



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**MIKRO-FRÉZOVÁNÍ SE ZAMĚŘENÍM NA HODNOCENÍ 4
OSÉHO A 5TI OSÉHO FRÉZOVACÍHO SYSTÉMU**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Těšík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Žídek

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Martin Těšík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Židek**
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 bakalářské práce:

Mikro-frézování se zaměřením na hodnocení 4 osého a 5ti osého frézovacího systému

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mikro-frézování je univerzální výrobní technologie zaměřená na výrobu rozměrově vysoce přesných obrobků. Jedním z hlavních aspektů ovlivňující výslednou rozměrovou přesnost je použití víceosého obráběcího centra.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je vypracovat literární rešerši zaměřenou na mikro-frézování. V rámci bakalářské práce bude zpracován přehled z vybrané výrobní technologie obsahující základní informace a nejnovější poznatky z problematiky 4 osého a 5ti osého mikro-frézování.

Seznam literatury:

CHENG, K., HUO, D. Micro cutting: fundamentals and applications. New York: John Wiley & Sons Inc., 2013.

CÂMARA, M.A., J.C. Campos RUBIO, A.M. ABRAO a J.P. DAVIM. State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. Journal of Materials Science & Technology [online]. 2012, 28(8), 673-685 [cit. 2016-12-06]. DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60115-7. ISSN 10050302. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1005030212601157>.

RYSAVA, Z., S. BRUSCHI, S. CARMIGNATO, F. MEDEOSSO, E. SAVIO a F. ZANINI. Micro-drilling and Threading of the Ti6Al4V Titanium Alloy Produced through Additive Manufacturing. Procedia CIRP. 2016, 46, 583-586. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.030. ISSN 22128271. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827116301858>.

BRUSCHI, S., G. TRISTO, Z. RYSAVA, P.F. BARIANI, D. UMBRELLO a L. DE CHIFFRE. Environmentally clean micromilling of electron beam melted Ti6Al4V. Journal of Cleaner Production. 2016, 133, 932-941. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.035. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616307107>.

HANSEN, H.N., K. CARNEIRO, H. HAITJEMA a L. DE CHIFFRE. Dimensional Micro and Nano Metrology. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2006, 55(2), 721-743. DOI: 10.1016/j.cirp.2006.10.005. ISSN 00078506. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1660277306000065>.

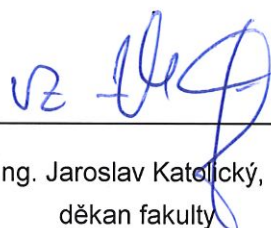
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 3. 11. 2016





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá mikroobráběním se zaměřením na mikrofrézování. Popisuje podstatu a problematiku postupů při mikroobrábění. Dále se věnuje srovnání 4-osého a 5-osého systému řešením shrnutím a návrhem teoretického experimentu, ve kterém se frézují zubní náhrady, nasadí se na model a poté se s pomocí elektronového mikroskopu porovná přesnost frézování skrz dosednutí jednotlivých zubních náhrad na zubní pahýl. V experimentu bude pokračovat navazující diplomová práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikroobrábění, mikrofrézování, frézování, mikronástroje, ultrapřesnost, obrábění, 4 osy, 5 os, zubní náhrady

ABSTRACT

This thesis is about Micromachining and Micromilling. It describes basics and problematic factors of micromachining. One of the sectors of micromachining and main topic of this bachelor thesis is micromilling. Another topic is comparison of 4 axis and 5 axis micromilling systems by recherche and theoretical experiment design, in which precision machining of designed dental crown is compared. Experiment will be done in related dissertation.

KEYWORDS

Microcutting, micromilling, milling, microtools, ultraprecision, machining, 4 axis, 5 axis, tooth replacement

TĚŠÍK, Martin *Mikro-frézování se zaměřením na hodnocení 4 osého a 5ti osého systému*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2017. s. Vedoucí práce byl Ing. Jan Žídek,

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Mikro-frézování se zaměřením na hodnocení 4 osého a 5ti osého systému“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

Martin Těšík

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat Ing. Janu Žídkovi za odborné vedení, dozor, pomoc a rady k této bakalářské práci. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Peškovi a Mgr. Jiřímu Bělovi za veškerou pomoc při vypracování experimentální části.

V neposlední řadě patří zvláštní poděkování mým rodičům za jejich podporu v průběhu mého celého studia a mé přítelkyni.

OBSAH

Úvod	1
1 Mikroobrábění	2
1.1 Základy mikroobrábění	3
1.1.1 Tloušťka nedeformované třísky	3
1.1.2 Rozměrová přesnost mikrosoučástí	4
1.1.3 Geometrie břitu řezného nástroje	4
1.1.4 Oblast použití	4
1.2 Vysoce přesné obrábění	4
2 Mikrofrézování	7
2.1 Definice	7
2.2 <i>Size effect</i> - Velikostní efekt	7
2.3 Řezné síly	9
2.4 Nástroje	15
2.5 Stroje	16
2.6 Využití	19
3 Srovnání dvou systémů	20
4 Mikrofrézování v dentálním průmyslu	23
4.1 Úvod do problematiky	23
5 Experiment	25
Závěr	28
Literatura	

ÚVOD

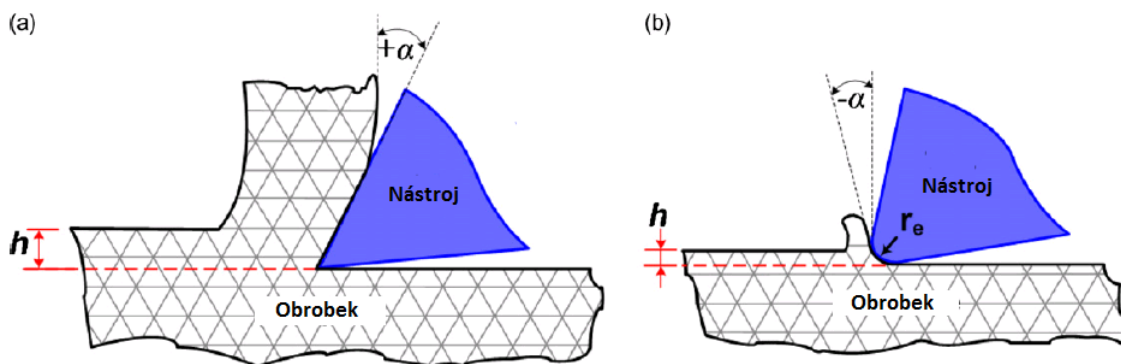
Mikroobrábění je v dnešním světě čím dál více vyhledávaná a používaná metoda pro výrobu různých součástek a částí, na které jsou kladeny požadavky na minimalizaci a přesnost. Jedním z odvětví mikroobrábění je také mikrofrézování, kterému se z valné části věnuje tato bakalářská práce. První kapitola shrnuje základy a problematiku mikroobrábění. V této kapitole se taktéž definuje rozdíl mezi konvenčním makroobráběním a mikroobráběním. V druhé kapitole jsou shrnuty základy mikrofrézování, jeho podstata a problematika. Je rozebrán tzv. *Size effect* - velikostní efekt, což je základní úskalí mikroprocesů, a je ukázán základní matematický model mikrofrézovacího procesu a teoretický výpočet tloušťky třísky. Poslední dvě kapitoly se věnují srovnání 4-osého a 5-osého mikrofrézovacího systému. Srovnání vychází z teoretických studií a praktických zkušeností. V poslední kapitole je navržen teoretický experiment a je popsán proces náhrady zubu od první návštěvy stomatologa až po finální výrobek. Srovnání v experimentu se věnuje porovnání marginálních mezer mezi zubní náhradou a zbytkem zubu či náhradní korunkou a dásní. Experiment je navržen teoreticky a bude proveden a blíže rozebrán v navazující diplomové práci.

1 MIKROOBRÁBĚNÍ

Úprava materiálu na atomové úrovni je považována za oblast fyziky, chemie a nanotechnologie. Nicméně velmi přesné mikroobrábění se stává čím dál více rozšířenějším nástrojem pro výrobu součástí a komponentů rozměrově velkých v rozsahu od desítek nanometrů do několika milimetrů, splňujících požadavky vysoké přesnosti a kvality.

Poptávka po miniaturizaci roste v posledních dvaceti letech velice rychle, což se dá pozorovat na rozšiřujícím se použití mikroelektromechanických systémů (MEMS), převážně mikrosenzorů a mikroovladačů. Tyto systémy mají využití v lékařsko-technickém průmyslu (např. tlakové senzory), komunikačních technologiích (velmi přesné rezonátory) a dalších mnoha odvětvích techniky (např. akcelerometry, gyroskopy, ...)[1]. Dalšími příklady využití mikrotechnologií jsou digitální fotoaparáty, mobilní telefony, PC komponenty a mnoho dalších spotřebitelských přístrojů.

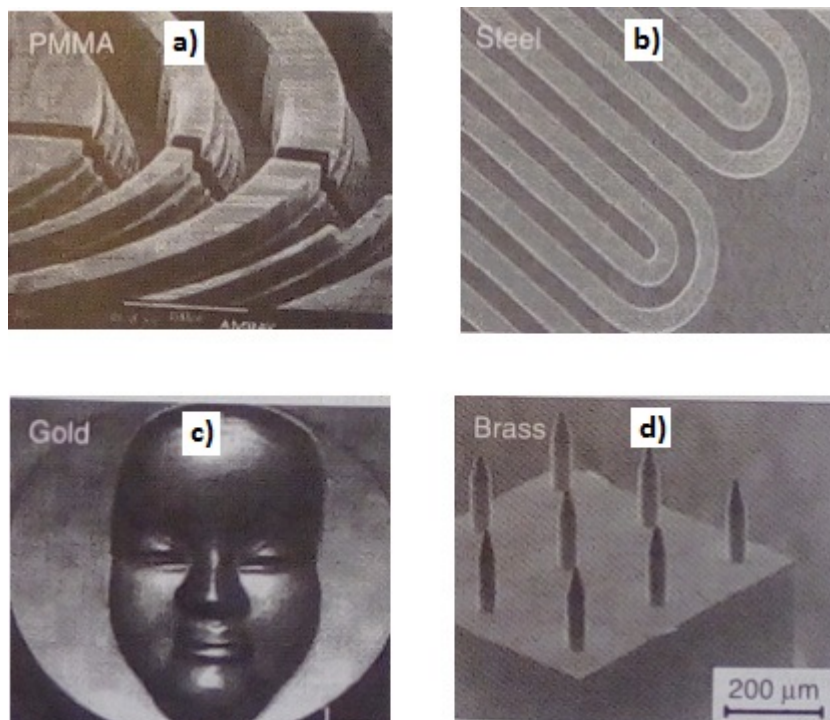
Obrábění je technologický proces, při kterém se vytváří požadovaný tvar obráběného předmětu v daných rozměrech a v daném stupni přesnosti odebráním materiálu. Tím se liší od jiných technologií jako například dělení materiálu, tváření nebo odlévání. Mikroobrábění je obráběcí proces, při kterém jsou odstraňovány malé, mikroskopické částčky materiálu o velikosti v řádech mikrometrů. Na rozdíl od konvenčního makroobrábění může být při procesu tloušťka odebíraného materiálu srovnatelná s velikostí poloměru břitů. Obr. 1.1 schématicky znázorňuje srovnání makroobrábění s mikroobráběním [2].



Obr. 1.1: Schématické zobrazení odebrání materiálu při a) makroobrábění a b) mikroobrábění. Tloušťka nedeformované třísky h , úhel sklonu ostří α a poloměr ostří r_e (převzato a upraveno z [2]).

1.1 Základy mikroobrábění

Mikroobrábění je kinematicky velmi podobné konvenčnímu obrábění, ale v podstatě je rozdílné v mnoha aspektech. Jde o mechanické mikroúpravy (přímé oddělování materiálu) za použití geometricky přesně definovaného ostrého nástroje na velmi precizních strojích či mikrostrojích. Vyrábí se rozměrově přesné 3D komponenty z mnoha různých materiálů, viz obr. 1.2. Základní podstatu mikroobrábění lze shrnout do několika následných bodů[1].



Obr. 1.2: Ukázky vysoce přesných komponentů a mikrostruktur vyrobených mikroobráběním. a) Polymethylakrylát b) Ocel c) Zlato d) Mosaz (převzato a upraveno z [1]).

1.1.1 Tloušťka nedeformované třísky

Tloušťka nedeformované třísky je vrstva materiálu, odebraného při procesu obrábění, viz obr. 1.1 b), hodnota h . Tloušťka této třísky při mikroobrábění se liší od konvenčního makroobrábění. Mikro-makro hranice je definována okolo $200\text{ }\mu\text{m}$ [3], přičemž se tato hodnota mění v závislosti na současné úrovni konvenčních technologií a klesá v závislosti na technologických pokrocích v oblasti obrábění. V současnosti je velmi přijatelná hranice menší než $10\text{ }\mu\text{m}$ [4].

1.1.2 Rozměrová přesnost mikrosoučástí

V případě rozměrů u obrobků při mikroobrábění musí být daná vyrobená mikrosoučást velká alespoň $1\text{ }\mu\text{m}$ až $1000\text{ }\mu\text{m}$ ve dvou dimenzích. Pro miniaturizované části jako např. mikrokolíky a miniaturizovaná ozubená kola tudíž platí, že jsou obráběny ve všech třech dimenzích a za dodržení vysoké přesnosti. Při mikroobrábění je pravidelně dosahována přesnost vyšší než několik mikrometrů s drsností povrchu (R_a) menší než 100 nm [5][1].

1.1.3 Geometrie břitu řezného nástroje

Velikost a geometrie břitu řezných mikronástrojů určuje omezení přesnosti a rozměrů obrobených mikroprvků. Při mikrovtání a mikrofrézování se nejčastěji používají nástroje rozměrově velké od $25\text{ }\mu\text{m}$ až do $1000\text{ }\mu\text{m}$ [6]. Ve speciálních laboratořích se používají dokonce nástroje o velikosti několika mikrometrů. Při mikrosoustružení nejsou na velikost nástroje kladeny speciální požadavky [1].

Tab. 1.1: Srovnání mikroobrábění a vysoce přesného obrábění (převzato z [1]).

<i>Parametr</i>	<i>Mikroobrábění</i>	<i>Vysoce přesné obrábění</i>
Procesy	mikro-frézování, -vrtání, -broušení, -soustružení	jednobodové diamantové soustružení,
Materiál nástroje	karbid wolframu, kubický nitrid bóru	diamantové nástroje
Velikost obrobku	$1 - 1000\text{ }\mu\text{m}$	$1\text{ }\mu\text{m}$ a více
Přesnost	méně než $10\text{ }\mu\text{m}$	méně než $1\text{ }\mu\text{m}$
Drsnost povrchu	méně než 100 nmRa	méně než 20 nmRa
Šířka záběru ostří	$1\text{ }\mu\text{m} - 10\text{ }\mu\text{m}$	$0.1\text{ }\mu\text{m} - 10\text{ }\mu\text{m}$

1.1.4 Oblast použití

Pomocí mikroobrábění jsme schopni upravovat široké spektrum materiálů včetně kovů, polymerů, technické keramiky (označována také jako inženýrská či průmyslová) a kompozitů na vysokou přesnost a drsnost povrchu. Využití se nachází v mnoha oblastech vyžadujících mikrokomponenty.

1.2 Vysoce přesné obrábění

Při odborných diskuzích se často stává, že se zaměňuje mikroobrábění s vysoce přesným obráběním. Rozdíly mezi oběma procesy jsou často pro mnohé matoucí.

To je proto, že některé charakteristické prvky mikroobrábění vycházejí z vysoce přesného obrábění a jsou si velmi podobné, jako např. minimální tloušťka třísky, proces tvoření třísky, specifické řezné síly a jiné [7]. Vysoce přesné obrábění se zaměřuje na dosažení co nejkvalitnější struktury povrchu a co nejpřesnějších rozměrů. Tyto faktory závisí především na tuhosti celé obráběcí soustavy. Tab. 1.1 shrnuje rozdíly mezi mikroobráběním a vysoce přesným obráběním.



Obr. 1.3: Ukázky strojů určených pro mikroobrábění: a) Kern micro b) Sodick AZ150 c) Fraunhofer IPT Minimill d) Makino Hyper2J e) Kuglar MicroMaster MM2 f) Fanuc ROBOnano g) Precitech freeform 700 Ultra h) Moore Nanotech 350FG (převzato z [8]).

Hlavními požadavky na stroje, které jsou určeny pro mikroobrábění, jsou vysoká rozměrová přesnost (vyšší než pár mikrometrů), přesná geometrie nástroje a nízká drsnost povrchu. Taktéž je třeba, aby použitý nástroj dobře tlumil případné otřesy, měl nízkou teplotní roztažnost a měl vysokou tvrdost [3].

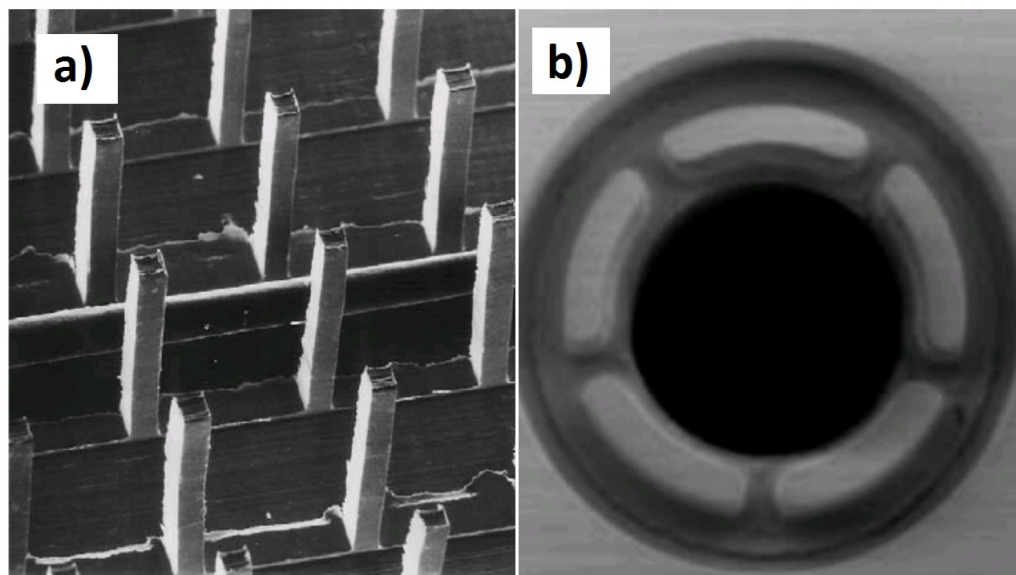
Většina experimentálních výzkumů a nynější samotné mikroobrábění bývá prováděno buď na tradičních vysoce přesných strojích nebo na centrech určených přímo pro mikroobrábění. Těchto strojů již v dnešní době existuje mnoho typů od různých výrobců. Obr. 1.3 ukazuje příklady používaných strojů, které jsou schopny mikroobrábění. Většinou se jedná o konvenční stroje určené primárně pro soustružení pomocí diamantu s přidanou osou Z, rotačním stolem a brousícím vřetenem. Typickým příkladem je *Moore Nanotechnology Nanotech 350FG* (obr. 1.3 g)) či *Precitech*

Freeform 700 ultra (obr. 1.3 h)). Oba pro svůj provoz potřebují plochu o velikosti 5 - 7 m^2 a jejich provoz je velmi nákladný. Lze na nich vyrobit pouze geometricky jednoduché součásti jako například součástky pro kosmonautiku a letecký průmysl (hřídelky, laserové tyčinky a jiné) [1][8].

2 MIKROFRÉZOVÁNÍ

2.1 Definice

Mikrofrézování je proces vzniklý zmenšením konvenčního frézování. Obě technologie jsou si podobné z kinematického hlediska, kdy se materiál odděluje pomocí rotujícího řezného nástroje na obrobku. To způsobuje stříh materiálu na rozhraní ostří řezného nástroje a odlamování materiálu ve formě třísek [1]. Většinou se používají nástroje s průměrem od 100 μm do 1 mm, které mají poloměr špičky od 1 μm do 10 μm . Ačkoli se jedná pouze o zmenšení konvenčního frézování, při procesu mikroobrábění vznikají nové nežádoucí efekty jako například *size effect* - velikostní efekt či vydrolení ostří řezného nástroje, kdy citelné snížení přesnosti obrobku vzniká již při vydrolení v řádech mikrometrů [9].



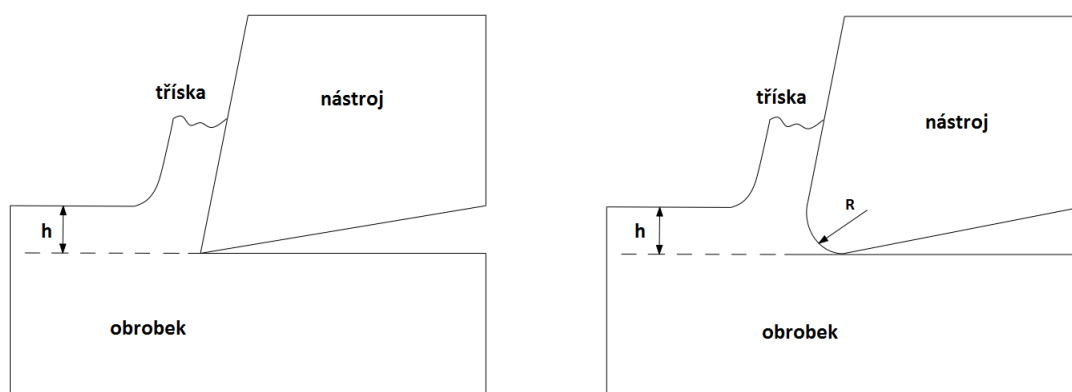
Obr. 2.1: Vyfrézované struktury v měřítku 2,5 cm = 100 μm . a) vyfrézovaná struktura v porovnání s lidským vlasem b) vyfrézovaná díra (převzato a upraveno z [10]).

2.2 *Size effect* - Velikostní efekt

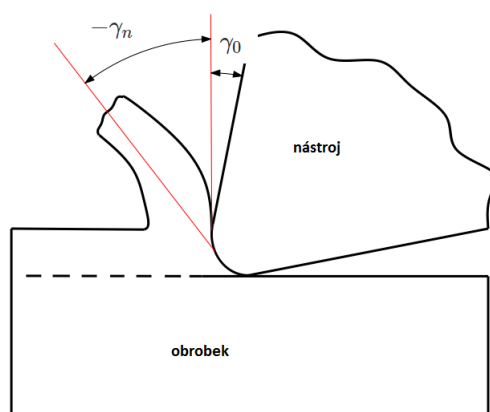
Při obrábění si můžeme představit špičku řezného nástroje jako ostrý hrot. Při mikroobrábění nikdy nedosáhneme naprosto ostrého nástroje a vždy můžeme změřit jeho poloměr ostří R jak ukazuje obr. 2.2. Pokud se velikost poloměru ostří či velikost zrn obráběného materiálu přiblíží jmenovité tloušťce třísky, dochází ke kritickým problémům označovaným jako velikostní efekty, které ovlivňují celý proces

mikrofrézování, jako např. negativní úhel čela či elastická deformace obrobeného povrchu. Tyto nežádoucí jevy ovlivňují střižné síly, proces tvorby třísky, otřep, spotřebovanou energii, vibrace a stabilitu celého procesu [11].

Při makroobrábění je jmenovitá tloušťka třísky vždy větší než poloměr ostří řezného nástroje, proto je považován za ostrý hrot a jeho poloměr může být zanedbán. Taktéž je efektivní úhel čela skoro shodný s nominálním úhlem čela řezného nástroje, a proto se materiál odděluje stříhem. Pokud budeme celý proces zmenšovat až na úroveň mikroobrábění, nastane situace, kdy poloměr ostří řezného nástroje bude srovnatelný s jmenovitou tloušťkou třísky, což vede k negativnímu úhlu čela. Toto je ukázáno na obr. 2.3. Odebíraný materiál už poté není oddělován stříhem, ale převážně kompresí a vtlačováním pod nástroj, což se označuje jako tzv. *ploughing effect* - rytí neboli rycí efekt.



Obr. 2.2: Srovnání řezného nástroje a tloušťky odebíraného materiálu u frézování a mikrofrézování. Jmenovitá tloušťka třísky h a poloměr ostří řezného nástroje R .

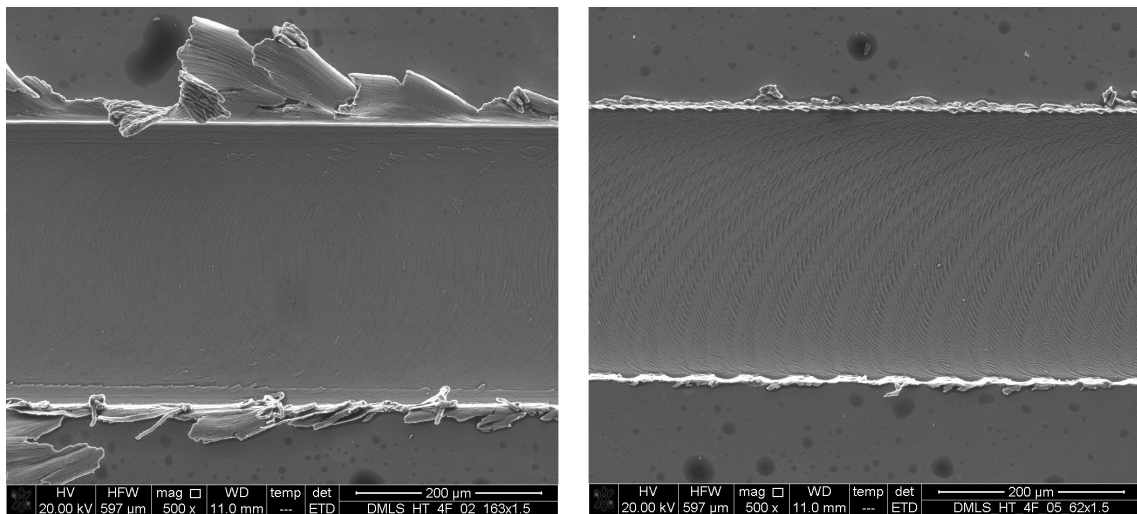


Obr. 2.3: Ukázka negativního sklonu ostří.

Typická velikost zrn většiny obráběných materiálů kolísá mezi 100 nm a 100 μm . Jmenovitá tloušťka třísky při mikrofrézování může klesat až k několika mikrometrům, tudíž se tříska tvoří i řezem jednotlivých zrn. Obráběný materiál proto nemůžeme považovat za izotropický a homogenní jako je tomu při konvenčním obrábění.

Dostupné nástroje pro mikrofrézování mají poloměr ostří v rozsahu od 0,8 μm do 5 μm , přičemž menšího poloměru prozatím není dnešní technika schopna dosáhnout. Se snižujícím se průměrem nástroje klesá taky možnost využití, aby se předešlo jeho průhybu, nadměrnému opotřebení a předčasnému lomu či dokonce zničení. Celkový posuv je volen nižší v poměru k makrofrézování tak, aby se dosáhlo menších řezných sil a menší třísky [1].

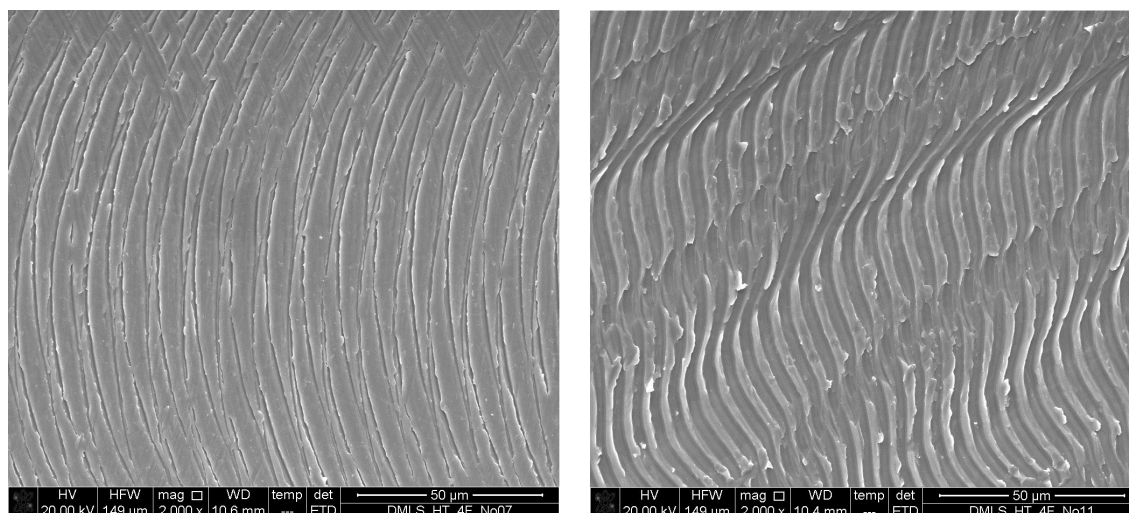
Postupným snižováním jmenovité tloušťky třísky až na kritickou hodnotu pro daný poloměr ostří nastane situace, kdy se již tříska netvoří. Tato tloušťka se nazývá minimální tloušťka třísky. Při tomto jevu se již materiál neodebírá a vznikající elastické deformace způsobují nepřesnosti v obráběcím procesu. Tento fenomén ovlivňuje řezné síly, spotřebovanou energii, způsobuje otřepy viz obr. 2.4 a snižuje kvalitu obroběného povrchu viz obr. 2.5 [12][13].



Obr. 2.4: Ukázka otřepů na okrajích mikrosoučástí.

2.3 Řezné síly

Výzkumníci a inženýři již dlouho používají pro vyšší efektivitu a ekonomiku procesu rovnice a data spojené s obráběním. Bylo také zjištěno, že vyšší výkonnosti se dosahuje nejen pouze předvídáním a optimalizováním, ale také použitím optimalizačních



Obr. 2.5: Ukázka nekvalitní struktury povrchu při mikrofrézování.

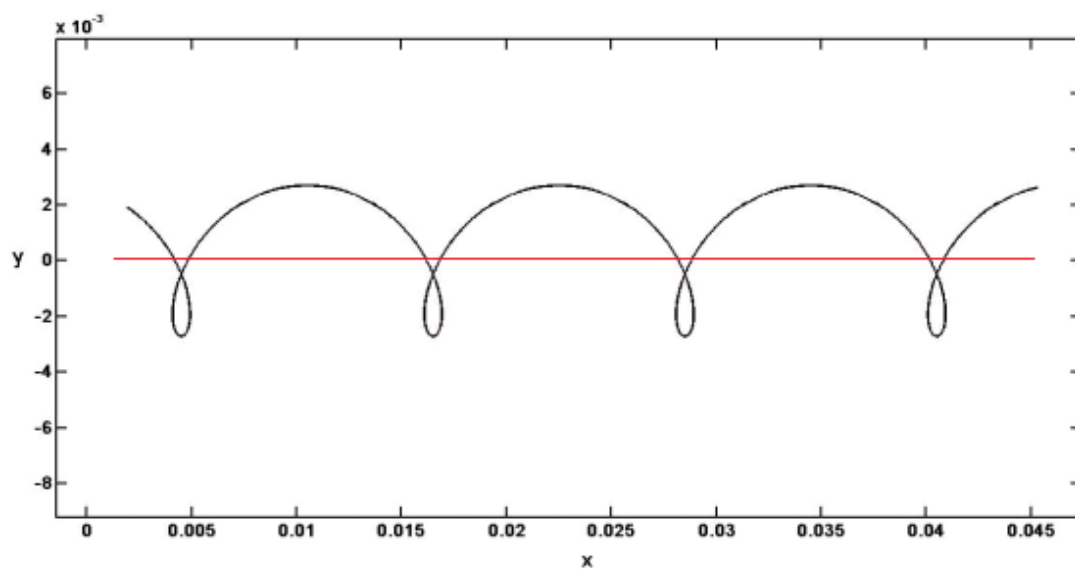
strategií [14].

Úhlové a radiální vychýlení je nejdůležitější faktor, který musíme při výpočtech u mikrofrézování vzít v potaz. U konvenčního makroobrábění vychýlení nástroje nemá až takový dopad a to proto, že vychýlení je malé v porovnání s průměrem řezného nástroje, a tudíž ovlivní výpočty jen nepatrně. Výsledné vychýlení u mikrofrézování způsobuje předčasné defekty řezných hran, ovlivňuje stabilitu celého procesu a má velký vliv na topografii obráběného povrchu [15].

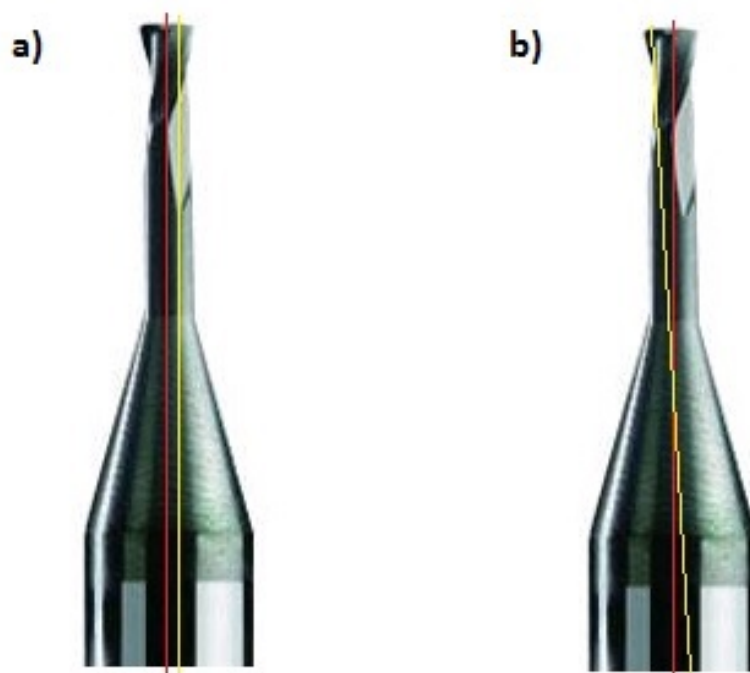
Vychýlení můžeme definovat jako periodické variace pohybu středu nástroje, které ovlivňuje jeho finální trajektorii. To tedy závisí na posuvu, otáčkách a průměru nástroje. Příklad vychýlení středu lze vidět na obr. 2.6. Výsledkem jsou okamžité síly, které mění výslednou podobu třísek [16].

Vychýlení u mikrofrézování můžeme rozdělit na dva typy - úhlové vychýlení a radiální vychýlení. První typ je dán nesouosostí, které spěje k vytvoření úhlu mezi osou rotace řezného nástroje a středovou osou systému. Příčiny jsou např. nepřesně vyrobený nástroj, výskyt úlomků materiálu při uchycování nástroje a další. Druhý typ je dán posunutím osy rotace řezného nástroje a středovou osou systému. Dohromady tvoří středový posun nástroje [14][17]. Oba typy jsou ukázány na obr. 2.7.

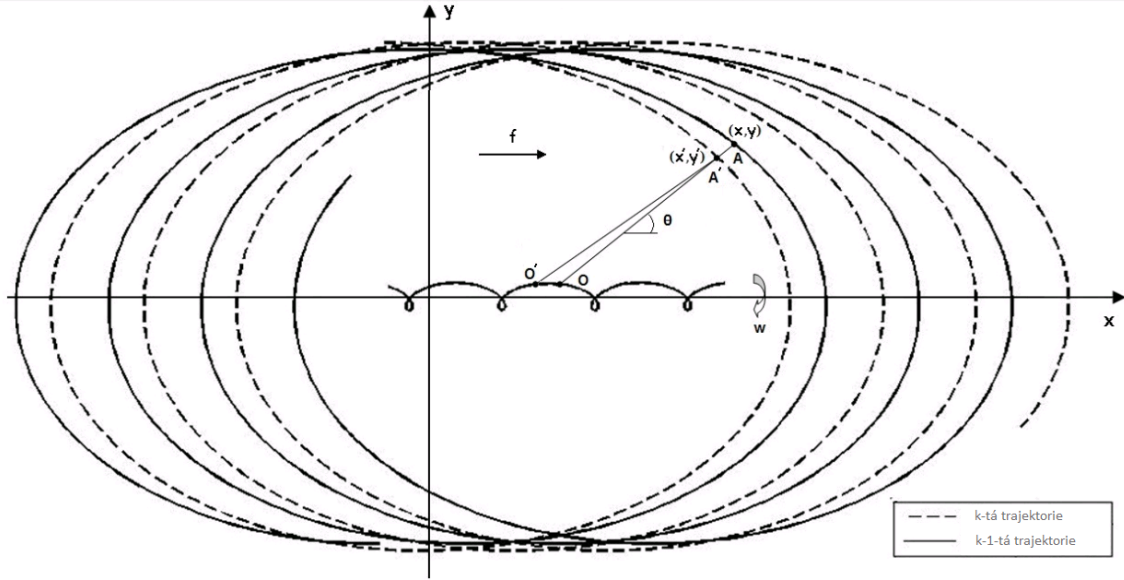
Následující rovnice jsou převzaty z článku a studie S.M.Afazova a upraveny [19]. Trajektorii k -tého a $(k-1)$ -tého zubu lze vidět na obr. 2.8. Výpočet jmenovité tloušťky třísky probíhá pomocí cest k -tého a $(k-1)$ -tého zubu, kde je již započítáno vychýlení nástroje z místa řezu a trochoidní pohyb. Souřadnicová hodnota (x', y') na obr. 2.8 znázorňuje polohu špičky $(k-1)$ -tého zubu, zatímco (x, y) se vztahuje na polohu špičky dalšího, tudíž k -tého zubu nástroje.



Obr. 2.6: Skutečná trajektorie pohybujícího se řezného nástroje se znázorněnou ideální trajektorií (červeně)[18].



Obr. 2.7: a) Radiální vychýlení b) Úhlové vychýlení (ideální osy červeně, reálné žlutě) [18].



Obr. 2.8: Trajektorie k-tého a (k-1)-tého zubu [18].

Souřadnice x, y trajektorie k -tého zubu vypadají následovně

$$\begin{aligned} x_k &= v_f t + R \sin \left(wt - \frac{2\pi k}{K} \right) + R_0 \sin (wt + \gamma_0) \\ y_k &= R \cos \left(wt - \frac{2\pi k}{K} \right) + R_0 \sin (wt + \gamma_0) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Zde v_f [mm/s] je posuvová rychlost, R [mm] je poloměr nástroje, w [rad/s] je úhlová rychlost vřetene, pro kterou platí obecný vzorec $w = 2\pi n$, t [s] je čas, k [-] je identifikační číslo zubu, K [-] je počet zubů, R_0 [mm] je velikost vychýlení nástroje a γ_0 [rad] je úhel vychýlení.

Rovnice 2.1 může být přepsána do následujícího tvaru:

$$y_k = \frac{x_k - v_f t - R \sin(wt + \gamma)}{\tan \left(wt - \frac{2\pi k}{K} \right)} + R_0 \cos(wt + \gamma_0) \quad (2.2)$$

Souřadnice x, y trajektorie $(k-1)$ -tého zubu lze odvodit z rovnice 2.1 dosazením $(k-1)$ namísto k a času t' namísto t .

$$\begin{aligned} x_{k-1} &= v_f t' + R \sin \left(wt' - \frac{2\pi(k-1)}{K} \right) + R_0 \sin (wt' + \gamma_0) \\ y_{k-1} &= R \cos \left(wt' - \frac{2\pi(k-1)}{K} \right) + R_0 \cos (wt' + \gamma_0) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Pro zjištění hodnoty času t' se substituuje rovnice 2.3 do rovnice 2.2, z čehož plyne následující rovnice:

$$\begin{aligned}
f(t') = R \tan \left(wt - \frac{2\pi k}{K} \right) \cos \left(wt' - \frac{2\pi(k-1)}{K} \right) + \\
R_0 \tan \left(wt - \frac{2\pi k}{K} \right) \cos(w't + \gamma_0) - R_0 \tan \left(wt - \frac{2\pi k}{K} \right) \cos(wt + \gamma_0) \\
-v_f t' + v_f t - R \sin \left(wt' - \frac{2\pi(k-1)}{K} \right) - \\
-R_0 \sin(wt' + \gamma_0) + R_0 \sin(wt + \gamma_0) = 0
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Pro řešení nelineární rovnice 2.4 v závislosti na čase t' , je zapotřebí nějaký počáteční odhad. Vzhledem k úhlové rychlosti a otáčkách zlomek $2\pi/(wK)$ [s] nahradí $2\pi/K$ [rad] a jako počáteční odhad se použije:

$$t'_i = t - \frac{2\pi}{wK} \tag{2.5}$$

Dle iterativní Newton-Raphsonovy metody neboli metody tečen se zapíše čas jako následující rovnice:

$$t'_{i+1} = t'_i - \frac{F(t'_i)}{F'(t'_i)} \tag{2.6}$$

A zderivovaná rovnice 2.4:

$$\begin{aligned}
F(t') = -w \left[R \tan \left(wt - \frac{2\pi k}{K} \right) \sin \left(wt' - \frac{2\pi(k-1)}{K} \right) + \right. \\
R_0 \tan \left(wt - \frac{2\pi k}{K} \right) \sin(wt' + \gamma_0) + \\
\left. + R \cos \left(wt' - \frac{2\pi(k-1)}{K} \right) + R_0 \cos(wt' + \gamma_0) - v_f \right] = 0
\end{aligned} \tag{2.7}$$

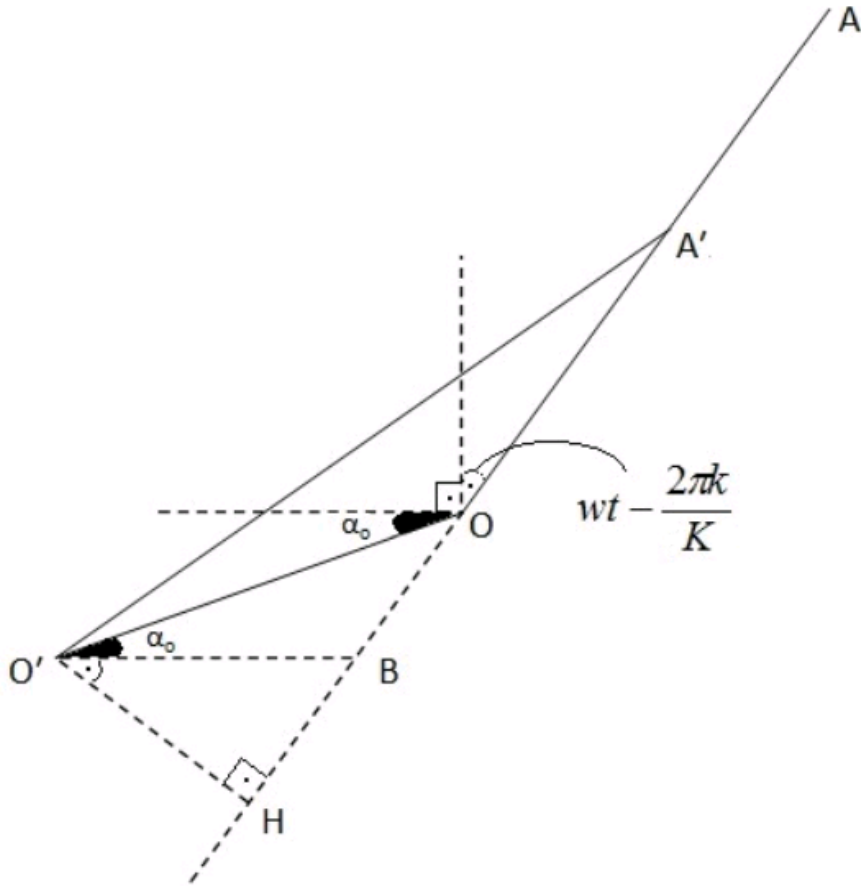
Obr. 2.9 slouží k bližšímu objasnění geometrických vztahů použitých při výpočtu jmenovité tloušťky třísky h .

Pomocí rovnosti $|A'O'| = |AO| = R$, $|OO'| = L$ se získá vzorec:

$$\alpha_0 + wt - \frac{2\pi k}{K} + m(O'OH) = \frac{\pi}{2} \tag{2.8}$$

A taktéž

$$m(OO'H) + \alpha_0 + m(BO'H) = \frac{\pi}{2} \tag{2.9}$$



Obr. 2.9: Graficky znázorněné vztahy při výpočtu jmenovité tloušťky třísky. Střed O k -tého zubu a O' $(k-1)$ -tého zubu [18].

Předchozí dvě rovnice se dají přepsat do tvaru:

$$m(BO'H) = wt - \frac{2\pi k}{K} \quad (2.10)$$

Dále $h = |AA'|$ a tudíž platí následující:

$$|AA'| = |AH| - |A'H| = |AO| + |OH| - |A'H| \quad (2.11)$$

$$h = R + L \sin \left(wt - \frac{2\pi k}{K} + \alpha_0 \right) - \sqrt{R^2 - L^2 \cos^2 \left(wt - \frac{2\pi k}{K} + \alpha_0 \right)} \quad (2.12)$$

V rovnici 2.12 platí, že vzdálenost L a úhel α_0 mohou být vypočítány jako:

$$L = \sqrt{(x_O - x_{O'})^2 + (y_O - y_{O'})^2} \quad (2.13)$$

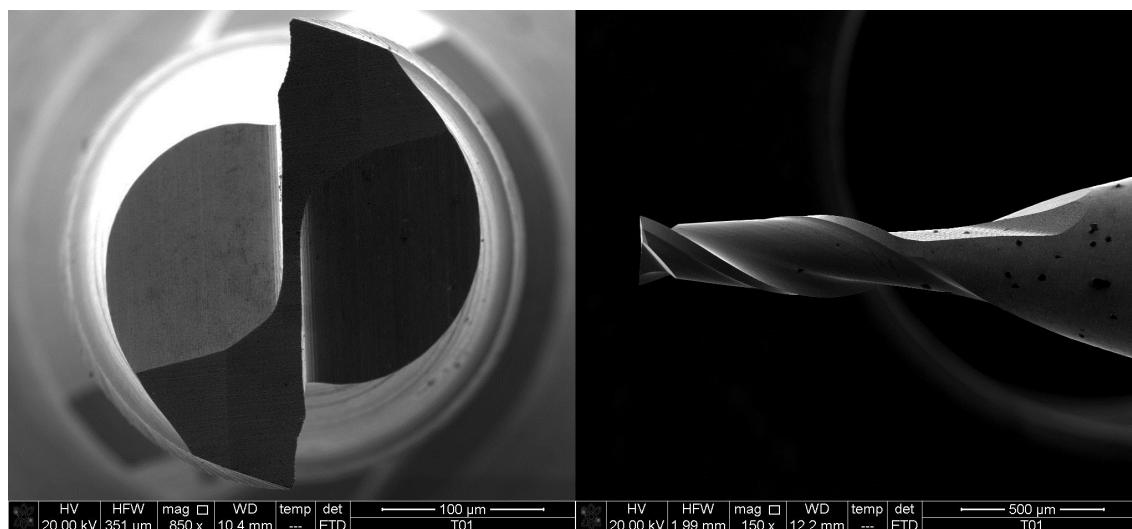
$$\alpha_0 = \arctan \left(\frac{y_O - y_{O'}}{x_O - x_{O'}} \right)$$

Souřadnice středů nástroje lze zapsat jako následující:

$$\begin{aligned}x_O &= v_f t + R_0 \sin(wt + \gamma_0) \\x'_O &= v_f t' + R_0 \sin(wt' + \gamma_0) \\y_O &= R_0 \cos(wt + \gamma_0) \\y'_O &= R_0 \cos(wt' + \gamma_0)\end{aligned}\tag{2.14}$$

2.4 Nástroje

Schopnost nástroje kvalitně frézovat závisí především na jeho materiálu a geometrii. Nej kvalitnější materiály mají vysokou tvrdost v kombinaci s adekvátní houževnatostí a chemickou stabilitou při vysokých teplotách. Žádný z materiálů bohužel nemá ve všech zmíněných ohledech vynikající vlastnosti. Vysokorychlostní ocel, karbidy, keramika, kubický nitrid bóru a diamant jsou nejpoužívanějšími materiály při výrobě řezného nástroje. Mezi těmito materiály vyniká diamant, který má perfektní che-

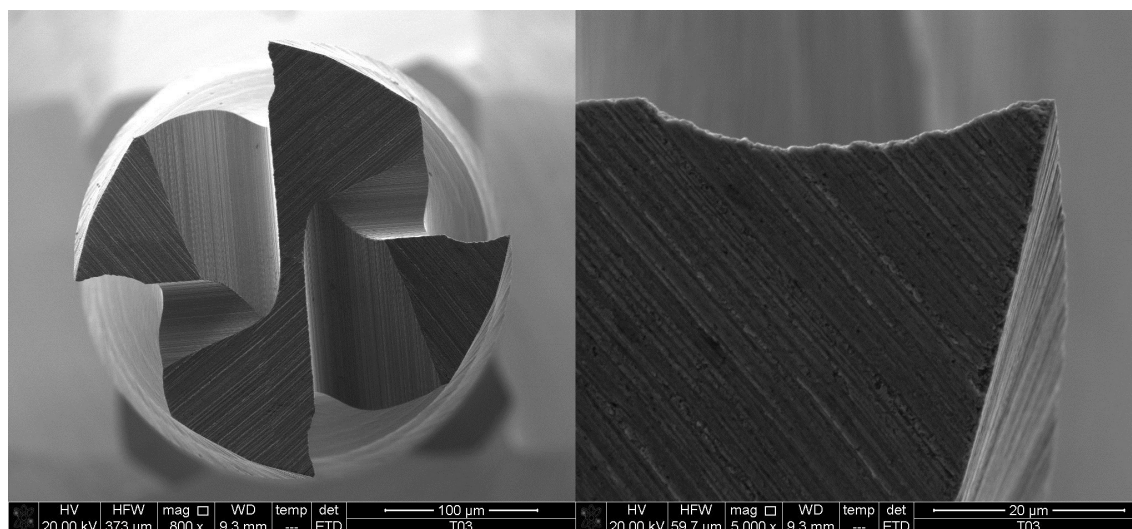


Obr. 2.10: Ukázka mikrofrézovacího nástroje.

mické, fyzikální a mechanické vlastnosti. Vysoká tvrdost umožňuje dosažení ostřejších řezných hran, mnohem nižší míry opotřebení a zajišťuje delší životnost nástroje, ale vysoká cena a křehkost omezují jeho použití. Pro komerční mikronástroje je nejběžnější a nejpoužívanější materiál karbid wolframu s velmi jemnozrnnou strukturou (obvykle s velikostí zrna menší než 0,5 µm) a to především kvůli jeho relativně nízké ceně, vysoké tvrdosti, pevnosti a adekvátní odolnosti proti opotřebení. Taktéž je vhodný pro obrábění široké škály technických materiálů. Celková kvalita obrábění pomocí nástrojů z karbidu wolframu závisí na jeho složení a velikosti zrn. Menší

obsah kobaltu povede k vyšší tvrdosti a křehkosti. Obecně platí, že čím jemnější velikost zrna, tím vyšší tvrdost a naopak [1][20][21].

Složení, díky kterému má nástroj požadovanou tvrdost nebo houževnatost, nemusí zdaleka poskytovat nejlepší odolnost proti opotřebení. Teoreticky lze nástroje z karbidu wolframu použít při obrábění takřka všech technických materiálů, ale při obrábění tvrdých materiálů při vysokých rychlostech trpí silným opotřebením a zkrácenou životností. Pro zlepšení těchto vlastností se nástroje povlakuji. Povlakování také díky nižšímu koeficientu tření mezi nástrojem a materiálem umožňuje tzv. suché obrábění. Povlaky by měly dobře přilnout a odolávat opotřebení. U povla-



Obr. 2.11: Ukázka mikrofrézovacího nástroje a detail na jeden z jeho zubů.

kovaných nástrojů se zvyšuje efektivita výrobního procesu díky lepší kvalitě povrchu, delší životnosti nástroje, snížení výrobních časů a snížení rizika poškození nástroje kvůli opotřebení nebo lomu. Pro mikrofrézování jsou nejběžnější povlaky na bázi titanu nebo TiAlN (titan aluminium nitrid) [1][22][23][24].

2.5 Stroje

Vysoce přesné stroje jsou rozhodující pro výrobu velmi kvalitních částí. Pro dosažení veškerých požadavků kladených na výrobek, jako například rozměrová přesnost a kvalita drsnosti povrchu mikrokomponeutů, je potřeba dobrá teplotní stabilita, minimální chyby pohybu nástroje a kvalitní tlumení otřesů a vibrací. Pro vysokou produktivitu a optimální řezné podmínky je také zapotřebí dosáhnout velmi vysoké řezné rychlosti, a proto se ve většině strojů určených pro mikrofrézování používají vřetena s minimálním radiálním házením a vysokou rychlostí [8].

V raných začátcích mikrofrézování se pro veškeré úkony používaly obyčejné konvenční stroje, které byly schopny dosáhnout vysokých rychlostí, ale na kterých výroba trvala dlouho, byla komerčně neefektivní a zdlouhavá. Díky lepšímu porozumění celého procesu a stále se zvyšujících kladených požadavků se začaly vyrábět stroje určené primárně pro mikrofrézování [1]. Některé z nich je vidět na tab. 2.1, která ukazuje základní specifikace jednotlivých strojů a jejich porovnání.

Tab. 2.1: Výčet některých strojů určených pro mikrofrézování (převzato a upraveno z [1]).

Stroj	KERN Micro	FANUC ROBO NANO	Sodick AZ250L	Kuglar Micromaster	Moore Nanotech 350UPM	Makino Hyper2J	UPM/Brunel UltraMill
Konfigurace	Tři lineární osy a dvě rotační osy	Tři lineární osy a dvě rotační osy	Tři lineární osy	Tři standartní osy nebo pět os	Tři standartní osy nebo čtyři osy	Tři lineární osy	Tři lineární osy a dvě rotační osy
Základní struktura	Polymerbeton	Litina s betonem	Polymerbeton	Žula	Žulový základ s vyztužením z uhlíkových vláken	Žula	Přírodní žula
Izolace vibrací	Není k dispozici	Vzduchový a olejový tlumič	Vyvažovací stoly	Pasivní vzdušné tlumiče	Samočinný vzdušný systém	Není k dispozici	Hydrodynamický tlumič
Ovládání	Heidenhain	Fanuc	Sodick	Multiprocessorové ovládání	Delta Tau	Fanuc	Delta tau
Vřeten vřeten	Vektorově řízené vřeten	Aerostatické ložisko, vzdušná turbína	Pneumatické ložisko, vzdušná turbína	Hydrostatické ložisko	Aerostatické ložisko chlazené kapalinou	Není k dispozici	Aerostatické ložisko
Rychlost	Až 160 000 1/min	Až 50 000 1/min	Až 120 000 1/min	Až 200 000 1/min	200 - 60 000 1/min	3 000 - 40 000 1/min	Až 20 000 1/min
Přesnost pohybu	< 0,1 m	< 0,2 m	Není k dispozici	< 0,5 m	< 0,05 m	< 0,3 m	< 1 m
Poháněcí systém	Střídavý servomotor	Lineární motor a vestavěné servomotory	Lineární motor	Lineární motor	Bezkartáčový stejnoseměrný motor	Není k dispozici	Bezkartáčový stejnoseměrný motor
Velikost poháněcího systému	Není k dispozici	1 mm	3 mm	Není k dispozici	0,034 mm	2 mm	5 mm
Pracovní prostor	250x220x200 mm	280x150x40 mm	250x150x100 mm	300x300x200 mm	350x350x150 mm	200x150x150 mm	150x150x80 mm

2.6 Využití

Mikrofrézování je v dnešní době jedna z nejefektivnějších a nejflexibilnějších technik výroby miniaturních součástek. Miniaturizování věcí kolem nás se neustále rozvíjí a je to potenciální klíčová technologie k novým vynálezům. Taktéž se předpokládá, že zájem o mikrofrézování v následujících rocích exponenciálně poroste. Mikrofrézování splňuje řadu požadavků na miniaturizaci a to především v oblasti letectví, automobilového průmyslu, biomedicínského průmyslu, elektroniky, informačních technologií, optiky, telekomunikačního průmyslu, šperků, hodinek a podobných [1].

Mnoho známých firem již v dnešní době využívá procesy mikrofrézování ve své výrobě. To jsou např. Bic, Gillette, Bosch, IBM, Biacore, Curasan, Microtronic, Oticon, Phonak AG, Microparts Steag, Acritec, Alcon, Bausch & Lomb, Carrera, Arlens, Medicontur, Morcher, Star Surgical, Braun, Festo, GKN Sinter Metals, Esser, Amic, Daimler Chrysler, EADS, Fraunhofer Institute, Philips Research, Pro-micron, Siemens VDO Automotive, Daimler Chrysler, EADS, 3M Unitek a mnoho dalších [1][25].

Nejnámější příklady využití mikrofrézování jsou shrnuty níže [1][25]:

- Biomedicína: Mikronástroje pro chirurgii, dentální implantáty, můstky, protézy kyčelního kloubu, šrouby a desky pro podporu zlomených kostí, mikročerpací mechanismy a další.
- Hodinářství: Základní desky pro hodinky, hodinková pouzdra, části hodinek, mechanické strojky, číselníky, mechanismy a další.
- Optika: Optické přístroje, mikročočkové systémy a podobné.
- Letectví: Formy pro ozubená kola, miniaturní zařízení pro rakety, mikrogyroskopické komponenty, mikroventily a servo zařízení a další.
- Elektronika: Mikroformy pro elektrické propojky, miniaturní elektronická zařízení, mikrosenzory, čipy pro identifikaci frekvencí rádií a podobné.

3 SROVNÁNÍ DVOU SYSTÉMŮ

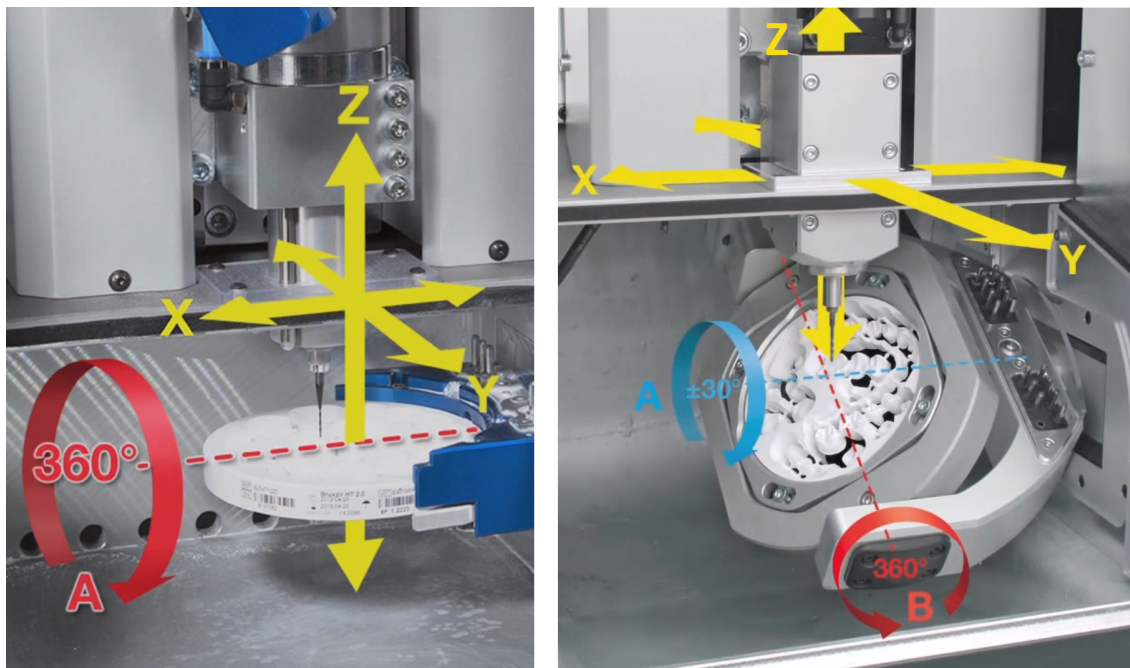
S pokračujícím vývojem technologií obrábění a mikroobrábění se zvyšují taktéž požadavky na vyráběné součásti. Při výrobě např. mikroprocesorů už nestačí technologie leptání, která je omezena na dvourozměrné tvary a je častěji využíván proces mikrofrézování, který je v daných případech o mnoho efektivnější metoda výroby 3D mikrosoučástí. Neustále probíhá výzkum a vývoj nových technologií a postupů, které by bylo možno použít pro efektivnější výrobu [26].



Obr. 3.1: Ukázka dentálních mikrofrézovacích strojů [27].

Pro valnou většinu vyrobených mikrosoučástí stačí 4-osé mikrofrézy namísto 5-osých. Oba typy mají 3 lineární osy, které vytvoří pracovní prostor ve tvaru krychle. Ty se definují jako horizontální směr X, vertikální směr Y a hloubka Z. Pohyb ve směru osy Y vždy vykonává nástroj, kdežto pohyb ve směru osy Z a X může vykonávat jak nástroj, tak pracovní deska. 4-osý systém vznikne přidáním osy A, která umožní rotaci pracovní plochy, což vede k možnosti obrobení mikrosoučástí i z boků či dokonce ze spodní strany. Přidáním páté osy, označované jako osa B, vzniká 5-osý systém. Grafické znázornění obou systémů lze vidět na obr. 3.2 [28].

Pátá osa umožňuje frézování v pozicích, které by při použití 4 os nebyly možné. Obrobek může být během procesu v téměř nekonečném počtu nakloněných poloh. Plynulé 5-osé frézování umožňuje vyrobit velmi sofistikované a komplexní tvary, které by byly na 4-osých systémech těžké k vyrobení nebo by nebylo možné je vyrobit vůbec. Výsledkem je tvarově náročná součást s malými bočními nerovnostmi a vysokou přesností navzájem různě orientovaných rovin výrobku. Další faktor je, že při 5-osém obrábění, které mj. umožňuje větší posuvy, je hlavně možnost kompletního ob-



Obr. 3.2: 4-osý a 5-osý mikrofrezovací systém [28].

robení na jedno založení (minimální počet upnutí) a tím dochází k snížení počtu operací, což znamená vyšší produktivitu. Použití 5-osých systému taktéž spěje k úspoře času z pohledu spotřebitele, kdy se už výrobek po vyfrezování nemusí většinou dále upravovat. I při úspoře času však víceosé obrábění nabízí delší kontakt nástroje s obrobkem a tím i vyšší přesnost a lepší kvalitu povrchu [26][29][30][31].

Obecně jsou 5-osé frézovací systémy přesnější než jejich předchůdci s menším počtem os, ale jsou také více náchylnější na správné seřízení systému nástroje a obrobku a při nesprávném nastavení jsou méně přesné než 4-osé systémy. Častou chybou je například nesladění poloměru nástroje s jeho délkou či nesprávné naprogramování řídicího systému [29][32].

- Některé 3D součásti se zakřivenými hranami se nedají pomocí 4-osého systému vyrobit. Při použití 5-osého systému může nástroj dosáhnout i jinak obtížně dosažitelných míst, tzn. je schopen vytvořit tzv. podsekřiviny [26].
- Chyba způsobená opětovným upnutím se eliminuje. Obrobek stačí upnout jednou a již není nutné ho upínat znovu, aby bylo dosaženo míst obtížných k obrobení. Tímto se vyloučí možnost chyb spojených s upnutím, což vede k delší životnosti použitých nástrojů [26].
- V případě obrábění válcovitých tvarů je možné otáčení osy A bez interpolace osy X a Y, tudíž bude výsledné mikroobrábění velmi přesné [33].

- Použití 5-osých strojů vede k úspoře času ze strany spotřebitele [32].
- 4-osé stroje jsou na úkor výše zmíněných pozitiv levnější.

I přes mnohé výhody 5-osých systémů je nutno před jejich koupí zvážit, zda se vyšší investice opravdu vyplatí. S použitím 5-osého stroje se také zvyšují náklady na vyškolení pracovníka, který bude stroj obsluhovat. Většinu mikrosoučástí, které jsou frézovány, lze na 4-osém stroji vyfrézovat také. Pokud jsou součástí výroby pouze nekomplikované mikrosoučásti, není nutnost přecházet na systém s více osami. Pokud se v laboratoři nebo závodě vyrábí i komplexní mikrosoučásti, při jejichž výrobě by mohl 5-osý stroj zvýšit produktivitu, je lépe prvně 5-osý systém před jeho koupí zapůjčit a provést objasňující výzkum [26][33][34].

4 MIKROFRÉZOVÁNÍ V DENTÁLNÍM PRŮMYSLU

4.1 Úvod do problematiky

Minimalizace marginálních mezer mezi náhradní korunkou a zbytkem zubu či náhradní korunkou a dásní je v oblasti zubních náhrad velice diskutované téma. Absolutní hodnota mezer v rozmezí 0,007 mm až 0,08 mm je z dentálního hlediska přijatelná. Zmenšení mezer spěje k menší iritaci gingivy a vymílání spoje, což vede k lepšímu klinickému výsledku a životnosti zubní náhrady. Vhodné marginální uložení s minimální mezerou taktéž snižuje akumulaci plaku a tím snižuje možnost výskytu zubního kazu a podobných onemocnění. V dentálních oblastech se již pro výrobu náhrad zubů používají grafické CAD/CAM systémy, které výrazně zrychlily celý proces, zmenšily riziko chyb, snížily náklady výroby a zvýšily produktivitu.



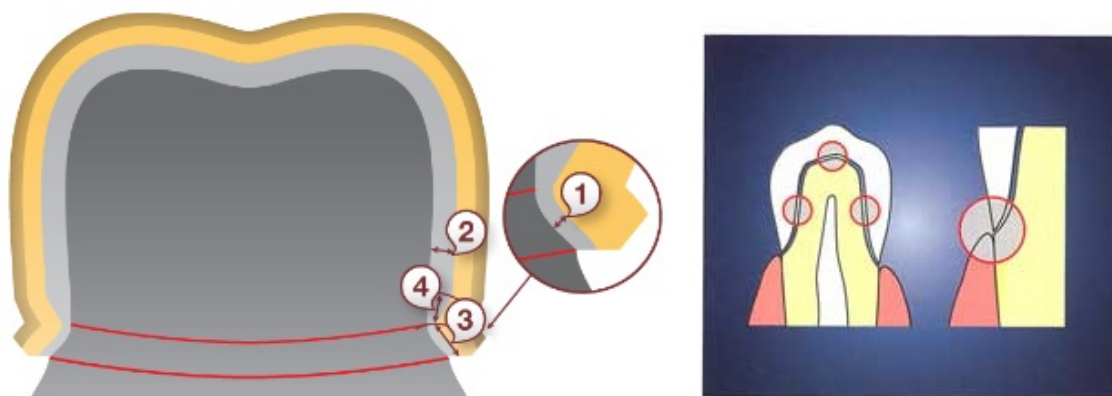
Obr. 4.1: Nejpoužívanější typy korunek. Zleva kovová korunka s příměsí zlata, metalokeramická korunka a celokeramická korunka [35].

V progresivnějších ordinacích se při tvorbě zubního modelu již namísto otiskovacích materiálů používají 3D zubní skenery, které jsou pro pacienta o mnoho příjemnější a taktéž eliminují chybu vzniklou deformací otiskovacího materiálu při vytahování lžice s otiskovací hmotou z úst pacienta a nepřesnosti při tvorbě sádrového modelu, způsobené při odlévání a tvorbě modelu z otisku. Nejrozšířenějším typem náhradních korunek jsou celokeramické náhrady, které jsou bez kovů, jsou biokompatibilní a hlavně jsou kvůli jejich zbarvení esteticky nejvhodnější. Další materiály, ze kterých se zubní náhrady vyrábí či se vyráběly, jsou např.:

- Kovy, které mají velmi dobrou životnost, jsou nenákladné na výrobu, ale jsou

esteticky naprosto nevyhovující [36].

- Pryskyřice, která se využívá primárně na provizorní náhrady z důvodu její nízké životnosti [36].
- Spojení kovu a keramiky či pryskyřice, označované jako fasetované korunky. Základní část je zhotovena z kovu a na vnější, viditelnou část je použitý jiný, esteticky více vyhovující materiál [36].
- Metalokeramika, která má vysokou životnost, velmi dobré estetické vlastnosti, nezabarvuje se, ale je z biologického hlediska z důvodu obsahu kovů problematickou v porovnání s celokeramickou zubní náhradou [36].
- Keramika, která je naprosto biologicky kompatibilní, má vysokou trvanlivost a pevnost, excelentní estetický výsledek, ale to se odráží ve vyšších nákladech a náročnější přípravě a výrobě zubní náhrady [36].

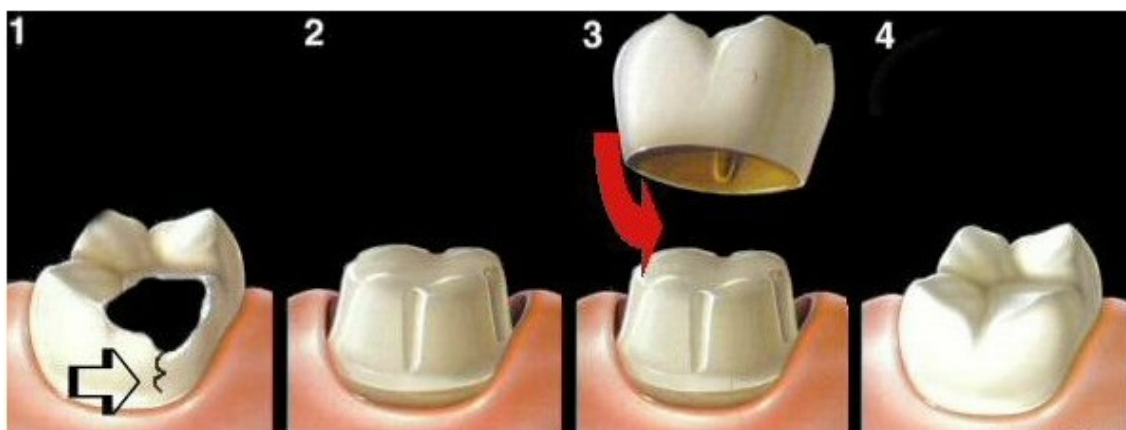


Obr. 4.2: Bližší objasnění marginální mezery a mezery mezi korunkou a zubní náhradou, 1 - marginální mezera, 2 - mezera mezi zubní korunkou a pahýlem [37].

5 EXPERIMENT

Cílem tohoto experimentu bude srovnání přesnosti marginální mezery mezi zubními náhradami, vyfrézovanými na 4-osém a 5-osém stroji pouze na jedno upnutí. Po vyfrézování a nasazení korunek se bude měřit přesnost jejich výroby a případné odchylky.

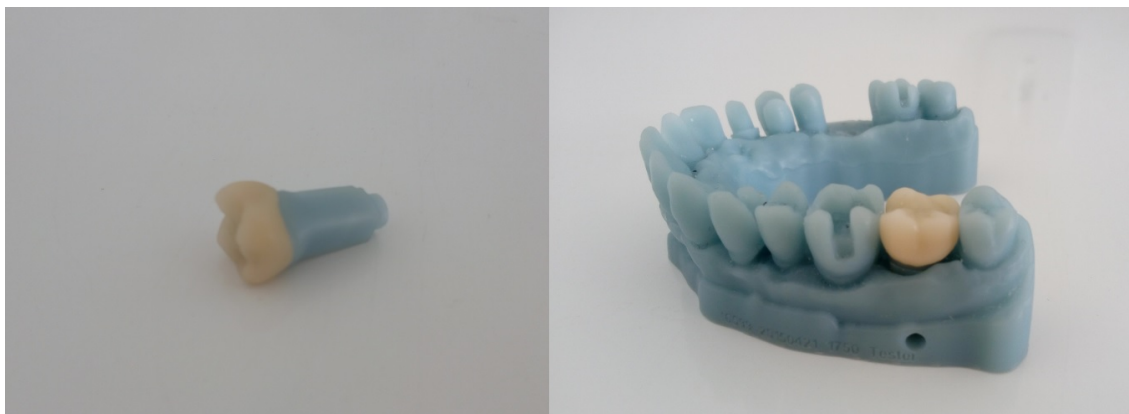
Experiment se bude provádět pod vedením firmy BELdental s.r.o (Česká republika, Ostrava) na dvou mikrofrézkách a to KaVo Arctica Engine (USA, Detroit), která disponuje 5 osami a dále 4-osým strojem Sirona CEREC MC (Německo, Bensheim). Vybere se stávající model chrupu pacienta či se udělá nový obraz pomocí 3D skeneru zubního chrupu a poté se vyberou 3 zuby, na které se vyrobí náhradní protézy. Při výrobě bude kladen důraz na co nejvyšší shodnost odstínu a tvaru původního zuby. Jako materiál se použije jednak lithium disilikátová keramika označovaná jako e.max a dále hybridní keramika Vita Enamic. Z obou materiálů se kromě náhradních korunek vyrábí taktéž kapny pro individuální korunky, konstrukce pro fazetované můstky, inleje a onleje a další dentální náhrady.



Obr. 5.1: Postup při léčbě zubu s kazem a nasazování nové náhradní korunky [38].

Tyto materiály jsou z důvodu nejestetičtějšího vzhledu, výborné biokompatibility a nízké pravděpodobnosti prasknutí nejrozšířenější při výrobě zubních náhrad. E.max se na rozdíl od Vita Enamic musí vypalovat při teplotě 750 °C. Při vypalování se materiál smrští, a proto se při zvolení tohoto materiálu v modelovacím programu vypočítá nový model, který bude po vypálení a smrštění odpovídat původnímu navrženému modelu. Při vypalování se počítá s koeficientem teplotní roztažnosti $9,5 \times 10^{-6} K^{-1}$.

Po skenu chrupu pacienta se vyrobí jeho model s vyndávacími pahýly pomocí 3D tisku, na které se budou nasazovat vyfrézované zubní náhrady. Tento model



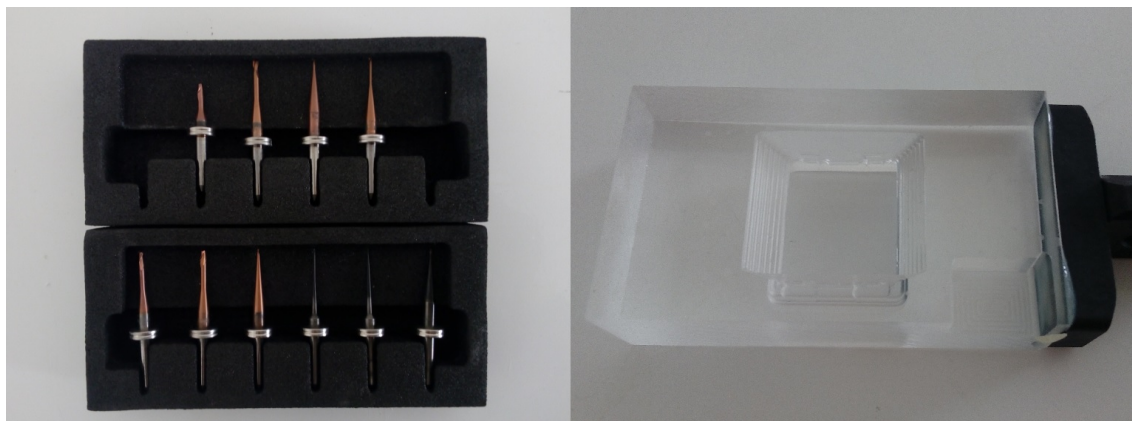
Obr. 5.2: Zubní korunka na pahýlu a ukázka celého modelu chrupu.



Obr. 5.3: Vyfrézované korunky zubů z materiálu E.max a Vita Enamic.

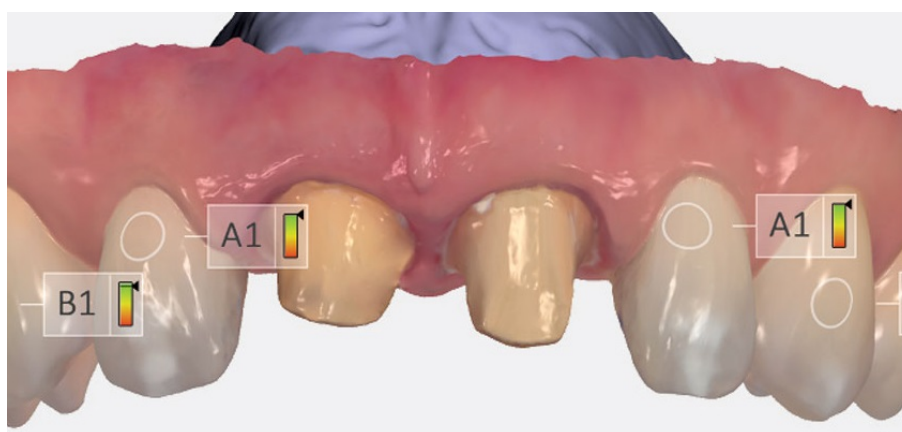
bude plně odpovídat momentálnímu skutečnému chrupu pacienta. Poté se v modelovacím programu 3shape navrhnou 3 zubní náhrady - inlay, onlay a zubní korunka a každá z těchto náhrad se vyfrézuje na obou strojích a to pouze na jedno upnutí. Vyrobí se tedy 6 zubních náhrad ve třech párech. Jednotlivé náhrady se nasadí na model a zkontroluje se jejich bod kontaktu se sousedními zuby. Dále se jednotlivé zubní náhrady nasadí na pahýly, kdy se prvně vyplní vrstvou silikonové otiskovací hmoty. Ta po ztvrdnutí a sejmutí zubních náhrad ukáže, kde vznikly marginální mezery a mezery mezi pahýlem a samotnou náhradou. Ze vzniklých vrstev otiskovacího silikonu se vyberou ty s největší velikostí, které se poté důkladněji přeměří na elektronovém mikroskopu a provede se jejich srovnání. Předpoklad je takový, že silikonové vrstvy na výrobku z 5-osého systému budou menší než ze 4-osého. To povede k menšímu využití lepícího cementu, což spěje k jeho méně častému vymílání a delší životnosti jednotlivých zubních náhrad. Taktéž použití 5-osého systému povede k úspoře času ze strany lékaře, kdy po kontrole dosednutí zubní náhrady může

ve většině případů náhradu ihned nalepit, kdežto u 4-osého systému je většinou nutné výrobek důkladněji opracovávat. Toto vede k zlepšení efektivity výroby a ke zkrácení čekací lhůty pacienta na jeho novou náhradu. Předpoklad počítá s tím, že zubní náhrady byly frézovány za stejných podmínek bez různých otřesů, vibrací, se správně skalibrovanými stroji a s dostatečně neopotřebovanými nástroji.



Obr. 5.4: Měděné nástroje určené pro kalibraci a kalibrační tělísko z frézy KaVo Arctica Engine.

Všechny změřené hodnoty budou vyneseny v grafech, které budou sloužit k přehlednému srovnání. Pokud bude předpoklad správný, bude vždy při výrobě výhodnější použít 5-osý systém, což povede ke zmenšení marginální mezery, menší iritaci gingivy, menšímu vymílání a tudíž větší životnosti za poměrně podobných nákladů na výrobu.



Obr. 5.5: Příklad naskenovaného chrupu i s preparovanými pahýly pomocí 3D skeneru v programu 3shape [37].

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala problematikou mikrofrézování. V jejím rámci byla provedena rešerše daného tématu a následně návrh teoretického experimentu. V rešeršní části byly shrnuty podstaty a základy z hlediska mikroobrábění a mikrofrézování. Byly vytyčeny základní rozdíly mezi mikroobráběním a konvenčním obráběním z hlediska tloušťky třísky, rozměrových přesností, geometrií břitu a oblasti použití. Taktéž byl ukázán přínos mikroobrábění v širokých spektrech průmyslu a jeho eventuální budoucí využití a rozvoj.

Dále bylo definováno mikrofrézování. V této kapitole bylo ukázáno, jak se mikrofrézování definuje, byly vytyčeny základní problémy spjaté s celým procesem jako např. *size effect* - velikostní efekt, byly matematicky vyjádřeny vztahy rezných sil pomocí geometrického modelu a dále bylo ukázáno jakého potenciálního rozvoje mikrofrézování dosáhne. Touto rešeršní částí byl splněn první cíl zadání bakalářské práce.

Poslední tři kapitoly se věnovaly srovnání 4-osého a 5-osého systému. Zde byl ukázán největší rozdíl mezi danými systémy a jejich použití v praxi, čímž byl splněn druhý cíl. Dále se práce věnovala použití mikrofrézování v dentálním průmyslu. Byl ukázán postup při léčbě chrupu pacienta a to od jeho první návštěvy lékaře až po finální zubní náhradu. V tomto odvětví byl také navržen teoretický experiment, který bude proveden v navazující diplomové práci za spolupráce s firmou BELdent s.r.o. Experiment se bude týkat přesnosti výroby na 4-osých a 5-osých dentálních systémech a úspoře času z pohledu pacienta a lékaře. Budou se v něm porovnávat velikosti vrstev otiskovacího silikonu z obou systémů. Experiment bude přínosem při výběru z 4-osých a 5-osých systému, kdy si bude moci kupec na základě informací vybrat, který stroj bude jeho práci lépe vyhovovat.

LITERATURA

- [1] Cheng, K.; Dehong, H.: *Micro-cutting: fundamentals and applications*, ročník 1. Chichester: Wiley, 2013, ISBN 978-0-470-97287-8.
- [2] Aramcharoen, A.; Mativenga, P. T.: Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, ročník 33, č. 4, 2009: s. 402–407.
- [3] Masuzawa, T.; Tönshoff, H.: Three-dimensional micromachining by machine tools. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, ročník 46, č. 2, 1997: s. 621–628.
- [4] Malekian, M.; Mostofa, M. G.; Park, S. S.; aj.: Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum. *Journal of Materials Processing Tech*, ročník 212, č. 3, 2011: s. 553–559.
- [5] Chae, J.; Park, S.; Freiheit, T.: Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, ročník 46, č. 3–4, 2006: s. 313 – 332, ISSN 0890-6955.
- [6] Komanduri, R.; Chandrasekaran, N.; Raff, L.: Effect of tool geometry in nanometric cutting: a molecular dynamics simulation approach. *Wear*, ročník 219, č. 1, 1998: s. 84 – 97, ISSN 0043-1648.
- [7] DeBra, D. B.; Hesselink, L.; Binford, T.: Ultra Precision Machining. Technická zpráva, DTIC Document, 1990.
- [8] Huo, D.; Cheng, K.; Wardle, F.: Design of a five-axis ultra-precision micro-milling machine—UltraMill. Part 1: holistic design approach, design considerations and specifications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, ročník 47, č. 9, 2010: s. 867–877.
- [9] Cardoso, P.; Davim, J. P.: Micro milling of metallic materials-A brief overview. *Transactions of FAMENA*, ročník 36, č. 2, 2012: s. 79–85.
- [10] Alting, L.; Kimura, F.; Hansen, H. N.; aj.: Micro engineering. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, ročník 52, č. 2, 2003: s. 635–657.
- [11] Saedon, J.; Norrdin, N. A.; Yahaya, M. A.; aj.: Investigation of Cutting Edge Radius Effect in Macro-machining and Micro-machining. In *Regional Conference on Science, Technology and Social Sciences (RCSTSS 2014)*, Springer, 2016, s. 17–26.

- [12] Ng, C. K.; Melkote, S. N.; Rahman, M.; aj.: Experimental study of micro- and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, ročník 46, č. 9, 2006: s. 929–936.
- [13] DeVor, R. E.; Kapoor, S. G.: On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, Part I: Surface generation. *J. Manuf. Sci. Eng.*, ročník 126, č. 4, 2004: s. 685–694.
- [14] Zhang, X.; Ehmann, K. F.; Yu, T.; aj.: Cutting forces in micro-end-milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, ročník 107, 2016: s. 21–40.
- [15] Malekian, M.; Park, S. S.; Jun, M. B.: Modeling of dynamic micro-milling cutting forces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, ročník 49, č. 7, 2009: s. 586–598.
- [16] Afazov, S.; Zdebski, D.; Ratchev, S.; aj.: Effects of micro-milling conditions on the cutting forces and process stability. *Journal of Materials Processing Technology*, ročník 213, č. 5, 2013: s. 671–684.
- [17] Bao, W.; Tansel, I.: Modeling micro-end-milling operations. Part II: tool run-out. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, ročník 40, č. 15, 2000: s. 2175–2192.
- [18] Kanlı, M.: *Modeling of cutting forces in micro milling including run-out*. Diplomová práce, Bilkent university, 8 2014.
- [19] Afazov, S.; Ratchev, S.; Segal, J.: Modelling and simulation of micro-milling cutting forces. *Journal of Materials Processing Technology*, ročník 210, č. 15, 2010: s. 2154–2162.
- [20] Fleischer, J.; Deuchert, M.; Ruhs, C.; aj.: Design and manufacturing of micro milling tools. *Microsystem Technologies*, ročník 14, č. 9-11, 2008: s. 1771–1775.
- [21] Aramcharoen, A.; Mativenga, P.: Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, ročník 33, č. 4, 2009: s. 402–407.
- [22] Aramcharoen, A.; Mativenga, P.; Yang, S.; aj.: Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, ročník 48, č. 14, 2008: s. 1578–1584.
- [23] Childs, T.: *Metal machining: theory and applications*. Butterworth-Heinemann, 2000.

- [24] Heaney, P. J.; Sumant, A. V.; Torres, C. D.; aj.: Diamond coatings for micro end mills: enabling the dry machining of aluminum at the micro-scale. *Diamond and Related Materials*, ročník 17, č. 3, 2008: s. 223–233.
- [25] Gandarias, D. E.: *MICROMILLING APPLICATIONS* [online]. 2009, [cit. 01.05.2017].
Dostupné z:<http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarollo/micromilling/1-6-micromilling-applications/>
- [26] Bang, Y.; Lee, K.-m.; Oh, S.: 5-axis micro milling machine for machining micro parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, ročník 25, č. 9-10, 2005: s. 888–894.
- [27] Barranca, I.: *DWX-4W Wet Dental Mill* [online]. ©2017, [cit. 06.05.2017].
Dostupné z:<https://www.rolanddga.com/products/dental/dwx-4w-wet/dental-milling-machine>
- [28] Lab Perspectives - Milling Machines: 4-Axis vs. 5-Axis (Vol. 1, Issue 1) [online]. 2014, [vid. 02.05.2017].
Dostupné z:<https://www.youtube.com/watch?v=1a0d010Y26w>
- [29] Cohen, B.: *Understanding 4 & 5 Axis Mills — Custom Automated Prosthetics* [online]. 2014, [cit. 07.05.2017].
Dostupné z:<http://cap-us.com/2014/07/28/understanding-4-5-axis-mills/>
- [30] Camara, M.; Rubio, J. C.; Abrão, A.; aj.: State of the art on micromilling of materials, a review. *Journal of Materials Science & Technology*, ročník 28, č. 8, 2012: s. 673–685.
- [31] Cheng, K.; Huo, D.: Design of a 5-Axis Ultraprecision Micro Milling Machine—UltraMill. *Part*, ročník 1: s. 9–12.
- [32] Axinte, D.; Shukor, S. A.; Bozdana, A.: An analysis of the functional capability of an in-house developed miniature 4-axis machine tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, ročník 50, č. 2, 2010: s. 191–203.
- [33] Hansen, H. N.; Carneiro, K.; Haitjema, H.; aj.: Dimensional micro and nano metrology. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, ročník 55, č. 2, 2006: s. 721–743.
- [34] Rüegg, A.; Gygax, P.: A generalized kinematics model for three-to five-axis milling machines and their implementation in a CNC. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, ročník 41, č. 1, 1992: s. 547–550.

- [35] Buckner, S.: *Materials For Dental Crowns* [online]. 2015, [cit. 05.05.2017].
Dostupné z:[http://myallcarefamilydental.com/images/
materials-for-dental-crowns.png](http://myallcarefamilydental.com/images/materials-for-dental-crowns.png)
- [36] Typy korunek [online]. www.zuby.cz, ©2016, [cit. 05.05.2017].
Dostupné z:<http://www.zuby.cz/korunky/iii-typy-korunek.html>
- [37] 3shape: *User guide for 3shape* [online]. 2015, [cit. 07.05.2017].
Dostupné z:[http://www.3shape.com/~media/files/support-materials/
whats-new-en.ashx?la=en](http://www.3shape.com/~media/files/support-materials/whats-new-en.ashx?la=en)
- [38] Crown and Bridges [online]. Dental one, ©2016, [cit. 2017-01-05].
Dostupné z:[http://www.dental1.com.au/services/cosmetic-dentistry/
crowns/](http://www.dental1.com.au/services/cosmetic-dentistry/crowns/)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam
3D	3-dimenzionální/ trojrozměrný
A,B,X,Y,Z	Označení os
AG	Aktiengesellschaft
CAD	Computer-aided design
CAM	Computer-aided manufacturing
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
GKN	Guest, Keen and Nettlefolds
IBM	International Business Machines Corporation
$m(ABC)$	Úhel mezi body ABC
MEMS	Mikroelektrotechnické systémy
PC	Personal computer
TiAlN	Titan aluminium nitrid
$x_k, y_k, x_{k-1}, y_{k-1}$	Souřadnice vektoru
x_O, y_O	Souřadnice středu nástroje

Symbol	Jednotka	Popis
h	[mm]	Jmenovitá tloušťka třísky
k	[-]	Identifikační číslo zubu
K	[-]	Počet zubů
n	[1/s]	Otáčky
R	[mm]	Poloměr nástroje
r_e	[mm]	Poloměr ostří
R_0	[mm]	Velikost vychýlení nástroje
R_a	[μm]	Drsnost povrchu
t	[1/s]	Čas
v_f	[mm/s]	Posuvová rychlost
w	[rad/s]	Úhlová rychlost vřetene
α	[°]	Úhel sklonu ostří nástroje
γ_0	[°]	Úhel vychýlení nástroje
π	[-]	Ludolfovo číslo