



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA SILOVÉHO ZATÍŽENÍ STOPKOVÝCH FRÉZ S PCD S OHLEDEM NA JEJICH OSTŘENÍ

ANALYSIS OF THE FORCE LOADING OF THE END MILLS WITH PCD CONSIDERING THEIR SHARPENING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Trčka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Tomáš Trčka
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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:

Analýza silového zatížení stopkových fréz s PCD s ohledem na jejich ostření

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V průběhu třískového obrábění je možno měřit aktuální hodnoty silového zatížení řezného nástroje/obrobku. Znalost velikosti silové výslednice a jednotlivých silových složek umožňuje lépe rozhodovat o způsobu programování dané technologie nebo o stavu opotřebení jednotlivých břitů. Měření sil prostřednictvím dynamometrů zpravidla umožňuje sledovat i drobné změny v technologii výroby řezných nástrojů nebo v řezných podmínkách při jejich používání. Na základě odborných analýz je možno provádět změny v konstrukci nástroje.

Cíle diplomové práce:

Stručný rozbor možností měření silového zatížení nástroje a obrobku při třískovém obrábění frézováním.

Návrh experimentálního měření silového zatížení stopkových fréz s PCD pájenými destičkami při obrábění plastů.

Praktické měření silového zatížení dynamometrem při frézování s analýzou rozvoje opotřebení.

Vyhodnocení silového záznamu (data v ASCII formátu).

Seznam doporučené literatury:

DE VOS, Patrick. SECO TOOLS AB. Metal Cutting Theories in Practice. 1. Sweden: Elanders, 2014.

DE VOS, Patrick. SECO TOOLS AB. Opotřebení řezných nástrojů: Praktické zkušenosti. 1. Švédsko: Elanders, 2014.

Traditional machining processes. 1. New York: Springer, 2014. ISBN 978-366-2450-871.

DAVIM, J. Paulo (ed.). Modern machining technology: a practical guide. 1st pub. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-857-9-099-7.

TSCHÄTSCH, Heinz. Applied machining technology. Dordrecht: Springer, c2009, xvii, 398 s. ISBN 978-3-642-01006-4.

SHAW, Milton Clayton. Metal cutting principles. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005, xix, 651 s. ISBN 01-951-4206-3.

QUESADA, Robert. Computer numerical control: machining and turning centers. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005, 548 s. ISBN 01-304-8867-4.

AB SANDVIK COROMANT. Technická příručka obrábění: soustružení - frézování - vrtání - vyvrtávání - upínání nástrojů. 2005.10. Švédsko: Elanders, 2005.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

TRČKA Tomáš: *Analýza silového zatížení stopkových fréz s PCD s ohledem na jejich ostření.*

Měření silového zatížení je ve strojírenství velmi důležitým typem měření, kterým se dokáží analyzovat důležité aspekty v procesu obrábění. Mimo stanovení specifických materiálových konstant, lze analyzovat například různé strategie obrábění, rozdílné geometrie nástrojů nebo stav opotřebení břitů rezných nástrojů. Zejména posledními dvěma aspekty se věnuje předkládaná diplomová práce, kde jsou předmětem experimentu stopkové frézy s PCD destičkami ostřené rozdílnou technologií. V úvodní části jsou teoreticky rozebrány rezné síly, jejich možnosti měření a technologie výroby fréz včetně jejich ostření – WEDM a EDM–G. Jedna kapitola je také věnována frézování plastových materiálu, jelikož použitý materiál obrobku během experimentu byl PVC. První experimentální část je věnována analýze naostřených nástrojů. Následuje měření silového zatížení pomocí piezoelektrického dynamometru, kde je následně analyzován vliv rozdílné geometrie nástrojů. Poslední řešený experiment sleduje, jak se měnily celkové rezné síly jednotlivých fréz naostřených rozdílnou technologií po určitých časových úsecích frézování.

Klíčová slova: Silové zatížení, analýza ostřených destiček, PCD, WEDM, EDM–G

ABSTRACT

TRČKA Tomáš: *Analysis of the force loading of the end mills with PCD considering their sharpening.*

Measurement of the force loading is a significant type of measurement in mechanical engineering applied to analyse important aspects in the machining process. In addition to the determination of specific material constants, it is possible to analyse, for example, various machining strategies, geometries of tools or the degree of wear of the cutting edges of cutting tools. This master's thesis deals especially with the last two mentioned aspects which are subjects of an experiment on end mills with PCD inserts sharpened by a different technology. In the introductory part the cutting forces are theoretically analysed along with their measurement possibilities and the technology of the production of the mills including their sharpening – WEDM and EDM-G. One chapter is concerned with the milling of plastic materials, as PVC was the material used for the workpiece during the experiment. The first experimental part is devoted to the analysis of sharpened tools followed by the measurement of forces using the piezoelectric dynamometer and the subsequent analysis of the influence of the different tool geometry. The last conducted experiment monitors how the overall cutting forces of individual end mills sharpened by different technology changed over specific milling time slots.

Keywords: Force loading, analysis of sharpened inserts, PCD, WEDM, EDM–G

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TRČKA, Tomáš. *Analýza silového zatížení stopkových fréz s PCD s ohledem na jejich ostření.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 83 s. 7 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 26.5.2017

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce a panu Čechovi a panu Mgr. Jílkovi za pomoc při měření experimentální části. Dále chci velmi poděkovat společnosti VYDONA s.r.o. za vyrobené nástroje a poskytnutý materiál a zejména celé rodině a blízkým za podporu během studia.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
Úvod.....	8
1 Technologie válcového čelního frézování	10
2 Možnosti měření silového zatížení při frézování.....	15
2.1 Přímé měření sil.....	15
2.2 Nepřímé měření sil.....	21
3 Diamant jako průmyslový supertvrdý materiál	22
4 Ostření PCD destiček.....	31
4.1 WEDM.....	31
4.2 EDM-G	35
5 Geometrie stopkových válcových čelních fréz s PCD pájenými destičkami	38
6 Technologie výroby stopkových fréz s PCD pájenými destičkami.....	40
7 Aspekty obrábění plastů.....	44
8 Experimentální část.....	46
8.1 Konstrukce a ostření experimentálních fréz s PCD destičkami.....	48
8.2 Analýza vyrobených nástrojů	53
8.3 Porovnání rozdílných geometrií jednotlivých fréz	61
8.4 Vliv řezných podmínek na kvalitu obrobeného povrchu řešené pomocí DoE	66
8.5 Analýza sil při frézování v závislosti na délce obrábění	70
Závěry	75
Seznam použitých zdrojů.....	76
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	81
Seznam příloh	83

ÚVOD

Díky novým technologiím výroby a novým materiálům se vyrábějí stále lehčí, tvarově složitější a výrobně přesnější součásti, u kterých jsou požadovány specifické funkční vlastnosti. Avšak součásti z takových materiálů mohou mít specifické parametry obrobitelnosti. Příkladem jsou kompozity na bázi uhlíkových vláken. Mezi nejčastěji používanými materiály pro strojírenský průmysl jsou však kovy. Mimo klasické technologie tváření a obrábění je v posledních letech rozmach tzv. aditivních technologií. I v případě plastových materiálů se tato technologie využívá v procesech Rapid Prototyping. Mimo tuto moderní prototypovou výrobu se plastové součásti vyrábí vstřikováním, extrudováním či lisováním.

Každá technologie má své výhody i nevýhody. Obráběcí operace vynikají svou přesnou výrobou, ať už z hlediska rozměrové nebo geometrické přesnosti, tak kvalitou obrobeného povrchu. Využití nachází pro výrobu součástí nejen v oblasti kovových a nekovových materiálů, ale také právě v případě plastů i dřeva. Obrábění plastových součástí se využívá pro výrobu přesných součástí nebo stejně jako aditivní technologie pro vytvoření rychlého prototypu, kde by výroba formy byla zdlouhavá a finančně nákladná. Využití nachází také jako dodatečná technologie opracování pro odstranění přetoků nebo vtokových kanálů u běžných technologií pro výrobu plastových součástí. Obráběcí operace zahrnují spoustu proměnných, které vstupují do jeho procesu. Řízenými proměnnými mimo volbu konkrétní technologie, daného stroje nebo řezných podmínek, je i nástrojový materiál, který je nejčastěji volen dle materiálu obrobeného [1, 2].

Lidské populaci je všeobecně znám materiál označovaný jako diamant. Jedná se o nejtvrděší známý minerál na světě. Vzhledem k jeho uvedené vlastnosti byl zaimplementován i do obráběcího procesu jako řezný materiál. Používal se přírodní diamant, který byl poté nahrazen diamantem umělým – syntetickým. Jeho aplikace je omezena pouze na neželezné materiály, ale i vzhledem k takovému omezení je velmi důležitým řezným materiálem, který má řadu výhod oproti nástrojům ze slinutých karbidů a jiným. Nejpoužívanějším diamantovým materiálem pro frézovací operace je PCD, což je syntetický polykrystalický diamant vyrobený syntézou za vysokých teplot a tlaků [3, 4, 5].

Každý nástroj používaný při obráběcích operacích musí být vhodně naostřen. To platí i pro diamant. V dnešní době existuje více variant výroby, respektive ostření, dané součástky pomocí rozdílných technologií. Diamant se často ostří elektrickými technologiemi. Nejčastěji drátovou elektroerozí (WEDM) nebo elektroerozivním broušením (EDM–G). Na obr. 1 lze vidět příklad stopkového nástroje s PCD destičkami, který byl ostřen technologií EDM–G [6, 7, 8].

Pro zlepšování obráběcích procesů je vhodné využít nejrůznější experimentální metody. Zlepšením procesu se myslí, zvýšení produktivity při zachování optimálních výrobních podmínek nebo ponechání stejné produktivity výroby, přičemž se zvýší kvalita obrobených součástí. Je tak podstatné analyzovat nejrůznější mechanismy během řezného procesu, které jsou nejen podstatné pro vývoj, ekonomiku a optimalizaci dané operace, ale také pro zajištění bezpečnostních podmínek během obrábění. Experimentální metody jsou ty, které potvrzují teoretické vztahy nebo ty, které vytvářejí „své vlastní“ empirické vztahy. Lze jimi však objasnit – změřit – daný proces bez ohledu na rovnice. Teoretické vztahy ve většině případů nejsou schopny zachytit proměnlivost výrobního procesu, změnu teplot, opotřebování stroje a jiných nežádoucích proměnných – tzv. experimentálních šumů. Pomocí experimentálních metod, lze

měřit nejrůznější veličiny jako teplotu, akustický tlak, sílu aj. Silového měření se často vyskytuje v procesu obrábění. Lze jim například zjistit, jaké se objevují změny při modifikacích geometrie nástroje nebo jak ovlivňují řezné parametry silové zatížení procesu. Silové složky mohou rozhodovat o výběru vhodné strategie při programování drah dané součásti a také lze analyzovat stav opotřebení řezného nástroje [1, 10, 11].

Tato diplomová práce se zabývá výrobou stopkových válcových čelních fréz ostřených dvěma metodami elektroerozivního obrábění. Vyrobeny byly stopkové frézy s destičkami z PCD s rozdílnou geometrií a naostřeny rozdílnou technologií – WEDM a EDM–G. Po samotné výrobě byla uskutečněna řada měření nástrojů. Nástroje byly vyváženy, byly změřeny nástrojové úhly a provedeny některé analýzy výbrusů naostřených hřbetů destiček. Následovalo experimentální měření silového zatížení. Byla vyhodnocena odlišná geometrie fréz, lišící se konkrétně v axiálním úhlu čela. Následoval úplný faktoriální experiment prováděný pomocí DoE, kde se sledoval vliv řezných parametrů a kinematiky frézování na kvalitu obrobeneho povrchu. Pomocí vhodně zvolených řezných parametrů byl frézami obráběn plastový obrobek (PVC) a vždy po určitém času obrábění bylo provedeno měření na silové zatížení. Toto měření mělo za úkol zjistit, jak se měnily řezné síly a jaký vliv má samotná technologie ostření na trvanlivost nástroje.



Obr. 1 Stopková fréza s PCD destičkami [9].

Předkládaná diplomová práce je vytvořena ve spolupráci s firmou Vydoná s.r.o., která sídlí v Pravčicích u Kroměříže. Firma se zabývá výrobou, prodejem, servisem nástrojů a nástrojových systémů na dřevo, plast a také kov. Vyvíjejí a vyrábí kromě standardních nástrojů zejména nástroje dle konkrétních požadavků zákazníka. Na trhu je možné se s jejich výrobky setkat už více než patnáct let. Kromě moderně zařízeného technologického parku pro výrobu nástrojů, disponují i velmi dobře zařízenou metrologickou základnou pro detailní měření a kontrolu nejen svých výrobků, jak kontaktními, tak bezkontaktními metodami měření.

1 TECHNOLOGIE VÁLCOVÉHO ČELNÍHO FRÉZOVÁNÍ

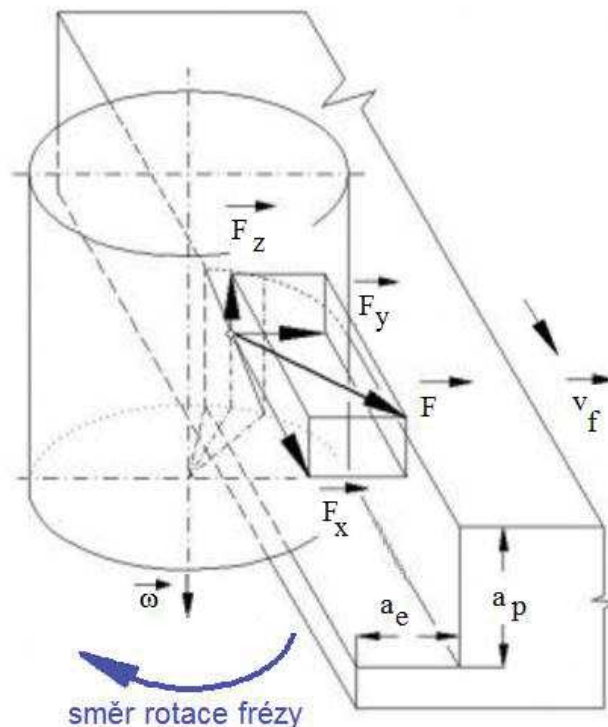
Válcové čelní frézy jsou takové, které mají ostří jak na válcové ploše nástroje, tak na čelní. Jejich použití je pro frézování současně dvou a sebe kolmých ploch – viz obr. 1.1 [12].

Výsledný řezný pohyb při frézování definovaný výslednou efektivní rychlostí v_e je složen ze dvou dílčích pohybů. Hlavní – rotační – řezný pohyb koná fréza definovanou řeznou rychlostí v_c , zatímco vedlejší přímočarý pohyb – posuv – definovaný posuvovou rychlostí v_f koná obrobek. U moderních frézovací center jsou posuvy plynule měnitelné a zároveň se realizují ve více směrech současně, čímž často vedlejší pohyb koná i nástroj (fréza). Na obr. 1.1 lze vidět kinematiku frézování, kde vektor ω – úhlová rychlost – definuje směr rotace frézy naznačený modrou barvou a současně řeznou – obvodovou – rychlost v_c . Tato rychlost má v uvažovaném bodě ostří vždy tečný směr vzhledem k rotačnímu pohybu nástroje. Vektor v_f definuje posuvovou rychlost obrobku. V případě naznačeného obr. se jedná o sousledné válcové čelní frézování, jelikož směr řezné a posuvové rychlosti je ve stejném smyslu. Šířka záběru hlavního ostří nástroje a_p se nastavuje ve směru osy frézy, zatímco radiální šířka záběru a_e je definovaná v radiálním směru frézy dle obr. [1, 12, 13, 14, 15].

Vztah mezi výslednou efektivní, posuvovou a řeznou rychlostí ve skalárním vyjádření je definován jako [1]:

$$v_e = \sqrt{(v_c \cdot 10^3)^2 + v_f^2} \quad (1.1)$$

kde: v_e [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] - výsledná efektivní rychlost,
 v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] - řezná rychlost,
 v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] - posuvová rychlost.



Obr. 1.1 Schematický model působících sil při sousledném válcovém čelním frézování [14].

Řezný proces frézování je přerušovaný, díky čemuž je tříska dělená. Jednotlivé zuby nástroje do materiálu postupně vnikají a poté opět řez opouští [1, 12, 13, 15].

Při řešení průběhu silového zatížení během obráběcího procesu se objevují dva pojmy – síly a odpory. Síly označované jako F jsou síly obrábění, kterými působí nástroj na obrobek. Odpory se označují síly, kterými působí obrobek na nástroj. Tyto síly souvisí s vnitřním řezným odporem materiálu obrobku. Jinými slovy stav napjatosti při obrábění v obráběném materiálu způsobuje řezný odpor, který musí síla obrábění F při řezném procesu stále překonávat. Odpory se označují R . Takto je v teorii obrábění dohodnuta konvence. Obě síly jsou stejně velké, ale opačně orientované dle vztahu (1.2) [1, 13, 15].

$$F = -R \quad (1.2)$$

Výsledná řezná síla F se často rozkládá do dílčích složek – směrů. Ty umožňují důkladnější seznámení s průběhem zatížení v různých směrech, které jsou důležité například pro dimenzování vhodných pohonů obráběcích strojů nebo pro detailní analýzu zatížení řezných nástrojů. Na obr. 1.1 je výslednice sil – F – rozdělena do jednotlivých os stroje x , y a z . Síly v jednotlivých osách tvoří ortogonální systém [1, 13, 15].

Skalární vztah mezi jednotlivými složkami sil má tvar [1, 13]:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1.3)$$

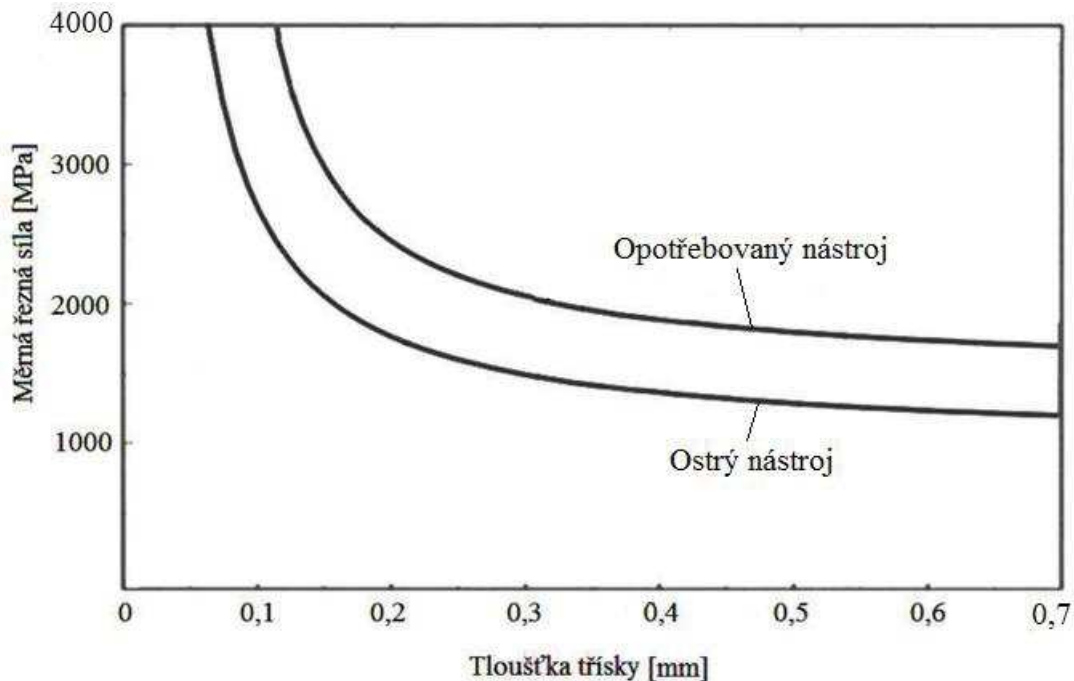
Stejně jako se v materiálových listech uvádějí určité pevnostní charakteristiky materiálu, tak se v teorii obrábění často definuje měrná řezná síla neboli měrný řezný odpor, který má základní tvar [1, 13]:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (1.4)$$

Jedná se o veličinu definující velikost měrné řezné síly, která je nutná k překonání kompaktnosti obráběného materiálu řezným procesem. Ze vztahu (1.4) lze vidět, že je definovaná jako síla působící ve směru hlavního řezného pohybu F_c vztahenou na průřez třísky A_D o velikosti 1 mm^2 , což značí že jednotkou je [MPa]. Tím se dá říct, že se jedná o plošnou sílu neboli tlak na břit nástroje. Hodnota k_c je věrohodnější než hodnota F_c , jelikož měrná řezná síla zohledňuje plochu odebíranou během řezného procesu [1, 10, 13, 15]. Hodnota k_c je zejména závislá na [1, 10, 13, 15]:

- fyzikálních vlastnostech materiálu obrobku (zejména tvrdost a pevnost),
- řezných podmínkách – zejména na velikosti průřezu (tloušťky) třísky a řezné rychlosti,
- řezném prostředí,
- mikro/makro geometrii řezného nástroje apod.

S rostoucí tloušťkou třísky se hodnota k_c snižuje, což lze vidět na obr. 1.2. Zmenšující se tloušťka třísky způsobuje zvětšení poměrné hodnoty deformační práce, jelikož se zvětšuje stupeň zpevnění materiálu a podíl pasivních prací pro tvorbu třísky [1, 10].



Obr. 1.2 Závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky [10].

Daný obr. vychází ze vztahu (1.5) [1, 10].

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h^{mc}} = \frac{k_{c1}}{(f \cdot \sin \kappa_r)^{mc}} \quad (1.5)$$

kde: h [mm] - tloušťka třísky

$$h = f \cdot \sin \kappa_r, \quad (1.6)$$

f [mm] - posuv,

κ_r [°] - úhel nastavení hlavního ostří nástroje,

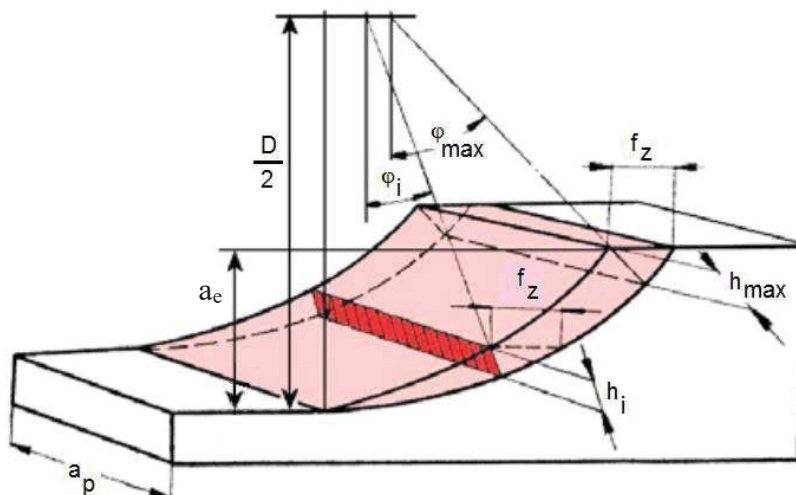
k_{c1} [MPa] - měrná řezná síla odpovídající tloušťce třísky 1 mm,

mc [-] - exponent pro výpočet měrné řezné síly.

Ze vzorce (1.6) lze vidět, že zmenšující úhel κ_r při stejném posuvu f snižuje tloušťku třísky h a v konečném důsledku zvyšuje hodnotu k_c . Poměrně velmi malý vliv na hodnotu k_c má šířka odebírané třísky [1, 10, 13].

Hodnoty k_{c1} a hodnoty exponentu mc , který závisí na fyzikálních vlastnostech materiálu obrobku a řezných podmínkách – hlavně tloušťce třísky h – uvádějí zejména výrobci řezných nástrojů (např. Sandvik Coromant) pro jednotlivé materiály. Exponent mc se pohybuje nejčastěji kolem hodnoty 0,25. Hodnoty těchto konstant byly stanoveny experimentálně [1, 10].

Při rozboru silového zatížení je nutné vzít v úvahu spoustu aspektů. Vedle počtů zubů v záběru, materiálu obrobku, patří mezi hlavní aspekty již zmíněná velikost průřezu odebírané třísky. Ta se v průběhu frézování neustále mění a díky tomu se mění i silové zatížení během celého procesu. Tloušťka třísky h_i závisí na úhlu pootočení frézy φ_i , což lze vidět na obr. 1.3 [1, 10, 13, 15].



Obr. 1.3 Průřez třísky při frézování [13].

Pro případ válcového čelního frézování se zuby ve šroubovici s uvažováním jednoho zubu v záběru se průřez třísky A_D vypočítá dle vztahu (1.7) [1].

$$A_D = f_z \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \cdot \sqrt{R_f^2 + \left(\frac{s_{\S}}{2 \cdot \pi}\right)^2} \quad (1.7)$$

kde: f_z [mm] - posuv na zub,
 φ_1, φ_2 [°] - úhly definující záběr břitu, viz obr. 1.4,
 R_f [mm] - poloměr frézy,
 s_{\S} [mm] - stoupání šroubovice.

Řezná síla se poté vypočítá ze vztahu (1.8) pro elementární řeznou sílu, která je funkcí měnící se tloušťky třísky h [1].

$$dF_c(h) = dA_D \cdot k_c \quad (1.8)$$

Tento vztah vede zpravidla k numerické integraci [1].

Z obrázku 1.2 lze také vidět, že s postupným opotřebením frézy se hodnota k_c a tudíž i F_c vyjádřená v [N] zvyšuje, čímž se zvyšuje i potřebný řezný výkon P_c pro frézování dle vzorce (1.9) vyjádřený v [kW] [1, 13, 15].

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} \quad (1.9)$$

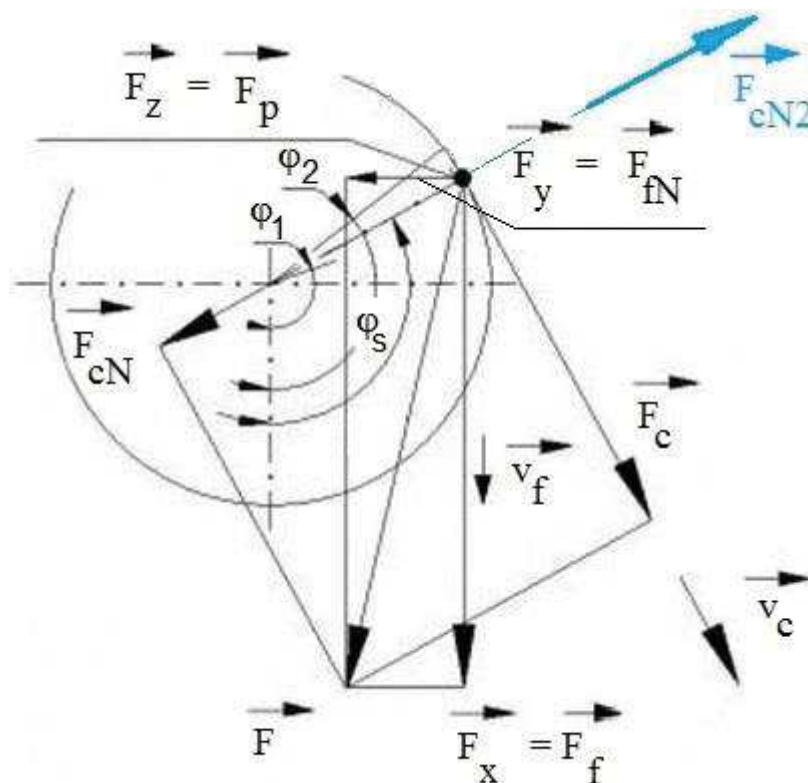
kde řezná rychlost v_c se vypočítá dle vztahu (1.10).

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1.10)$$

kde: D [mm] - řezný průměr nástroje,
 n [min^{-1}] - počet otáček vřetene.

Stav opotřebení břitu má vliv na velikost deformační práce i práce vzniklé třením [13, 15].

Dobrym příkladem měnícího se průběhu jednotlivých složek sil jsou nástroje s pozitivní geometrií čela. Například frézy se zuby ve šroubovici, kdy na počátku frézování je fréza vtahována do řezu díky pozitivnímu úhlu čela, zatímco po značném opotřebení se od obráběného povrchu odtláčuje. Na obr. 1.4 lze vidět rozklad sil pro frézu se zuby ve šroubovici, kde normálová složka celkové řezné síly F_{cN} vtahuje zub do řezu. Při opotřebení bude tato složka mít opačný směr a bude zub odtláčet z řezu, což představuje modře naznačená síla $-F_{cN2}$. Síly se nejčastěji rozkládají podle směru řezné rychlosti v_c nebo podle směru posuvové rychlosti v_f . V druhém případě jsou často jednotlivé složky shodné se změřenými silovými složkami v jednotlivých osách stacionárního dynamometru – viz obr. 1.4. Úhel φ_s definuje střední úhel záběru frézy. Celkové zvýšení řezných sil při opotřebení se běžně dosahuje 200 %. Kladnou vlastností opotřebovaných fréz je zvýšení stability řezného procesu, jelikož se zvýší třecí plocha mezi nástrojem a obrobkem. Naopak nevýhodou je zejména horší kvalita obrobeného povrchu [1, 10].



Obr. 1.4 Silový rozklad při sousledném frézování se zuby ve šroubovici [14].

2 MOŽNOSTI MĚŘENÍ SILOVÉHO ZATÍŽENÍ PŘI FRÉZOVÁNÍ

Během analýzy řezného procesu je důležité kvantifikovat řezné síly, které vznikají za daných řezných podmínek. Jejich měření a vyhodnocení umožňuje například [11, 15]:

- identifikovat stupeň opotřebení řezných nástrojů,
- rozhodovat o vhodném upnutí obrobku,
- získat hodnoty pro určení příkonu obráběcího stroje,
- optimalizovat řezné podmínky,
- vyhodnotit specifické materiálové konstanty (např. měrnou řeznou sílu),
- ověřit simulace obrábění získané z MKP (FEA),
- optimalizovat geometrii či povlak řezných nástrojů aj.

Frézování je dynamickým procesem. Tzn., že síly stále kolísají v závislosti na čase i při konstantních řezných podmínkách. To je dáno zejména mechanismem tvorby třísky a rozptylem mechanický vlastností obrobku. Proto je vhodné experiment vícekrát opakovat [15].

Měřit síly či odpory během řezného procesu je možné přímo nebo nepřímo. Pro přímé měření existuje mnoho principů, avšak nejpoužívanější pro měření řezných sil je piezoelektrický dynamometr, zatímco pro nepřímé měření se využívají wattmetrické soustavy [1, 15, 16].

2.1 Přímé měření sil

Dynamometrem se nazývá přístroj, který slouží pro měření sil a momentů během řezného procesu prostřednictvím deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek. Dynamometry musí zaručit zejména nezávislost měřené veličiny – reprodukovatelnost, maximální přesnost a citlivost v měřeném rozsahu. Konstrukce dynamometrů a jeho měřících deformačních elementů musí také zajistit, aby se jednotlivé složky celkové řezné síly vzájemně neovlivňovaly [15, 16, 17].

Celá aparatura pro měření řezných sil se nejčastěji skládají ze 3 funkčních částí [15, 17]:

- měřícího – pružného členu, který zaznamená a reaguje na vnější zatížení (deformací, změnou polohy apod.),
- snímače, který mění mechanickou veličinu změny měřícího elementu na určitou hodnotu analogického parametru,
- a přijímače. Ten má za úkol zesilovat a zpracovávat signál ze snímače.

Základní klasifikace dynamometrů může být podle počtu měřených složek síly (1–složkové, 2–složkové, 3–složkové či pro měření momentů). Dále se mohou dělit dle konkrétní obráběcí operace (soustružení, broušení, vrtání apod.) V této kapitole je pozornost zaměřena na dynamometry určené pro operaci frézování [15, 16].

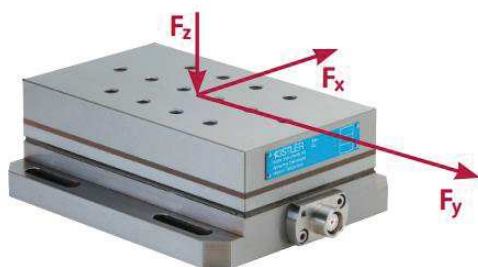
Jedno z dalších dělení je založeno na typu přenosu působící síly z deformačního členu na indikační. Takové dynamometry mohou být [15]:

- mechanické
- pneumatické
- hydraulické
- elektrické
 - kapacitní
 - odporové
 - indukční
 - na principu piezoelektrického jevu
- optické atd.

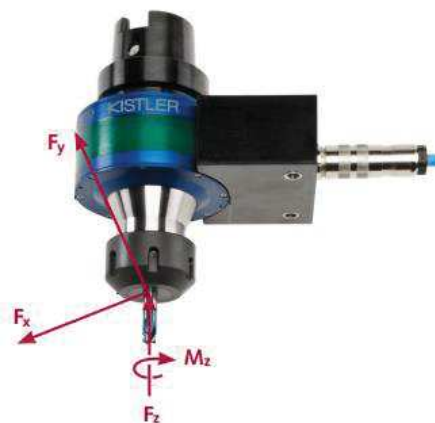
Mechanické dynamometry se nejčastěji používají pro cejchování jiných typů dynamometrů, jelikož u nich lze ve většině případů vyloučit nežádoucí šum. Působící síla se přenáší na měřící prvek, kterým může být například číselníkový úchylkoměr. Hlavní nevýhodou mechanických snímačů je velká setrvačnost systému. Tím je nelze použít pro dynamické měření. U hydraulických dynamometrů je princip založen na změně tlaku v kapalině, která je měřena pomocí manometru. Nevýhodou je nízká citlivost, velká setrvačnost, proto se také nepoužívají pro dynamické zkoušky [15].

Mezi nejpoužívanější dynamometry v technické praxi se řadí elektrické dynamometry. Jejich výhodou je ve snadném přenosu signálu, miniaturních měřících elementech, čistotě provozu, možnosti snímat rotující/pohybující součásti či vhodně volit frekvenci zachycených signálů. Elektrické dynamometry se dají rozdělit na parametrické systémy, kde se mění jeden daný parametr elektrického obvodu (kapacita, odpor nebo indukčnost) a na systémy generátorové. Ty jsou založeny na vzniku elektrické veličiny při deformaci elementu – nejznámější je piezoelektrický jev [15, 17].

Pro operaci frézování jsou nejpoužívanější dynamometry založené právě na principu piezoelektrického jevu. Všechny dynamometry od fy. Kistler jsou založeny na tomto principu. Pro měření řezných sil při procesu frézování se využívají buďto stacionární – viz obr. 2.1, které jsou většinou upínány na upínací stůl stroje nebo rotační dynamometry – viz obr. 2.2, které jsou upínány do vřetena stroje. Stacionární dynamometry jsou spojovacím prvkem mezi upínacím stolem stroje a obrobkem. U rotačních dynamometrů nelze minimalizovat vliv teploty



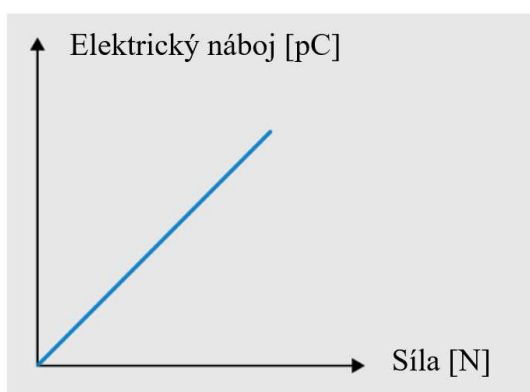
Obr. 2.1 Stacionární dynamometr [16].



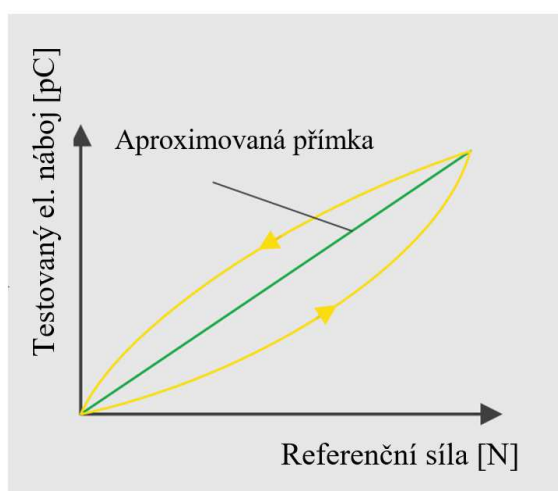
Obr. 2.2 Rotační dynamometr [16].

na měření, zatímco u stacionárních ano. Rotační jsou vhodné pro frézování či vrtání, kdy se měří síly F_x , F_y , F_z a moment v ose z – M_z . Na obr. 2.2 je takový rotační 4-složkový dynamometr, který díky stupni vyvážení menší než G 2,5 umožňuje použít otáčky až ve výši $20\,000\text{ min}^{-1}$. Upínání do vřetene je v tomto případě pomocí HSK. Na rozdíl od stacionárních dynamometrů má rotační dynamometr pouze jeden multikomponentní senzor. Navíc rotor už obsahuje zesilovač náboje – tzn., že obsahuje elektroniku pro převod elektrického náboje na napětí a také telemetriální elektroniku pro převod bezkontaktního signálu na stacionární část – stator (tzv. kotvu). Rotor dynamometru rotuje zároveň s nástrojem. Tzn., že souřadný systém se otáčí kolem osy z společně s nástrojem, čímž se měří okamžité normálové, řezné a pasivní složky celkové řezné síly. To umožňuje přímou kvantifikaci mechanického zatížení frézovacího nástroje, což je oproti stacionárnímu dynamometru obrovská výhoda, kterou lze také využít u souvislého 5i-osého frézování. V případě stacionárního dynamometru se musí ve většině případů jednotlivé normálové a řezné složky síly dodatečně přepočítávat. Koncepce stacionárního dynamometru umožňuje měření silové zatížení pouze prostřednictvím obrobku. Moment u rotačního dynamometru je měřen přímo, což umožňuje přesné měření a posouzení například stavu opotřebení. Tento dynamometr také umožňuje použít vnitřní chlazení s maximálním tlakem 70 barů. Lze toho využít např. u frézovacích operacích v leteckém průmyslu, kde vysoká vzorkovací frekvence také umožňuje tento dynamometr použít při HSC frézování [11, 16].

Piezelektrické snímače jsou založeny na krystalu, který při zatížení produkuje elektrický náboj. Ten je přímo úměrný působící síle – viz obr. 2.3. Výsledná zatěžující charakteristika ovšem není nikdy zcela lineární. Je pouze vhodně aproximována ze skutečných naměřených hodnot, tak aby vždy procházela počátkem, což lze vidět na obr. 2.4. S touto nepřesností souvisí citlivost senzoru vyjádřeného v jednotkách $[\text{pC}\cdot\text{N}^{-1}]$. Vzhledem k principu piezelektrického snímače, se během statického zatížení objevuje malý drift. Hodnota driftu zůstává vždy stejná bez ohledu na velikost působící statické síly. Tím chyba vzniklá měřením je velká u malých sil působících po dlouhou dobu. U velkých statických sil to tedy nezpůsobuje velký problém. Piezelektrické snímače síly jsou vhodné zejména pro dynamicky se měnící síly, kde díky své tuhosti vynikají velmi malými deformacemi pod zatížením. To vede k vysoké rezonanční frekvenci, která je velmi vhodná pro dynamické měření [15, 16, 17].

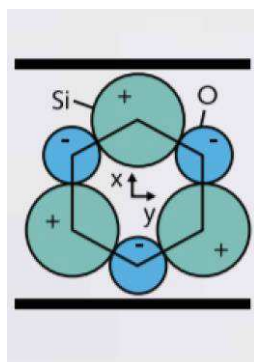


Obr. 2.3 Elektrický náboj je přímo úměrný působící síle – teorie [17].

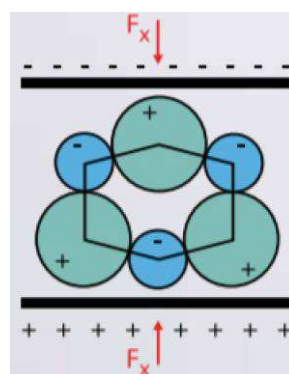


Obr. 2.4 Skutečný průběh závislosti el. náboje na působící síle [17].

Piezelektrický efekt nastává u piezelektrického materiálu (například křemene, materiálu na bázi titanicitanu barnatého, Seignettovy soli apod.), který při mechanickém zatížení produkuje kladný nebo záporný elektrický náboj. Náboj je generován, jelikož kladné a záporné krystalové mřížky jednotlivých prvků jsou vůči sobě přemístěny. Tím se vytvoří elektrický dipól. Tento princip lze vidět na obr. 2.5 a 2.6, kde je znázorněn nezatížený a zatížený krystal křemene [15, 17].

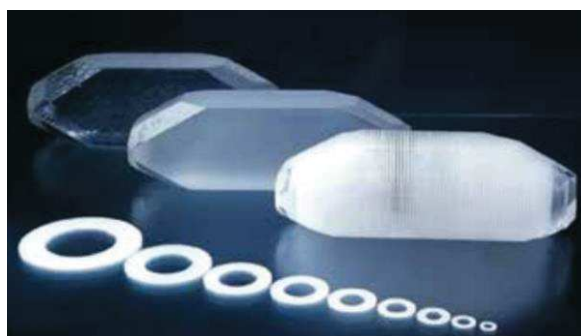


Obr. 2.5 Nezatížený krystal [17].

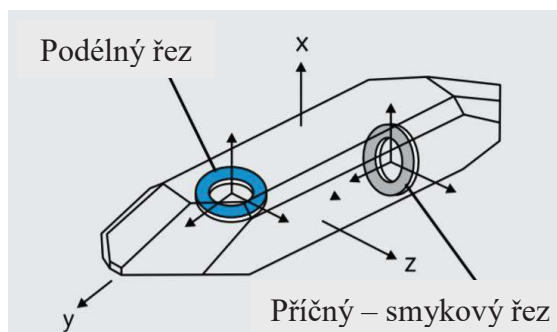


Obr. 2.6 Krystal pod zatížením [17].

Většina piezelektrických senzorů pracuje s měřicím elementem ve tvaru tenkého disku získaného z krystalu – viz obr. 2.7. V závislosti na tom, zda jsou měřeny tlakové či smykové síly, jsou disky vyřezány z krystalu pod různými úhly. Podélným řezem se získají disky, které jsou určeny jako senzory pro měření tlakových – tahových sil, zatímco disky z příčného řezu jsou určeny pro měření smykových sil – viz obr. 2.8 [15, 17].

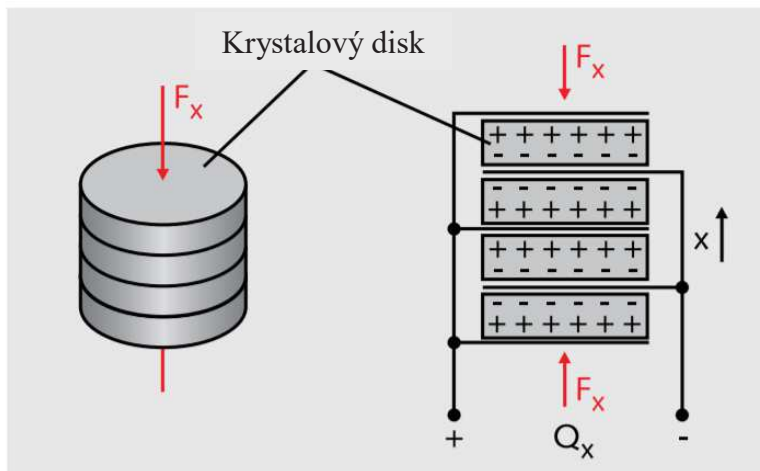


Obr. 2.7 Krystalové disky jako měřicí elementy [17].



Obr. 2.8 Možné řezy disků v krystalu [17].

Velikost elektrického náboje generovaného jedním krystalovým diskem závisí pouze na zvoleném piezelektrickém materiálu, a ne na jeho geometrických rozměrech. K získání senzorů s vyšší citlivostí se využívá pokládání několika disků na sebe, přičemž jsou paralelně elektricky spojené. To lze vidět na obr. 2.9, kde působící síla F_x generuje náboj Q_x . Druhou možností, kterou vynalezla a nabízí firma Kistler, je použití speciálního materiálu, který má vyšší citlivost a teplotní stabilitu než křemen, čímž lze měřit velmi malé hodnoty působících sil [17].



Obr. 2.9 Možnost zvýšení citlivosti senzoru [17].

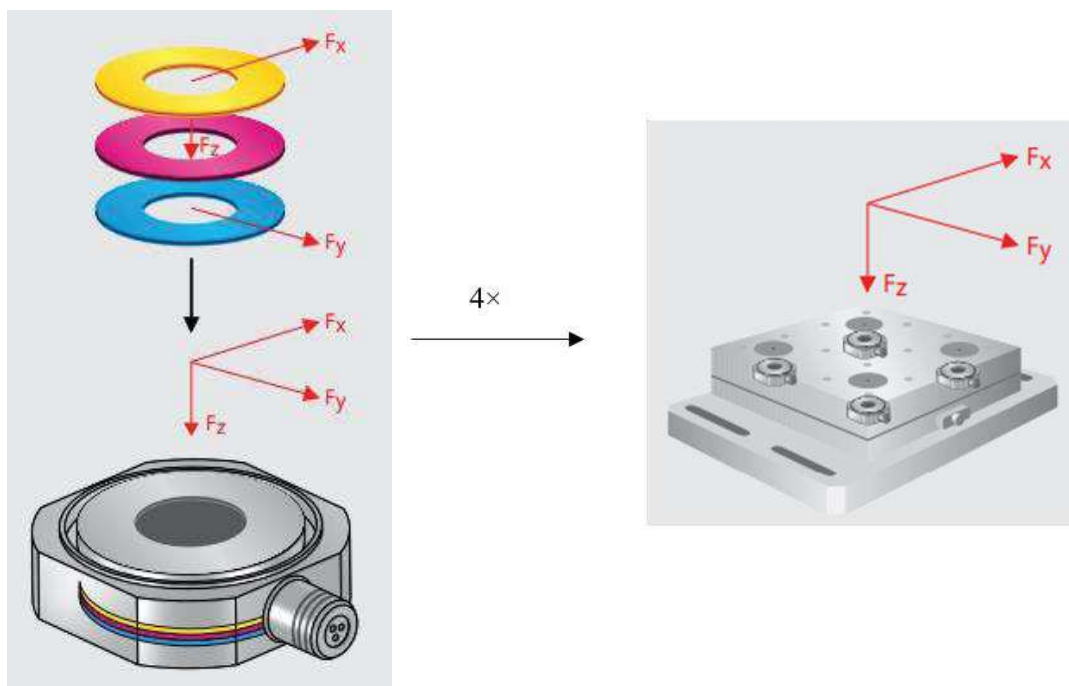
Piezoelektrický měřicí řetězec stacionárního dynamometru se skládá ze snímače, vysokoizolačního propojovacího kabelu pro přepravu malých nábojů k nábojovému zesilovači, který následně převede signál náboje na signál napětí [16, 17].

U propojovacího kabelu je izolační odpor vyšší než $10^{13} \Omega$. Vnitřní drát je obalen PTFE elektrickým izolantem, který redukuje efekt driftu na minimum. Další vrstvou je speciální opláštění vodivým grafitem, který minimalizuje triboelektrický efekt. Ten nastává při vzájemném pohybu kabelu vůči jinému materiálu – zejména při vibracím, kdy může získat určité množství elektrického náboje, který by měl vliv na přesnost měření. Předposlední vrstvou je elektrické stínění a poslední je obal z korozivzdorné oceli, který chrání celý kabel před poškozením. Dynamometrické kabely jsou ve verzích jako 3 nebo 8 drátové [17].

Nábojový zesilovač slouží pro převod nábojového signálu na napěťový, který je poté dále vyhodnocen. Změnou rozsahu kondenzátoru, který je součástí zesilovače, je možné změnit měřený silový rozsah. Například stejným snímačem lze měřit rozsah sil 10 kN anebo 100 N přičemž, poměr signálu k šumu bude v obou případech na dobré úrovni [11, 16, 17].

Na obr. 2.10 vlevo lze vidět 3–složkový piezoelektrický silový senzor, který měří všechny 3 ortogonální silové složky ve stejný okamžik. Obsahuje 3 krystalové disky, kde každý disk má za úkol zachytit jednu sílu v daném směru – tlakovou a tahovou sílu ve směru osy z ($\pm F_z$) stejně jako pozitivní a negativní smykové síly v obou směrech $\pm F_x$ i $\pm F_y$. Disky jsou integrovány do těsně svařovaného pouzdra s nepatrným předběžným zatížením. I při instalaci senzoru musí být vždy zabezpečeno jeho mechanické předepjatí. To z důvodu zajištění požadované tuhosti spojené soustavy, kde nesmí být žádné vůle, které by způsobovaly necitlivost, nezachycení malých zatížení nebo v horším případě zkreslení hodnot vzniklými vibracemi. Předepjatí je také důležité pro vytvoření tření, kterým je nutné zachytit smykové síly. Pro zvětšení statického tření se někdy využívá povlakování keramickou vrstvou [11, 17].

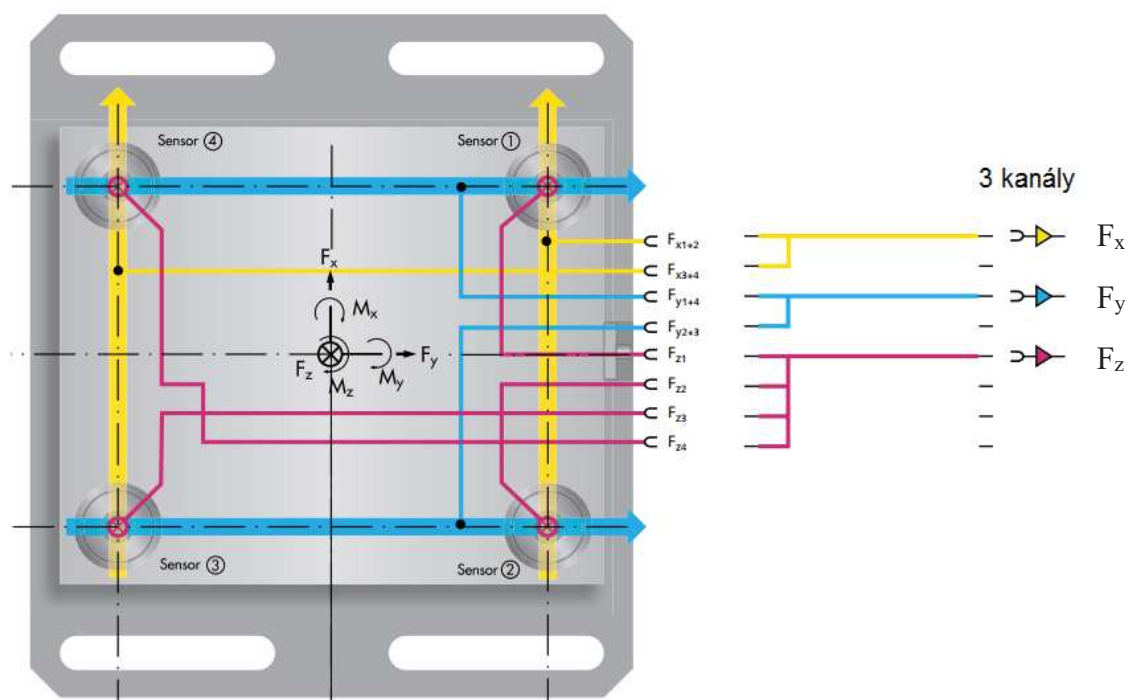
Pravá část obrázku 2.10 již představuje schématické znázornění 3–složkového dynamometru, který je složen ze čtyř 3–složkových senzorů, které jsou namontovány s předpětím mezi základní a horní desku. Poté jsou s daným předpětím cejchovány za přesně stanovených podmínek – teplota, vlhkost apod. Předpětí je možné realizovat ve vertikální poloze, kde šrouby vyvodí předpětí na senzor, který je mezi základní a horní deskou. Toto uspořádání má výhodu ve vyšším možném rozsahu sil. Horizontální předpětí si nechala patentovat firma Kistler, kde již není klasická koncepce základní a horní upínací desky. Toto uspořádání má výhody v minimálním teplotním vlivu na signál. Kromě změření sil, lze také pomocí známých pozic senzorů vypočítat i korespondující kroucí momenty, které nejsou přímo měřeny [15, 16, 17].



Obr. 2.10 Struktura dynamometru obsahující čtyři 3–složkové senzory síly [17].

Třísložkovými stacionárními dynamometry lze tedy analyzovat 3 síly (F_x , F_y , F_z) nebo také tyto 3 síly a 3 momenty kolem těchto sil (M_x , M_y , M_z), tzn. že 3–složkový dynamometr může být použit i jako 6i–složkový. Všechny síly a momenty jsou spočítány pomocí softwaru DynoWare nebo v nábojovém zesilovači. Pro výpočet momentů je důležité, aby se poloha působících sil během obrábění neměnila, což znamená, že vzdálenosti pro výpočet momentů budou konstantní – viz obr. 2.11. Toho je nemožné docílit při procesu frézování, proto se toho využívá například u vrtání pro výpočet M_z [11, 16].

Pro 3–složkové silové měření při frézování je získáno 8 signálů, které jsou shrnuty do tří–drátového kabelu a následně směřovány na 3 nábojové zesilovače – viz obr. 2.11. Tím jsou získány tři síly bez dalšího výpočtu, u kterých jsou známé směry a velikosti jednotlivých sil, ale ne jejich poloha v prostoru [16, 17].



Obr. 2.11 Koncepce měření sil 3–složkového dynamometru [16].

2.2 Nepřímé měření sil

Tato metoda vychází ze vztahu (1.9) řezného (užitečného) výkonu elektromotoru obráběcího stroje. Z uvedeného vztahu lze stanovit pouze řeznou složku celkové řezné síly [15].

Pro stanovení řezného výkonu se nejprve musí změřit výkon nezatíženého obráběcího stroje (tzn. výkon při chodu naprázdno) a až poté se může změřit celkový výkon obráběcího stroje během obrábění – P_{cel} . Takové měření se provádí převážně wattmetry. Řezný výkon se potom spočítá jako [1, 15]:

$$P_c = P_{cel} - P_0 \quad (2.1)$$

kde: P_{cel} [kW] - celkový výkon obráběcího stroje,
 P_0 [kW] - výkon při chodu naprázdno.

Řezná síla se poté při známé řezné rychlosti a známém řezném výkonu vyjádří ze vztahu (1.9) jako:

$$F_c = \frac{P_c}{v_c} \cdot 6 \cdot 10^4 \quad (2.2)$$

Uvedená metoda nevyžaduje nákladnou měřicí techniku a je poměrně jednoduchá. Dá se využít u všech metod obrábění – i frézování. Její nevýhody spočívají v zanedbání vlivu ostatních složek výsledné řezné síly na výkon elektromotoru a v rozdílné účinnosti stroje v chodu naprázdno a při zatížení, což ovlivňuje přesnost měření [15].

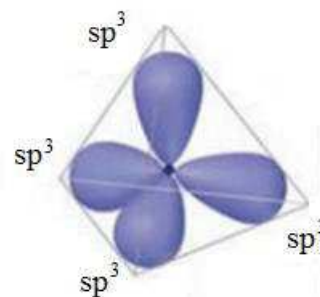
3 DIAMANT JAKO PRŮMYSLOVÝ SUPERTVRDÝ MATERIÁL

Přírodní diamant je minerál, krystalická látka, transparentní, metastabilní, alotropní forma uhlíku, vedle např. grafitu a fullerenu známých od roku 1985. Diamantu patří číslo 10 v Mohsově stupnici tvrdosti a je tak nejtvrdsí známý minerál, který našel řadu uplatnění i v průmyslu, a to jako přírodní či poté jako syntetický. U frézovacích nástrojů se používá jako řezný segment nástroje [1, 3, 4, 18, 19, 20].

Nevýhodou diamantu je jeho oxidace na vzduchu, která začíná při teplotě 600 °C. Jeho přechod do grafitické podoby začíná i v nepřítomnosti vzduchu nad teplotou 900 °C, čímž ztrácí svoje vlastnosti. Rychlost přeměny pro zpětnou transformaci v grafit závisí na podmínkách, kde nejznatelnějším faktorem je teplota. Při zahřátí navíc snadno reaguje s karbidotvornými prvky jako nikl, kobalt, tantal, wolfram, titan, vanad, bor, chrom, zirkon, hafnium a hlavně železo. Tím se zhoršují jeho fyzikální vlastnosti díky tvořícím se karbidům [3, 4, 21].

Tvrдость diamantu vychází z jeho krystalové struktury a způsobu, jakým se jednotlivé atomy uhlíku spojují. Diamant je izolant, zatímco grafit se používá u tužkových baterií jako vodič. Diamant je super-abrazivum, zatímco grafit je velmi dobré mazivo používané např. u ložisek [18].

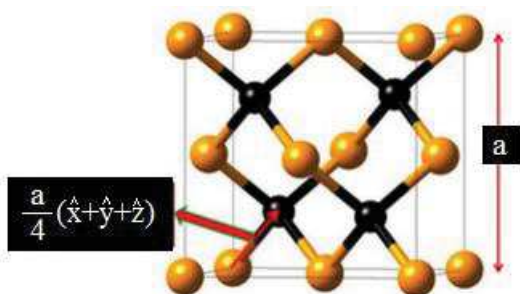
Označení diamantu je C₁ (jednoduše C), čili čistý uhlík neboli latinsky Carboneum, i když často obsahuje stopy chemických nečistot. Uhlíku je všeobecně věnována pozornost díky jeho schopnosti existovat v rozdílných formách hybridizace a to sp^1 , sp^2 a sp^3 . Jeho atomové číslo je 6, což znamená, že každý atom uhlíku má 6 elektronů a 6 protonů. Pozitivně nabitě protony v jádru drží elektrony v jejich orbitech kolem jádra. Elektrony vykonávají interakci mezi atomy, které dávají celé substanci unikátní vlastnosti. Čtyři elektrony v atomu uhlíku leží v orbitalech, které mu umožňují být chemicky interaktivní. Tyto elektrony se nazývají valenční. Každý valenční elektron leží v jednom ze čtyř energeticky rovnocenných hybridních sp^3 orbitalech, které se účastní na chemických kovalentních vazbách. Tyto vazby jsou nejsilnějšími vazbami v chemických substancích. Celkovou hybridní orbitalovou strukturu lze vidět na obr. 3.1. Ta zapříčiňuje tání diamantu při teplotě 3 500 °C a jeho velkou tvrdost. Geometrie molekuly má tvar tetraedru, která také zabezpečuje stabilitu diamantové struktury, kde úhel mezi vazbami uhlíku je 109° 28'. Při následném vzniku chemických vazeb mezi atomy uhlíku dochází k prolínání neboli skládání těchto hybridních orbitalů, čímž dochází ke stabilizaci a snížení energie valenčních elektronů [1, 19, 20, 22, 23].



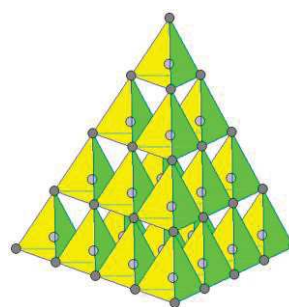
Obr. 3.1 Tetraedrická sp^3 hybridní orbitalová struktura diamantu [23].

Krystalovou mřížku diamantu lze vidět na obr. 3.2. Má takovou strukturu, která zaručuje čtyř-vaznost uhlíku podle hybridizace sp^3 . Díky takovému tetraedrickému spojení čistý diamant nevede žádný el. proud ani pod velkým napětím, jelikož nejsou volné žádné elektrony, které by tuto vodivost zabezpečily. Elektrickou vodivost diamant dokáže získat při kombinaci s jinými prvky nebo při vytvoření polykrystalického diamantu s metalickou fází. Tetraedr neboli

spojení centrálního atomu uhlíku se čtyřmi sousedními atomy stejně vzdálenými, je součástí dalšího tetraedru, a tak struktura stále pokračuje. Takovou opakující se geometrií je tvořena vysoce symetrická celková struktura diamantu – viz obr. 3.3. Samotná struktura diamantu neodpovídá žádné ze 14i Bravaisových mřížek. Z obr. 3.2 lze ale vidět, že je to kombinace dvou mřížek FCC, kde druhá mřížka je posunuta ve směru tělesové úhlopříčky o $\frac{1}{4}$ délky této úhlopříčky, tzn. o vektor, který je naznačen v daném obr. Počet atomů uhlíku v krystalové mřížce je 8. Typické krystaly diamantu jsou nejčastěji tvaru pravidelného osmistěnu, tzn. tělesa složeného z rovnostranných trojúhelníků stejné velikosti. Parametr krystalové mřížky se určí pomocí známé vzdálenosti tetraedrické (kovalentní) vazby dvou atomů uhlíku v diamantu (154 pm), která lze zjistit pomocí rentgenové, elektronové či neutronové difrakce. Parametr krystalové mřížky diamantu má potom velikost 0,357 nm. Tento parametry je na obr. 3.2 označen pod písmenem **a** [3, 4, 18, 19, 20, 24, 25].

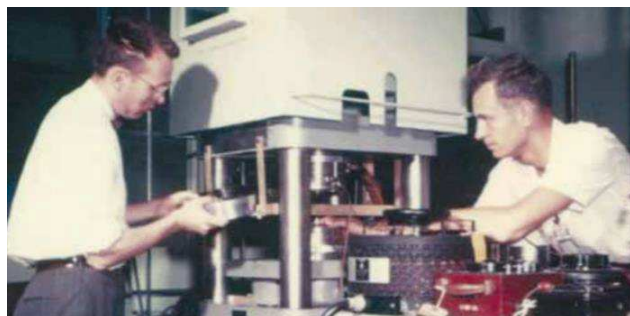


Obr. 3.2 Krystalová mřížka diamantu [25].



Obr. 3.3 Tetraedrická struktura diamantu [26].

Historie diamantového zkoumání spadá do Francie. Jeden z prvních historických experimentátorů v oblasti diamantů byl francouzský chemik Antoine-Laurent de Lavoisier, který zkusil spalovat diamant zaměřením slunečního světla, přičemž zjistil, že se uvolňoval oxid uhličitý jako vedlejší produkt. Tak ukázal, že je uhlík složkou diamantu. O 7 let později v roce 1797 navázal na jeho práci anglický chemik Smithson Tennant a ten prokázal, že diamant je čistý uhlík jako grafit. Od této doby se uvádí, že začala historie pokusů o syntézu umělého diamantu. Ta byla veřejně oznámena 15. února 1955 s tím, že za jeho vynálezce se považuje Howard Tracy Hall, který je na obr. 3.4 vlevo. Tracy Hall v roce 1966 zkompletoval první krychlový lis, kde o dva roky později sintroval první polykrystalický diamantový produkt označovaný jako PCD (česká zkratka se často používá PKD), který pojmenoval jako „Megadiamant“. Na obr. 3.4 a 3.5 jsou principiálně stejné zařízení pro výrobu umělého diamantu. Obr. 3.5 představuje moderní aparaturu pro výrobu syntetického diamantu v jedné z největších firem zabývajících se tímto materiálem – Element Six [5].

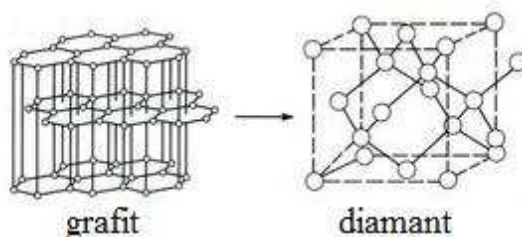


Obr. 3.4 Tehdejší aparatura pro syntézu umělého diamantu [5].



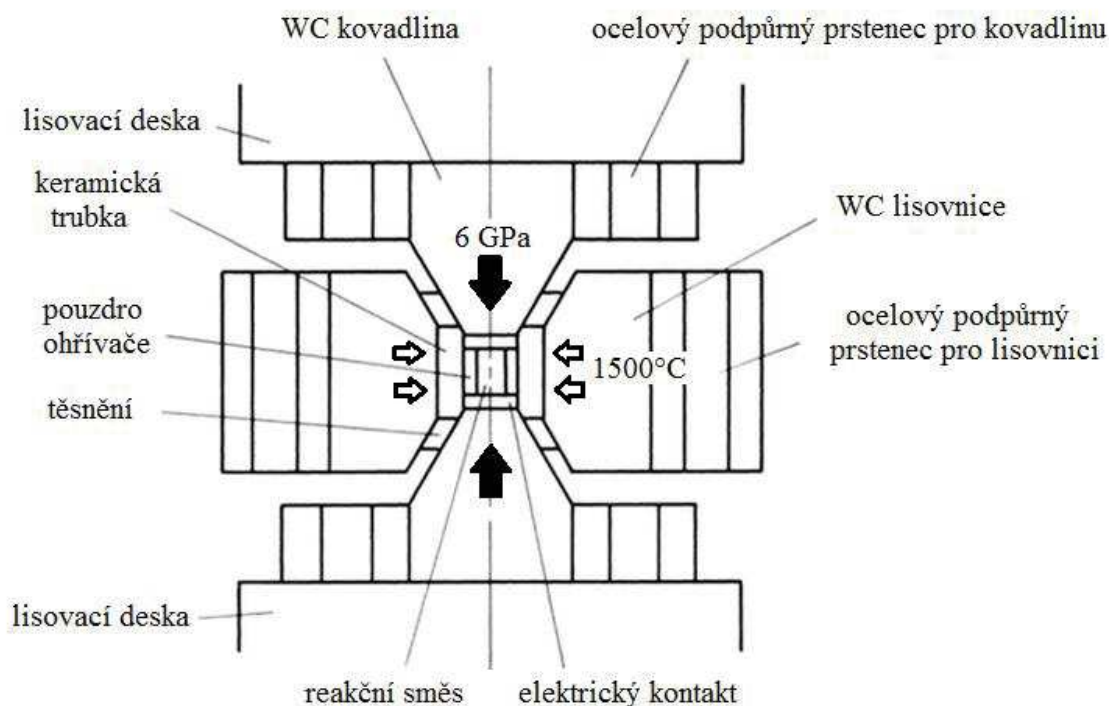
Obr. 3.5 Dnešní moderní aparatura ve firmě Element Six [5].

Úkolem syntézy diamantu je transformace struktury z měkkého hexagonálního uspořádání do tvrdého kubického uspořádání. To znamená přechod z grafitu na diamant – viz obr. 3.6 [3].

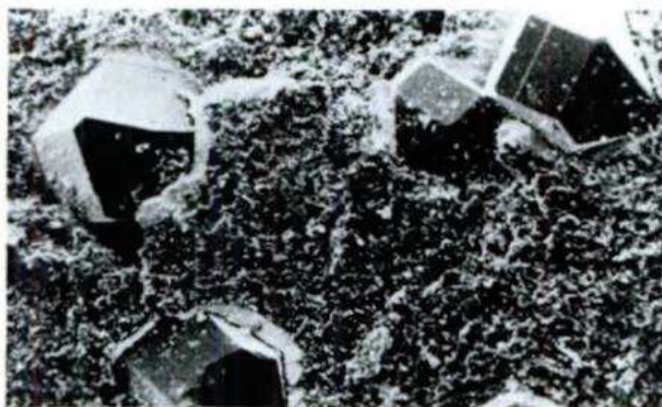


Obr. 3.6 Základní princip syntézy [3].

První syntéza diamantu byla uskutečněna metodou HPHT, což je zkratka High Pressure – High Temperature. To znamená syntéza za vysokých teplot a tlaků, která se provádí ve speciálních lisech. Schéma takového lisu lze vidět na obr 3.7 i s jeho materiálovou skladbou hlavních částí. Potřebný tlak přeměny dosahuje hodnoty až 6 GPa a teplota až 1700 °C, běžně 1500 °C. Této přeměny není lehké podle rovnovážného diagramu přeměny uhlíku dosáhnout. Pro usnadnění procesu syntézy se používají katalyzátory jako nikl nebo kobalt za účelem zmenšit tyto potřebné tlaky a teploty přeměny. Po dokončení transformačního procesu je v reakční komoře možné vidět reakční směs spolu s krystaly diamantu – viz obr. 3.8. Rozpuštěním katalyzátoru kyselinou se získají diamantové krystaly [1, 3, 4, 27, 28].



Obr. 3.7 Hlavní části lisu [3].



Obr. 3.8 Reakční směs s krystaly diamantu [3].

Dalšími možnostmi syntézy diamantu je dynamická syntéza (explozivní) anebo syntéza pomocí chemického napařování z plynné fáze – CVD (Chemical vapor deposition) [3, 13, 27].

Typ diamantu označovaný jako PCD lze charakterizovat jako kompozitní řezný materiál s krystaly diamantů uložených nejčastěji v kobaltovém pojivu. Po syntéze HPHT procesem jednotlivých zrn krystalů, se tyto individuální krystaly diamantu musí sintrovat dohromady opět za vysokého tlaku a teploty. Často se používají přídavné metalické nebo keramické sekundární fáze pro zlepšení formování. HPHT sintrovacím procesem je možné získat materiál, kde náhodě orientovaná zrna tvoří izotropního materiálu na rozdíl od monokrystalu, kde se vyskytují rozdílné vlastnosti v různých krystalových rovinách. Takových polykrystalických produktů může být vyrobena celá škála, lišících se např. ve velikosti zrna, sekundárních fází, stupni sintrování či rozdělením velikostí částic. Všechny tyto faktory mají vliv na výsledné mechanické, fyzikální a tepelné chování výsledného produktu. Porozuměním všech faktorů lze vyrobit přesnou sortu PCD pro danou obráběcí aplikaci [3, 21, 27].

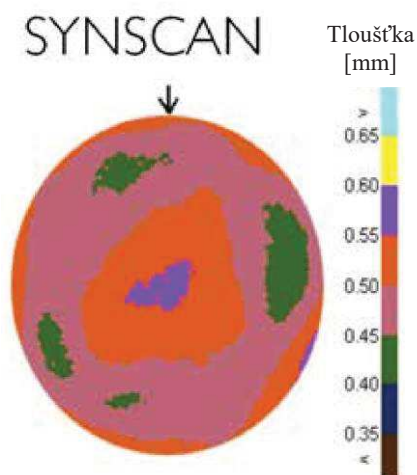
Díky kovovému pojivu má PCD vyšší hustotu a vyšší lomovou houževnatost než CVD polykrystalický diamant, který je tvořen téměř čistým uhlíkem s minimem nečistot. To je vhodné pro hrubovací operace a pro operace, kdy je vyžadována větší hodnota lomové houževnatosti nástroje. To je právě příklad frézování [3, 28, 29, 30].

Stejně jako lze měnit velikosti zrn diamantů, lze měnit i polotovary do mnoho formátů. Jeden z nejběžněji používaných formátů pro řezné nástroje obsahuje vyleštěnou vrstvu PCD, sintrovanou k podkladu slinutého karbidu wolframu – viz obr. 3.9. Vyleštěná vrstva zabezpečuje lepší odvod třísek při obrábění, umožňuje kvalitněji naostřit řeznou hranu nástroje a také zamezuje tvoření nárůstků. Podkladový slinutý karbid poskytuje kovové pojivo, nejčastěji kobalt, pro slinování diamantových krystalů k podkladu a také k sintrování samotných



Obr. 3.9 Formáty PCD nástrojů [31].

zrn diamantů. Kobalt způsobí zvýšení houževnatosti a elektrické vodivosti, čímž lze PCD elektricky obrábět. Další výhodou podkladového slinutého karbidu je jeho relativně snadná možnost pájení k tělu nástroje. Nejvíce používaný formát je kruhový o průměru 76 mm, kde tloušťka PCD vrstvy se pohybuje od 0,3 mm do 1,5 mm a celková tloušťka včetně slinutého karbidu wolframu je od 0,8 mm do 8 mm. Tloušťka PCD vrstvy má samozřejmě určitou toleranci. Proto např. firma Element Six používá ultrazvukové snímání celého disku. To vytvoří barevné schéma disku se stupnicí, která udává tloušťku diamantové vrstvy. Tento obr. je dodán zákazníkovi spolu s diskem, na kterém je laserem označen bod, který koresponduje se šipkou na přiloženém barevném schématu. To je důležité pro orientaci celého disku. Takový obr. může pomoci výrobcí nástrojů při řezání daného disku, kde potřebuje přesně znát tloušťku sintrované diamantové vrstvy – viz obr. 3.10. Na obr. 3.11 jde vidět další možné formáty polotovarů pro frézování, u kterých lze vybrousit ostří do tvaru šroubovice, což u běžných rovných disků není možné. Tyto polotovary nabízí také firma Element Six [1, 3, 28, 31].



Obr. 3.10 Barevná škála definující tloušťku PCD vrstvy [31].



Obr. 3.11 Další možné polotovary pro výrobu nástrojů [31].

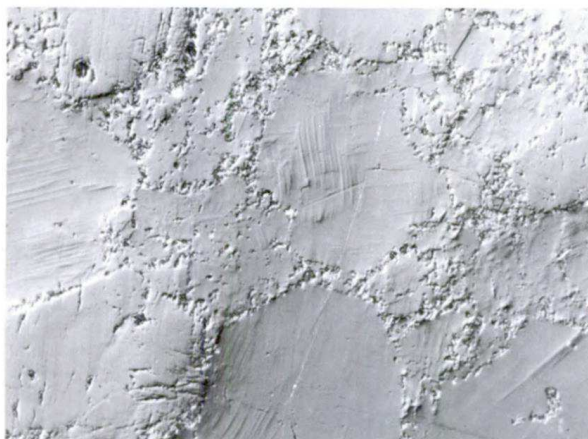
Tabulka 3.1 ukazuje některé mechanické a tepelné vlastnosti PCD ve srovnání s jinými nástrojovými materiály, a to bílou neboli čistou oxidickou keramikou Al_2O_3 (umělým korundem) a karbidem wolframu dle ISO označení K10. Písmeno 'K' odpovídá materiálu obrobku, pro který je nástroj určen a hodnota '10' říká, jaké je v nástroji množství pojiva – kobaltu. Ale neznamená to 10 hmot. % kobaltu. Pouze udává určitou hodnotu nejčastěji mezi 05 až 50. Čím vyšší číslo, tím více hmotnostních procent kobaltu a tím vyšší houževnatost, ale naopak menší tvrdost. Vyšší hodnoty jsou vhodné například pro přerušované obrábění. Jelikož diamant je obzvláště tvrdý, tak se pro porovnání použil karbid s tvrdší strukturou. Syndite 010 je kompozitní materiál složený z vrstvy PCD a podkladu WC. U lomové houževnatosti si lze všimnout, že nejvíce odolným materiálem proti křehkému porušení za přítomnosti trhliny je

WC. PCD je izotropní materiál, čímž je jeho lomová houževnatost větší než přírodní diamant nebo i v tabulce uvedený Al_2O_3 . Tepelnou vodivost má jednoznačně nejvyšší PCD, což je vhodná vlastnost pro nástrojové materiály, kde se vzniklé teplo během obráběcího procesu odvádí rychle z místa řezu [3, 13].

Tab. 3.1 Vlastnosti PCD a jiných nástrojových materiálů [3].

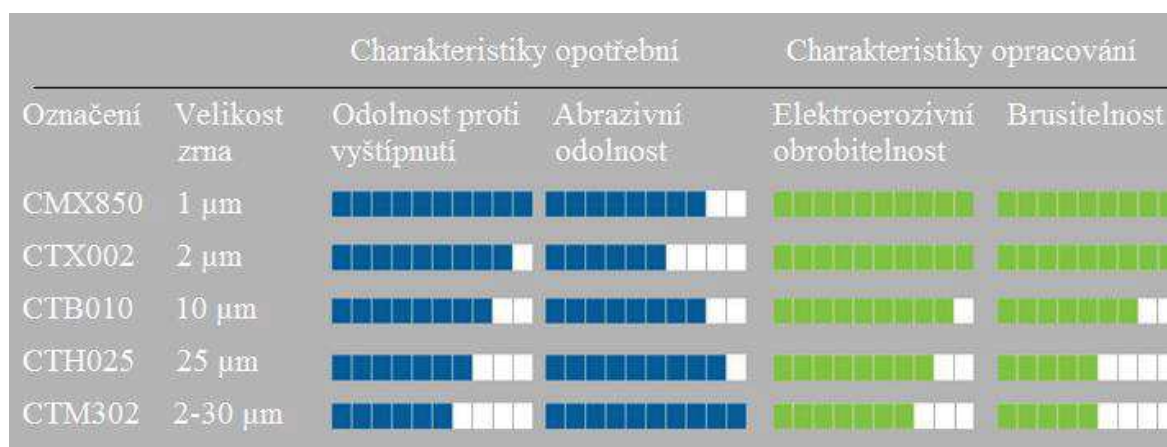
Typ diamantu	Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Pevnost v tlaku [GPa]	Lomová houževnatost [$\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$]	Tvrдость HK [GPa]	Youngův modul [GPa]
PCD (Syndite 010)	4,12	7,60	8,80	50	776
Al_2O_3	3,91	4,00	2,33	16	380
WC (K10)	14,70	4,50	10,80	13	620
	Modul pružnosti ve smyku [GPa]	Poissonovo číslo[-]	Koeficient tepelné roztlačnosti [10^{-6}K^{-1}]	Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	
PCD (Syndite 010)	363	0,07	4,20	560	
Al_2O_3	153	0,24	8,50	22,7	
WC (K10)	258	0,22	5,00	100	

Mikrostrukturu PCD s metalickou sekundární fází na hranicích zrn lze sledovat na obr. 3.12. Uvnitř zrn jsou běžně vidět deformace dvojčatění, které nastaly během sinterování technologií HPHT. Takové pásy dvojčatění jsou viditelné na vyleštěném vzorku, jelikož jsou více odolné vůči opotřebení než okolní materiál. Sinterovaný diamant obsahuje 5-10 obj. % metalické fáze a také může obsahovat kovy nebo grafit z původního krystalového růstového procesu. Jelikož diamant dominuje celkovému objemu PCD, chemická reaktivita je podobná jako pro samotná syntetická zrna. Metalická fáze ovšem zhoršuje tepelnou stabilitu celého systému. Může zvýšit grafitizaci a také přispět k degradaci nad $700\text{ }^\circ\text{C}$ díky teplotnímu namáhání, které vzniká díky velkému rozdílu koeficientů tepelné roztlačnosti diamantu a metalické fáze. Proto je vhodné tyto nástroje nepřehřívat, obzvláště během pájení. Některé sinterované materiály jsou vyrobeny s takovou spojovací fází, která zaručuje lepší tepelnou stálost a tím minimalizuje tepelnou degradaci, avšak na úkor pevnosti. Taková tepelná stálost se zabezpečuje podobnými hodnoty koeficientu tepelné roztlačnosti obou složek – diamantu a spojovací fáze. Lze tak použít například karborundum (SiC), který má uvedený koeficient podobný jako diamant [3].

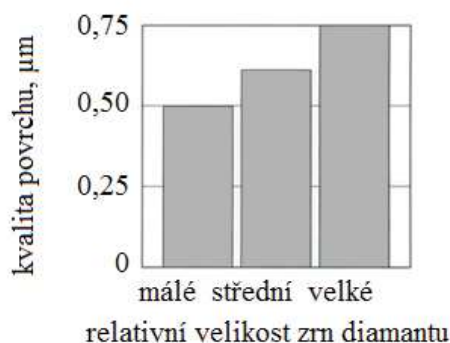


Obr. 3.12 Mikrostruktura sinterovaného PCD se sekundární fází na hranicích zrn [3].

Během let byly vyvíjeny různé stupně (sorty) PCD, které jsou založeny na rozdílné průměrné velikosti zrn diamantu používané pro PCD vrstvy. Obecně průměrná velikost zrn je rozdělena do 3 stupňů. Rozdílné velikosti zrn mají vliv zejména na abrazivní odolnost, obrobiteľnosť a na kvalitu obrobené plochy. Díky těmto vlivům se mohou definovat vhodné aplikace pro daný stupeň PCD. Jak se chovají jednotlivé stupně zrn lze vidět na obr. 3.13 a 3.14. Všechny tyto aspekty byly vyhodnoceny a podle nich se uvádějí typické aplikace, které jsou uvedeny v tab. 3.2 [3, 28, 31].



Obr. 3.13 Sorty PCD firmy Element Six [31].

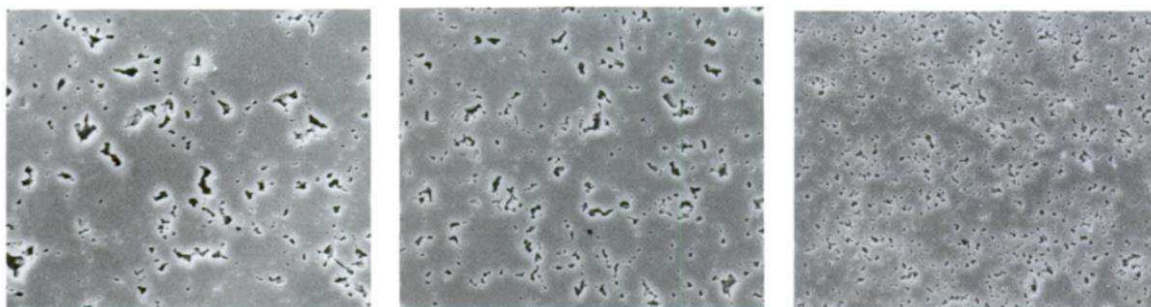


Obr. 3.14 Charakteristické vlastnosti dle průměrné velikosti zrn PCD [3].

Tab. 3.2 Aplikace jednotlivých velikosti zrn PCD [3].

Stupeň PCD	Velikost zrn [μm]	Aplikace
Jemné zрно	2-4	Aplikace požadující vyšší kvalitu obrobeného povrchu, dřevoobrábění
Střední zрно	10	Všestranné použití (slitiny Al s Si < 16 %)
Hrubé zрно	25	Těžké obrábění, přerušované řezy (slitiny Al s Si > 16 %)

Z výše uvedeného se dá říci, že hrubá zrna PCD dávají delší trvanlivost nástrojů, zatímco jemnější zrna vykazují lepší kvalitu ostří – tím umožňují produkovat lepší kvalitu obrobené plochy pro homogenní materiály obrobků, mají větší pevnost – což symbolizuje odolnost proti vyštipování – a současně jsou lépe obrobitelné, ať už z hlediska mechanického broušení tak také elektroerozivního. Při velikosti zrn 1 μm a méně, odolnost proti opotřebení a také pevnost mohou růst současně. To není možné u hrubších zrn. Takových vlastností se například využívá u sorty PCD označené jako CMX850. Materiál CTM302 vyniká nejvyšší odolností proti abrazi, ale také díky kombinaci s jemnými zrny nepředstavuje běžné nevýhody hrubých sort. Má pevné ostří a také dobrou kvalitu břitu. CMX850 je vhodná pro zvýšenou kvalitu obrobeného povrchu zejména pro hliníkové slitiny. CTH025 je vhodná pro abrazivní obrábění, zejména pro hliníkové slitiny s vysokým obsahem křemíku. Pro frézování plastů se doporučuje volit sortu CMX850, případně CTX002. Pro většinu aplikací a všestranně použitelné nástroje je všeobecně doporučena průměrná velikost zrna 10 μm . Sorta CTX002 s průměrnou velikostí zrna 2 μm obsahuje 84,8 obj. % diamantu a 15,2 obj. % kobaltu. U CTB010 – průměrná velikost zrna 10 μm – je obsahu diamantu 89,7 obj. % a kobaltu 10,3 obj. %. S tím souvisí také tvrdost, která je sorty obsahující menší obj. % kobaltu menší. Rozdíl v mikrostruktuře těchto třech stupňů PCD lze vidět na obr. 3.15, kde jsou leptané vzorky jednotlivých velikostí zrn [3, 21, 28, 31, 32].



Obr. 3.15 Mikrostruktura leptaného PCD podle velikosti zrn při stejném měřítku snímku (zleva: hrubá, střední, jemná zrna) [3].

Nyní je uvedeno, jakou odolnost proti opotřebení má PCD v porovnání s jinými materiály. Teoretické vztahy pro hodnoty odolnosti proti opotřebení byly odvozeny v souvislosti s lomovou houževnatostí, Youngovým modulem a tvrdostí dle Knoop jako [3]:

$$W_r = K_{IC}^{0,5} \cdot E^{-0,8} \cdot HK^{1,43} \quad (3.1)$$

kde: W_r [-] – odolnost proti opotřebení
 K_{IC} [$\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$] – lomové houževnatost při módu zatěžování I
 E [GPa] – Youngův modul pružnosti
 HK [GPa] – hodnota tvrdosti dle Knoop

Zdroj [3] udává hodnoty W_r , které jsou uvedeny v tab. 3.3. Takové pořadí odpovídá pouze jednoduché situaci – odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Při obrábění kovových obrobků se mohou vyskytnout jiné mechanismy opotřebení jako chemické nebo adhezivní opotřebení, které se může stát dominantní. Například obrábět sialonovými nástroji je vhodné zejména niklové superslitiny. Při takovém použití se PCD opotřebí rapidně rychleji i přes fakt, že je znatelně tvrdší. Proto je podstatné vybrat správný materiál nástroje pro daný materiál obrobku [1, 3, 13].

Tab. 3.3 Odolnost proti opotřebení jednotlivých řezných materiálů [3].

Nástrojový materiál	W_r
Čistá oxidická keramika (Al_2O_3)	0,76
Karbid wolframu (ISO K05)	0,73
Sialon	0,91
Směsná oxidická keramika ($Al_2O_3 + TiC$)	0,92
PCBN (Amborite)	2,07
PCD (Syndite grade 010)	3,38

Všeobecně pro obrábění diamantem jsou vhodné určité materiály. Jedná se pouze o nejrůznější neželezné materiály, ale i tak je v průmyslu mnoho aplikací, kdy syntetický diamant může snadno nahradit slinutý WC, jak lze vidět v tabulce 3.4. Ve většině situací prodloužená trvanlivost nástroje více než kompenzuje zvýšené pořizovací náklady na nástroj [1, 3, 27].

Tab. 3.4 Materiály vhodné pro obrábění diamantem [1, 3, 27].

Materiály
hliník a jeho slitiny
karbidické/oxidické materiály (hlavně sloučeniny Al_2O_3 , Cr_2O_3 , WC)
keramika, zahrnující neslinovanou keramiku, nepálené hlíny a určité typy vypálené keramiky
slinutý WC s vyšším obsahem kobaltu
měď a mosaz
abrazivní plasty
skleněné a uhlíkové vláknové kompozity, kevlar, lamináty
dřevo a dřevokompozitní materiály – zejména dřevotříska, MDF, desky s plastovým povrchem, laminátové desky, cementovláknité desky a abrazivní tvrdé dřeviny
přírodní kameny – žula, syntetický mramor nebo syntetické kameny
beton a podobné stavební materiály

4 OSTŘENÍ PCD DESTIČEK

Ostření PCD destiček je jednou z posledních technologických operací, která zabezpečuje hlavní funkci nástroje – řezný proces. Jsou odstraněny poškození způsobené drátovým řezáním či laserem při řezání destiček z polotovarů a je generována požadovaná geometrie a kvalita řezné hrany. V případě diskového polotovaru se PCD destičky ostří na hřbetech nástroje, jelikož čelo je již výrobcem těchto polotovarů vyleštěné. U těchto destiček se také hovoří o trvanlivosti, jelikož je možné jejich přeastření, pokud je to z hlediska další funkce nástroje možné.

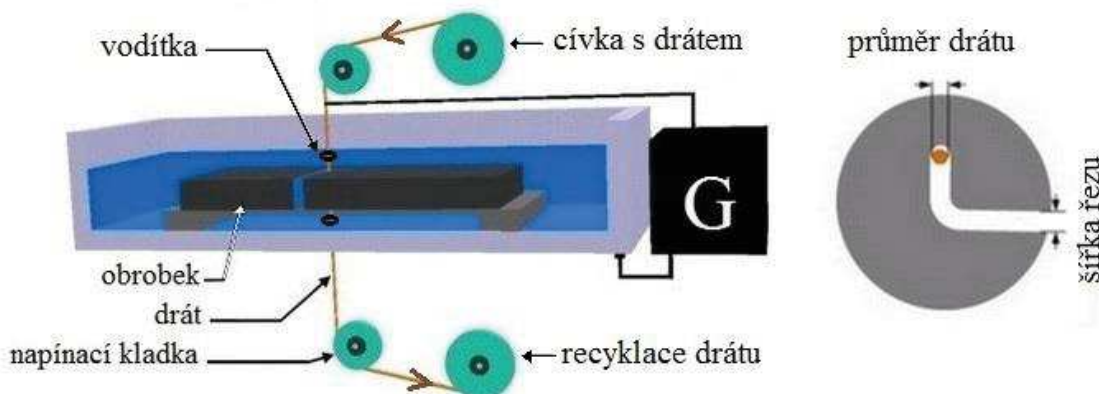
První technologii, kterou se brousily PCD destičky bylo klasické konvenční broušení. Při této technologii působí diamantová zrna vázaná v brusném kotouči na přibližně stejně tvrdá zrna PCD. To přináší nepříjemnosti v ekonomice a času broušení, jelikož koeficient broušení dosahuje velmi malých hodnot – často pouze 0,01 až 0,02. Moderní elektroerozivní technologie se staly používanějšími technologiemi při ostření PCD destiček. Pro obrábění využívají elektrickou energii bez přeměny na energii mechanickou. Jedná se o vhodnou technologii pro obrábění tvrdých a křehkých vodivých materiálů, jelikož zde nejsou žádné mechanické síly působící na obrobek. Elektricky vodivé materiály se obrábí přibližně stejnou rychlostí. Nezávisí na jejich tvrdosti. PCD nástroje lze elektroerozivně obrábět, jelikož obsahuje kovové – nejčastěji kobaltové – pojivo, které zabezpečuje elektrickou vodivost. Díky nekontaktnímu obrábění je metoda vhodná i z ekonomického hlediska. Dvěma nejrozšířenějšími elektroerozivními technologiemi v případě ostření PCD destiček jsou WEDM a EDM–G. Technologie konvenčního broušení se dnes používá pouze jako finální úprava před–obrobeného PCD povrchu právě elektrickými technologiemi. Poslední vývojový krok je ostření PCD destiček pomocí laseru, přičemž tato technologie je nejdostupnější technologií pro výrobu utvářečů. Lze ji také s výhodou použít u diamantů, které nevedou el. proud. Poslední tři zmíněné technologie patří do kategorie nekonvenčních technologií. Nekonvenční metody jsou ty, u kterých dochází k oddělování materiálu jiným způsobem než řezným klínem. Takové metody se obzvláště hodí pro těžkoobrobitelné materiály, mezi které diamant bezpochyby patří [3, 6, 30, 33].

4.1 WEDM

WEDM je zkratkou Wire Electrical Discharge Machining, což znamená drátové elektroerozivní obrábění. Jak už název napovídá, proces je uskutečněn odvíjejícím se drátem z cívky. Někdy se používá termín drátové elektroerozivní řezání [6, 33, 34].

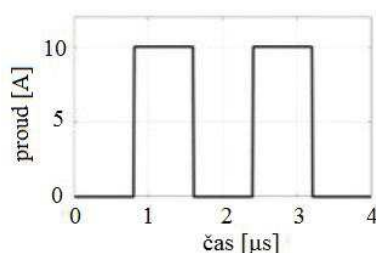
Princip metody lze vidět na obr. 4.1. Řezný proces zabezpečují dvě elektrody, které jsou ve vzdálenosti od 1 μm do 500 μm . Jednou elektrodou je stále napnutý odvíjející se drát a druhou elektrodou je obrobek, který je vodivostně spojen s upínacím stolem stroje. Obě elektrody jsou připojeny na zdroj elektrického napětí, což v obrázku představuje písmeno 'G' jako generátor. Poté, co je obrobek připevněn na upínací stůl v pracovním prostoru stroje, je tento prostor zaplněn dielektrickou kapalinou, což je izolant schopný polarizace. Pro drátovou elektroerozi se používá deionizovaná voda. Samotný řezný proces probíhá mezi elektrodami. Nejprve probíhají předvýbojové pochody, které následně způsobí průraz dielektrika a elektrický výboj. Trvání výboje a veškeré parametry s tím související závisejí na „srdci“ elektroerozivního stroje – generátoru, který ovlivňuje všechny nejdůležitější parametry. Posledním vývojovým krokem jsou polovodičové generátory, které umožňují široké nastavení různých elektrických parametrů. Časový průběh proudu v jiskřišti je již zcela pravidelný – viz obr. 4.2. S kratší

dobou trvání výboje se zlepšuje kvalita obrobeného povrchu. Po průchodu drátu řezným procesem je drát směřován do odpadové nádoby, odkud poté následuje jeho recyklace [6, 33, 34, 35, 36].



Obr. 4.1 Princip drátové elektroeroze [33].

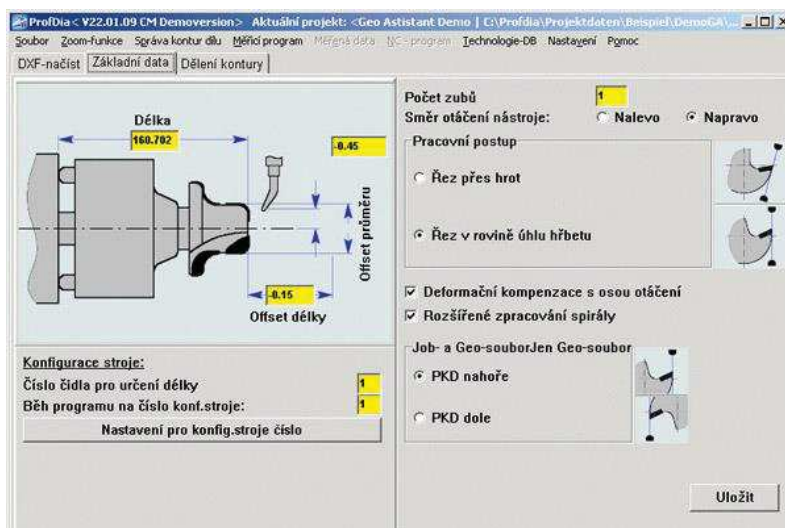
Výbojový kanál je tvořen plasmou. Elektricky nabitě a neutrální částice v různých kvantových stavech provádějí neuspořádaný pohyb, který je charakterizován vysokými teplotami. Plasmový kanál umožňuje protékání velkého el. proudu, jelikož je dobře elektricky vodivý. Tímto procesem jsou na povrchu elektrod způsobeny jak změny tvarové, tak také strukturální. Výbojový kanál vymizí, jakmile dojde k přerušení el. proudu. Následně se celý proces opakuje, což lze vidět také z obr. 4.2. Teplo z plasmového kanálu se elektrodami částečně odvádí a zejména slouží k roztavení a následnému odpaření materiálů elektrod. Teplota v místě výbojů dosahuje 10 000 – 20 000 °C. Probíhá tedy změna skupenství. Následně se roztavený a vypařený materiál transformuje různými mechanismy, kterými mohou být například výtok vlivem magneto-hydrodynamických sil, expanze par nebo elektrostatické vytrhávání pevného materiálu. Povrch se výrazně liší od klasického konvenčního obrábění. Tady jsou mikroskopické krátery po vzniklém výboji [6, 33, 37].



Obr. 4.2 Průběh proudu v jiskřišti polovodičových generátorů [33].

Obrábění probíhá nejčastěji více řezy – až 5i možnými. Jednotlivé řezy se výrazně liší elektrickými parametry, rychlostí a také velikostí jiskrové mezery, která se směrem k dokončovacím řezům zmenšuje. Rychlost pohybu drátu se pohybuje maximálně v řádu jednotek $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Rychlost odvinu drátu, který je nejčastěji z mosazi nebo mědi, má vliv na přesnost řezu. Čím rychlejší odvin, tím vyšší přesnost a kvalita povrchu. Je to způsobené opalováním drátu vzniklými výboji, ke kterým dochází hned při vstupu do obrobku. Pro řezání spodní částí obrobku se tedy už používá opálený drát předchozími výboji. Pro tlusté obrobky lze tento opal softwarově kompenzovat zadáním korekce přímosti – korekce opotřebení

řezacího drátu. U parametrů generátoru se nejčastěji může měnit nastavení doby působení pulzů a vybíjecí proud. Programů pro vytváření NC kódu pro drátové řezání je celá řada. Pro ostření nástrojů se využívá ProfDia – viz obr. 4.3. Tento softwarový nástroj slouží pro práci v pěti řízených osách. Je tak vhodný pro řezání PCD nástrojů, kde automaticky dle zadaných vstupních parametrů vypočte dráhu řezu [6, 33, 34].



Obr. 4.3 Program ProfDia [34].

Dosahovaná přesnost WEDM strojů je v tisícinách milimetrů a průměrná aritmetická úchylka drsnosti Ra 0,2 μm . U drátových strojů určených k vysoké přesnosti obrábění se může docílit povrchu až Ra 0,04 μm . Nevýhodou WEDM technologie je vždy určitá ovlivněná minimální vrstva elektrickými výboji. U moderních strojů je tato vrstva minimální. Problematikou WEDM je také koroze obrobků obsahující železo, kdy vznikají ionty oxidu železitého. Pro odstranění koroze je vhodné použít antikorozi jednotku [6, 33, 34].

Nejběžnější dnešní koncepci stroje lze vidět na obr. 4.4. V základu se jedná o stroj s 5 osami, kde 4 osy jsou řízené. Během řezání se pohybuje drát – nástroj a obrobek stojí [6, 34].



Obr. 4.4 Elektroerozivní drátový stroj [34].

Důležitým konstrukčním prvkem je horní i dolní vodící hlava. Tento systém musí zabezpečit zejména přesné vedení drátu pomocí vodiček, napájení drátu a výplach místa řezu. Horní hlava má navíc za úkol při přetrhnutí drátu, drát následným přestřižením zarovnat a poté automaticky navléct a pokračovat v řezu [6, 34].

Firma Vollmer také nabízí speciální drátové elektroerozivní stroje pro erodování rotačních nástrojů. Drát je v tomto případě napínán na kratší vzdálenosti, což má pozitivní vliv na přesnost. Horizontální poloha drátu poskytuje větší variabilitu v pohybu než poloha vertikální. Řezání neprobíhá pod hladinou, ale v tomto případě na řezné místo tryská dielektrická kapalina z více trysek. Názorná ukázka takové koncepce je na obr. 4.5 [7, 36, 38].



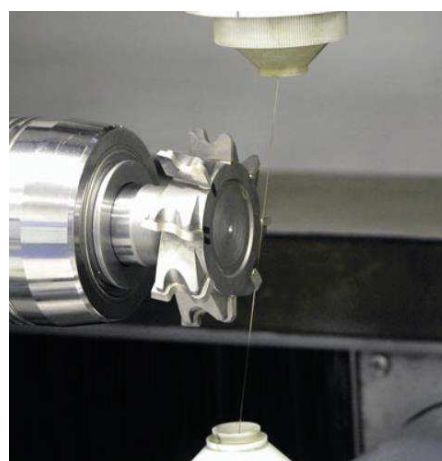
Obr. 4.5 Erodování PCD nástroje strojem od fy. Vollmer [7].

U moderních strojů je také nutné chladit důležité uzly stroje, které ho udržují na určité konstantní teplotě, což má opět vliv na přesnost řezu. Druhou možností, jak eliminovat tyto teplotní rozdíly, je kompenzace tepelné roztažnosti. Tato možnost naopak připouští deformaci stroje, ale 3–7 snímačů umožňuje softwarovou korekci polohování stroje. Drátové řezací stroje chladí dielektrickou kapalinu, čímž omezují veškeré tyto deformace a nepřesnosti řezu [6, 34].

Pro elektroerozivní obrábění rotačních je nutné použít přídavné zařízení, které poskytuje další osu polohování. Na obr. 4.6 lze vidět takové zařízení, které poskytuje přídavnou šestou osu a to rotaci – polohování obráběného nástroje. V tomto případě je přístroj připraven pro upínání obráběných nástrojů pomocí upínače typu HSK. Takové přídavné zařízení je připevněno na pracovním stole stroje. Reálné erodování nástrojů s 6 osy polohování lze vidět na obr. 4.7, kde řízeno os 5 (osa z není CNC řízena). Pro sondování polohy jednotlivých destiček fréz se používá dotyková sonda, která je připevněna na horní vodící hlavě [39].



Obr. 4.6 Zařízení pro erodování rotačních nástrojů [39].



Obr. 4.7 Erodování PCD nástroje [34].

4.2 EDM-G

EDM-G je zkratkou Electrical Discharge Machining – Grinding, což znamená elektroerozivní obrábění – broušení. Jak název napovídá, tato metoda je podobná klasickému konvenčnímu broušení, kde ovšem konvenční abrazivní brusný kotouč je nahrazen kovovým či grafitickým kotoučem, pomocí kterého probíhají elektrické výboje mezi tímto kotoučem a nástrojem – obrobkem. Někdy se používá také zkratka pouze EDG, což je zkráceně elektroerozivní broušení [3, 37, 38].

Tato technologie pracuje podle stejného elektroerozivního procesu jako WEDM, ale liší se zejména ve tvaru použité elektrody. Při erodování rotačních obráběcích nástrojů je WEDM metoda vhodná pro malé vnitřní rádiusy a složitější profily, které rotační elektrodou nejsou možné vyrobit. Zatímco tuhý kotouč se nadá jednoduše odklonit jako drát. To poskytuje rychlejší úběr materiálu až do obráběné vrstvy PCD 0,4 mm. Více než uvedenou vrstvu je vhodná erodovat pomocí WEDM [7, 36].

Materiál obrobku je také odstraněn tavením a následným odpařením a není zde žádný fyzický kontakt mezi obrobkem a kotoučem, tudíž tento proces je vhodný pro obrábění tenkých, křehkých a elektricky vodivých materiálů a velmi citlivých, komplexních nástrojů, u kterých by během konvenčního broušení řezné síly mohly obráběný nástroj poškodit [3, 37, 38].

Za účelem rovnoměrného rozložení eroze po celé ploše kotouče a zachování konstantní geometrie po co nejdélejší dobu, kotouč vykonává rotační pohyb. V důsledku rotačního pohybu dochází k účinnému odvádění roztaveného materiálu a nečistot z místa elektrických výbojů, což má také pozitivní vliv na celý proces. Lze erodovat jak čelní plochou kotouče, tak obvodovou [7, 21, 37].

Pro erodovací proces je také nutné použít dielektrickou kapalinu. Stroje fy. Vollmer i Walter používají dodání dielektrické kapaliny do místa řezu pomocí trysek. Tento způsob je nejpoužívanějším při ostření PCD nástrojů. Na obr. 4.8 lze vidět takové erodování PCD destiček. Obr. 4.9 představuje pouze polohování obou elektrod – reálné erodování také probíhá s dielektrickou kapalinou. Materiál kotouče samozřejmě musí zabezpečovat elektrickou vodivost a je také zvolen tak, aby se dobře orovnával. To probíhá nejčastěji přímo na elektroerozivní stroji, což má pozitivní vliv na geometrickou přesnost kotouče a celého procesu. Materiál kotouče pro ostření PCD destiček je většinou ze slitiny mědi. Firma Vollmer uvádí slitinu mědi a wolframu a dielektrickou kapalinu na bázi oleje. Ta má také výhodu v korozní ochraně obrobku oproti deionizované kapalině v případě WEDM [7, 8, 36, 37, 38].

Pro obrábění se musí vytvořit program na přilehlém počítači, kde se vloží 2D kontura, korespondující s obráběným profilem. Následně se pošle program do stroje, kde se zadají další parametry jako požadovaný průměr frézy, rychlost a posuv kotouče, požadované úhly broušených hřbetů a další informace o profilu. Stroj si poté nasonduje a změří skutečný rozměr erodovacího kotouče a také nasonduje skutečné polohy jednotlivých destiček na těle frézy [36, 38].



Obr. 4.8 EDG na stroji od fy. Walter [36].

Obr. 4.9 EDG na stroji od fy. Vollmer [8].

Uvádí se, že následné konvenční dobroušení erodované plochy je vhodné pro delší trvanlivost nástroje. Firma Vollmer UK prováděla experimenty, které ukázaly, že trvanlivost nástroje s finálně dobroušenou destičkou je o 15 % delší než pouze s erodovaným profilem. Pro dodávku zákazníkovi je vhodné zvážit takové konvenční dobroušení, které opotřebí velké množství abrazivního kotouče, výrazně zvýší strojní čas a zvýší tak cenu nástroje, který s uvážením vyšší trvanlivosti nemusí být v konečné fázi ekonomicky výhodnější. Mimo dobroušení je také někdy nutné vybrousit drážky na karbidickém těle. Proto se někteří výrobci, například Vollmer nebo Walter, rozhodli nabízet stroje s konvenčním broušením i EDG, což zvyšuje produktivitu výroby PCD nástrojů. Walter nabízí stroje s jedním i dvěma vřeteny, kdy jedno lze používat pro klasické broušení a druhé pro EDG. Na obr. 4.10 lze vidět automatický stroj s 6i řízenými osy fy. Vollmer, který umožňuje EDG, konvenční broušení a také leštění. Číslo 1 na uvedeném obr. představuje generátor, speciálně navržený pro ostření PCD nástrojů; číslo 2 řídicí panel stroje; číslo 3 zásobník až s 6i nástroji a konečně číslo 4 - zásobník obráběných nástrojů, což zaručuje dlouhý bezobslužný provoz. Obrobky jsou měněny pomocí robotické ruky, která je uvnitř stroje [7, 8, 36].



Obr. 4.10 EDG stroj [8].

Častým příkladem kombinace EDG a konvenčního broušení je také erodování PCD vrstvy nástroje, přičemž úhel druhého hřbetu na karbidickém podkladu za PCD vrstvou je konvenčně dobroušen. To značí obrázek 4.11, kde nalevo je erodování prvního hřbetu PCD a napravo lze vidět broušení druhého hřbetu na karbidickém podkladu. Toto broušení je rychlejší než EDG a poskytuje vynikající kvalitu povrchu. To snižuje pravděpodobnost ulpívání obráběného materiálu na hřbetu nástroje a zvyšuje také trvanlivost nástroje. Jako řezná kapalina se pro konvenční broušení používá také dielektrická kapalina na bázi oleje jako u erodování [8, 38].



Obr. 4.11 Erodování a broušení hřbetů PCD nástroje [8].

Stejně jako u WEDM se používá více fází ostření – hrubovací a dokončovací. Konečná dokončovací fáze je prováděna při nízkém výkonu generátoru, kdy je získáno finální ostří nástroje se zanedbatelným EDM poškozením. Dosahovaná hodnota R_a technologie EDG při erodování PCD nástrojů se uvádí až $0,10 \mu\text{m}$, zatímco následným dobroušením se může dosáhnout drsnosti $0,035 \mu\text{m}$. Drsnost povrchu po elektroerozi závisí mimo jiné na rychlosti erodování. Rychlejší znamená více teplotně poškozená oblast a horší strukturu povrchu. Naopak v případě, kdy je generátor vyladěn pro vysokou kvalitu povrchu, proces zabere více času, teplotně ovlivněná oblast je menší a je také dosahováno delší trvanlivosti obráběného nástroje. Platí zde, že s kratší dobou trvání pulzů v $[\mu\text{s}]$ je nižší úběr materiálu ale stejně jako u WEDM se s kratší dobou trvání pulzů dosahuje vyšší kvality povrchu a redukuje se teplotní poškození materiálu, které má vliv na zbytkové napětí či grafitizaci diamantu. Důležitý je i vliv polarity elektrody – nástroje, kdy se pro hrubování používá pozitivní polarita a pro dokončovací řezy polarita negativní. Experimenty bylo také prokázáno, že při vyšších obvodových rychlostech kotouče je také nižší úběr materiálu ale nižší drsnost povrchu [3, 8, 21, 36, 37, 38].

Stejně jako při technologii WEDM vznikají krátery na obráběném povrchu, které jsou po hrubovacím řezu větší u zrn s vyšší průměrnou zrnitostí. Dokončovací erodování povrchu PCD musí být poté voleno s takovým minimálním přísuvem, aby se zahladily vzniklé krátery po hrubování [21].

5 GEOMETRIE STOPKOVÝCH VÁLCOVÝCH ČELNÍCH FRÉZ S PCD PÁJENÝMI DESTIČKAMI

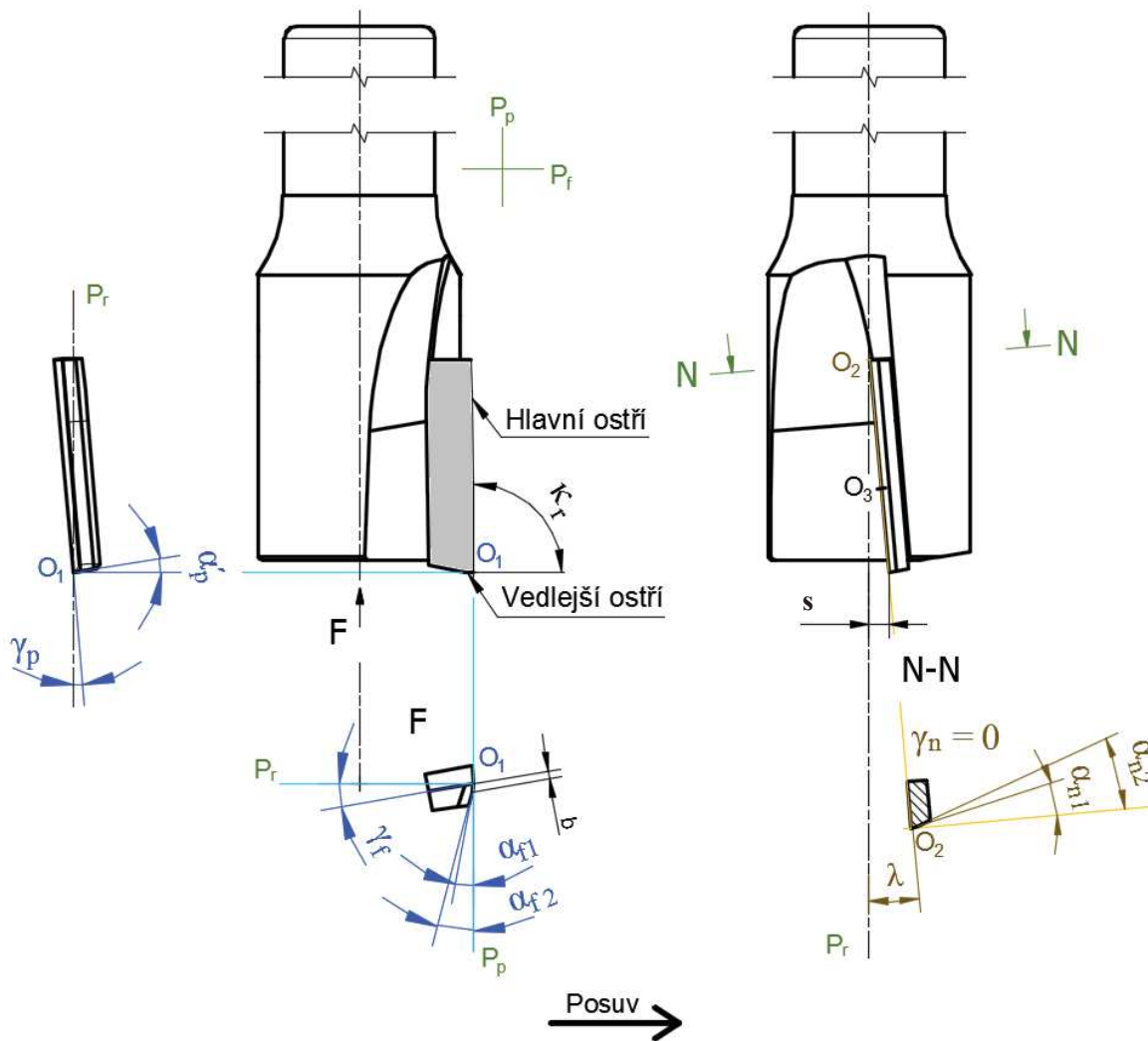
Správná geometrie frézovacích nástrojů ovlivňuje trvanlivost daných nástrojů, kvalitu obrobeného povrchu, lámání a odvod třísek a také podmínky během celého procesu. U vícebřitých fréz je vhodné volit nepravidelnou rozteč zubů nebo pro každý zub zvolit jiný úhel sklonu ostří λ , což eliminuje vibrace během obrábění [1, 12, 15].

Při popisu geometrie řezných nástrojů lze definovat dvě souřadnicové soustavy – nástrojovou a pracovní. Nástrojové roviny se definují ve statickém stavu a používají se zejména při konstrukci a výrobě řezných nástrojů. Pracovní soustavou se identifikuje geometrii nástrojů během procesu obrábění [12, 15].

Na obr. 5.1 jsou naznačeny v nástrojovém souřadnicovém systému nástrojové úhly stopkových válcových čelních fréz s PCD pájenými destičkami, které mají rovinnou plochu čela. Frézy tohoto typu mají vedlejší a hlavní nástrojové ostří. Vedlejší ostří představuje čelní fasetu, která přispívá k lepší kvalitě obrobeného čelního povrchu. K označení úhlů souvisejících s vedlejším ostřím se přidává čárka nad daný úhel, aby se odlišilo toto ostří od hlavního. Zelená barva na obr. představuje stopy jednotlivých nástrojových rovin. Levá část obr. znázorňuje geometrii fréz, která se řídí směrem posuvu. Obsahuje základní nástrojovou rovinu P_r procházející osou nástroje a uvažovaným bodem ostřím, v tomto případě bodem O_1 na spojnici hlavního a vedlejšího ostří – špičce. V této základní rovině je definován nástrojový úhel nastavení hlavního ostří κ_r a nástrojový úhel nastavení vedlejšího ostří κ_r' (v daném případě 0°), popřípadě úhel přechodového ostří. Úhel κ_r je úhel v nástrojové základní rovině mezi nástrojovou boční rovinou P_f a nástrojovou rovinou hlavního ostří P_s , která je v daném případě totožná s nástrojovou zadní rovinou P_p . V boční rovině P_f se definuje boční úhel čela γ_f a boční úhly hřbetů. Boční rovina P_f je kolmá na rovinu P_r , rovnoběžná se směrem posuvu a také prochází uvažovaným bodem ostří. Jinými slovy tato rovina je kolmá na osu nástroje. Fréza na obrázku má lomenou hřbetní plochu s bočním úhlem prvního hřbetu označeným α_{r1} a bočním úhlem druhého hřbetu označeným α_{r2} . V případě rovinných destiček se úhlům v boční rovině také říká jako úhly radiální a rovině P_f jako rovina radiální. Druhý hřbet začíná ve vzdálenosti b od uvažovaného bodu ostří v rovině P_f . Třetí rovina – zadní nástrojová rovina P_p – doplňuje ortogonální souřadný systém vůči rovinám P_r a P_f . V dané rovině a v daném bodě ostří O_1 procházejícího osou nástroje lze definovat zadní úhel čela γ_p a také zadní úhel vedlejšího hřbetu α_p' . Této rovině se také říká rovina axiální, přičemž α_p' se také nazývá jako axiální úhel hřbetu [12, 13, 15, 40].

V právě části obr. je definován nástrojový úhel sklonu ostří λ , což je úhel v nástrojové rovině ostří P_s mezi hlavním ostřím a rovinou P_r (osou). Tento úhel je u fréz se zuby ve šroubovici v každém uvažovaném bodě ostří stejný, ale vzhledem k rovinnému čelu PCD destiček se úhel λ v každém uvažovaném bode ostří mění. Proto je vhodné definovat tzv. axiální úhel čela, což je úhel mezi rovinou čela destičky a osou nástroje. Jinými slovy je to úhel λ měřený v místě, kde úhly γ_f a γ_n jsou rovny nule. Tento úhel je na rozdíl od ostatních úhlů čela konstantní. Právě na pravém obrázku je znázorněn tento případ, kdy λ je zároveň axiálním úhlem čela. Rovina čela destičky vytváří stopu, která splývá v pohledu s hlavním ostřím. Hlavní ostří destičky, které je v každém bodě naostřeno na požadovaný jmenovitý řezný průměr, vytváří prostorovou křivku, kde se většina úhlů, které nejsou dané ostřením mění. I v normálovém řezu N-N představující normálovou nástrojovou rovinu P_n se úhel čela γ_n na rozdíl od zubů ve šroubovici mění. Znázorněný normálový řez v uvažovaném bodě ostří O_2 , který v pohledu prochází osou nástroje má nástrojový normálový úhel čela γ_n roven 0° .

V případě jiného bodu např. bodu O_3 na hlavním ostří frézy, se pohled musí potočit tak, aby tento bod procházel v daném pohledu osou nástroje. Poté se vede kolmý řez k ostří tímto bodem. Normálový nástrojový úhel čela γ_n potom v bodě O_3 je pozitivní. Fréza na obr. s nenulovým axiálním úhlem má šikmé zuby, zatímco fréza s nulovým axiálním úhlem čela by měla zuby přímé.



Obr. 5.1 Nástrojové úhly válcových čelních fréz s pájenými destičkami [12].

Úhly, který vzniknou ostřením se uvádějí do závorky. V případě ostření PCD destiček se nejčastěji využívá elektroerozivní technologie obrábění, kde se ostří hřbety destičky, přičemž jejich čelo je již od výrobce PCD polotovarů vyleštěné. Pro tyto technologie se do řídicího systému zadává axiální úhel hřbetu a radiální úhly hřbetů s vzdáleností b , kde začíná druhý radiální hřbet. Základní geometrie fréz je potom určena nastavením hlavního ostří κ_r , radiálními a axiálnímu úhly ostřených hřbetů, axiálním úhlem čela a vzdáleností vedlejšího ostří od osy nástroje s . Radiální úhel čela γ_r se pro každý uvažovaný bod ostří mění v závislosti na této vstupní geometrii.

Geometrie frézovacích nástrojů se často dělí podle nástrojových úhlů v zadní a boční rovině – γ_p a γ_r . Tím se frézy rozdělují na pozitivně – pozitivní, pozitivně – negativní a negativně – negativní. Dvojitá negativní geometrie vyžaduje vyšší příkon stroje z důvodu vznikajících velkých řezných sil. Může také docházet k nepříznivým vlivům utváření třísek, případně k problémům s jejich odstraňováním [1, 12, 40].

6 TECHNOLOGIE VÝROBY STOPKOVÝCH FRÉZ S PCD PÁJENÝMI DESTIČKAMI

Pro výrobu frézy je potřeba jako první provést její návrh. Návrh frézy je založen na profilu, který má být obráběn. Při obvodovém frézování do rohu nemusí být břit na čele frézy přes osu nástroje, zatímco např. pro zavrtání do kapsy je nutné mít břit na čele frézy i přes středový bod. Je potřeba také získat podstatné informace o podmínkách, při kterých bude fréza pracovat, obráběném materiálu, způsobu upnutí frézy, případně na omezujících podmínkách z hlediska výkonu, otáček a posuvové rychlosti stroje. Při větším zatížení nástroje obráběcím procesem, je někdy nutné zjistit, jak jsou koncipovaná ložiska vřetene obráběcího stroje. U velkého axiálního úhlu čela destiček (popřípadě velkého úhlu λ) působí část celkové řezné síly v ose vřetene. Konkrétně při negativním axiálním úhlu do vřetena stroje. Naopak při pozitivních úhlech působí část celkové řezné síly z vřetena. Takové síly zatěžují ložiska v axiálním směru. Některá ložiska nemusí být na takové síly koncipovaná a můžou způsobit problém s životností, která může rapidně poklesnout. Navíc při velkých pozitivních axiálních úhlech může nastat vytažení nástroje z upínače, a proto je nutné zajistit kvalitní upínání, které tomuto zamezí. Negativnímu působí sil v ose nástroje lze zamezit konstrukcí destiček, které jsou souměrné. Příklad lze vidět na obr. 6.1. Taková fréza se používá na frézování nejružnějšího dřeva, exotických dřevin, MDF či plastů. Otáčky se udávají v závislosti na průměru frézy až na $24\,000\text{ min}^{-1}$ a vzhledem k více zubům po obvodě poté posuvová rychlost dosahuje hodnoty $20\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ [9].



Obr. 6.1 Stopková fréza se souměrnými destičky [9].

Až jsou známy všechny potřebné informace, tak se může přejít k samotné konstrukci fréz ve vhodném 3D softwarovém modeláři. Podle potřebného profilu obrobku se volí řezný průměr, upínací normalizovaný průměr a k tomu délka upínací a řezné části. V následujícím kroku je nutné zvolit materiál těla. Při větším silovém zatížení se nástroj odchyluje od své osy, což má za následek geometricky nepřesnou a méně kvalitní obrobenu plochu z hlediska drsnosti. V případě malých řezných průměrů je vhodné zvolit jako materiál těla slinuté karbidy (SK), které dosahují malého průhybu vlivem velkého modulu pružnosti. Na obr. 6.2 lze vidět frézu, která má řezný průměr 5 mm a vlivem toho je materiál těla nástroje HW, což jsou dle normy ČSN ISO 513 právě nepovlakované slinuté karbidy s obsahem primárního WC – karbid wolframu. U takových materiálů se musí změnit technologický postup výroby díky vysoké tvrdosti tohoto materiálu. Nejběžněji je možné řeznou část, sedla destiček a mezery mezi zuby

pouze brousit. Upínací část je s výjimkou sražené hrany broušená od výrobce těchto polotvarů [9, 13, 14].



Obr. 6.2 Stopková fréza s tělem z materiálu SK [9].

Rovnice (6.1) vysvětluje, proč se používají pro malé průměry právě slinuté karbidy. Modul pružnosti se nachází ve jmenovateli této rovnice. Slinuté karbidy obecně dosahují přibližně 3× vyšší hodnoty E než oceli, což znamená, že dosahují 3× menšího průhybu. Z rovnice lze také vidět, že velký vliv na průhyb má vyložení, které je v místě působící radiální síly F_r ve třetí mocnině. Proto je vhodné konstruovat co nejmenší vyložení pro danou operaci. Směrem od působící síly F_r o vzdálenost x_1 ve směru osy nástroje se průhyb samozřejmě zmenšuje. Kvadratický moment průřezu se nachází ve jmenovateli rovnice (6.1). Pro jednoduchý modelový případ kruhového průřezu se zanedbáním řezné geometrie, drážek apod., má kvadratický moment tvar podle rovnice (6.2). Zde je nutné si všimnout obrovského vlivu průměru, který se nachází ve čtvrté mocnině [14, 41].

Vztah pro průhyb vetknutého válcového nosníku má tvar [41]:

$$\omega_p(x_1) = \frac{F_r}{6 \cdot E \cdot I} \cdot (2 \cdot L^3 - 3 \cdot L^2 \cdot x_1 + x_1^3) \quad (6.1)$$

kde: ω_p [mm] - velikost průhybu frézy,
 F_r [kN] - radiálně působící síla,
 E [GPa] - Youngův modul pružnosti,
 I [mm⁴] - kvadratický moment průřezu frézy,
 x_1 [mm] - vzdálenost ve směru osy nástroje od radiálně působící síly,
 L [mm] - délka vetknutého nosníku (délka frézy vysunuté z upínače).

Kvadratický moment plného kruhového průřezu k ose těžiště frézy má tvar:

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (6.2)$$

kde: d [mm] - průměr charakteristického kruhového průřezu.

Pro reálnější situaci a rozdělení nástroje na řeznou část délky L_1 definovanou kvadratickým momentem průřezu I_1 a válcovou stopkovou část délky L_2 s kruhovým průřezem definovaným osovým kvadratickým momentem I_2 , lze napsat rovnici (6.3). V ní jsou uvedené všechny proměnné, které se týkají konstrukce nástroje. Jsou to jednotlivé průměry, vyložení a materiál těla nástroje, který je charakterizován pomocí E [14].

Rovnice pro průhyb nástroje složeného ze dvou rozdílných průřezů [14]:

$$\omega_p = \frac{F_r \cdot L_1^3}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{F_r \cdot [(L_1 + L_2)^3 - L_1^3]}{3 \cdot E \cdot I_2} \quad (6.3)$$

Následně se při konstrukci volí, jak budou PCD destičky rozmístěné, jaké budou svírat úhly, případně jak se budou vzájemně překrývat. Geometrie řezného nástroje má vliv na velikost jednotlivých sil obrábění, odvod a utváření třísky, trvanlivost a tuhost břitu, hospodárnost řezného procesu a také na výslednou kvalitu obrobené plochy. Pro obrábění dřeva jsou destičky blíže k upínací části voleny v negativním axiálním úhlu. To z důvodů, aby se dřevo na horní hraně nevyštípovalo. To lze vidět také na obr. 6.1. Při známém rozmístění PCD destiček je potřeba zkonstruovat lůžka destiček tak, aby vhodně odcházela tříska, případně zvolit vhodnou spirálu pro tento odvod třísek. Je nutné počítat s vrstvou pájky a také s tloušťkou destičky, která se nejčastěji používá 1,6 mm nebo 2,00 mm. Vedle tloušťky je také nutné zvolit vhodnou sortu PCD diamantu, což bylo řešeno v kapitole 3. Při finální konstrukci se musí ověřit, zda je fréza vyvážená, případně se musí udělat drobné změny v konstrukci, aby tohle bylo zajištěno. Po kompletním zhotovení 3D sestavy frézy, je sestava složená nejméně ze dvou součástí - těla frézy a destiček. Pro výrobní proces se musí zajistit konstrukční příprava výroby, která obsahuje potřebné výkresy, kusovníky aj. V dnešní době prostorově složitých součástí se používá digitalizace dat. To je například používáno u frézarské operace, kde je programátor z tištěného výkresu odvolán na 3D model. Tím se z oblasti CAD přechází do CAM. Pro kompletní zhotovení technické přípravy výrobního postupu je nutné ještě zajistit dokumentaci týkající se technologické a projektové přípravy výroby [1, 15, 28, 42].

Výrobní proces těla nástroje z oceli nejčastěji probíhá odděleně od přípravy PCD destiček na pájení. Tělo se zhotovuje klasickými metodami obrábění. Jako první se musí připravit polotovar pro soustružení. Ten má tvar přířezu a je připraven nejčastěji rámovými či pásovými pily. Pro soustružení se často využívá uchycení pomocí středících důlků, které je nutné předem vyrobit. Následuje broušení upínací stopky, kdy je tělo nástroje upnuto právě pomocí středících důlků. V další operaci výroby těla nástroje se uplatňuje frézování, kde je obrobek upnut za broušenou, a tudíž geometricky a rozměrově přesnou stopkovou upínací plochu. Frézuje se řezná část nástroje, kde je potřeba získat tvary sedel pro destičky, záhřbetí, drážky pro odvod třísek aj. [42].

Současně s tímto výrobním procesem probíhá příprava PCD destiček pro pájení. Je nutné získat tvar destičky, který musí být zvětšen na řezných hranách o přídavek pro broušení. Destičky se vyřezávají z diskových polotvarů, který lze vidět na obr. 3.9. Je možné použít technologii WEDM, kde je nutné začít řezat od okraje polotovaru. V jiném případě je nutné použít startovací otvor. V minulosti byl problém řezat destičky z PCD díky relativně malé elektrické vodivosti, přičemž omezujícím faktorem byl generátor. V případě řezání laserem je možné začít řezat polotvar i uvnitř kruhového polotovaru.

Když je vyrobeno tělo nástroje i připraveny destičky, je možné přejít k pájení destiček do vyfrézovaných sedel těla. Obecně nejvhodnější pájkou pro pájení PCD je slitina stříbra s nízkou teplotou tání. Pozor musí být dán na teplotu pájení, aby se nepřehřál diamant a nehrozila jeho grafitizace. Podkladní povrch pro pájení musí být adekvátně čistý. Zahřátí pájky může být provedeno kyslíko–acetylenovým plamenem, ale nejpreferovanější způsob je indukční pájení, u kterého se docílí vyššího stupně kontroly [3].

Před finálním ostřením frézy se volí ještě povlakování ocelového těla nástroje, přičemž upínací část je proti povlakování chráněna. Povlakování se používá na ochranu před korozí.

Ostření PCD je poslední obráběcí operací ve výrobě nástroje, která odstraní poškození destiček způsobené předchozím řezáním a generuje požadovanou geometrii a kvalitu řezné hrany. Ostření je vhodné provést metodou WEDM nebo EDM–G, což bylo vysvětleno v kapitole 4. Jedná se tedy o nekonvenční operaci obrábění, která dává potřebnou kvalitu řezné hrany a hřbetu nástroje. Čelo nástroje je leštěno do zrcadlového povrchu již výrobcem PCD polotovarů [36, 38].

Ve většině případů, pokud to konstrukce stopkové frézy umožňuje, nastupuje na řadu vyvažování, kdy se kontroluje hodnota obvodového házení. Vždy se vyvažuje do určité mezní hodnoty nevývahy vyjádřené ve stupni G. Nevývaha může vzniknout výrobními tolerancemi či v důsledku opakované přeastřování a odbrušování těla za diamantovým plátkem. Nevývaze, vznikající při nerovnoměrném dělení zubů, se zamezuje už při konstrukci nástroje. Nerovnoměrné dělení zubů eliminuje vznik vibrací. Nevývahu je potřebné kontrolovat zejména u vysokých otáček vřetene a u větších průměrů nástroje. Stejně tak je důležité kontrolovat nástrojový držák, v kterém je nástroj upnut. Uvádí se kontrolovat nevývahu držáku při otáčkách vyšších než 8000 min⁻¹. Dobře vyvážený držák spolu s nástrojem poskytuje lepší kvalitu obrobené plochy, vyšší stabilitu řezu, vyšší životnost nástroje i ložisek vřetene. Tyto faktory nabývají na významnosti při otáčkách vyšších než 30 000 min⁻¹. Pro vysokorychlostní obrábění se nejčastěji používají tepelné držáky, které nemají dodatečné prvky jako upínací šrouby či drážky. Příklad vyvažovacího stroje je na obr. 6.3 [9, 32, 43].



Obr. 6.3 Vyvažovací stroj Haimer [44].

Posledními operacemi je čištění, konzervace nástroje a jeho balení.

7 ASPEKTY OBRÁBĚNÍ PLASTŮ

Při obrábění plastů se musí brát v úvahu jejich odlišné chování a vlastnosti oproti materiálům kovovým. Obrábět plasty lze na běžných strojích určených pro kovoobrábění i dřevoobrábění. Diamantové nástroje jsou velmi vhodné pro obrábění špičkových technických plastů i běžných termoplastů. Všeobecně mají termoplasty nízký bod tání a nízkou tepelnou vodivost. Z toho důvodu je požadováno, aby co nejmenší množství tepla přecházelo do obrobku a vůbec, aby se eliminoval vznik nežádoucího tepla třením nástroje o obrobek [2, 45, 46].

Doporučuje se proto dodržovat následující podmínky [45, 46]:

- řezné nástroje musí být stále ostré a musí se dotýkat obráběného materiálu pouze řeznou částí,
- musí být zajištěn dostatečný odvod třísek,
- používán co největší posuv
- a při operacích s nadměrným vznikajícím teplem je vhodné použít chladicí kapalinu, pokud to obráběný materiál umožňuje.

Nadměrné teplo může způsobit deformaci obrobku, s tím související vnitřní napětí, změnu barvy, měknutí či v horším případě natavení jeho povrchu [45].

Problém při obrábění může způsobovat i pružnost termoplastů. Youngův modul pružnosti E z tahové zkoušky vychází u plastů v řádech jednotek GPa, zatímco klasická uhlíková ocel má hodnotu E 210 GPa. To znamená, že při stejném napětí v tahu, plasty vykazují o mnoho vyšší deformaci než oceli. Plasty jsou tak pružnější, což zhoršuje přesnost obrábění. Proto je nutný velmi ostrý břit použitých nástrojů. Druhou záležitostí, kterou způsobuje nízký modul pružnosti, je upínání, které může také způsobovat problém. Řezné síly u plastů dosahují menších hodnot než u kovů, což značí, že mohou být použity menší upínací síly. Příliš velké upínací síly při nejmenším pružně deformují obrobek, což může mít vliv na přesnost obrábění. Při odepnutí obrobku se pružné deformace vrátí do původní nezatíženého stavu a obrobená plocha už nemusí mít požadovaný geometrický tvar. Doporučují se menší upínací síly působících ve více bodech. Pro obrobky typu pouzder se doporučuje upínání pomocí upínacích trnů, které sníží riziko deformací. Pro tenkostěnné ploché součásti upnutí pomocí vakuových systémů [2, 45, 46].

Pro chlazení se používají klasické chladicí emulze. U amorfních plastů může být použita pouze čistá voda či stlačený vzduch, který je také vhodný pro odvod třísek z místa řezu. Amorfní materiál je např. polykarbonát, který je náchylný k vnitřnímu praskání právě při použití chladicí emulze. Chlazení povrchu zvyšuje jeho kvalitu a má vliv na zlepšení tolerancí při obrábění, jelikož tolerance pro obrábění termoplastů jsou vyšší než pro kovové obrobky. Je to z důvodu vyššího součinitele délkové teplotní roztažnosti a díky deformacím, které jsou způsobené vnitřním pnutím během obrábění. Deformace nastávají zejména při obrábění, při kterém vznikají asymetrické tvary nebo při velkých změnách v rozměrech např. při frézování hlubokých drážek. Toleranční stupně pro obrábění termoplastů se udávají IT9–IT11. Pro přesnější toleranční stupně je nutné po vyhrubovací operaci použít tepelné zpracování pro odstranění vnitřního pnutí. Velký vliv na výslednou kvalitu povrchu má správně zvolený

nástroj se správně zvolenou řeznou geometrií. Přesnějších tolerancí lze také dosáhnout použitím plastů vyšších tříd. Na obr. 7.1 lze vidět obrábění plastů s chlazením pomocí stlačeného vzduchu, který je velmi vhodný pro frézování tvarově složitých součástech, kde velmi efektivně odstraňuje třísky z místa řezu [2, 45].

Jako startovací řezné podmínky pro nástroje s PCD jsou nejčastěji voleny ty, jakými se obrábí pomocí slinutých karbidů. Za takových okolností by trvanlivost měla být vyšší $50\times$ až $200\times$ než u slinutých karbidů. Obrábění materiálů z PVC se vyznačuje jednou z nejvyšších řezných rychlostí. Firma AK Plast [47] má zpracované tabulky pro geometrii nástrojů a řezných podmínek pro jednotlivé obráběcí operace a jednotlivé plasty. Konkrétně pro frézování PVC je doporučena řezná rychlost v_c $300\text{--}1\,000\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuv na zub f_z až $0,5\text{ mm}$. Je důležité volit takový počet zubů, aby byly vzniklé třísky dostatečně odváděny. Radiální úhel hřbetu nástroje pro frézování takového materiálu je volen mezi $5^\circ\text{--}10^\circ$ a radiální úhel čela $0^\circ\text{--}15^\circ$. Pozitivní radiální geometrie se také uvádí pro obrábění uhlíkových vláken nebo kevlaru, jelikož je nutné řezat vlákna, aby se zamezilo jejich vytahování z matrice [3].

Po dokončení obrábění je vhodné hotové součásti ošetřit a skladovat tak, aby se zamezilo příjmu vlhkosti z okolí, což může mít za následek nabobtnání a změnu rozměrů. Pro velmi přesné obrobky se doporučuje skladování v plastovém obalu s pohlcovačem vlhkosti [45].



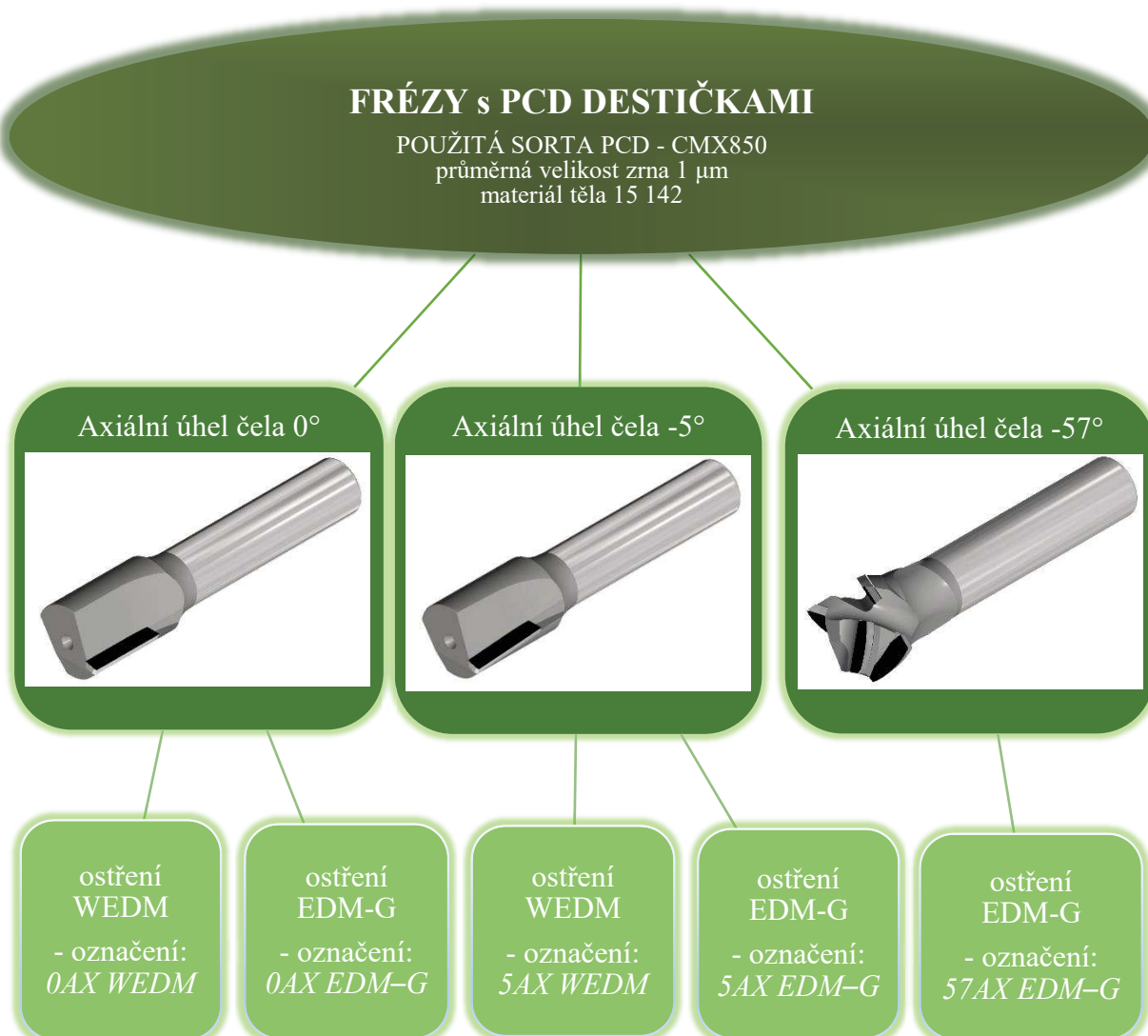
Obr. 7.1 Chlazení plastů pomocí stlačeného vzduchu [48].

8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část je rozdělena na pět podkapitol, které se zabývají jednotlivými sekcemi experimentu. V první podkapitole je stručně napsáno, jak probíhala konstrukce a ostření fréz. Celkem bylo vyrobeno 5 válcových čelních stopkových fréz, které se liší geometrií a technologií ostření destiček. To lze vidět přehledně na obr. 8.1, kde poslední úroveň značí, jak byly destičky ostřeny včetně jejich příslušného označení, které se používá i dále v textu. Frézy jsou určené pro frézování do rohu, což bylo přizpůsobeno experimentu.

Po výrobě fréz byla provedena analýza naostřených destiček, kde se měřily vybrané nástrojové úhly, rozměry nástroje a také drsnost povrchu po ostření nebo poloměr zaoblení břitu.

Následovalo experimentální měření silového zatížení, kde se v prvním kroku analyzovala rozdílná geometrie fréz. Po tomto zhodnocení se provedl úplný faktoriální experiment, který měl za úkol zjistit, jak jednotlivé řezné parametry ovlivňují drsnost povrchu obrobku a zda byly startovací řezné podmínky pro měření silového zatížení vhodně nastaveny.



Obr. 8.1 Schéma experimentálních fréz.

Posledním a obecně hlavním experimentem bylo porovnání dvou technologií, pomocí kterých byly destičky ostřeny. Toto porovnání spočívalo v silové analýze po určitých časových úsecích používání nástroje.

Materiál obrobku byl volen plast, přesněji PVC, což je zkratka polyvinylchlorid. Takový materiál je volen z důvodu, jelikož plasty jsou ve strojírenství stále využívanějším materiálem, které se stále zdokonalují. Některé plasty se označují jako technické plasty a jejich využití je přímo pro strojírenské účely. Pro obrábění takových plastů a kompozitů na bázi plastů je vhodné využít jako rezný materiál právě diamant [46].

Zvolený termoplast PVC se vyznačuje jednou z nejvyšších měrných hmotností, tvrdostí a také vysokou pevností v tahu v rámci běžných plastů, které jsou finančně přijatelné pro trvanlivostní zkoušky fréz. Právě tvrdost a pevnost jsou jedny z faktorů, které souvisí s velikostí měrné rezné síly, obrobiteľností a také abrazivitou daného materiálu. Přesné označení materiálu obrobku a jeho vybrané mechanické vlastnosti jsou na následujícím obrázku 8.2. Příloha 1 obsahuje materiálový list od dodavatele, kde použitý materiál obrobku má obchodní označení MEDUR 2000. Tento obrobek má tvar desky s tloušťkou 20 mm. Je vyroben pomocí extruze neboli vytlačování. Tím má materiál přibližně stejné mechanické vlastnosti ve všech místech a směrech, na rozdíl od vlákniny vyztužených kompozitů. Použitý materiál by měl být tedy izotropní. Řezná rychlost pro frézování PVC se doporučuje dle zdroje [47] 300–1000 m·min⁻¹. Tento údaj říká, že se jedná o vysokorychlostní obrábění, který se označuje zkratkou HSC (High speed cutting) [1, 46, 47].

OBROBEK - PVC - MEDUR 2000

Mechanické vlastnosti:

- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| • měrná hmotnost | $\rho = 1,42 \text{ g/cm}^3$ |
| • pevnost v tahu | $R_m = 50 \text{ MPa}$ |
| • Youngův modul | $E = 3 \text{ GPa}$ |
| • vrubová houževnost při +23°C | $KC = 11 \text{ kJ/m}^2$ |
| • tvrdost dle Shoreho D | $HSD = 74$ |

Obr. 8.2 Mechanické vlastnosti obrobku.

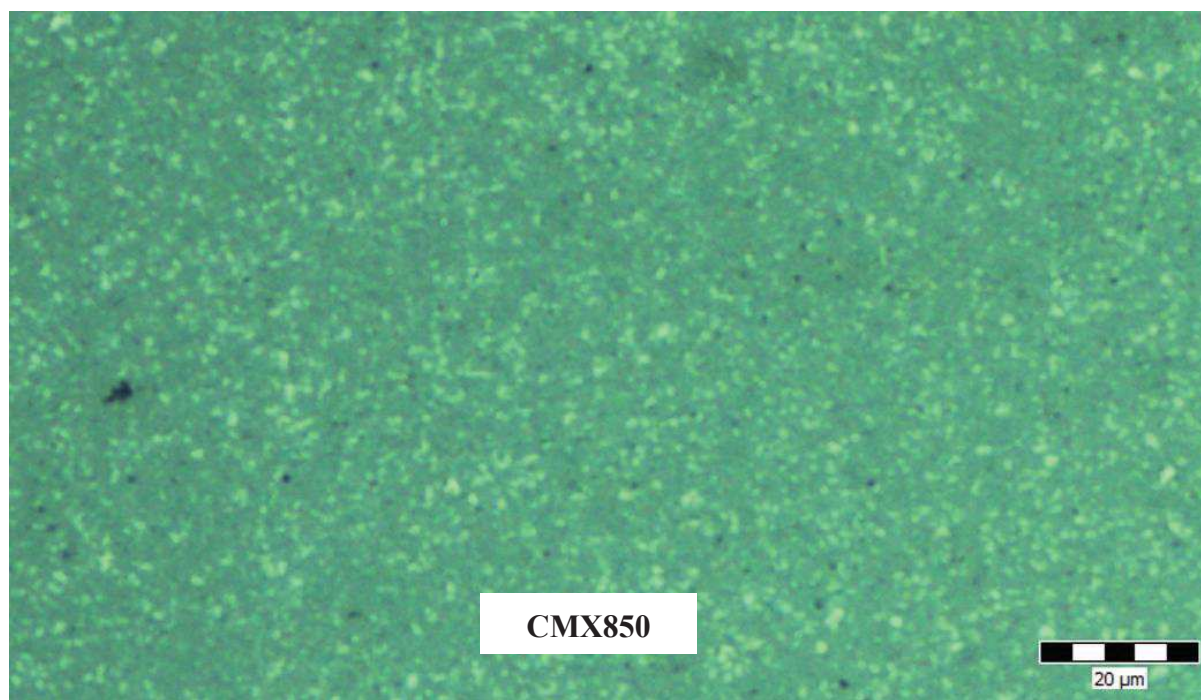
8.1 Konstrukce a ostření experimentálních fréz s PCD destičkami

Konstrukce fréz probíhala v 3D konstrukčním softwaru Inventor Professional 2015 fy. Autodesk. Následovala výroba, kde pozornost byla věnována ostření. Vyrobeny byly 3 sady fréz, kde první sada obsahuje dvě frézy s nulovým axiálním úhlem čela, druhá sada také dvě frézy ale s axiálním úhlem čela 5° a třetí sada obsahuje jednu frézu, které přísluší daný úhel 57° . Poslední sada obsahuje pouze jednu frézu vyrobenou metodou EDM–G, jelikož běžnou metodou WEDM frézu s tak velkým úhlem není možné vyrobit. Přehledně jsou sady znázorněny na obr. 8.1.

Pro samotnou konstrukci bylo nutné zjistit důležité vstupní údaje. Mezi nimi byl průměr upínací části nástroje a počet otáček, který použitá frézka dokáže dosáhnout. Tento údaj je nepostradatelný, jelikož pro frézování PVC se doporučuje vysoká řezná rychlost uvedená v úvodu kapitoly 8. Byla volena spíše horní hranice řezné rychlosti pro rychlejší opotřebení PCD destiček, které vynikají vysokou trvanlivostí. Z těchto důvodů byl tedy zvolen průměr upínací části 12 mm a průměr řezné části 18 mm, kde se vyšším průměrem dosáhlo vyšší řezné rychlosti při stejných otáčkách vřetene. Vstupní otáčky byly nastaveny na $15\,000\text{ min}^{-1}$. Při těchto otáčkách se dosáhlo řezné rychlosti dle vztahu (1.10):

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 18 \cdot 15\,000}{1000} = 848,23\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

Doporučována sorta PCD diamantu pro obrábění plastů od fy. Element Six má označení CMX850. Vyznačuje se velmi jemnozrnnou strukturou, kde průměrná velikost zrn je $1\ \mu\text{m}$ – viz obr. 8.3.



Obr. 8.3 Struktura PCD diamantu sorty CMX850 od výrobce Element Six.

Válcové čelní frézy byly zkonstruovány jako pravořezné, což je klasická koncepce frézovacích nástrojů. Díky vysoké trvanlivosti PCD byly frézy také voleny jako jednozubé, čímž se zajistilo nejrychlejší možné opotřebení fréz. Upínací část je válcová, která se dá použít jak pro kleštinové upínače, tak pro hydraulické či tepelné upínače, které jsou zvláště vhodné pro vysokorychlostní obrábění.

Vedlejší ostří na čele nástroje má délku 0,6 mm, což značí hodnotu $2 \times$ startovacího posuvu na zub. Větší délka by způsobovala nežádoucí zahřívání a následné deformace plastového obrobku.

Pro experiment bylo nutné zajistit, aby všechny frézy měly kladný radiální úhel čela γ_f , který je nutný pro frézování PVC. Uvedené frézy se v zásadě liší axiálním úhlem čela, který je uveden jako úhel mezi rovinou čela destičky a osou nástroje, což bylo vysvětleno v kapitole 5. Voleny jsou záporné axiální úhly, které se často vyskytují v dřevařském průmyslu. Tato geometrie zabezpečuje vhodný průběh např. při frézování do rohu, kdy destičky s takto negativním úhlem jsou umístěny tak, aby obráběly horní plochu polotovaru, čímž minimalizují tvorbu otřepů. Negativní úhel čela destiček se také využívá s vhodnou kombinací destiček s pozitivním úhlem čela u obrábění kompozitních materiálů, čímž se zamezuje vzniku delaminací a otřepů.

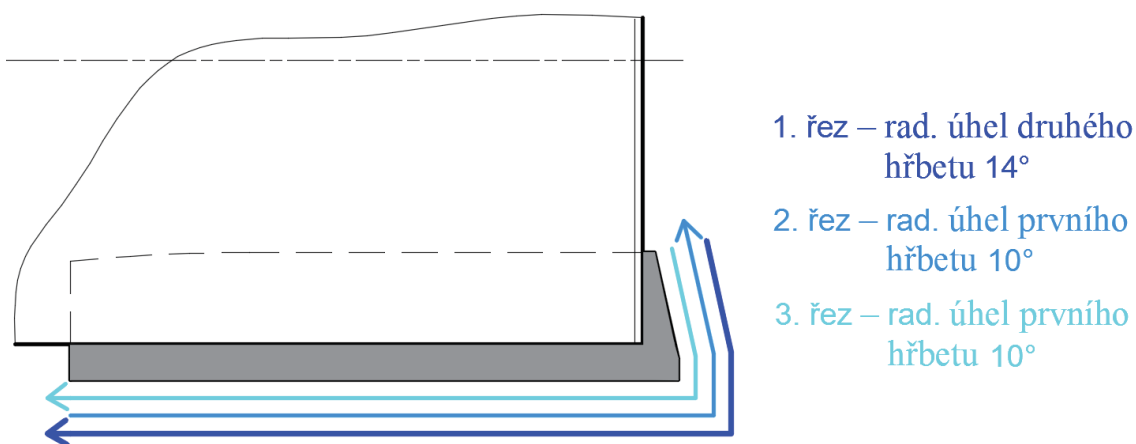
Jelikož destičky jsou rovinného charakteru, tak se jejich určité úhly v případě nenulového axiálního úhlu čela pro každý uvažovaný bod ostří mění – viz kapitola 5. Jediné konstantní úhly, které lze zabezpečit výrobou, jsou úhly hřbetů. Zkonstruovány byly dva radiální úhly hřbetu α_f , kdy první úhel byl s ohledem na materiál obrobku volen 10° a druhý 14° . Tento druhý úhel začíná za vrstvou PCD na karbickém podkladu destičky. V tomto případě 0,6 mm od bodu ostří v ortogonální rovině destičky. Axiální úhel vedlejšího hřbetu α_p na čele nástroje byl volen jen jeden a to 10° . Radiální úhel čela se díky negativnímu axiálnímu úhlu čela mění. A to se sice dál od čela nástroje se dosahuje menších kladných hodnot, až v určité výšce může dojít k tomu, že radiální úhel čela z pozitivního smyslu přejde na negativní. S přihlédnutím k materiálu obrobku je u všech fréz zaručen kladný radiální úhel čela v celém rozsahu α_p . Nástrojový zadní úhel čela γ_p se také pro každý uvažovaný bod ostří mění. Pro frézy sorty 5AX je tento vliv změny daného úhlu zanedbatelný a úhel γ_p dosahuje přibližné velikosti axiálního úhlu 5° ve všech bodech ostří. Největší odchylka velikosti γ_p od axiálního úhlu je necelých $0,1^\circ$ a to na špičce nástroje. U nástroje 57AX EDM-G je ale změna velikosti nástrojového zadního úhlu vzhledem k velkému axiálnímu úhlu znatelnější. Ve skutečnosti tento nástroj má axiální úhel čela 54° . Pro uvažovaný bod ostří na špičce destičky je však úhel γ_p 62° a se zvyšující se hodnotou α_p se úhel snižuje až k hodnotě $54,5^\circ$. Díky této velké změně je fréza označena věrohodnější hodnotou 57° , což symbolizuje přibližnou střední hodnotu měnicího se úhlu γ_p . Hodnoty úhlu γ_p 54° se v žádném bodě ostří nedosáhne, jelikož fréza nabývá pouze pozitivních radiálních úhlů čela (nikde není nulová hodnota). Radiální úhel čela dosahuje na špičce nástroje hodnoty 44° a blíže k upínací části nástroje klesá až k hodnotě $+3^\circ$, čímž se naopak úhel břitu v boční rovině od čela nástroje stále zvyšuje, jelikož radiální úhly hřbetů jsou v každém bodě ostří stejné. Jaké nabývají jednotlivé frézy úhly lze vidět v Příloze 2, kde jsou výkresy sestavy všech fréz. Jaké ve skutečnosti dosahují jednotlivé frézy úhly bude dále rozebráno v kapitole 8.2.

Ještě před samotným ostřením byly frézy povlakovány chemickým niklem, který tělo fréz chrání před korozí.

Ostření PCD destiček bylo prováděno na elektroerozivním drátovém stroji fy. Fanuc a elektroerozivním brousícím stroji fy. Vollmer.

Fanuc ROBOCUT α -C600iA je poloautomatický CNC stroj, který pro ostření fréz používá přídatné zařízení, které poskytuje jednu osu stroje navíc, viz obr. 4.6. Pro řezný proces je nutné vytvořit NC kód. Ten je vytvořen na síťově propojeném přilehlém počítači prostřednictvím softwarového programu ProfDia, který lze vidět na obrázku 4.3. Do prvního vstupního dialogového okna je nutné zadat délku vyložení nástroje s upínačem. To je nutné přesně změřit na optickém měřicím přístroji, v tomto případě tak bylo učiněno na přístroji fy. Zoller. Pozice destičky při erodování byla nastavena dole a řez probíhal v rovině úhlu hřbetu. Korekce průměru byla nastavena nepatrně do kladné hodnoty, aby byl nástroj naostřen k horní toleranční hodnotě řezného průměru. Poté byl tento projekt vytvořen a v následujícím dialogovém okně se nastavily další nutné informace pro ostření. Byla načtena 2D kontura v souboru s příponou dxf. Kromě směru vnějšího řezu, nájezdu, přejezdu aj., se do programu zejména zadávají příslušné hodnoty nástrojových úhlů v jednotlivých částech kontury – axiální úhel hřbetu, první radiální úhel hřbetu, druhý radiální úhel hřbetu včetně vzdálenosti od ostří, kde tento úhel má začít. V rámci postupu se nastaví i pozice měřicích bodů pro sondování destičky, které probíhá na vyleštěném čela destičky. Na základě zadaných pozic měřicích bodů je do stroje poslán NC měřicí program, který určí přesnou pozici destičky na nástroji. To znamená, v jakém úhlu pootočení osy A stroje se destička v upínači nachází a jak je vůči tělu nástroje připájená – jaké jsou úhly čela. Po nasondování je program s měřenými daty odeslán zpět do počítače. V programu ProfDia se nasondované měřené hodnoty načtou, zkontrolují, a nakonec je do stroje poslán NC kód pro přesné obrábění dané frézy.

Použitý drát byl z mosaze o průměru 0,25 mm. Ostření probíhalo na tři řezy, u kterých byly nastaveny rozdílné parametry generátoru. Prvním řezem byl ostřen druhý radiální hřbet s úhlem 14° , který zároveň vyhruboval materiál pro ostření prvního radiálního hřbetu. První řez také pokračoval na ostření vedlejšího ostří a odlehčení s podbrusem na čele nástroje. Druhý a třetí řez již ostřil první radiální úhel hřbetu a také zbytek kontury jako v případě řezu prvního. Tento průběh ostření lze vidět na obr. 8.4.



Obr. 8.4 Poloha destičky při ostření a pořadí jednotlivých řezů s příslušnou hodnotou úhlu radiálního hřbetu.

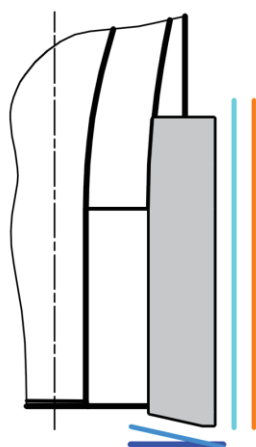
Určité parametry řezání lze vidět v tabulce 8.1. Lze si všimnout, že u prvního řezu byla skutečná hodnota rychlosti posuvu drátu nižší než nastavená. To bylo způsobeno řezem, kdy drát odebíral materiál celým svým průměrem, jelikož destička obsahuje na funkčních částech přídatky pro ostření. Tyto přídatky zaručí odstranění teplotního poškození, které je způsobené

řezáním destiček laserem z PCD kruhových polotovarů. Při počítání velikosti přídávku se musí také počítat s operací pájení, kdy při dosažení nejvyšší tolerance nepřesnosti pájení je stále zabezpečen minimální přídavek pro ostření. Pro hodnoty proudu v jiskrové mezeře platí, že čím vyšší hodnota řízeného proudu, tím nižší řezná rychlost, ale lepší kvalita povrchu. Skutečné napětí koresponduje s referenčním napětím, které zabezpečuje udržování konstantní velikosti jiskrové mezery. Platí, že čím vyšší hodnota, tím nižší řezná rychlost. Vyšší rychlost odvinu a napnutí drátu zabezpečuje vyšší přesnost řezu.

Tab. 8.1 Parametry řezů při WEDM.

Parametr řezu	Jednotka	1. řez	2. řez	3. řez
Nastavená rychlost posuvu drátu	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$	10	5	2,5
Skutečná rychlost posuvu drátu	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$	~1,9	~5	~2,5
Skutečné napětí v jiskrové mezeře	[V]	~23	~38	~58
Skutečné řízení proudu v jiskrové mezeře	[A]	~0,3	~0,1	~1,8
Čas trvání pulzu	$[\mu\text{s}]$	7	2	2
Rychlost odvinu drátu	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	4	6	6
Napnutí drátu	[g]	1300	1700	1700

V případě technologie EDM–G příprava NC programu vypadá obdobně. Ostření bylo prováděno na automatickém stroje Vollmer QXD 250, který lze vidět na obr. 4.10. Parametry generátoru pro erodování PCD jsou od výrobce nastaveny v závislosti na daném typu PCD a na daném čísle řezu. Vzhledem k sortě PCD – CMX850 – byl volen program výbrusu pro nejjemnější typ polykrystalického diamantu. Je možné erodovat každý úhel až čtyřmi řezy odstupňovaných od těch hrubovacích až k těm dokončovacím. Na obr. 8.5 lze vidět, jak byly frézy s axiálním úhlem čela 0° a 5° ostřeny. Jako první se erodoval podbrus s 3° , následně axiální hřbet a poté první hřbet s radiálním úhlem 10° . Každá tato část destičky byla erodována dvěma řezy. První řez byl čistě hrubovací a druhý řez jako třetí ze 4 možných. Druhý radiální úhel hřbetu na karbidickém podkladu – 14° – již nebyl erodován jako v případě WEDM, ale konvenčně broušen klasickým abrazivním kotoučem, na stejném CNC stroji. Jednotlivé rychlosti obou kotoučů lze vidět v tabulce 8.2.

2 řezy – podbrus 3° 2 řezy – ax. úhel hřbetu 10° 2 řezy – rad. úhel prvního hřbetu 10° Abrazivní broušení – rad. úhel druhého hřbetu 14°

Obr. 8.5 Posloupnost ostření destičky technologií EDM–G včetně uvedených úhlů.

Tab. 8.2 Řezné a posuvové rychlosti při EDM–G.

	Jednotka	Erodování		Broušení
		1.řez	2. řez	
Řezná rychlost kotouče	[m·s ⁻¹]		2,5	30
Posuvová rychlost	[mm·min ⁻¹]	~1,4	~4	14

Fréza *57AX EDM–G* byla erodována celkem třemi řezy. Dva řezy byly použity pro ostření prvního úhlu hřbetu a třetí řez vytvořil druhý hřbet s úhlem 14°. Tato fréza byla použita pouze pro měření vlivu rozdílné geometrie fréz, a proto jí není věnována větší pozornost z hlediska ostření ani následné analýzy ostřeného povrchu.

Při konstrukci jsou frézy velmi přesně vyvážené. Drobné nepřesnosti výroby, vliv povlakování nebo nestandardní ostření může způsobit nevyváhu. Proto je vhodné frézy i vzhledem k vysokým otáčkám na nevyváhu zkontrolovat a případně dovyvážit. Následující tabulka 8.3 ukazuje stupeň kvality nevyváh jednotlivých fréz při otáčkách 15 000 min⁻¹. Bylo odzkoušeno u frézy *5AX EDM–G*, že při nižších otáčkách je stupeň nevyváhy nižší. Konkrétně při otáčkách 12 000 min⁻¹ bylo naměřeno G 2.0.

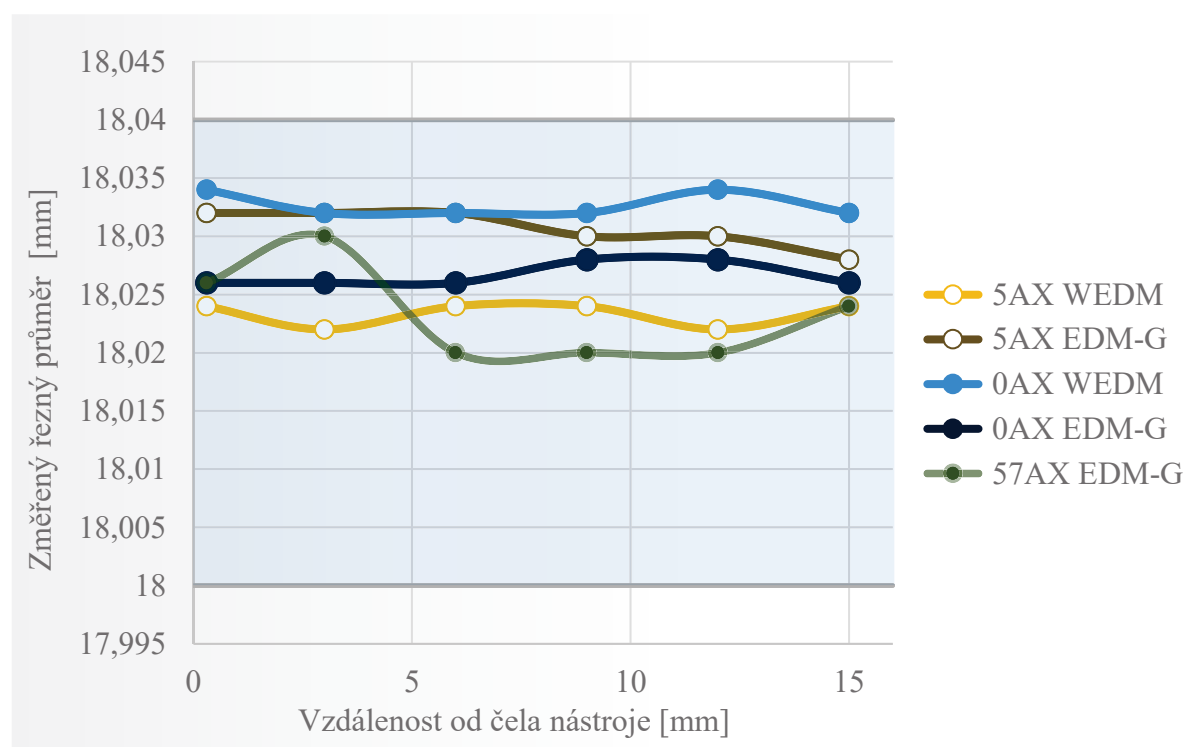
Tab. 8.3 Stupeň kvality nevyváh fréz při otáčkách 15 000 min⁻¹.

Fréza	<i>0AX WEDM</i>	<i>0AX EDM-G</i>	<i>5AX WEDM</i>	<i>5AX EDM-G</i>	<i>57AX EDM-G</i>
Stupeň nevyváh	G 4,9	G 5,6	G 6,1	G 2,5	G 6,9

Poslední operací bylo gravírování fréz na upínací stopkovou část, kde bylo laserem vypáleno označení jednotlivých fréz, aby bylo jednodušší je od sebe odlišit.

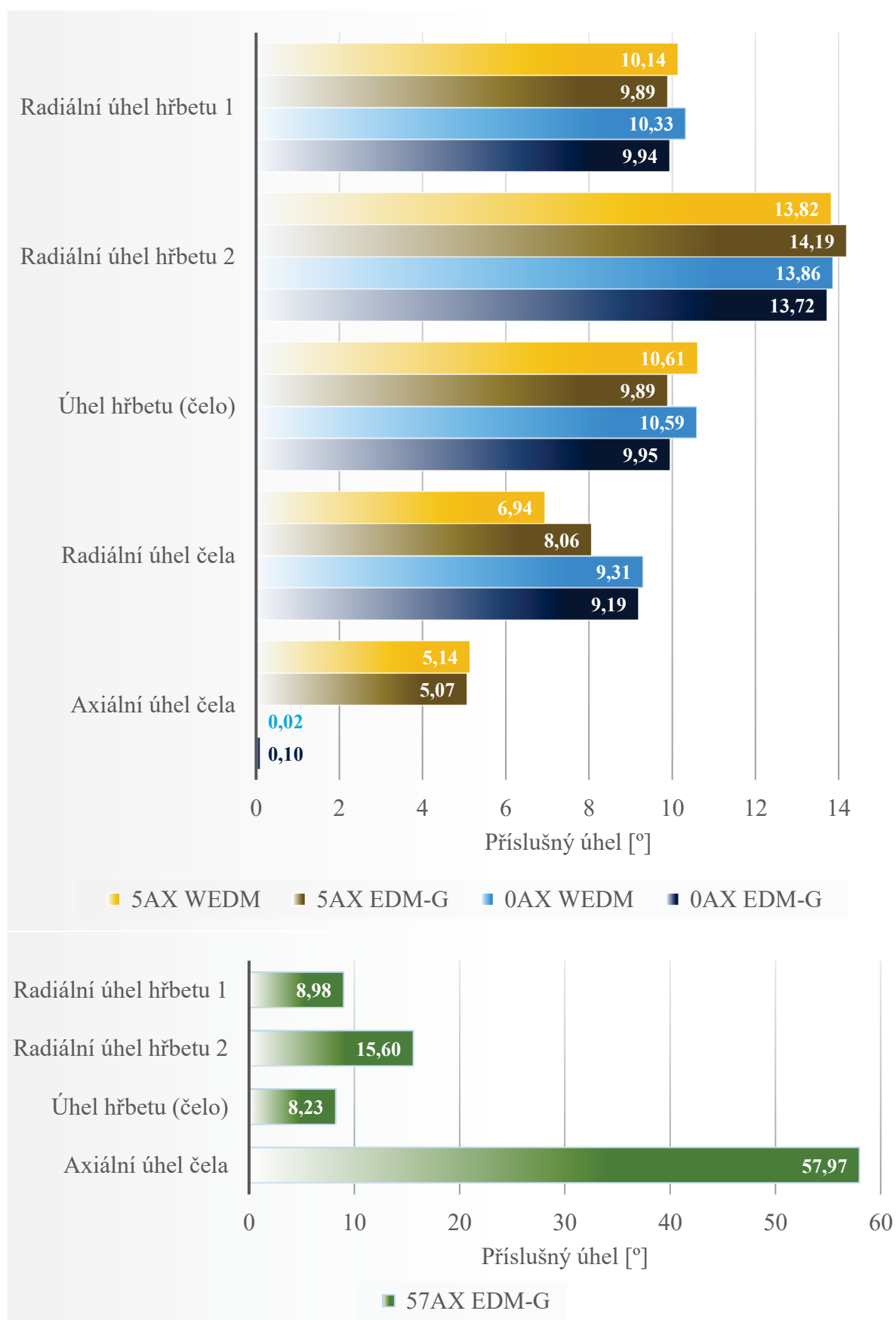
8.2 Analýza vyrobených nástrojů

Po ostření byla zkontrolována rozměrová přesnost nástroje, přesněji řezný průměr frézy, který musel ležet v rozměrové toleranci a toleranci obvodového kruhového házení dle výkresové dokumentace. Tyto změřené hodnoty jednotlivých fréz lze najít v protokolech měření v Příloze 3, které byly pořízeny na měřícím přístroji Genius 3s fy. Zoller. Jak lze vidět na obr. 8.6, změřené průměry u všech fréz jsou posazeny k horní hranici tolerance rozměru, což umožňuje následné přeastření, čímž se zmenší průměr součástí, který se ale stále bude pohybovat v blízkosti jmenovité hodnoty průměru 18 mm. Toleranční pole rozměru je vybarveno světle modrou barvou. Dle výkresové dokumentace byla také splněna zadaná tolerance obvodového házení destiček.



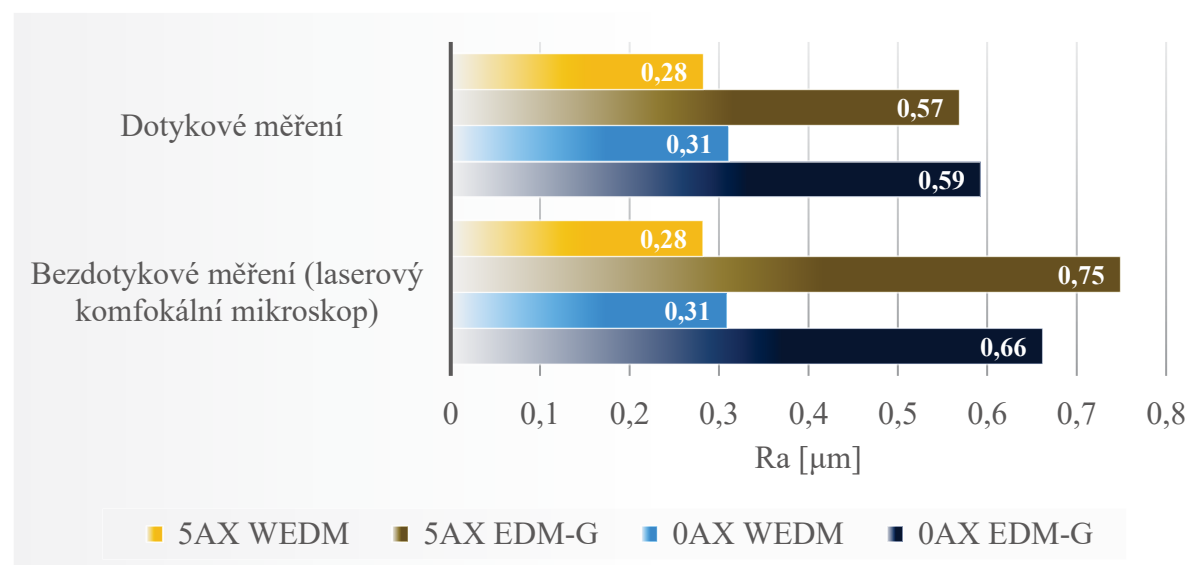
Obr. 8.6 Řezné průměry jednotlivých fréz.

Součástí výstupních protokolů pro každou frézu byly taktéž nástrojové úhly, kde jejich souhrn lze vidět na obr. 8.7. Radiální úhly byly změřeny 5,4 mm v ose z od špičky destičky. To je důležité definovat, jelikož jak bylo zmíněno, tak radiální úhel čela se v každém bodě ostří mění. Radiální úhel čela u frézy *5AX WEDM* se relativně liší od ostatních fréz, což mohlo být zapříčiněno dvěma ostřeními axiálního úhlu hřbetu. Tím je vedlejší ostří blíže k čelu frézy. Byl tak změřen radiální úhel ve vzdálenosti 5,4 mm od špičky, zatímco v případě prvního ostření, by měřená vzdálenost v ose z byla např. 4,9 mm od současné špičky destičky a tím by byl naměřen vyšší rad. úhel čela. Spodní část obrázku je věnována fríze *57AX EDM-G*. Její úhly jsou podobné ostatním frézám s rozdílem v axiálním úhlu čela. Radiální úhel čela této frézy nebylo možné změřit. Ten dle výkresové dokumentace má velikost na špičce nástroje 44° a v rámci jedné destičky jeho hodnota klesá až k $+3^\circ$. Destičky na fríze se vzájemně překrývají a všechny mají stejné nástrojové úhly.

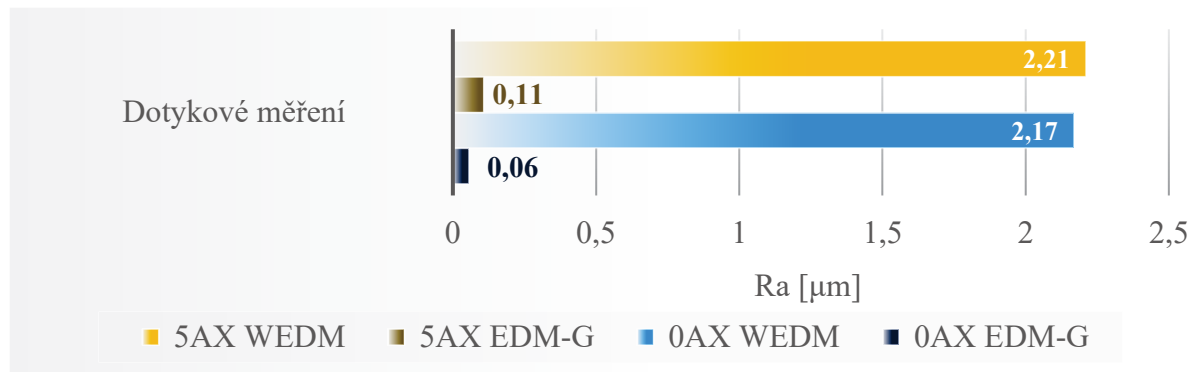


Obr. 8.7 Porovnání nástrojových úhlů fréz.

Další analýzy byly věnovány detailnějšímu měření ostří a drsnosti výbrusu – hřbetní radiální plochy. Tento rozbor je věnován pouze frézám s axiálním úhlem čela 0° a 5° , jelikož právě tyto frézy byly testovány na změny v jejich silovém působení po určitých dobách frézování. Prvním dílčím měřením bylo měření drsnosti laserovým konfokálním mikroskopem LEXT OLS4000 firmy Olympus s použitím objektivu s 50i násobným zvětšením. Frézy byly položeny prostřednictvím broušené stopkové upínací části na prizmatickou podložku. Následně byla změřena lineární drsnost, kde získané protokoly jsou uvedeny v Příloze 4. Tato příloha obsahuje celkem 8 stran, kde každé fréze patří strany dvě. Ty obsahují celou řadu parametrů drsnosti, které jsou vždy uvedeny ve čtyřech řádcích s čísly 1-4 lišících se hodnotou λ_c , což je základní délka drsnosti neboli cut-off. Ten vyjadřuje, jak bude filtrována drsnost z celkového změřeného profilu povrchu. V podstatě se jedná o velikost mezní vlnové délky, která separuje vlnitost od drsnosti. Dle normy ČSN EN ISO 4288 je pro uvedenou drsnost nutné použít jako základní délku drsnosti 0,8 mm a vyhodnocovaná délka drsnosti musí být 4 mm s přídatkem přejezdu a výjezdu, což také slouží pro odfiltrování prvních a posledních hodnot. Grafický průběh drsnosti v příložených protokolech, kde vodorovná osa ukazuje hodnoty měřené délky v jednotkách mikrometrů, lze vidět, že tato vyhodnocovaná délka drsnosti byla splněna. Správné hodnoty se tedy dle normy nachází v 2. řádku všech osmi protokolů. Kontrolní měření bylo provedeno dotykovou metodou měření drsnosti na drsnoměru Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50 s poloměrem zaoblení snímacího hrotu $2 \mu\text{m}$, kde protokoly z tohoto měření lze najít v Příloze 5. Tyto protokoly obsahují vždy křivku a naměřené hodnoty drsností, křivku amplitudového rozložení a křivku materiálového poměru s jeho parametry. Tato příloha obsahuje 16 stran, kde každé fréze přísluší 4 strany. Z toho dvě strany obsahují protokol týkající se měření na diamantové vrstvě označené předposledním dvojčíslem 01 a dvě strany se týkají měření drsnosti na karbidickém těle označené předposledním dvojčíslem 02. Drsnosti byly měřeny v souladu s normou ČSN EN ISO 4288. Průměrné aritmetické úchytky jednotlivých profilů získaných pomocí dvou rozdílných metod měření jsou vyneseny do obr. 8.8. Lze vidět, že obě metody jsou srovnatelné. Obr. 8.9 ukazuje drsnost druhého úhlu hřbetu, kde v případě drátové elektroeroze je dosahovaná hodnota R_a obou fréz velmi vysoká – vyšší než $2 \mu\text{m}$. Druhý hřbet u fréz ostřených na stroji Vollmer dosahuje velmi nízké hodnoty R_a , jelikož tento druhý hřbet na karbidickém těle byl konvenčně dobroušen abrazivním kotoučem. Průměrná aritmetická úchytky drsnosti se zde pohybuje v řádech setin mikrometrů.

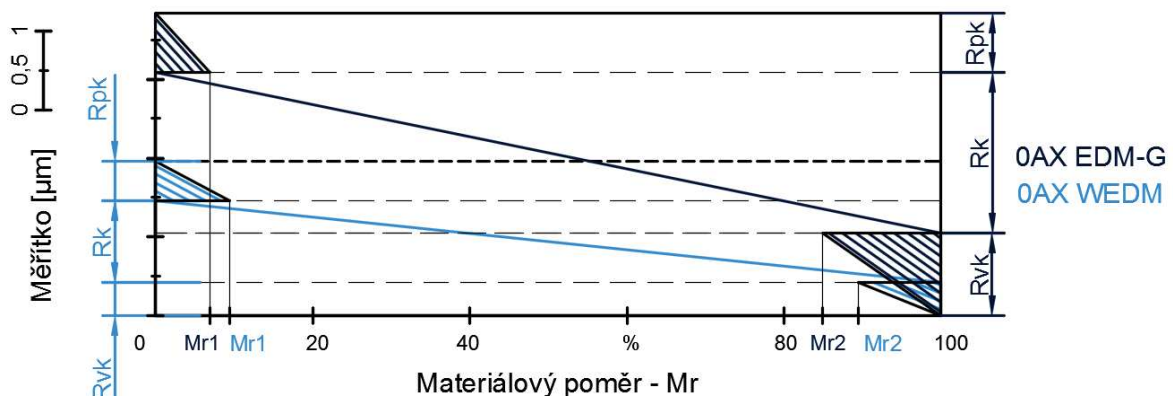


Obr. 8.8 Graf průměrných aritmetických úchylek drsností jednotlivých fréz měřených na PCD vrstvě – 1. radiálním úhlu hřbetu.



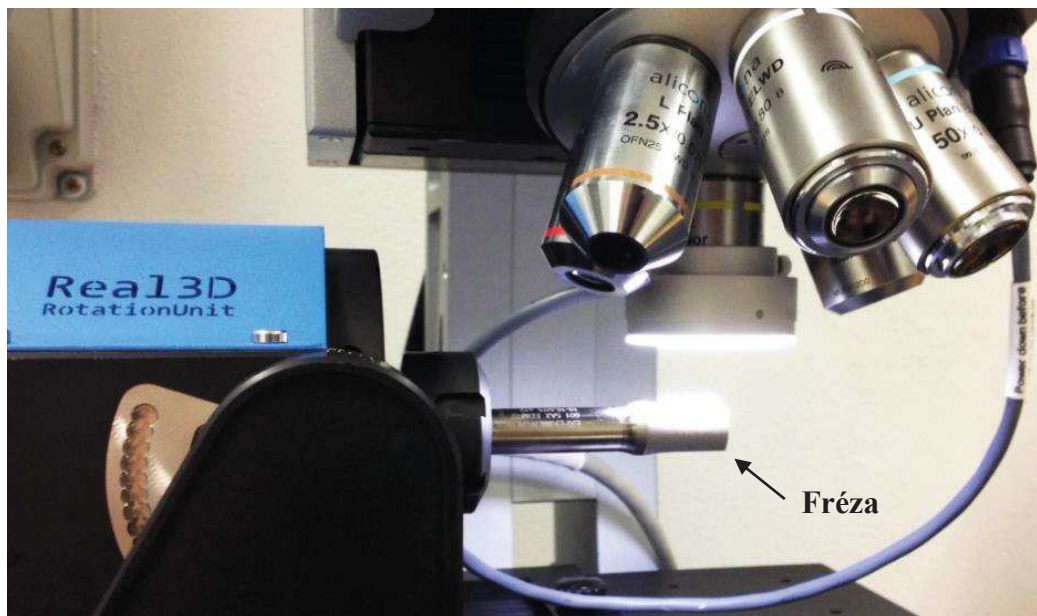
Obr. 8.9 Graf průměrných aritmetických úchylek drsností jednotlivých fréz měřených na karbidickém podkladu – 2. radiálním úhlu hřbetu.

Druhý výstupní list z optického měření obsahuje také parametry lineárního materiálového podílu, které byly použity pro sestavení obr. 8.9, kde jsou vyneseny tyto parametry pro dvě rozdílně ostřené frézy s nulovým axiálním úhlem čela. Funkční parametry nosného podílu vycházejí z hodnocení křivky materiálového poměru profilu, často označované jako Abbot–Firestoneovy křivky. Přibližná křivka materiálového poměru by na obr. 8.10 vznikla proložení jednotlivých funkčních bodů. Daný obr. ukazuje, že menších celkových nerovností dosahuje fréza ostřená technologií WEDM. Plocha výstupků je v obou případech velmi podobná – to ukazují hodnoty **Rpk** a **Mr1**. Tato plocha je úměrná vybarvenému trojúhelníku v levé části obr. Plocha trojúhelníků v pravé dolní části obrázku je úměrná ploše rýh neboli prohlubní. Tady lze vyzorovat určitý rozdíl s tím, že fréza EDM–G obsahuje prohlubně na větší procentuálně vyjádřené ploše dle parametru **Mr2** a také prohlubně v případě frézy **0AX EDM–G** jsou hlubší, jelikož dosahuje vyšší hodnoty **Rvk** než fréza **0AX WEDM**. Lze pozorovat také rozdílný sklon obou ekvivalentních přímek, kde přímka u frézy **0AX WEDM** je méně skloněná vůči vodorovné ose a tím je profil drsnosti v menším rozkmitu. Sklon těchto přímek udává parametr **Rk**, což je základní hloubka profilu jádra. V případě fréz s axiálním úhlem čela 5° je průběh nosného podílu obdobný. Také z protokolů kontaktního měření drsnosti lze vyzorovat tento trend průběhu materiálového poměru.



Obr. 8.10 Funkční parametry materiálového podílu.

Poslední analýza byla prováděna na bezdotykovém, optickém mikroskopu Alicona InfiniteFocus 5 pracujícího na principu Focus Variation, tedy metody variace hladiny ostření. Jak měření probíhalo a jak byly frézy upnuty lze vidět na obr. 8.11.



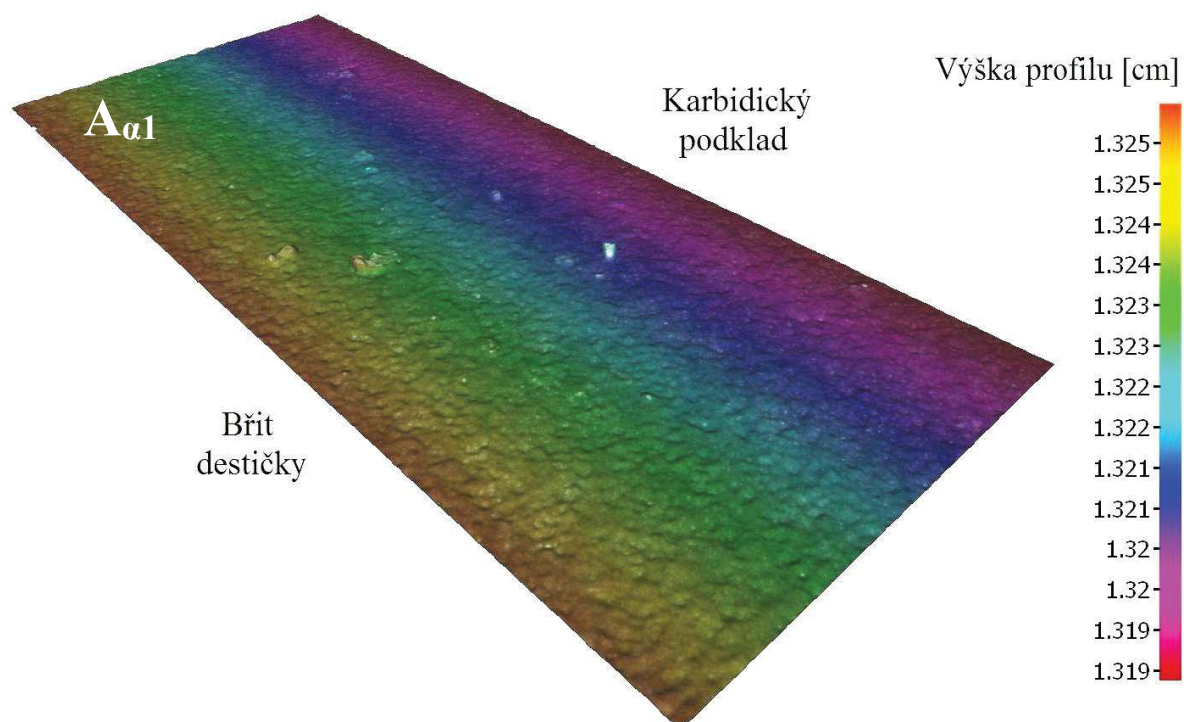
Obr. 8.11 Průběh měření na přístroji Alicona InfiniteFocus 5.

Bylo uskutečněno měření pomocí modulu IF-EdgeMasterModule v softwaru taktéž od fy. Alicona, který poskytuje detailní analýzu ostří nástroje. Použitý objektiv měl 10i násobné zvětšení. Všechny frézy byly měřeny ve stejné vzdálenosti od čela nástroje. Protokoly měření jsou uvedeny v Příloze 6. Obsahují jednotlivé úhly v orthogonální rovině destičky i poloměr zaoblení břitu. Úhly čela a hřbetu nejsou relevantní, jelikož záleží na natočení frézy při měření. Z toho důvodu lze považovat pouze úhel břitu β a poloměr zaoblení břitu za důvěryhodný – viz tab. 8.4. Lze vidět, že úhel břitu u fréz s nulovým ax. úhlem čela odpovídá měření z přístroje Zoller (Příloha 3), kde úhel břitu se dá dopočítat tak, že se od 90° odečte první rad. úhel hřbetu a radiální úhel čela. Tím se pro obě frézy získá velikost úhlu břitu skutečně kolem 70° . V případě fréz s axiálním úhlem 5° je toto porovnání irelevantní, jelikož se měří úhly v jiné nástrojové rovině. Ale trend je stejný, jelikož dopočítaný úhel břitu frézy *5AX WEDM* v boční rovině je větší než u frézy *5AX EDM-G* díky nižšímu změřenému radiálnímu úhlu čela, což potvrzuje i následující tabulka.

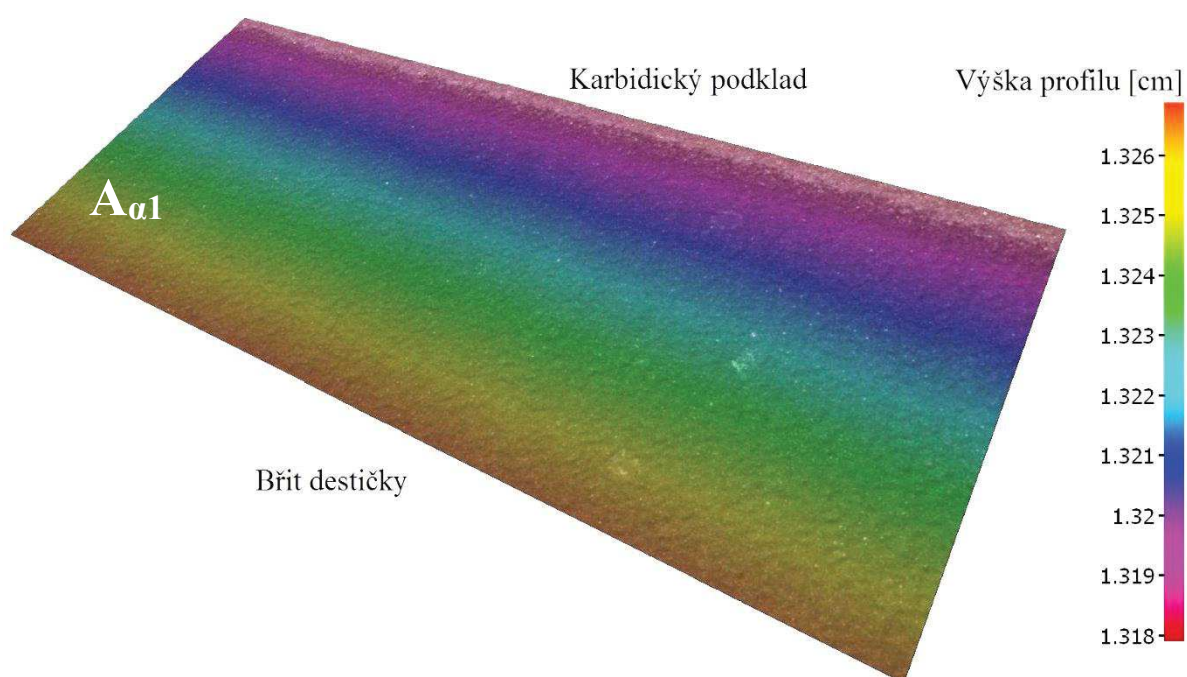
Tab. 8.4 Úhel břitu a poloměr zaoblení břitu jednotlivých fréz.

Fréza	<i>0AX WEDM</i>	<i>0AX EDM-G</i>	<i>5AX WEDM</i>	<i>5AX EDM-G</i>
Úhel břitu [°]	69,99	69,21	72,83	71,38
Poloměr zaoblení břitu [μm]	3,15	2,48	3,50	2,49

V pořadí druhou analýzou výbrusu na měřicím přístroji fy. Alicona bylo pořízení topografie povrchu – prvního hřbetu. Toto měření bylo provedeno pomocí objektivu s 20i násobným zvětšením, což poskytovalo zachycení větších detailů povrchu. Výsledné reliéfy povrchu byly vyhodnoceny pouze na dvou frézách sorty *0AX*. Obr. 8.12 a 8.13 představují vykreslený povrch obou fréz s barevnou škálou zobrazující výšku jednotlivých oblastí na profilu.

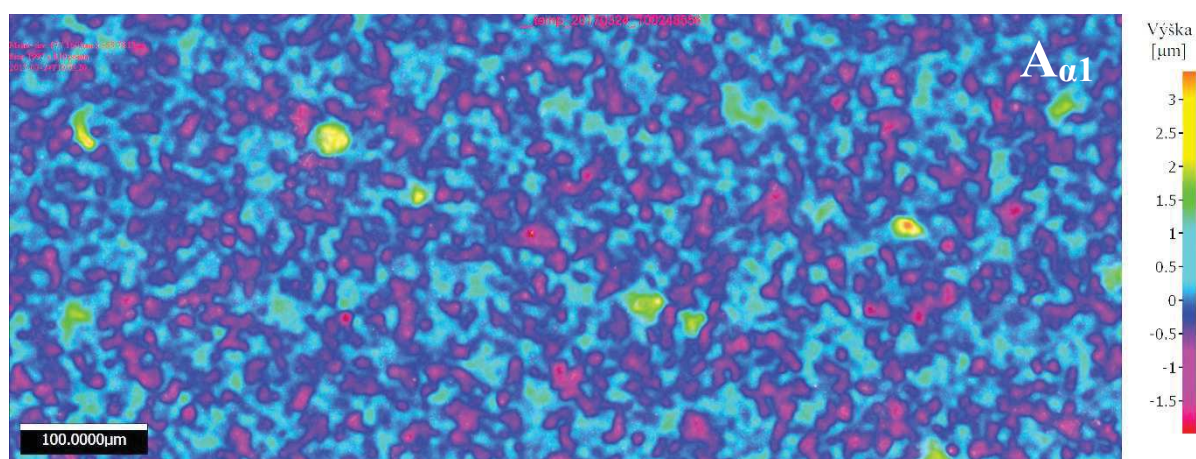


Obr. 8.12 Povrch hřbetu ostřený technologií EDM-G zobrazený ve 3D.

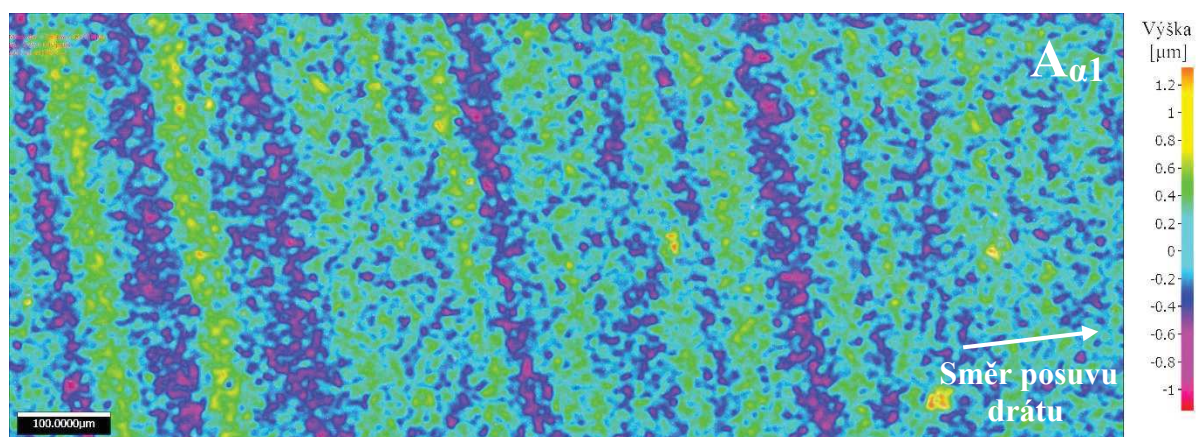


Obr. 8.13 Povrch hřbetu ostřený technologií WEDM zobrazený ve 3D.

Obr. 8.14 a 8.15 zobrazují vybranou oblast ze základního 3D profilu, která zobrazuje výškové nerovnosti daného povrchu. Povrch erodovaného pomocí EDM–G je tvořen pravidelně vytrhanými zrny diamantu. Oblast výběru je menší, jelikož se eliminovalo zahrnutí extrémní hodnoty nerovnosti, která byla nejpravděpodobněji způsobená nečistotou. Povrch, který byl erodován pomocí WEDM, ukazuje výrazně pásovitou strukturu. Ta je způsobena nekonstantním napětím a posuvem drátu. Proto jsou některé pásy položeny výše a některé naopak níže. Z barevné škály u každého povrchu lze také s přihlédnutím některých neobvyklých extrémních vrcholů říci, že WEDM povrch vykazuje nižší nerovnostmi, což je potvrzeno nižší změřenou hodnotou **Ra** z kontaktního i bezkontaktního měření.



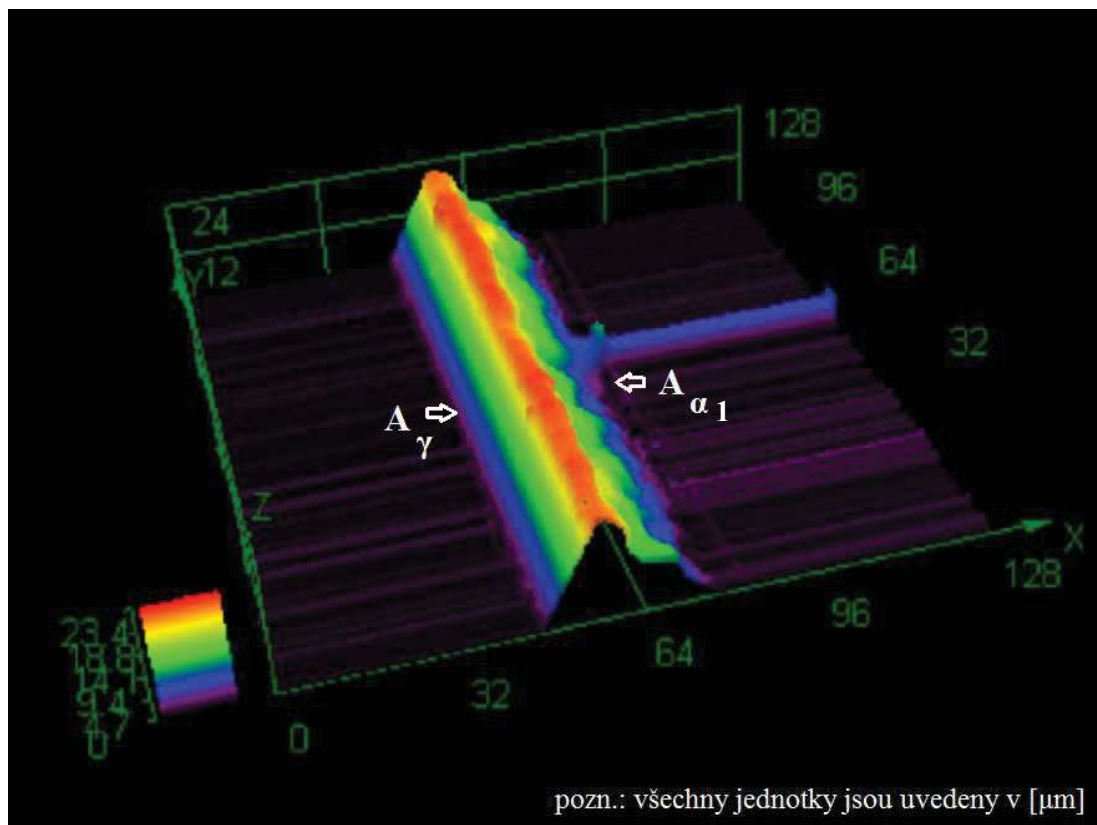
Obr. 8.14 Povrch prvního hřbetu ostřený technologií EDM–G.



Obr. 8.15 Povrch prvního hřbetu ostřený technologií WEDM.

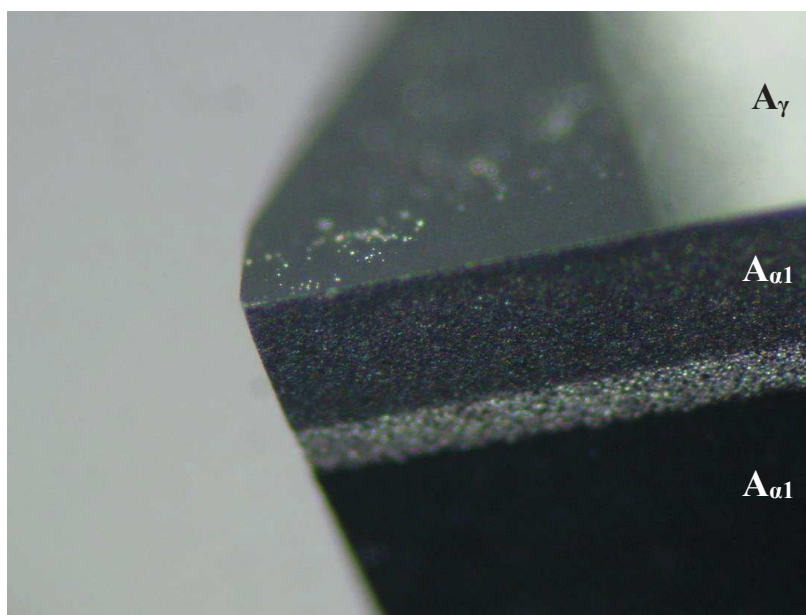
Na obr. 8.16 lze vidět prostorový profil břitu frézy *0AX EDM–G*, který byl pořízen optickým mikroskopem LEXT OLS4000 firmy Olympus jako v případě měření drsnosti výše. Obr. je vytažen z protokolu, který je součástí Přílohy 7. Tento obr. potvrzuje výše uvedenou profilovou analýzu z optického mikroskopu Alicona. Profil byl vykreslen pomocí jemného skenování s objektivem, jehož zvětšení bylo 100 násobné. Vyleštěné čelo destičky **A_γ** je velmi rovinné, zatímco erodovaný hřbet destičky **A_{α1}** vykazuje nerovnoměrný povrch jako u optického měření pomocí metody Focus Variation. Součástí tohoto protokolu jsou také poloměry zaoblení břitu měřené v pěti místech profilu, které byly vhodně aproximovány obsluhou přístroje. Průměrný

rádus zaoblení břítu je zde 2,317 μm , což se velmi blíží poloměru zaoblení břítu 2,48 μm , který byl měřen automaticky bez vlivu obsluhy na mikroskopu Alicona.



Obr. 8.16 Břit destičky frézy 0AX EDM-G.

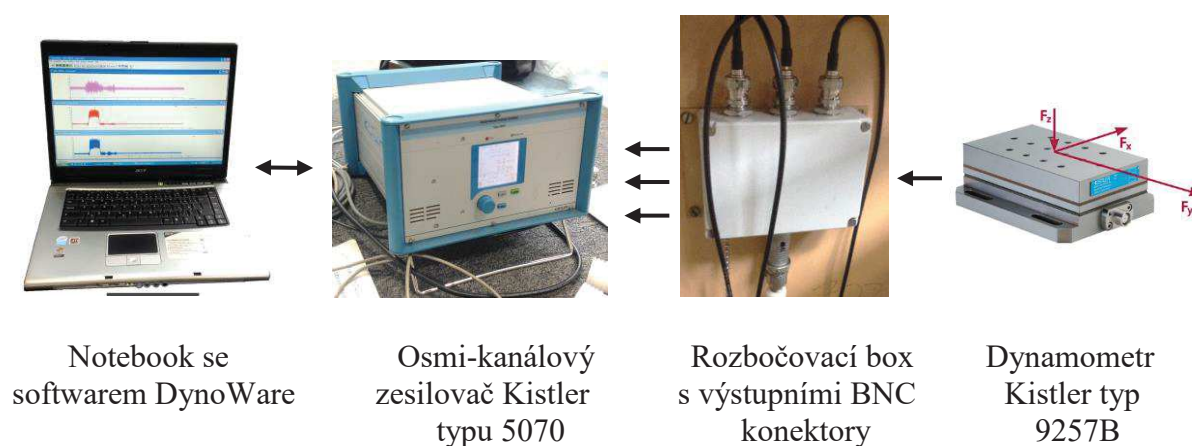
Na obr. 8.17 lze vidět ještě vyleštěný povrch čela destičky v porovnání s erodovanými hřbety.



Obr. 8.17 Povrch čela a hřbetů destičky.

8.3 Porovnání rozdílných geometrií jednotlivých fréz

V této kapitole je provedena analýza vlivu geometrie fréz na silové zatížení nástroje. Předmětem zkoumání jsou 3 frézy vyrobeny stejnou technologií EDM-G, aby se zamezilo případnému vlivu rozdílné technologie ostření fréz. Měření probíhalo pomocí aparatury Kistler, který zaznamenává síly v jednotlivých osách x , y a z . Na obr. 8.18 lze vidět celý řetězec měřící aparatury.



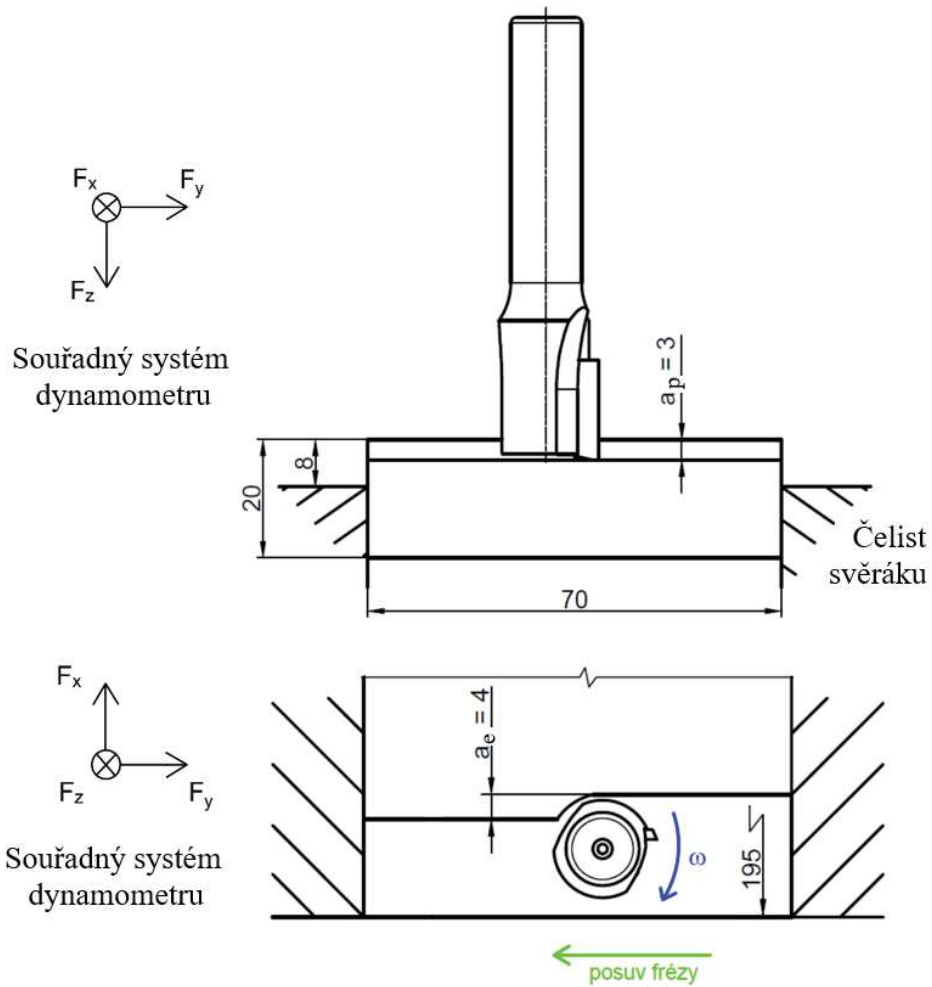
Obr. 8.18 Měřící řetězec aparatury [16].

Všechna měření byla provedena na CNC 5i-osé frézce Tajmac-ZPS MCV 1210 s řídicím systémem Siemens v laboratořích ÚST. Nastavené rezné podmínky pro všechny frézy lze vidět v tab. 8.5. Lze si všimnout, že pracovní záběr je menší než poloměr frézy, čímž jde do řezu s přihlednutím radiálního úhlu čela jako první ostří nástroje. Šířka záběru hlavního ostří nástroje je 3 mm, což také koresponduje s velikostí aktivního hlavního ostří nástroje.

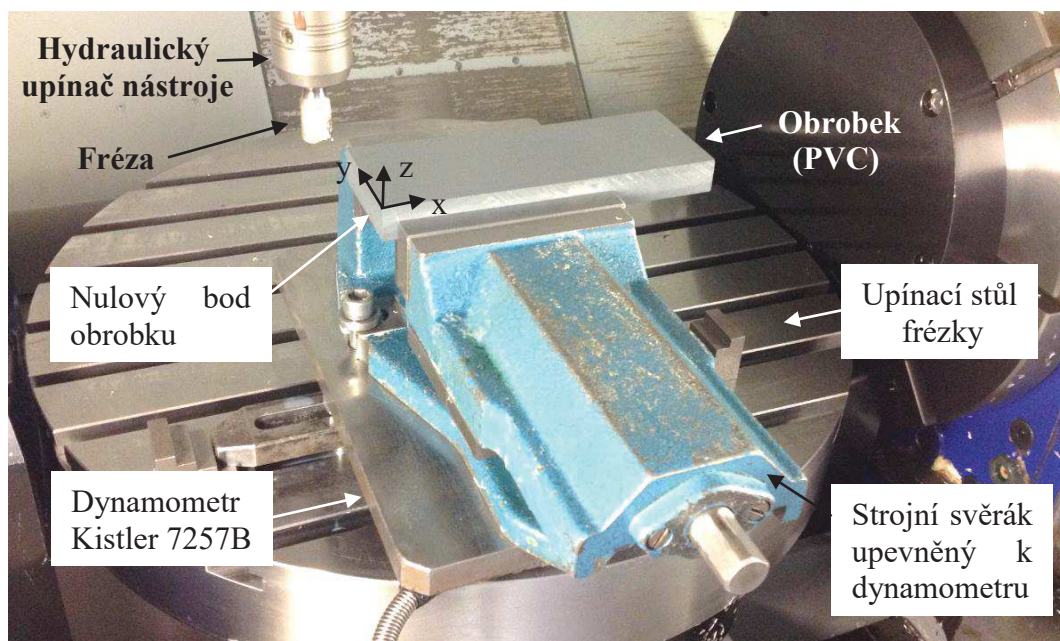
Tab. 8.5 Rezné podmínky frézování.

	Veličina	Jednotky	Hodnota
Otáčky vřetene	n	$[\text{min}^{-1}]$	15 000
Posuvová rychlost	v_f	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$	4 500
Šířka záběru hlavního ostří nástroje	a_p	$[\text{mm}]$	3
Radiální šířka záběru	a_e	$[\text{mm}]$	4
Chlazení vzduchem s atmosférickým tlakem			
Sousledné frézování			

Průběh frézování lze schematicky vidět na obr. 8.19. Polotovar velikosti $70 \times 195 \times 20$ mm byl upnut do strojního svěráku, který byl mechanicky spojen s dynamometrem. Silové měření bylo zaznamenáno v délce 70 mm, což odpovídalo šířce upnutého obrobku. Reálné upnutí obrobku poté lze vidět na obr. 8.20. Fréza byla upnuta do hydraulického upínače pomocí redukčního pouzdra.



Obr. 8.19 Schéma frézování při měření silového záznamu.



Obr. 8.20 Nastavení experimentálního frézování.

Před samotným měřením bylo nutné nastavit určité parametry zaznamenávání sílového průběhu v softwaru DynoWare. Vzorkovací frekvence měření (počet zaznamenaných hodnot za sekundu) byla nastavena na hodnotu 8000 Hz. Tato hodnota se získala výpočtem, tak aby bylo získáno minimálně 5 hodnot frézy v záběru. Z vypočítaného úhlu záběru frézy tomu odpovídalo celkem 32 hodnot na 1 otáčku. Frekvence otáčení vřetene při otáčkách $15\,000\text{ min}^{-1}$ vychází 250 Hz. Vynásobením těchto dvou hodnot se získala daná frekvence, která snímala každou hodnotu po úhlu otočení frézy $11,25^\circ$. Celočíslný počet hodnot na jednu otáčku byl vhodný také pro následné vyhodnocení získaných záznamů z ASCII kódu. Rozsah měřených sil v každé ose byl nastaven na nejmenší možný vzhledem k malému průřezu třísky, HSC frézování a materiálu obrobku.

Všechny frézy odebíraly třísku pouze jedním břitem. To platí zejména u vícebřitého nástroje 57AX EDM-G. Díky tomuto faktu, byl vliv geometrie fréz na jednotlivé řezné síly více čitelný.

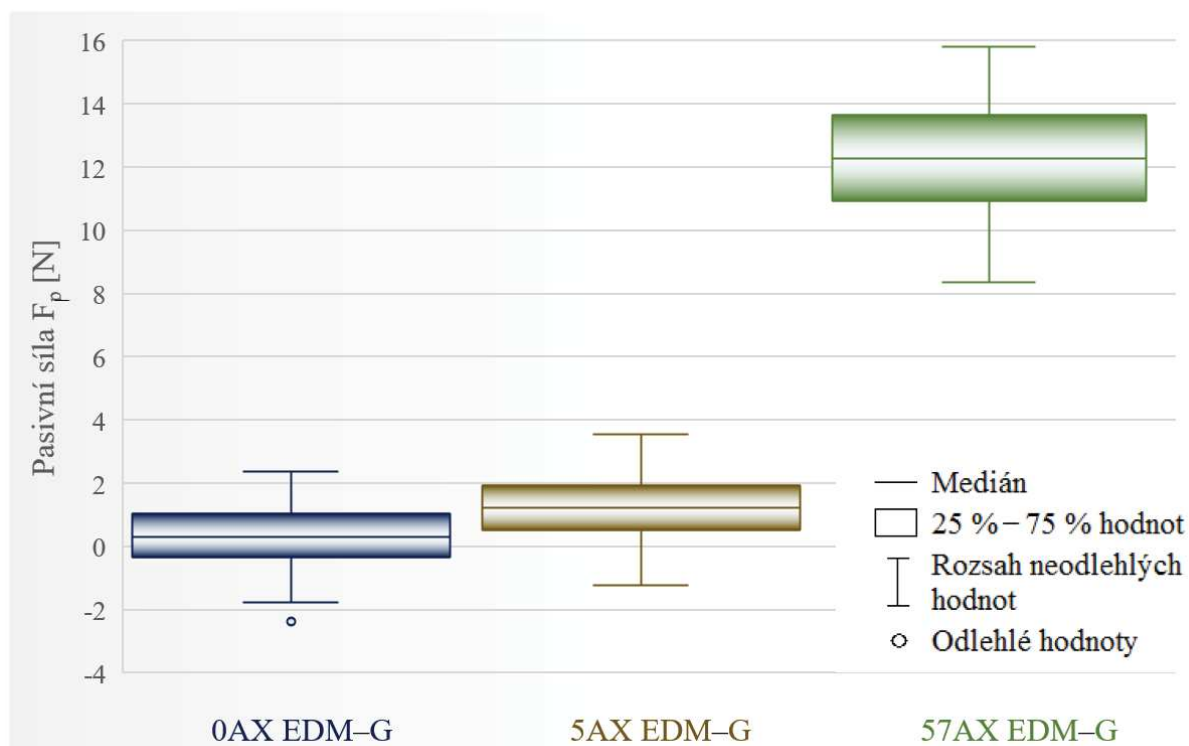
Surová data z měření v podobě ASCII kódu byla vyhodnocena v softwaru Excel, kde pro filtrování hodnot byla použita vytvořená aplikace pomocí makra v kartě "Vývojář". Tato vytvořená aplikace měla vždy za úkol vypsát každou 32. hodnotu z daného sloupce, kdy jako startovní řádek byl vybrán ten s nejvyšší hodnot. Od daného řádku byly vypsány vždy 32. hodnoty, přičemž bylo zkontrolováno, že se jedná skutečně o největší hodnoty. Vlivem možného rozkmitu snímání hodnot, pěchování třísky, tření třísky a jiných vedlejších vlivů se na konci měřicího úseku už vypisovaly hodnoty nepatrně nižší než maximální. Proto byly vyhodnoceny vždy zvlášť 3 úseky – na začátku, uprostřed a na konci obráběného úseku. Tak bylo získáno 75 filtrovaných hodnot, z kterých byly sestaveny krabicové grafy.

Místo maximální skutečné působící síly pro dané podmínky frézování není možné u negativním axiálních úhlů čela určit, jelikož dochází k pěchování třísek, tření a jiným faktorům, díky kterým nelze předpokládat, že maximální síla se nachází přesně tam, kde je maximální průřez třísky. I v případě negativních axiálních úhlů čela výpočet maximálního průřezu třísky ve většině případů vede k numerickému řešení. Z těchto důvodů byly ze sílového záznamu obsahující síly v jednotlivých osách x , y a z vyhodnoceny zvlášť síly F_p působící ve směr osy z a silové výslednice F_{xy} jednotlivých fréz, což je síla působící v radiální rovině xy , která se získá výpočtem dle vztahu 8.1.

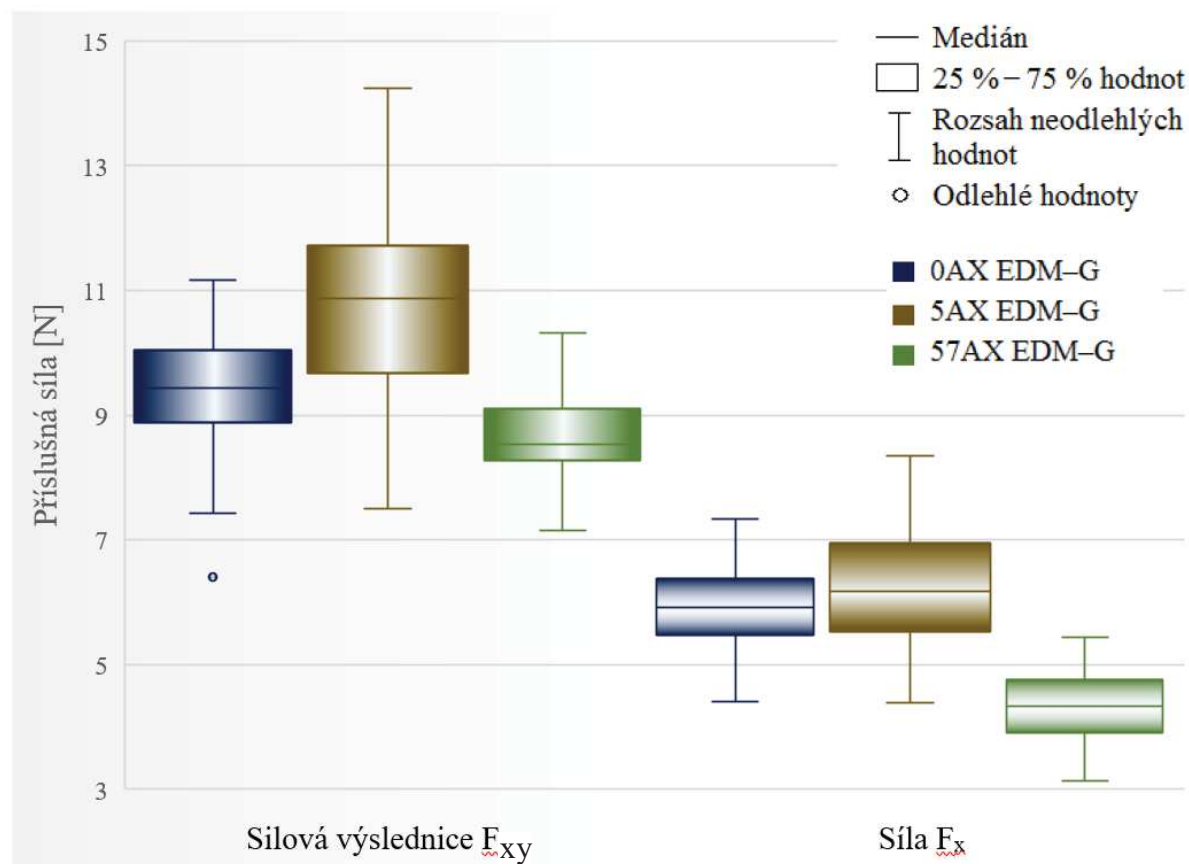
$$F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (8.1)$$

Obr. 8.21 představuje krabicový graf pasivních sil jednotlivých fréz působících ve směru osy z . Kladná hodnota je orientována směrem do obrobku, což naznačuje že s rostoucím negativním axiálním úhlem fréz se velikost této síly zvětšuje. Na nástroj působí tedy síly, které se snaží nástroj zasunout do upínače a na obrobek naopak působí síly, které ho tlačí do spodního dorazu na strojním svěráku. Sílu F_p tedy ovlivňuje zejména axiální úhel čela destiček, kdy s více negativní geometrií tato síla narůstá díky vyššímu tření a pěchování třísek [15].

V levé části obr. 8.22 lze vidět velikost jednotlivých sil F_{xy} . Jelikož hodnoty se poměrně liší, tak bylo přihlédnuto na surová data v jednotlivých osách x a y . Hodnoty sil v ose y byly u všech fréz srovnatelné. Síly F_x se poměrně lišily a proto byly vyhodnoceny i tyto síly, které lze vidět v pravé části daného obr.. Síly F_x mají obdobný trend jak síly F_{xy} , z čeho také plyne, že síla F_y se opravdu u jednotlivých fréz zásadně neliší.

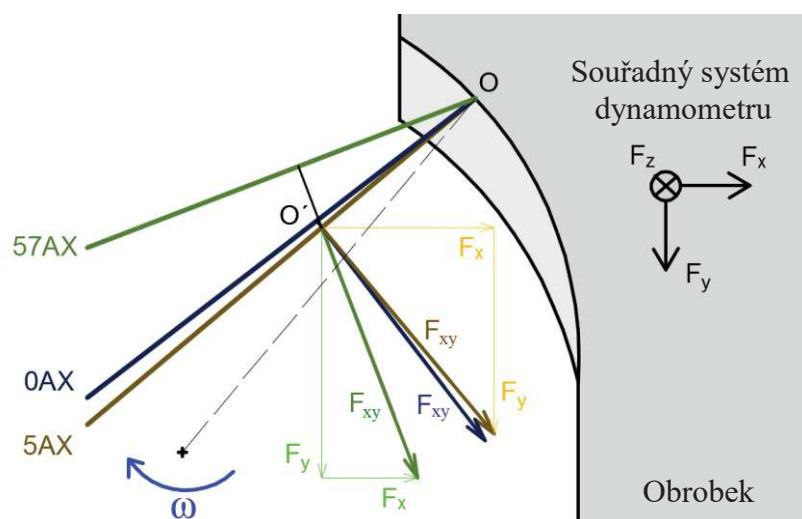


Obr. 8.21 Krabicové grafy pasivních sil jednotlivých fréz.



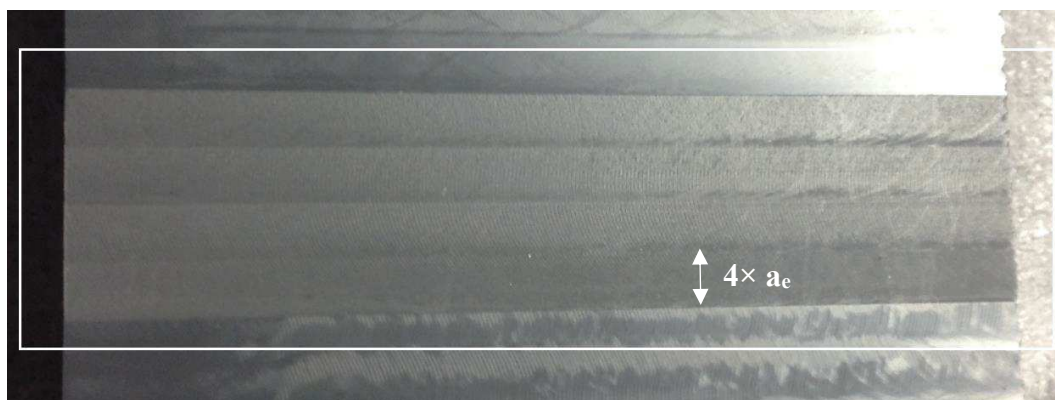
Obr. 8.22 Krabicové grafy sil v radiální rovině jednotlivých fréz.

Rozdílná velikost sil v ose x je způsobená radiálním úhlem čela. U frézy $0AX$ je tento úhel 10° a je konstantní. U frézy $5AX$ se tento úhel v daném bodě ostří s vyšší a_p stále snižuje. Na špičce nástroje se dosahuje radiálního úhlu čela 10° zatímco při hodnotě 3 mm, což značí použité a_p , je tato hodnota už kolem $8,5^\circ$. Toto lze také pro dané frézy EDM–G potvrdit z obr. 8.7, kde byly tyto úhly měřeny 5,4 mm od špičky. Radiální úhel čela frézy $57AX$, se také s vyšší a_p snižuje. Ale aby fréza s tak velkým axiálním úhlem čela měla pozitivní radiální úhel v celém rozsahu, tak tento úhel musí nabývat na špičce vysokých hodnot. Konkrétně na špičce nástroje je radiální úhel čela dle 3D modelu 43° , zatímco v osové vzdálenosti 3 mm od špičky je hodnota radiálního úhlu čela $13,5^\circ$. Na obr. 8.23 jsou schematicky nakresleny střední hodnoty radiálních úhlů čel jednotlivých fréz z bodu O . Pro přehlednost jsou působící síly nakresleny v bodě O' a je zanedbán vliv zaoblení břitu, tření aj. faktory. Lze vidět, že s rostoucím úhlem γ_r klesá silová složka v ose x . Pozitivní geometrie v boční (radiální) rovině, celkově přispívá v poklesu sil F_{xy} , což vyjadřuje obr. 8.22.



Obr. 8.23 Vliv úhlu γ_r na poměr velikostí jednotlivých silových složek.

Povrch obrobený frézami s úhlem 0° a 5° vykazoval lesklý srovnatelný vzhled. Avšak povrch obrobený frézou $57AX$ EDM–G vykazoval značně matný vzhled – viz obr. 8.24. To je dané vysokým axiálním úhlem čela, který způsobuje pěchování třísky a při obrábění této čelní plochy nedochází ke skutečné řezací akci, ale spíše k pěchování – tváření daného povrchu. Z tohoto důvodu se na čele nástroje používá samostatný břit s pozitivní geometrií.



Obr. 8.24 Čelní obrobený povrch frézou $57AX$ EDM–G.

8.4 Vliv řezných podmínek na kvalitu obrobeného povrchu řešené pomocí DoE

V předchozí kapitole byly pro analýzu rozdílné geometrie fréz použity startovací podmínky, které jsou všeobecně doporučovány pro obrábění PVC. Dané podmínky byly v této kapitole překontrolovány z hlediska dosahované drsnosti, jelikož v následující části experimentu budou frézy používány po minimální dobu obrábění 1,5 hodiny.

Pro návrh experimentu (Design of Experiment – DoE) byl použit úplný faktoriální experiment, který byl řešen v souladu se zdrojem [49] a také pomocí [50].

Všechny frézy byly vyváženy, kde jejich stupeň vyvážení byl uveden v tab. 8.3. Vyvážením fréz se zamezilo vzniku vibrací a tím k následnému zhoršení drsnosti obrobeného povrchu, za předpokladu, že i upínač nástroje byl vyvážen. Vliv vibrací se projevu zejména při vysokých otáčkách vřetene, což je případ také daného experimentu. Vyvážením všech fréz lze také předejít rozdílu v drsnostech obrobené plochy jednotlivými nástroji.

V úvodní etapě plánování experimentu byly vybrány 4 faktory, které mohou mít na výslednou drsnost největší vliv. Danými faktory jsou otáčky vřetene, posuv na zub a kinematika pohybu reprezentující sousledné a nesousledné frézování. Kinematika pohybu je faktor textového typu s dvěma možnými úrovněmi faktoru, a proto jsou pro daný experiment použity dvě úrovně. Posledním fiktivním faktorem je upínač nástroje, což reprezentuje pouhou replikaci měření. V obou případech úrovně je použit stejný upínač. Tato replikace má za úkol ověřit, že vliv opotřebení a řezných podmínek (teploty) během provádění experimentu je zanedbatelný. Experiment tedy obsahuje dva spojitě faktory a dva faktory nespojitě. Jednotlivé faktory a jejich nastavené úrovně lze vidět v tab. 8.6. Měřenou odezvou byla průměrná aritmetická úchylka drsnosti, což je spojitá veličina.

Tab. 8.6 Faktory experimentu a jejich úrovně.

Faktory	Jednotky	Dolní úroveň	Horní úroveň
Kinematika frézování	[–]	Sousledné	Nesousledné
Otáčky vřetene	[min ⁻¹]	10 000	15 000
Posuv na zub	[mm]	0,15	0,40
Upínač nástroje	[–]	A	B

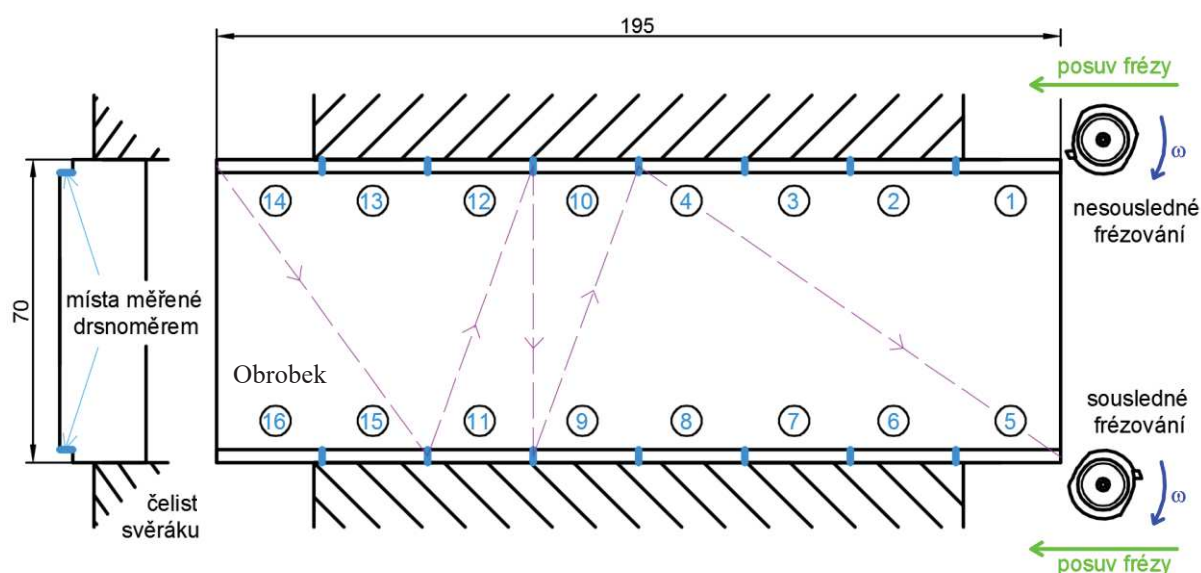
Úplný faktoriální experiment využívá všechny možné kombinace jednotlivých faktorů. Tzn., že při 2 úrovních a 4 faktorech se získá celkem 16 kroků experimentu ($2^4 = 16$). Aby se zamezilo proměnlivosti, systematickým vlivům a šumům reálného procesu bylo provedeno znáhodnění jednotlivých kroků experimentu, které byly automaticky vygenerovány v softwaru Minitab 2017. Pořadí kroků experimentu lze vidět v tab. 8.7

Na obr. 8.25 je systematicky naznačen průběh experimentu. Číslo v kroužku představuje pořadí frézovaných úseků dle tab. 8.7. Polotovár byl upnut do strojního svěráku se širokými čelistmi, aby se zamezilo vzniku chvění při obrábění nájezdových a výjezdových ploch. Byl vytvořen NC program, kterým se frézovalo na jedno upnutí všech 16 ploch dle pořadí jednotlivých kroků experimentu. Přejezdy mezi jednotlivými úseky pro změnu kinematiky frézování jsou naznačeny fialovou čárkovanou čarou. Mezi jednotlivými po sobě jdoucími úseky v rámci stejné kinematiky obrábění byla vždy nastavena časová prodleva, která

zabezpečila jistou změnu podmínek frézování. Každý obrobený úsek měl minimální délku 20 mm, což splňovalo vyhodnocovanou délku při měření drsnosti.

Tab. 8.7 Pořadí kroků experimentu.

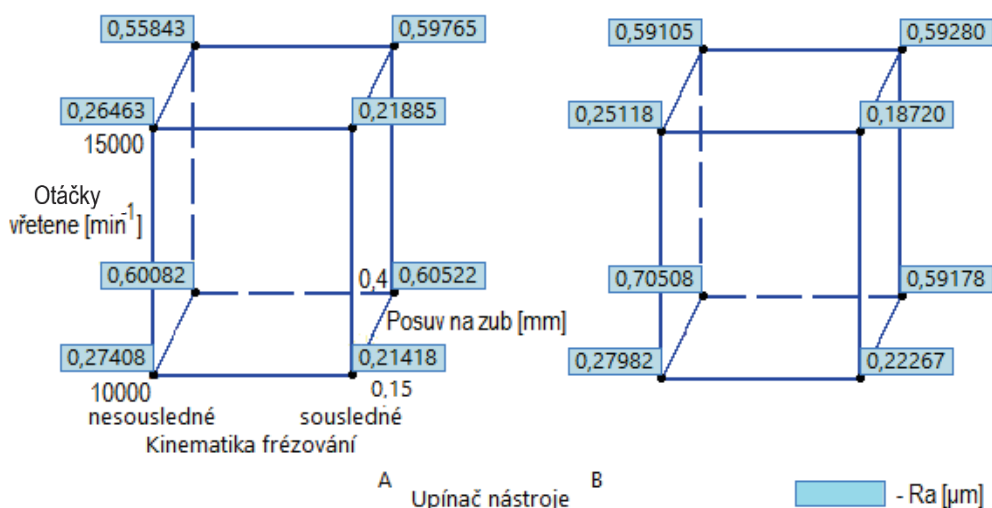
Krok experimentu	Kinematika frézování	Otáčky vřetene [min^{-1}]	Posuv na zub [mm]	Upínač nástroje
1	Nesousledné	10 000	0,40	A
2	Nesousledné	10 000	0,15	A
3	Nesousledné	15 000	0,40	B
4	Nesousledné	15 000	0,15	A
5	Sousledné	10 000	0,40	B
6	Sousledné	15 000	0,40	B
7	Sousledné	15 000	0,40	A
8	Sousledné	10 000	0,40	A
9	Sousledné	15 000	0,15	A
10	Nesousledné	15 000	0,15	B
11	Sousledné	10 000	0,15	A
12	Nesousledné	10 000	0,40	B
13	Nesousledné	15 000	0,40	A
14	Nesousledné	10 000	0,15	B
15	Sousledné	10 000	0,15	B
16	Sousledné	15 000	0,15	B



Obr. 8.25 Průběh experimentu.

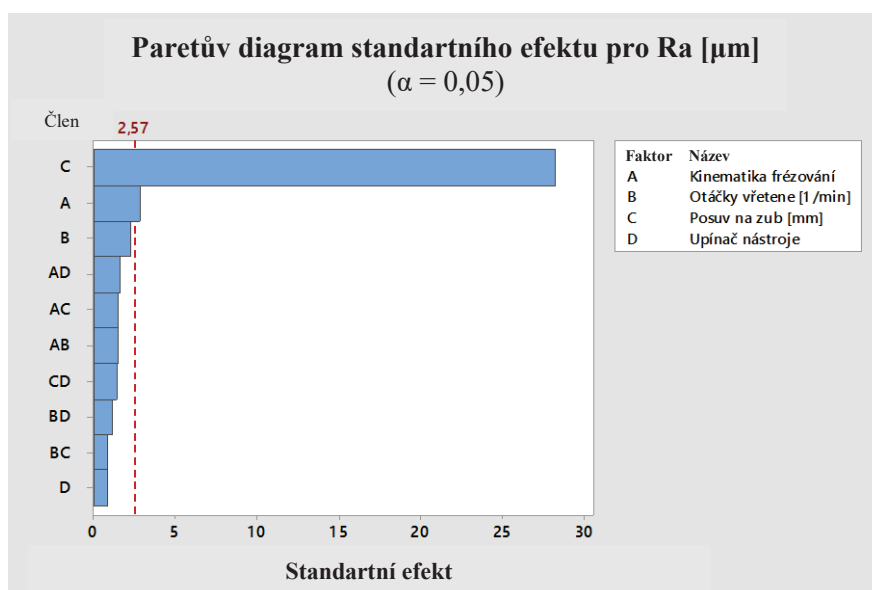
Frézování bylo provedeno 4i frézy s ax. úhlem čela 0° a 5° . Fréza 57AX EDM-G byla použita pouze pro analýzu vlivu geometrie na síly během obrábění. Měřením drsnosti v daném místě dle obr. 8.25 byly tedy získány 4 hodnoty pro každý krok experimentu, kde 1 hodnota korespondovala s 1 frézou. Celkem bylo tedy změřeno 64 hodnot průměrných aritmetických drsností, které byly vyhodnoceny v souladu s normou ČSN EN ISO 4288. Ze 4 hodnot v každém kroku byla vyčíslena střední hodnota, která se zadala pro daný krok do softwaru

Minitab 2017. Tyto všechny průměrné hodnoty odezev lze vidět v experimentálním prostoru na obr. 8.26. Rohy krychlí signalizují dané úrovně faktorů včetně konkrétní průměrné hodnoty **Ra** v daném místě a každá krychle signalizuje replikaci upínače nástroje. Lze si všimnout, že vliv faktoru upínače nástroje je zanedbatelný a ve stejných místech obou krychlí se dosahuje srovnatelných hodnot.



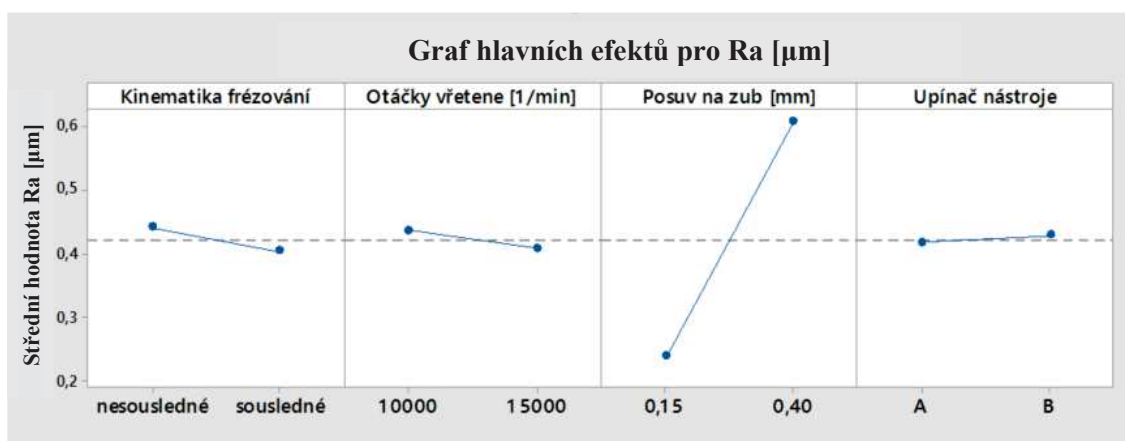
Obr. 8.26 Krychlové diagramy naměřených průměrných aritmetických úchylek drsnosti.

Obr. 8.27 představuje Paretův diagram, kde lze vidět seřazené efekty jednotlivých faktorů a jejich dvojných interakcí. Test vykonaný na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ ukazuje jako statisticky významné faktory C a A. Vliv upínače nástroje (faktor D) je zcela zanedbatelný. Jak bylo řečeno, tak tento faktor reprezentoval replikaci, která potvrdila, že vliv opotřebení, teploty a jiných faktorů byl během frézování zanedbatelný.



Obr. 8.27 Paretův diagram.

Jelikož obr. 8.27 ukázal vliv dvojných interakcí jako zanedbatelný, tak je zde přiložen obr. 8.28, z kterého lze vidět hlavní efekty jednotlivých faktorů, kde nejstrmější přímka reprezentuje největší vliv na odezvu. Efekt faktoru se spočítá jako rozdíl průměru odezvy pro faktor nastavený na horní úroveň a na dolní úroveň. Z daného obr. lze názorně vidět, že nejlepší drsnosti se dosáhne při sousledném frézování, vyšších otáčkách vřetene a nižší hodnoty posuvu na zub.



Obr. 8.28 Grafické znázornění hlavních efektů.

Použitý druh experimentu byl tzv. *screening*, který měl za úkol zjistit, které faktory mají největší vliv na výslednou drsnost. Další analýza nejvýznamnějších faktorů v daném případě nebyla nutná, jelikož se ověřilo, že dosahovaná drsnost pro zvolené startovní podmínky je dostačující a tyto podmínky obrábění tedy zůstanou zachovány i pro další průběh experimentů [49]. Předmětem následujícího experimentu v kapitole 8.6 byl vliv nepřímého opotřebení fréz na čas obrábění, a proto také nebyl volen nižší posuv, kterým by byla získána nižší drsnost obrobeného povrchu ale zároveň také nižší zatížení břitu.

Z 64 naměřených hodnot drsností byla také vytvořena tab. 8.8, která vyjadřuje střední hodnotu **Ra** dle axiálního úhlu čela a také dle technologie ostření destiček. Každá střední hodnota byla vypočítána dle 32 změřených hodnot (pro 1 frézu 16 hodnot). Lze vidět, že axiální úhel čela na drsnost obrobeného povrchu nemá vliv, zatímco odlišná technologie ostření ano. Je to způsobeno rozdílnou velikostí poloměru zaoblení břitu. Z optického měření na přístroji fy. Alicona bylo zjištěno, že poloměr zaoblení břitu je pro frézy vyrobené technologií WEDM vyšší – viz tab. 8.4. Jelikož oba břity ještě nebyly zaběhnuty, tak právě vyšším poloměrem břitu při stejných podmínkách obrábění se dosáhlo nižší hodnoty **Ra**.

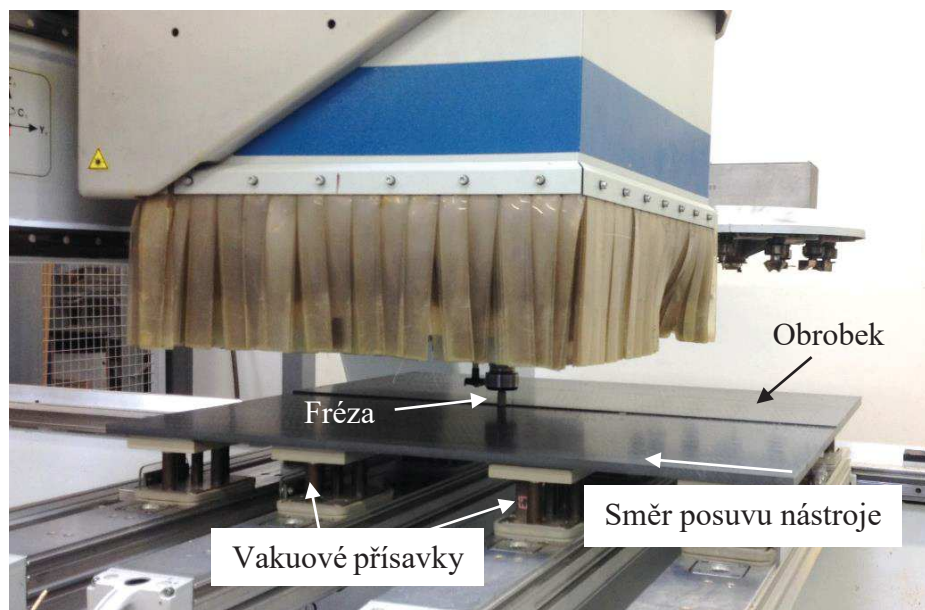
Tab. 8.8 Dosahovaná drsnost pro dané frézy dle axiálního úhlu čela a technologie ostření.

Kategorie	Střední hodnota Ra
Frézy s axiálním úhlem čela 0°	0,421
Frézy s axiálním úhlem čela 5°	0,423
Frézy ostřené technologií WEDM	0,39
Frézy ostřené technologií EDM-G	0,45

8.5 Analýza sil při frézování v závislosti na délce obrábění

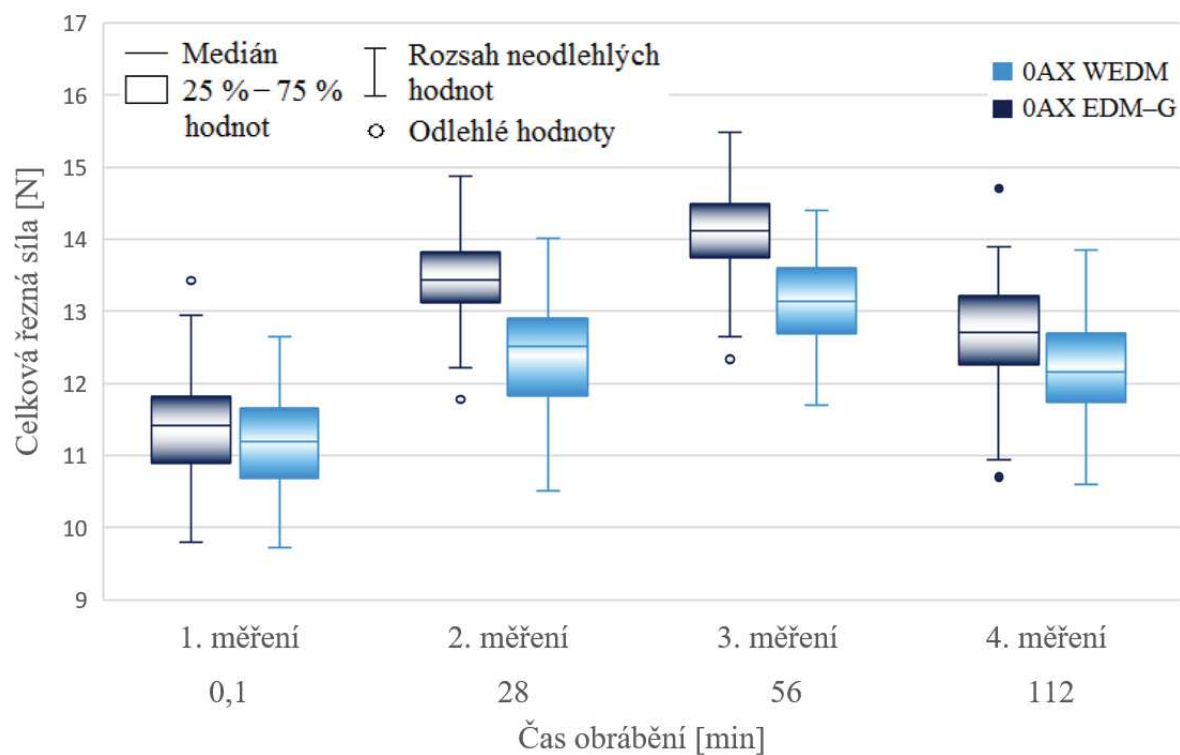
Poslední experiment byl věnován, zda technologie ostření má zásadní vliv na změny v silovém zatížení jednotlivých fréz po určité době frézování. Pro vyhodnocení tohoto experimentu nebyl použit žádný plán experimentu, jelikož jedinými vstupními faktory byla technologie ostření fréz a jejich rozdílné axiální úhly čela. Faktory rezných podmínek např. rozdílnou reznou rychlostí nebylo vhodné použít, jelikož bylo důležité zachytit, zda je vliv technologie ostření podstatný a ne hledat, které faktory ovlivňují výslednou silovou výslednici. Fréza 57AX EDM-G se tohoto experimentu nepodílela, jelikož ji nebylo možné s žádnou další frézou porovnávat.

Řezné podmínky v rámci celého experimentu byly stejné pro všechny frézy a byly shodné se startovacími podmínkami, které byly také ověřeny v kapitole 8.4. Hodnota a_p dosahovala hodnoty 3 mm, aby bylo možné co nejvíce využít dostupný materiál. Před prvním frézováním se změřil silový záznam, podle stejného principu jako v kapitole 8.3. Následně byla frézami obráběna PVC deska o rozměrech plochy 1000×1000 mm, která byla upnuta pomocí vakuových přísavek, čímž bylo možné frézovat celou horní plochu polotovaru. Frézování probíhalo strategií řádkování na dřevoobráběcím stroji Homag Venture 20, který byl vybaven odsáváním, čímž se efektivně odstraňovaly třísky z místa řezu. Průběh frézování lze vidět na obr. 8.29.

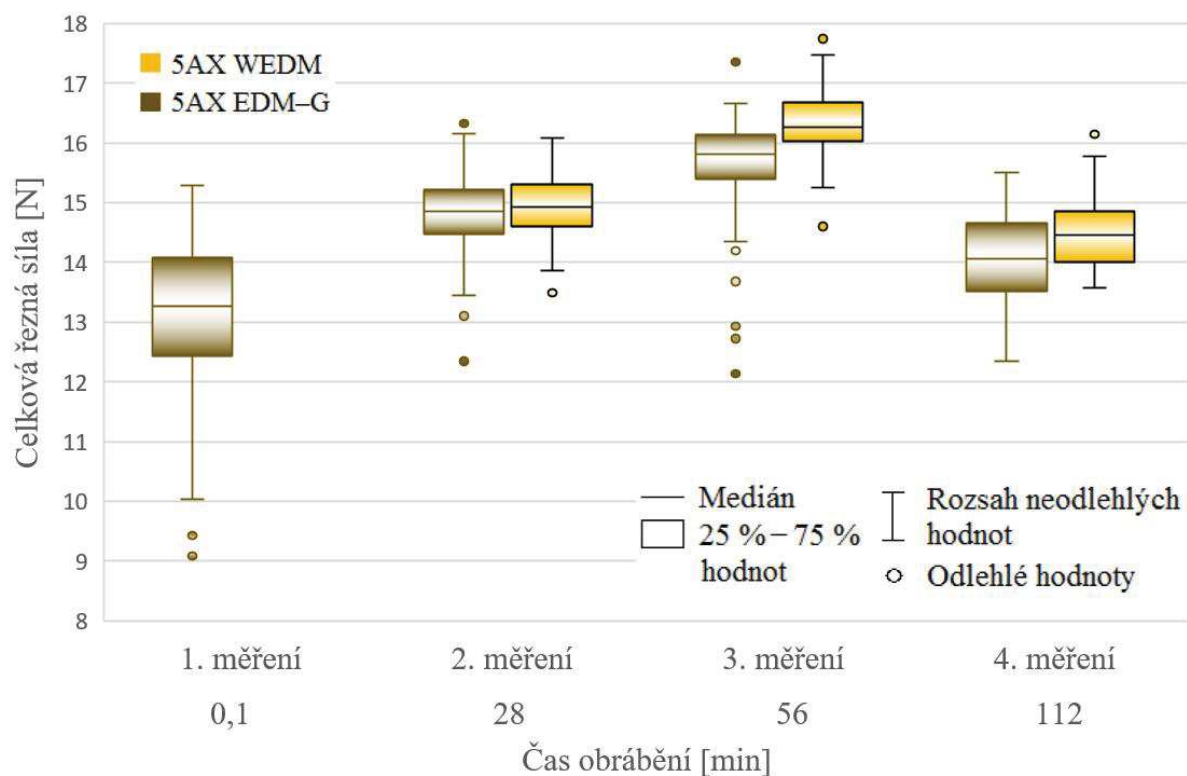


Obr. 8.29 Průběh experimentálního frézování.

Časové úseky obrábění mezi měřeními byly 28 minut. Po těchto úsecích bylo změřeno silové zatížení opět dle stejného principu jako v kapitole 8.3. Do času obrábění v tomto případě nebyly započítány žádné vedlejší časy, přejezdy, nájezdy ani rychloposuvy, jelikož hlavním předmětem byly silové změny. Poslední úsek obrábění měl délku 56 minut. To z důvodu ne zcela znatelného nárůstu sil po 3. silovém měření. Obr. 8.30 a 8.31 ukazují krabicové grafy, v kterých jde vidět, jak se celkové rezné síly jednotlivých fréz po daných časech frézování měnily. První měření pro frézu 5AX WEDM je z experimentu odstraněno, jelikož změřený průběh vykazoval extrémní hodnoty.

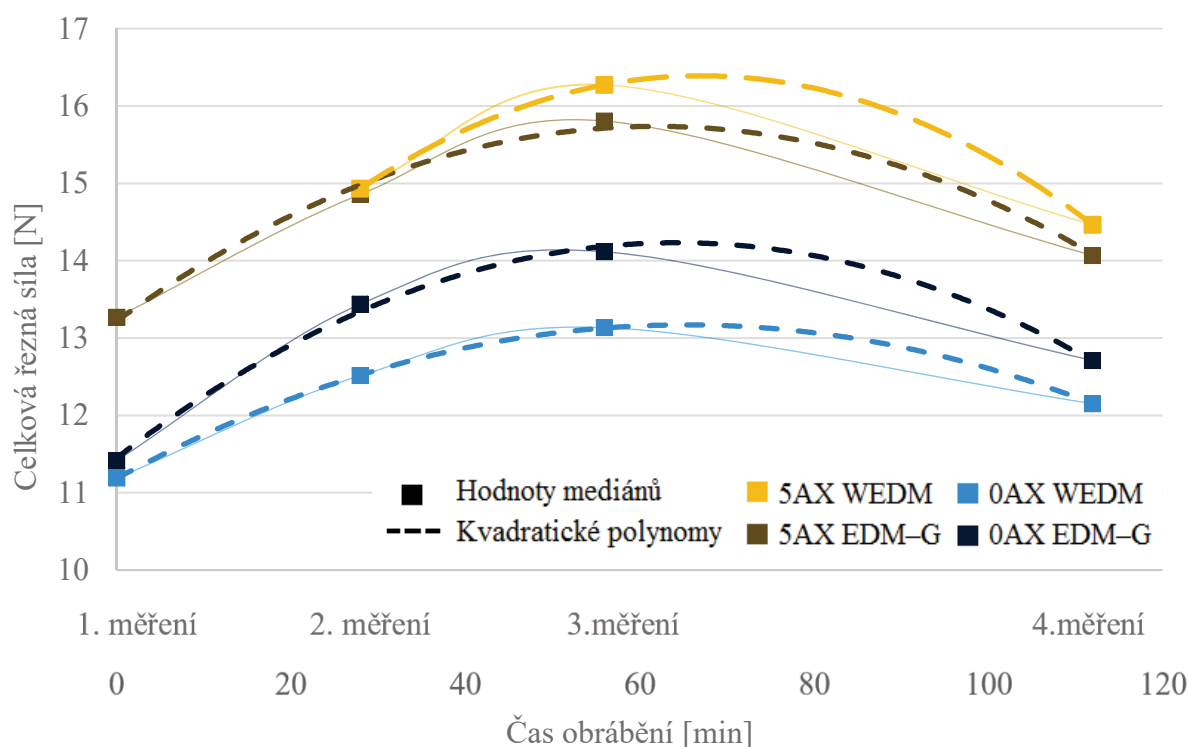


Obr. 8.30 Průběh celkové řezné síly fréz s ax. úhlem 0°.



Obr. 8.31 Průběh celkové řezné síly fréz s ax. úhlem 5°.

Předchozí obr. shrnuje souhrnný graf na obr. 8.32. Lze vidět, že hodnoty celkových řezných sil do 1 hodiny obrábění stále narůstaly a poté nastal jejich pokles. Vzhledem k vysoké trvanlivosti PCD nástrojů se může jednat o záběhovou část, kdy se „obrousí“ kontaktní plošky na nástroji a tím poklesnou síly. Další variantou může být naopak opotřebení nástroje, které způsobuje vyšší tření v místě řezu. Vyšší tření způsobí nárůst teploty, čímž se materiál může stát lépe obrobitelný, a to v konečné fázi znamená pokles sil. Tomu napomáhá nízká teplota měknutí PVC, která je dle Vicata 72 °C. Tento údaj lze vidět v materiálovém listě PVC (Medur 2000) – Příloha 1. Vhodné by bylo provést delší studii měření, která ovšem v rámci této diplomové práce není možná.



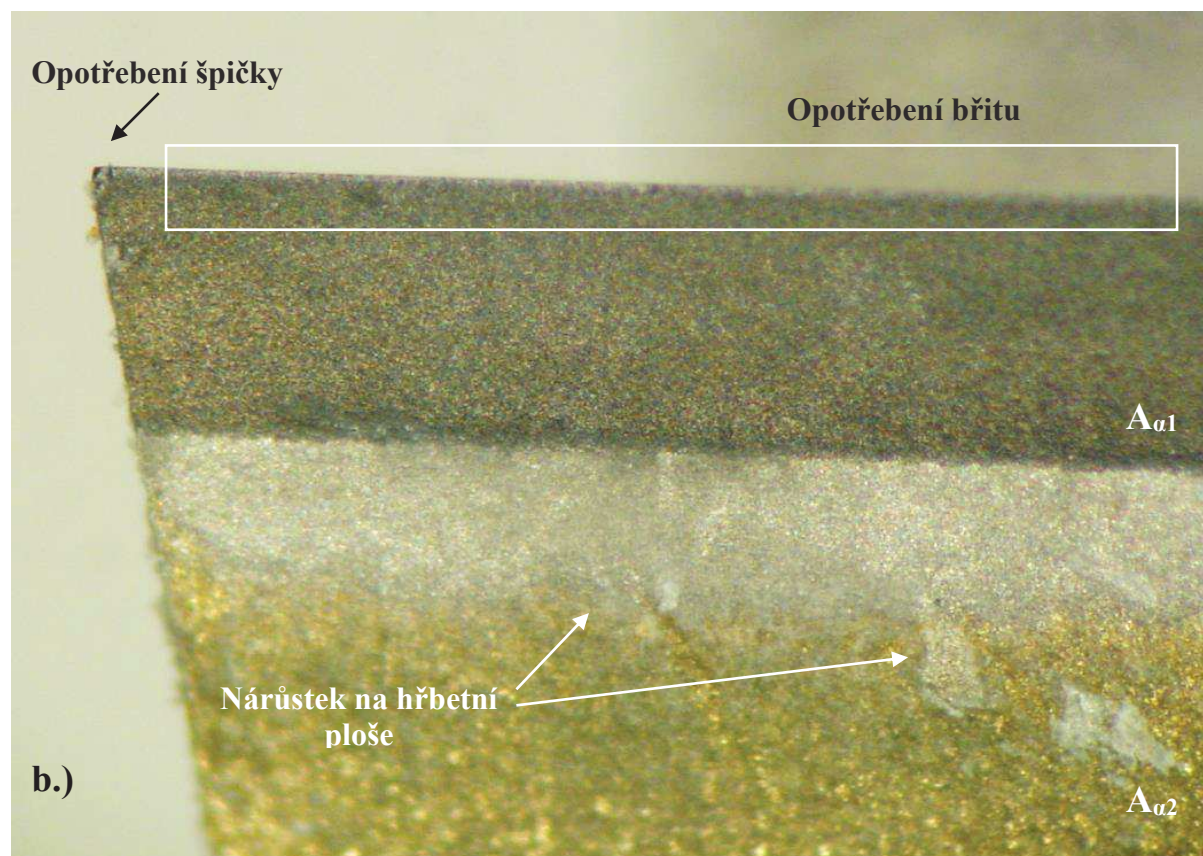
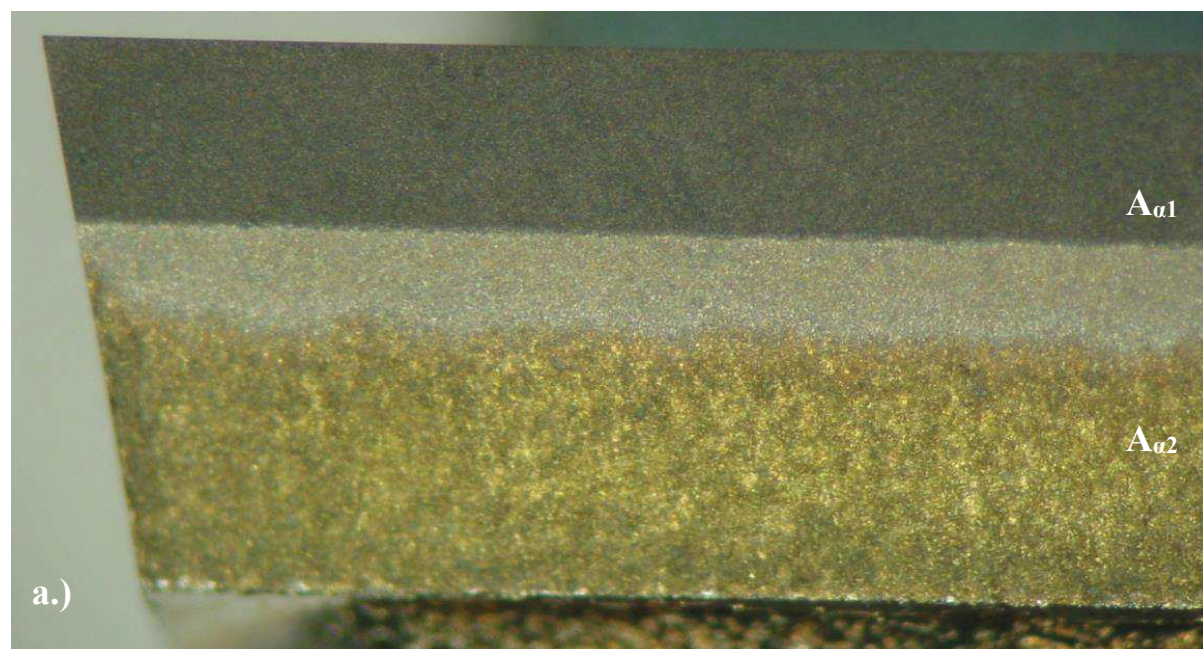
Obr. 8.32 Souhrnný graf celkových řezných sil.

Celkové řezné síly pro experimentální frézy s axiálním úhlem 0° v porovnání s 5° vycházejí nižší, jelikož mají pozitivnější geometrii v axiálním i radiálním směru. Toto bylo detailněji vysvětleno v kapitole 8.3.

Řezné síly sort fréz 0AX začínají přibližně ve stejném bodě. Po půl hodině obrábění jsou vidět rozdílné hodnoty sil, které si svůj trend udržují až do konečné fáze měření, kde je dokonce vidět, že rozdíl mezi oběma silami je menší než po půl hodině.

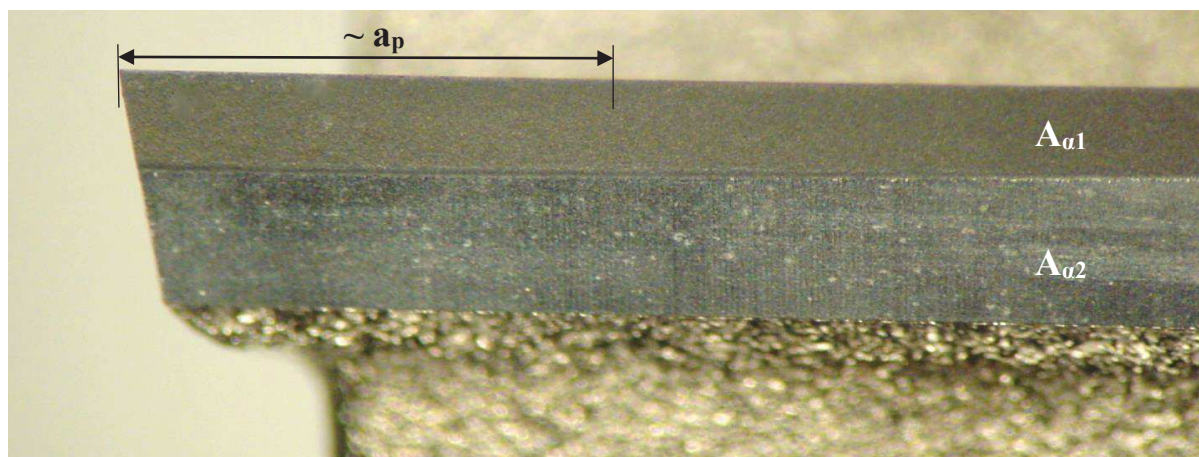
Pro frézy sorty 5AX je průběh opačný. Oběma frézy je po půl hodině změřeno velmi podobné silové zatížení. Po hodině obrábění lze ale vidět nárůst celkové řezné síly u frézy vyrobené technologií WEDM. Stejný rozdíl mezi oběma změřenými silami je i na konci experimentu.

Obr. 8.33 ukazuje hřbetní plochy frézy $0AX$ WEDM před začátkem a na konci experimentu. Snímky byly pořízené na světelném mikroskopu. Nejde z nich pozorovat klasické hřbetní opotřebení, ale pouze opotřebení na špičce nástroje a malé opotřebení na břitu nástroje, což bylo způsobeno neustálými vstupy do materiálu obrobku, kdy jako první do



Obr. 8.33 Hřbetní plochy frézy $0AX$ WEDM:
a.) nový nástroj, b.) nástroje po 112 minutách obrábění.

kontaktu s obrobkem šlo právě ostří nástroje. U všech fréz byl zaznamenán podobný vzhled opotřebení. Z obr. lze také vidět, že zejména na druhém hřbetě frézy jsou adherované částičky materiálů obrobku, jejichž nalepování je zapříčiněno zejména vysokou drsností na tomto hřbetě, který se pohyboval přes hodnotu Ra 2 μm . Na broušeném druhém hřbetě frézy *0AX EDM-G* takové přilnutí bylo minimální – viz obr. 8.34. Na vyleštěných čelních plochách fréz nebyly pozorovatelné výraznější změny.



Obr. 8.34 Hřbetní plochy frézy *0AX EDM-G* po ukončení experimentu.

Díky výše uvedeným faktům nelze jednoznačně určit, kterou technologií ostření se dosáhne vyšší trvanlivosti nástroje při daných podmínkách experimentu a konkrétních podmínkách ostření fréz. Na průběh celkových řezných sil má v tomto případě největší vliv geometrie nástroje. Technologií ostření WEDM se dosahuje u fréz sorty *0AX* menších celkových řezných sil, zatímco v případě fréz s axiálním úhlem čela 5° je tomu naopak. Vzhledem k vysokým trvanlivostem PCD destiček je opotřebení na hřbetních plochách minimální a běžným světelným mikroskopem takřka neměřitelné. Na silové poměry tedy nemají vliv ani rozdílné drsnosti, kde frézy ostřené technologií EDM-G dosahovali $2\times$ vyšší drsnosti prvního hřbetu vztahované k parametru průměrné aritmetické úchytky drsnosti. Po 112 minutách obrábění se tedy nepotvrdil zásadní vliv technologie ostření na trvanlivost fréz s PCD destičkami.

ZÁVĚRY

Závěry předkládané diplomové práce lze rozdělit do dílčích oblastí, přičemž závěry získané z analýzy ostřených destiček jsou:

- Metodou ostření WEDM se při daných podmínkách ostření dosáhlo na prvním hřbetu hodnoty průměrné aritmetické úchytky drsnosti změřené dotykovou metodou pro jednotlivé frézy $0,28 \mu\text{m}$ a $0,31 \mu\text{m}$. To byla $2\times$ nižší hodnota než v případě konkrétních podmínek ostření fréz sorty *EDM-G*, kde se naopak touto metodou dosahovala hodnota **Ra** konvenčně dobroušených druhých hřbetů $0,06 \mu\text{m}$ a $0,11 \mu\text{m}$, zatímco v případě metody WEDM byly naměřeny hodnoty **Ra** druhých – pouze erodovaných hřbetů – vyšší než $2 \mu\text{m}$. Topografie erodovaných prvních hřbetů u metody *EDM-G* má pravidelný vzhled kráterů po vytrhaných zrnech, zatímco v případě druhé metody, lze vidět pásovitou strukturu způsobenou posuvem a napnutím drátu.
- Výhodnějšího nosného profilu a většího poloměru zaoblení břitu dosahovaly frézy ostřené pomocí technologie WEDM.

Z měření silového zatížení fréz s rozdílnou geometrií vyplývá:

- Rostoucí negativní axiální úhel čela způsobuje růst axiální síly F_p , která má snahu nástroj zasunout do upínače. U frézování do rohu velký axiální úhel čela způsobuje matný (tvářený) vzhled čelního obrobeného povrchu. Nedocházelo ke skutečnému řezacímu procesu.
- Pozitivní geometrií v radiální rovině se docílilo menší silové výslednice F_{xy} .

Při analýze drsnosti obrobeného povrchu za různých podmínek obrábění za použití úplného faktoriálního experimentu se zjistilo:

- Průměrnou aritmetickou úchytkou drsnosti nejvíce ovlivňuje hodnota posuvu na zub.
- Nejnižší hodnoty **Ra** se dosáhne za podmínek sousledného frézování, vyšších otáček vřetene a nižšího posuvu na zub.
- Frézami ostřenými WEDM se dosáhlo průměrné hodnoty **Ra** $0,39 \mu\text{m}$, zatímco u fréz sorty *EDM-G* $0,45 \mu\text{m}$. To je dáno poloměrem zaoblení břitu, který u nástrojů WEDM dosahoval vyšší hodnoty.

Z provedeného 112i minutového frézování PVC materiálu obrobku dvěma frézami ostřenými technologií WEDM a dvěma frézami ostřenými technologií WEDM se zjistilo:

- Celková řezná síla narůstá u všech fréz do 1 hodiny obrábění. Poté nastal její pokles. Frézami s axiálním úhlem 5° se dosahuje vyšších celkových řezných sil, jelikož jejich geometrie je více negativní.
- Všechny frézy měly stejný trend opotřebení, a to na špičce nástroje a velmi malé opotřebení na břitu nástroje, způsobené neustálým vstupem do materiálu, kdy vzhledem k řezným podmínkám šlo jako první do řezu právě ostří nástroje.
- Na konci experimentu po 112 minutách frézování za daných řezných podmínek se neukázala technologie ostření destiček jako rozhodující faktor, který by ovlivňoval celkovou řeznou sílu a tím i trvanlivost nástroje. Z toho důvodu se ani drsnost jednotlivých výbrusů neukázala jako význačná. Pro detailnější studii by bylo vhodné provést delší experimentální obrábění, které však nebylo možné v rámci této diplomové práce vzhledem k vysoké trvanlivosti PCD destiček splnit.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
2. HENKEL, Martin. Třískové obrábění technických dílů z plastů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, (1), 56 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/triskove-obrabeni-technickyh-dilu-z-plastu.html>
3. DAVIS, Joseph R. *Tool Materials. ASM Specialty Handbook: Prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee*. Ohio: ASM International, 1995, 501 s. ISBN 0-87170-545-1.
4. MONTEIRO, Sergio Neves, Ana Lúcia Diegues SKURY, Márcia Giardinieri DE AZEVEDO a Guerold Sergueevitch BOBROVNITCHII. Cubic boron nitride competing with diamond as a superhard engineering material – an overview. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2013, 2(1), 68-74 [cit. 2017-02-20]. DOI: 10.1016/j.jmrt.2013.03.004. ISSN 22387854. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785413000057>
5. *Howard Tracy Hall, 1919-2008*. South Jordan, Utah: Legacy Books, 2012. ISBN 978-0-9856830-0-9. Dostupné také z: <http://www.htracyhall.org/featured-content.php>
6. OSÍČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění*. Brno, 2012, 96 s. Vzdělávací a tréninkový modul. Vysoké učení technické v Brně – Fakulta strojního inženýrství.
7. *Vollmer* [online]. Carnegie, PA: VOLLMER OF AMERICA [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.vollmer-group.com/us/us.html>
8. VOLLMER. *PCD ROTARY TOOLS: Disk erosion machine for complete machining of PCD-tipped tools - QXD 250*. VOLLMER WERKE Maschinenfabrik GmbH. Biberach/Riß, 12 s. Dostupné také z: http://www.vollmer-group.com/uploads/tx_detagworkvollmerproducts/12seit_QXD_250_280214_englisches-h-web.pdf
9. *Vydona: Katalog produktů*. Pravčice: Vydona, 2015, 142 s. VI. Dostupné také z: <http://vydona.cz/#katalog>
10. FIALA, Zdeněk. *Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály a CNC technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 125 s. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=72730. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

11. KISTLER. *Force: 4-Component Dynamometer (RCD) – Rotating – for Measuring Cutting Forces on a Rotating Tool, Type 9170A*. Kistler Group. Winterthur, c2013-2015, 5 s. Dostupné také z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=63434&model=document&callee=frontend>
12. ZEMČÍK, Oskar. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 193 s. ISBN 80-214-2336-6.
13. HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část* [online]. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2003 [cit. 2017-03-3]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
14. ZOUHAR, Jan a Miroslav PÍŠKA. Napjatostně-deformační analýza moderních HSS fréz. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, (3), 64 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/napjatostne-deformacni-analyza-modernich-hss-frez.html>
15. BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Marek SADÍLEK, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava, 2007, 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné také z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>. Učební text. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
16. KISTLER. *Product Catalog: Sensors and Solutions for Cutting Force Measurement*. Kistler Group. Winterthur, c2014, 28 s. Dostupné také z: <https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-002e-05.14.pdf>
17. KISTLER. *Test & Measurement Force and Strain: Measurement Equipment for Demanding T&M Applications*. Kistler Group. Winterthur, c2016, 120 s. Dostupné také z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=361&model=download>
18. HARLOW, George E. *The nature of diamonds* [online]. New York, NY, USA: Cambridge University Press in association with the American Museum of Natural History, c1998 [cit. 2017-04-01]. ISBN 05-216-2935-7. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=_WI86J88ydAC&printsec=frontcover&dq=nature+diamond&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjovfjnuNTSAhXBSxoKHekuD80Q6AEIGTAA#v=onepage&q=nature%20diamond&f=false
19. STREBLOVÁ, Eva. *Souhrnné texty z chemie: pro přípravu k přijímacím zkouškám (přírodovědné obory, lékařství) - I. díl* [online]. 3., upr. vyd. Praha: Karolinum, c2012 [cit. 2017-04-01]. ISBN 978-80-246-2135-7. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=BrswBQAAQBAJ&pg=PA152&lpg=PA152&dq=grafit+vazby&source=bl&ots=YR50udeENu&sig=ffaTsBxJJbPTY8n1rQEngjsfseI&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjxhuasstnSAhWBGhQKHb6vChAQ6AEIVTAJ#v=onepage&q=grafit%20vazby&f=false>

20. ELEMENT SIX. *THE ELEMENT SIX CVD DIAMOND HANDBOOK*. c2017, 27 s. Dostupné také z: http://www.e6.com/wps/wcm/connect/863962ae-b380-4f96-9b0f-fd1bcdda56fa/Element+Six_CVD+Diamond+Handbook_A5_r3_v1.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=863962ae-b380-4f96-9b0f-fd1bcdda56fa
21. RAHIM, Mohammad Zulafif, Guangxian LI, Songlin DING, John MO a Milan BRANDT. Electrical discharge grinding versus abrasive grinding in polycrystalline diamond machining—tool quality and performance analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2015, **85**(1-4), 263-277 [cit. 2017-05-23]. DOI: 10.1007/s00170-015-7935-z. ISSN 02683768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-015-7935-z>
22. BLANK, V., M. POPOV, G. PIVOVAROV, N. LVOVA, K. GOGOLINSKY a V. RESHETOV. Ultrahard and superhard phases of fullerite C60: Comparison with diamond on hardness and wear. *Diamond and Related Materials* [online]. 1998, **7**(2-5), 427-431 [cit. 2017-03-15]. DOI: 10.1016/S0925-9635(97)00232-X. ISSN 09259635. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092596359700232X>
23. SlideShare [Internet]. San Francisco, CA: LinkedIn Corporation; c2017. *Molecular Geometries and Bonding Theories*; 2014 [cit. 2017-03-24]; 60 s. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/ewalenta/ch-9-molecular-geometry>
24. GOPALAN, R. *Inorganic chemistry for undergraduates*. Hyderabad, India: Universities Press Private Limited, c2009. ISBN 978-817-3716-607. Dostupné také z: https://books.google.cz/books?id=Fs4zQ-hNTz8C&pg=PA29&lpg=PA29&dq=carbon+radius+of+atom&source=bl&ots=wNS_T2Jwg9&sig=txehmTmeGrsTRsHIOxi1qfgaVZc&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwiIzqKAnXSAhWpbZoKHYY2CZE4ChDoAQhXMAg#v=onepage&q=carbon%20radius%20of%20atom&f=false
25. SlideShare [Internet]. San Francisco, CA: LinkedIn Corporation; c2017. *Crystallography: Diamond structure*; 2014 [cit. 2017-03-24]; 15 s. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/virendrave/diamond-structure>
26. DUTCH, Steven. Diamond Structure. *Steve Dutch* [online]. Natural and Applied Sciences, University of Wisconsin - Green Bay, 2001 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.uwgb.edu/dutchs/Petrology/Diamond%20Structure.HTM>
27. FIALA, Stanislav a Karel KOUŘIL. Nová generace průmyslového diamantu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010, (9), 106 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-generace-prumysloveho-diamantu.html>
28. *Element Six* [online]. c2017 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <http://www.e6.com/en/Home>

29. ELEMENT SIX. *TAKING UNPREDICTABILITY OUT OF MECHANICAL APPLICATIONS*. PRECISION MACHINING & FINISHING. c2017, 15 s. Dostupné také z: http://www.e6.com/wps/wcm/connect/c1a07415-5759-48dc-b7d2-e7e08e79850b/E6_Mechanical+Brochure_A4_16pp_ENG_R5_AwVIZ.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=c1a07415-5759-48dc-b7d2-e7e08e79850b
30. DVOŘÁK, Luděk. Nástroje se silnou vrstvou CVD-diamantu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013, (12), 62 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-se-silnou-vrstvou-cvd-diamantu.html>
31. ELEMENT SIX. *GIVING TOOL MAKERS A COMPETITIVE EDGE: With PCD, PCBN, CVD Diamond & Single Crystal Diamond*. PRECISION MACHINING & FINISHING. c2017, 18 s. Dostupné také z: http://www.e6.com/wps/wcm/connect/2451c5c3-4738-41d0-aea4-0de96bc8f72e/E6_Metalworking_A4_English_R6_AwVIZ.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=2451c5c3-4738-41d0-aea4-0de96bc8f72e
32. DVOŘÁK, Luděk. Tepelné upínání a vyvažování nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013, (10), 32 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/tepelne-upinani-a-vyvazovani-nastroju.html>
33. MOURALOVA, K., J. KOVAR, L. KLAKURKOVA, T. PROKES a M. HORYNOVA. Comparison of morphology and topography of surfaces of WEDM machined structural materials. *Measurement* [online]. 2017 - [cit. 2017-04-10]. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.03.009. ISSN 0263-2241. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0263224117301689>
34. *Fanuc* [online]. Praha 8 – Libeň: FANUC Czech [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.fanuc.eu/cz/cs#>
35. *GF Machining Solutions* [online]. Podolí: GF Machining Solutions Management [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: http://www.gfms.com/country_CZ/cs.html
36. KENNEDY, B. Superhard vs. Superhard. *Cutting Tool Engineering* [online]. 2010 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://www.ctemag.com/news-videos/articles/superhard-vs-superhard>
37. YADAV, Ravindra Nath a Vinod YADAVA. ELECTRICAL DISCHARGE GRINDING (EDG): A REVIEW. In: *Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering, Faridabad, Haryana* [online]. department of Mechanical Engineering, Motilal Nehru National Institute of Technology, Allahabad, India, 2012, s. 590-597 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://ymcaust.ac.in/tame2012/cd/production/P-40.pdf>

38. KORN, Derek. A Role For Rotary Erosion. *Modern Machine Shop* [online]. 2009 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmsonline.com/articles/a-role-for-rotary-erosion>
39. *Hirschmann North America* [online]. Schaumburg: HIRSCHMANN ENGINEERING USA [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://www.hirschmannusa.com/en-us/welcome>
40. KUDELA, Miroslav. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997, 857 s. ISBN 91-972299-4-6.
41. POLZER, Aleš. Deformace stopkových frézovacích nástrojů při obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, (5), 32 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/deformace-stopkovych-frezovacich-nastroju-pri-obrabeni.html>
42. PROKOP, J. *HTVI - TGPV jako integrovaná součást výrobního procesu*. Presentation presented at: [Technologická příprava výroby VUT; 2016 Sept 21; Brno.]
43. SUCHNA, Karel. Vyvažování nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, (9), 56 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/vy vazovani-nastroju.html>
44. Modular Balancing Technology - Tool Dynamic. In: *HAIMER* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://www.haimer-usa.com/products/balancing-technology.html>
45. Návod na obrábění polotovarů technických plastů. *EPP Plasty* [online]. c2012 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.eppplasty.cz/obrabeni.php>
46. *Tribon Plasty* [online]. Brno: Tribon, c2011 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.tribon.cz/>
47. Směrnice pro obrábění. *AK Plast* [online]. Ledec nad Sázavou, c1995-2017 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.akplast.cz/smernice-pro-obrabeni>
48. Plastic Milling: Milling plastic component on custom fixturing. In: *East Branch Engineering and Manufacturing Incorporated* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.eastbrancheng.com/production-machining/>
49. MILLER, Ivan. *DOE: Návrh a analýza experimentu s pomocí MINITAB®*. Praha: Interquality, 2010, 122 s. ISBN 978-80-902770-5-2.
50. SABOVÁ, Iveta. *Plánovaný experiment* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015, 83 s. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/39391>. Vedoucí diplomové práce Ing. Josef Bednář, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	rotace frézy kolem osy x	[°]
A_D	průřez třísky	[mm ²]
A_{a1}	označení plochy prvního hřbetu destičky	-
A_{a2}	označení plochy druhého hřbetu destičky	-
A_γ	označení plochy čela destičky	-
a_e	radiální šířka záběru	[mm]
a_p	šířka záběru hlavního ostří nástroje	[mm]
b	vzdálenost v boční nástroje rovině, kde začíná α_{f2} od bodu ostří	[mm]
D	řezný průměr nástroje	[mm]
DoE	plán experimentu (Design of Experiment)	-
d	průměr charakteristického kruhového průřezu	[mm]
E	Youngův modul pružnosti	[GPa]
EDM–G,	elektroerozivní broušení	-
EDG	(Electric Discharge Machining – Grinding)	
F	výsledná řezná síla	[N]
F_c	řezná síla	[N]
F_{cN} , F_{cN2}	normálová složka celkové řezné síly	[N]
F_f	silová složka působící ve směru posuvu	[N]
F_{fN}	normálová složka celkové řezné síly vztažená k posuvu	[N]
F_p	pasivní složka celkové řezné síly	[N]
F_r	síla působící v radiálním směru	[kN]
F_x , F_y , F_z	jednotlivé složky řezné síly ve směru souřadných os	[N]
F_{xy}	silová výslednice síly F_x a F_y (resp. F_{cN} a F_c)	[kN]
f	posuv	[mm]
f_z	posuv na zub	[mm]
G	stupeň nevyváhy	[mm]
HW	nepovlakované slinuté karbidy s obsahem primárního WC	-
HK	tvrdost dle Knoopu	[GPa]
HSC	vysokorychlostní řezání (High speed cutting)	-
h, h_i	tloušťka třísky	[mm]
h_{max}	maximální tloušťka třísky	[mm]
I , I_1 , I_2	kvadratické momenty průřezu frézy	[mm ⁴]
K_{Ic}	lomové houževnatost při módu zatěžování I	[MPa·√m]
k_c	měrná řezná síla (měrný řezný odpor)	[MPa]
k_{c1}	měrná řezná síla odpovídající tloušťce třísky 1 mm	[MPa]
L, L_1 , L_2	charakteristické délky nástroje	[mm]
MDF	polotvrdá dřevovláknitá deska (medium–density fibreboard)	-
MKP	metoda konečných prvků (FEA)	-
M_x , M_y , M_z	momenty sil k příslušným osám	[N·m]
mc	exponent pro výpočet měrné řezné síly	[-]
n	počet otáček vřetene	[min ⁻¹]
P_c	řezný výkon	[kW]
PCD	polykrystalický diamant	-
P_{cel}	celkový výkon obráběcího stroje	[kW]

P_f	boční nástrojová rovina (radiální rovina)	-
P_n	nástrojová normálová rovina	-
P_p	zadní nástrojová rovina (axiální rovina)	-
P_r	základní nástrojová rovina	-
P_s	nástrojová rovina hlavního ostří	-
PVC	polyvinylchlorid	-
P_0	výkon při chodu naprázdno	[kW]
Q_x	generovaný elektrický náboj působením síly F_x	[pC]
R	řezný odpor	[N]
R_a	průměrná aritmetická úchylka drsnosti	[μm]
R_f	poloměr frézy	[mm]
SK	slinuté karbidy	
s	vzdálenost vedlejšího ostří od osy nástroje	[mm]
s_s	stoupání šroubovice	[mm]
v_c	řezná rychlost	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_e	výsledná efektivní rychlost	[$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_f	posuvová rychlost	[$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
WEDM	drátové elektroerozivní obrábění (Wire Electric Discharge Machining)	-
WC	karbid wolframu	-
W_r	odolnost proti opotřebení	[-]
x, y, z	osy souřadného systému	-
x_1	vzdálenost ve směru osy nástroje od radiálně působící síly	[mm]
α_{f1}	nástrojový boční úhel první hřbetu (radiální úhel prvního hřbetu)	[$^\circ$]
α_{f2}	nástrojový boční úhel druhého hřbetu (radiální úhel druhého hřbetu)	[$^\circ$]
α_{n1}	nástrojový normálový úhel první hřbetu	[$^\circ$]
α_{n2}	nástrojový normálový úhel druhého hřbetu	[$^\circ$]
$\alpha_{p'}$	zadní úhel vedlejšího hřbetu (axiální úhel hřbetu)	[$^\circ$]
γ_f	boční nástrojový úhel čela (radiální úhel čela)	[$^\circ$]
γ_n	nástrojový normálový úhel čela	[$^\circ$]
γ_p	zadní nástrojový úhel čela	[$^\circ$]
κ_r	úhel nastavení hlavního ostří nástroje	[$^\circ$]
$\kappa_{r'}$	úhel nastavení vedlejšího ostří nástroje	[$^\circ$]
λ	nástrojový úhel sklonu ostří	[$^\circ$]
λ_c	základní délka drsnosti (cut-off)	[mm]
π	Ludolfovo číslo	[-]
φ_i	úhel pootočení frézy	[$^\circ$]
φ_{\max}	úhel pootočení frézy, kterému odpovídá h_{\max}	[$^\circ$]
φ_1, φ_2	úhly definující záběr břitu	[$^\circ$]
φ_s	střední úhel záběru	[$^\circ$]
ω	úhlová rychlost	[$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]
ω_p	velikost průhybu frézy	[mm]

SEZNAM PŘÍLOH

- PŘÍLOHA 1 Materiálový list použitého materiálu obrobku – PVC (MEDUR 2000).
- PŘÍLOHA 2 Výkresy sestav jednotlivých fréz.
- PŘÍLOHA 3 Protokoly z měření řezných průměrů a nástrojových úhlů jednotlivých fréz.
- PŘÍLOHA 4 Protokoly z optického měření drsností prvních hřbetů fréz s axiálním úhlem čela 0° a 5° .
- PŘÍLOHA 5 Protokoly z dotykového měření drsností prvních i druhých hřbetů fréz s axiálním úhlem čela 0° a 5° .
- PŘÍLOHA 6 Protokoly z optického měření na mikroskopu fy. Alicona obsahující změřené hodnoty břítu včetně poloměru zaoblení břítu fréz s axiálním úhlem čela 0° a 5° .
- PŘÍLOHA 7 Protokol s 3D profilem břítu frézy *0AX EDM-G*.