO 100 U-Standard*

Zpracováno s pomocí [7], [8]. Fréza RATIO 100 U – Standard s nestejným stoupáním šroubovice a s břitem přes střed byla vyvinuta firmou GÜHRING především proti vzniku chvění a zamezení tzv. vývrtkovitého vytažování nástroje z dutiny upínacího pouzdra během procesu obrábění. Nestejněměrné stoupání šroubovice přináší ještě další výhody:

- až o 60% vyšší posuvy
- delší životnost a chod bez vibrací
- vhodné pro hrubování i obrábění na čisto
- lepší kvalita obrobeneho povrchu

### Základní technické parametry o nástroji:

Norma:	DIN 6527 L	Směr řezu:	pravý
Řezný materiál:	monol. SK	Vnitřní chlazení:	žádné
Použití:	Univerzální a vysokopevnostní oceli, litiny	Průměr a tolerance nástroje $\varnothing d_1$ [mm]:	10 (h10)
Tvar stopky:	HA	Průměr a tolerance stopky $\varnothing d_2$ [mm]:	10 (h6)
Povrchová úprava:	TiAlN/TiN	Řezná délka $l_3$ [mm]:	22
Sklon šroubovice:	35°/38°	Délka $l_1$ [mm]:	72
Počet zubů:	4	Radius $R$ [mm]:	0,5

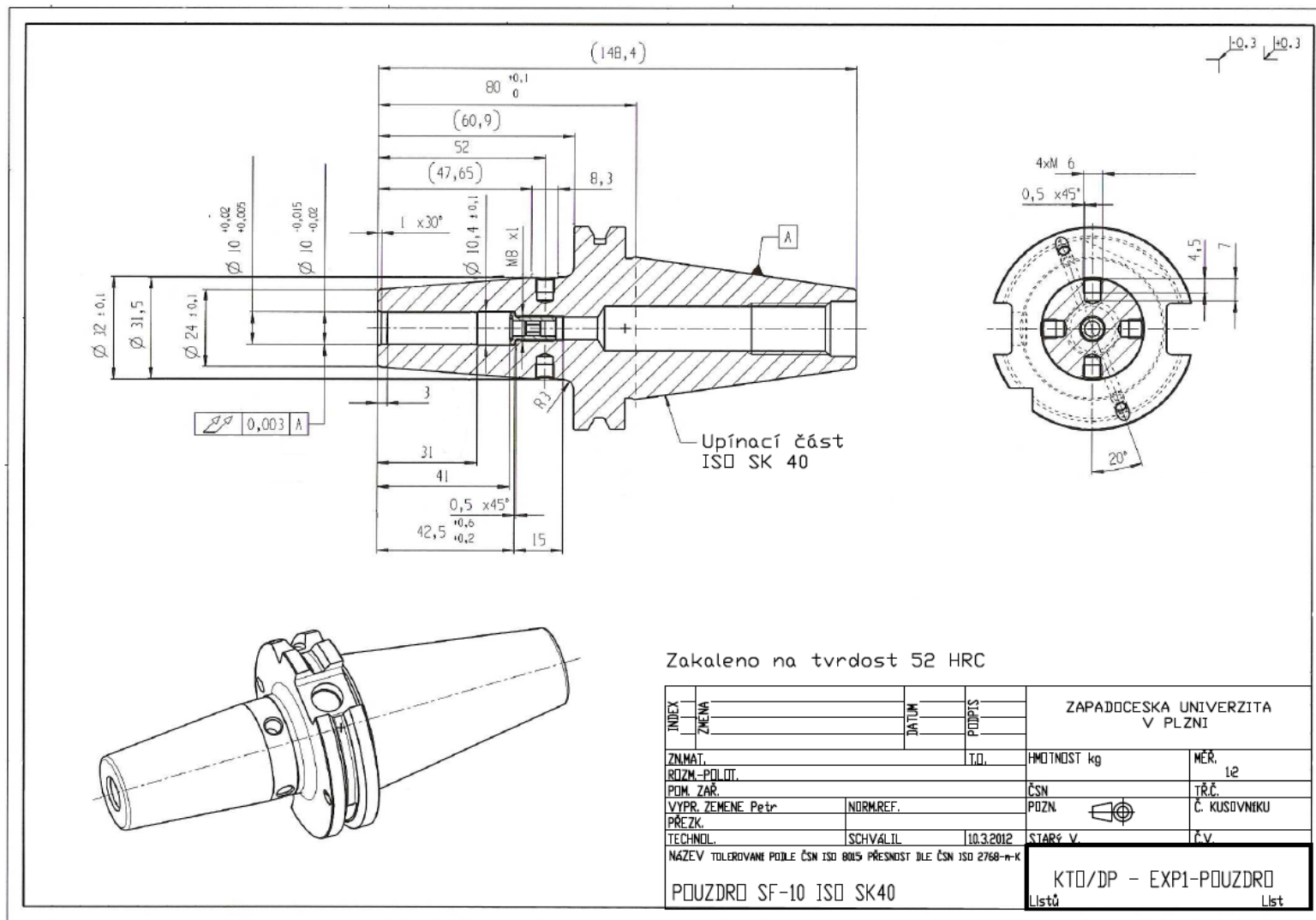


Obr.č.P2-1 – Základní rozměry řezného nástroje [8]

### Doporučené řezné podmínky vzhledem k obráběnému materiálu:

Obráběný materiál:	12 050 (1.0503, C45)	Řezná rychlost $v_c$ [m/min]:	171 (+/- 15%)
Pevnost obr. materiálu:	700 N/mm <sup>2</sup>	Posuv $f_z$ [mm/zub]:	0,0561
Frézovaná hloubka $a_p$ [mm]:	10	Otáčky $n$ [1/min]:	5443
Frézovaná hloubka $a_e$ [mm]:	10	Posuvová rychlost $v_f$ [mm/min]:	1220

**PŘÍLOHA P3: Výkres tepelného upínacího pouzdra SF-10 ISO SK 40**



Obr.č.P3-1 – Výrobní výkres tepelného upínacího pouzdra SF-10 ISO SK 40



## PŘÍLOHA P5: Zařízení pro měření řezných sil

### DYNAMOMETR KISTLER 9225 Asp

<b><u>Technická data:</u></b>	<b>Rozsah ve směru X:</b>	-20 až 20 kN
	<b>Rozsah ve směru Y:</b>	-20 až 20 kN
	<b>Rozsah ve směru Z:</b>	-10 až 40 kN
	<b>Dovolené provozní teploty:</b>	0 až 70 °C
	<b>Vlastní frekvence:</b>	3 kHz
	<b>Chyba měření:</b>	1%
	<b>Citlivost:</b>	8 pC/N
	<b>Spojovací kabel se zesilovačem:</b>	1687A5



Obr.č.P5-1 – Dynamometr KISTLER 9225 Asp (s upnutým zkušním obrobkem)

### ZESILOVAČ KISTLER 5007

Zesilovač mění elektrický náboj vycházející z dynamometru pomocí speciálního kabelu na elektrické napětí úměrné velikosti náboje. Elektrické napětí je pak podle potřeby zesilováno. Pro experiment byl nastaven zesilovač pro složky řezných sil  $F_x : F_y : F_z$  na hodnoty 200 : 1000 : 500 [N/V].

<b><u>Technická data:</u></b>	<b>Měřicí rozsah:</b>	10 až 500 000 pC
	<b>Citlivost:</b>	0,1 až 11 000 pC/N
	<b>Přesnost pro nejcitlivější rozsah:</b>	3%
	<b>Přesnost pro ostatní rozsahy:</b>	1%





Obr.č.P5-2 – Zesilovač KISTLER 5007 s dálkovým ovládním

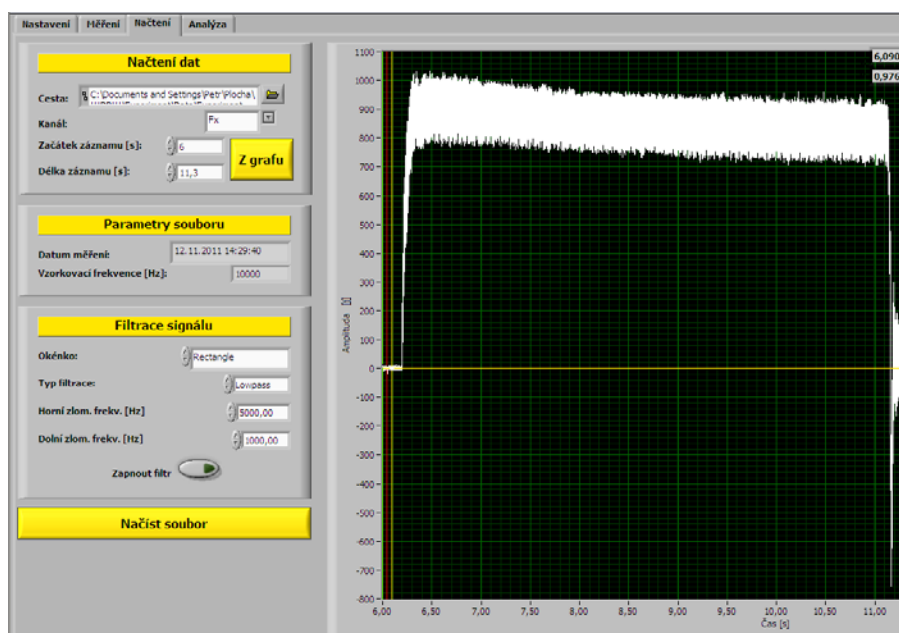
### SBĚRNÁ KARTA DAQCARD-60262E

Pomocí sběrnice se připojují vstupní/výstupní veličiny k vlastní sběrné kartě DAQCard 60262E (fy. National Instruments), která slouží k digitalizaci signálu a je umístěna v PCMCIA slotu laboratorního PC.

<b>Technická data:</b>	<b>Počet vstupů:</b>	16
	<b>Počet výstupů:</b>	2
	<b>Vzorkovací frekvence:</b>	500 kHz

### SOFTWARE PRO ZÁZNAM A ZPRACOVÁNÍ DAT LABVIEW 8.2

Pro naměření a zpracování dat byl použit software LabView 8.2, jenž snímá velikost řezných sil v závislosti na čase  $F=f(t)$ . Vstupní informací je signál ze sběrné karty.



Obr.č.P5-3 – Prostředí softwaru pro záznam a zpracování dat - LabView 8.2

## PŘÍLOHA P6: Optický mikroskop *MULTICHECK PC500*

### Technická data: Optický mikroskop

#### Horizontální provedení

**Možnosti měření:**

- opotřebení rotačních i nerotačních nástrojů
- vzdálenosti (např. velikost opotřebení bříty)
- úhlů

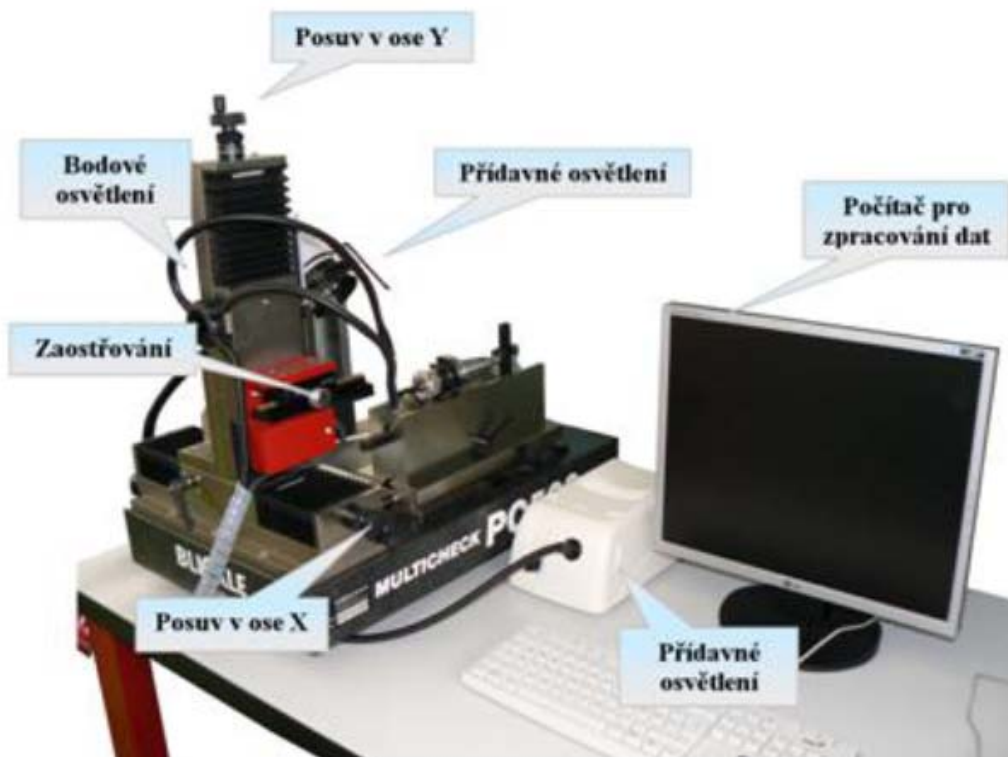
#### Možnost nastavení nástroje pod úhlem

**Přesnost:** 0,001  $\mu\text{m}$

**Rozsah v ose X i Y:** 0 – 150 mm

**Vybavení:**

- software WMS
- vyměnitelné objektivy se zvětšením 10x, 30x, 75x a 150x



Obr.č.P6-1 – Optický mikroskop *MULTICHECK PC 500* [3]

## PŘÍLOHA P7: Zařízení pro měření drsnosti povrchu

Zařízení HOMMEL-ETAMIC T8000 RC je flexibilním řešením pro měření geometrických tvarů, drsnosti a vlnitosti povrchu vyráběných součástí. Toto zařízení má stavebnicový design, který umožňuje vzájemné propojení různých posuvových jednotek, typů snímačů, sloupů a granitových desek.

### Technická data:

Typ přístroje		T8000 Contour				
<b>Snímač</b>	<b>Maximální zdvih v ose Z (mm)</b>	<b>Rozlišení v ose Z (μm)</b>	<b>Standardní délka raménka (mm)</b>	<b>Typ sondy</b>		
Wavecontour inductive	20	0,68	230	indukční cívka		
Wavecontour digital	60	0,05	230	lineární měřítko		
Wavecontour Surfscan	6	0,006	75	vysoce přesný, indukční systém s 20 bitovým A/D převodníkem		
<b>Posuvový přístroj</b>	<b>Maximální dráha / mm</b>	<b>Posuvová rychlost mm/s</b>	<b>Přesnost vedení</b>	<b>Měřicí systém</b>	<b>Rozlišení</b>	<b>Přesnost osy X</b>
Waveline 60	60	0,01-3,00	≤0,2 μm/60 mm	Lineární pravítko	0,01/0,1 μm	±1,0 μm
Waveline 120	120	0,01-3,00	≤0,4 μm/120 mm	Lineární pravítko	0,01/0,1 μm	±1,0 μm
Waveline 200	200	0,01-3,00	≤0,8 μm/200 mm	Lineární pravítko	0,01/0,1 μm	±1,0 μm
<b>Měřicí sloup</b>	<b>Výškový posuv mm</b>	<b>Traverse Speed mm/s</b>				
Wavelift 400	400	0,1-12,0				
Wavelift 800	800	0,1-12,0				
<b>Naklápací jednotka</b>	<b>Rozsah přestavení</b>	<b>Jemné stavění</b>		<b>Opakovatelnost</b>		
S jemným stavěním	±45,0°	±5,0°		-		
S hrubým stavěním	±45,0°	-		-		
S motorickým stavěním	±45,0°	-		0,005°		
<b>Granitové desky</b>	<b>Rozměry D x Š x V (mm)</b>			<b>Hmotnost (Kg)</b>		
630	630 x 500 x 100			93		
780	780 x 500 x 100			117		
1000	1000 x 500 x 140			150		
<b>Contour vyhodnocení</b>		Bod, bod na profilu, úhel, rádius, vzdálenost, přímky, přímký na profilu, porovnání, vyrovnání a otočení profilu, import-export DXF, SPC statistika				



Obr.č.P7-1 – Zařízení HOMMEL-ETAMIC T8000 RC

## PŘÍLOHA P8: Řezné podmínky pro jednotlivé přejezdy

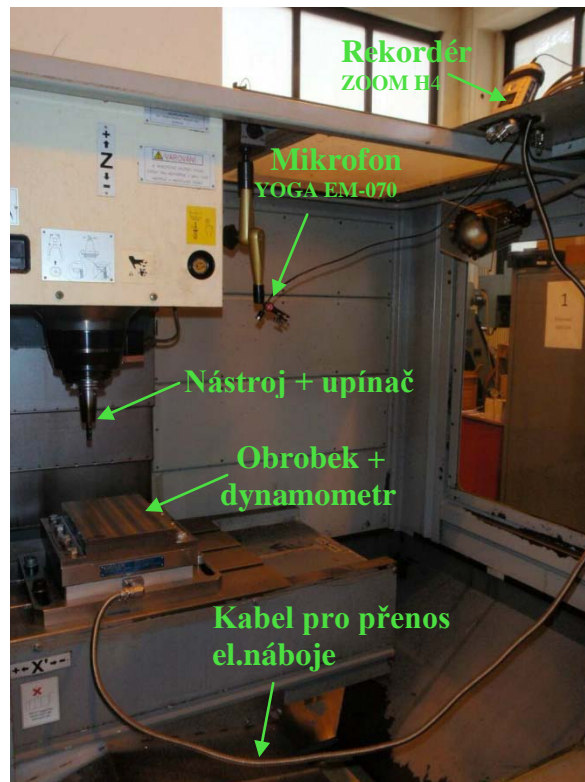
	Sestava	Číslo přejezdu na obrobku	Přejezd nástroje č.	Řezná rychlost $v_c$ [m/min]	Posuv $f_z$ [mm/zub]	Posuvová rychlost $v_f$ [mm/min]	Otáčky $n$ [ot/min]
PRE-EXPERIMENT	Y62	1	1	170	0,07	1515	5411
	Y62	2	2	180	0,075	1719	5730
	Y62	3	3	180	0,09	2063	5730
	Y62	4	4 (destrukce)	185	0,15	3533	5899
EXPERIMENT I.	G21	5	1	180	0,07	1515	5730
	B13	6	1	180	0,07	1515	5730
	Y44	7	1	180	0,07	1515	5730
	B35	8	1	180	0,07	1515	5730
	G21	9	2	180	0,08	1834	5730
	B13	10	2	180	0,08	1834	5730
	Y44	11	2	180	0,08	1834	5730
	B35	12	2	180	0,08	1834	5730
	G21	13	3	180	0,09	2063	5730
	B13	14	3	180	0,09	2063	5730
	Y44	15	3	180	0,09	2063	5730
	B35	16	3	180	0,09	2063	5730
	G52	17	1	180	0,07	1515	5730
	G52	18	2	180	0,08	1834	5730
	G52	19	3	180	0,09	2063	5730
EXPERIMENT II.	G21	20	4	185	0,07	1649	5899
	G52	21	4	185	0,07	1649	5899
	B13	22	4	185	0,07	1649	5899
	Y44	23	4	185	0,07	1649	5899
	B35	24	4	185	0,07	1649	5899
	G21	25	5	190	0,07	1693	6048
	G52	26	5	190	0,07	1693	6048
	B13	27	5	190	0,07	1693	6048
	Y44	28	5	190	0,07	1693	6048
	B35	29	5	190	0,07	1693	6048
	G21	30	6	200	0,07	1783	6366
	G52	31	6	200	0,07	1783	6366
	B13	32	6	200	0,07	1783	6366
	Y44	33	6	200	0,07	1783	6366
	B35	34	6	200	0,07	1783	6366

Obr.č.P8-1 – Přehled řezných podmínek pro jednotlivé přejezdy

## PŘÍLOHA P9: Technické prostředí experimentu



Obr.č.P9-1 – Laboratorní vybavení (zařízení pro měření řezných sil)

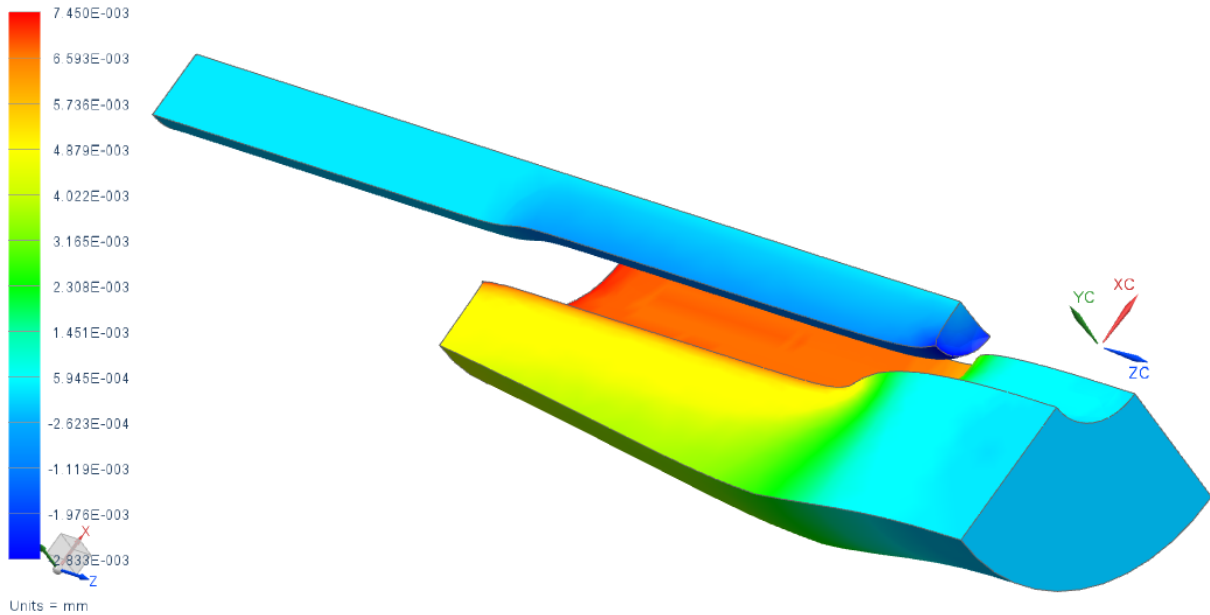


Obr.č.P9-2 – Laboratorní vybavení (prostor obráběcího stroje)



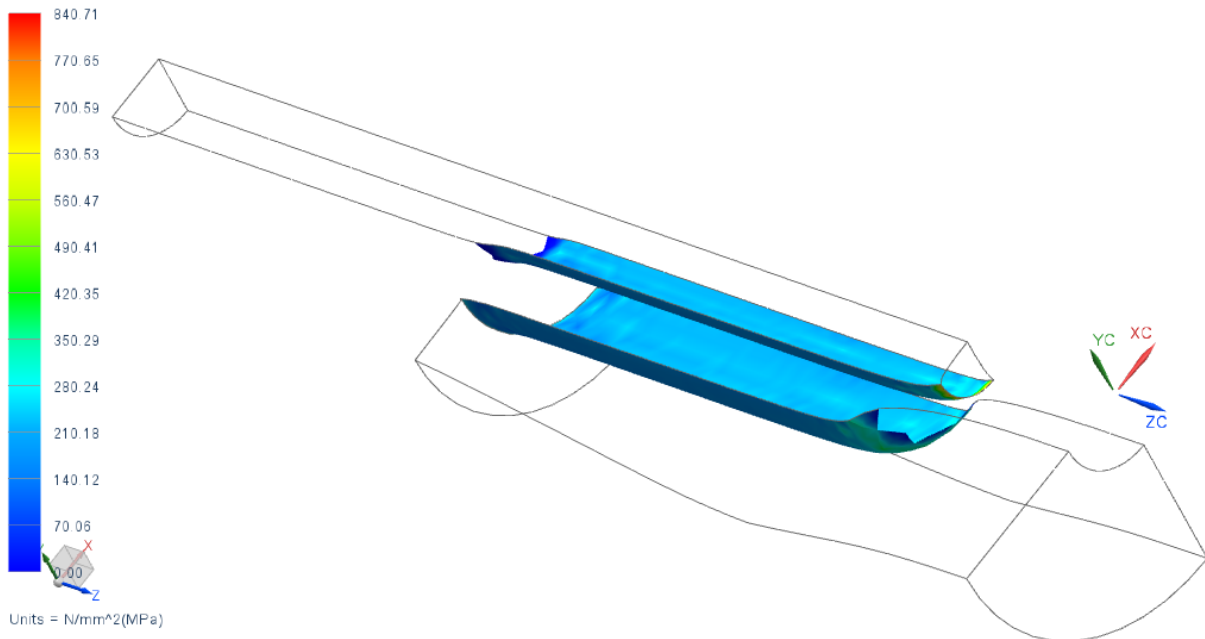
## PŘÍLOHA P10: Výstupy z MKP – SIEMENS NX 8.0

Zemenak\_2\_sim1 : přesah 0,008 Result  
Subcase - Loads, Constraints 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, R  
Min : -2.833E-003, Max : 7.450E-003, Units = mm  
Coord sys : Absolute Cylindrical  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



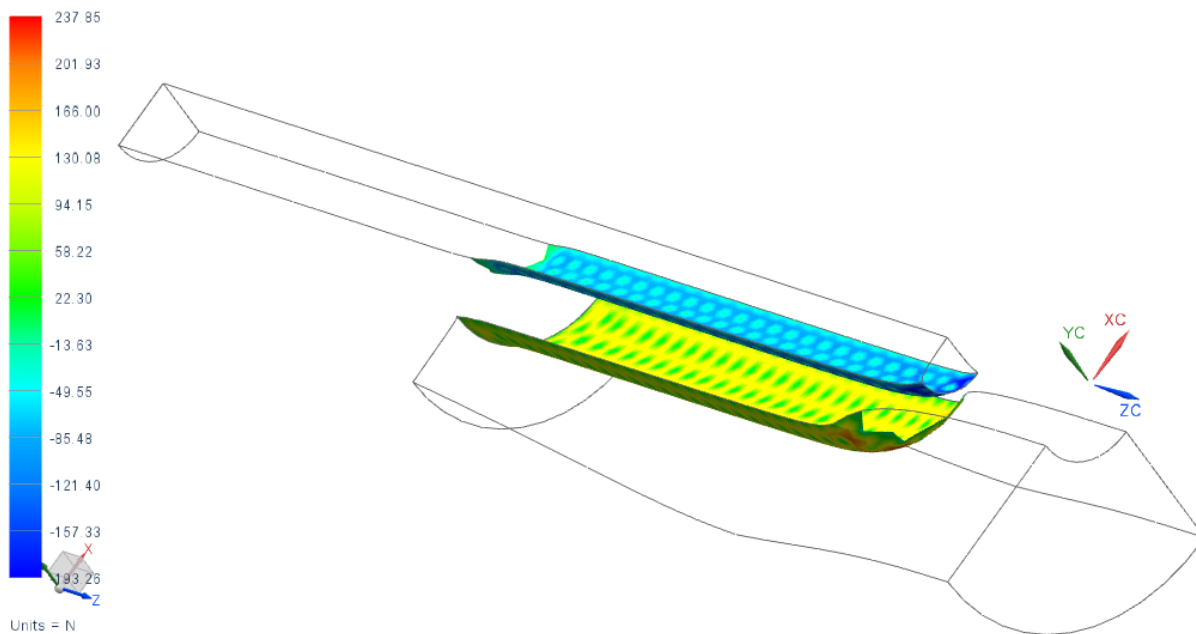
Obr.č.P10-1 –MKP– deformace soustavy nástroje s upínacím pouzdrem pro přesah 0,008 mm

Zemenak\_2\_sim1 : přesah 0,008 Result  
Subcase - Loads, Constraints 1, Static Step 1  
Contact Pressure - Nodal, Scalar  
Min : 0.00, Max : 840.71, Units = N/mm<sup>2</sup>(MPa)  
Coord sys : Absolute Cylindrical  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



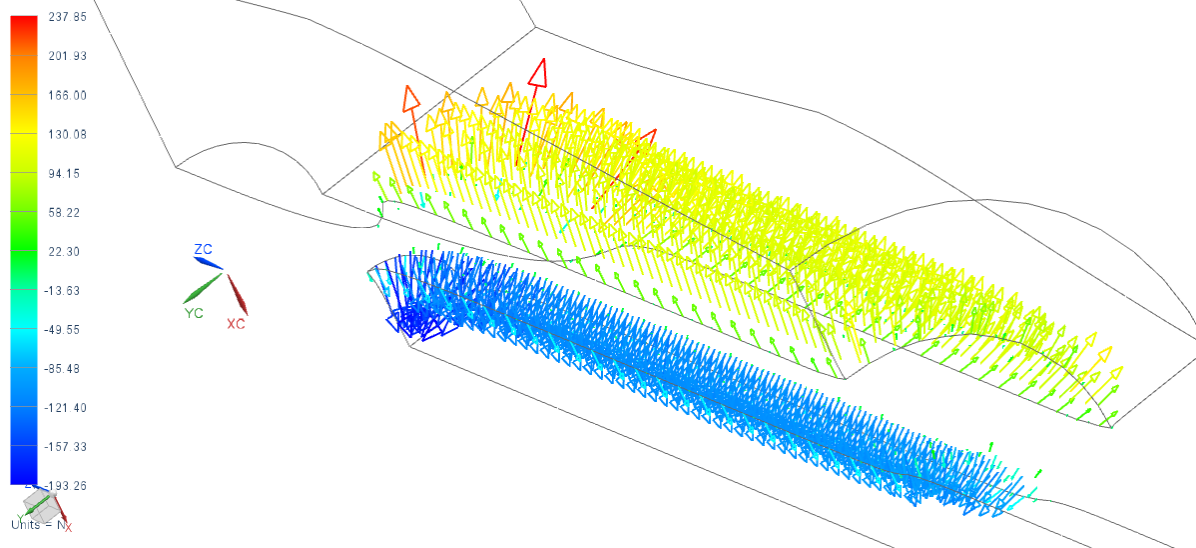
Obr.č.P10-2 – MKP – plošný tlak mezi nástrojem a upínacím pouzdrem pro přesah 0,008 mm

Zemenak\_2\_sim1 : přesah 0,008 Result  
Subcase - Loads, Constraints 1, Static Step 1  
Contact Force - Nodal, R  
Min : -193.26, Max : 237.85, Units = N  
Coord sys : Absolute Cylindrical  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obr.č.P10-3 – MKP – silové poměry mezi nástrojem a upínacím pouzdrem pro přesah 0,008

Zemenak\_2\_sim1 : přesah 0,008 Result  
Subcase - Loads, Constraints 1, Static Step 1  
Contact Force - Nodal, R  
Min : -193.26, Max : 237.85, Units = N  
Coord sys : Absolute Cylindrical  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obr.č.P10-4 – MKP – silové poměry mezi nástrojem a upínacím pouzdrem pro přesah 0,008  
(vektory)

## **PŘÍLOHA P11: Program frézování (řídící systém Heidenhain)**

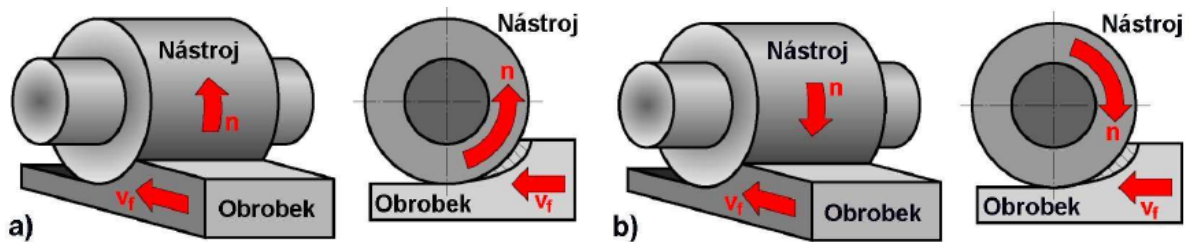
```
0 BEGIN PGM ZEMENE MM
1 Q98 = 25 ; NASTROJ
2 Q100 = 34 * 13 - 13 * 20 ; DRAHA
3 Q99 = 6366 ; S
4 Q12 = 1783 * 2 / 3 ; F
5 ; SOURADNICE:0-13-26-39-52-65-78-91-104-117-130-143-156
6 BLK FORM 0.1 Z X+0 Y+0 Z-40
7 BLK FORM 0.2 X+170 Y+260 Z+0
8 ;
9 ; PETR ZEMENE A SPOL.
10 ;
11 ; POSOUVEJ NA RADKU 28 NA UDANE SOURADNICE
12 ;
13 TOOL CALL Q98 Z SQ99 DL+0
14 CALL LBL 10
15 CYCL DEF 14.0 OBRYS
16 CYCL DEF 14.1 LBL OBRYSU 1
17 CYCL DEF 25.0 LINIE OBRYSU ~
    Q1=-10 ;HLOUBKA FREZOVANI ~
    Q3=+0 ;PRIDAVEK PRO STRANU ~
    Q5=+0 ;SOURADNICE POVRCHU ~
    Q7=+10 ;BEZPECNA VYSKA ~
    Q10=+10 ;HLOUBKA PRISUVU ~
    Q11=20000 ;POSUV NA HLOUBKU ~
    Q12=Q12 ;FREZOVACI POSUV ~
    Q15=+1 ;ZPUSOB FREZOVANI
18 L Z+10 R0 F MAX M3
19 STOP
20 CYCL CALL M3
21 L Z+150 R0 F MAX M5 M9
22 L X-15 R0 F MAX
23 STOP M2
24 LBL 1
25 L X-15 Y+3 RL
26 L X+185
27 LBL 0
28 ; SOURADNICE:0-13-26-39-52-65-78-91-104-117-130-143-156
29 LBL 10
30 CYCL DEF 7.0 NULOVY BOD
31 CYCL DEF 7.1 Y+Q100
32 LBL 0
33 END PGM ZEMENE MM
```



## PŘÍLOHA P12: Teorie frézování

### P12.1 Základní způsoby frézování

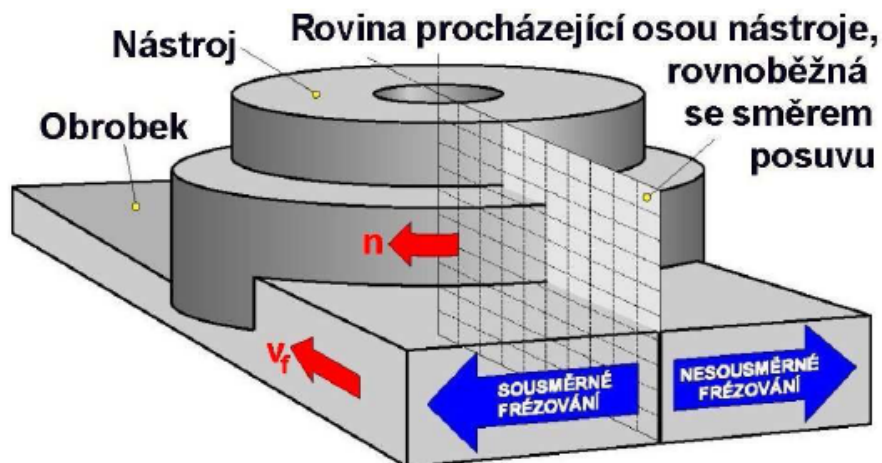
Podle způsobu záběru frézovacího nástroje do materiálu obrobku rozeznáváme základní dva druhy frézování. Jedná se o tzv. *frézování válcové* (obr.č.P12.1-1) a *frézování čelní* (obr.č.P12.1-2), které jsou základem pro vytváření dalších způsobů (např. *okružní* a *planetové* frézování). Při technologii frézování dochází k úběru materiálu při dané hloubce řezu  $a_p$  relativním posuvem zubů frézy vzhledem k obrobku, přičemž posuv na jeden zub je  $f_z$ .



Obr.č.P12.1-1 – Válcové frézování: a) nesousledné, b) sousledné [4]

Válcové frézování se uplatňuje převážně při práci s válcovými a tvarovými frézami. Zuby frézy jsou vytvořeny pouze po obvodu nástroje, hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu frézy a směr posuvu. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. V závislosti na kinematice obráběcího procesu se rozliší frézování *nesousledné* (nesousměrné) a *sousledné* (sousměrné).

Čelní frézování se uplatňuje při práci s čelními frézami, kdy jsou břity vytvořeny na obvodu i čele nástroje. V závislosti na poměru šířky frézované plochy k průměru frézy a také s ohledem na polohu osy frézy vzhledem k frézované ploše může být frézování symetrické (osa nástroje prochází středem frézované plochy) nebo nesymetrické (osa nástroje je mimo střed frézované plochy). U čelního frézování pracuje fréza současně sousledně i nesousledně (viz.obr.č.P12.1-2).



### *Obr.č.P12.1-2 – Čelní frézování [4]*

#### ***P12.1.1 Nesousledné frézování***

Zpracováno s pomocí [1], [2], [3]. Při nesousledném frézování je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. K oddělování třísky nedochází v okamžiku její nulové tloušťky, ale po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem. Přitom vznikají silové účinky a deformace způsobující zvýšené opotřebení břitu. Před samotným vstupem zubu frézy do materiálu dochází ke tření povrchu nástroje a povrchu obrobku, struktura povrchu je tak tvářena a to má za následek mechanické zpevnění obrobeného povrchu. Následující obrobení takovéto vrstvy může být potom značně problematické, hlavně u těžkoobrobitelných materiálů, které se vyznačují velkým zpevněním povrchové vrstvy. Řezná síla při nesousledném frézování má složku, která působí směrem nahoru a odtahuje obrobek od stolu. Je zde tedy nutnost zajistit dostatečnou upínací sílu (viz. obr.č.P12.1.1-1).

#### Výhody nesousledného frézování

- Trvanlivost nástroje nezávisí na stavu povrchu obrobku (okujích, písčitém povrchu, apod.).
- Není zapotřebí vymezování vůle mezi posuvovým šroubem a maticí stolu stroje.
- Menší opotřebení pohybového šroubu a matice.
- Záběr zubů frézy při jejich vnikání do obrobku nezávisí na hloubce řezu  $a_p$ .

#### ***P12.1.2 Sousedné frézování***

Zpracováno s pomocí [1], [2], [3]. Při sousledném frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka třísky vzniká při vnikání zubu frézy do obrobku. Obrobená plocha se vytváří, když zub vychází ze záběru. Řezné síly působí obvykle směrem dolů. Největší ráz vzniká při prvotním zařiznutí břitu nástroje do materiálu, kdy hodnota řezné síly prudce poskočí z nulové hodnoty na maximální a následně se ustálí. Při záběru frézy vznikají rázy, je tedy nutné zajistit dostatečnou tuhost celé soustavy S-U-N-O. Pro větší stabilitu procesu řezání se používají nástroje se šikmými zuby, případně zuby ve šroubovici, tak aby bylo v záběru v jednom okamžiku více zubů. Sousedné frézování může probíhat pouze na přizpůsobeném stroji při vymezené vůli, a předpětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézky. V opačném případě způsobuje vůle nestejný posuv, při němž může dojít k poškození nástroje, popř. i stroje (viz. obr.č.P2.1.2-1).

#### Výhody sousledného frézování

- Vyšší trvanlivost břitů, což umožňuje použití vyšších řezných parametrů (rychlostí a posuvů).
- Menší nároky na obráběcí stroj – nižší potřebný řezný výkon.
- Výsledná řezná síla přitlačuje obrobek ke stolu – upínací síly nemusí být tak vysoké jako u nesousledného frézování (lze použít i jednodušších upínacích přípravků).
- Větší stabilita soustavy S-U-N-O má za následek menší sklon ke chvění.



stудuje v oblasti kořene třísky, která je charakterizována primární, sekundární a terciální plastickou deformací. Velikost primární plastické deformace (oblast OMNO') závisí na fyzikálních vlastnostech materiálu, zejména pak na jeho deformační a zpevňovací schopnosti. Dále závisí také na velikosti síly  $F$ , velikosti úhlu čela a na řezném prostředí.

Při vnikání řezného nástroje do materiálu obrobku je břit tlačěn silou  $F$ . Před břitem a pod břitem se koncentruje napětí, které má za následek pružné a plastické deformace. Smyková napětí rostou do té míry, než dojde k plastické deformaci před břitem (posuv vrstev v kluzných rovinách). Pohyb nástroje pokračuje, roste plastická deformace a dochází k přechování a posuvu vrstev materiálu. Zde končí plastická deformace. Při dalším pohybu nástroje roste napětí v materiálu, až dosáhne vyšší hodnoty, než je mez stříhu obráběného materiálu a dojde k oddělení segmentu třísky [3], [5].

### P12.3 Průřez třísky při frézování

Zpracováno s pomocí [2], [4]. Tloušťka odřezávané vrstvy  $h_i$  se při válcovém nesousledném frézování mění od nulové do maximální hodnoty a od maximální hodnoty do nuly při frézování sousledném. Jmenovitá tloušťka třísky  $h_i$  v libovolné fázi jejího odřezávání se vyjádří vztahem (viz. obr. č. P12.3-1):

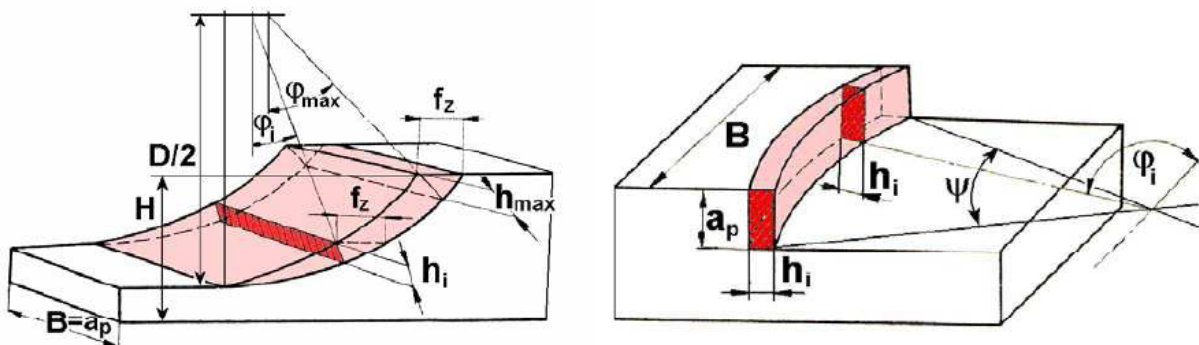
$$h_i = f_z \sin \varphi_i \quad , \quad \text{kde } f_z \text{ – posuv na zub, } \varphi_i \text{ – úhel posuvového pohybu}$$

Úhel posuvového pohybu  $\varphi_i$  se mění nejen v závislosti na poloze řešeného zubu, ale u fréz se šikmými zuby nebo zuby ve šroubovici, také podél příslušného ostří. Uvedené výpočty jsou proto z hlediska rozsahu uvedeny pro válcovou frézu s přímými zuby. Jmenovitá tloušťka třísky se potom vyjádří:

— — — — —

Jmenovitý průřez třísky  $A_{Di}$  nabývá hodnotu:

Šířka záběru ostří  $a_p$  je pro válcovou frézu s přímými zuby rovna šířce frézované plochy. Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky je:



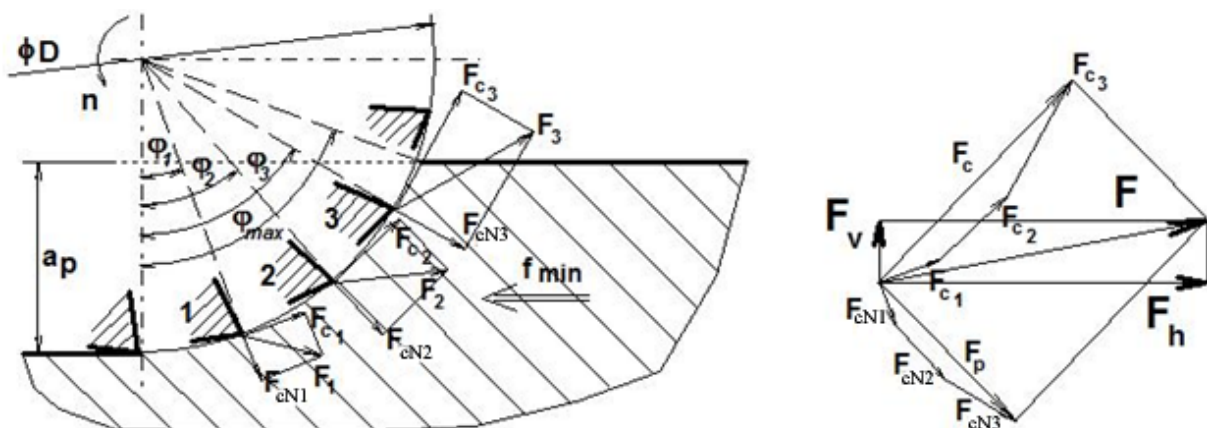
Obr.č.P12.3-1– Průřez třísky při  
válcovém frézování [4]

Obr.č.P12.3-2– Průřez třísky při  
čelním frézování [4]

U čelního frézování je postup výpočtu podobný, ale je třeba brát v úvahu navíc ještě úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  (obr.č.P12.3-2).

#### P12.4 Řezné síly při frézování

Řešení silového zatížení nástroje je jednou z hlavních problematik při stanovení vhodných parametrů pro frézování. Řezné síly mají totiž výrazný vliv na stabilitu řezných nástrojů a tím i na celý proces obrábění. Z důvodu správného pochopení průběhu řezného procesu a jeho dílčích dějů je nezbytné porozumět řezným silám vznikajícím a působícím během procesu obrábění. Musíme znát jejich velikost, smysl a směr abychom mohli hodnotit a optimalizovat řezný proces z různých hledisek. Jedním z nejvýznamnějších faktorů, působících na velikost řezných sil je řezná rychlost  $v_c$ . Se zvyšující se řeznou rychlostí roste hodnota teploty a tím dochází ke snížení velikosti řezných sil. Tohoto jevu se využívá při moderních metodách obrábění HSC. Se zvyšující se řeznou rychlostí stoupá i rychlost odchodu třísky, což má za následek minimalizaci tepelného přenosu právě mezi odchozí třískou, nástrojem a obrobkem. I přes značný nárůst tepla v místě řezu, se tímto způsobem omezí opotřebení samotného břitu nástroje. Důsledkem poklesu řezných sil, menším opotřebením břitu nástroje a v neposlední řadě také snížením tepelného toku do obrobku stoupá přesnost procesu obrábění. Nižší řezné síly způsobují menší a hlavně stálou výchylku nástroje. Vliv na velikost řezných sil nemá pouze hodnota řezné rychlosti, ale i ostatní parametry jako např.: hloubka řezu  $a_p$  nebo posuvu  $f$ . Řezné síly se zvyšují zároveň se zvyšující hloubkou řezu  $a_p$  a není vůbec podstatné, jestli se jedná o frézování sousledné nebo nesousledné. Vůbec největší vliv na velikost, smysl a orientaci řezných sil má samotný řezný nástroj a jeho navržená geometrie. Řezné síly se zvětšují s přechodem úhlu čela z kladných hodnot do záporných. Je dokonce experimentálně dokázáno, že vyšší úhel stoupání šroubovice zvyšuje hodnoty naměřených řezných sil. Mimo oblast vlivu geometrie nástroje můžeme poukázat i na fakt, že řezné síly se zvětšují se zvětšením tepelné vodivosti nástroje [5], [9].



Obr.č.P12.4-1 – Řezné síly při válcovém nesousledném frézování pro několik zubů  
v současném záběru [5]



V mnoha případech frézování platí, že je najednou v záběru více zubů, proto se výsledné složky řezných sil sčítají z vektorů působících na jednotlivé zuby. Nicméně pro základní specifikaci řezných sil se vyjde ze silových poměrů pouze na jednom břitu, který se nachází v poloze určené úhlem  $\varphi_i$ . Pro válcové frézování nástrojem s přímými zuby se celková řezná síla působící na břitu  $F_i$  rozkládá na složky  $F_{ci}$  (řezná síla) a  $F_{cNi}$  (kolmá řezná síla), resp. na složky  $F_{fi}$  (posuvová síla) a  $F_{fNi}$  (kolmá posuvová síla). Rozklad řezných sil při nesousledném a sousledném frézování je znázorněn na *obr.č.P12.1.1-1* a *obr.č.P12.1.2-1*. Jak již ale bylo řečeno, při frézování je současně v záběru více než jeden zub nástroje. Výsledná síla se tedy určí vektorovým součtem (*obr.č.P12.4-1*) a velikost jejích složek se určí empiricky z experimentálně zjištěných vzorců [5], [9], [2].

### **P12.5 Nástroje pro frézování**

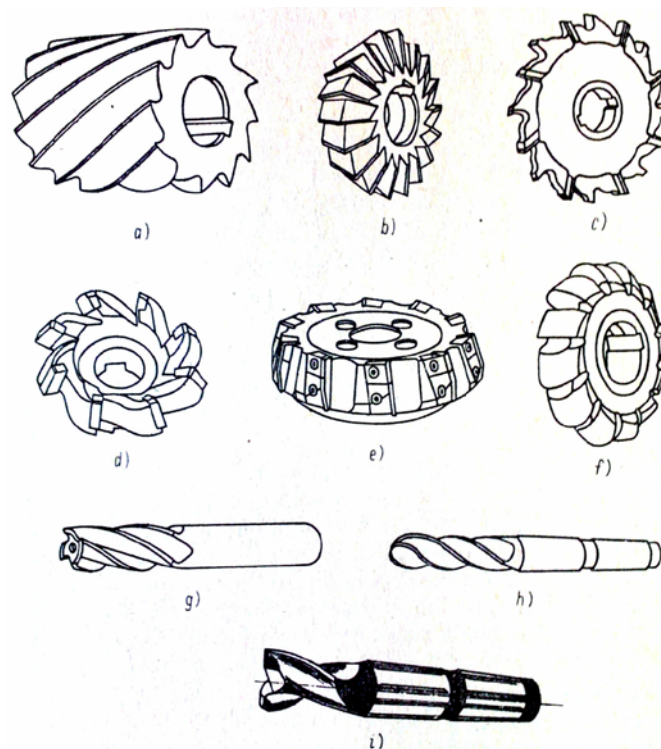
Na světovém trhu je nepřehledné množství jednotlivých typů frézovacích nástrojů. Je tedy prakticky nemožné zmapovat celý tento sortiment a rozdělit ho tak do různých skupin. Stále více dochází k vývoji nových kombinovaných speciálních nástrojů, které firmy používají pro zproduktivnění jejich výroby. Tyto nástroje jsou konstruovány tak, aby mohly provádět více technologických operací najednou. Navíc každý výrobce si svůj vyráběný sortiment rozčleňuje trochu jinak. Nicméně z několika zjednodušených konstrukčních a technologických hledisek lze nástroje přeci jen rozdělit (viz. kapitola P12.5.1.).

#### ***P12.5.1 Rozdělení frézovacích nástrojů***

Zpracováno s pomocí [1], [10]. Frézy jako několikabřité nástroje mají břity uspořádány na válcové, kuželové nebo jiné tvarové ploše. U čelních fréz také na ploše čelní. Vzhledem k mnohostrannému uplatnění technologie frézování se v současné době používá mnoho typů a velikostí fréz. Vyráběné frézy lze rozřadit do jednotlivých skupin z různých hledisek (*obr.č.P12.5.1-1*):

- 1) Podle nástrojového břitu materiálu:
  - rychlořezná ocel
  - slinuté karbidy
  - řezná keramika
  - kubický nitrid bóru
  - systémy povlakovaných vrstev, aj.
- 2) Podle tvaru zubů:
  - frézy se zuby frézovanými
  - frézy se zuby podsoustruženými
- 3) Podle směru zubů:
  - frézy s přímými zuby
  - frézy se zuby ve šroubovici (pravé, levé, střídavé)
- 4) Podle počtu zubů:
  - frézy jemnozrné
  - frézy polohrubozubé
  - frézy hrubozubé
- 5) Podle konstrukčního uspořádání:
  - frézy celistvé (těleso a zuby z jednoho kusu)

- frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami
  - frézy dělené, sdružené, složené
- 6) Z hlediska geometrického tvaru:
- frézy válcové nástrčné nebo se stopkou
  - frézy čelní válcové nástrčné nebo se stopkou
  - frézy kotoučové se zuby přímými nebo ve šroubovici (pravé, levé, střídavé)
  - frézy úhlové jednostranné nebo dvoustranné
  - frézy tvarové
- 7) Z technologického hlediska:
- frézy pro frézování rovinných ploch
  - frézy pro frézování tvarových ploch
- 8) Z hlediska upnutí fréz na stroji:
- frézy nástrčné
  - frézy s válcovou nebo kuželovou stopkou



Obr.č.P12.5.1-1 – Jednotlivé typy fréz [1]:

- a) válcová fréza, b) úhlová fréza, c) kotoučová fréza, d) čelní fréza, e) frézovací hlava s VBD, f) tvarová fréza, g) čelní válcová fréza, h) kopírovací kulová fréza, i) drážkovací fréza

### P12.5.2 Geometrie a mikrogeometrie nástrojů pro frézování

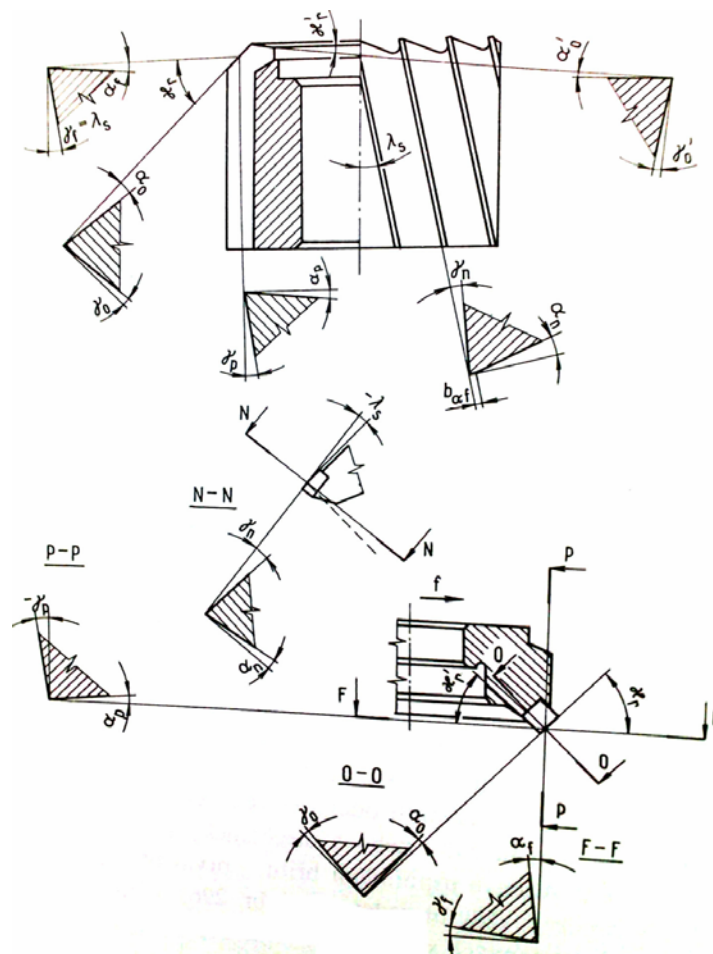
- zpracováno s pomocí [1], [10], [11].

Geometrie a mikrogeometrie řezného nástroje pro frézování je důležitá zejména z hlediska správného utváření třísky, ale také z hlediska orientace vektorů jednotlivých složek řezných sil. Kompletní nástrojová geometrie válcové frézy znázorněna na obr.č.P12.5.2-1. Na řezné síly má geometrie nástroje zcela zásadní vliv. Je tak určeno, jakým způsobem bude

soustava S-U-N-O namáhána. U povlakovaných nástrojů je důležitá také mikrogeometrie břítu, zejména z hlediska lepšího přilnutí deponované vrstvy na nástroj. Mezi tyto úpravy patří např. kartáčování, leštění nebo vlečné omílání.

U fréz vyrobených z rychlořezné oceli se používá geometrie, která se v průběhu používání této technologie víceméně ustálila. U frézovaných zubů se úhel hřbetu  $\alpha$  pohybuje v rozmezí 10 až 20° a úhel čela  $\gamma$  v rozmezí 10 až 30°. Úhel sklonu  $\lambda_s$  u válcových nástrčných fréz bývá 20 až 45°, u válcovýchčelních fréz potom 10 až 30° a u kotoučových fréz 10 až 45°.

U tvarových fréz se zuby podsoustruženými se většinou používá nulový úhel čela  $\gamma_o=0$ , ve výjimečných případech, kdy je to nutné s ohledem na dobré utváření třísek a trvanlivosti nástroje se volí úhel  $\gamma_o=5^\circ$  až  $15^\circ$ .



Obr.č.P12.5.2-1 – Nástrojová geometrie válcové frézy [11]

Použití vyměnitelných břitových destiček u fréz přináší řadu výhod. Geometrie fréz s vyměnitelnými destičkami se v současné době z hlediska polohy vyměnitelné destičky v tělese ustálila do základních tří variant: negativní, pozitivní, pozitivně negativní. Každá z těchto variant používá jiný typ destiček. Upínání těchto destiček do tělesa frézy probíhá různým způsobem pomocí upínacích šroubů. Jejich radiální i axiální poloha může být v tělese pevně dána, nebo lze destičky axiálně stavět. Při použití vyměnitelných břitových destiček je



rovněž důležitý úhel nastavení hlavního a vedlejšího ostří  $\kappa_r$  a  $\kappa_r'$ . Úhel nastavení (mezi ostřím břitové destičky a povrchem obrobku) má vliv na tloušťku třísky, velikosti řezných sil a životnost nástroje. Nejčastěji se používají úhly nastavení nabývajících hodnot  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $10^\circ$ .

