



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIUM ŘEZIVOSTI CELOKARBIDOVÝCH FRÉZ S JEMNOU ZRNITOSTÍ

CUTTING PERFORMANCE OF VERY FINE GRAINED END MILLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ALEŠ UTTENDORFSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student : Bc. Aleš Uttendorfský

kteřý studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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

Studium řezivosti celokarbidových fréz s jemnou zrnitostí

v anglickém jazyce:

Cutting performance of very fine grained end mills

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na velmi moderní směr vývoje řezných nástrojů – celokarbidové frézy s jemnou zrnitostí, vymezení jejich řezivosti a technologických aplikací.

Cíle diplomové práce:

1. Teoretický rozbor technologie.
2. Návrh experimentu.
3. Zpracování experimentálních dat.
4. Diskuze.
5. Závěry pro výrobní praxi.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se skládá ze dvou částí. Teoretická část popisuje slinuté karbidy, jejich vlastnosti a postup výroby nástrojů. Rozebírá problematiku frézování a jeho fyzikální podstatu. Dále se pak zabývá druhy a způsoby opotřebení nástrojů. Cílem experimentální části bylo srovnání řezných vlastností monolitních čelních čtyřbřítých nepovlakovaných krátkých fréz ze slinutého karbidu o různé velikosti zrna ve dvou základních způsobech frézování – sousledném a nesousledném. Z naměřených hodnot byly vyhodnoceny, pomocí analýzy rozkladu sil a jejich transformace, grafy silového zatížení a z nich vyvozeny závěry.

Klíčová slova

karbidy, řezivost, frézování, monolitní frézy, silová analýza

ABSTRACT

This diploma thesis consists of two parts. The theoretical part describes sintered carbides, their properties and manufacturing tools. Some selected problems of milling and its physical nature is discussed also. It also deals with the types and methods of tool wear testing. The aim is to compare the experimental properties of monolithic end milling cutters (short four cutting edges, uncoated carbides) of various grain sizes in two basic ways of milling - down-feed method and up-feed method. The measured values are evaluated by analysis in time series of the cutting forces and power.

Key words

Carbides, cutting forces, milling, solid carbide cutter, force analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

UTTENDORFSKÝ, ALEŠ. *Studium řezivosti celokarbidových fréz s jemnou zrnitostí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 56 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: **Studium řezivosti celokarbidových fréz s jemnou zrnitostí** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 27.5.2010

.....
Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslav Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji všem, kteří mi poskytli důležité podklady pro moji diplomovou práci. V neposlední řadě bych děkuji firmě Pramet Tools, s.r.o., Šumperk, za dodání nástrojů.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1. SLINUTÉ KARBIDY	10
1.1 Historie výroby slinutých karbidů	10
1.2 Slinuté karbidy a jejich výroba	10
1.2.1 Prášková metalurgie	11
1.2.2 Výroba prášků.....	11
1.2.3 Lisování.....	11
1.2.4 Slinování	12
1.2.5 Karbid wolframu.....	12
1.2.6 Členění slinutých karbidů	13
2. FRÉZOVÁNÍ – VYSOKORYCHLOSTNÍ FRÉZOVÁNÍ	14
2.1 Frézování.....	14
2.1.1 Válcové frézování	14
2.1.2 Sousledné frézová.....	15
2.1.3 Nesousledné frézování.....	15
2.1.4 Čelní frézování.....	15
2.2 Vysokorychlostní frézování.....	16
2.2.1 Rozdíly mezi vysokorychlostním a konvenčním obráběním.....	17
2.2.2 Výhody a nevýhody HSC obrábění	20
2.3 Řezné síly při frézování.....	21
2.3.1 Analytické vyjádření	22
2.3.2 Měření řezných sil	23
2.4 Tvorba třísky	25
2.4.1 Matematický model ortogonálního řezání	25
2.4.2 Tepelná bilance řezného procesu.....	26
3. Trvanlivost a opotřebení nástrojů.....	27
3.1. Druhy opotřebení	27
3.2. Projevy a kritéria opotřebení	28
3.3 Trvanlivost nástroje.....	30
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	32
4.1 Cíl práce	32
4.2 Popis testů, metodiky měření a analýzy naměřených hodnot	33
4.2.1 Obráběcí stroj	33
4.2.2 Upnutí řezných nástrojů	33
4.2.2 Měřicí aparatura	34
4.2.3 Obráběný materiál.....	35
4.2.4 Řezné podmínky a jejich určení.....	35
4.2.5 Snímání silového zatížení nástroje a analýzy naměřených hodnot	36
5. Testování čelních fréz.....	40
5.1 Testování nástrojů č. 1,3.....	40
5.2 Testování nástrojů č. 2,4.....	43
5.2 Grafické vyjádření statisticky zpracovaných datových souborů	46

Závěr	49
Seznam použitých zdrojů.....	51
Seznam použitých zkratk a symbolů	54
Seznam příloh.....	57

ÚVOD

S rozvojem nových technologií stoupají nároky na obráběcí nástroje, které mají zkrátit dobu obrábění a tím zefektivnit výrobu. V současnosti, kdy je z pohledu konkurenční výhody velký nátlak na co nejkratší dobu obrábění, dochází k nástupu vysokorychlostního obrábění. To vyžaduje nové druhy materiálů - nitridy, karbidy, řezná keramika a další. Nástroje se často také nechávají povlakovat, aby došlo ke snížení intenzity opotřebení nástroje, zvýšení doby trvanlivosti nástroje a zlepšení technologických parametrů (zvýšení řezné rychlosti, větší hloubka řezu, vyšší rychlost posuvu a v neposlední řadě zlepšení kvality povrchu). Tématem této práce je zkoumat, jak se mění vlastnosti frézovacích řezných nástrojů při různé velikosti zrna.

1. SLINUTÉ KARBIDY

1.1 Historie výroby slinutých karbidů

Poprvé byly objeveny karbidy wolframu W_2C a WC na Farmaceutické škole Pařížské univerzity koncem 19. století s využitím elektrické obloukové pece. Začátkem 20. století začal rozvoj práškové metalurgie, když se podařilo vyrobit wolframové žhavicí vlákno s velikostí zrn řádově několik μm . To vedlo k začátkům výroby nových rezných materiálů na bázi WC . K průkopníkům patří Karl Schröter, který roku 1923 při vývoji materiálů pro průvlaky k tažení drátů zjistil, že smícháním práškového wolframu s uhlíkem a následným ohřevem získá práškový karbid wolframu mikrometrické zrnitosti, a že pokud se takto vyrobený WC smíchá s malým množstvím kovu (kobalt 10% ve formě jemnozrnného prášku) a vylisovaný celek je ohřát nad teplotu $1300\text{ }^\circ C$, ve vodíkové atmosféře dostaneme výrobek, který se vyznačuje vysokou tvrdostí, nízkou pórovitostí a velkou pevností. ⁴

1.2 Slinuté karbidy a jejich výroba

Slinuté karbidy jsou nástrojové materiály vyráběné práškovou metalurgií z karbidů těžkých kovů a nízkotavitelného slinutého kobaltu. Základním karbidem pro výrobu všech slinutých karbidů je karbid wolframu (WC), jako další složky jsou používány karbidy titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a chromu (Cr_3C_2). Množstvím a poměrem složek při výrobě slinutých karbidů lze ovlivňovat jejich tvrdost, houževnatost a odolnost proti otěru. Ve velké míře také vlastnosti slinutých karbidů závisejí na velikosti zrna. Rozměr zrna karbidu wolframu bývá od $0,5$ do $5\mu m$. V současné době se vyrábí slinuté karbidy se zrny menšími než $1\mu m$. Toto vede k vyšší houževnatosti a pevnosti slinutých karbidů. Zjemnění zrna dosahujeme přidáním $0,25$ až 3% objemu tantalu, niobu, vanadu nebo chromu. ^{4,10}

1.2.1 Prášková metalurgie

Prášková metalurgie je věda, která se zabývá výrobou předmětů ze směsí kovových i nekovových prášků. Tyto prášky se lisují a slinují za teploty, která je nižší než teplota tavení. Prášková metalurgie se využívá k výrobě předmětů se speciálními mechanickými a fyzikálními vlastnostmi, které jiným způsobem nejsme schopni vyrobit. Postup výroby při slinování prášků je následující: ⁴

- příprava prášku, lisování a tvarování polotovaru, slinování a konečná úprava.

1.2.2 Výroba prášků

Základní surovinou je směs karbidů kovů a pojiva, kterým je kobalt. Tato část výroby slinutých karbidů ovlivňuje nejvíce vlastnosti budoucího výrobku. Jakost hotových výrobků závisí na chemickém složení, velikosti částic, čistotě směsi, tvaru částic, povrchových vlastnostech a aktivitě. Prášky můžeme získat dvěma základními způsoby: ⁴

a) mechanicky - mletím v kulových a vířivých mlýnech. To se provádí buď za sucha, nebo v kapalném prostředí. V kapalném prostředí je mletí výhodnější. Po skončení mletí je nutné směs dokonale vysušit;

b) fyzikálně-chemicky - redukcí oxidů, štěpením karbonylů, elektrolytickým vylučováním a chemickým slučováním s nekovy.

1.2.3 Lisování

Lisování slouží k upravení kovového prášku do tvaru požadovaného výrobku. Při lisování dochází k plastické deformaci částic a zvětšuje se styková plocha mezi zrny. Lisování je ovlivněno lisovacím tlakem, způsobem lisování, rozměry výlisek a přísadami pro snížení tření tzv. plastifikátory. Lisování může být prováděno mnoha způsoby (lisování za studena, za tepla, izostatické, protlačování, vibrační lisování apod.). Z důvodu smrštění při slinování je nutné vyrobit výlisek rozměrově větší o 20% a více. Velikost rozměrového přesahu je závislá na velikosti tlaku, kterým působíme na výlisek, a na velikosti zrna ⁴ tab.1.1.

Tab.1.1 Lineární smrštění při slinování ⁴

Složení [hm. %]			Zrnitost [μm]	Smrštění [%] pro lisovací tlak [MPa]			
WC	(W,Ti,Ta)C	Co		50	100	150	200
94	---	6	0,8	28,00	26,50	25,50	24,50
94	---	6	1,2	24,50	22,75	22,00	21,00
91	---	9	4,0	23,00	21,00	20,20	19,60
71	20	9	3,0	22,50	21,00	20,40	19,80

1.2.4 Slinování

Slinování je proces, při kterém se dosahuje požadovaných vlastností - pevnosti, tažnosti a tvrdosti. Tento proces probíhá tak, že výrobek je umístěn do slinovací pece, kde je řízeně ohříván a ochlazován v atmosféře H_2 , nebo ve vakuu. Teplota slinování je nižší než teplota tavení daného kovu. Při této teplotě dochází k natavení a karbidy tvrdých kovů se začínají rozpouštět v kobaltu. To, jak slinování probíhá, ovlivňuje především teplota, čas a prostředí. Doba slinování bývá 2 až 3 hodiny ⁴

1.2.5 Karbid wolframu

Karbid wolframu zvyšuje tvrdost, odolnost proti opotřebení a chemickou stálost. Slinuté karbidy tohoto typu tvoří významnou skupinu nástrojových materiálů. Obsah kobaltu bývá mezi 4-12% a velikost zrna je v rozsahu 0,5-10 μm .

Tab.1.2 Velikost slinutých karbidů typu WC-CO ^{1,4}

Co [%]	Rozměr zrna WC [μm]	Tvrdost [HV 30]	Příčná pevnost [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Lomová houževnatost KIC
3	0,7	2020	1000		
	1,4	1820			8
6	0,7	1800	1750		
	1,4	1575	2300	630	10
	0,7	1670	2300		
9	1,4	1420	2400	588	13
	4,0	1210	2770		
15	0,7	1400	2770	558	
	1,4	1160	2600		18

1.2.6 Členění slinutých karbidů

Nepovlakované slinuté karbidy jsou členěny do skupin dle ČSN ISO 513.

Tab.1.3 Členění slinutých karbidů do skupin ¹⁶

Skupina	Barva značení	Složení
K	červená	WC + Co + (TaC.NbC)
P	modrá	WC + TiC + Co + (TaC.NbC)
M	žlutá	WC + TiC + TaC.NbC + Co
N	zelená	---
S	hnědá	---
H	tmavošedá	---

Skupina **K** (jednokarbidové) je určena zejména pro šedé litiny, neželezné slitiny a nekovové materiály, tedy pro obrábění materiálů, které vytvářejí krátkou, drobivou třísku. Je to dáno tím, že u karbidu wolframu, který tvoří jedinou tvrdou složku, klesá tvrdost se vzrůstající teplotou více než u jiných karbidů;

Skupina **P** (dvojkarbidové) je určena pro obrábění uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli, tedy pro materiály, které tvoří dlouhou třísku. Je to dáno tím, že přísada TiC zaručuje odolnost proti difúzi za vysokých teplot, a tím brání opotřebení na čele nástroje;

Skupina **M** (vícekarbidové) je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku, jsou tedy vhodné pro široké spektrum využití. Vzhledem k relativně vysoké houževnatosti se často používá pro těžké hrubovací a přerušované řezy;

Skupina **N** je určena pro obrábění měkkých materiálů jako jsou slitiny hliníku;

Skupina **S** je určena pro obrábění materiálů jako jsou žárovzdorné slitiny;

Skupina **M** je určena pro obrábění tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů. ^{4,16}

2. FRÉZOVÁNÍ – VYSOKORYCHLOSTNÍ FRÉZOVÁNÍ

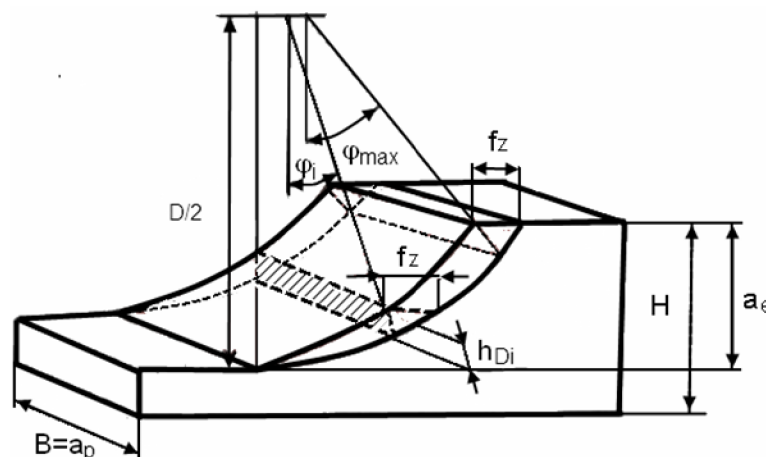
Současný trend ve strojírenství klade stále větší požadavky na tvarovou a rozměrovou přesnost, ale hlavně na co nejvyšší rychlost obrábění a co nejnižší náklady. To vede k vývoji stále dokonalejších a odolnějších nástrojů, které jsou schopny obrábět velkou rychlostí. Úběr materiálu při frézování dnes dosahuje řezných rychlostí v závislosti na typu materiálu až $8000\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$.

2.1 Frézování

Frézování je výrobní metoda strojního obrábění, při které odebíráme materiál zuby vícebřitého nástroje na rovinných i tvarových plochách nerotačních obrobků. Hlavní pohyb rotaci koná fréza, která se otáčí kolem své osy a každý zub této frézy odebírá přerušovaně krátkou třísku po cykloidní dráze. Vedlejší pohyby posuv a hloubka záběru bývají nejčastěji přímočaré, a koná je převážně obrobek. Podle způsobu záběru frézy do materiálu obrobku rozeznáváme tyto druhy frézování: frézování válcové, čelní, čelní rotační, planetové a okružní.

2.1.1 Válcové frézování

Při válcovém frézování dochází k odebírání třísky břity, které jsou uspořádány po obvodě frézy, při posuvu jehož směr je kolmý k ose frézy. Podle směru posuvu obrobku vzhledem k směru otáčení frézy rozeznáváme dva typy frézování a to sousledné a nesousledné.^{5,10,13}



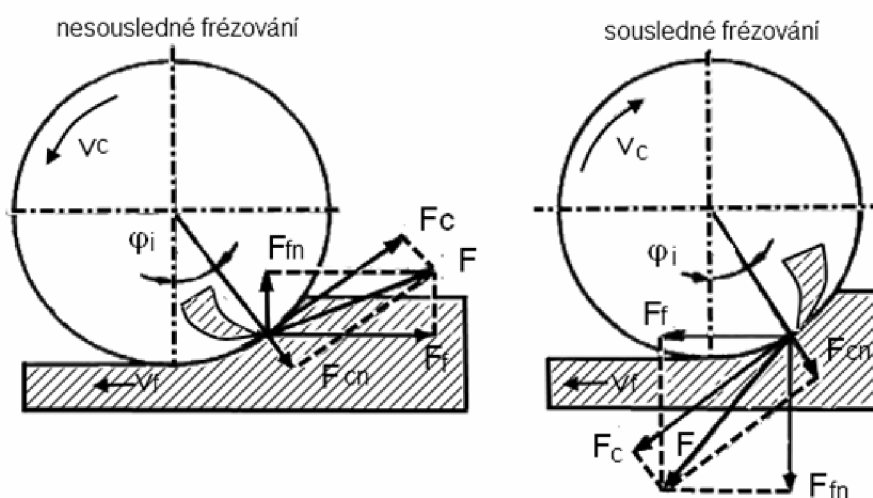
Obr. 2.1 Průřez třísky při válcovém frézování⁵

2.1.2 Sousedné frézování

Při sousledném frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. Při tomto způsobu frézování dochází k úběru třísky od maximální hodnoty průřezu třísky k její minimální hodnotě. Toto má za následek, že výsledná obrobená plocha má lepší povrchové vlastnosti než kterých dosahujeme u nesousledného frézování, avšak dochází k většímu namáhání břítů a je větší riziko jejich ulomení v důsledku vtahování třísek zpět do řezu.⁵

2.1.3 Nesousledné frézování

Při nesousledném frézování je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Při tomto způsobu frézování dochází k úběru třísky od minimální hodnoty průřezu třísky k její maximální hodnotě. Toto má za následek, že břity frézy nejsou sice tolik namáhány, ale výsledná obrobená plocha má horší povrchové vlastnosti než kterých dosahujeme u sousledného frézování.⁵

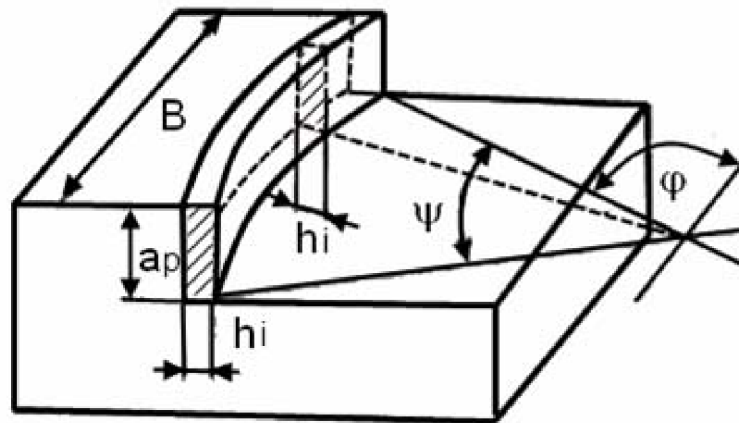
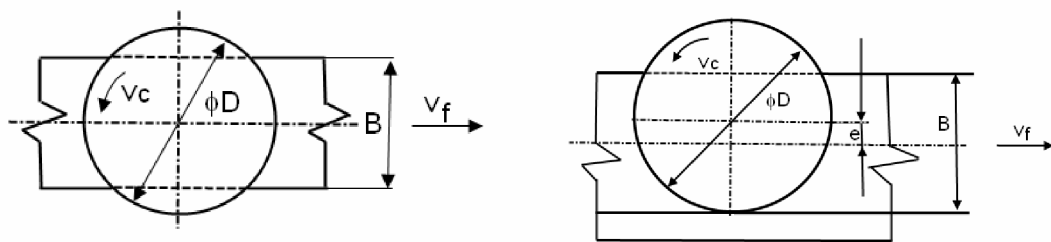


Obr. 2.2 Schéma rozložení složek síly řezání při frézování⁵

2.1.4 Čelní frézování

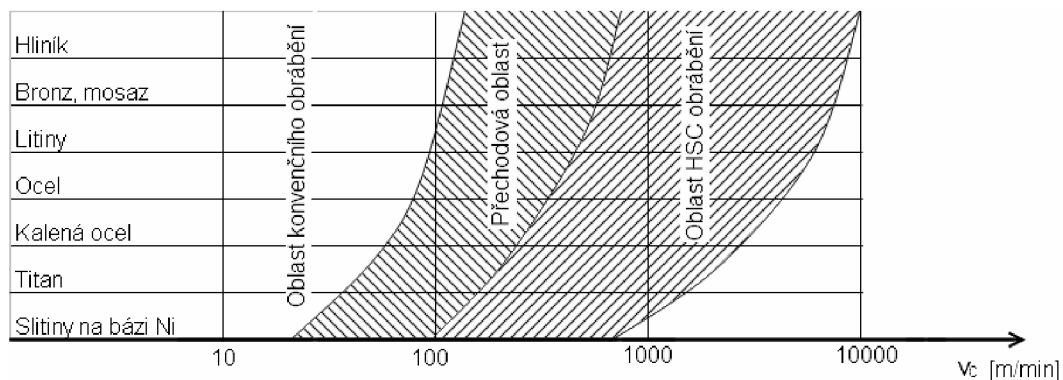
Při čelním frézování nástroj odebrává třísku břity, které jsou umístěny na čele a na obvodu frézy. Podle polohy osy otáčení frézy vzhledem k obrobku dělíme čelní frézování na 2 metody:⁵

- a) symetrické frézování;
- b) nesymetrické frézování.

Obr. 2.3 Průřez třísky při čelním frézování⁵Obr. 2.4 Čelní frézování, a) symetrické, b) nesymetrické⁵

2.2 Vysokorychlostní frézování

Rozvoj vysokorychlostního frézování je umožněn vývojem nových supertvrdých materiálů pro výrobu fréz a jejich povlakování. Nástroje vyrobené z těchto materiálů mají stabilní tvrdost i za velmi vysokých teplot a velkou odolnost proti mechanickému opotřebení. K dalším přednostem patří hlavně obrábění bez nutnosti chlazení a možnost obrábění tvrdých materiálů, jako je kalená ocel a slitiny titanu. Rychlost obrábění je závislá na vlastnostech materiálu, který se má obrábět a na nástroji kterým obrábíme.^{9,10,15,17}

Obr. 2.5 Frézované materiály oblast HSC efektu ¹⁷

2.2.1 Rozdíly mezi vysokorychlostním a konvenčním obráběním

Rozdíly mezi vysokorychlostním a konvenčním obráběním se projevují především při tvorbě třísky. Oddělování třísky je složitý proces, který závisí na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu. Pro vyjádření fyzikálních vlastností obráběného materiálu se zejména v oblasti HSC obrábění používá Johnson-Cookův vztah, který vyjadřuje vztah mezního napětí na mezi kluzu a kritérium redukovaného přetvoření, při kterém dojde k porušení jednotlivých částic materiálu (dojde k lomu): ¹⁵

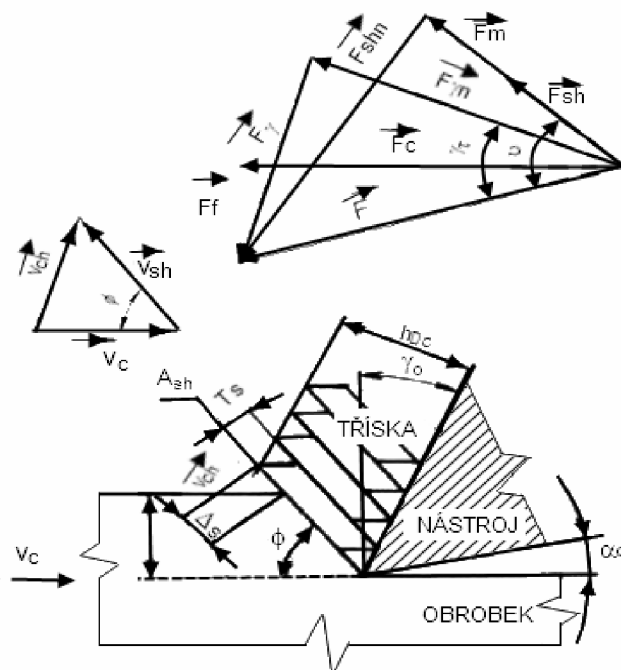
$$\sigma_y = \left[A + B(\bar{\epsilon}^p)^n \right] \cdot \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\bar{\epsilon}}^0} \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right] \quad (2.1)$$

Pro základní vyjádření polohy roviny stříhu se používá Merchantova energetické rovnice, jejíž odvození je založeno na minimální energii pro vytvoření elementu třísky a rovnosti sil ve střížné rovině podle vztahu:

$$F \cdot \cos \nu = \frac{h_D}{\sin \phi} \cdot \tau_{sh} \cdot b_D \quad (2.2)$$

Z čehož vyplývá obecná hodnota síly F.

$$F = \frac{\tau_{sh} \cdot h_D \cdot b_D}{\sin \phi \cdot \cos \nu} = F \cdot \cos \theta \quad (2.3)$$

Obr. 2.6 Model tvorby třísky pro HSC obrábění ¹⁵

Směr roviny maximální hodnoty smykového napětí musí odpovídat vztahu:

$$\phi = 45^\circ - \lambda_t + \gamma_0 \quad (2.4)$$

Síla vyvolaná změnou hybnosti materiálu v rovině maximálních smykových napětí tzv. D'Alembertova dynamická, nestacionární síla F_m :

$$F_m = \rho \cdot (v_c \cdot h_D \cdot b_D) \cdot (v_c \cdot \sin(\phi - \gamma_0) + v_c \cdot \cos \phi) \quad (2.5)$$

Tento vztah upravíme:

$$F_m = \rho \cdot v_c^2 \cdot h_D \cdot b_D \cdot \gamma_0 \cdot \sin \phi \quad (2.6)$$

Resp.

$$F_m = \rho \cdot v_c^2 \cdot h_D \cdot b_D \cdot \frac{\cos \gamma_0}{\cos(\phi - \lambda_0)} \quad (2.7)$$

Hodnoty složek řezné síly v rovině maximálních smykových napětí jsou významné, protože umožňují stanovit smluvní normálové a smykové napětí v této rovině – obr. 2.6.

$$\tau_{sh} = \tau_{xy} = \frac{F_{sh}}{A_{sh}} \quad (2.8)$$

Kde

$$A_{sh} = \frac{h_D \cdot b_D}{\sin \phi} \quad (2.9)$$

Hned po fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu má největší vliv na proces třískového obrábění řezná rychlost v_c . Vyšší řezná rychlost má za následek větší množství práce potřebné k řezání. Tato práce se téměř celá transformuje na teplo - cca 95 %, které je odváděno třískou. Zbývající práce jsou potřebné na pružné deformace, práce spotřebované na deformaci mřížky kovu a vytvoření nových povrchů. V důsledku odvodu tepla třískou je minimalizován vliv energetického působení na vlastnosti obrobeného povrchu a především jsou minimalizovány nežádoucí reziduální napětí. Tato napětí jsou spojena s deformačními nebo fázovými změnami a jsou vyvolána zejména plastickou deformací povrchové vrstvy za působení tření. Při HSC se teplota třísek blíží teplotě tavení obráběného materiálu ¹⁵ tab.2.1.

Tab.2.1 Teploty dosahované při HSC obrábění ¹⁵

Materiál obrobku	Teplota dosahovaná při obrábění [°C]
Ocel	1500
Šedá litina	1300
Bronz	1000
Hliník	600

Při jisté velikosti v_c dochází k náhlé změně fyzikálních a chemických vlastností třísky. To má za následek, že se tříška transformuje v rovině stříhu. Toto doprovází vysoká teplota, která způsobuje podstatné změknutí třísky a střední součinitel tření se výrazně zmenší. Tím se do značné míry eliminuje vliv

normálové složky řezné síly na čele nástroje, poklesne celkový řezný odpor a tedy i třecí složka řezné síly, dojde ke ztenčení průřezu třísky a zvýšení rychlosti jejího odchodu z místa řezu. Dojde ke snížení velikosti plochy kontaktní zóny a omezí se sekundární nárůst teploty třísky třením v kontaktní zóně. Zvýšení rychlosti odcházející třísky snižuje množství tepla, které je přenášeno do nástroje. Pokles řezných sil a nižší množství tepla, které je přenášeno do nástroje i obrobku, se projevuje zvýšením přesnosti obrábění a zmenšením intenzity opotřebení čela nástroje. ^{8,9,10,15,17}

2.2.2 Výhody a nevýhody HSC obrábění

Hlavní výhody aplikace HSC obrábění:

- dosažení vysoké kvality obráběného povrchu, zpravidla bez nebezpečí vzniku nežádoucích reziduálních pnutí na obrobeném povrchu;
- zvýšení objemu odebraného materiálu při hrubování (se zvyšujícími se otáčkami řezného nástroje nebo obrobku je možno zvýšit posuvovou rychlost, při zachování hodnoty posuvu na zub nebo otáčku) ;
- zvětšení obrobené plochy a zkrácení strojního času při dokončování, zvýšením řezné a posunové rychlosti;
- vlivem menšího pěchování třísky se sníží řezné síly o 30%;
- nižší tepelné zatížení nástroje a obrobku, což vede ke snížení deformací a zvýšení přesnosti obrábění;
- snížení pravděpodobnosti vzniku vibrací, protože vysoká frekvence otáčení vřetene je mimo oblast samobuzeného kmitání;
- významný je i ekologický dopad, protože tento způsob obrábění je možné aplikovat bez chlazení. ^{8,10,15}

Hlavní nevýhody aplikace HSC obrábění:

- vysoké provozní a investiční náklady;
- nedostatek technických dat pro HSC obrábění jednotlivých druhů materiálů;
- nutnost zajištění bezpečnosti obsluhy obráběcích center. ^{8,10,15}

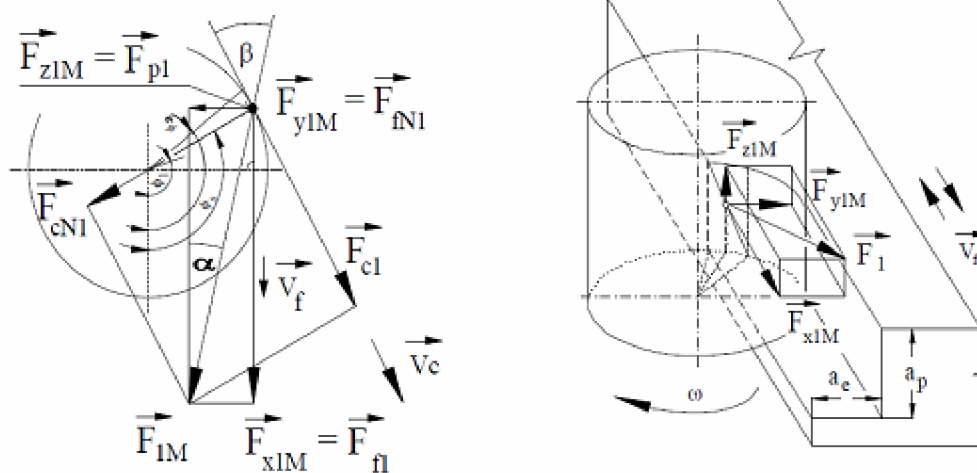
2.3 Řezné síly při frézování

Řezný nástroj je při obrábění zatěžován působením odporu obrobku proti břitu nástroje. Síly rozložené na celém břitu v axiálním směru, které jsou závislé na jeho poloze, způsobují deformaci nástroje. Že se nástroj působením sil deformuje, poznáme podle obrobeného povrchu, na kterém se vyskytuje rozměrová chyba. Pro následující vyjádření budeme považovat nástroj za tuhý a s deformací nepočítáme.^{14,16,19}

Vyjádření celkových sil F_j působících na řezný nástroj (obrobek) je možno realizovat v různě orientovaných kartézských souřadných systémech:

- souřadný systém řezného nástroje (F_c, F_{cN}, F_p);
- souřadný systém obráběcího stroje (F_x, F_y, F_z);
- souřadný systém měřicí aparatury (F_x, F_y, F_z);

V těchto souřadných systémech je celková síla působící na nástroj rozložena na jednotlivé silové složky.



Obr. 2.7 Fyzikální model zatížení řezného nástroje v průběhu obrábění¹⁹

Velikosti jednotlivých měřených složek F_{x1} , F_{y1} a F_{z1} slouží pro dimenzování posunových mechanismů strojů. Z těchto složek si můžeme vyjádřit silovou výslednici F_1 , kterou je možné přetransformovat dle ČSN ISO 3002. Sílu F_1 můžeme rozložit na složky F_{c1} , F_{c1N} a F_{p1} . Tyto složky hrají důležitou roli při určování pohonů vřeteníku a řezných výkonů nástrojů.¹⁹

2.3.1 Analytické vyjádření

Řezné síly jsou u frézování nástrojem se zuby ve šroubovici závislé na úhlu záběru φ , poloměru nástroje R a sklonu šroubovice λ_s . Tyto hodnoty řídí průřez třísky AD . Vyjádření složek elementární síly pro zub frézy je uvedeno v rovnicích: ¹⁹

$$dF_{cj}(\varphi, z) = K_t \cdot h_j(\varphi, z) dz \quad (2.10)$$

$$dF_{cNj}(\varphi, z) = K_r \cdot dF_{cj}(\varphi, z) \quad (2.11)$$

kde tloušťka třísky lze vyjádřit podle:

$$h_j = f_z \cdot \sin \varphi_j(z) \quad (2.12)$$

kde je axiální hloubka řezu. Velikost úhlu φ_j je závislá nejen na pootočení zubu frézy, ale také na umístění vyšetřovaného elementu v axiálním směru na šroubovici zubu. Závislost lze vyjádřit:

$$\varphi_j(z) = \varphi + j\varphi_p - k_\beta \quad (2.13)$$

kde

$$\varphi_p = 2\pi / 2 \quad (2.14)$$

a

$$k_\beta = \tan \beta / R \quad (2.15)$$

K_t , K_r z (2.12)(2.13) závisí na jmenovité tloušťce třísky h_a , na materiálu nástroje a obrobku.

$$K_t = K_T \cdot h_a^{-p} \quad (2.16)$$

$$K_r = K_R \cdot h_a^{-q} \quad (2.17)$$

Konstanty K_T , K_R , p a q jsou zjištěny experimentálně pro danou dvojici nástroj-obrobek. Elementární řeznou sílu je možno také transformovat do souřadného systému ztotožněného se směrem posuvu nástroje:

$$dF_{yj}(\varphi, z) = -dF_{cj}(\varphi, z)\cos\varphi_j(z) - dF_{cNj}(\varphi, z)\sin\varphi_j(z) \quad (2.18)$$

$$dF_{yj}(\varphi, z) = dF_{cj}(\varphi, z)\sin\varphi_j(z) - dF_{cNj}(\varphi, z)\cos\varphi_j(z) \quad (2.19)$$

Zjednodušeně uvádí vztah mezi složkami řezných sil pro frézu se zuby ve šroubovici Tlustý¹⁹, který předpokládá že,

$$\Delta F_c = 0,3\Delta F_{cN} \quad (2.20)$$

2.3.2 Měření řezných sil

Pro zkoumání řezných sil můžeme použít dvě základní metody:

nepřímá metoda: tato metoda vychází z toho, že síla, kterou působí nástroj na obrobek, ovlivňuje výkon elektromotoru, proto pomocí wattmetrů měříme rozdíl mezi příkonem a výkonem stroje. Nevýhodou této metody je, že nejsme schopni určit směr výsledné síly;

přímá metoda: tato metoda se zakládá na měření deformací, způsobených působící silou, v soustavě stroj-nástroj-obrobek. Měření složek síly řezání se provádí prostřednictvím dynamometrů.

Dynamometr musí zaručit nezávislost měřicí veličiny na provozních vlastnostech přístroje, měřit sledovanou veličinu ve zvoleném rozsahu s maximální přesností, zaručit stálost naměřených hodnot s časem včetně její reprodukovatelnosti. Je známa celá principů, na kterých mohou dynamometry pracovat.¹⁹

mechanické – silové zatížení vyvolá pružnou deformaci, která je měřena a přepočtena na působící sílu;

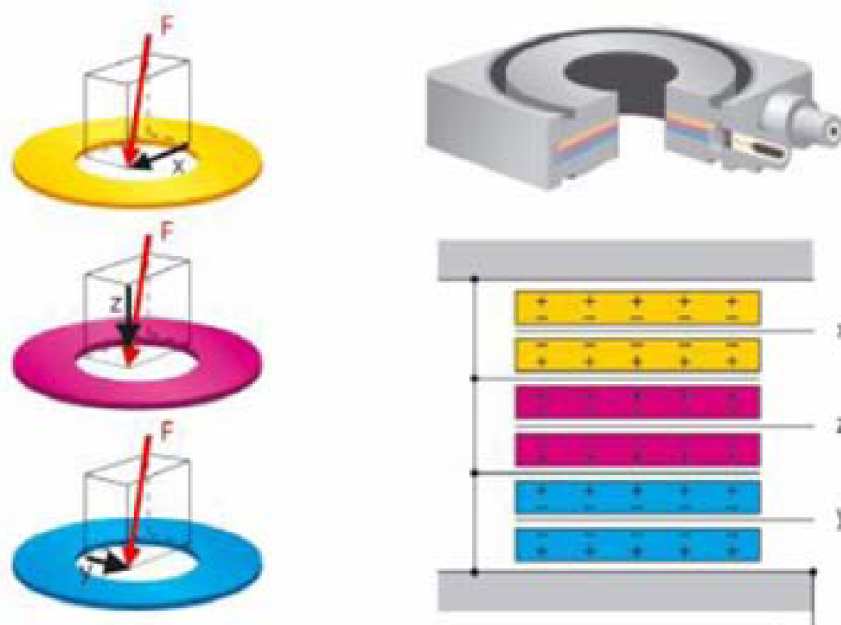
pneumatické – silové zatížení vyvolá změnu tlaku nebo průtoku v závislosti na změně výtokového průřezu mezi klapkou a tryskou v deformačním elementu;

hydraulické – silové zatížení vyvolá přes membránu změnu tlaku kapaliny, tato změna bývá nejčastěji měřena manometrem;

tenzometry – tyto senzory pracují na principu změny odporu v deformovaném vodiči, tato změna je přepočtena na jeho deformaci a následně na sílu;

měřicí můstky – princip je založen na vyhodnocování změny odporů rezistorů ve Wheatstoneově můstku;

piezoelektrické – tyto dynamometry využívají piezoelektrického jevu (schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování, přičemž elektrický náboj je přímo úměrný silovému zatížení). V současné době jsou nejpoužívanějšími dynamometry, díky svému velkému rozsahu měření.



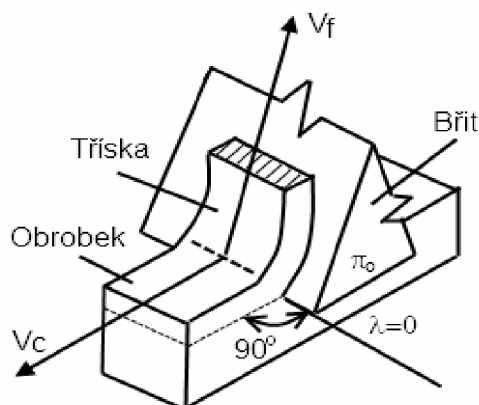
Obr. 2.8 Princip měření piezoelektrického dynamometru ¹⁹

2.4 Tvorba třísky

Tvorba třísky je jedním z nejvýznamnějších parametrů obrábění, který významně ovlivňuje řezný proces. Při tomto procesu, který probíhá za vysokých teplot a tlaků, vznikají elastické a plastické deformace, které vedou k lomu materiálu. Tento proces popisuje celá řada matematických modelů, ale jelikož se jedná o složitý děj, žádný model není konkrétní pro celé spektrum podmínek obrábění a druhů materiálů.

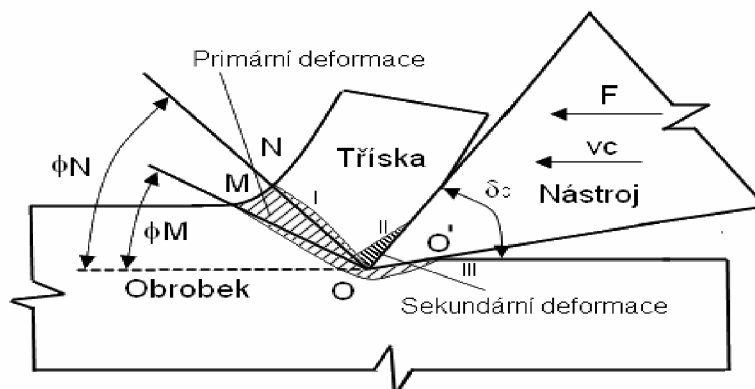
2.4.1 Matematický model ortogonálního řezání

Ve většině obráběcích operací lze zavést zjednodušení, při kterém je ostří kolmé na směr pohybu. Tento stav se nazývá ortogonální řezání.^{1,5,7,9}



Obr. 2.9 Ortogonální řezání^{5,7}

V této pozici můžeme znázornit deformační zóny.



Obr. 2.10 Deformační oblasti⁵

Vnikání nástroje do obrobku má za následek vznik pružných a plastických deformací. V oblastech znázorněných na obrázku 2.10.:

- oblast primární plastické deformace - před břitem nástroje v rovině maximálních smykových napětí;
- oblast sekundární plastické deformace II - tření třísky s břitem nástroje;
- oblast terciární plastické deformace III - tření nástroje o obrobený povrch.

Tvar, velikost a stav napjatosti v oblasti primární deformace (NOO'M) závisí na celé řadě parametrů, jako je např. geometrie nástroje, tepelné zatížení nástroje, mechanické zatížení nástroje, řezné prostředí, řezná rychlost atd.

2.4.2 Tepelná bilance řezného procesu

Při obráběcím procesu se téměř veškerá mechanická energie přivedená pro tvorbu třísky transformuje v energii tepelnou. Zbývající energie je uložena jako zbytková energie v třískách. Množství vzniklého tepla závisí na podmínkách deformace a tření při řezání. Při řezání vzniká teplo v několika zdrojích, které se projevují různou teplotou. Největší množství tepla vzniká v oblasti primární plastické deformace v důsledku plastických a elastických deformací (Q_{pe}). Druhé největší množství tepla vzniká v oblasti sekundární plastické deformace II jako důsledek tření mezi čelem nástroje a třískou (Q_{γ}). Teplo vzniká i v oblasti III jako důsledek tření hlavního hřbetu nástroje o přechodovou plochu na obrobku (Q_{α}). Vzniklé teplo je odváděno třískou (Q_t), nástrojem (Q_n), obrobkem (Q_o) a řezným prostředím (Q_{pr}).^{1,5}

$$Q_{pe} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha} = Q_t + Q_n + Q_{\alpha} + Q_{pr} \quad (2.21)$$

Na zvyšování teploty se podílí celá řada parametrů - řezná rychlost (roste množství vzniklého tepla, v první fázi rychleji, pak se nárůst zpomalí), posuvová rychlost, šířka záběru ostří, pracovní úhel hlavního ostří, úhel čela, úhel hřbetu a další. Zvyšování teploty při obrábění je nežádoucí děj, který negativně působí na řezné vlastnosti nástroje, ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu, ovlivňuje pěchování a zpevňování obráběného materiálu, ovlivňuje podmínky tření na čele i hřbetě nástroje.

3. TRVANLIVOST A OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ

3.1. Druhy opotřebení

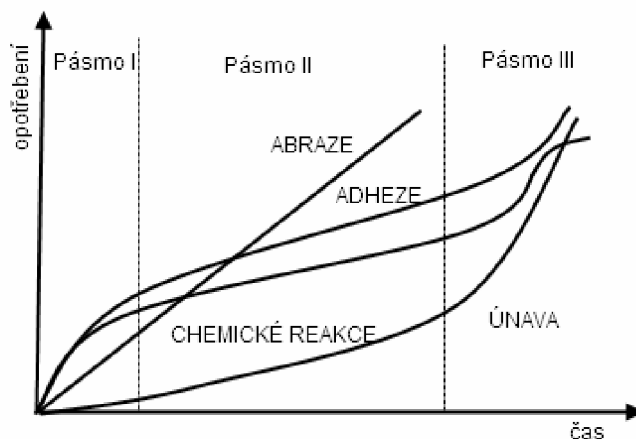
Opotřebení je jev, který vzniká při vzájemném působení funkční plochy nástroje a obrobku. Opotřebení je nežádoucí, a proto se snažíme vhodnou volbou materiálů nástroje tento jev, co nejvíce omezit.

Při obrábění dochází ke kontaktu nástroje s obrobkem a nástroje s třískou. Při kontaktu nástroje s obrobkem dochází k opotřebení na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje. Při kontaktu nástroje s třískou dochází k opotřebení na čele nástroje. Opotřebení nástroje záleží na mnoha fyzikálních a mechanických vlastnostech nástrojového a obráběného materiálu. ^{1,2,5,10}

V průběhu obrábění dochází k různým fyzikálně-mechanickým jevům:

- a) abraze- je fyzikální mechanismus opotřebení, při kterém dochází k brusnému otěru vlivem tvrdých částic, které se jednak uvolňují z obráběného materiálu tak i z nástroje;
- b) adheze- je fyzikální mechanismus opotřebení, při kterém dochází ke vzniku a následnému porušování mikrosvárových spojů. K tomuto jevu dochází v důsledku vysokých tlaků a teplot při chemické příbuznosti materiálů obrobku a nástroje na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky;
- c) oxidace- je chemický mechanismus opotřebení, při kterém dochází ke vzniku chemických sloučenin v důsledku přítomnosti kyslíku v okolí;
- d) difúze- je chemický mechanismus opotřebení, při kterém dochází k migraci atomů mezi materiálem a obráběcím nástrojem. To vede k tvorbě nežádoucích sloučenin ve struktuře nástroje;
- e) plastická deformace- je důsledek tepelného a mechanického zatížení, která může vést k lavinovému opotřebení;
- f) křehký lom- vzniká důsledkem vysokého mechanického zatížení. To může být způsobeno například přerušovaným řezem.

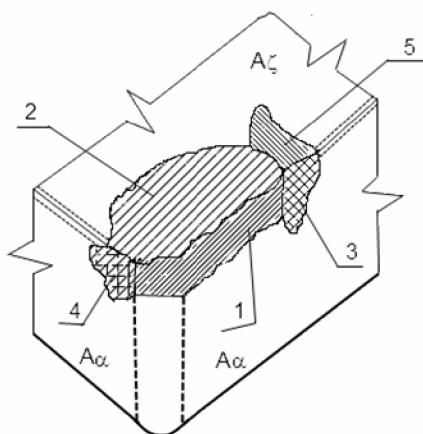
Abráze a adheze působí především na hřbet nástroje, oxidace a difúze působí na čelo nástroje. Na to jak a kde se bude nástroj opotřebovávat mají vliv různé faktory. A to především druh a geometrie nástroje, druh operace a řezné podmínky.



Obr.3.1 Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení ¹

3.2. Projevy a kritéria opotřebení

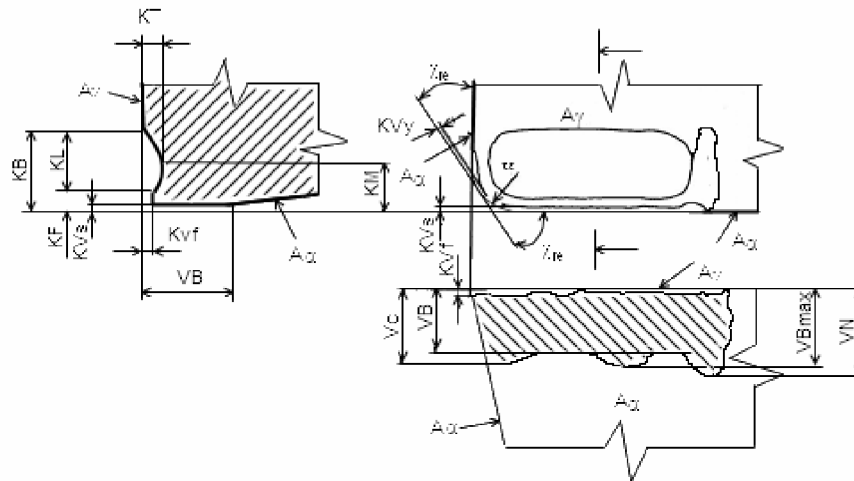
Jednotlivé projevy opotřebení u nástroje ze slinutého karbidu jsou znázorněny na ^{2,5} obr. 3.2.



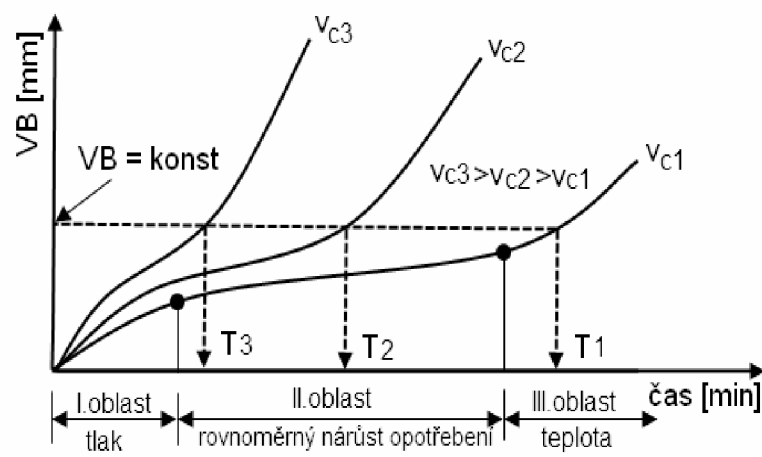
Obr.3.2 Formy opotřebení břitu ⁵

- 1- Fazetka opotřebení na hřbetě
- 2- Výmol na čele
- 3- Primární hřbetní rýha
- 4- Sekundární hřbetní rýha
- 5- Rýha na čele

Základní a nejčastěji používaná kritéria **VB** - šířka fazetky opotřebení na hřbetě, **KT** - hloubka výmolu na čele, **KV_y** - radiální opotřebení špičky jsou zobrazena na obr.3.3.



Obr.3.3 Kritéria opotřebení řezného nástroje⁵



Obr.3.4 Časová závislost opotřebení pro různé řezné rychlosti⁵

Opotřebení nástroje je jev, který provází každé obrábění a nelze mu nikdy zcela zabránit. Pouze vhodnou volbou nástroje můžeme tento proces zpomalit. Při obrábění je velice důležité sledovat kritéria opotřebení. Po překročení určité míry opotřebení už nástroj buď nevyrobí ekonomicky, protože nárůst opotřebení se negativně projevuje nárůstem obráběcích sil nebo vyrábíme zmetky, které buď nespĺňují rozměrovou přesnost, nebo kvalitu povrchu. Z tohoto důvodu je velice důležité kritéria opotřebení hlídat a nástroj

včas vyměnit za nový. Na sledování opotřebení se používá mnoho metod. Ty se dělí na metody přímé a metody nepřímé, podle způsobu měření, to může probíhat buď přímo za obráběcího procesu, nebo po jeho zakončení.⁵

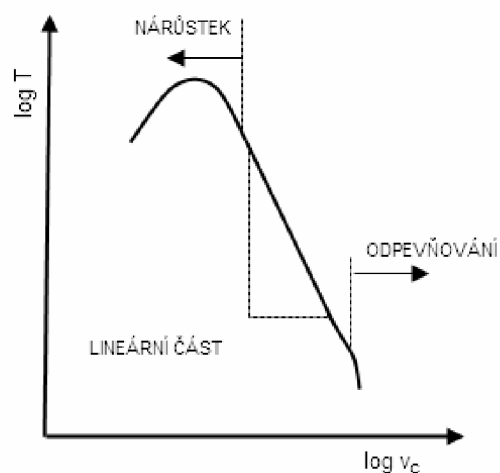
3.3 Trvanlivost nástroje

Trvanlivost nástroje se dá definovat jako celková doba, po kterou nástroj obráběl než dosáhl námi zvolené hodnoty opotřebení. Z tohoto by se trvanlivost dala vyjádřit jako:

$$T = T_K \cdot t_c \quad (3.1)$$

Na trvanlivosti nástroje se podílí celá řada různých činitelů jako jsou podmínky obráběcího procesu (řezná rychlost, posunová rychlost, řezné prostředí, šířka záběru ostří), druh a vlastnosti obráběcího a obráběného materiálu, geometrie řezné části a rozměry nástroje a plynulost řezného procesu. Největší vliv však má na trvanlivost řezná rychlost, závislost trvanlivosti na ní vyjadřuje tzv. Taylorův vztah.^{1,5,10}

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad (3.2)$$



Obr.3.4 Závislost T-v_c¹

Při analýze $T-v_c$ závislosti vyplývá, že Taylorova závislost je lineární jen v určitém rozsahu řezných rychlostí a dá se předpokládat, že nelineární průběh může mít tato závislost i v logaritmickém znázornění obr.3.4.

Konstanty i exponent m se mění, protože jsou ovlivňovány řadou činitelů. Významnou roli hraje hodnota exponentu m , která se mění s vlastnostmi materiálu nástroje. Jeho velikost udává, jaká je citlivost nástrojového materiálu na změnu řezné rychlosti tab. 3.1. ^{1,5,10}

Tab. 3.1 Hodnoty exponentu m ¹

Materiál	m [-]
Nástrojové oceli	10 ÷ 8
Rychlořezné oceli	8 ÷ 5
Slinuté karbidy	5 ÷ 2,5
Řezná keramika	2,5 ÷ 1,5

Tab. 3.2 Vztahy pro výpočet trvanlivosti nástroje, jak je sestavili různí autoři. ¹

Autor	Rovnice	Poznámka
Taylor, 1907	$T = C_T \cdot v_c^m$	
ISO norma, 1977	$v_c \cdot T^{1/m} = C_v$ $T = C_T \cdot v_c^m \cdot a_p^{x_T} \cdot f^{y_T}$	
Temčín, 1957	$T = \frac{C_T}{v_c^m + \frac{C_T}{T_{max}}}$	T_{max} – maximální trvanlivost
Wu, 1963	$T = \frac{C_T}{v_c^{a+b v_c}}$	a, b – součinitelé
König	$T = \exp\left(\frac{K v_c}{m} v_c^m + \frac{i_f}{n} f^n + C\right)$	
Kundrák	$T = \frac{C_{T_1}}{v_c^3 + C_{T_2} \cdot v_c^2 + C_{T_3} \cdot v_c}$	Vhodné pro nástroje DIA a KNB

V praxi se více využívá rozšířený Taylorův vztah:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m \cdot a_p^{x_T} \cdot f^{y_T}} \quad (3.3)$$

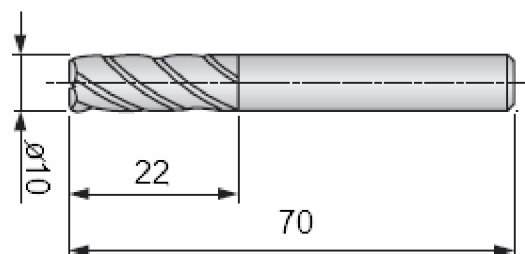
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Cíl práce

Cílem zkoušek bylo porovnání řezivostních vlastností nepovlakovaných čelních válcových čtyřbřitých krátkých fréz ze slinutého karbidu wolframu dodaných firmou Pramet Tools s.r.o.. Frézy byly dodané ve dvou různých typech zrnitosti. Úhel stoupání šroubovice těchto fréz je 40° a úhel čela 10° .¹⁸

Tab. 4.1 Přehled testovaných nástrojů a jejich označení

označení výrobce	rozměr nástroje	materiálové složení nástroje	velikost zrna	označení měřených souborů
10E4S70-UF45	10x70	86,5% WC 12% CO+ 1,5% ostatní	0,5 μm	1
10E4S70-UF45	10x70	86,5% WC 12% CO+ 1,5% ostatní	0,5 μm	2
10E4S70-MG45	10x70	90% WC 10% CO	0,8 μm	3
10E4S70-MG45	10x70	90% WC 10% CO	0,8 μm	4



Obr. 4.1 Rozměry fréz

4.2 Popis testů, metodiky měření a analýzy naměřených hodnot

4.2.1 Obráběcí stroj

Ke zkouškám byla použita konzolová vertikální frézka FV 25 CNC s řídicím systémem Heidenhain 530 TNC, výrobce O.S.O., spol. s.r.o. Olomouc (obr. 4.1) s těmito parametry:

Upínací plocha stolu: 1300x350 mm, Maximální otáčky 6000 ot/min

Pohyby v ose: X = 760 mm, Y = 355 mm, Z = 152 mm



Obr. 4.2 Konzolová frézka FV 25 CNC A

4.2.2 Upnutí rezných nástrojů

Nástroje byly upínány do upínacího pouzdra RÖHM SK 40x10 576032 a dotaženy šestihranným klíčem. Tento komplet byl pneumaticky upnut do vřeteníku obráběcího stroje.



Obr. 4.3 Upnutí nástroje

4.2.2 Měřicí aparatura

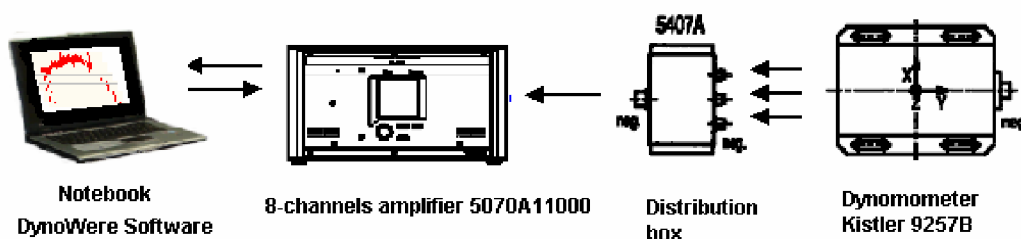
K měření axiální, radiální a tangenciální síly byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER 9257B. Aparatura byla plně řízena prostřednictvím PC.



Obr. 4.4 Vícekanálový nábojový zesilovač



Obr. 4.5 Měřicí aparatura KISTLER 9257B ¹²



Obr. 4.6 Schéma piezoelektrické měřicí soupravy ¹⁴

4.2.3 Obráběný materiál

Obráběným materiálem byla zušlechtěná nízkolegovaná Cr-Mn konstrukční ocel ČSN 41 5241.9 ($R_m = 1100\text{MPa}$)¹¹ viz. tab.4.2.

Tab. 4.2 Chemické složení obráběného materiálu podle ČSN 415241

Chemické složení	Mn [%]	C [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	V [%]	Fe [%]
15241	0,60-0,80	0,35-0,43	0,17-0,37	0,03-5	0,03-5	1,70-2,00	0,6	0,25-0,50	0,10-0,20	zbytek

4.2.4 Řezné podmínky a jejich určení

Řezné podmínky byly stanoveny odhadem tak, aby vyhovovaly obrábění tohoto typu nástroje pro daný materiál. Pro dané nástroje byly zvoleny tyto hodnoty ($f_z=0,05\text{mm}$, $a_p=6\text{mm}$, $a_e=0,6\text{mm}$), pro řeznou rychlost byly zvoleny hodnoty dvoje, pro nástroje č.1,3 ($v_c=70\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) a pro nástroje č.2,4 ($v_c=120\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$), ostatní hodnoty byly dopočítány dle vzorců 4.1,4.2 viz. tab. 4.3, 4.4.

$$n = \frac{v_c \cdot 10^3}{\pi \cdot D} \quad 4.1$$

$$v_f = n \cdot f_z \cdot z \quad 4.2$$

Tab. 4.3 Řezné podmínky použité v testu pro frézy 1,3

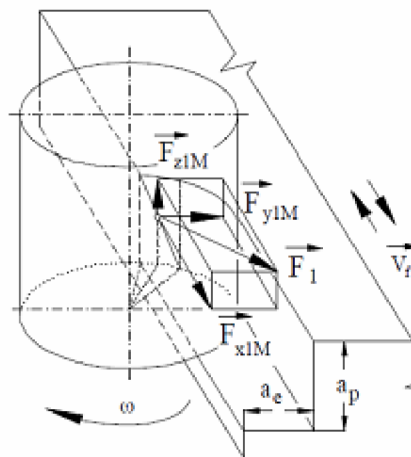
Řezné podmínky	Jednotky	Hodnota
řezná rychlost v_c	[m.min-1]	70
posuv na zub f_z	[mm]	0,05
axiální šířka řezu a_p	[mm]	6
radiální šířka řezu a_e	[mm]	0,6
otáčky n	[min-1]	2229
posuvová rychlost v_f	[mm.min-1]	490
druh frézování	---	sousledné/nesousledné

Tab. 4.4 Řezné podmínky použité v testu pro frézy 2,4

Řezné podmínky	Jednotky	Hodnota
řezná rychlost v_c	[m.min-1]	120
posuv na zub f_z	[mm]	0,05
axiální šířka řezu a_p	[mm]	6
radiální šířka řezu a_e	[mm]	0,6
otáčky n	[min-1]	3822
posuvová rychlost v_f	[mm.min-1]	765
druh frézování	---	sousledné/nesousledné

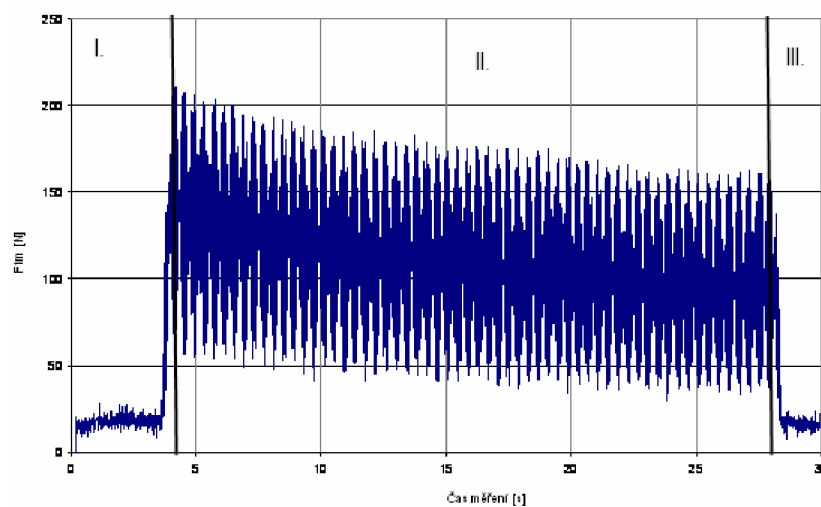
4.2.5 Snímání silového zatížení nástroje a analýzy naměřených hodnot

Pro měření síly byl použit piezoelektrický křemíkový dynamometr KISTELER 9257B. Vzorkovací frekvence byla 100 Hz. Touto aparaturou byly změřeny základní zdrojové signály ve všech souřadných osách stroje (F_{xm}, F_{ym}, F_{zm}). Vzhledem k tomu, že fréza měla v záběru vždy jen jeden zub frézy, je v obr.4.7 uváděno označení ($F_{x1m}, F_{y1m}, F_{z1m}$).

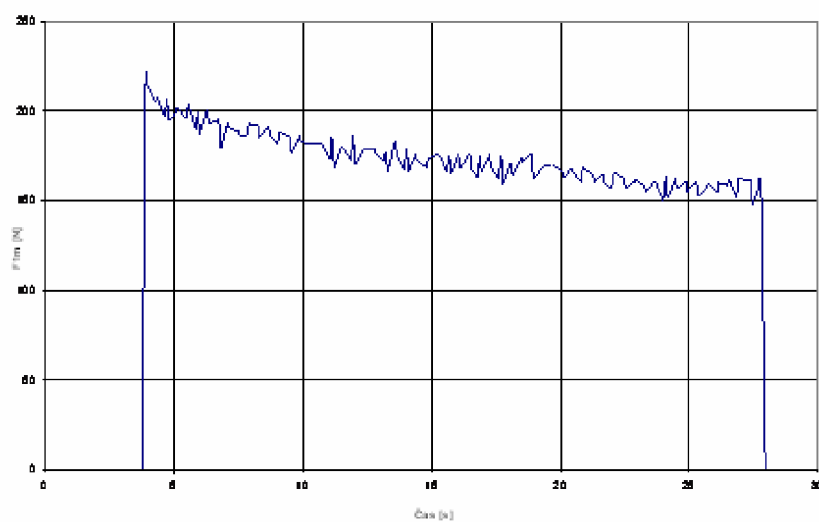


Obr. 4.7 Fyzikální model zatížení rezného nástroje v průběhu obrábění ⁴

Naměřené hodnoty sil byly ukládány do PC pro další zpracování. Jelikož bylo měřeno s frekvencí 100 Hz po dobu 30 sekund znamená to, že z každého námi provedeného měření bylo získáno 3000 záznamů. Tyto naměřené hodnoty je třeba přefiltrovat a vybrat hodnoty sil, které odpovídají silám při působení maximálního průřezu h_{Dmax} třísky. K tomuto účelu byl použit program, který vyhledává maximální hodnoty výslednice sil F (pro dílčí naměřené silové složky), které odpovídají silám při působení maximálního průřezu h_{Dmax} třísky. Dále je pro statistické vyhodnocení nutno odstranit náběžnou a sestupnou hranu I a III, které zaznamenávají síly před začátkem a po konci řezání (obr. 4.8, obr. 4.9).

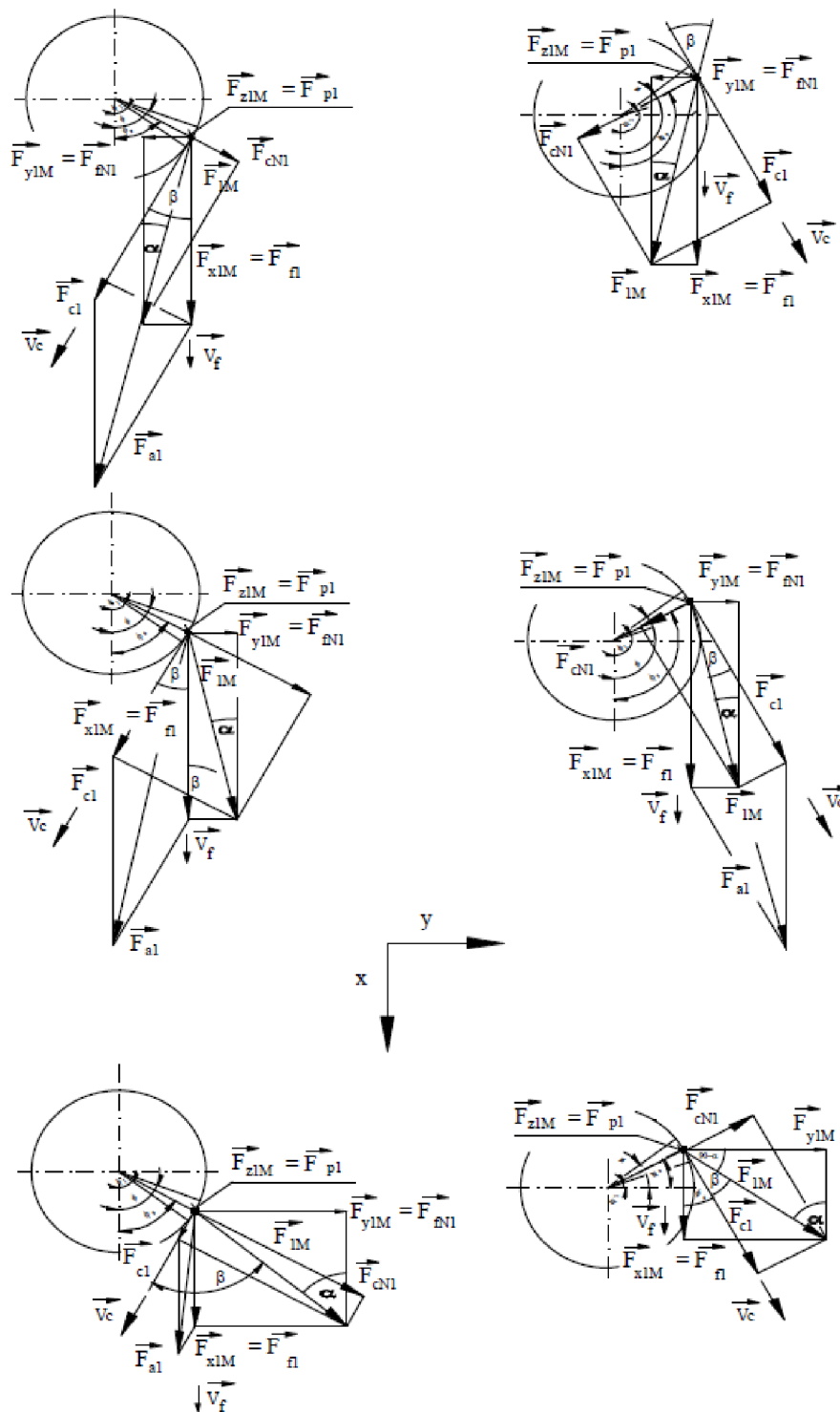


Obr. 4.8 Grafické znázornění nefiltrované celkové síly F



Obr. 4.9 Grafické znázornění filtrované celkové síly F

Silovou výslednici, která byla získána z naměřených a přefiltrovaných hodnot ($F_{x1m}, F_{y1m}, F_{z1m}$) lze dále přetransformovat na silové složky (F_{c1}, F_{cN1}, F_{p1}), které slouží například pro určování řezných výkonů nástrojů.



Obr. 4.10 Silový rozklad v průběhu opotřebení pro sousledné (vpravo) a nesousledné (vlevo) frézování. ¹⁹

Při obrábění dochází k opotřebení nástroje, a tím ke změně jeho geometrie, což je dále doprovázeno změnou řezné síly. Tato změna v průběhu životnosti nástroje dosahuje hodnot až 300 % původní řezné síly. Složky síly se mění nerovnoměrně, takže v průběhu obrábění se mění i směr působících sil (obr. 4.10). Na začátku řezu může být nástroj v důsledku pozitivního úhlu čela vtahován do řezu a na konci obrábění, kdy je fréza zcela opotřebená, se od obrobeného povrchu výrazně odtlačuje. Tuto změnu můžeme kvantifikovat (v závislosti na čase t v souřadném systému pro ortogonální rovinu řezu) rovnicemi: ¹⁹

$$dF_h = \frac{\partial F_h}{\partial t} \cdot dt = \frac{\partial F_h}{\partial \gamma_o} \cdot \gamma_o + \frac{\partial F_h}{\partial r_n} \cdot dr_n + \mu \cdot dF_v + \frac{\partial F_h}{\partial R_a} \cdot dR_a \quad (4.3)$$

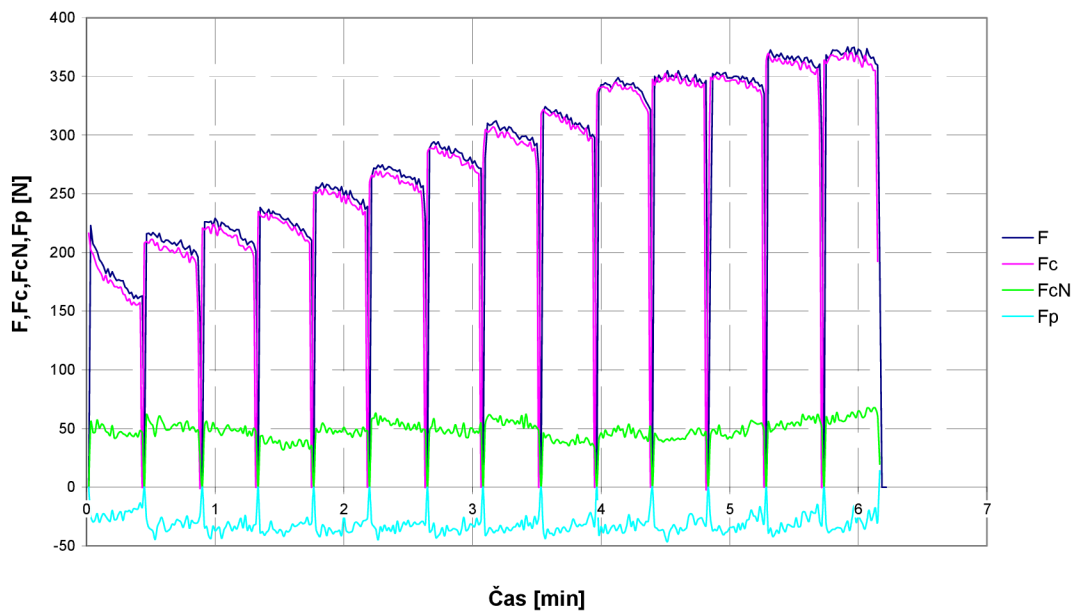
$$dF_v = \frac{\partial F_v}{\partial t} \cdot dt = \frac{\partial F_v}{\partial VB} \cdot dVB + \frac{\partial F_v}{\partial r_n} \cdot dr_n \quad (4.4)$$

kde γ_o je ortogonální úhel čela, r_n je poloměr ostří, μ je Newton-Colombův koeficient tření a VB je šířka plochy opotřebení na hřbetu nástroje. Při obrábění nebývá hlavním sledovaným kritériem řezná síla, protože ta je v praktických aplikacích těžko měřitelná. Jsou to především jevy, které může lehce sledovat obsluha stroje: kvalita obrobeného povrchu, změna tvaru a barvy třísky (Příloha 1-4), viditelné poškození nástroje nebo zvukové projevy. Při hodnocení pevnosti nástroje během rozvoje opotřebení je hlavním kritériem změna silového působení popsaná v rovnicích (4.3 a 4.4). Změna tvaru a velikosti funkčních ploch nástroje v důsledku opotřebení má vliv na zvýšení sil. ¹⁹

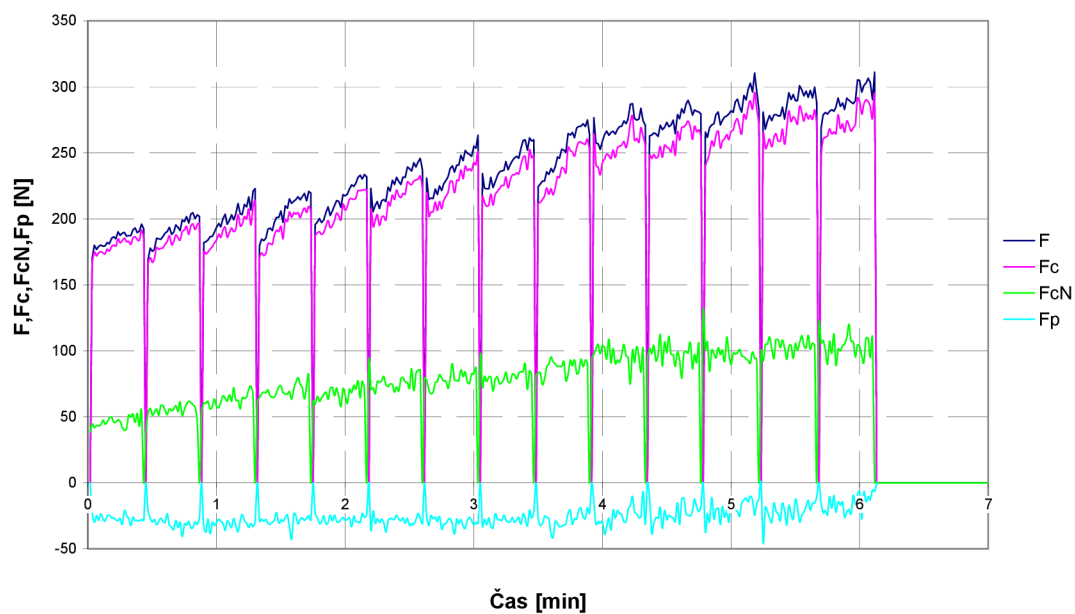
5. TESTOVÁNÍ ČELNÍCH FRÉZ

5.1 Testování nástrojů č.1,3

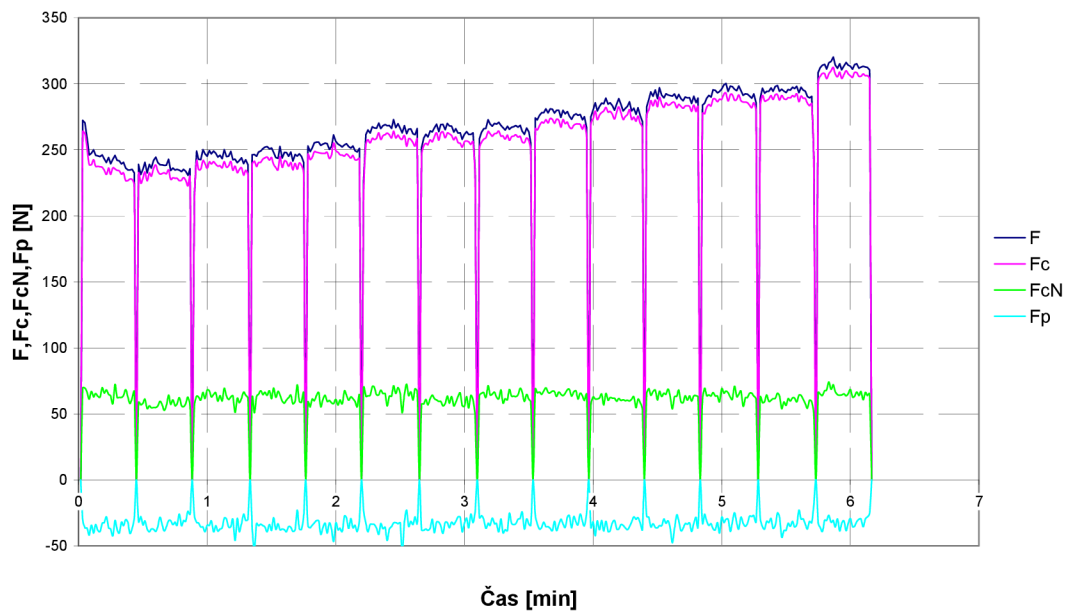
Pro první testování byly vybrány nástroje s označením 1 (10E4S70-UF45 s zrnitostí $0,5 \mu\text{m}$) a 3 (10E4S70-MG45 s zrnitostí $0,8 \mu\text{m}$). Řezná rychlost byla pro dané frézy zvolena $70 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Při této řezné rychlosti jsme obráběli daný materiál (ČSN 41 5241.9) vždy průjezd nesousledně a průjezd sousledně cca 13 minut. U obou nástrojů jsme začínali nesousledným frézováním. Z grafů (5.1 a 5.3) je patrný poměrně velký pokles sil u prvního měření, tento pokles mělo za následek „zabíhání“ nástroje. U nástroje č.1 je z grafu patrné, že sice při měření začínal na nižších hodnotách řezných sil než nástroj č.3 (celková síla F byla jak u sousledného, tak u nesousledného frézování kolem 180N), ale v průběhu měření síly u tohoto nástroje vzrostly poměrně významně (u sousledného frézování vyrostla F na 300N a u nesousledného až na 370N). U nástroje č.3 byl sice zaznamenán také nárůst sil, ale ne takto významný. Při nesousledném frézování vzrostla celková síla F z 240N na 310N, a u sousledného frézování z 220N na 270N. Jelikož jsme za dobu měření nedosáhli konce řezivosti ani u jednoho nástroje a nárůst řezných sil u nástroje č.3 byl v průběhu měření velice malý, bylo rozhodnuto pro další měření s nástroji č.2, č.4, zvýšit hodnotu řezné rychlosti z $70 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ na $120 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. To, že fréza č.1 ani fréza č.3 nedosáhla opotřebení, které vede ke konci její životnosti, je patrné také z grafů. V grafech pro frézu č.1 a č.3 je síla F_p během celého testu v záporných hodnotách (na rozdíl od frézy č.2,č.4), to znamená, že jsou frézy, v důsledku pozitivního úhlu čela, vtahovány do řezu a nedosáhly stavu, kdy se od obrobeného povrchu odtlačují (obr. 4.10).



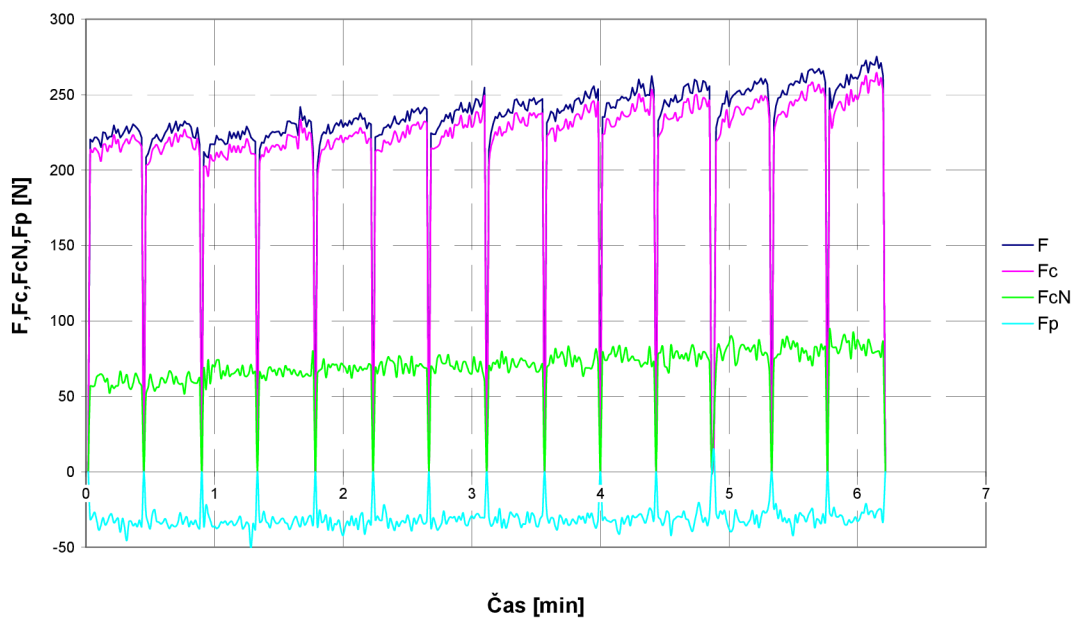
Obr. 5.1 Nárůst řezných sil v průběhu nesousledného frézování pro frézu 1.



Obr. 5.2 Nárůst řezných sil v průběhu sousledného frézování pro frézu 1.



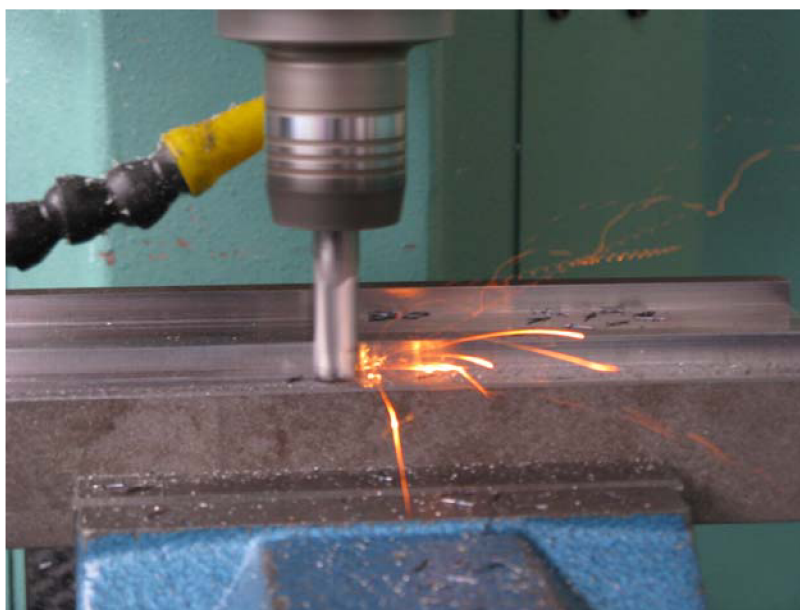
Obr. 5.3 Nárůst řezných sil v průběhu nesousledného frézování pro frézu 3.



Obr. 5.4 Nárůst řezných sil v průběhu sousledného frézování pro frézu 3.

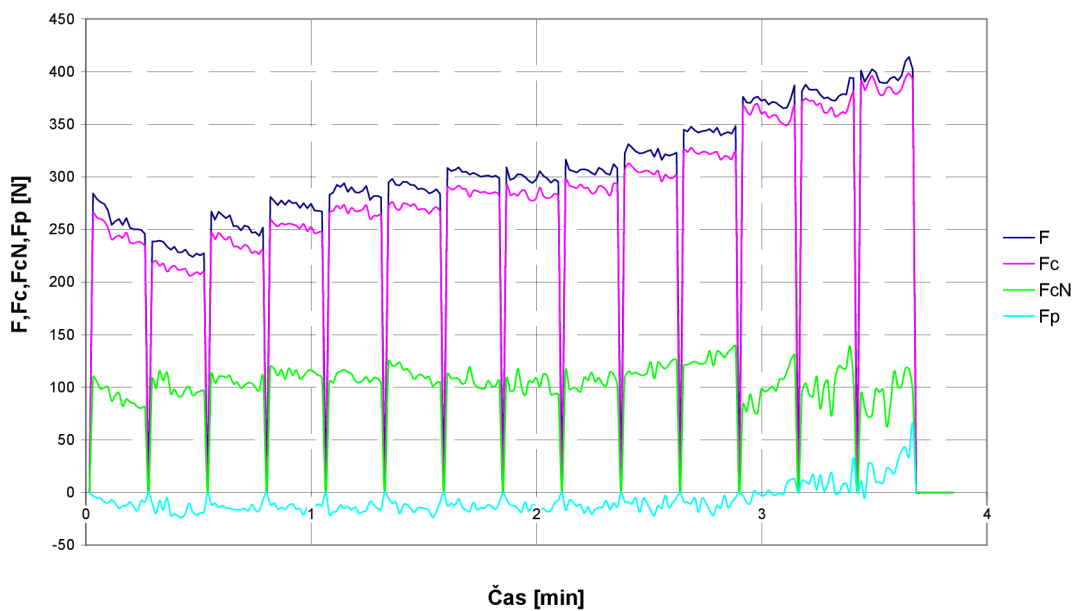
5.2 Testování nástrojů č.2,4

Pro druhé testování byly vybrány nástroje s označením 2 (10E4S70-UF45 s zrnitostí $0,5 \mu\text{m}$) a 4 (10E4S70-MG45 s zrnitostí $0,8 \mu\text{m}$). Pro dané nástroje byla zvolena řezná rychlost $120 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Při této řezné rychlosti jsme frézovali (vždy nesousledně a sousledně) až do konce řezivosti nástroje (obr. 5.5). Konec řezivosti nástroje nastal u nástroje č.2 po době obrábění cca 7,5 minuty při celkové síle F okolo 350N u sousledného frézování. Nástroj č.4 vydržel obrábět podstatně déle (cca 9,5 minuty), když u něj nastal konec řezivosti při sousledném frézování v hodnotě, taktéž při celkové síle F okolo 350N . Řezivost nástroje č.2 skončila tedy ve stejných hodnotách jako řezivost nástroje č.4, ale u nástroje č.4 k tomu došlo o 4 sousledné a 4 nesousledné průjezdy déle.

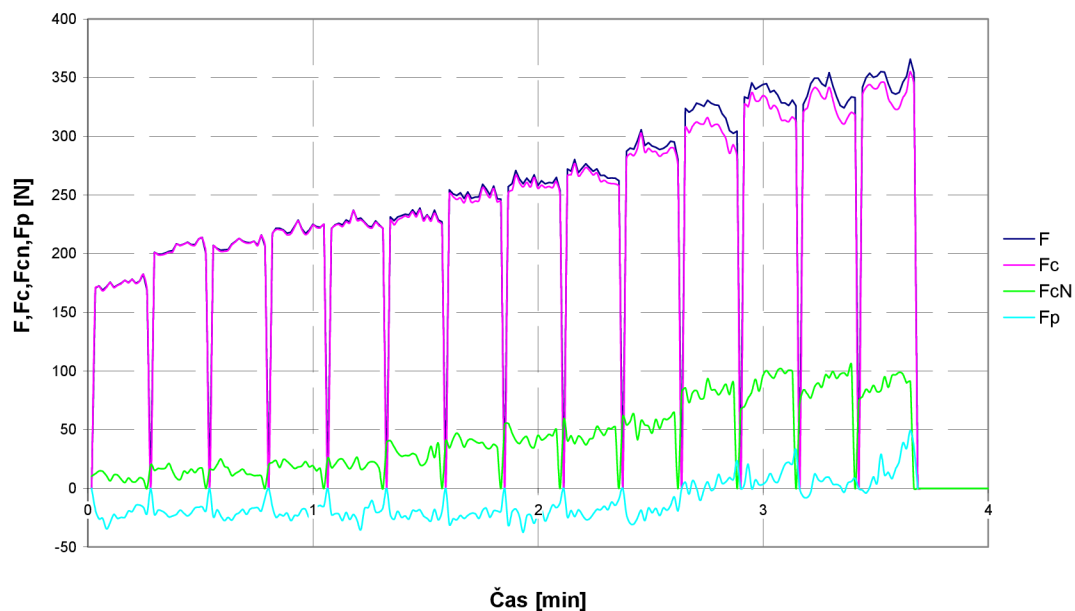


Obr. 5.5 Dosažení konce řezivosti nástroje – nastoupení jevu.

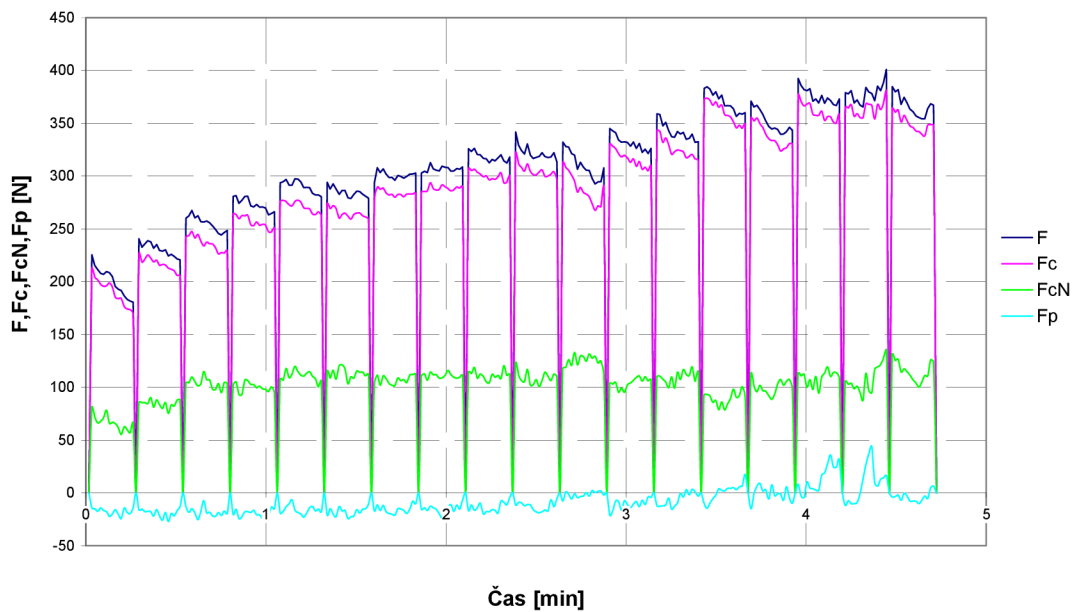
U nástroje č.2 je z grafů patrné, že řezné síly v průběhu času postupně narůstaly (u nesousledného frézování celková síla F stoupala od 250N do 400N a u sousledného frézování od 170N do 350N). U nástroje č.4 rostly síly méně strmě než u nástroje č.2, což je patrné z grafů (u nesousledného frézování celková síla F stoupala od 200N do 380N a u sousledného frézování od 180N do 350N).



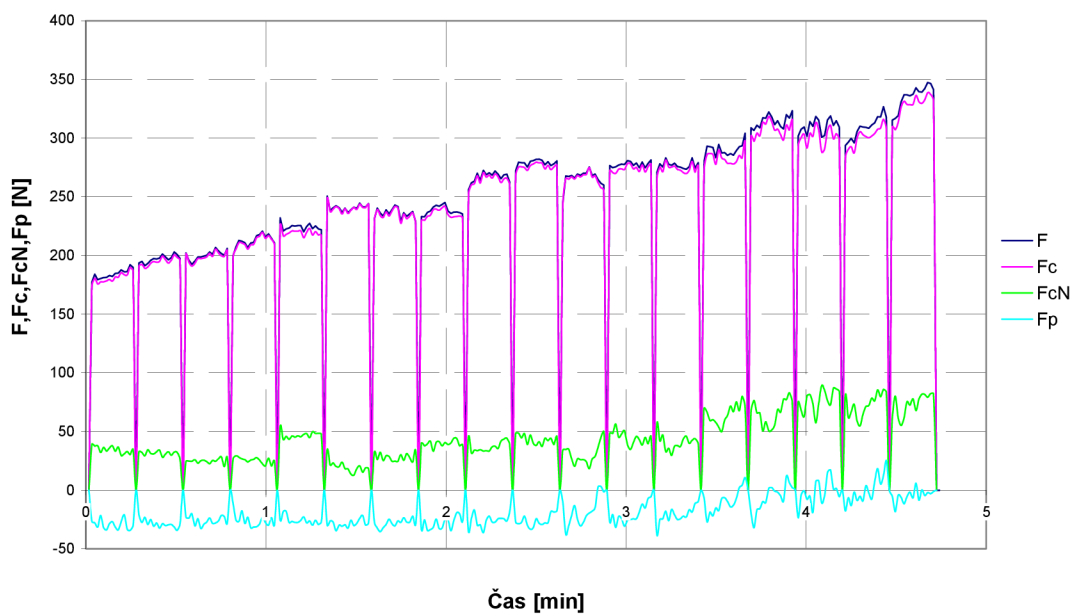
Obr. 5.6 Nárůst řezných sil v průběhu nesousledného frézování pro frézu 2.



Obr. 5.7 Nárůst řezných sil v průběhu sousledného frézování pro frézu 2.



Obr. 5.8 Nárůst řezných sil v průběhu nesousledného frézování pro frézu 4.

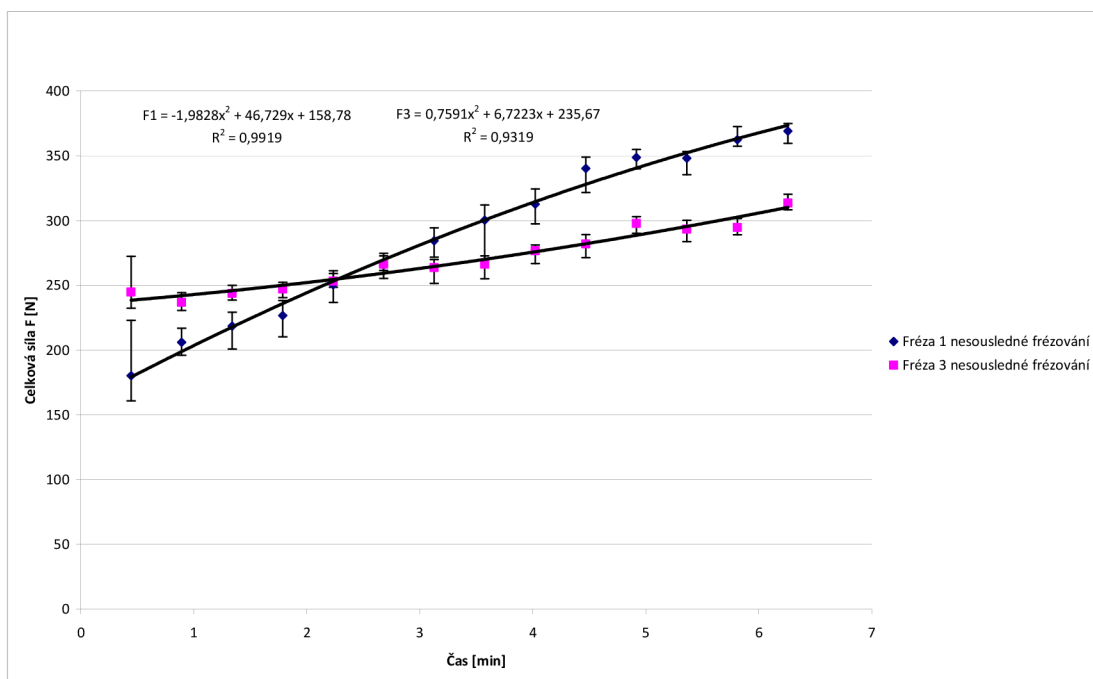


Obr. 5.9 Nárůst řezných sil v průběhu sousledného frézování pro frézu 4.

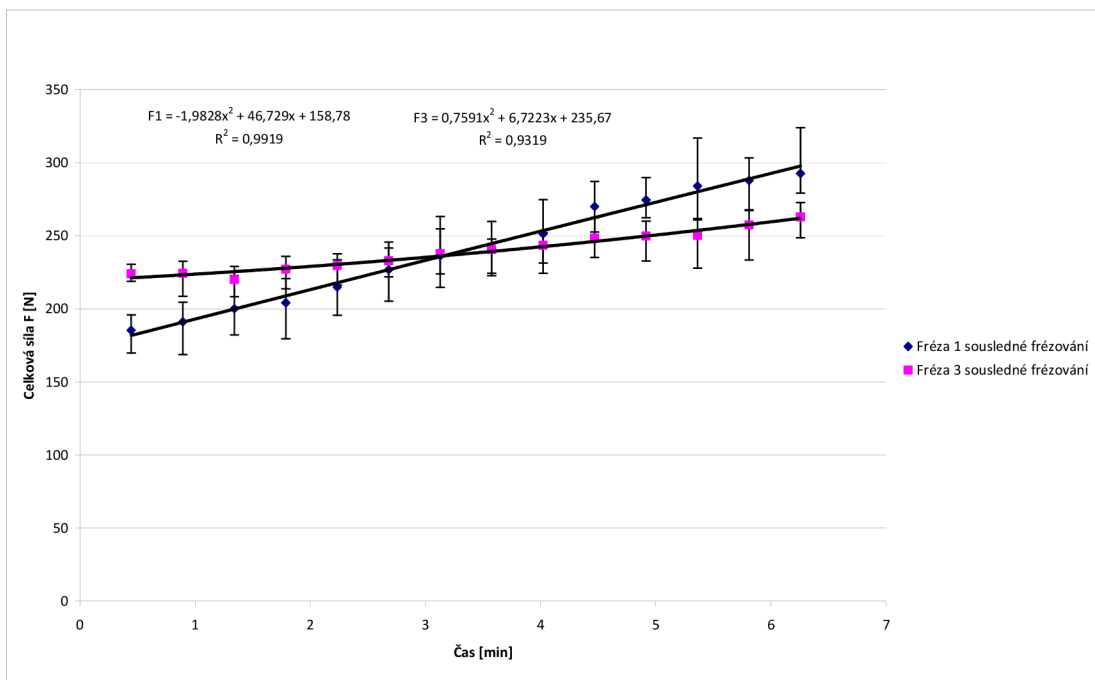
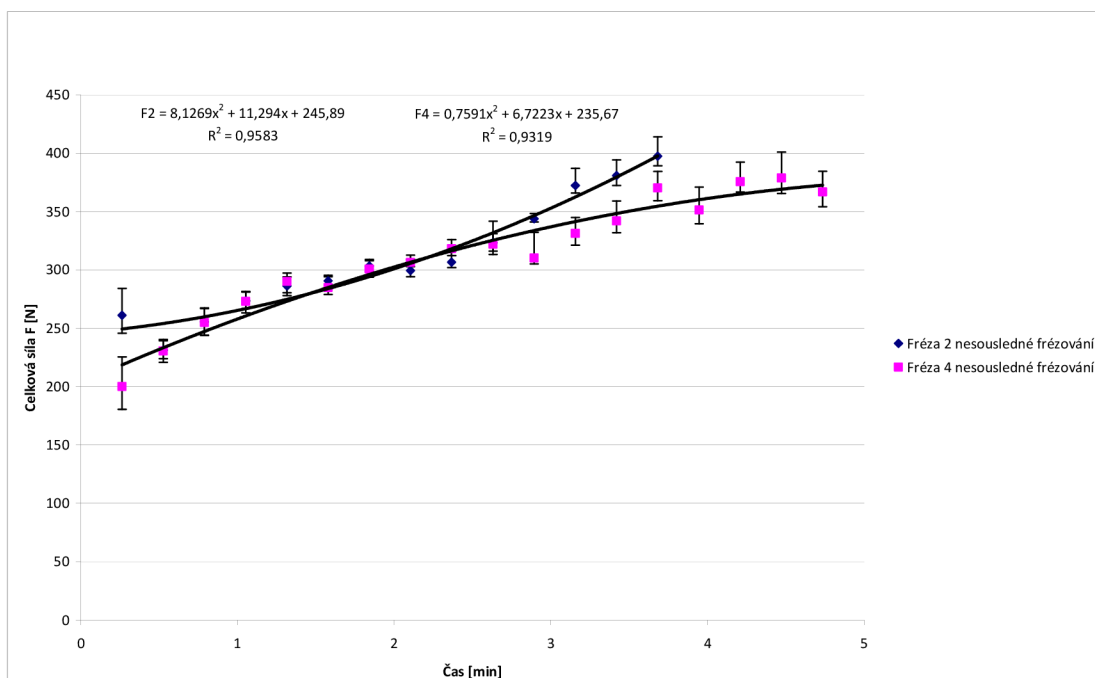
5.2 Grafické vyjádření statisticky zpracovaných datových souborů

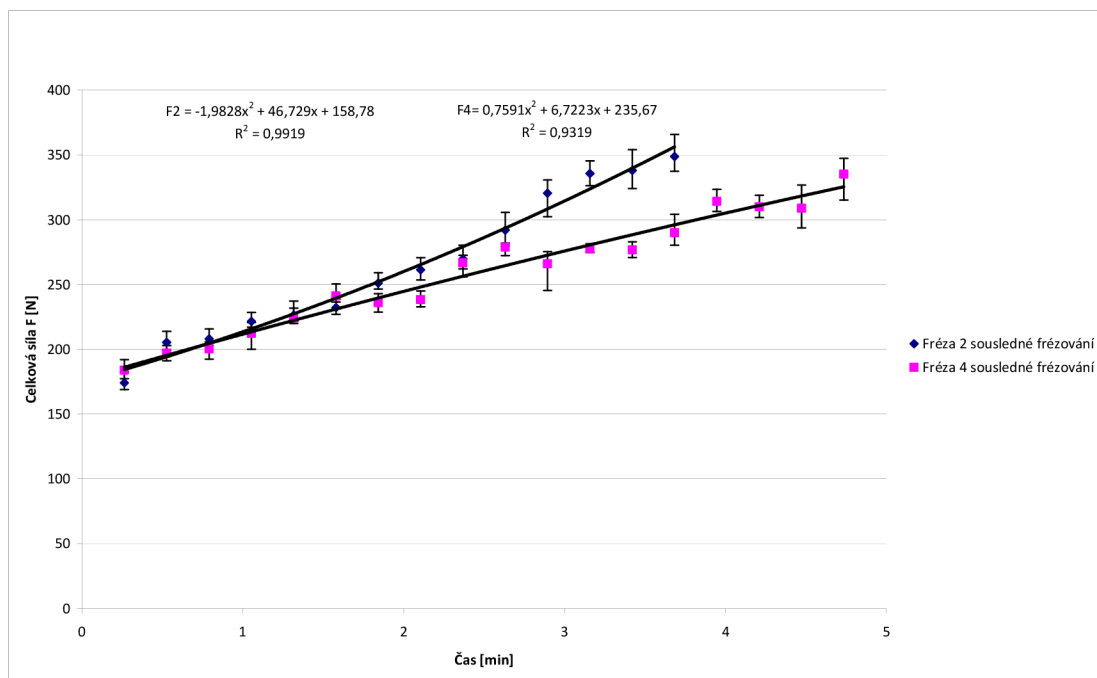
K grafickému vyjádření byly použity přefiltrované datové soubory ořezané o náběhové a výběhové části. Z takto upravených dat byly spočítány odhady středních hodnot, proloženy kvadratickou polynomiální křivkou a byly zadány min. a max. hodnoty datových souborů.

Z grafů je patrné, že sousledné frézování bylo u všech měření, se všemi typy fréz, a za všech použitých řezných podmínek výhodnějším způsobem frézování než frézování nesousledné. Nesousledné frézování způsobuje zvýšené zatížení (v důsledku narůstání průřezu třísky s časem), s tím je spojené i zhoršení kvality povrchu. Dále je také ve všech grafech jasně vidět, že u nástroje č.1,2 (10E4S70-UF45 s zrnitostí 0,5 μm) ve všech případech dochází k rychlejšímu nárůstu řezných sil než u nástrojů č.3,4 (10E4S70-MG45 s zrnitostí 0,8 μm), tedy životnost nástrojů č.3,4 je vyšší a hodí se lépe pro obrábění daného materiálu.



Obr. 5.12 Grafické vyjádření síly F pro frézy č. 1, 3 nesousledné frézování.

Obr. 5.13 Grafické vyjádření síly F pro frézy č.1,3 sousledné frézování.Obr. 5.14 Grafické vyjádření síly F pro frézy č.2,4 nesousledné frézování.



Obr. 5.15 Grafické vyjádření síly F pro frézy č.2,4 sousledné frézování.

ZÁVĚR

Z provedené studie řezivosti uvedených typů monolitních frézovacích nástrojů pro obráběný materiál ČSN 41 5241.9 s pevností $R_m=1100$ MPa vyplývají tyto závěry:

- zatížení fréz bylo u sousledného frézování ve všech případech nižší než u frézování nesousledného, a to o 10-20%, což činí 20-60 N ;

- ze všech provedených měření vychází, že pro obrábění daného materiálu je vhodnější fréza s označením 10E4S70-MG45, tedy fréza s větší velikostí zrna $0,8 \mu\text{m}$ a s nižším obsahem kobaltu;

- fréza 10E4S70-MG45 má oproti fríze 10E4S70-UF45 s velikostí zrna $0,5 \mu\text{m}$ pozvolnější nárůst řezné síly v čase. Při $v_c=70\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ byl nárůst řezné síly frízy 10E4S70-MG45 u nesousledného frézování $9,6$ N/min a $6,4$ N/min u sousledného frézování. U frízy 10E4S70-UF45 byly tyto hodnoty podstatně vyšší, a to $28,8$ N/min při nesousledném a $6,4$ N/min při sousledném frézování. Při $v_c=120\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ byl nárůst řezné síly frízy 10E4S70-MG45 u nesousledného i nesousledného frézování $33,8$ N/min. U frízy 10E4S70-UF45 byl nárůst řezné síly $48,8$ N/min při nesousledném a $40,7$ N/min při sousledném frézování;

- při prvním testu s $v_c=70\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ došlo za dobu měření u frízy 10E4S70-MG45 k nárůstu celkové síly u sousledného frézování o 13,5% (z 220N na 260N) a u nesousledného frézování o 22% (z 250N na 310N) na rozdíl od frízy 10E4S70-UF45, kde u sousledného frézování došlo k nárůstu o 40% (z 180N na 300N) a u nesousledného až o 53% (z 180N na 360N);

- při druhém testu, kdy byla $v_c=120\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, nastalo u frízy 10E4S70-MG45 při hodnotě celkové síly 380N u nesousledného a 340N u sousledného frézování k jiskření nástroje obr.5.5. Z tohoto důvodu lze dané hodnoty sil pro tento nástroj považovat za limitní. Ukončení životnosti nástroje nastalo po 9,5 minutách frézování (po 18 sousledných a 18 nesousledných průjezdech frízy). Během této doby došlo k nárůstu řezné síly o 48% (z 170N na 330N) u sousledného a 46% (z 200N na 360N) u nesousledného frézování. U nástroje 10E4S70-UF45 byly limitní hodnoty 400N u nesousledného a 350N

u sousledného frézování. Ukončení životnosti nástroje nastalo po 7,5 minutách frézování (po 14 sousledných a 14 nesousledných průjezdech frézy). Během této doby došlo k nárůstu řezné síly o 52% (z 170N na 350N) u sousledného a 43% (z 250N na 400N) u nesousledného frézování;

- porovnáním doby životnosti nástroje bylo zjištěno, že nástroj 10E4S70-MG45 má při $v_c=120\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ o 20% (2 minuty) delší dobu životnosti než nástroj 10E4S70-UF45.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BUMBÁLEK, B. *Fyzikální podstata řezání*. [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/ust/vys.presne.met.obr.pdf> >.
2. FOREJT, M., HUMÁR, A., PÍŠKA, M., JANÍČEK, L. *Experimentální metody*. [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody_cviceni_forejt_piska_humar_janicek.pdf >.
3. FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225s. ISBN 80-214-2374-9.
4. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. 1. vyd. Praha: MM publishing, s. r. o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2
5. HUMÁR, A. *Technologie I: Technologie obrábění – 1. část*. [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.ust.fme.vutbr.cz> >.
6. HUMÁR, A. *Výrobní technologie II*. [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobnTechnologie_II.pdf >.
7. IITM. *Module 2 Mechanics of Machining Version 2 ME IIT*. [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcoursecontents/IIT%20Kharagpur/Manuf%20Proc%20II/pdf/LM-06.pdf> >.
8. KOČMAN, K., PROKOP, J., KOČMANOVÁ, J. *Ekologické a technologické aspekty HSC obrábění*. [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/ekologicke-a-technologicke-aspekty-hsc-obrabeni> >.

9. KOCMAN, K., PROKOP J. *Technologie výroby II.* [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TechnVyroby_II.pdf >.
10. KOLDER, P. *Zkoušky frézovacích nástrojů vyráběných práškovou metalurgií.* [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web: <<https://www.stag.utb.cz/apps/stag/dipfile/index.php?download=2993> >.
11. *Konstrukční ocel ČSN 15 241.* JKZ BUČOVICE, a.s, [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.jkz.cz/ocel.php?ocel=15241&lang=cz> >.
12. *Multicomponent Dynamometer Type 9257B.* KISTLER GROUP, SCHWITZERLAND, [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.kistler.com/javaScript/imgPopup.html?/medias/FX0mOYIO7YoxP85D8YwBEd-30.image.jpg> >.
13. PÍŠKA, M., *Frézování I.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 1999. 191 s. ISBN 80-214-1425-1.
14. PÍŠKA, M. *Machining today: From theory to applications.* [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/info/978-80-214-3777-7.pdf> >.
15. PÍŠKA, M. , A KOLEKTIV. *Speciální technologie obrábění. POLZER, A. HSC, HFC a HPC Technologie.* vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247s. , ISBN 978-80-214-4025-8.
16. POLZER, Aleš. *Monolitní frézovací nástroje pro efektivní obrábění kovových materiálů bez použití chlazení: Disertační práce.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 127 s.

17. PRÁŠIL, T. *Základy strojírenské technologie*. [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web: <http://www.semaco.cz/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=66&mosmsg=Zkou%C5%A1%C3%ADte+se+p%C5%99ipojit+z+neautorizovan%C3%A9+dom%C3%A9ny.+%28www.google.cz%29>.

18. Solid End Mills 2009 screen. PRAMET TOOLS, s.r.o, Šumperk, Česká republika, [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/Milling%202010%20CZ%20prog.pdf>>.

19. ZOUHAR, J. *Vývoj výkonných frézovacích nástrojů s využitím CAD/CAM a analýzy mechanismu tvorby třísky*. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2009. 104 s, 7s příloh.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
a_p	mm	axiální šířka záběru (hloubka řezu)
a_e	mm	radiální šířka záběru
b_D	mm	šířka třísky
h_D	mm	tloušťka třísky
f	mm	posuv na zub
n	-	materiálová konstanta
n	ot/min	otáčky nástroje
m	-	materiálová konstanta
m	-	exponent
k_c	MPa	měrná řezná síla, řezná síla na jednotku plochy řezu
v_c	m/min	řezná rychlost
v_f	mm/min	posuvová rychlost
x_T	-	exponent
y_T	-	exponent
A	-	konstanta
A_α	-	rovina hlavního hřbetu
A_γ	-	rovina čela
A_{sh}	mm ²	plocha roviny maximálních smykových napětí
B	-	konstanta
C	-	konstanta
C_T	-	konstanta
D	mm	průměr frézy
F	N	celková síla vyvolaná řeznou částí
F_{1m}	N	celková síla vyvolaná řeznou částí jednoho břitu
F_{h1}	N	horizontální síla působící na jeden břit v ortogonální rovině
F_c	N	řezná síla
F_{c1}	N	řezná síla působící na jeden břit
F_{cN1}	N	kolmá řezná síla působící na jeden břit
F_{p1}	N	pasivní síla působící na jeden břit
F_{sh}	N	tangenciální síla v rovině stříhu působící na jeden břit
F_{shN1}	N	normálová síla v rovině stříhu působící na jeden břit
$F_{\gamma 1}$	N	tangenciální síla působící na čele nástroje (na jeden břit)

$F_{\gamma N1}$	N	normální síla působící na čele nástroje (na jeden břit)
F_{f1}	N	posuvová síla působící na jeden břit
F_{tr1}	N	transversální síla působící tangenciálně na čele nástroje
F_{v1}	N	vertikální síla působící v ortogonální rovině na jeden břit
F_{xm}	N	celková měřená síla působící v ose x stroje a snímače
F_{x1m}	N	síla působící v ose x stroje a snímače a na jeden břit frézy
F_{ym}	N	celková měřená síla působící v ose y stroje a snímače
F_{y1m}	N	síla působící v ose y stroje a snímače a na jeden břit frézy
F_{zm}	N	celková měřená síla působící v ose z stroje a snímače
N	-	počet zubů
Psh	-	střížná rovina
R	mm	poloměr nástroje
T	°C	teplota materiálu
T	min	celková trvanlivost nástroje
T_{melt}	°C	teplota tavení
T_{room}	°C	teplota tavení materiálu
α_o	°	ortogonální úhel čela
β	°	úhel stoupání šroubovice
δ	°	úhel řezu
Φ	-	úhel roviny stříhu
Φ_1	-	počáteční úhel tvorby třísky
Φ_2	-	koncový úhel tvorby třísky
Φ_3	-	úhel v zadní rovině, odpovídající poloze těžiště plochy nominálního průřezu třísky
γ_o	°	ortogonální úhel čela
λ_t	°	třecí úhel
φ	°	úhel tření
σ_{red}	MPa	reduované napětí
σ_x	MPa	normální napětí
$\sigma_{1,3}$	MPa	hlavní napětí
σ_p	MPa	normální napětí v rovině p
τ_k	MPa	střední kritické skluzové napětí obráběného materiálu

τ_ρ	MPa	smykové napětí v rovině ρ
τ_{xy}, τ_{xz}	MPa	smyková napětí v daných rovinách

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Fotografie změny tvaru a barvy třísek pro frézu 1
Příloha 2	Fotografie změny tvaru a barvy třísek pro frézu 2
Příloha 3	Fotografie změny tvaru a barvy třísek pro frézu 3
Příloha 4	Fotografie změny tvaru a barvy třísek pro frézu 4

Příloha 1: Fotografie změny tvaru a barvy třísek pro frézu 1



Nesousledné frézování

Sousledné frézování

Na fotografii jsou vzorky třísek získané při průjezdu č. 1, 4, 8, 11, 14 (od shora)

Příloha 2: Fotografie změny tvaru a barvy třísek pro frézu 2

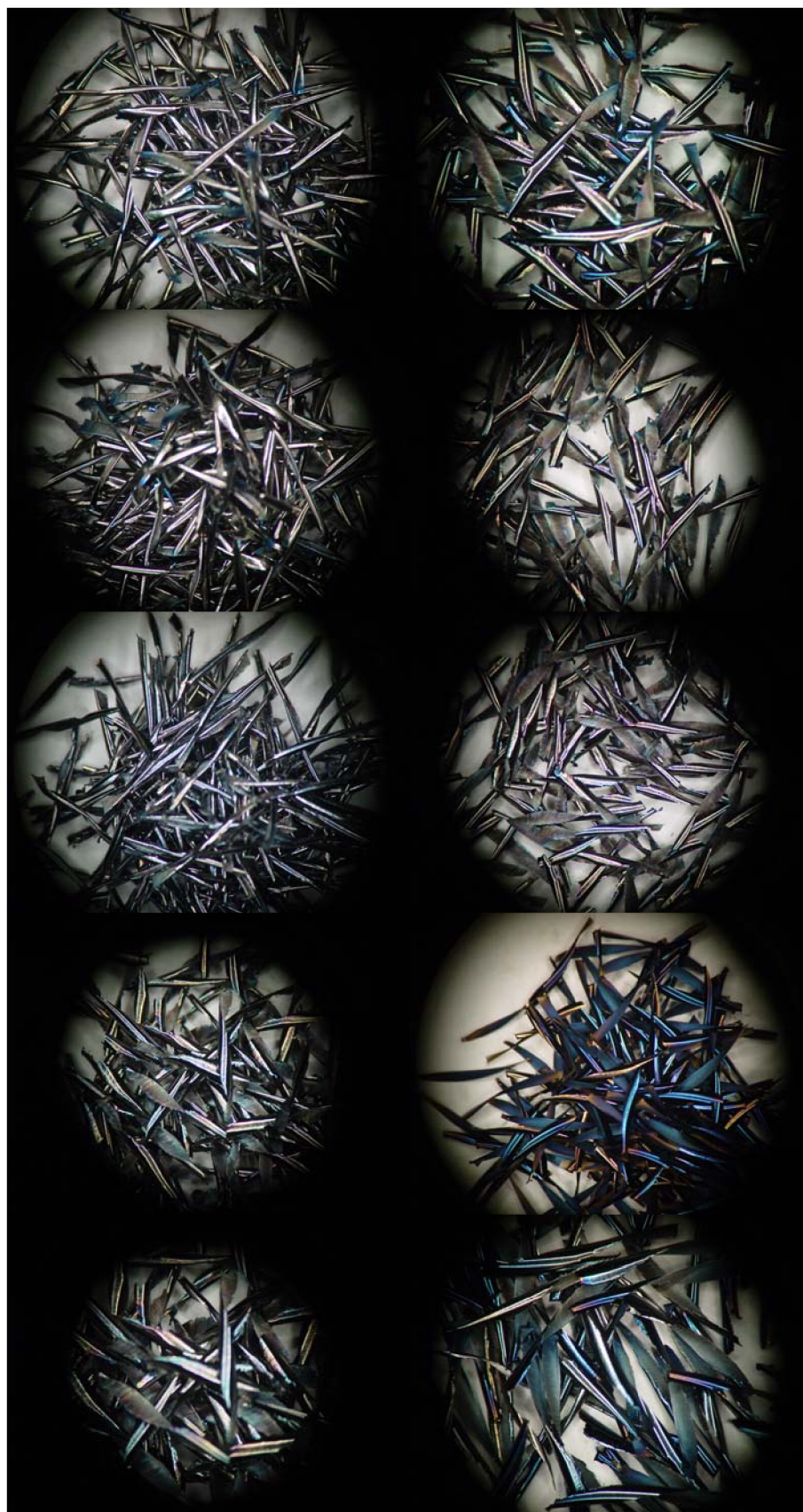


Nesousledné frézování

Sousledné frézování

Na fotografii jsou vzorky třísek získané při průjezdu č. 1, 4, 8, 11, 14 (od shora)

Příloha 3: Fotografie změny tvaru a barvy třísek pro frézu 3

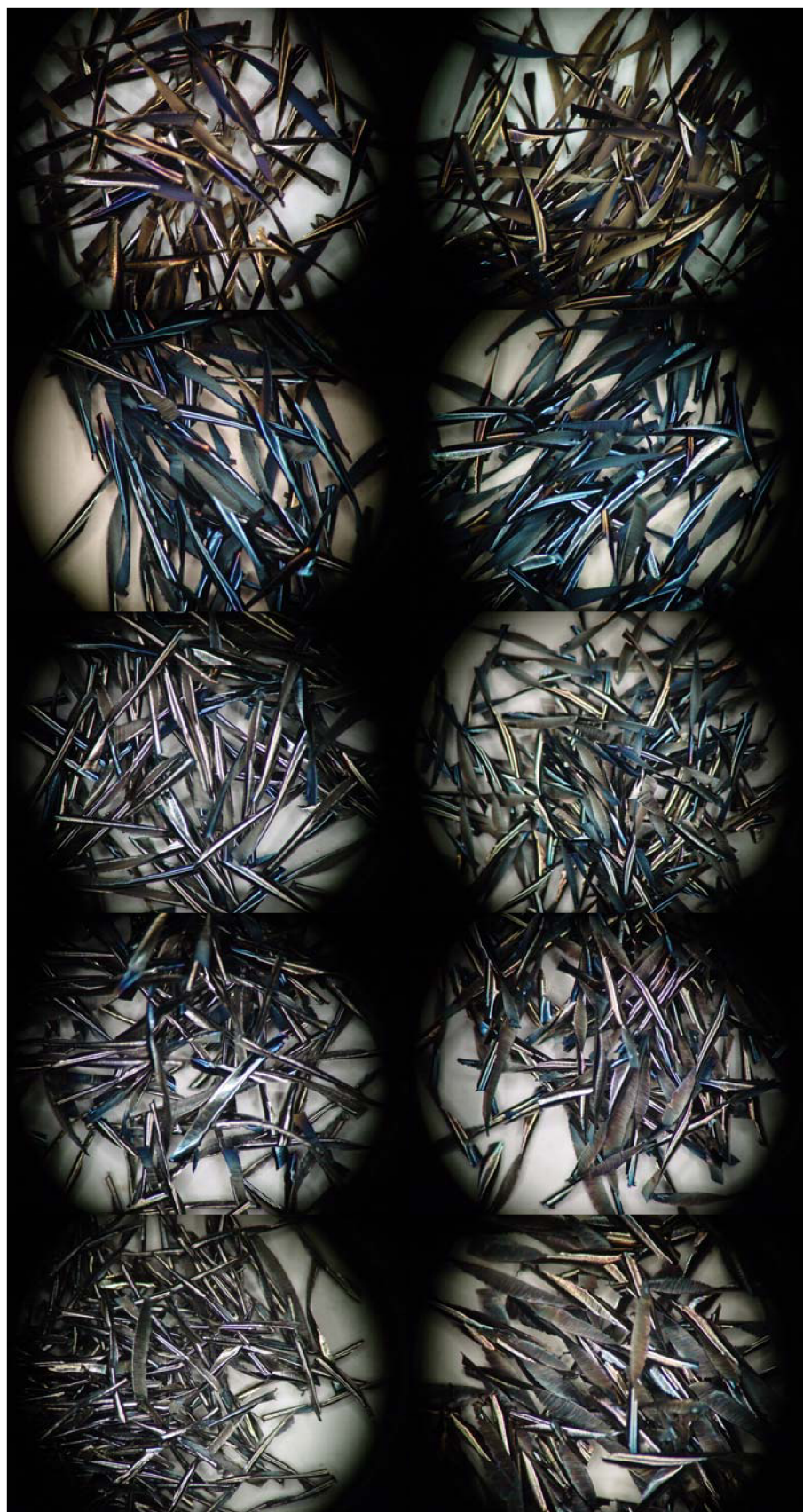


Nesousledné frézování

Sousledné frézování

Na fotografii jsou vzorky třísek získané při průjezdu č. 1, 4, 8, 11, 14 (od shora)

Příloha 4: Fotografie změny tvaru a barvy třísek pro frézu 4



Nesousledné frézování

Sousledné frézování

Na fotografii jsou vzorky třísek získané při průjezdu č. 1, 5, 10, 15, 18 (od shora)