

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv řezných podmínek na kvalitu obrobku a zatížení vřetena při broušení
na 5-ti osé brusce

Autor: **Bc. Jindřich FARSKÝ**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jindřich FARSKÝ**

Osobní číslo: **S15N0089P**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**

Název tématu: **Vliv řezných podmínek na kvalitu obrobku a zatížení vřetena při broušení na 5-ti osé brusce**

Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

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

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh vlastního experimentu ve variantním řešení
4. Praktické provedení a ověření včetně vyhodnocení výsledků
5. Závěr

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah kvalifikační práce: 50 - 70 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

- JANDEČKA, K., ČESÁNEK, J., KOŽMÍN, P.: Programování NC strojů. Plzeň : ZČU, 2000, ISBN 80-7082-692-4
- JANDEČKA, K.: Úvod k broušení tvarově složitých nástrojů I. Brno : UJEP, Fakulta výrobních technologií a managementu, 2009, ISBN 978-80-7414-231-4
- DAVIM, J. PAULO: Modern machining technology : a practical guide : Oxford, Woodhead Publishing, 2011, ISBN 978-0-85709-099-7
- ŠTUPLA, M.: CNC : programování obráběcích strojů. Praha : Grada Publishing, 2015, ISBN 978-80-247-5269-3
- ŠTANĚK, J., NĚMEJC, J.: Metodika zpracování a úprava diplomových prací. Plzeň : ZČU, 2005, ISBN 80-7043-363-9

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Konzultant diplomové práce: **Ing. Tomáš Bakša**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **2. června 2017**


Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. října 2016

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektu SGS-2016-005: Výzkum a vývoj pro inovace v oboru strojírenská technologie - technologie obrábění II.

Především bych chtěl poděkovat vedoucímu této diplomové práce, panu Ing. Miroslavovu Zetkovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Tomášovi Bakšovi a Ing. Zdeňkovi Hájíčkovvi za odborné rady poskytnuté při konzultacích. Velké díky patří také obsluze stroje Pavlovi Adámkovi.

V neposlední řadě bych chtěl velmi poděkovat své rodině a blízkým za velkou podporu v průběhu celého studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Farský	Jméno Jindřich	
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 „Strojírenská technologie-technologie obrábění“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vliv řezných podmínek na kvalitu obrobku a zatížení vřetena při broušení na 5-ti osé brusce		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	90	TEXTOVÁ ČÁST	68	GRAFICKÁ ČÁST	22
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato diplomová práce se zabývá vlivem řezných podmínek na kvalitu povrchu a zatížení vřetena při broušení obecných tvarových ploch na 5-ti osé brusce. Zároveň je touto prací ověřena funkčnost nového postprocesoru a možnosti tvorby NC dat v softwaru NX. Cílem této práce je navrhnout vlastní experiment a vytvořit funkční NC data pro realizaci navrženého experimentu.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>broušení, víceosé broušení, řezné podmínky, kvalita povrchu, zatížení vřetene, NC data, NX 9.0, postprocesor,</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Farský	Name Jindřich	
FIELD OF STUDY	2303T004 „Manufacturing Processes - Technology of Metal Cutting“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Influence of the Grinding Cutting Conditions on the Surface Quality and the Spindle Load when the 5 Axis Grinder is Used		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	90	TEXT PART	68	GRAPHICAL PART	22
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This diploma thesis deals with Influence of the Grinding Cutting Conditions on the Surface Quality and the Spindle Load when the 5 Axis Grinder is Used. Also this work deals with checking functionality the new postprocessor and possibility to create a NC data in the software NX. The aim of this work is proposal a own experiment and create functional NC data for realization of the proposed experiment.</p>
KEY WORDS	Grinding, Multi-axis grinding, cutting conditions, surface quality, Spindle load, NC data, NX 9.0, postprocessor

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
1 Úvod.....	11
2 Rozbor současného stavu	12
2.1 Broušení.....	12
2.1.1 Charakteristika broušení.....	12
2.1.2 Základní metody broušení	13
2.1.3 Brusné kotouče	14
2.1.4 Řezné podmínky při broušení a jejich vliv na kvalitu povrchu.....	17
2.1.5 Stroje pro broušení	19
2.2 Programování CAD/CAM systémů.....	20
2.2.1 Základní informace	20
2.2.2 NX 9.0 s postprocesorem ANCA	21
2.2.3 iGrind	23
2.2.4 Postprocessing NC dat	24
2.3 Vyhodnocování kvality povrchu a zatížení vřetena	25
2.3.1 Drsnost povrchu (struktura povrchu)	25
2.3.2 Geometrická přesnost vyrobeného povrchu	28
2.3.3 Zatížení vřetene	29
3 Návrh vlastního experimentu ve variantním řešení	30
3.1 Návrh experimentu a vybrání vstupních faktorů pro experiment.....	30
3.2 Hodnoty parametrů a výstupy z navrženého experimentu	32
3.2.1 Vstupní parametry experimentu	32
3.2.2 Výstupní parametry experimentu	32
3.3 Část kolenního implantátu jako součást pro experiment.....	35
3.4 Použité vybavení pro experiment	35
3.4.1 Nástrojařská bruska ANCA MX7	36
3.4.2 Brusný kotouč	36
3.4.3 ZOLLER genius 3s.....	37
3.4.4 CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator	37
3.4.5 HommelÉtamic T8000	38
3.4.6 3D tiskárna EOS M290	38

3.5	Příprava CAD/CAM dat pro experiment.....	39
3.5.1	Součást Knee_implant.....	39
3.5.2	Návrh a konstrukce upínacího přípravku pro součást Knee_implant	39
3.5.3	Tvorba CAM programu pro součást Knee_implant.....	41
	Tvorba CAM programu	44
4	Praktické provedení a ověření včetně vyhodnocení výsledků	49
4.1	Experimentální broušení součásti Knee_implant	49
4.2	Vyhodnocení drsnosti povrchu	51
4.2.1	Drsnost povrchu pro experimenty s hodnotou $sc_{0,005}$	51
4.2.2	Drsnost povrchu pro experimenty s hodnotou $sc_{0,001}$	52
4.2.3	Porovnání drsnosti povrchu v závislosti na vyklopení brusného kotouče	54
4.3	Vyhodnocení geometrické přesnosti	55
4.4	Geometrická přesnost posunutí drah	56
4.5	Zatížení vřetena stroje	57
4.6	Opotřebením brusného kotouče	59
4.7	Zhodnocení všech dosažených výsledků	61
5	Závěr	63
	Seznam použité literatury	65
	Seznam obrázků:	66
	Seznam tabulek:	67
	Seznam grafů:.....	68
	Seznam příloh.....	68
	Příloha č. 1.....	69
	Příloha č. 2.....	71
	Příloha č. 3.....	73
	Příloha č. 4.....	76
	Příloha č. 5.....	78
	Příloha č. 6.....	81
	Příloha č. 7.....	83
	Příloha č. 8.....	85
	Příloha č. 9.....	87

Seznam použitých zkratek a symbolů

Značka veličiny, symbol	Jednotka	Popis
a_e	[mm]	Radiální posuv
a_p	[mm]	Axiální posuv
A_w	[mm ²]	Průřez odebírané vrstvy
A_g	[mm ²]	Geometrická styková plocha brousícího kotouče
Al_2O_3	[-]	Oxid hlinitý
B_4C	[-]	Karbid boru
CAD	[-]	Počítačová podpora konstruování
CAM	[-]	Počítačová podpora výroby
CL data	[-]	Poloha řezného nástroje
CNC	[-]	Počítačem řízený obráběcí stroj
ČSN	[-]	Česká státní norma
d_s	[mm]	Průměr brusného kotouče
f_r	[mm]	Radiální posuv
IT	[-]	Stupeň přesnosti
l_g	[mm]	Geometrická délka styku
MKP	[-]	Metoda konečných prvků
MPa	[-]	Jednotka tlaku
mm	[-]	Jednotka délky
μm	[-]	Jednotka délky
NC	[-]	Číslíkové řízení
n_s	[min ⁻¹]	Otáčky brusného kotouče
PLM	[-]	Řízení životního cyklu výrobku
R_a	[μm]	Střední aritmetická hodnota drsnosti
R_q	[μm]	Průměrná kvadratická úchylka profilu

Rz	[μm]	Největší výška profilu
SiC	[-]	Karbid křemíku
v_c	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Řezná rychlost
v_f	[$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	Posuvová rychlost
v_{ft}	[$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	Tangenciální rychlost posuvu
v_{max}	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Maximální řezná rychlost
$^{\circ}\text{C}$	[-]	Celsiova teplota
\emptyset	[-]	Značka průměru

1 Úvod

Kvalita povrchu a dosahování přesných rozměrů je v dnešní době velmi často zmiňované téma, které je také velmi žádané. V mnoha strojních odvětvích je potřeba dosahovat velmi přesných rozměrů a vysoké kvality povrchu u součástí s tvarovými plochami. Aby bylo možno dosáhnout těchto požadavků, je potřeba využívat možností broušení obecných tvarových ploch na víceosých bruskách, jelikož složitost součástí a požadavky kladené na kvalitu povrchu neumožňují použití klasických brusek nebo jiných technologií výroby než právě broušení. Jednou z těchto víceosých brusek je také nástrojařská bruska ANCA MX7, která je však určena hlavně pro broušení rotačních řezných nástrojů, ale za použití CAM softwaru NX s postprocesorem od výrobce stroje je možné brousit i na této 5-ti osé brusce libovolné obecné tvarové plochy. To samozřejmě nese s sebou spoustu úskalí při samotném broušení i při tvorbě programu, návržení upínání tvarových součástí a hlavně při volbě řezných podmínek.

Právě z těchto důvodů je cílem této práce ověřit vliv řezných podmínek na kvalitu povrchu a zatížení včetně při broušení obecných tvarových ploch na 5-ti osé brusce, kdy kvalitou povrchu je zde myšlena hodnota drsnosti a geometrické přesnosti. Protože se jedná o prvotní použití postprocesoru a softwaru NX k tvorbě NC dat pro provedení experimentu v rámci Západočeské univerzity a Regionálního technologického institutu, je zároveň dalším cílem ověření funkčnosti nového postprocesoru od společnosti ANCA.

V této diplomové práci je nejdříve proveden rozbor současného stavu v oblasti broušení, který je zaměřen na základní popis broušení a jeho specifikace. Dále pak na zjištění faktorů ovlivňujících kvalitu povrchu při broušení a zatížení včetně. V následující části je popsán návrh experimentu ve variantním řešení a výběr vstupních parametrů pro experiment. Zároveň jsou popsány veškeré kroky k realizaci experimentu, kdy se jedná o popis výběru použitého vybavení, návržení a konstrukci upínacího přípravku pro vybranou součást, tvorbu NC dat pro provedení experimentu a popis vstupních a výstupních hodnot z experimentu. V poslední hlavní části je popsána samotná realizace experimentu a provedeno vyhodnocení výstupních faktorů v závislosti na navrženém experimentu. Na závěr této práce je provedeno shrnutí všech dosažených cílů této diplomové práce.

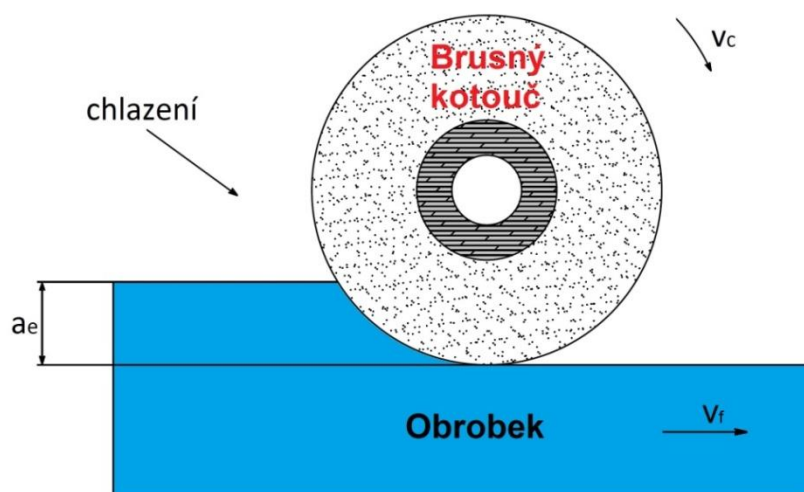
2 Rozbor současného stavu

2.1 Broušení

Proces broušení je pravděpodobně nejstarší metodou obrábění, jelikož technologie broušení vzniká s objevem brusných materiálů a pokračuje s vývojem brusných nástrojů a strojů, které člověk používal k výrobě předmětů, jež mu ulehčovaly život. První zmínky o broušení jsou z doby pravěké, kdy pravěký muž zjistil, že může nabrousit kamenný nástroj (tzv. „pazourkový nůž“) o hrubou skálu, popřípadě pískovec. V pozdější době, před objevem keramiky, se broušení používalo k výrobě kamenného nádobí. To může být považováno za prvotní použití broušení jako obráběcí operace pro získání požadovaného tvaru. V dnešní době broušení zaujímá kolem 20 % až 25 % ze všech obráběcích operací v průmyslově vyspělých zemích. [1]

2.1.1 Charakteristika broušení

Broušení je souhrnný název pro obráběcí procesy, které využívají tvrdé abrazivní částice jako řezné médium na obrábění rovinných, válcových nebo tvarových vnějších a vnitřních ploch. Proces broušení se řadí mezi dokončovací metody obrábění, které se vyznačují dosahováním vysokých přesností (IT 4–10), velmi dobrou drsností povrchu (R_a 0,2–2,4 μm) a také požadovaného geometrického tvaru. S vývojem výkonných brousících nástrojů a strojů se broušení již posouvá z dokončovacích metod obrábění do oblasti hrubování. Mezi další oblasti, ve kterých je možno využít proces broušení, se zařazuje také opracování materiálů, které mají vysokou pevnost a tvrdost povrchu a jejich obrábění řeznými nástroji s definovanou geometrií je velmi neefektivní nebo i nemožné. Odebíraný materiál vzniká ve formě drobných částic (třísek) za pomoci mnohobřitého řezného nástroje s nedefinovanou nebo definovanou řeznou geometrií brusných zrn spojených pojivem. [2; 3; 4]



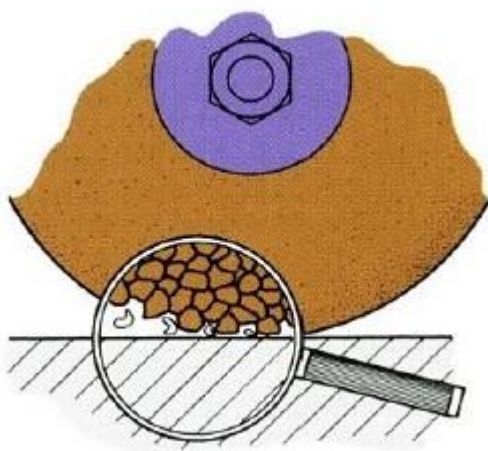
Obr. 1 Základní schéma broušení

kde

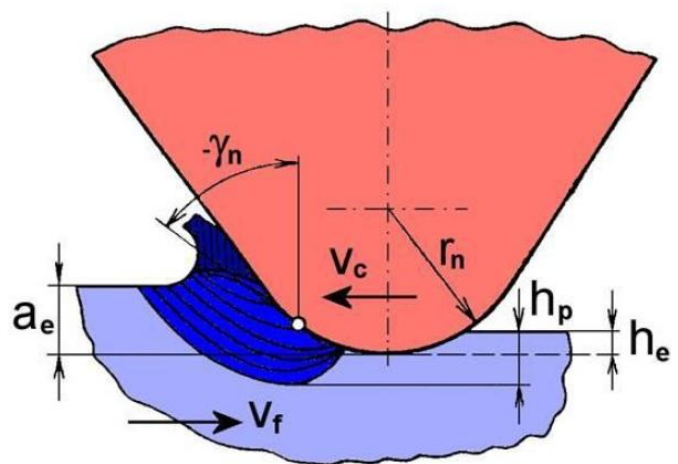
a_e	...	hloubka odebrané vrstvy
v_c	...	řezná rychlost
v_f	...	rychlost posuvu

Při broušení dochází k nepravidelnému úběru třísky jednotlivými zrna brusného kotouče v důsledku rozdílných geometrických forem zrn a jejich nepravidelnému rozložení v brousícím kotouči (Obr. 2). Rozměry třísek při broušení dosahují v průřezu okolo 10^{-3} mm^2 a to má za následek vznik velkých měrných řezných sil (odporů), které jsou v řádech několika desítek tisíc MPa. U broušení se dosahuje vysokých řezných rychlostí ($30\text{--}100 \text{ ms}^{-1}$) a z toho vyplývá krátká doba záběru brusného zrna v místě řezu. V důsledku rozdílných záporných úhlů čel u brusných zrn je ovlivněna oblast primární plastické deformace a podmínky tření (Obr. 3). Z důvodů velkých plastických deformací a vzniku vysokého tření se v místě řezu může dosáhnout teploty až $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ a to způsobí roztavení třísky, popřípadě její shoření (tzv. jiskření). Dosahování vysokých teplot má za následek oduhličování povrchu obrobku a může docházet ke změně struktury povrchové vrstvy. Proto je potřeba intenzivně chladit brusný kotouč a také broušený povrch technologickou kapalinou. Tyto vysoké teploty mají také za následek vznik nepříznivých tahových zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobene plochy, která mohou vést až ke vzniku trhlin na povrchu. Toto vše může vést k zhoršení kvality broušené plochy a celkové přesnosti broušení.

Při broušení dochází k samovolnému uvolňování jednotlivých brusných zrn nebo jejich částí (tzv. samoostření brusného kotouče), které je způsobeno tím, že zrna brusného kotouče jsou schopna přenášet pouze malé řezné síly, kvůli jejich slabému upevnění v pojivu. Avšak tzv. samoostření není dostačující, jelikož dochází k otupování ostří jednotlivých brusných zrn a také k zanášení pórů obráběným materiálem (třískami), to vede ke ztrátě řezivosti brusného kotouče. K obnovení řezivosti a i tvaru kotoučů se využívají různé typy orovnávačů. [2; 3]



Obr. 2 Nepravidelný úběr třísky [2]



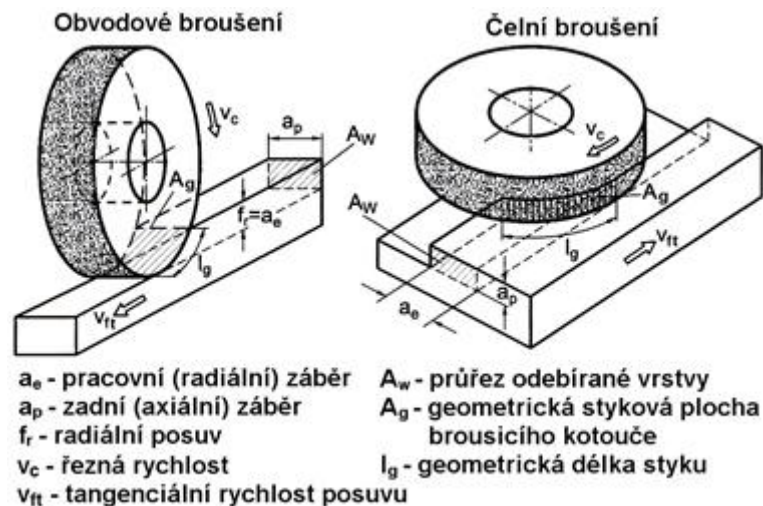
Obr. 3 Geometrie brusného zrna a deformace povrchu [2]

2.1.2 Základní metody broušení

Při procesu broušení se dají brousit různé povrchy v různých polohách, z toho vyplývá více druhů metod broušení, které jsou definovány danými kritérii. Tyto metody se rozdělují do 3 skupin, jež slouží pro základní rozdělení brousících metod:

- Podle tvaru a způsobu vytvoření obrobeneho povrchu
 - Rovinné broušení – výsledkem je rovinná plocha

- Broušení dokulata – slouží pro broušení rotačních ploch
- Broušení na otáčivém stole – broušení s rotačním posuvem
- Tvarové broušení – výroba ozubených kol, závitů, atd...
- Kopírovací broušení – na NC a CNC strojích
- Broušení tvarovými kotouči – pro výrobu tvarových ploch
- Podle řezné části brousícího kotouče (Obr. 4)
 - Obvodové broušení – broušení obvodem kotouče
 - Čelní broušení – broušení čelem kotouče



Obr. 4 Obvodové a čelní broušení [2]

- Podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k brusnému kotouči
 - Axiální broušení – osa kotouče je rovnoběžná s posuvem stolu
 - Radiální broušení – brousící kotouč je radiální k hlavnímu posuvu stolu
 - Tangenciální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče
 - Obvodové zapichovací broušení – posuv stolu je plynulý radiální
 - Čelní zapichovací broušení – posuv stolu je plynulý axiální

Pro účely této práce jsou vybrány metody kopírovacího a tvarového broušení, jelikož jsou nejčastěji využívány pro broušení tvarově složitějších součástí. Součástí mohou být jednoduššího i složitějšího provedení, jako jsou různé typy řezných nástrojů (tvarové nože, frézy, vrtáky, ...). Nebo může jít o součásti, které mají tvarovou plochu, u níž je potřeba dosáhnout vysokých přesností. Takové tvary se dají brousit v podstatě dvěma způsoby, a to tvarovými brusnými kotouči, kdy tvar brusného kotouče je negativem broušené plochy, která se vytváří pomocí diamantových orovnávačů. Druhým způsobem je použití brusných kotoučů s obvyklým tvarem, přičemž pohyb nástroje je řízen pomocí šablony nebo NC kódu. [2; 3]

2.1.3 Brusné kotouče

Na kvalitu broušené plochy má značný vliv složení brusného kotouče, proto je potřeba před broušením zvolit vhodný brusný kotouč. Volba brusného kotouče však nezáleží pouze na požadované kvalitě obrobené plochy, ale také na materiálu obrobku, metodě broušení a řezných podmínkách, jelikož správná volba brusného kotouče je základem pro efektivní broušení, dosažení vysoké přesnosti a jakosti broušené plochy.

Složení brusného kotouče

Brusné kotouče se skládají ze zrn tvrdých materiálů neboli brusiva (Al_2O_3 , SiC, diamant, kubický nitrid bóru), které jsou pevně vázány pojivem, čímž tvoří pevné těleso různých tvarů a velikostí. Mezi brusivem a pojivem vznikají póry, které plní funkci zubových mezer pro shromažďování a odvod třísky z místa řezu. Brusné kotouče se posuzují podle druhu brusného materiálu, zrnitosti brusiva, tvrdosti kotouče, struktury a druhu pojiva.

Brusné materiály se rozdělují do dvou skupin, na přírodní a syntetická brusiva. Mezi přírodní brusiva se zařazuje vápenec, kazivec, křemen, korundy a diamant, mezi syntetická se zařazuje umělý korund (Al_2O_3), karbid křemíků (SiC), karbid bóru (B_4C), kubický nitrid bóru a syntetický diamant. Druh brusného materiálu se volí na základě vlastností obráběného materiálu a samotného druhu materiálu (např. pro broušení ocelí je vhodný druh brusiva umělý korund).

Zrnitost brusiva se volí podle tvrdosti materiálu obrobku, velikost úběru materiálu a dosahované drsnosti broušené plochy. Proto je zrnitost brusiva jedním z parametrů, kterými lze ovlivňovat kvalitu broušené plochy. Označení zrnitosti je vztaženo na normu FEPA „F“ 42–D–1986 (ČSN 22 4012), kde je definována zrnitost jako číslo udávající počet ok síta na jeden palec, kterým ještě brusivo propadne při prosívání.

Jak již bylo zmíněno, volba velikosti brusiva má velký vliv na dosahovanou drsnost povrchu po broušení. Proto je zde na ukázkou uvedena tabulka (*Tabulka 1*) závislosti velikosti brusného zrna na dosahované drsnosti povrchu. Hodnoty drsnosti povrchu jsou určeny pro zrna z oxidu hlinitého Al_2O_3 .

Surface roughness ¹ , R_a , (μm)	Abrasive grain size ² (U.S. mesh size)
0.7 – 1.1	46
0.35 – 0.7	60
0.2 – 0.4	80
0.17 – 0.25	100
0.14 – 0.2	120
0.12 – 0.17	150
0.1 – 0.14	200
0.08 – 0.12	220

Tabulka 1 Vztah mezi velikostí brusného zrna a drsnosti povrchu [5]

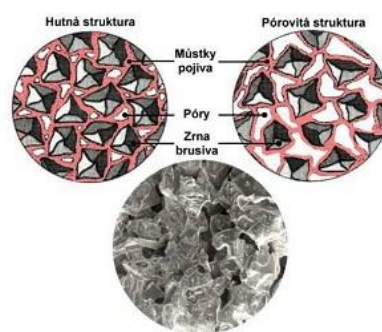
Tvrdot brusného kotouče vyjadřuje míru houževnatosti a pružnosti pojivových můstků mezi jednotlivými zrny brusiva neboli soudržnost brusného kotouče. Jak již bylo uvedeno na začátku, souvisí tento pojem s tzv. samoostřením brusného kotouče, kdy se brusná zrna u měkkých kotoučů snadněji uvolňují než u kotoučů tvrdých. Pro přehlednější ukázkou na co vše má vliv tvrdost brusného kotouče, je zde uvedena tabulka podmínek pro volbu tvrdosti kotouče (*Tabulka 2*).

¹ Surface roughness v překladu znamená drsnost povrchu

² Abrasive grain size v překladu znamená velikost brusného zrna

Měkký kotouč	Podmínky	Tvrký kotouč
Tvrký, křehký	Obráběný materiál	Měkký, houževnatý
Velká	Kontaktní plocha	Malá
Vysoká	Řezná rychlost	Nízká
Nízká	Posuvová rychlost	Vysoká
Dobrá	Přesnost brusky	Špatná

Tabulka 2 Volba tvrdosti kotouče



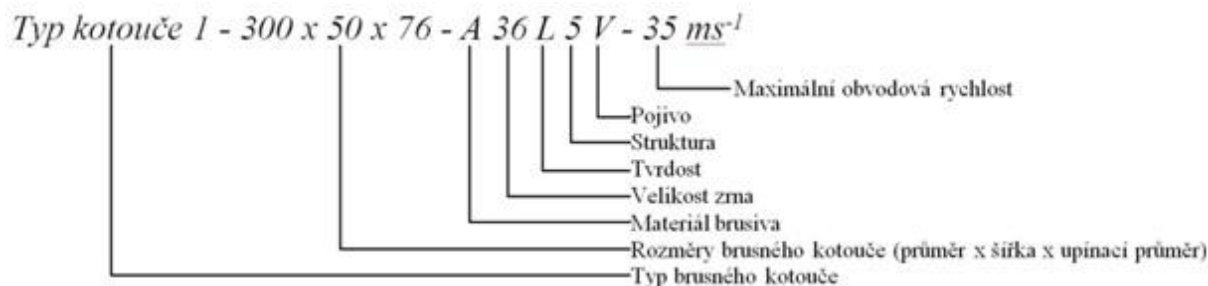
Obr. 5 Struktura brusného kotouče [2]

Struktura kotouče vyjadřuje poměr brusných zrn, pojiva a pórů v 1 cm^3 . To znamená, že čím vyšší je číslo u struktury kotouče, tím větší je vzdálenost mezi jednotlivými brusnými zrny. Struktura brusného kotouče se rozděluje na pórovitou³ a hutnou⁴ (Obr. 5). Při výběru struktury kotouče se vychází z tvrdosti broušeného materiálu, velikosti dotykové plochy mezi brusným kotoučem a obráběnou plochou a množstvím odebíraného materiálu. Platí, že čím je broušený materiál tvrdší a křehčí, tím se volí větší hutnost brusného kotouče. Zároveň je také potřeba dodržet pravidlo, že čím je množství odebraného materiálu větší nebo čím je větší styková plocha, tím je potřeba volit pórovitější strukturu.

Pojivo kotouče spojuje brusná zrna do požadovaného tvaru a rozměru. Zároveň určuje vhodnou mechanickou pevnost a má také vliv na samoostření nástroje. Zároveň je velmi důležité z hlediska životnosti brusného kotouče a odvádění tepla z místa řezu. Základní rozdělení pojiv je podle druhu brusných zrn. Pro brusné kotouče z SiC a Al_2O_3 se používají pojiva keramická (označení „V“), pryžová („R“), z umělé pryskyřice („B“), šelaková („E“) a magnezitová („Mg“). Pro brusné kotouče ze supertvrdých brusných zrn se používají pojiva kovová, galvanická, keramická a z umělé pryskyřice.

Označení brusných kotoučů

Brusné kotouče se označují podle normy ČSN ISO 0525 (22 4503) z hlediska tvaru, rozměru, specifikace složení, které je uvedeno výše, a z maximální obvodové rychlosti. Toto označení podle normy je platné pro standardní brusné kotouče, které jsou vyrobeny z brusného materiálu Al_2O_3 a SiC. Pro ukázkou je zde na obrázku (Obr. 6) uveden příklad označení brusného kotouče podle normy ČSN ISO 0525 (22 4503).



Obr. 6 Označení brusného kotouče podle normy ČSN ISO 0525 (22 4503)

³ Pórovitá struktura je struktura, u které je velká vzdálenost mezi brusnými zrny

⁴ Hutná struktura je struktura, u které je malá vzdálenost mezi brusnými zrny

Pro brusné kotouče, které mají brusná zrna ze supertvrdých materiálů jako je diamant a kubický nitrid bóru, není dle normy určeno označení. Proto značení těchto brusných kotoučů není vždy zcela shodné, jelikož si označení určují výrobci brusných kotoučů. Většinou však toto označení obsahuje všechny výše uvedené údaje o brusném kotouči. [2; 3; 4; 5; 6]

2.1.4 Řezné podmínky při broušení a jejich vliv na kvalitu povrchu

Jak již zde bylo uvedeno, broušení se zařazuje mezi dokončovací operace, proto je potřeba dbát na správnou volbu řezných podmínek, protože řezné podmínky vysoce ovlivňují dosažení požadované přesnosti rozměrů, geometrického tvaru a drsnosti broušené součásti. Volba řezných podmínek je také ovlivněna materiálem obrobku, složením brusného kotouče, zvolenou metodou broušení a kinematikou stroje.

Řezná rychlost (v_c)

Základním parametrem řezných podmínek je řezná rychlost označovaná v_c , která se z důvodu vysokých hodnot, uvádí v metrech za sekundu. Při volbě řezné rychlosti v_c je třeba dbát na pevnost brusného kotouče. Z tohoto důvodu výrobci brusných kotoučů uvádějí maximální řeznou rychlost, kterou může brusný kotouč dosáhnout a nedojde k jeho poškození z důvodu velkých odstředivých sil.

Řezná rychlost se vypočte ze vztahu:

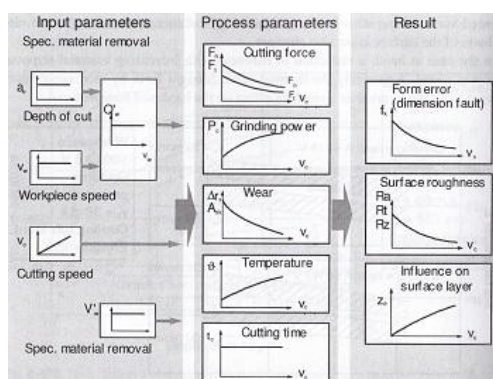
$$v_c = \frac{\pi * d_s * n_s}{60 * 1000} [m \cdot s^{-1}]$$

kde: d_s průměr brusného kotouče [mm]
 n_s otáčky brusného kotouče [min^{-1}]

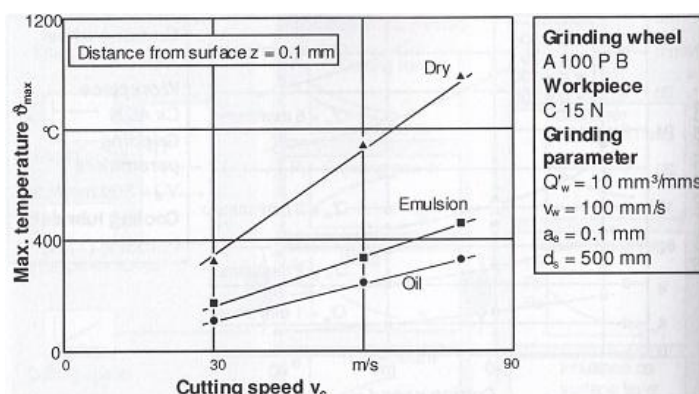
U řezné rychlosti ve většině případů platí, že čím je tato rychlost větší, tím by měla být drsnost povrchu lepší. Zároveň je třeba uvažovat, že se zvyšující řeznou rychlostí je potřeba volba správné technologické kapaliny a jejího tlaku, jelikož se zvyšující se řeznou rychlostí se zvyšuje velikost vznikajícího tepla v místě řezu a běžně používané technologické kapaliny zde nemusí být tak účinné. Proto při jejich špatné volbě hrozí zhoršení drsnosti povrchu. Řezná rychlost broušení se dá rozdělit do 3 skupin:

- Broušení normálními řeznými rychlostmi $v_c = 0 - 30 [m \cdot \text{min}^{-1}]$
- Rychlostní broušení $v_c = 30 - 100 [m \cdot \text{min}^{-1}]$
- Vysokorychlostní broušení $v_c > 100 [m \cdot \text{min}^{-1}]$

Volba řezné rychlosti ovlivňuje nejen kvalitu broušené plochy, ale i další parametry jako je teplota, řezné síly, apod. Veškeré parametry, které jsou přímo ovlivněny volbou řezné rychlosti, jsou zobrazeny na následujícím obrázku (*Obr. 7*), kdy veškeré vstupní parametry jsou konstantní (hloubka třísky, posuvová rychlost, apod.), kromě řezné rychlosti, která se zvyšuje. Jak je patrné z tohoto schématu, se zvyšující se řeznou rychlostí se zlepšuje drsnost povrchu, snižuje se opotřebení brusného kotouče a dochází ke změně dalších parametrů, kromě času řezu, který je konstantní.



Obr. 7 Schéma závislosti řezné rychlosti na průběhu broušení [7]



Obr. 8 Závislost řezné rychlosti na teplotě [7]

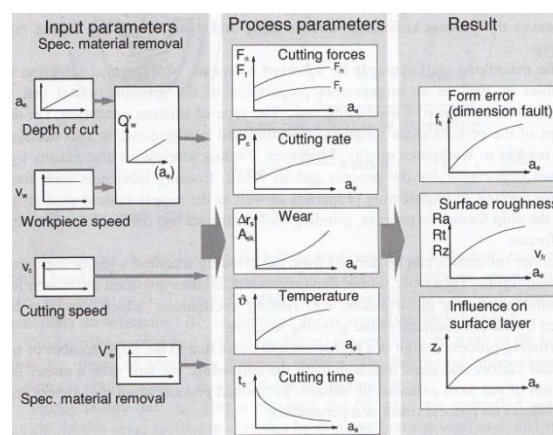
Jak je patrné z obrázku (Obr. 7), se zvyšující se řeznou rychlostí se zvyšuje i teplota v místě řezu, která může mít negativní vliv na požadovanou kvalitu obrobku, nebo může docházet k změnám vlastností povrchové vrstvy. Z tohoto důvodu je potřeba volba správné technologické kapaliny, jak je patrné z grafu, který je zobrazen na levém obrázku (Obr. 8). Tato závislost teploty na řezné rychlosti při broušení za sucha, s chladicí emulzí nebo s chlazením pomocí oleje, je provedena za specifických řezných parametrech, které jsou uvedeny vedle grafu.

V této práci a následně v experimentu se budeme pohybovat v první a druhé skupině řezných rychlostí, jelikož konstrukční řešení brusky ANCA MX 7 neumožňuje překročení rychlosti broušení do skupiny vysokorychlostní. Důvodem jsou maximální otáčky vřetena $10\,000 \text{ ot.min}^{-1}$.

Axiální posuv (a_e)

Dalším řezným parametrem, který se volí při broušení, je pohyb v axiálním směru neboli přísuv. Tento parametr určuje hloubku odebrané vrstvy materiálu, kdy narozdíl od hloubky záběru nástroji s definovanou geometrií břitu je mnohonásobně menší. Obvykle se tato hodnota pro přesné broušení volí v rozmezí od $0,001 - 0,075 \text{ mm}$.

Axiální posuv se řadí mezi řezné parametry, kdy jeho volba ovlivňuje výslednou kvalitu povrchu po broušení a také jednotlivé průběhy procesních parametrů. Procesními parametry se zde rozumí řezné síly, opotřebení nástroje, teplota, řezný čas, apod. Jak je zobrazeno na schématu (Obr. 9) je zde patrné, že se zvyšujícím se axiálním posuvem broušený povrch dosahuje horší kvality.



Obr. 9 Schéma závislosti axiálního posuvu na průběhu broušení [7]

Podélný posuv (a_p)

Posledním řezným parametrem, který výrazně ovlivňuje kvalitu a přesnost broušené plochy, je podélný posuv, ale pouze za určitých podmínek. Jednou z podmínek, která určuje, že podélný posuv ovlivňuje kvalitu broušené plochy, je tvar brusného kotouče. Pokud se jedná o brusné kotouče zaoblené, má tento řezný parametr vysoký vliv na kvalitu broušené plochy. U standardních brusných kotoučů, které jsou ploché, se uvádí, že podélný posuv se volí podle šířky kotouče, a to při dokončovacích operacích v rozmezí 0,2 – 0,3 šířky brusného kotouče.

Volba správných řezných podmínek má tedy vysoký vliv na kvalitu a přesnost broušené plochy, ale je také třeba zdůraznit, že zároveň mají vliv i na zatížení vřeten při broušení. Je potřeba také zmínit, že výše uvedená schémata (*Obr. 7; Obr. 9*) a graf (*Obr. 8*) jsou převzatý z literatury pro přehlednější vysvětlení pojmů, kdy následný průběh může být rozdílný u provedeného experimentu, jelikož uvedené průběhy jsou naměřeny experimentálním měřením s jinými vstupními podmínkami. [8; 9; 7]

2.1.5 Stroje pro broušení

Brousící stroje jsou vyráběny v širokém sortimentu druhů a použití. Proto při volbě brusky je potřeba vycházet z metody broušení, která je pro broušený tvar nejvhodnější, jelikož každá konstrukce brusky je určena prioritně na danou metodu broušení. S tím souvisí i dosahovaná přesnost a kvalita broušené plochy.

Brusky se rozdělují podle prováděných operací na:

- Hrotové – s posuvným stolem nebo s posuvným vřeteníkem
- Bezhrtové – pro vnější nebo vnitřní broušení
- Na díry
- Rovinné – jednojohánkové nebo dvojohánkové, které pracují obvodem nebo čelem brusného kotouče
- Speciální – nástrojařské, na jemné broušení, na závity, na ozubení, apod. [4]

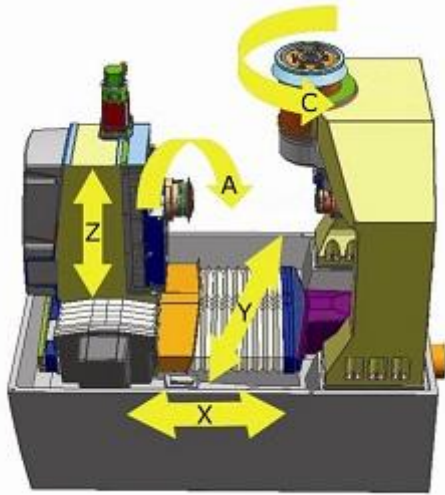
Pro tuto práci je vybrána nástrojařská bruska, která je dále v textu detailněji popsána. Tato bruska se řadí mezi speciální brousící stroje, jelikož jsou často číslicově řízené a některé se zařazují mezi pětiosé stroje.

Speciální brusky – nástrojařské brusky

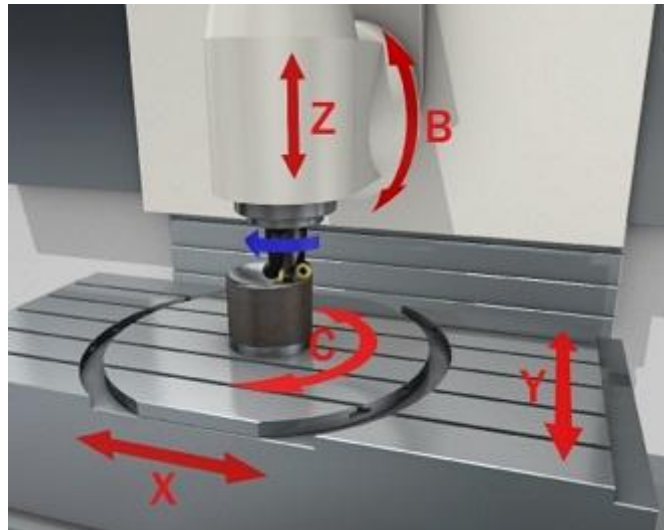
Nástrojové brusky jsou určeny převážně pro ostření a broušení řezných nástrojů, ale dají se využít i v mnohem širším spektru na broušení tvarově složitých obrobků, kterými mohou být různé typy kloubních implantátů, speciálně tvarovaných lopatek, apod. Tato možnost je díky tomu, že tyto brusky jsou číslicově řízeny, je proto velká volnost v jejich využití. Dalším parametrem, kterým se tyto brusky vyznačují, je možnost pohybu v pěti i více osách, kdy tři pohyby jsou v lineární v osách X, Y, Z a dále pak dvěma rotačními pohyby kolem lineárních os. Jejich velkou předností je možnost vyklopení brusného kotouče díky tomu, že vřeteník je otočný až o 360°.

Číslicově řízené nástrojařské brusky vychází z podobné myšlenky jako ostatní číslicově řízené stroje určené pro obrábění, jakými jsou například obráběcí centra, pětiosé frézky a podobně. Velkým rozdílem je však kinematika těchto strojů, kdy na obrázku (*Obr. 10*) je schéma pohybu jednotlivých os u pětiosé nástrojařské brusky – obrobek se pohybuje v lineárních osách X, Y, Z a jedné rotační ose A. Nástroj se pohybuje v jedné rotační ose C, která slouží pro vyklopení brusného kotouče na požadovaný úhel. Vedle na obrázku (*Obr. 11*) je znázorněno schéma pohybů jednotlivých os u vertikálního frézovacího centra, kde je vidět

hned několik rozdílů v pohybu os – obrobek koná dva lineární pohyby v osách X, Y a jeden rotační pohyb v ose C, zatímco nástroj koná lineární pohyb v ose Z a naklonění v rotační ose B. Samozřejmě je potřeba brát v potaz, že je zde uvedeno pouze jedno konstrukční provedení frézovacího centra pro porovnání s pohybem os u pětiosé nástrojařské brusky. [10; 11]



Obr. 10 ANCA MX7 Kinematika stroje [10]



Obr. 11 Vertikální pětiosé frézovací centrum [12]

2.2 Programování CAD/CAM systémů

Aby bylo možné brousit obecné tvarové plochy, řezné nástroje, apod., na pětiosých bruskách, je zapotřebí mít znalosti CAD/CAM programování. Jak již pro samotnou tvorbu součástí, upínačů nebo pomocných ploch v CADu, tak především pro tvorbu technologie broušení v systému CAM. V této kapitole jsou popsány základní informace o CAD/CAM programování, dále pak o softwaru NX 9.0 od společnosti Siemens a iGrind od společnosti ANCA a na závěr několik informací o postprocessingu⁵ programu z CAM prostředí na NC data, která jsou čitelná pro CNC stroj.

2.2.1 Základní informace

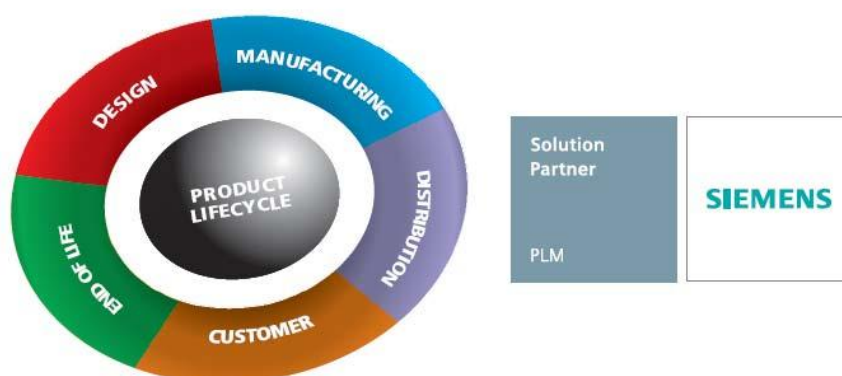
V dnešní době je použití CAD/CAM systémů zcela běžné, jelikož spousta firem využívá CAx systémy kvůli přehlednosti a provázání jednotlivých systémů mezi sebou. CAD/CAM systémy se využívají hlavně kvůli rychlosti, s níž je vyhotoven program, dále pak kvůli možnosti plného využití volného programování ve více osách a také proto, že je možno provést vizuální kontrolu programu nebo jeho částí pomocí grafického simulátoru.

CAD systém (Computer Aided Design) znamená počítačovou podporu konstruování. Využívá se ke kreslení, návrhu a konstruování nových součástí, sestav, apod. Hlavní výhodou tohoto systému je možnost provázání konstrukce a technologií, jelikož navržený výrobek v CAD systému může být exportován do CAM systému.

CAM systém (Computer Aided Manufacturing) znamená počítačová podpora výroby. Tyto systémy mají přímou datovou vazbu s CAD systémy, kdy pro tvorbu technologie v CAM

⁵ Postprocessingem programu je myšleno vytvoření interních NC dat z CAM systému tak, aby byla čitelná pro software iGrind, který s nimi pracuje

systému je využit přímo navržený produkt v CADu od konstruktéra⁶. Hlavní výhodou použití těchto systémů je skutečnost, že obsahují výkonná výpočetní jádra, která umožňují tvorbu programů i pro geometricky velmi komplikované součásti, jejichž výroba by bez použití těchto systémů byla velmi komplikovaná nebo neefektivní. CAM systémy můžeme rozdělovat do tří skupin. Na CAM systémy, které stojí samostatně a mají pouze své CAD jádro, kdy komunikace s konstrukčními CAD systémy probíhá na základě univerzálních formátů (STEP, IGES,...). Dále CAM systémy integrované do stávajících CAD systémů, kdy CAD i CAM modul využívají stejný model součásti, tedy že jakákoliv změna v konstrukci modelu se projeví i v součásti CAM. A v poslední řadě na systémy, které jsou modulárně stavěny, neboli PLM („*Product Lifetime Management*“) systémy. Ty obsahují nejen CAD a CAM moduly, ale také celou řadu dalších modulů, jako například MKP (metoda konečných prvků) nebo digitální tvorbu prototypů, apod., kdy tyto softwary se snaží pokrýt celoživotní cyklus výrobku. Mezi tyto systémy patří NX, Catia, ProEngineer a další. [13]

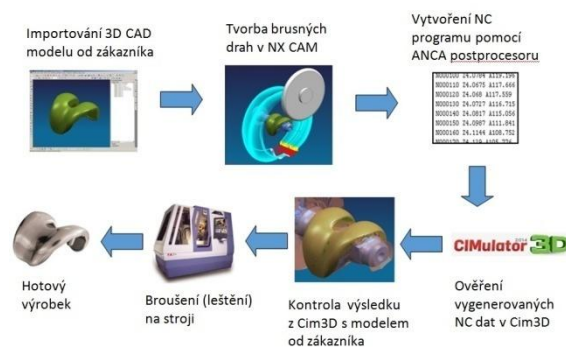


Obr. 12 PLM systém [14]

2.2.2 NX 9.0 s postprocesorem ANCA

Systém NX od společnosti Siemens se řadí mezi PLM systémy, kdy v této kapitole je popsána tvorba CAM programu s postprocesorem od společnosti ANCA. Hlavní myšlenkou pro tvorbu NC dat pro broušení na bruskách ANCA je zobrazeno na obrázku (Obr. 13), kdy se začíná u převzetí 3D modelu od zákazníka, popřípadě jeho vytvoření konstruktérem nebo technologem, až po výrobu této součásti. Dále je popsána část, která se zabývá tvorbou CAM programu, přesněji myšlenkou vytvoření drah nástroje.

Při vytváření CAM programu se vychází z tvorby drah pro obráběcí nástroj. Proto aby mohly být tyto dráhy vytvořeny je potřeba vycházet z tvaru součásti („*PART*“⁷) a řídicí geometrie („*DRIVE*“⁸). Part vyjadřuje označení



Obr. 13 Hlavní myšlenka tvorby ANCA CAD/CAM procesu [15]

⁶ Produktem od konstruktéra je myšleno vytvoření modelu součásti nebo sestavy podle výkresové dokumentace

⁷ PART je pojem v NX softwaru pro označení součásti

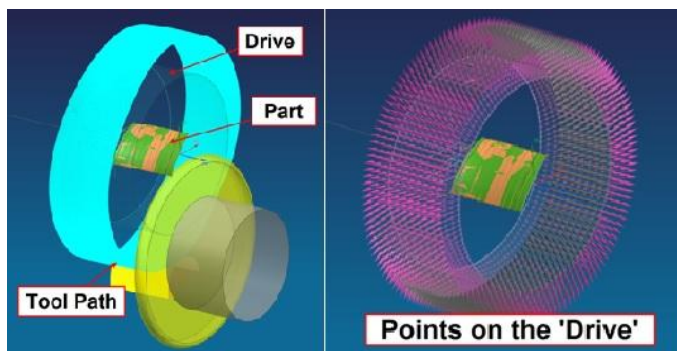
⁸ DRIVE je pojem v NX softwaru pro označení řídicí geometrie, která je vytvořená pomocí ploch

pro plochy součásti, pro které budou generovány dráhy nástroje. Aby však mohly být tyto dráhy generovány, je potřeba definovat řídicí geometrii, která slouží k definování sady bodů, které jsou buď promítány na povrch řídicí geometrie, nebo mohou být promítnuty přímo na součást. Tato sada bodů poté tvoří dráhu nástroje („*TOOL PATH*“⁹), která vychází z těchto bodů. Dráha nástroje je definována jako množina bodů, kterou následuje brusný nástroj po požadované geometrii. Tyto body jsou poté překládány do programového jazyka, který je určen pro řídicí systém od společnosti ANCA a mohou být použity pro tvorbu NC dat v systému iGrind. Na obrázcích (*Obr. 15* a *Obr. 16*) je zobrazena myšlenka tvorby drah v systému NX, která zde byla popsána. Pro úspěšnou tvorbu těchto drah jsou dále bodově popsána pravidla, kterými by se měl řídit technolog pro vytvoření programu.

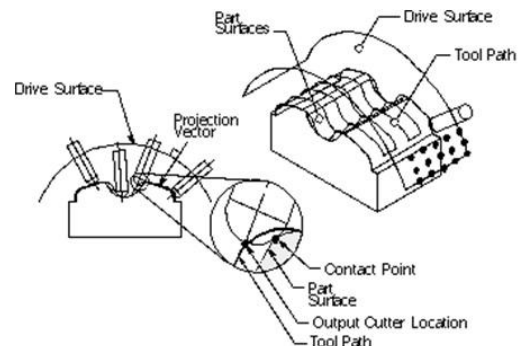
- Uživatel musí definovat, co je nástroj, součást, směr vektorů bodů, které se promítnou, a směr pohybu nástroje
- Řídicí geometrie musí obsahovat body, které jsou definovány uživatelem
- Každý z těchto bodů je promítnut na plochu součásti ve směru, který definuje vektor
- Nástroj je umístěn do pozic, kde byly promítnuty body na součásti (kontaktní body)
- Kontaktní body slouží pro výstup pozice nástroje (na základě souřadného systému MCS)
- Umístění nástroje je zaznamenáno jako bod, který je umístěn ve středu nástroje na jeho přední straně (*Obr. 14*)
- Dráha nástroje je definována pomocí bodů, které pohybují s nástrojem v pořadí, které je definováno směrem pohybu nástroje a zvolené technologie



Obr. 14 Bod na nástroji [15]



Obr. 15 Tool Path, Drive and Part [15]



Obr. 16 Generates Tool Path [15]

Po nadefinování drah nástroje je potřeba tyto dráhy převést do NC dat, která jsou čitelná pro obráběcí stroj. Software NX obsahuje postprocesor od společnosti ANCA, který ale generuje dráhy, které nejsou čitelné přímo pro stroj, ale pro jejich software s názvem iGrind. Ten slouží v tomto případě pro ověření a kontrolu drah nástroje, nastavení rezných podmínek a dalších nastavení, která jsou potřeba pro vygenerování plně funkčních NC dat, jež jsou poté čitelná pro obráběcí stroj. [15]

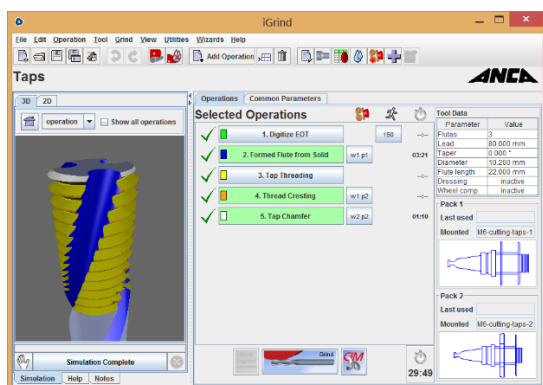
V této kapitole je uvedena pouze základní informace o tom, jak se definuje dráha nástroje v softwaru NX. V kapitole (3.5) je popsána detailněji tvorba technologie pro zadanou součást a veškeré náležitosti s tím spojené, jako je konstrukce přípravku, tvorba pomocné geometrie ve formě ploch a vytvoření CAM programu.

⁹ TOOL PATH je pojem v NX softwaru pro označení křivek, po kterých je veden nástroj

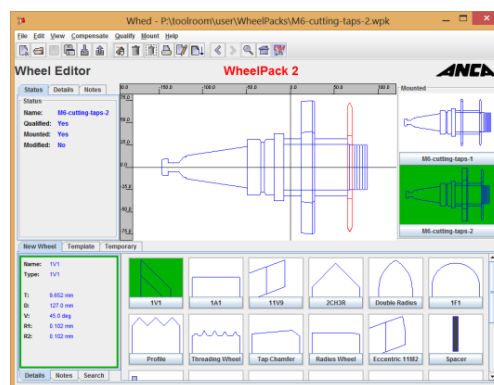
2.2.3 iGrind

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, pro vygenerování NC dat, která jsou čitelná pro nástrojařskou brusku od společnosti ANCA, je zapotřebí použít software iGrind, který to umožňuje. V této kapitole bude představen tento software a uvedeny základní informace pro jeho použití při generování NC dat z softwaru NX.

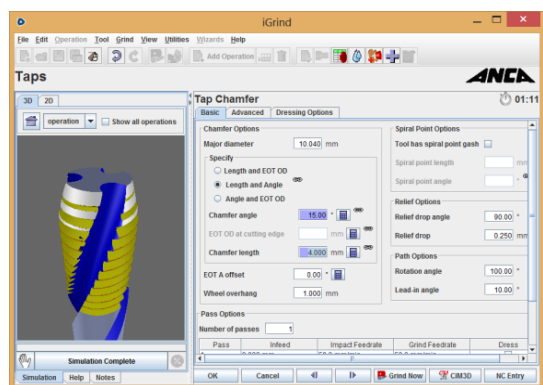
Software iGrind od společnosti ANCA slouží primárně pro konstrukci řezných nástrojů, tvorbu technologie broušení řezných nástrojů a postprocessing NC dat, která jsou čitelná pro stroj. V tomto softwaru je rozdělen do několika uživatelských prostředí, která slouží pro jednotlivá nastavení, například definice tvaru polotovaru, tvorba technologie, nastavení řezných podmínek, konstrukce brusných kotoučů s upínači a simulaci programu ve virtuálním prostředí. Na obrázku (Obr. 17) je zobrazeno uživatelské prostředí programu iGrind, kdy prostřední část okna slouží pro rychlý přístup ke všem operacím, které jsou použity ve výsledném programu na výrobu zobrazeného nástroje v levé části obrázku. Tato část slouží pro rychlou vizualizaci 3D nebo 2D zobrazení všech nastavených operací. V pravé dolní části je zobrazen aktuální nástroj, který je použit pro danou operaci. Na dalších obrázcích jsou zobrazena jednotlivá prostředí, která slouží pro nastavení tohoto programu. Na obrázku (Obr. 18) je zobrazeno prostředí pro definici geometrie brusného kotouče s vyložením na upínacím trnu. Další obrázek (Obr. 19) znázorňuje kartu pro nastavení řezných parametrů pro vybranou operaci. Poslední obrázek (Obr. 20) zobrazuje CIMulator3D, který slouží pro virtuální simulaci jednotlivých operací, změnění vybroušené geometrie a také ke kontrole, zda nedochází ke kolizím mezi nástrojem, strojem a obrobkem. [16; 17]



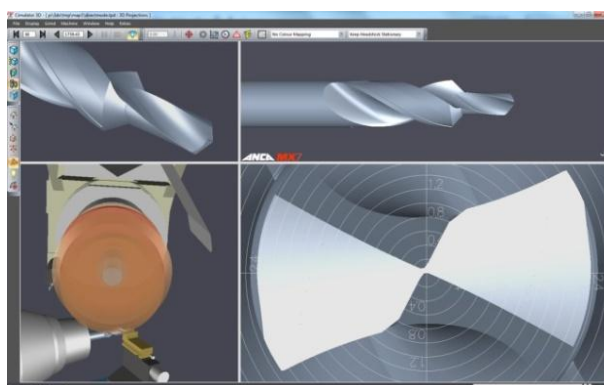
Obr. 17 Uživatelské prostředí iGrind [16]



Obr. 18 Toolroom [16]



Obr. 19 Operation options [16]

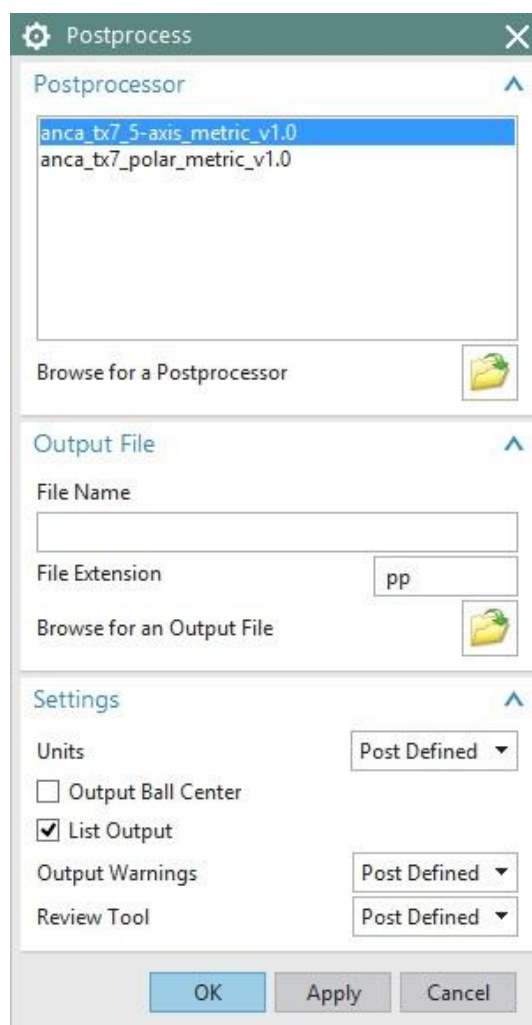


Obr. 20 CIMulator3D [18]

2.2.4 Postprocessing NC dat

Aby naprogramovaná technologie broušení nebo obecně jakákoliv technologie, která je vytvořena v CAM systému, fungovala na obráběcím stroji, je potřeba použít tzv. přechodový článek neboli postprocesor. Postprocesor slouží jako překladač tzv. CL dat¹⁰ na NC data, která jsou čitelná pro daný obráběcí stroj. Jelikož existuje velké množství řídicích systémů a obráběcích strojů, které se mezi sebou liší svými technologickými a konstrukčními možnostmi, je potřeba používat vždy postprocesor, který je určen na daný stroj s daným řídicím systémem.

Takto je to i u softwaru NX, který obsahuje postprocesor pro generování interních dat pro software iGrind, která obsahují záznam o poloze bodu brusného kotouče. Při generování těchto dat je vybrán příslušný postprocesor, jak je vidět na obrázku (Obr. 21). Anca_tx7_5-axis_metric_v1.0 slouží pro generování dat plynulého pětiosého pohybu stroje. Druhá možnost, která má název anca_tx7_polar_metric_v1.0, slouží pro generování dat, kdy osa C je fixována v jedné poloze ($C = -90^\circ$), to znamená, že osa nástroje je rovnoběžná s osou upínacího vřetene. Ukázka interních dat vygenerovaných z programu NX je přiložena v příloze (Příloha č. 1, Příloha č. 2), kde je patrný rozdílný zápis polohy brusného kotouče, který je dán číselně v souřadnicích X, Y, Z, C, A. V těchto interních datech je na první pohled vidět rozdílnost ohledně souřadnic polohy řezného nástroje a použitých příkazů. Tato data se poté importují do softwaru iGrind, ve kterém se nastaví chybějící parametry, jako je řezná rychlost, posuvová rychlost, hloubka úběru a počet drah na odebrání přídatku pro broušení. Po nastavení všech potřebných parametrů se program uloží a spolu s vygenerovanými daty z NX nahraje na uložení stroje. Stroj ANCA MX7 má jako řídicí software iGrind, proto již není potřeba generovat data přímo pro stroj, stačí otevřít přímo program v iGrindu spolu s daty z NX, na která je program vázán. [15]



Obr. 21 Výběr postprocesoru v NX

¹⁰ CL data znamenají Cutter location, v překladu poloha řezného nástroje

2.3 Vyhodnocování kvality povrchu a zatížení vřetena

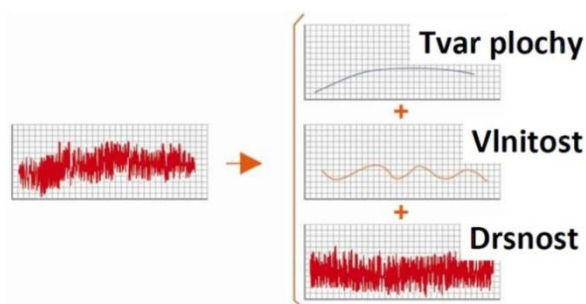
Jak již bylo zmíněno, technologie broušení se využívá pro dokončovací operace, kdy je důležitá požadovaná vysoká kvalita povrchu a geometrická přesnost obrobku. Měřítkem kvality povrchu mohou být různé parametry, ale nejvíce vypovídající jsou dva parametry – drsnost povrchu po broušení a geometrická přesnost broušené plochy¹¹. Tyto parametry jsou ovlivněny řeznými parametry i samotnou přesností obráběcího stroje. Zároveň s přesností obráběcího stroje souvisí i opotřebením jeho jednotlivých částí, hlavně také opotřebením brusného kotouče, kdy opotřebením brusného kotouče má následně vliv na kvalitu obrobku. Proto je vhodné provádět i kontrolu zatížení vřetene při broušení, kdy toto má vliv na životnost vřetene, která souvisí s přesností obráběcího stroje. Z tohoto tvrzení vyplývá, že pro proces broušení je potřeba volba vhodných řezných podmínek, aby byla dosažena požadovaná kvalita broušeného povrchu a zároveň aby zatížení vřetene nebylo příliš vysoké a nedocházelo tak vysokému opotřebením brusného kotouče jednotlivých částí stroje.

2.3.1 Drsnost povrchu (struktura povrchu)

Strukturu povrchu lze rozdělit do 3 základních skupin (*Obr. 22*), které odlišuje jejich vlnová délka:

- mikronerovnost – označuje se jako drsnost povrchu, je dána jako nerovnost povrchu, která vzniká stopami od řezných nástrojů nebo brusiva
- makronerovnost – vlnitost povrchu, je způsobena nejčastěji vibracemi soustavy stroj – nástroj – obrobek – přípravek
- tvar plochy – kdy jeho úchyly mohou být způsobeny nedostatečnou tuhostí soustavy, teplem vznikajícím při výrobním procesu

Z hlediska vyhodnocování kvality povrchu po broušení je potřeba se zaměřit zejména na mikronerovnosti, tj. drsnost povrchu. Jak již bylo uvedeno, drsnost povrchu je dána stopami řezných nástrojů, které vytvářejí nerovnost povrchu. Ta je ovlivněna volbou technologie procesu výroby, okolních vlivů a také technologickými podmínkami. Základní parametry drsnosti jsou definovány podle normy ČSN EN ISO 4287 (01 4450), která definuje geometrické požadavky na výrobky, termíny, definice a parametry struktury povrchu. Dále je uvedena definice a rozebrání tří parametrů drsnosti a to Ra , Rq a Rz . [19]



Obr. 22 Obecný povrch a jeho části [19]

¹¹ Geometrickou přesností broušené plochy je zde myšleno změření odchylek obrobku od 3D modelu plochy pomocí souřadnicového měřicího stroje

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu – Ra

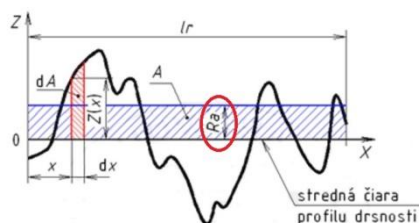
Je definována podle normy jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. Jinak řečeno, jedná se o střední hodnotu vzdálenosti bodu zjišťovaného profilu od střední čáry měřeného úseku (Obr. 23). Nevýhodou této hodnoty je její nízká vypovídací schopnost, která je způsobena její nízkou citlivostí na extrémní výstupky a rýhy měřeného povrchu. To znamená, že povrchy, které mají profily rozdílného tvaru, velikosti a funkčního charakteru, mohou mít stejnou hodnotu R_a (Obr. 24). Hodnota R_a je zobrazena žlutými obdélníky. [20]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

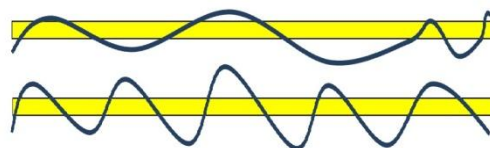
Kde:

l ... délka vyhodnocovaného profilu

$Z(x)$... výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x



Obr. 23 Průměrná aritmetická úchylka Ra [20]



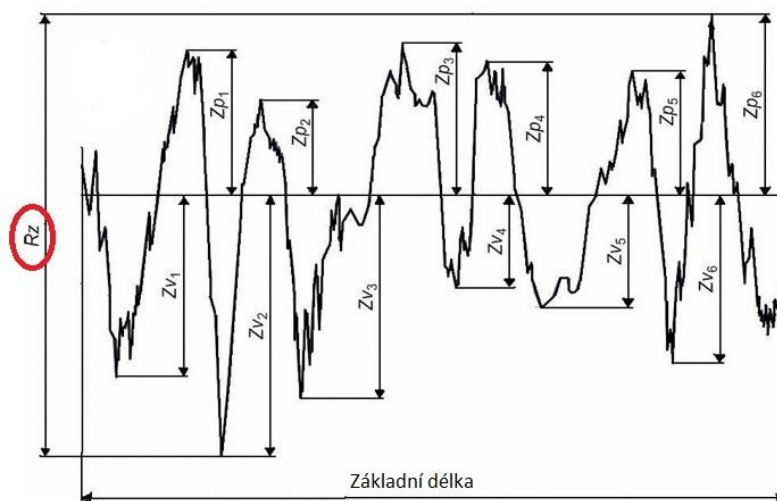
Obr. 24 Vliv reálného povrchu na hodnotu Ra [20]

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu – Rq

Je definována podle normy jako kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. Parametr R_q lze využít i ve spojení s vyhodnocovanou délkou profilu k výpočtu velikosti obsahu prohlubně. Tím pádem lze stanovit objem opotřebovaného materiálu na daném místě měřeného povrchu. Oproti hodnotě R_a je parametr R_q citlivější na výstupky a rýhy měřeného profilu, kdy nehrozí změření stejné hodnoty drsnosti u dvou rozdílných profilů jako u hodnoty R_a . [20]

Nejvyšší výška profilu – Rz

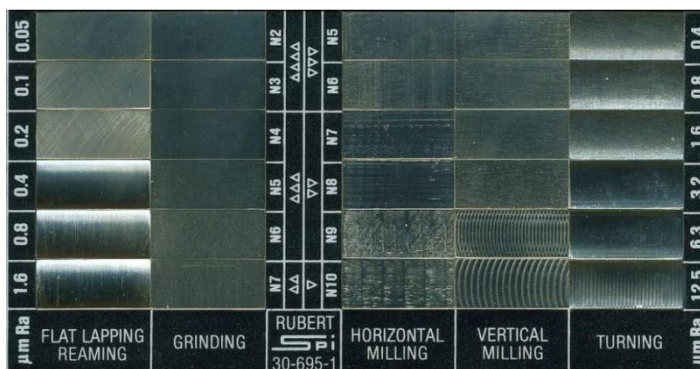
Je definována podle normy jako součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnížší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (Obr. 25). [20]



Obr. 25 Nejvyšší výška profilu Rz [20]

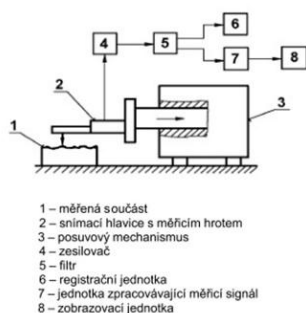
Metody měření drsnosti

Měření drsnosti povrchu se rozděluje na dvojí základní metody, přímé a nepřímé. Mezi přímé patří tzv. porovnávací metoda, kdy hlavním měřítkem vyhodnocení drsnosti je lidský smysl. Při této metodě se zkoumaná plocha porovnává se vzorovými plochami vzorkovnice (Obr. 26) s rozdílnou drsností hmatem, zrakem nebo popřípadě pomocí jednoduchých optických pomůcek. U nepřímé metody se vyhodnocuje drsnost porovnáním zkoumané plochy se vzorovou plochou za použití komparačních měřidel. Výsledkem této metody je rozdíl drsností porovnávaných vzorků. Jelikož nepřímá metoda se dá použít převážně pro rychlé, ale poměrně nepřesné vyhodnocení kvality povrchu, je výhodnější pro účel zjištění drsnosti při broušení použít metody přímé.

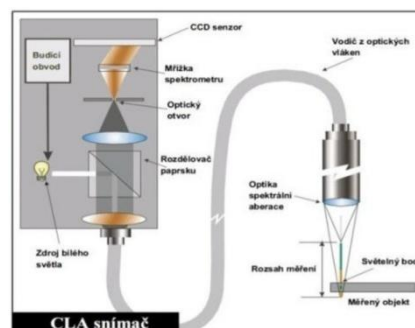


Obr. 26 Vzorkovnice drsnosti povrchu [19]

Přímé metody jsou rozděleny do dvou skupin – dotykové a bezdotykové. Na následujících obrázcích jsou zobrazena schémata těchto dvou skupin pro měření drsnosti povrchu. Na levém obrázku (Obr. 27) je schéma dotykového měření drsnosti povrchu a na pravém obrázku (Obr. 28) schéma CLA snímače pro měření drsnosti bezkontaktní metodou. Dotykové metody měření drsnosti se charakterizují tím, že měření je prováděno rovnoměrným posouváním měřicího dotyku po kontrolovaném povrchu, kdy při měření drsnosti po obrábění by tento posuv měl být proveden vždy kolmo na stopy po řezném nástroji. Zaznamenání hodnot probíhá změnou výšky měřicího dotyku, které jsou způsobeny nerovnostmi na povrchu, kdy se tyto nerovnosti zaznamenávají v mnohonásobné velikosti. Oproti tomu bezdotykové metody měření drsnosti povrchu využívají pro snímání povrchu bezkontaktní snímače. Nejčastěji se používají snímače CLA (Chromatic Length Aberration), jejich rozlišitelnost je v μm , laserové snímače jsou o řád přesnější. Jejich výhodou je zobrazení drsnosti na celé funkční ploše měřené součásti. V této práci se však využívá pro měření drsnosti dotyková metoda, jelikož pro vyhodnocení drsnosti po broušení je tato metoda dostačující a také její provedení je výrazně rychlejší v porovnání s bezdotykovou metodou. [19; 21]



Obr. 27 Schéma dotykové metody [21]



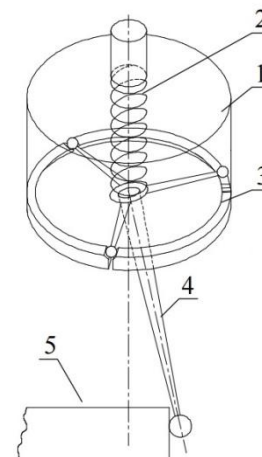
Obr. 28 Schéma bezdotykové metody [21]

2.3.2 Geometrická přesnost vyrobeného povrchu

Další metodou pro vyhodnocení kvality povrchu po broušení je metoda, při níž se odměřují odchylky obrobene součásti od jejího CAD modelu, který představuje dokonalý tvar obrobene součásti. Tyto odchylky jsou měřeny pomocí souřadnicového měřicího stroje zobrazeného na obrázku (Obr. 29), z důvodů složitosti tvarových ploch, jelikož jsou tvarové plochy velmi obtížně změřitelné konvenčními metodami měření¹². Souřadnicové měřicí stroje pracují na principu stanovení základního bodu v prostoru a polohy dalších bodů na měřené součásti formou souřadnicových rozměrů X, Y, Z. Možnost určení základního bodu libovolně v prostoru je velkou výhodou oproti konvenčním metodám měření. Souřadnicové měřicí stroje je možno využívat na několik základních principů měření – na měření jednotlivých bodů na součásti, spojitě snímání plochy součásti a pro spojitou kontrolu úchylek tvaru křivek. Z těchto principů je pro naměření odchylek obrobene součásti od 3D modelu vyhovující použít princip měření jednotlivých bodů na součásti, kdy tento princip pracuje s prostorovými souřadnicemi bodů na součásti, které se změní pomocí dotyku, jenž je umístěn na měřicí hlavě. K zaznamenání naměřených souřadnic dochází v okamžiku, kdy je dotyk vychýlen ze své klidové polohy tím, že dojde ke kontaktu s plochou součásti. Při tomto vychýlení dotyku je vyslán signál, při němž dojde k zaznamenání prostorových souřadnic. Na obrázku (Obr. 30) je zobrazeno kinematické schéma měřicí hlavy s elektrokotaktním snímačem. Naměřené prostorové souřadnice jednotlivých bodů jsou poté převáděny do softwaru, který je vyhodnocuje podle zvolené metody. Volba metody záleží jaké výstupní data jsou požadovány. Výstupními daty z tohoto měření pro určení je vzdálenost naměřeného bodu na součásti od bodu, který je umístěn na 3D modelu a je definován pomocí měřicího programu. Tento měřicí program řídí automaticky tento proces měření v jednotlivých bodech. [22]



Obr. 29 Souřadnicový měřicí stroj ZEISS PRISMO [23]



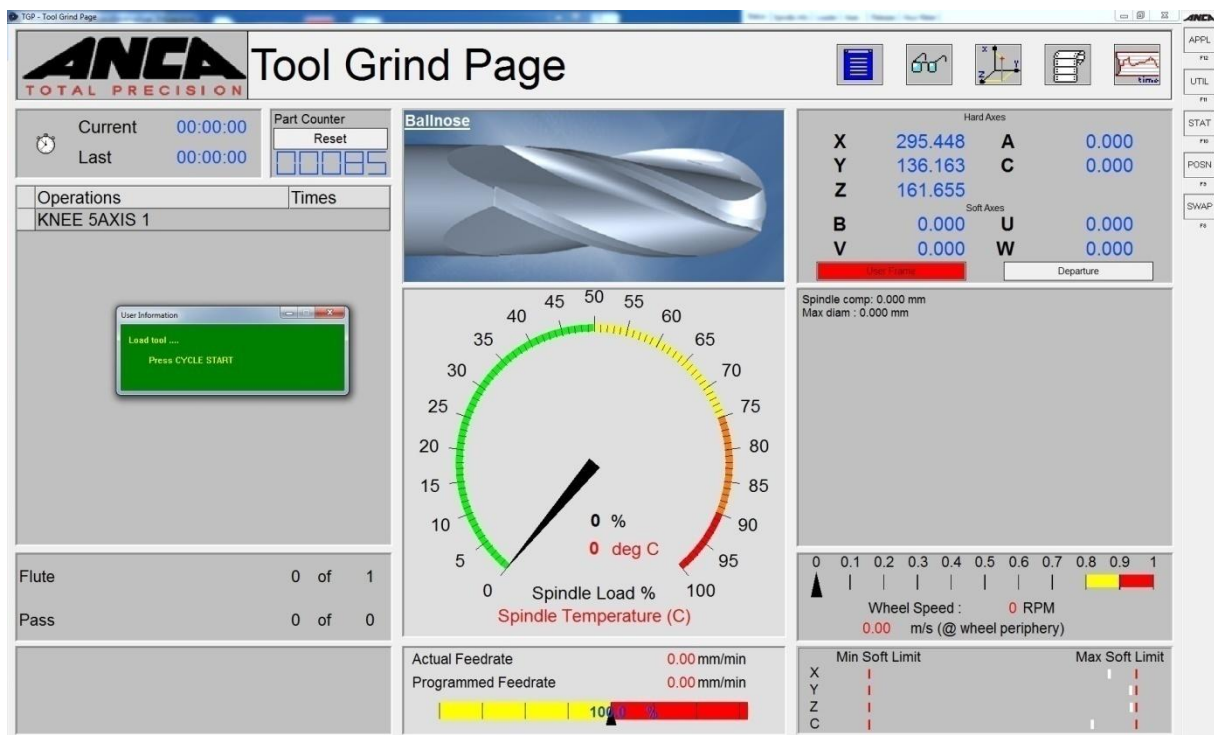
- 1... Těleso sondy
- 2... Tlaková pružina
- 3... Kroužek se 3 V-drážky
- 4... Měřicí dotek
- 5... Měřená součást

Obr. 30 Kinematické schéma měřicí hlavy [22]

¹² Konvenčními metodami měření je zde myšleno měření, které je prováděno pomocí mikrometru, délkoměru, apod.

2.3.3 Zatížení vřetene

Jak již bylo zmíněno výše, kontrola zatížení vřeten při procesu broušení je důležitá také z hlediska přesnosti výroby součástí a kvality obrobené plochy, jelikož velikost zatížení při procesu broušení má vliv na celkovou přesnost stroje, kdy při vysokém zatížení může dojít k rychlejšímu opotřebování jednotlivých částí nebo i k jejich poškození. Zároveň velikost zatížení má také vliv na rychlost a velikost opotřebení brusného kotouče, které pak vede k zhoršení kvality broušené plochy. Kontrola zatížení vřetene na brusce ANCA MX7 je již umístěna ve stroji a celkové zatížení je zde zobrazeno na řídicím panelu tohoto stroje v procentuálním rozhraní, jak je zobrazeno na obrázku (Obr. 31). Při procesu broušení je možno toto zatížení vřetena přímo kontrolovat na řídicím panelu a zároveň také zaznamenávat jeho průběh do grafů. Z těchto grafů je možno vyhodnotit celkové zatížení při procesu broušení nebo pouze určité úseky. Při vyhodnocování nebo i při samotné kontrole zatížení vřetena je potřeba vzít na vědomí, že roztočený brusný kotouč sám zanášá do systému zatížení vlivem odstředivých sil, a to ve velikosti okolo 4 % z celkového zatížení.



Obr. 31 Zobrazení zatížení vřetena

3 Návrh vlastního experimentu ve variantním řešení

V této kapitole je představeno vlastní navržení experimentu na broušení obecné tvarové plochy a následné vyhodnocení kvality obrobku a zatížení vřetene na pětiosé brusce. První část je zaměřena na navržení experimentu pro tuto práci. V následující části je představena vybraná součást pro broušení, která je vhodným představitelem obecné tvarové plochy. Následuje představení použitého vybavení, navržení technologie broušení, tvorba NC programu a dalších potřebných činností pro provedení experimentu na pětiosé brusce ANCA MX7.

3.1 Návrh experimentu a vybrání vstupních faktorů pro experiment

Hlavním cílem této práce je ověření vlivu řezných podmínek na kvalitu povrchu a zatížení vřetene. Vedlejším cílem je ověřit funkčnost a použití nového postprocesoru do softwaru NX od společnosti ANCA, který umožňuje naprogramovat NC data pro broušení libovolných ploch na nástrojařské brusce ANCA MX7.

Navržení vlastního experimentu je provedeno v následujících krocích:

- Vymezení vstupních podmínek faktorů ovlivňujících experiment
- Představení a definice součásti
- Použité vybavení pro experiment
 - Stroj ANCA MX7
 - Brusný kotouč
 - Stroje pro vyhodnocení výstupních parametrů z experimentu
- Příprava CAD/CAM dat pro experiment
- Hodnoty vstupních parametrů pro experiment
- Způsob vyhodnocení výstupních parametrů

Při návrhu experimentu je potřeba se zaměřit na vstupní podmínky, které mohou ovlivňovat samotný průběh experimentu i kvalitu povrchu a zatížení vřetena. Jak je patrné z tabulky (*Tabulka 3*), vstupních faktorů, je poměrně velké množství. Proto je potřeba si určit, které varianty faktorů jsou použity jako vstupní hodnoty pro experiment.

Vstupní faktory ovlivňující kvalitu povrchu					
Technologie	Řezné podmínky	Řezná rychlost v_c	Brusný kotouč	Složení kotouče	Materiál brusiva
		Posuvová rychlost v_f			Materiál pojiva
		Axiální posuv a_p			Zrnitost
		Radiální posuv a_e			Tvrdost
	Strategie	Sousledné		Tvar kotouče	Struktura
		Nesousledné			Rádiusový
		Naklopení kotouče			Profilový
	Chlazení	Složení		Přípravky	Opotřebení kotouče
		Tlak			Upínací přípravek

Tabulka 3 Vstupní faktory ovlivňující kvalitu povrchu

Na základě tématu této práce a možností realizace jsou vybrány ze vstupních faktorů řezné podmínky, které jsou zvýrazněny v tabulce. Jedná se přímo o řeznou rychlost, posuvovou rychlost a axiální posuv. Čtvrtým parametrem, který musel být přidán v průběhu tvorby

programu, je vyklopení brusného kotouče o 30° na jedné polovině součásti, jelikož při tvorbě první varianty programu byla zjištěna kolize upínacího přípravku, který již byl vyroben, s vřetenem stroje. Tato kolize je rozebrána v kapitole (3.5.3).

Na základě vybraných vstupních faktorů je provedeno navržení 3 variant pro experiment z hlediska zařazení do skupin u řezné rychlosti, jak bylo uvedeno v kapitole (2.1.4), jelikož dle provedeného rozboru současného stavu této problematiky má nejvyšší vliv na kvalitu povrchu řezná rychlost. V tabulce (Tabulka 4) jsou zobrazeny tyto 3 varianty řezných rychlostí s návrhem dvojice řezné rychlosti pro každou variantu.

Varianta	Skupina	Rozpětí řezné rychlosti	Navržená řezná rychlost	
1	Normální broušení	0 – 30 m/s	10 m/s	20 m/s
2	Rychlostní broušení	30 – 100 m/s	30 m/s	40 m/s
3	Vysokorychlostní broušení	více jak 100 m/s	100 m/s	120 m/s

Tabulka 4 Návrh variant pro řeznou rychlost

Z navržených variant je jako výsledná vybrána varianta číslo 2, která se řadí do skupiny rychlostního broušení. Výběr této varianty je hned z několika důvodů vyplývajících z rozboru současného stavu uvedeného v této práci i z realizačních možností. Jedním z důvodů, proč tato varianta je vybrána, je ověření, zdali má velikost řezné rychlosti tak velký vliv na kvalitu povrchu. Dalším důvodem je technické omezení stroje a nástroje, kdy maximální řezná rychlost použitého brusného kotouče je 63 m/s. Dalším omezením však jsou maximální otáčky vřetena stroje, které jsou 10000 ot/min. Proto nebylo možné dostat se k vysokorychlostnímu broušení, které začíná na řezné rychlosti 100 m/s.

Pro zbývající dva parametry jsou navrženy hodnoty v několika možnostech v tabulce (Tabulka 5), kdy z těchto hodnot je pro každý parametr vybrána dvojice hodnot, která je použita v experimentu. Je však potřeba uvést, že místo axiálního posuvu se v softwaru NX nastavuje hodnota „maximal scallop height“¹³, proto je v tabulce místo axiálního posuvu uvedena tato hodnota.

Parametr	Hodnoty								
Posuvová rychlost v_f [mm/min]	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Maximal scallop height [mm]	1	0,5	0,1	0,05	0,01	0,005	0,001	0,0005	0,0001

Tabulka 5 Návrh hodnot posuvové rychlosti a "maximal scallop height" pro experiment

Z hodnot posuvové rychlosti jsou vybrány nižší hodnoty proto, že se jedná o první broušení tohoto typu na tomto stroji a za použití softwaru NX k tvorbě NC dat pro broušení. Hodnoty „maximal scallop height“ jsou vybrány v tomto rozpětí, jelikož je potřeba ověřit, jaké drsnosti povrchu je dosaženo při těchto hodnotách. Zároveň se u vyšších hodnot předpokládá, že drsnost povrchu bude nevyhovující v rámci broušení jako dokončovací operace, u nižších hodnot se dosahuje příliš vysokého času broušení jednoho experimentu – při kombinaci posuvové rychlosti 150 m/min a hodnoty "maximal scallop height" 0,001 je doba broušení něco málo přes 5 hodin.

¹³ Maximal scallop height znamená maximální výšku výstupku, který vzniká od posunutí brusného kotouče o axiální hodnotu posuvu

3.2 Hodnoty parametrů a výstupy z navrženého experimentu

Z navrženého experimentu a vybraných vstupních faktorů je možno provést navržené jednotlivých experimentů a jejich hodnot při broušení vybrané součásti, kterou je horní část kolenního implantátu. Samotná součást je v následující kapitole (3.3) spolu s důvodem vybrání této součásti a definování broušených ploch pro experiment.

3.2.1 Vstupní parametry experimentu

Jak bylo uvedeno, pro provedení experimentu jsou vybrány 3 základní proměnné z řezných podmínek a jedna přidaná proměnná z důvodu vzniklé kolize upínacího přípravku s vřetenem stroje. Z řezných podmínek se pak jedná o řeznou rychlost, kdy její hodnoty jsou vybrány tak, aby se experiment pohyboval v oblasti rychlostního broušení. Zároveň je tento parametr limitován maximálními otáčkami brusného kotouče a především stroje. Druhou proměnnou je zde posuvová rychlost, která, jak již bylo zmíněno, je zvolena v nižších hodnotách z důvodu prvotního broušení tohoto typu na tomto stroji. Poslední proměnnou z řezných parametrů je pak axiální posuv, v tomto případě hodnota maximální výšky výstupku („*maximal scallope height*“), která vzniká mezi jednotlivými dráhami brusného kotouče. Jak již bylo zmíněno, z důvodů kolize je přidána čtvrtá proměnná, vyklopení vřetena v ose C o 30°, která je dále v textu této práce označována jako $C = 60^\circ$. Jednotlivé parametry s označením experimentu jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 6). Hodnota v tabulce, označená "HR01", je posledním přípravným broušením před experimentem. Jak je možno si povšimnout, jednotlivé řezné parametry této operace jsou totožné s prvním experimentem označeným "EXP01" z důvodu nezkrácení výsledku při ověření posunutí drah mezi sebou o radiální posuv, který je 0,05 mm.

Parametry experimentu Knee_implant					
Označení	v_c [m/s]	v_f [m/min]	sc [mm]	a_e [mm]	posunutí od modelu [mm]
Přípravné broušení					
HR00	20	50	0,1	0,1	0 až -1
HR01	30	150	0,005	0,05	-1,05
Experimentální část					
EXP01	30	150	0,005	0,05	-1,1
EXP02	40	150	0,005		-1,15
EXP03	30	200	0,005		-1,2
EXP04	40	200	0,005		-1,25
EXP05	30	150	0,001		-1,3
EXP06	40	150	0,001		-1,35
EXP07	30	200	0,001		-1,4
EXP08	40	200	0,001		-1,45

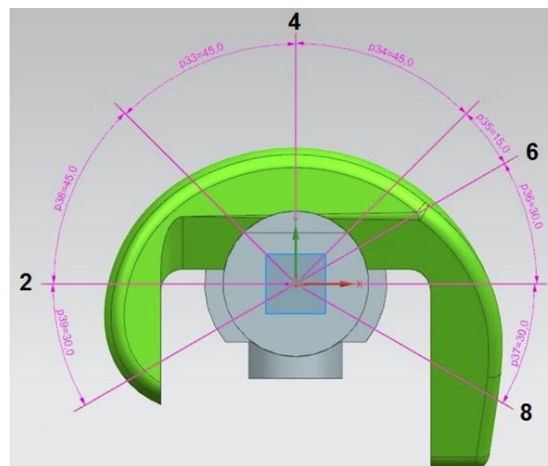
Tabulka 6 Parametry experimentu Knee_implant

3.2.2 Výstupní parametry experimentu

Výstupní hodnoty z tohoto experimentu se dají rozdělit do dvou skupin – hlavní a vedlejší parametry pro vyhodnocení experimentu. U jednotlivých výstupních parametrů je uvedeno, do jaké skupiny patří, dále na jakém stroji jsou měřeny, na jakých místech na součásti bylo měření prováděno a výstupy z jednotlivých měření. Naměřené hodnoty jsou dále zpracovány v kapitole (4).

Drsnost povrchu

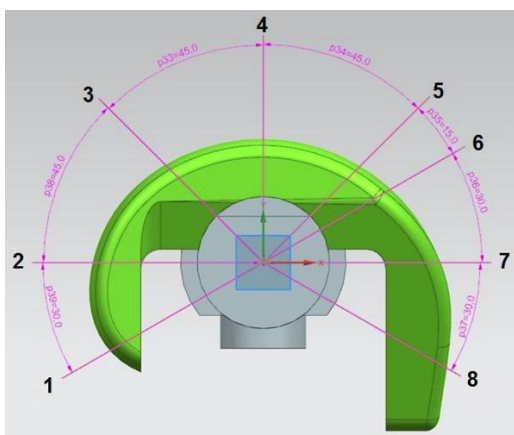
Prvním vyhodnocovaným parametrem je drsnost povrchu, která je zařazena do hlavní skupiny. Drsnost povrchu je měřena v jednotlivých řezech na součásti, vždy ve dvou místech – na povrchu, který je vybroušen bez vyklopení vřeteně, a na povrchu, který je vybroušen s vyklopeným vřetenem. Na obrázku (Obr. 32) jsou tyto řezy, ve kterých je součást měřena, označeny čísly 2, 4, 6 a 8. Tyto řezy jsou poskládány tak, aby byla proměřena drsnost po celé součásti a bylo možno uvést, že celková drsnost součásti má hodnotu, která je změřena a následně vyhodnocena. Drsnost povrchu je v těchto řezech měřena na velmi přesném profiloměru/drsnoměru HommelEtamic T8000. Hodnoty z měření jsou zaznamenány do protokolu o měření, který je na ukázkou v příloze (Příloha č. 5). Veškeré protokoly o měření jsou na přiloženém CD.



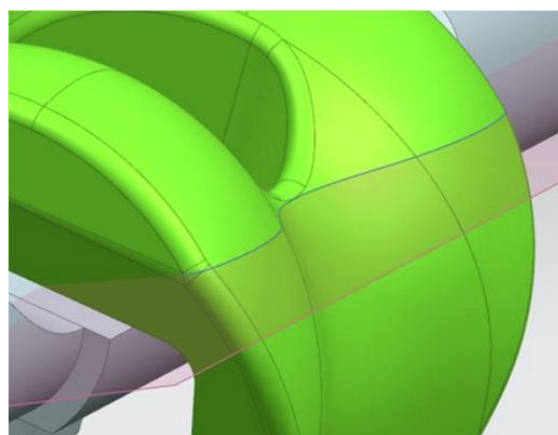
Obr. 32 Rozmístění řezů na součásti pro drsnost povrchu

Geometrická přesnost

Dalším hlavním parametrem vyhodnocení experimentu je geometrická přesnost broušené plochy. Tato přesnost je měřena v jednotlivých řezech na součásti (Obr. 33), kdy každý řez je definován pomocí 14 bodů, ve kterých je změřena vzdálenost od původního modelu součásti, neboli představitele ideálního tvaru a geometrické přesnosti. Minimální počet bodů je určen od pracovníků metrologické laboratoře tak, aby změřené hodnoty vypovídaly o geometrické přesnosti součásti. Tyto body jsou rovnoměrně rozmístěny po křivkách, které vznikly jako průsečnice rovin řezu a povrchu, jak je zobrazeno vpravo na obrázku (Obr. 34). Jednotlivé řezy jsou rozmístěny po součásti tak, aby byla proměřena celá součást. Měření je prováděno pomocí souřadnicového měřicího stroje CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator, kdy výstupem z měření je protokol vždy v daném řezu s naměřenými hodnotami o posunutí od modelu součásti neboli nulové hodnoty. Ukázka protokolu je umístěna v příloze (Příloha č. 6) a veškeré protokoly z měření jsou na přiloženém CD.



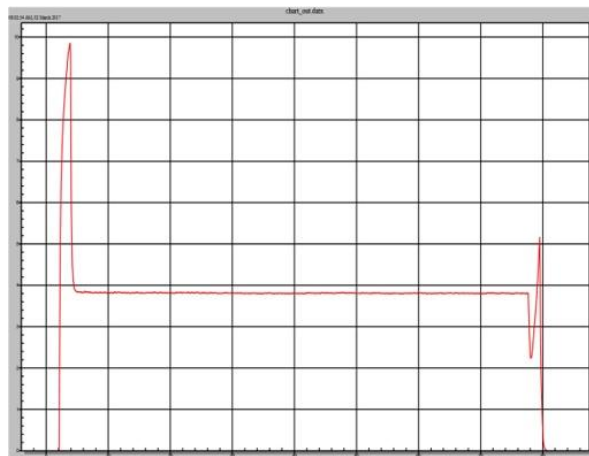
Obr. 33 Rozmístění řezů pro geometrickou přesnost



Obr. 34 Ukázka křivky, na níž je prováděno měření

Zatížení vřetene stroje

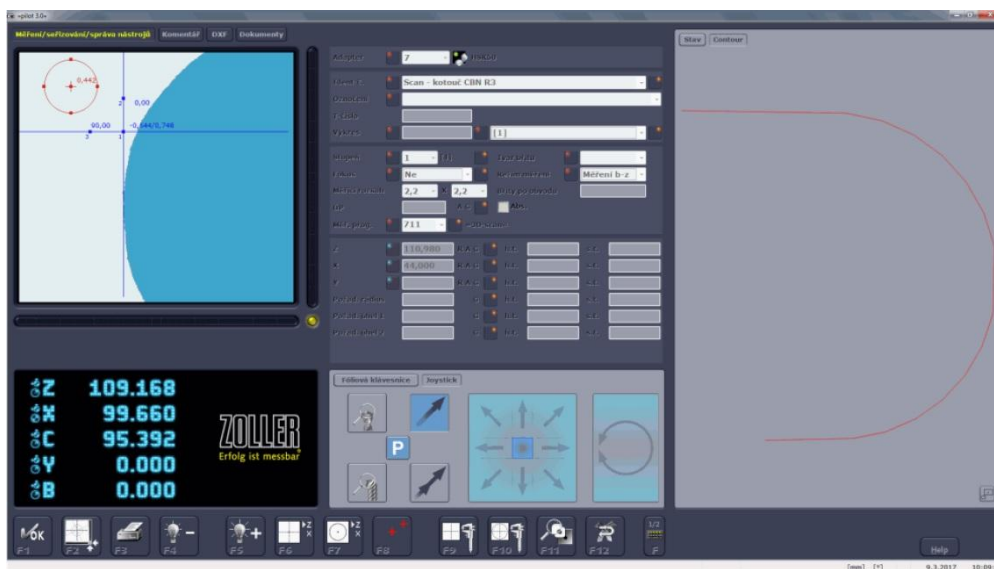
Jako poslední patří do hlavní skupiny vyhodnocení zatížení vřetene stroje. Jak již bylo zmíněno, měření probíhá přímo na nástrojařské brusce ANCA MX7. Kdy v softwaru iGrind je možno zaznamenávat procentuální zatížení vřetene do grafu. Ukázka grafu se zatížením vřetene při roztočení kotouče bez broušení je na obrázku níže (Obr. 35). Jelikož zatížení vzniká i od odstředivých sil při rotaci brusného kotouče, jsou tyto hodnoty změřeny a zaznamenány, aby bylo patrné jaký je nárůst zatížení při broušení této součásti za daných řezných podmínek. Z těchto grafů je pak možno vyhodnotit průběh zatížení a naleznout také kritická místa, ve nichž bylo zatížení skokově větší nebo maximální. Poté lze pomocí času dohledat místo na součásti nebo v programu, kde došlo ke zkoumanému úseku zatížení. Jednotlivé průběhy zatížení jsou umístěny na příloženém CD a pro ukázkou je jeden průběh zatížení vřetene v příloze (Příloha č. 7).



Obr. 35 Zatížení vřetene při roztočení kotouče

Opotřebení brusného kotouče

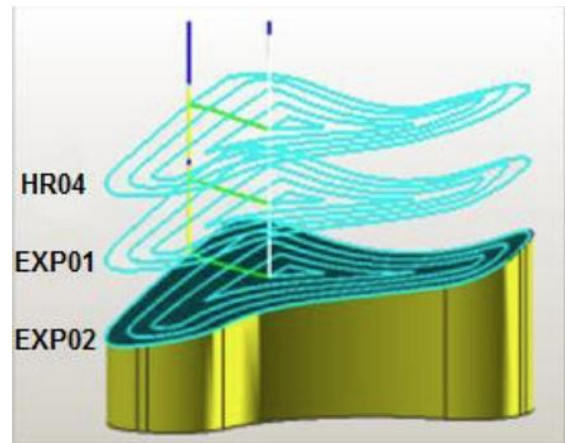
Mezi vedlejší sledované parametry patří opotřebení brusného kotouče, protože může vnést chybu do prováděného experimentu. Proto je opotřebení na průměru kotouče měřeno a korigováno pomocí průměrové korekce na nástroji v softwaru iGrind. Toto měření se provádí na univerzálním měřicím stroji Zoller genius 3s, kdy kromě změření průměru brusného kotouče je vygenerována křivka tvaru brusného kotouče. Prostředí pro měření je zobrazeno na obrázku (Obr. 36), kdy v levé části je zobrazena snímaná plocha a v pravé již vygenerovaná křivka tvaru kotouče. Toto měření se provádí po každém provedeném broušení, jelikož je potřeba provést experimentální broušení až po tzv. "zařízení brusného kotouče". Pokud by bylo provedeno dříve, hrozí zanesení chyby geometrické přesnosti do průběhu experimentu.



Obr. 36 Ukázka měření opotřebení brusného kotouče

Geometrická přesnost posunutí drah

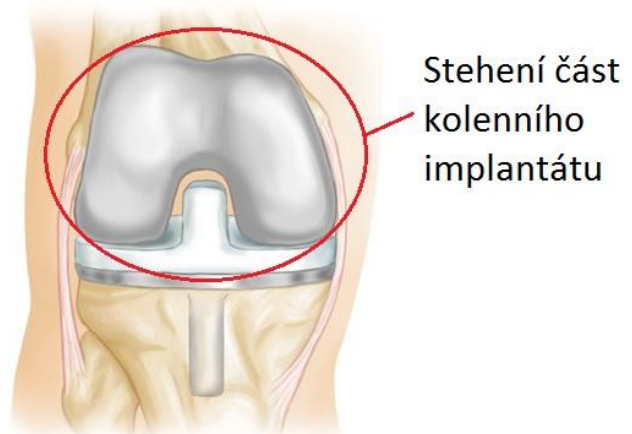
Posledním vyhodnocovaným parametrem je geometrická přesnost posunutí drah, která je zařazena do vedlejší skupiny vyhodnocovaných parametrů. Tento parametr se vyhodnocuje kvůli ověření vzdálenosti posunutí drah mezi jednotlivými experimenty. Na obrázku (Obr. 37) je znázorněno posunutí drah mezi jednotlivými operacemi o radiální krok, který je 0,05 mm. Jelikož je tento parametr ověřovací, je potřeba ho provést na dvojici broušení, která mají stejné řezné parametry. Jedná se proto o ověření posunutí drah mezi broušením s označením HR04 a broušením EXP01.



Obr. 37 Posunutí drah mezi broušeními

3.3 Část kolenního implantátu jako součást pro experiment

Jako vhodný představitel obecné tvarové plochy pro broušení je vybrána horní část kolenního implantátu, která se umísťuje na stehenní kost v lidském těle, jak je zobrazeno na obrázku (Obr. 38). Výroba kloubních implantátů je sama o sobě poměrně složitou operací, jelikož je potřeba zaručit vysoce kvalitní povrch a přesné rozměry součásti, použití speciálních slitin materiálů, které jsou zdravotně nezávadné a mají vysokou životnost. Z těchto a dalších důvodů je kolenní implantát vybrán jako představitel obecné tvarové plochy, kdy se na jeho poměrně složitém tvaru provedou experimenty ohledně vlivu řezných podmínek na kvalitu povrchu a zatížení vřetene při broušení obecných tvarových ploch. V kapitole (3.3), je představen model součásti kolenního implantátu, jeho úprava pro potřeby experimentu a veškeré činnosti spojené s přípravou experimentu.



Obr. 38 Horní část kolenního implantátu

3.4 Použité vybavení pro experiment

Experimentální testování vlivu řezných podmínek na kvalitu povrchu a zatížení vřetene při broušení bylo provedeno v halových laboratořích Regionálního technologického institutu. V této podkapitole je představeno použité zařízení pro provedení experimentu a jeho vyhodnocení.

3.4.1 Nástrojařská bruska ANCA MX7

Nástrojařská bruska ANCA MX7 je určena především pro broušení nástrojů od průměru 0,5 mm, z tohoto důvodu je tento stroj vybaven vřeteny se zvýšenou přesností a dalším příslušenstvím umožňujícím broušení přesných nástrojů. Tato bruska však zvládá i broušení jiných tvarů než řezných nástrojů, na které je prioritně určena, díky možnosti využití postprocesoru od výrobce stroje ANCA, který je určen pro PLM software NX od společnosti Siemens. Při použití tohoto rozšíření je možno plné využití této nástrojařské brusky na broušení libovolných tvarů součástí. Tohoto rozšíření bylo využito v rámci vytvoření programu pro navržený experiment. Technická specifikace stroje je k dispozici v příloze (*Příloha č. 3*).



Obr. 39 Nástrojařská bruska ANCA MX7

3.4.2 Brusný kotouč

Pro experiment je vybrán rádiusový brusný kotouč o $\varnothing 100$ mm, v šířce 6 mm a rádiusem R3 od výrobce TYROLIT s označením 1FF1B64C75B54 9644225, který je zobrazen na obrázku (*Obr. 40*). Jedná se o brusný kotouč, který má brusivo z kubického nitridu bóru a jeho zrna jsou spojena pryskyřičným pojivem. Jak je vidět na obrázku, nad označením je uvedena maximální řezná rychlost v_{\max} 63 m/s. V přepočtu na otáčky se jedná o maximální hodnotu 12030 ot/min. Na pravém obrázku (*Obr. 41*) je zobrazeno vyložení brusného kotouče na upínacím trnu spolu s kazetou na přívod technologické kapaliny na brusný kotouč.



Obr. 40 Rádiusový brusný kotouč 1FF1



Obr. 41 Sestava brusný kotouč + kazeta s přívodem chlazení

3.4.3 ZOLLER genius 3s

Jedná se o univerzální měřicí stroj pro měření řezných nástrojů. Slouží pro rychlé, plně automatické testování geometrie řezných nástrojů, nebo k ověření jednotlivých parametrů na nástroji. Tento stroj pomocí 3D násvitové a 2D průsvitové kameře jednoduše a rychle proměří více jak 40 parametrů nástroje s vysokou přesností v řádech mikrometrů. Veškeré změřené parametry je poté možno zdokumentovat na protokoly o měření, nebo lze vygenerovat různé formáty naskenovaných ploch, s kterými se dále dá pracovat v softwarech jako je NX, Catia, SolidCam, apod. Na tomto stroji bylo provedeno prvotní zaměření brusného kotouče a následně kontrolováno jeho opotřebení, kdy změřené parametry se před novým experimentem zadávaly v rámci korekce do řídicího systému stroje ANCA. Na obrázcích je zobrazen stroj ZOLLER genius 3s (Obr. 42).



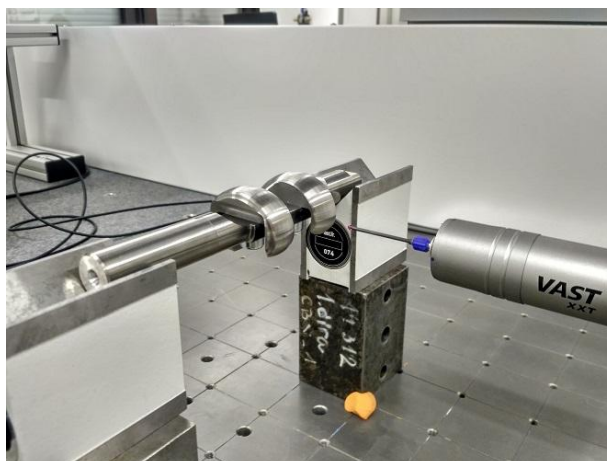
Obr. 42 ZOLLER genius 3s

3.4.4 CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator

Souřadnicový měřicí stroj od společnosti Carl Zeiss (Obr. 43) je určen pro vysokorychlostní skenování a maximální přesnost ve výrobním prostředí. Tento stroj je určen pro měření velmi přesných výrobků, to zaručuje jeho maximální dovolená chyba při měření délky pouze $0,9+L/350 \mu\text{m}$. Tento souřadnicový měřicí stroj je využit pro měření přesnosti broušené plochy na modelu kolenního implantátu. Přesnost je ověřována pomocí bodů na modelu součásti, které jsou určeny pomocí řezů. Na obrázku (Obr. 44) je zobrazeno měření součásti kolenního implantátu.



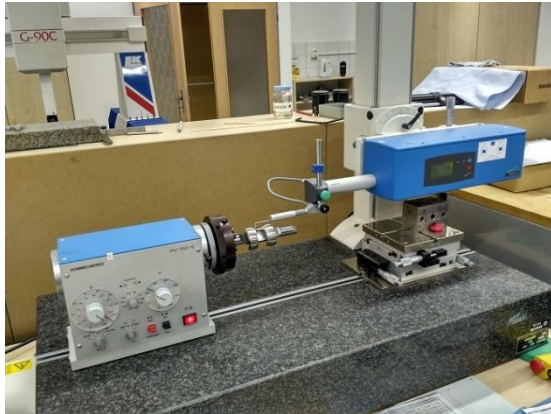
Obr. 43 CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator



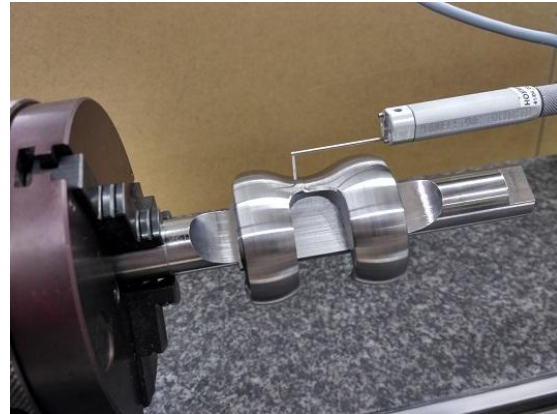
Obr. 44 Měření součásti Knee_implant

3.4.5 HommelEtamic T8000

Vysoce přesný profiloměr/drsnoměr od společnosti HOMMEL–ETAMIC T8000 (*Obr. 45*) je flexibilním řešením pro měření geometrických tvarů, drsnosti a vlnitosti povrchu jednotlivých součástek. Stavebnicový systém skladby tohoto stroje umožňuje vzájemné propojení různých typů posuvových jednotek, typů snímačů, sloupů a granitových desek. Na tomto drsnoměru je měřena drsnost povrchu součásti na předem určených místech, které se po dobu experimentu nemění z důvodu nezanesení chyby. Na obrázku (*Obr. 46*) v levé části je zobrazeno měření drsnosti součásti kolenního implantátu.



Obr. 45 Drsnoměr HommelEtamic T8000



Obr. 46 Součást Knee_implant měřená na drsnoměru

3.4.6 3D tiskárna EOS M290

3D tiskárna od společnosti EOS pod označení M290 (*Obr. 47*) pracuje na principu technologie DMLS¹⁴. Jedná o technologii, která vytváří výrobek po jednotlivých vrstvách, které jsou spékány za pomoci laserového paprsku. Díky této technologii je možno vytvářet součásti s libovolným vnějším i vnitřním tvarem, které by nebylo možno vyrobit konvenčním způsobem výroby. Pro výrobu součásti na 3D tiskárně se používají 3 materiály – nástrojová ocel MS1, Inconel 718 a nerezová ocel 316L. Tiskárna je použita pro vyrobení tvaru součásti pro experiment (*Obr. 48*).



Obr. 47 3D tiskárna EOS M290



Obr. 48 Součást po tisku

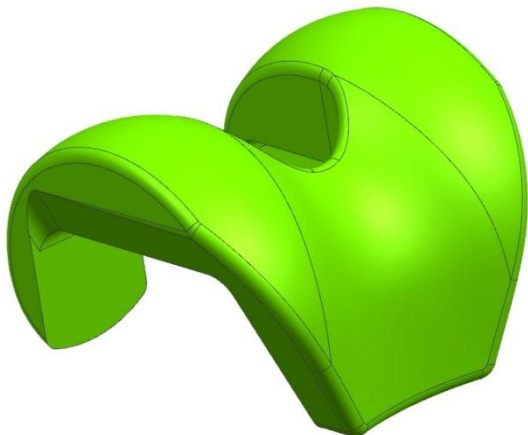
¹⁴ Zkratkou DMLS je myšlena technologie Direct Metal Laser Sintering (přímé kovové laserové spékání)

3.5 Příprava CAD/CAM dat pro experiment

Aby bylo možno provést navržený experiment, je potřeba nejdříve připravit data, která jsou nutná pro jeho provedení. V této kapitole je představen model součásti kolenního implantátu, který bude dále uváděn pod názvem Knee_implant, jeho konstrukční úpravy pro výrobu součásti a jeho upnutí na upínací přípravek. Dále pak je zde popsán návrh a konstrukce upínacího přípravku, vytvoření CAM programu na součást Knee_implant pro experiment a vytvoření modelu pro vyhodnocení kvality povrchu pro laboratoř dílenské metrologie.

3.5.1 Součást Knee_implant

Jak již bylo uvedeno na začátku této kapitoly, vybranou součástí pro navržený experiment je horní část kolenního implantátu pod názvem Knee_implant. Na obrázku (Obr. 49) je zobrazen původní model této součásti, který byl následně upraven pro potřeby upínacího přípravku a samotné výroby polotovaru na 3D tiskárně EOS M290. Na výrobu součásti byla použita nástrojová ocel s označením od dodavatele MS1. Jedná se o martenzitickou ocel s označením 1.2709 / DIN X3NiCoMoTi18-9-5. Úprava modelu součásti je provedena v rámci konstrukce dvou neprůchozích otvorů o hloubce 12 mm se závitem M8x1,25. Tyto otvory jsou umístěny na spodní rovinné straně modelu (Obr. 50). Tato rovinná plocha součásti slouží zároveň jako dosedací plocha pro upínací přípravek, proto je potřeba zaručit její vysokou rovinnost. Pro navržený experiment nebylo již dále potřeba součást více upravit, jelikož ostatní její parametry jsou vyhovující.



Obr. 49 Součást Knee_implant

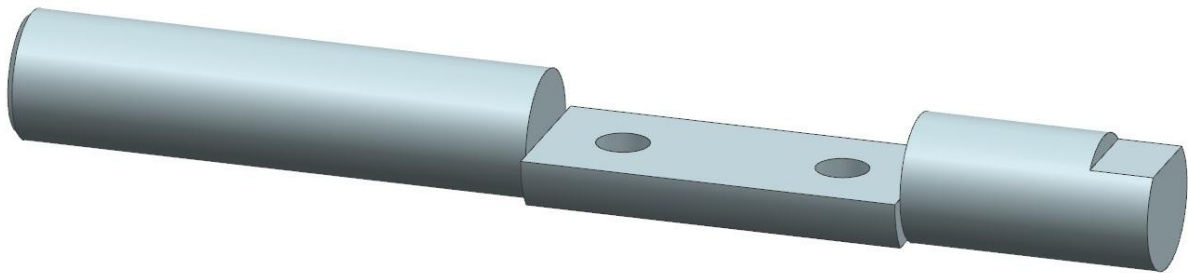


Obr. 50 Přidání dvou závitových otvorů na součást

3.5.2 Návrh a konstrukce upínacího přípravku pro součást Knee_implant

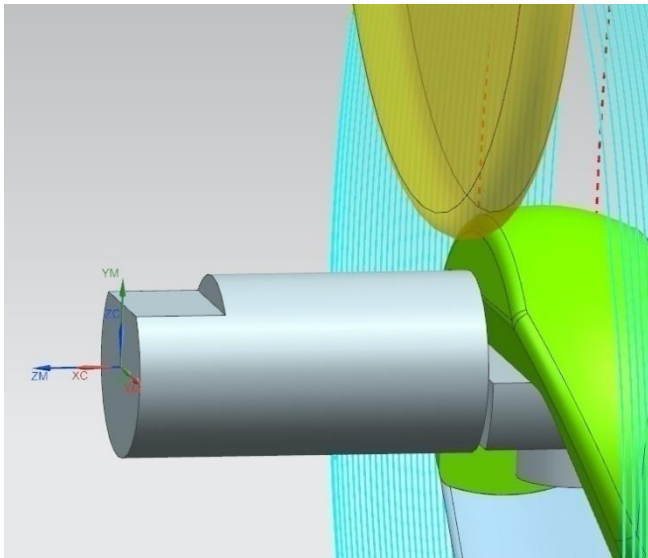
Aby součást bylo možno brousit na nástrojařské brusce ANCA MX7, je potřeba navrhnout vhodný upínací přípravek, jelikož upínací systém této brusky je dostupný pouze v provedení kleštin. Do těchto kleštin lze upínat pouze válcové součásti. Z možností upínání na nástrojařské brusce bylo patrné, že upínací přípravek musí být hřídelovitěho charakteru, protože upínací systém kleštin umožňuje upnout součásti s válcovou plochou v toleranci $\leq h6$, s největším průměrem 20 mm. Z těchto důvodů je navržen upínací přípravek, který je hřídelovitěho charakteru s osazením ve formě rovinné plochy. Na obrázku (Obr. 51) je zobrazena první varianta upínacího přípravku pro součást Knee_implant, která již v počátcích vypadala jako vhodná varianta pro upnutí součásti vzhledem k minimálním úpravám modelu součásti. Tato varianta upínacího přípravku se skládá ze 3 částí. První částí je upínací část o $\varnothing 20$ mm v toleranci h6 a o délce 82 mm, která slouží pro upnutí upínacího přípravku do

upínací kleštiny stroje, kdy minimální délka potřebná k upnutí tohoto upínače je 40 mm. Střední část je tvořena osazením o \varnothing 25 mm v délce 59 mm, na němž jsou vytvořeny dvě rovnoběžné plochy. Horní plocha, která je více posazena do vnitřní části upínače, neboli blíže k ose upínače, slouží jako dosedací plocha pro součást. Touto plochou zároveň prochází dvojice otvorů, které slouží pro upnutí součásti pomocí šroubů M8x1,25. Spodní rovnoběžná plocha je umístěna ve vzdálenosti 10 mm od horní rovinné plochy z důvodů zaručení dostatečné tuhosti. V přední části upínacího přípravku je umístěna referenční plocha, která je rovnoběžná s dosedací plochou, jež je umístěna ve střední části přípravku. Tato referenční plocha slouží pro nastavení nulové polohy osy A a k zaručení opakovatelnosti upnutí do stejné polohy na nástrojařské brusce ANCA MX7. Zároveň je určena jako referenční plocha pro zaručení opakovatelnosti umístění do stejné polohy při měření na souřadnicovém měřicím stroji a na drsnoměru.

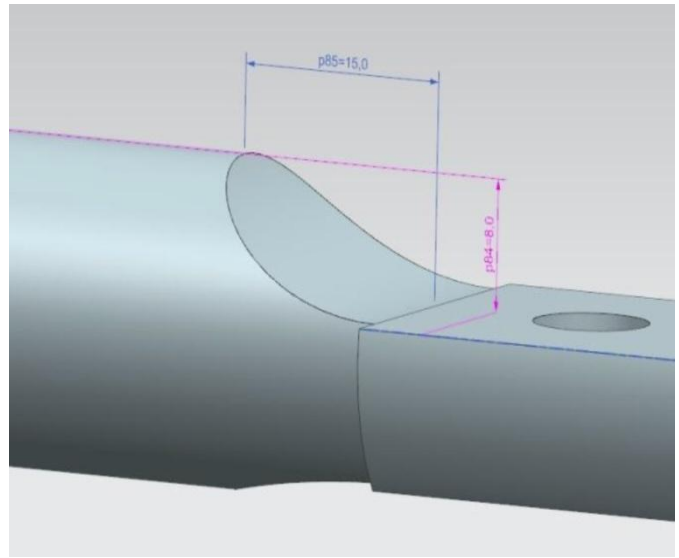


Obr. 51 První varianta upínacího přípravku

Při tvorbě CAM programu na broušení součásti Knee_implant byla zjištěna chybovost této varianty na obou bocích ve střední části upínacího přípravku. Jak je patrné z obrázku (Obr. 52), při broušení bočního radiusu se brusný kotouč může dostat příliš blízko k válcové ploše upínacího přípravku. Tento problém by mohl vést k následné kolizi brusného kotouče s upínacím přípravkem při experimentu. Jelikož se předpokládá, že kolenní implantát se bude brousit na více úběřů, při neodstranění tohoto problému by byl experiment limitován hodnotou maximální hloubky všech úběřů. Z tohoto důvodu byla navržena úprava stávajícího upínacího přípravku v jeho střední části, jelikož v ostatních oblastech tento přípravek vyhovoval požadavkům. Jedná se o nahrazení bočních stěn, určující střední část upínacího přípravku, za rádiusové náběhy na rovnoběžné plochy (Obr. 53), které jsou na ně tečně vázány. Zároveň s vytvořením těchto rádiusových náběhů došlo k odstranění ostrých rohů neboli vrubů, ve kterých by mohlo docházet ke koncentrování napětí a k následnému vzniku trhlin, které by mohly mít vliv na experimentální část této práce. Na takto navržený upínací přípravek byl vytvořen výrobní výkres, který je umístěn v příloze (Příloha č. 4) a tato varianta upínacího přípravku byla zadána do výroby. Po vyrobení upínacího přípravku bylo provedeno kontrolní upnutí součásti Knee_implant, jak je zobrazeno na obrázku (Obr. 54). Pro takto navržený upínací přípravek jsou vytvořena potřebná NC data pro provedení experimentu. Tvorba těchto NC dat je popsána v následujícím textu diplomové práce.



Obr. 52 Chybný návrh upínacího přípravku



Obr. 53 Rádusový náběh na střední část



Obr. 54 Vyrobená finální verze upínacího přípravku s upnutou součástí Knee_implant

3.5.3 Tvorba CAM programu pro součást Knee_implant

Jak již bylo uvedeno, v této části diplomové práce je popsána tvorba CNC programu v softwaru NX, který se nejdříve zaměřuje na popis tvorby sestavy součásti s upínacím přípravkem, následuje tvorba řídicí geometrie, pomocných ploch a tvorba CAM programu s vygenerováním NC dat.

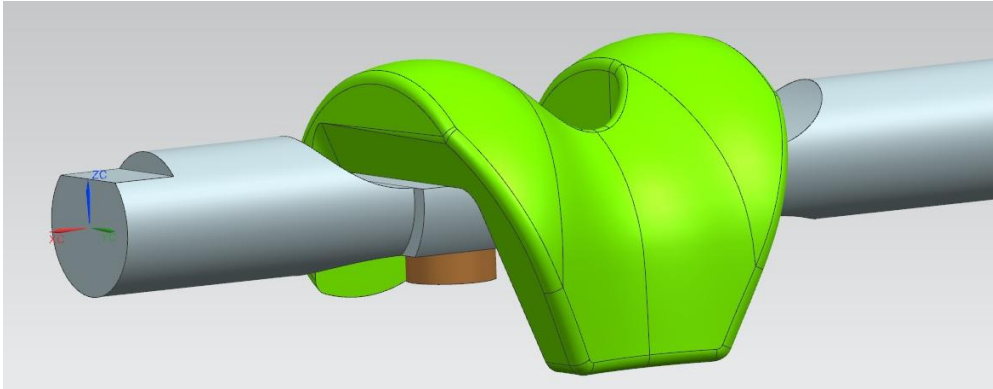
Tvorba sestavy

Pro co nejpřesnější tvorbu programu, aby bylo možno vyhnout se následným kolizím při fyzické výrobě této součásti a obecně jakékoliv součásti, je vhodné, aby virtuální¹⁵ prostředí softwaru bylo co nejvíce podobné reálné¹⁶ výrobě. Proto se doporučuje nevytvářet program pouze s modelem obráběné součásti, ale i s upínači a různými přípravky, které jsou v pracovním prostoru stroje a jsou použity při výrobě, aby se zabránilo již v počátku možným kolizím nástroje. Nejvýhodnější variantou je pak ta, kdy je použit i kinematický model daného

¹⁵ Virtuálním prostředím nebo modelem se zde myslí prostředí nebo model (sestava), která je vytvořená v softwaru NX

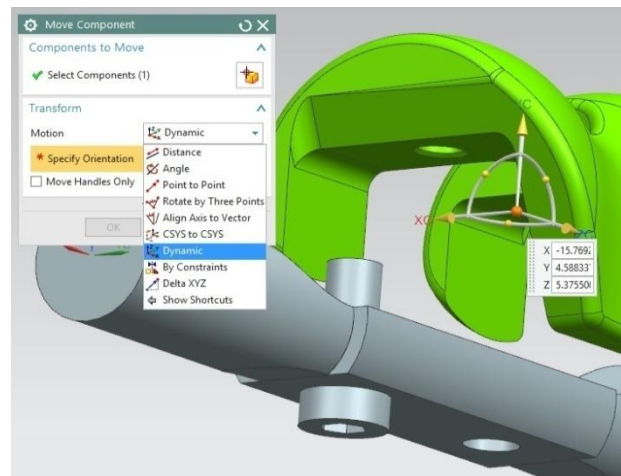
¹⁶ Reálnou výrobou se zde myslí sestava součásti s upínacím přípravkem, která je fyzicky vyrobena

stroje, na němž se tato součást vyrábí. To může předejít možným kolizím nástroje se strojem. V tomto případě bohužel není k dispozici v softwaru NX kinematický model nástrojařské brusky ANCA MX 7, takže virtuální prostředí se skládá z modelu součásti a upínacího přípravku se šrouby, jak je zobrazeno na obrázku (Obr. 55).



Obr. 55 Sestava modelů součástí

Při tvorbě sestavy je potřeba jednotlivé komponenty umístit tak, jak bude vypadat reálná sestava. K tomu je možno použít dva způsoby – buď spojením jednotlivých komponentů přes vazby tak, aby nedošlo k jejich posunutí při pohybu. Tato funkce je často používána ve většině CAD softwarech pro tvorbu sestav. Nebo druhý způsob, který je použit při tvorbě sestavy v této práci, kdy se jedná o vytvoření sestavy pomocí funkce „*move component*“. Jednotlivé komponenty jsou posunuty do přesných poloh pomocí různých možností posunutí, jak je zobrazeno na obrázku (Obr. 56). Následně je použita funkce „*Wave geometry linker*“, která vytvoří kopie jednotlivých modelů sestavy v daných polohách, se kterými se již nedá pohnout a jakákoliv jejich úprava se neprojeví do jejich zdrojových modelů. To znamená, že jakákoliv úprava, která je posléze vytvořena, je pouze v této sestavě a zdrojové modely zůstávají v prvotním stavu. Ale pokud dojde k úpravě těchto zdrojových modelů dochází k automatické úpravě vytvořených kopií, jelikož jsou na ně vázány. Pro takto definovanou sestavu je možno vytvořit pomocné geometrie, které jsou pak dále použity při tvorbě CAM programu.

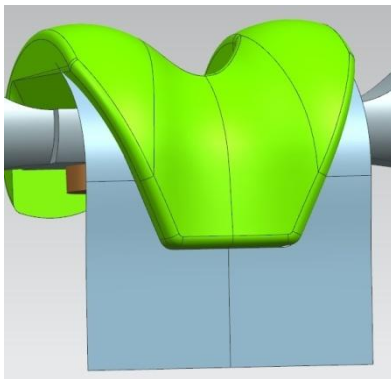


Obr. 56 Požití funkce Move Component

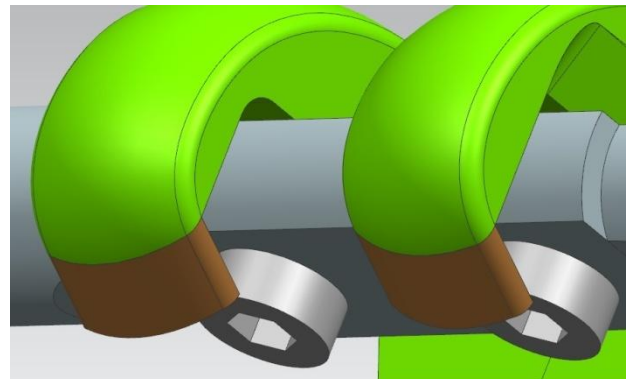
Tvorba pomocné a řídicí geometrie

Jak již bylo uvedeno v kapitole (2.2.2 *NX 9.0 s postprocesorem ANCA*), pro tvorbu CAM programů v softwaru NX se využívá hodně pomocných ploch pro navedení/vyvedení brusného kotouče do/z místa řezu a definici pohybu v místech, která uživatel potřebuje obrobit. Proto je potřeba i na této sestavě vytvořit pomocné plochy, které zaručí lepší průběh programu, jistotu obrobení všech částí, které jsou potřebné, a minimalizaci počtu možných kolizí, které by při broušení mohly nastat, jelikož, jak již bylo uvedeno, součást je broušena pouze na vnější obalové ploše, která je ohraničena bočními rádiusy. Proto jsou vytvořeny

pomocné plochy, které navedou brusný kotouč do místa řezu tak, aby nedošlo k neobrobení nebo možné kolizi při broušení. První z těchto pomocných ploch je v přední části součásti (*Obr. 57*), kdy se jedná o plochu, která zabraňuje kotouči, aby najížděl při broušení pod součást a zároveň aby součást byla obrobena i na jejich koncích. Ke konstrukci všeobecně těchto ploch se používají standardní konstrukční funkce pro tvorbu ploch, kdy se využívá jednotlivých částí modelu tak, aby tyto plochy byly co nejvíce vhodně konstrukčně provedeny. Další pomocnou plochou, kterou bylo potřeba vytvořit, je plocha na dvojici „pacek“, které jsou na opačné straně, než byla předchozí pomocná plocha. Dvojice pomocných ploch, které jsou zde vytvořeny (*Obr. 58*), slouží stejnému účelu jako předchozí pomocná plocha. Tyto pomocné plochy se skládají ze dvou bočních rádiusů a tvarové prostřední plochy, které jsou tečně navázány na součást.

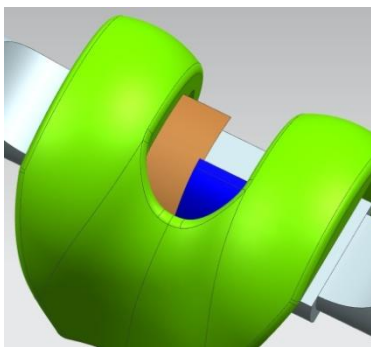


Obr. 57 První pomocná plocha

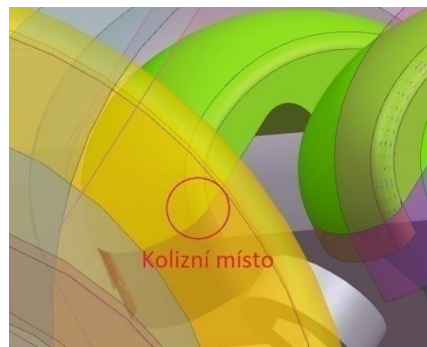


Obr. 58 Dvojice pomocných ploch

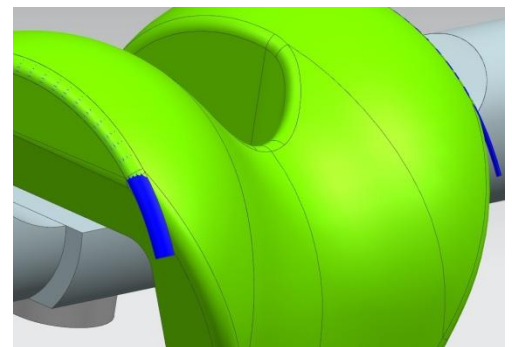
Dále jsou vytvořeny pomocné plochy pro prostřední část součásti, kdy je vytvořena dvojice ploch pro zaručení bezpečného vyjetí z místa řezu a také k odstranění kolize, která zde vznikala s upínacím přípravkem a s bokem součásti. Na obrázku (*Obr. 59*) je hnědou barvou vyznačena první pomocná plocha, která byla prvotně navržena přes celé vybrání. Vzhledem k důsledkům vzniklé kolize v druhé polovině vybrání bylo potřeba upravit konstrukci pomocné plochy z důvodů změny vybrání ploch při tvorbě programu. Kolize, která zde vznikala, je zobrazena na obrázku (*Obr. 60*), kdy se jednalo o kolizi boku nástroje s bokem součásti. Úpravy vedoucí k jejímu odstranění jsou popsány dále v textu, který je zaměřen přímo na tvorbu CAM programu pro tuto součást. Posledními pomocnými plochami, které zde jsou vytvořeny, jsou prodloužení bočních rádiusů (*Obr. 61*), která slouží pro bezpečný nájezd a výjezd brusného kotouče z místa řezu.



Obr. 59 Pomocné plochy ve středu

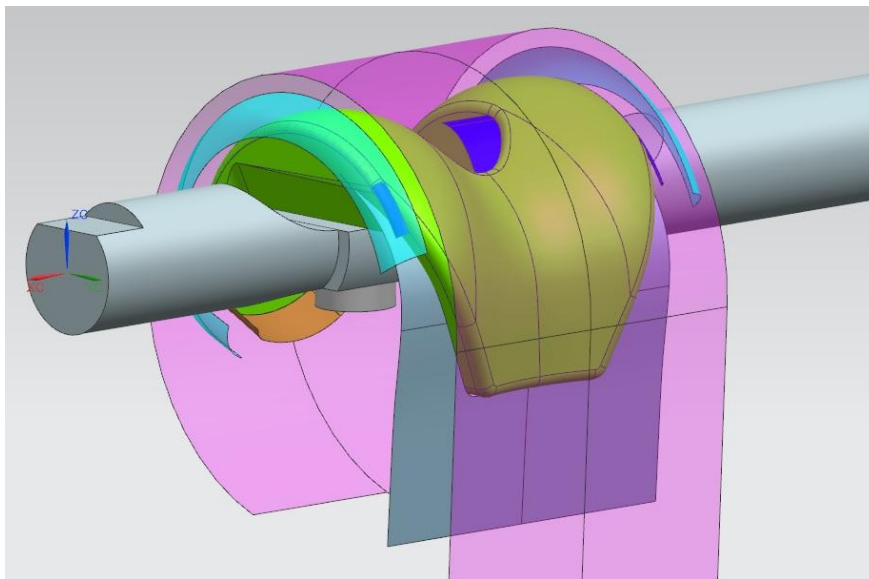


Obr. 60 Kolize boku nástroje se součástí



Obr. 61 Rádiusové pomocné plochy

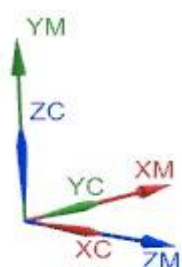
Poslední přípravnou činností před samotnou tvorbou CAM dat, je potřeba vytvoření tzv. „řídící plochy“, na níž jsou promítány vektory, které jsou kolmé na součást a vytvoří mapu bodů. Tato mapa bodů slouží pro generování drah nástroje. Jedno z pravidel pro správné vytvoření programu říká, že řídící geometrie, kterou je plocha, musí být co nejjednodušší. To znamená, že je potřeba vytvořit takovou plochu řídící geometrie, která má tvar základního tělesa nebo přímo rovinné plochy. Z těchto možností je pro daný tvar nejnvýhodnější vytvořit neúplnou válcovou plochu pro horní vnější obalovou plochu součásti Knee_implant, která se brousí (označeno průhlednou růžovou barvou na Obr. 62) a dvě řídící plochy pro boční radiusy, které mají tvar jedné čtvrtiny válce (označeno průhlednou světle modrou barvou na Obr. 62). Pro takto upravenou sestavu je možno vytvořit CAM program, kdy jeho tvorba je popsána níže v textu.



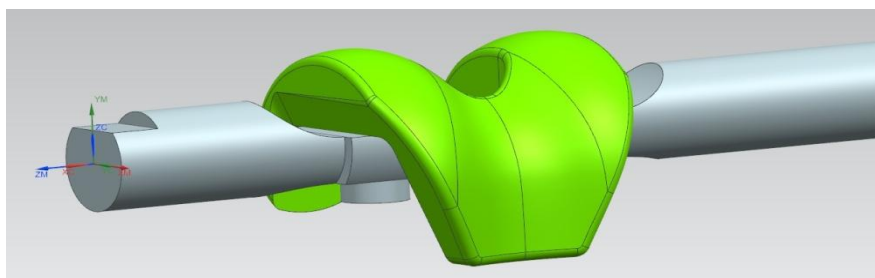
Obr. 62 Řídící geometrie ve formě ploch

Tvorba CAM programu

Před samotnou tvorbou strategie broušení je potřeba provést správnou definici souřadného systému. Na strojích od společnosti ANCA je programový souřadný systém, který je zároveň brán jako nulový bod obrobku, rozdílný od souřadného systému stroje, pro který platí pravidlo pravé ruky. Programový souřadný systém, který je označen jako „MSC Master“, je pootočen o 90° kolem osy Z a následně kolem osy Y. Pro lepší pochopení je zde uveden obrázek (Obr. 64), na němž je označen souřadný systém stroje pod písmeny XC, YC, ZC a nově definován souřadný systém "MCS", který je označen písmeny XM, YM, ZM. Při definici souřadného systému "MCS" je potřeba dodržet pravidlo, že tento systém musí být umístěn v ose rotace upínací kleštiny na stroji a obráběná součást musí být mezi upínací kleštinou a souřadným systémem "MCS". V tomto případě je souřadný systém umístěn na začátek upínacího přípravku, kde je umístěna referenční plocha, a do osy rotace tohoto přípravku, jelikož je shodný s osou rotace upínací kleštiny, jak je zobrazeno na obrázku (Obr. 65).

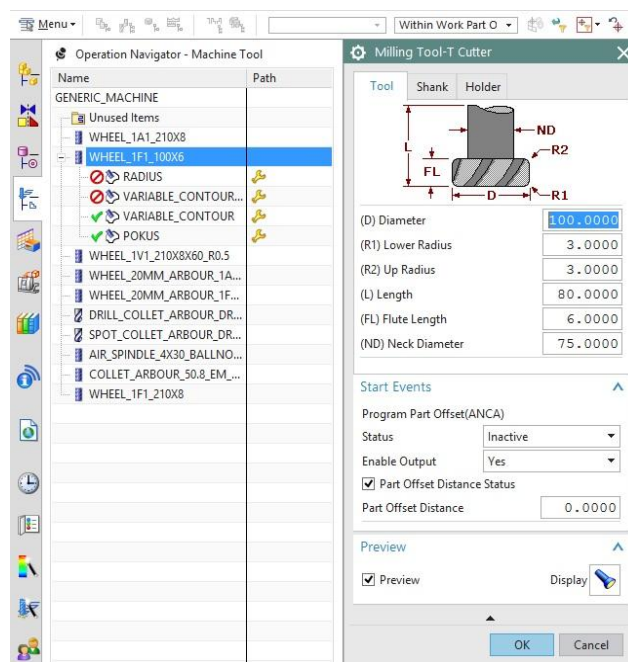


Obr. 64 Souřadný systém MCS



Obr. 65 Umístění souřadného systému MCS na sestavě

Po definování nulového bodu je potřeba provést definici nástroje, kterým je v tomto případě rádiusový brusný kotouč. Definici brusného kotouče je možno provést vytvořením nového nástroje přes funkci "Create tool"¹⁷, v níž je možno definovat veškeré potřebné parametry řezného nástroje. S postprocesorem od společnosti ANCA je tato definice upravena tak, aby bylo možno vytvořit jako řezný nástroj brusný kotouč. Proto jsou některé funkce uzamčeny, aby výsledný nástroj byl plně funkční a nedošlo k nastavení některých parametrů, které by zabraňovaly správnému výpočtu řezných drah pro nově definovaný nástroj. Zároveň s tímto postprocesorem jsou automaticky vygenerovány základní brusné nástroje, které lze používat a u nichž je možná úprava jejich parametrů. Nabídka předdefinovaných nástrojů je v záložce „Machine Tool View“¹⁸ zobrazené v levé části obrázku (Obr. 63), do které se ukládají i nově vytvořené nástroje. V této záložce je také vidět, který nástroj je použit na jakou operaci. Jak bylo uvedeno, je možno si vybrat i z předdefinovaných nástrojů. Tato metoda tvorby nebo spíše úpravy nástroje je použita v této práci. Úprava parametrů nástroje tak, aby odpovídaly zvolenému brusnému kotouči, je zobrazena na pravé části obrázku (Obr. 63), kdy je patrné, že ke správné definici nástroje je potřeba zadat průměr brusného kotouče $D = 100$ mm, boční rádiusy $R1, R2 = 3$ mm a řeznou délku $FL = 6$ mm. Tyto rozměry odpovídají použitému brusnému kotouči.

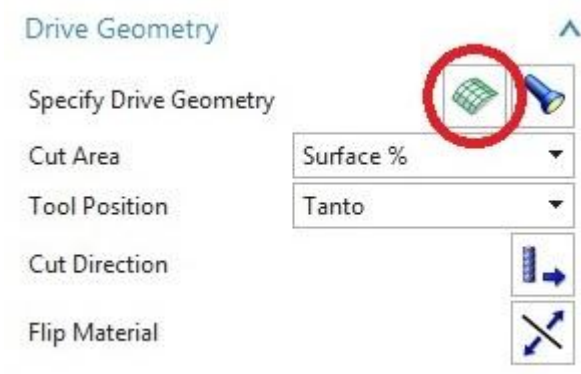


Obr. 63 Definice řezného nástroje v NX

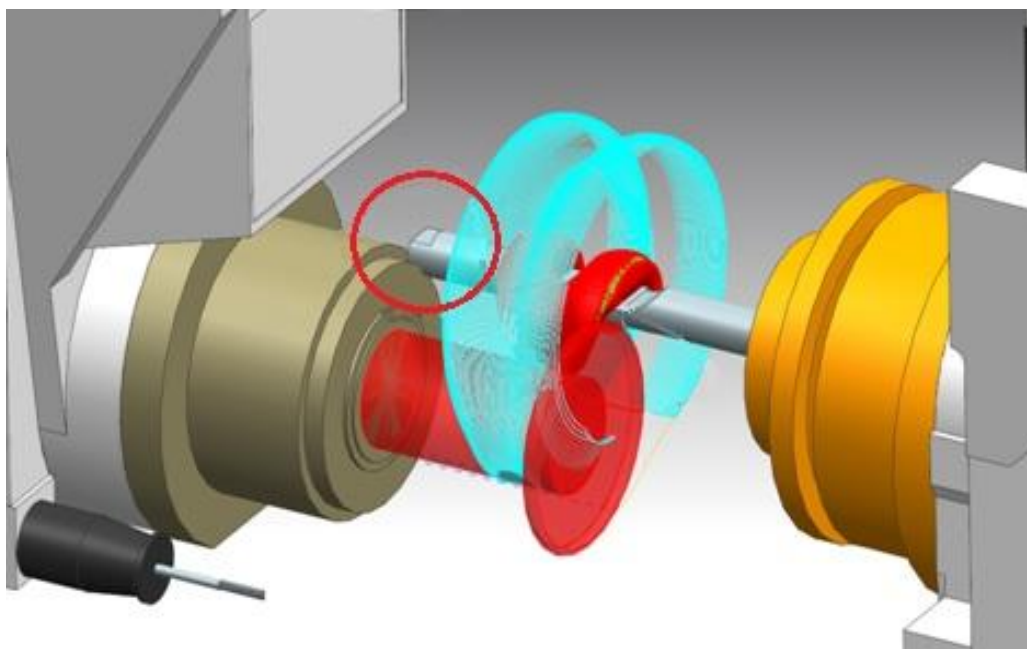
¹⁷ Create tool znamená v překladu vytvořit nástroj a používá se pro konstrukci řezných nástrojů a držáků

¹⁸ Machine Tool View znamená v překladu zobrazení obráběcích nástrojů.

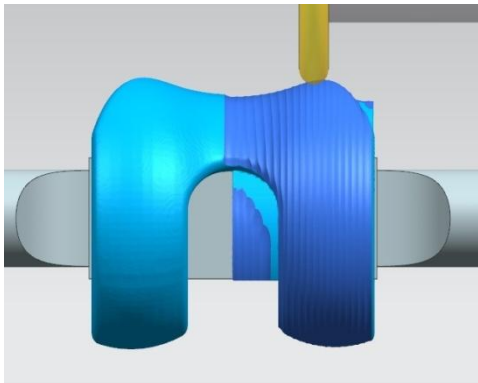
Jakmile je nástroj definován správně je možné začít s tvorbou samotné technologie broušení, před níž je však zapotřebí definovat obrobek, upínač a obráběné plochy. Definování těchto ploch je provedeno přímo v dialogovém okně operace (Obr. 66). Pak již záleží na zvolené metodě řídicí geometrie, jestli se bude jednat o „*conture profile*“, „*streamline*“, apod. V tomto případě byla zvolena metoda *Surface Area*, která využívá řídicí plochy pro vytvoření dráhy nástroje. Tyto plochy byly popsány v předchozí části textu. Pro správné obrobení jednotlivých ploch bylo potřeba rozdělit program na boční rádiusy a středovou část, která je rozdělena v polovině součásti na přední a zadní část. Rozdělení programu na tyto základní části je z důvodu dodržení konstantní vzdálenosti řídicích drah nástroje u rádiusových ploch, která při standardním nastavení nebyla dodržena. U středové části je toto rozdělení z důvodu vzniklé kolize nástrojového vřetene s upínacím přípravkem, kdy tato kolize je zobrazena na obrázku (Obr. 67). Z tohoto důvodu musel být program rozdělen na dvě části podle vyklopení kotouče v rotační ose C, kdy první polovina součásti je broušena bez vyklopení kotouče a druhá polovina již s vyklopením kotouče o 30°. Na levém obrázku (Obr. 68) je zobrazeno broušení první poloviny součásti, které probíhá bez vyklopení vřetena, neboli osa nástroje je rovnoběžná s osou kleštiny. Na pravém obrázku (Obr. 69) je znázorněno broušení s vyklopením vřetena o 30°, kdy při tomto vyklopení probíhalo broušení druhé poloviny součásti. Pro takto zvolenou technologii již stačilo nastavit jednotlivá dialogová okna operací, které jsou použity pro vytvoření programu pro broušení součásti.



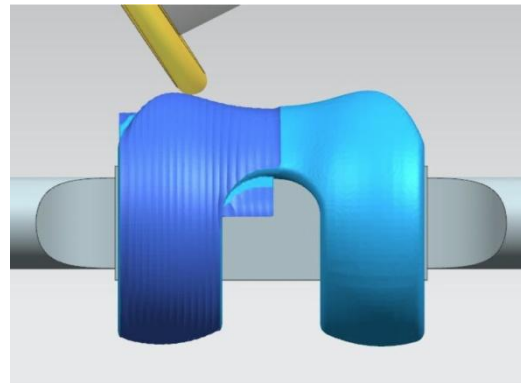
Obr. 66 Definice obrobku, upínačů a obráběné plochy



Obr. 67 Kolize vřetena s upínačem



Obr. 68 Broušení bez vyklopení

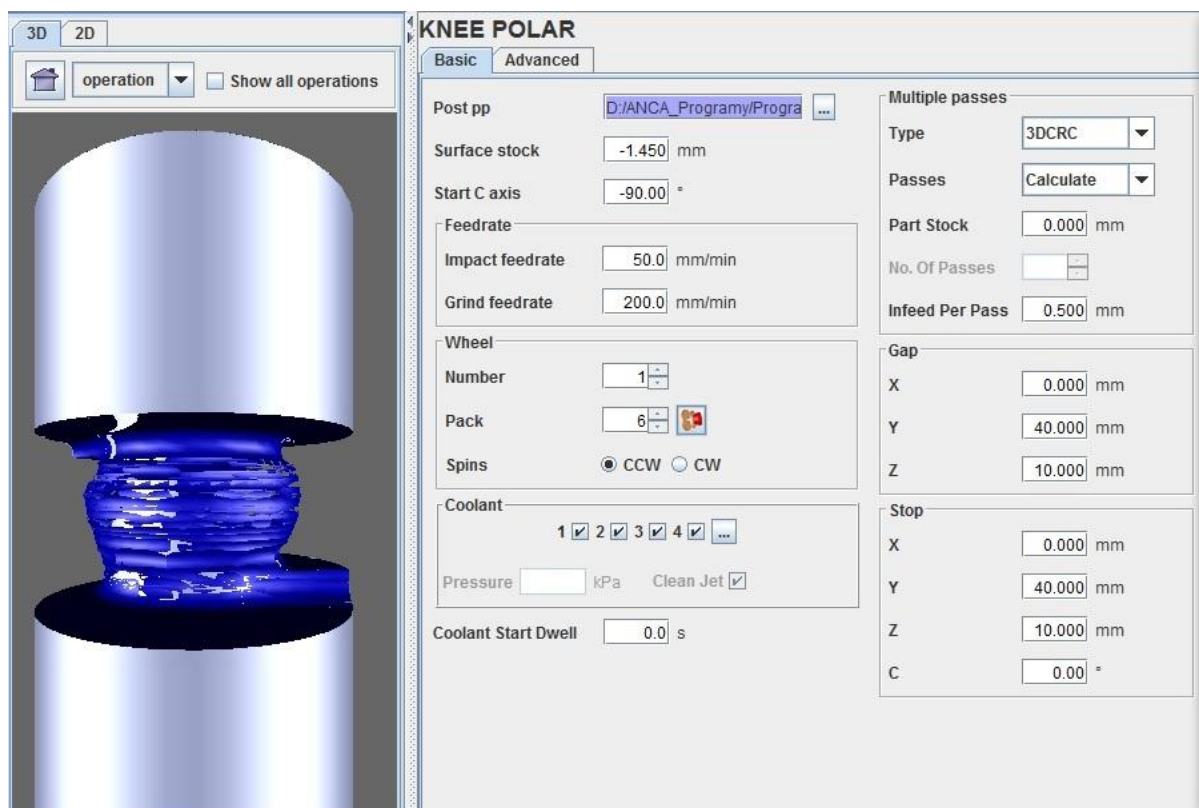


Obr. 69 Broušení s vyklopením o 30°

Generování NC dat programu Knee_ipmlant a jeho úprava v softwaru iGrind

Po vytvoření NC programu v softwaru NX bylo potřeba tato data vygenerovat do vhodného NC kódu, který je čitelný pro řídicí software stroje. K tomu slouží dva postprocesory, které jsou umístěny v softwaru NX a jejich rozdíl je popsán v kapitole 2.2.4. Pro programy, kde nebylo vyklopení vřetene, je použit postprocesor „*anca_tx7_polar_metric_v1.0*“, který zanechává osu C ve výchozí poloze, neboli osa brusného kotouče je rovnoběžná s osou upínací kleštiny. Pro programy s vyklopením vřetene o 30° je použit postprocesor „*Anca_tx7_5-axis_metric_v1.0*“, který umožňuje pohyb rotační osy C. Vygenerovaná data jsou umístěny v plné délce na CD a také jejich ukázky jsou umístěny v příloze (Příloha č. 1, Příloha č. 2).

Takto vygenerovaná NC data jsou poté importována do softwaru iGrind, v němž je ale potřeba nastavit řezné parametry pro každý experiment a bezpečnou vzdálenost pro nájezdy a výjezdy brusného kotouče při začátku a konci programu. Na obrázku (Obr. 70) je zobrazeno dialogové okno pro nastavení konkrétní části programu pro experiment EXP08 při broušení bez vyklopení vřetene (osa C = 90°). Dále jsou v textu jsou popsány základní potřebné kroky k nastavení tohoto dialogového okna. Pod označením „*post pp*“ se skrývá cesta k souboru s vygenerovanými NC daty ze softwaru NX. Dále je zde nastaveno posunutí od výchozího modelu, které je zde -1,450 mm, označené jako „*surface stock*“. V okně „*Start C axis*“ se nastavuje výchozí poloha osy C brusného kotouče při nájezdu v bezpečné vzdálenosti. V rámečku s označením „*Feedrate*“ je nastavována posuvová rychlost pro nájezdy a výjezdy brusného kotouče („*Impact feedrate*“) a velikost posuvové rychlosti při broušení („*Grind feedrate*“). V tabulce pod touto, označenou („*Wheel*“), se nastavuje pozice brusného kotouče na trnu („*Number*“), v zásobníku s nástroji („*Pack*“) a smysl otáčení brusného kotouče („*Spins*“), jestli je ve směru hodinových ručiček „*CW*“ nebo v protisměru „*CCW*“. Poslední nastavení je zde provedeno pro bezpečnou vzdálenost nájezdu v tabulce („*Gap*“) a odjezdu („*Stop*“), kdy v posledním okně je možno nastavit pozici osy C při odjezdu v bezpečné vzdálenosti do výchozího bodu stroje. V tomto případě je ponechána na hodnotě 0. Řezná rychlost se poté nastavuje v dialogovém okně brusného kotouče, který slouží i pro definování jeho profilu, rozměrů a velikosti vyložení na trnu. V dialogovém okně se také nastavuje hodnota průměrové korekce změnou průměru brusného kotouče. Po této definici je již program zcela připraven pro nahrání do nástrojařské brusky a odzkoušení tohoto programu na stroji. Praktická část provedení tohoto experimentálního broušení je uvedena v následující kapitole (4.1 *Experimentální broušení součásti Knee implant*).



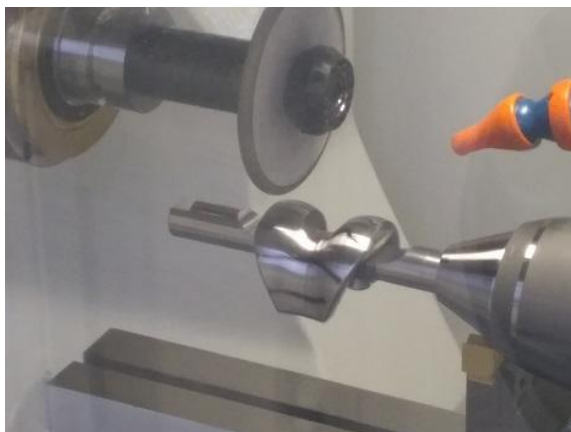
Obr. 70 Nastavení dialogového okna pro experiment EXP08 v softwaru iGrind

4 Praktické provedení a ověření včetně vyhodnocení výsledků

V předchozí kapitole bylo vysvětleno, jaké jsou vstupní parametry pro experiment, kdy v této kapitole jsou vyhodnoceny jejich výstupy. Nejdříve je zde popsáno praktické provedení experimentu. Aby bylo možno provést tento experiment, byl vytvořen program pro broušení na nástrojařské brusce ANCA MX7. Tvorbou tohoto programu je uvedena v předchozí kapitole a ukázková část NC kódu je přiložena v příloze (*Příloha č. 1, Příloha č. 2*). Celý program je umístěn na přiloženém CD. Na základě tohoto programu proběhlo experimentální broušení podle navrženého experimentu.

4.1 Experimentální broušení součásti Knee_implant

Jelikož se jedná o prvotní broušení tohoto druhu na této brusce, je potřeba před spuštěním programu provést i kontrolu na stroji v tzv. Dry run mode. Tento režim slouží pro kontrolu, zda nedochází ke kolizím mezi jednotlivými částmi v pracovním prostoru stroje u nově vygenerovaných NC dat. Kontrola probíhá ve dvou stupních, vždy v ručním režimu, bez použití technologické kapaliny a při vypnutých otáčkách brusného kotouče. První stupeň kontroly probíhá bez umístění součásti s upínacím přípravkem, kdy se kontroluje, zda nedochází ke kolizím mezi jednotlivými částmi stroje. Při druhém stupni kontroly je již do upínací kleštiny upnuta součást s upínacím přípravkem, jak je zobrazeno na obrázku (*Obr. 71* **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). V tomto stupni však nedochází ke kontaktu brusného kotouče se součástí, jelikož je nastaveno posunutí drah od součásti o hodnotu 10 mm, protože tento stupeň kontroly probíhá za stejných podmínek jako první a mohlo by tak dojít k poškození brusného kotouče, součásti, ale i jednotlivých částí stroje. U tohoto stupně se především kontroluje, zda nedochází k nebezpečným nebo nepředpokládaným pohybům brusného kotouče a součásti, které by mohly vést ke kolizi při experimentálním broušení. Jakmile proběhne tato kontrola a vše je v pořádku, je možno začít s broušením této součásti. Tato kontrola je důležitá, jelikož při broušení je použita technologická kapalina, a jak je patrné z obrázku (*Obr. 72*), viditelnost v pracovním prostoru stroje je minimální.



Obr. 71 Dry run mode 2. stupeň kontroly



Obr. 72 Viditelnost v pracovním prostoru při broušení

Před provedením experimentálního broušení je potřeba povrch součásti vyhrubovat tak, aby byla zajištěna konstantní hloubka třísky při experimentálním broušení. Kdyby nebyl takto povrch připraven, mohlo by dojít k zanesení chyby do prvního experimentu. Tímto vyhrubováním se zároveň odstranily nepřesnosti, které vznikly od upnutí součásti na upínací přípravek, a došlo k odstranění nerovností na povrchu, které vznikly při odstraňování podpěr

po 3D tisku součásti. Hrubovací broušení je rozděleno na dvě části, a to na hrubování HR00, kdy hloubka odebrané vrstvy je 0,1 mm s bočním posuvem definovaným jako maximal scallop height 0,1 mm. Takto je odebráno 10 vrstev od povrchu součásti do hloubky 1 mm. Výsledný povrch je zobrazen na obrázku (Obr. 73). Jelikož bylo potřeba připravit povrch na následné broušení, poslední hrubovací operace HR01 je provedena za stejných řezných podmínek jako první experimentální broušení EXP01. Pro porovnání rozdílů povrchů je součást po tomto broušení zobrazena na obrázku (Obr. 74).



Obr. 73 Součást po broušení HR00

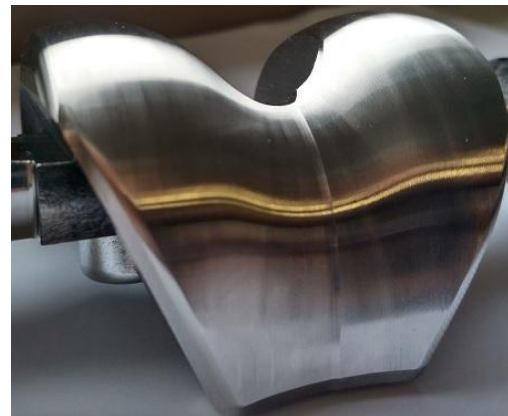


Obr. 74 Součást po broušení HR01

Jakmile je takto připraven povrch součásti, je možno začít s experimentální, broušením podle navrženého experimentu, kdy jeho hodnoty jsou uvedeny v předchozí kapitole v tabulce (Tabulka 6). Jednotlivé experimenty jsou navrženy tak, aby vždy byly provedeny všechny kombinace hodnot vstupních parametrů experimentu bez nutnosti změny programů mezi sebou, jelikož pro změnu hodnoty „maximal scallop height“ je potřeba změnit hodnoty posunutí drah v softwaru NX. Z tohoto důvodu je pak experimentální broušení prováděno ve dvou programech. V prvním programu Knee_implant_sc0,005 pro experimenty HR01 a EXP01 až EXP04 a v druhém programu Knee_implant_sc0,001 pro experimenty EXP05 až EXP08. Výsledné povrchy pro porovnání jsou zobrazeny na obrázcích (Obr. 75, Obr. 76).



Obr. 75 Součást po broušení s hodnotou $sc = 0,005$ mm



Obr. 76 Součást po broušení s hodnotou $sc = 0,001$ mm

Jak již bylo zmíněno, pro každou změnu hodnoty „maximal scallop height“ jsou vygenerována NC data ze softwaru NX, je potřeba provést i kontrolu v režimu „Dry run

mode“. Je zde totiž možnost, že by mohlo dojít ke kolizi, která byla přehlédnuta při kontrolní simulaci těchto NC dat v softwaru iGrind.

4.2 Vyhodnocení drsnosti povrchu

Po každém experimentálním broušení dle navrženého experimentu je provedeno změření drsnosti povrchu na profiloměru/drsnoměru HommelEtamic T8000. Součást je stále upnuta na upínacím přípravku, jenž slouží i pro upnutí na drsnoměr k zajištění opakovatelnosti nastavení jednotlivých řezů. Výstupem z každého měření je několik měřicích protokolů s hodnotami drsnosti povrchu Ra, Rq a Rz. Jednotlivé měřicí protokoly jsou umístěny na příloženém CD. Pro ukázkou je vybrán z experimentu EXP01 a EXP05 jeden protokol, který je umístěn v příloze (Příloha č. 5).

4.2.1 Drsnost povrchu pro experimenty s hodnotou $sc_{0,005}$

První porovnání drsnosti povrchu v závislosti na řezných parametrech jsou pro experimenty, které mají hodnoty "maximal scallop height" $sc = 0,005$ mm, jelikož změnou tohoto parametru dojde ke změně drsnosti povrchu. Z jednotlivých protokolů o drsnosti měření jsou vypočítány průměrné hodnoty této drsnosti, která je uvedena pro jednotlivé experimenty v tabulce (Tabulka 7) s hodnotami řezných parametrů a s označením experimentu.

Test	sc [mm]	a_e [mm]	v_c [m/s]	v_f [m/min]	Průměrná hodnota Ra [μ m]	Průměrná hodnota Rz [μ m]	Průměrná hodnota Rq [μ m]
EXP01	0,005	0,05	30	150	1,79	9,75	2,18
EXP02			40	150	1,9	10,53	2,3
EXP03			30	200	1,73	9,7	2,08
EXP04			40	200	1,83	10,45	2,21

Tabulka 7 Hodnoty drsnosti povrchu pro experimenty s hodnotou $sc_{0,005}$ mm

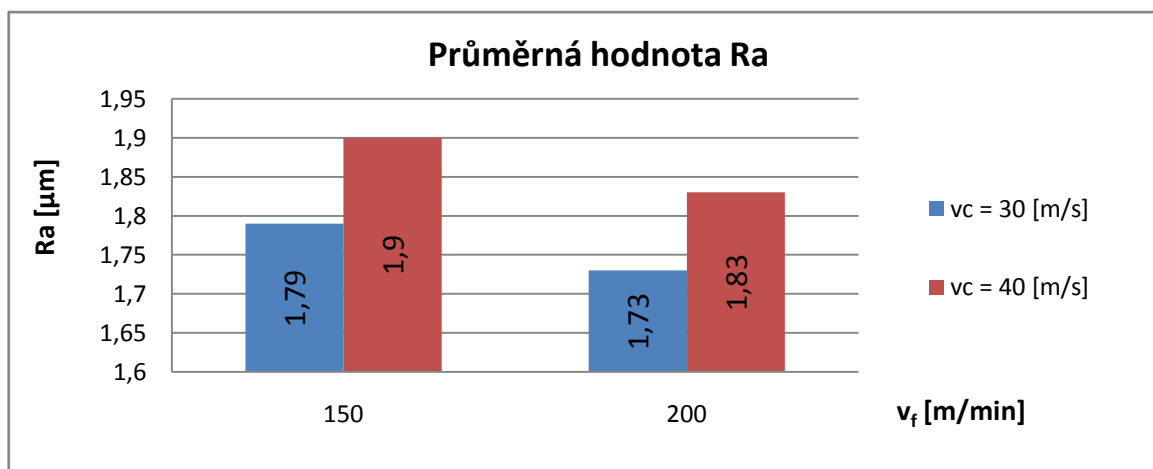
Průměrné hodnoty drsnosti povrchu pro jednotlivé experimenty jsou spočítány jako aritmetický průměr naměřených hodnot pro každý experiment. Na ukázkou je zde uvedena jedna tabulka (Tabulka 9) z experimentu EXP01, kdy polohou je myšlena pozice řezu na součásti a hodnoty jsou ještě rozděleny podle místa měření v řezu.

EXP01						
Poloha	Bez vyklopení (C = 90°)			S vyklopením (C = 60°)		
	Rz [μ m]	Ra [μ m]	Rq [μ m]	Rz [μ m]	Ra [μ m]	Rq [μ m]
1	9,1	1,5	1,9	8,8	1,7	2
2	8,9	1,5	1,9	9,1	1,7	2
3	10,7	1,8	2,2	15,2	2,3	2,9
4	8,2	1,7	2,1	8	2,1	2,4
Průměr	9,225	1,625	2,025	10,275	1,95	2,325

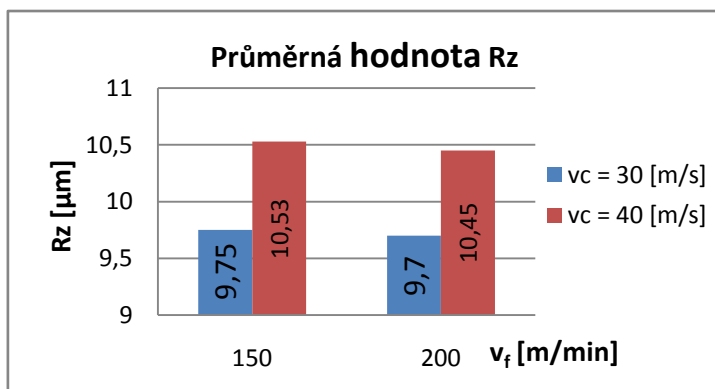
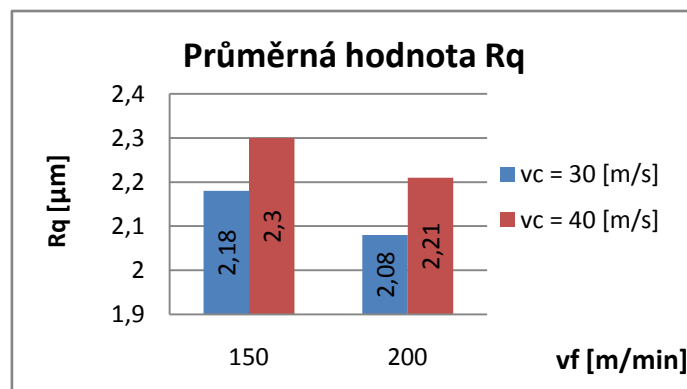
Tabulka 8 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro EXP01

Pro přehlednější vyhodnocení jsou jednotlivé hodnoty drsnosti převedeny do grafu, který je zobrazen níže. Jak je patrné z grafu (Graf 1), hodnota drsnosti povrchu Ra je při vyšší řezné rychlosti vyšší než u řezné rychlosti 30 m/s. Tento průběh, dle zjištěných průběhů z rešerše, nebyl předpokládán, jelikož dle uvedené teorie by narůstající řeznou rychlostí mělo dojít ke zlepšení drsnosti povrchu. Je možné, že při těchto řezných parametrech a zvolené vzdálenosti

drah od sebe tento průběh není platný z důvodů vyšší drsnosti povrchu, než se očekává po broušení. Zároveň zde ale platí zjištěný průběh zlepšení kvality povrchu v závislosti na zvýšení posuvové rychlosti z hodnoty 150 m/min na 200 m/min.

Graf 1 Průměrná hodnota Ra při $sc = 0,005$ mm

Velmi podobného průběhu je dosaženo i u hodnot drsností povrchu s parametry Rz a Rq (Graf 2, Graf 3), kdy, jak již bylo uvedeno, nebyl tento průběh očekáván a je potřeba si ověřit, zdali to není opravdu způsobeno hodnotou axiálního posuvu, která má samozřejmě nejvyšší vliv na drsnost povrchu v tomto experimentu.

Graf 2 Průměrná hodnota Rz při $sc = 0,005$ mmGraf 3 Průměrná hodnota Rq při $sc = 0,005$ mm

4.2.2 Drsnost povrchu pro experimenty s hodnotou $sc0,001$

Z předchozího průběhu drsností lze počítat s tím, že bude zde stejný průběh drsnosti povrchu pro experimenty, které jsou s hodnotou „maximal scallop height“ $sc = 0,001$ mm. Je ale pravděpodobné, že průběh bude u těchto experimentů totožný s teorií, která je zde uvedena, jelikož hodnoty drsností povrchu se již blíží s tímto parametrem k očekávaným drsnostem při broušení. V tabulce (Tabulka 9) jsou uvedeny jednotlivé experimenty s řeznými podmínkami pro tuto hodnotu bočního posuvu drah brusného kotouče.

Test	sc [mm]	a _e [mm]	v _c [m/s]	v _f [m/min]	Průměrná hodnota Ra [μm]	Průměrná hodnota Rz [μm]	Průměrná hodnota Rq [μm]
EXP05	0,001	0,05	30	150	0,86	5,68	1,09
EXP06			40	150	0,81	5,71	1,06
EXP07			30	200	0,84	5,39	1,01
EXP08			40	200	0,8	5,29	0,99

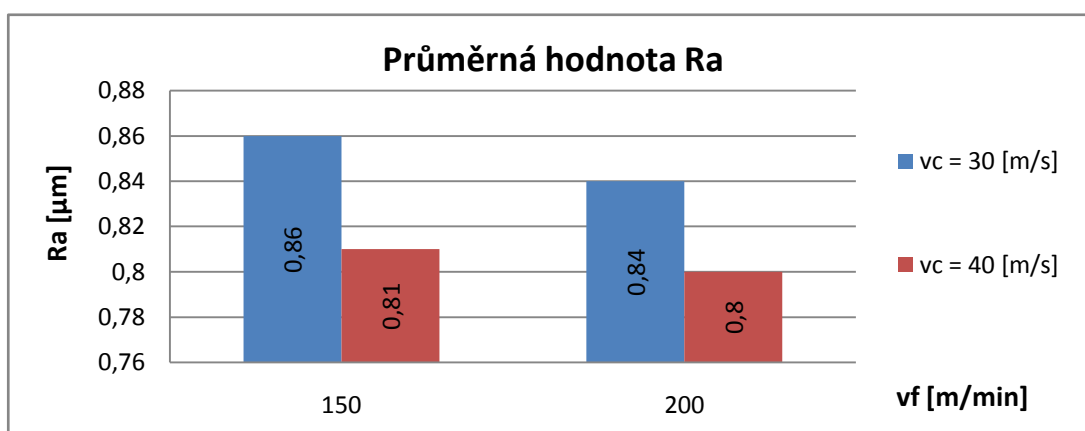
Tabulka 9 Hodnoty drsnosti povrchu pro experimenty s hodnotou sc = 0,001 mm

Pro výpočet průměrných hodnot je použit stejný způsob jako u předchozího případu, neboli spočítání aritmetického průměru z naměřených hodnot. Na ukázkou a pro porovnání je zde uvedena tabulka (*Tabulka 10*) s hodnotami drsnosti povrchu pro experiment označený EXP05, který má totožné parametry řezné a posuvové rychlosti a liší se pouze ve velikosti axiálního kroku.

EXP05						
Poloha	90			60		
	Rz [μm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rq [μm]
1	4,9	0,8	1	4,4	0,7	0,9
2	5,1	0,8	1	5,3	0,8	1
3	6,6	0,9	1,2	7,9	0,9	1,2
4	5,5	0,9	1,1	5,7	1,1	1,3
Průměr	5,525	0,85	1,075	5,825	0,875	1,1

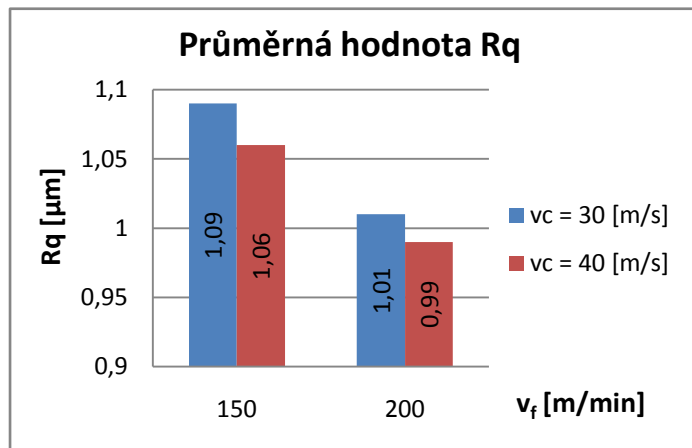
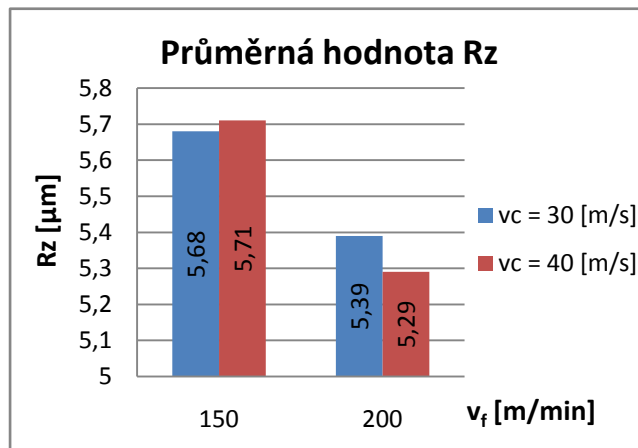
Tabulka 10 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro EXP05

Jak je patrné z grafu (*Graf 4*), pro hodnotu drsnosti povrchu Ra je zřejmé, že v porovnání s předchozí hodnotou sc = 0,005 mm je drsnost povrchu minimálně 2x lepší. Tento fakt je způsoben větší hustotou drah brusného kotouče pro broušení tohoto experimentu. Také je zde patrné, že již platí předpokládaný průběh drsnosti platí. Tím pádem se na základě zvyšující se řezné rychlosti zlepšuje kvalita výsledné drsnosti povrchu. Tyto změny jsou sice v řádech setin μm, ale dá se předpokládat, že na základě zvyšující se řezné rychlosti by mohlo dojít k lepší drsnosti výsledného povrchu. Zároveň se zde potvrdilo, že se zvyšující se posuvovou rychlostí dochází k zlepšení drsnosti povrchu.



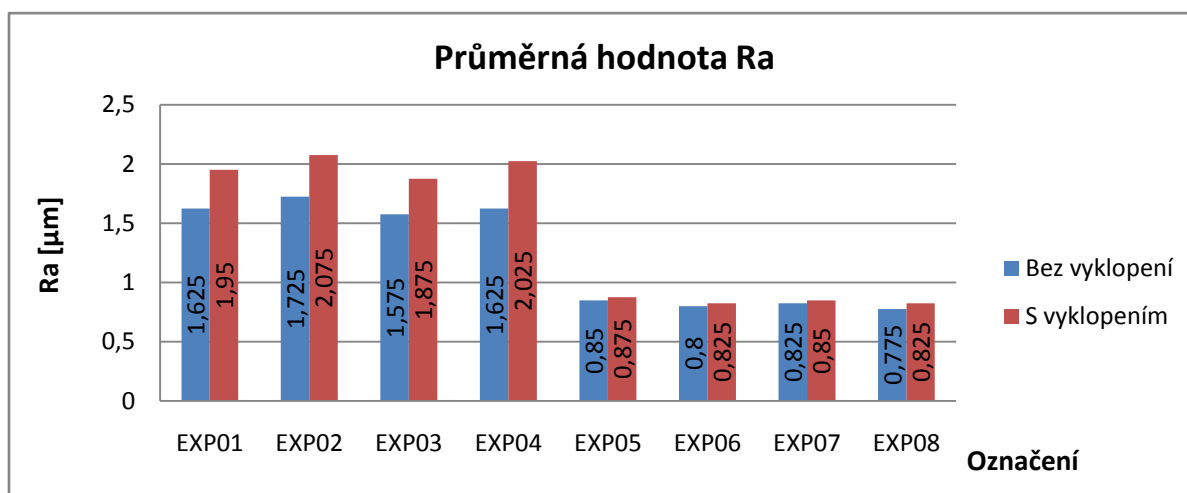
Graf 4 Průměrná hodnota Ra při sc = 0,001 mm

Zároveň byl tento průběh potvrzen i u hodnot R_q , které jsou uvedeny v grafu (*Graf 5*). U grafu (*Graf 6*) jsou uvedeny hodnoty drsnosti povrchu R_z , zde je vyšší hodnota tohoto parametru u experimentu označeného EXP06, který má vyšší řeznou rychlost než u srovnávané průměrné hodnoty drsnosti u experimentu EXP05, kde se předpokládal opačný průběh. To může být způsobeno zanesením chyby do průběhu měření.

Graf 5 Průměrná hodnota R_q při $sc = 0,001$ mmGraf 6 Průměrná hodnota R_z při $sc = 0,001$ mm

4.2.3 Porovnání drsnosti povrchu v závislosti na vyklopení brusného kotouče

Je potřeba brát v potaz, že na výslednou kvalitu broušeného povrchu má také vliv naklopení kotouče při broušení. Proto je potřeba i tento parametr porovnat u jednotlivých parametrů. Jak je patrné z následujícího grafu průměrné hodnoty R_a (*Graf 7*), hodnoty drsnosti povrchu u broušení bez vyklopení vycházejí lépe než při vyklopení brusného kotouče o 30° . Stejný průběh je drsností povrchu R_z a R_q , kdy tyto grafy jsou umístěny v příloze (*Příloha č. 8*). U hodnot s vyšší drsností povrchu je tento rozdíl více patrný a je přibližně v řádech desetin μm . U hodnot s nižší drsností povrchu je tento rozdíl o řád menší. Proto lze předpokládat, že se zvyšujícím se počtem drah brusného kotouče (snižující se hodnotou sc) bude mít tento parametr na výsledný povrch minimální vliv.



Graf 7 Vliv naklopení brusného kotouče na drsnost povrchu

4.3 Vyhodnocení geometrické přesnosti

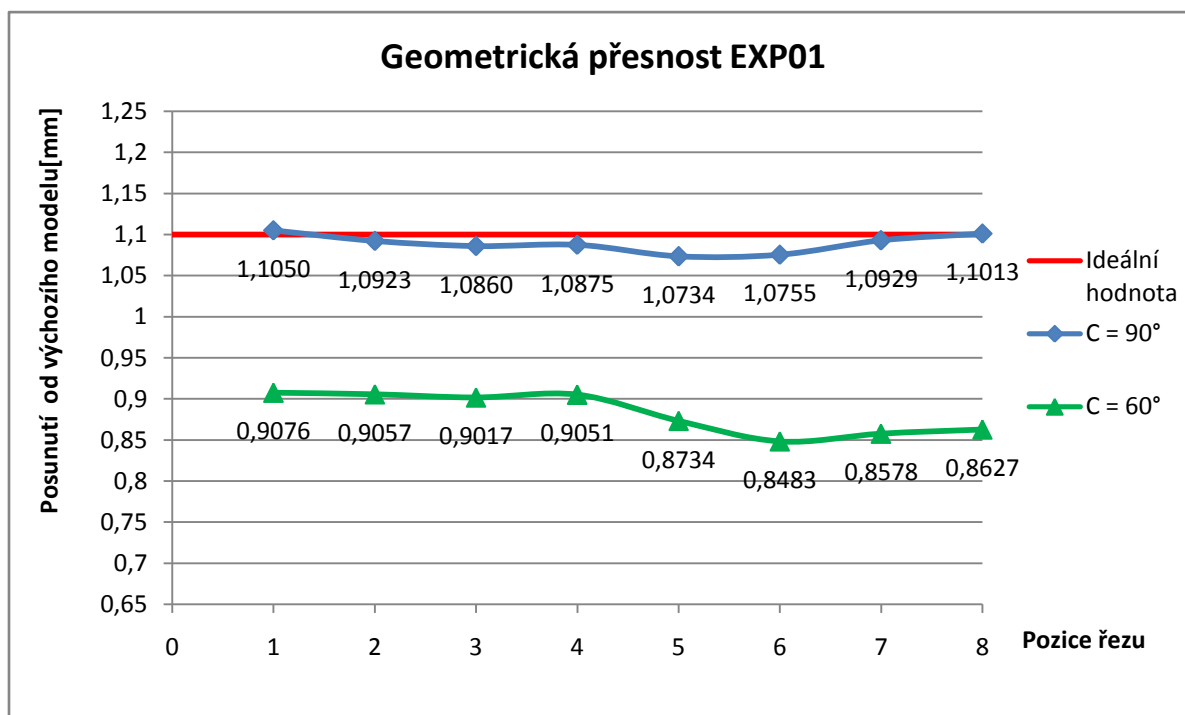
Dalším parametrem, který je vyhodnocen, je geometrická přesnost broušeného povrchu. Jak již bylo zmíněno, z každého měření je výstupem několik protokolů o měření geometrické přesnosti v jednotlivých řezech na součásti. Z těchto hodnot je pak vypočtena průměrná hodnota odchylky pro jednotlivé řezy na součásti při každém experimentu. V následující tabulce (*Tabulka 11*) jsou na ukázkou hodnoty geometrické přesnosti pro EXP01, a to pouze pro polohu řezu označenou číslem 6. Veškeré tabulky s výpočty jsou umístěny na příloženém CD ve složce vyhodnocení, v souboru s názvem Geometrická přesnost. Jak je možno si povšimnout v tabulce, žlutě vyznačená hodnota odchylky je oproti ostatním o řád vyšší, proto se touto hodnotou nepočítá při výpočtu průměrné hodnoty, jelikož se může jednat o náhodnou chybu měření, nebo špatně zvolený bod, protože se jedná vždy o body na krajích součásti.

EXP01									
Bez vyklopení (C = 90°)					S vyklopením (C = 60°)				
poz.	měření [mm]	ideální hodnota [mm]	rozdíl [mm]	Průměr [mm]	poz.	měření [mm]	model [mm]	rozdíl [mm]	průměr [mm]
1	0,876	1,1	-0,224	1,0755	1	0,843	1,1	-0,257	0,848286
2	1,142	1,1	0,042		2	0,673	1,1	-0,427	
3	1,107	1,1	0,007		3	0,702	1,1	-0,398	
4	1,082	1,1	-0,018		4	0,803	1,1	-0,297	
5	1,019	1,1	-0,081		5	0,936	1,1	-0,164	
6	1,002	1,1	-0,098		6	1,023	1,1	-0,077	
7	1,101	1,1	0,001		7	0,958	1,1	-0,142	

Tabulka 11 Naměřené hodnoty geometrické přesnosti EXP01 v řezu 6

Vypočítané hodnoty jsou pro lepší přehlednost převedeny do grafu. V jednotlivých grafech je vždy znázorněna červenou přímkou ideální hodnota geometrické přesnosti, které by se mělo dosáhnout v jednotlivých experimentech. Průměrné hodnoty v jednotlivých řezech jsou poté zaneseny do grafu a porovnány s touto ideální hodnotou. Pokud je hodnota vyšší než ideální, došlo k většímu úběru materiálu, než bylo požadováno. Pokud však je to naopak a hodnota je menší než ideální, došlo k menšímu úběru materiálu neboli k nedobroušení na požadovanou hodnotu úběru. Tento průběh je znázorněn v grafu (*Graf 8*) při experimentu označeném jako EXP01. Jak je patrné, ideální hodnota z grafu i z tabulky uvedené výše je 1,1 mm a je tvořena přímkou v grafu. Průměrné hodnoty naměřené po experimentu by se měly k této hodnotě blížit, ale jak je patrné, u broušení bez vyklopení vřetena (C = 90°) je odchylka v řádech setin mm. Větší odchylka, která je již v řádech desetin mm, je při broušení s vyklopením vřetena (C = 60°). Takto velká odchylka již byla patrná na první pohled při provedení experimentu. Rozdíl velikosti odchylky mezi těmito strategiemi při broušení může být způsoben chybou v rámci opotřebení brusného kotouče, který byl odstraněn pouze průměrovou korekcí bez orovnění tvaru brusného kotouče. Je ale na zvážení, jestli nemělo spíše docházet k podbroušení povrchu než k jeho nedobroušení, které lze očekávat při neorovnění kotouče na požadovanou profilovou křivku. Tím pádem se naskytá otázka, zda není možné, že je chyba v přepočítání 3D korekce u postprocesoru při generování NC dat. Zároveň velikost odchylek bez vyklopení brusného kotouče je zde velká od přesností, kterých je dosahováno při broušení. To může být způsobeno chybou při tvorbě programu, vlivem nepřesností upínacího přípravku a samotného upnutí na tento přípravek. Podobný průběh byl zjištěn i u ostatních

experimentů, kdy jednotlivé průběhy odchylek jsou vyznačeny v grafech, které jsou přiloženy v příloze (Příloha č. 9).



Graf 8 Geometrická přesnost EXP01

4.4 Geometrická přesnost posunutí drah

Jelikož u jednotlivých experimentů byla zjištěna vyšší geometrická nepřesnost, než se předpokládalo, bylo potřeba ověřit, jestli při posunutí modelu o hodnotu a_e je této hodnoty dosaženo, nebo jestli je zanesena chyba do experimentu tímto posunutím, jelikož posunutí jednotlivých experimentů je prováděno v řídicím softwaru zadáním hodnoty posunutí drah od modelu vždy o 0,05 mm. Toto ověření je provedeno u dvou experimentů, které mají stejné řezné podmínky. Jedná se o poslední hrubovací operaci označenou HR01 a první experimentální broušení EXP01, tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 12).

Označení	sc [mm]	v_c [m/s]	v_f [m/min]	a_e [mm]	posunutí od modelu [mm]
HR01	0,005	30	150	0,05	-1,05
EXP01	0,005	30	150	0,05	-1,1

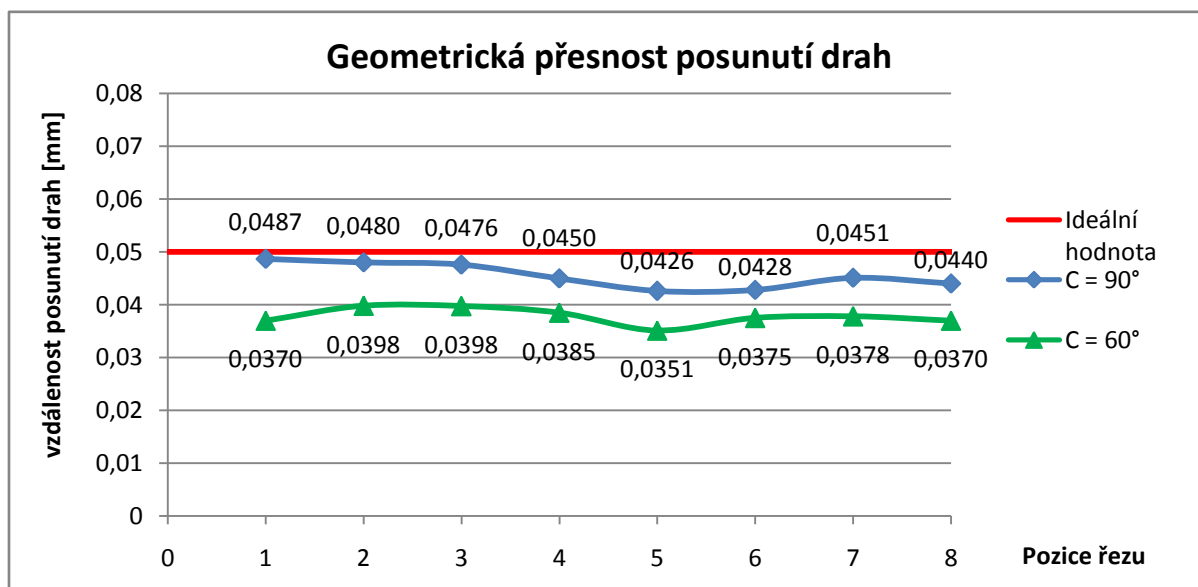
Tabulka 12 Řezné podmínky pro geometrické posunutí drah

Výpočet posunutí je proveden jako rozdíl naměřených hodnot, kdy z těchto vypočítaných hodnot je vytvořen aritmetický průměr pro každý řez. Kvůli velkému množství dat v tabulce zde nemůže být umístěna celá tabulka s výpočty. Proto je pouze uvedena na ukázkou tabulka (Tabulka 13) s naměřenými hodnotami v řezu číslo 6 pro experiment EXP01 a poslední hrubovací operací HR01. Celá tabulka je pak umístěna na přiloženém CD ve složce Vyhodnocení, v souboru s názvem Geometrická přesnost posunutí drah.

HR01			EXP01			Rozdíl mezi měření		Průměrná hodnota	
Poz.	C = 90° [mm]	C = 60° [mm]	Poz.	C = 90° [mm]	C = 60° [mm]	C = 90° [mm]	C = 60° [mm]	C = 90° [mm]	C = 60° [mm]
1	0,839	0,809	1	0,876	0,843	0,037	0,034	0,04285	0,03757
2	1,094	0,648	2	1,142	0,673	0,048	0,025		
3	1,06	0,673	3	1,107	0,702	0,047	0,029		
4	1,044	0,766	4	1,082	0,803	0,038	0,037		
5	0,977	0,894	5	1,019	0,936	0,042	0,042		
6	0,961	0,975	6	1,002	1,023	0,041	0,048		
7	1,054	0,91	7	1,101	0,958	0,047	0,048		

Tabulka 13 Výpočet geometrické přesnosti posunutí drah mezi EXP01 a HR01

Vypočítané průměrné hodnoty jsou pro lepší přehlednost zaneseny do grafu (*Graf 9*). V tomto grafu je také znázorněna červenou přímkou ideální hodnota posunutí a_e , kterého by se mělo dosáhnout. Jak je patrné, při broušení bez vyklopení vřetene ($C = 90^\circ$) je odchylka od ideální hodnoty velmi malá, v průměru dosahuje hodnot 0,004 mm. Tento výsledek znázorňuje, že pokud není vyklopeno vřeteno o 30° , není zde chyba v posunutí drah mezi sebou. Velikost této hodnoty je ovlivněna chybou měření na souřadnicovém měřicím stroji, kdy velikost chyby měření může dosahovat hodnoty 0,003 mm. Na rozdíl od hodnoty při vyklopení brusného kotouče ($C = 60^\circ$) je průměrná velikost odchylky 0,011 mm. Tato odchylka je již příliš vysoká a lze uvést, že se nedá považovat za správnou z hlediska geometrické přesnosti posunutí drah, které by se mělo dosahovat na této nástrojařské brusce. Velikost této odchylky je způsobena velikostí chyby při měření a také opotřebením brusného kotouče, které bylo korigováno pomocí rádiusové korekce bez orovnění tvaru.

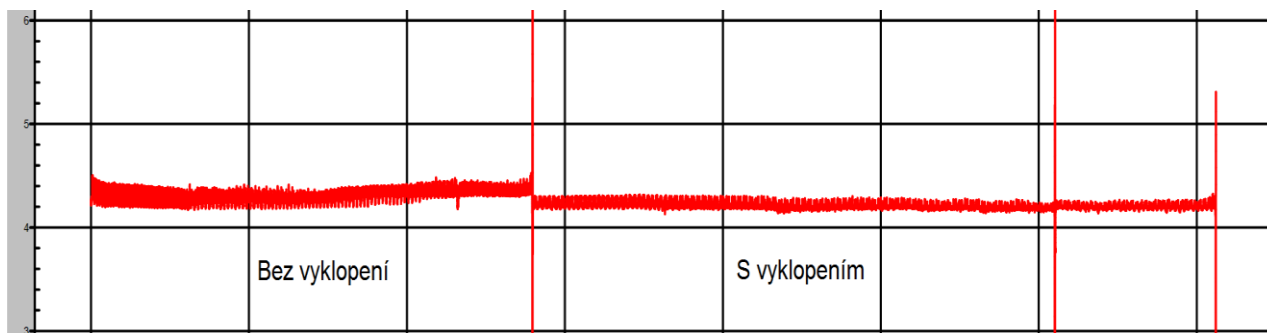


Graf 9 Geometrická přesnost posunutí drah

4.5 Zatížení vřetena stroje

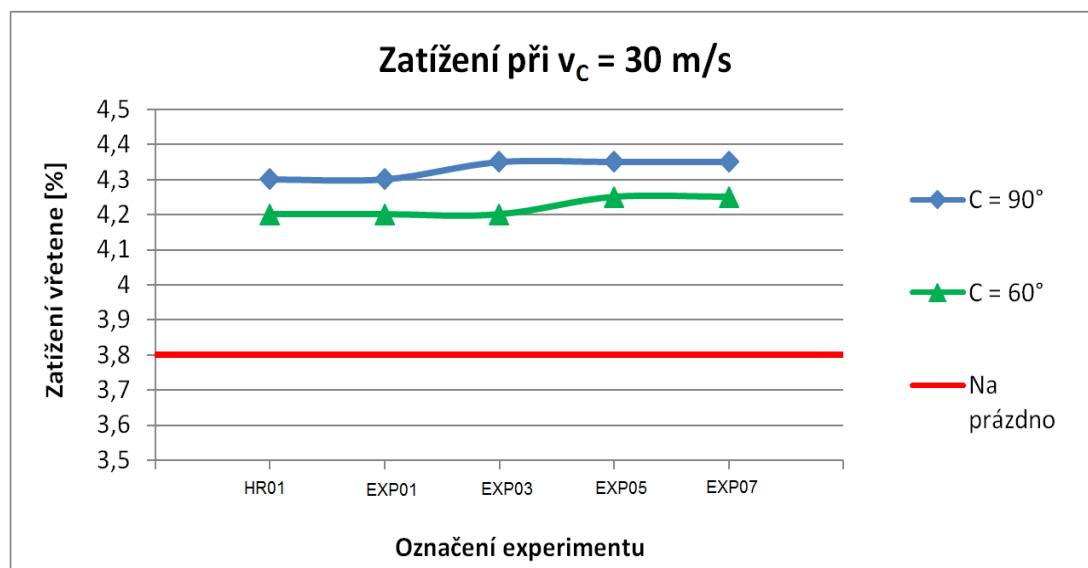
Při broušení jednotlivých experimentů vzniká zatížení na brusném kotouči, které je přenášeno do vřetena. Průběh tohoto zatížení, jak již bylo uvedeno, je zaznamenán do grafu při broušení a z těchto grafů lze určit průměrnou hodnotu zatížení při broušení u jednotlivých experimentů.

Je potřeba brát v potaz, že samotném roztočení brusného kotouče má vliv na zatížení vřetena. Z tohoto důvodu je potřeba zaznamenat také průběh zatížení vřetena při běhu brusného kotouče bez broušení tzv. "na prázdko". Pro jednotlivé řezné rychlosti jsou určeny průměrné hodnoty z průběhů zatížení při broušení. Tyto hodnoty jsou poté zadány do grafu. Na obrázku (Obr. 77) je zobrazen průběh zatížení z broušení experimentu EXP07 při řezné rychlosti 30 m/s. Jak je patrné, při broušení bez naklopení je zatížení vyšší než při vyklopení brusného kotouče. Vertikální čáry průběhu zatížení, kdy na tomto obrázku není zobrazena jejich celá velikost, značí změnu programu, kdy došlo k zastavení a znovu roztočení otáček na brusném kotouči. Celý tento průběh je na ukázkou přiložen v příloze (Příloha č. 7), přičemž veškeré průběhy jsou umístěny na přiloženém CD.



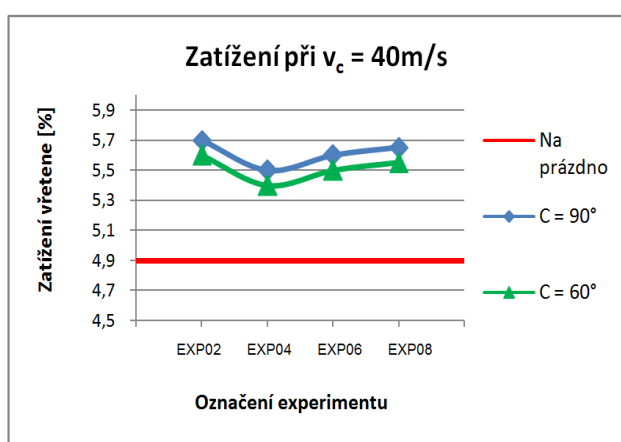
Obr. 77 Průběh zatížení při EXP07

Z tohoto grafu je poté určena průměrná hodnota zatížení při broušení, která je zanesena do grafu (Graf 10) zatížení při řezné rychlosti 30 m/s. Tento postup byl proveden pro jednotlivá zatížení při této řezné rychlosti. U všech průběhů je viditelný rozdíl mezi velikostí zatížení při broušení bez vyklopení a s vyklopením brusného kotouče. Tento rozdíl je však velmi malý, jelikož i samotné zatížení je pouze v řádech jednotek procent. Zároveň na tomto grafu je označeno zatížení od roztočení kotouče tzv. na prázdko, kdy je patrné, že jenom roztočení kotouče na požadovanou řeznou rychlost vnáší do broušení mnohem vyšší zatížení než samotné zatížení, které je způsobeno úběrem materiálu.

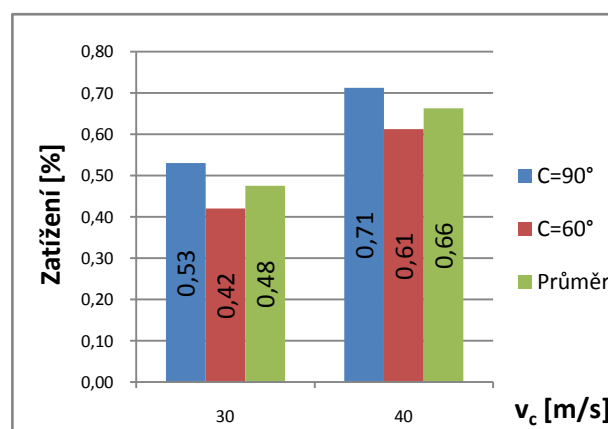


Graf 10 Průběh zatížení při řezné rychlosti 30 m/s

Stejný postup je tak použit pro vyhodnocení zatížení pro průběh zatížení při řezné rychlosti 40 m/s. S tím že zatížení je zde o 1 % vyšší, ale tento vliv je způsoben vyšší odstředivou silou, která vzniká při roztočení vřetena na prázdno. Toto zatížení je zobrazeno na grafu (*Graf 11*), kdy průběh zatížení je zde rozdílný oproti zatížení na při řezné rychlosti 30 m/s. Pro lepší zobrazení vznikajícího zatížení při procesu broušení je od těchto hodnot odečteno zatížení, které vzniká odstředivými silami od otáček brusného kotouče při běhu na prázdno. Následně je vypočítána průměrná hodnota pro řeznou rychlost 30 a 40 m/s, kdy tyto hodnoty jsou rozděleny, jestli se jedná o broušení s vyklopením nebo bez vyklopení a průměrnou hodnotu, které bylo dosaženo při dané řezné rychlosti. Velikosti jednotlivých zatížení jsou zobrazeny na grafu (*Graf 12*), kdy je patrné, že zatížení vzrůstá s rostoucí řeznou rychlostí. Vzniklé zatížení zde dosahuje minimálních hodnot, protože velikost zatížení je závislá na hloubce odebírané vrstvy, která zde byla pouze 0,05 mm. Z tohoto důvodu je patrné, že lze odebírat i větší hloubky odebírané vrstvy.



Graf 11 Průběh zatížení při řezné rychlosti 40 m/s



Graf 12 Porovnání zatížení mezi řeznými rychlostmi

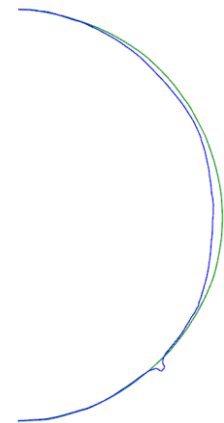
4.6 Opotřebení brusného kotouče

Posledním vyhodnocovaným parametrem, který byl spíše vedlejšího charakteru, je průběh opotřebení brusného kotouče. Jak již bylo zmíněno, opotřebení brusného kotouče a jeho následná korekce v programu jsou nezbytně nutné pro nezanesení chyby do experimentu. Z těchto důvodů to bylo sledováno v průběhu přípravného broušení a hlavně v průběhu experimentu po každém broušení. Jelikož ale bylo možno zadávat pouze průměrovou korekci nástroje a nešlo provést pokaždé orovnění brusného kotouče, do experimentu se zanesla chyba nedodržení profilové křivky u rádiusu kotouče. Tím pádem zde byla ovlivněna geometrická přesnost při broušení s vyklopením brusného kotouče. A jak již bylo zmíněno, spíše se předpokládalo, že bude docházet k podříznutí broušené plochy. V následující tabulce (*Tabulka 14*) jsou uvedeny hodnoty průměrů po opotřebení brusného kotouče s tím, že průměr nového kotouče je totožný s označeným měření HR00-1.

Označení	Ø brusného kotouče [mm]	Označení	Ø brusného kotouče [mm]	Označení	Ø brusného kotouče [mm]
HR00-1	99,95	EXP01	99,65	EXP05	99,64
HR00-2	99,75	EXP02	99,64	EXP06	99,64
HR00-3	99,65	EXP03	99,64	EXP07	99,64
HR01	99,65	EXP04	99,64	EXP08	99,64

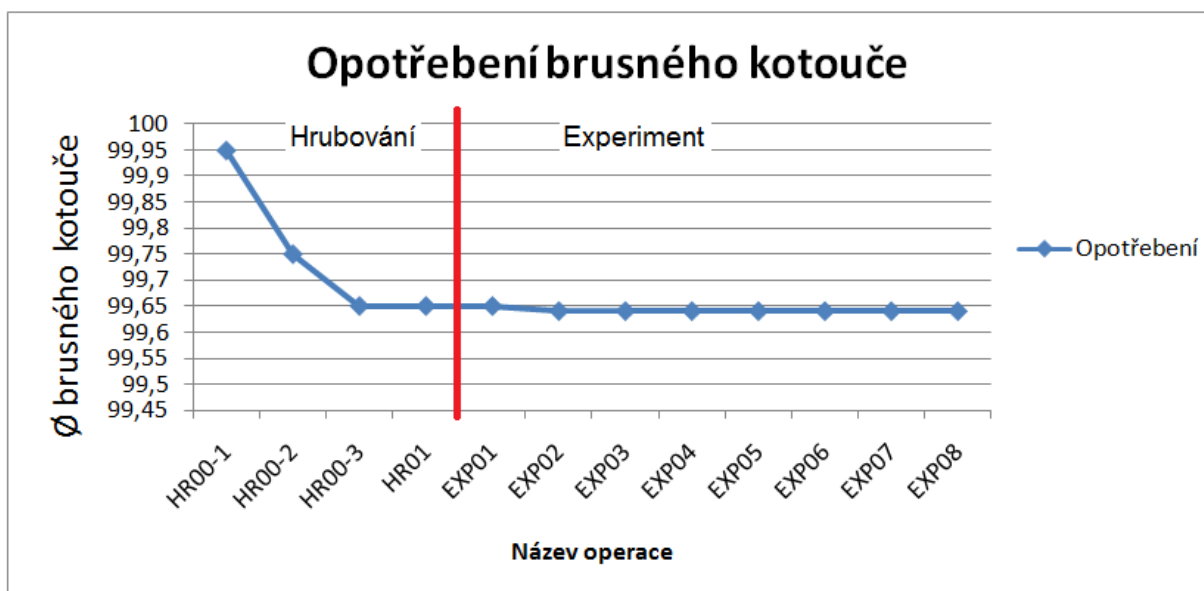
Tabulka 14 Hodnoty průměru brusného kotouče po opotřebení

Při samotném broušení dochází k tzv. jevu „samoostření“, to má za následek úbytek brusných zrn na povrchu, která jsou opotřebená a tím dochází k jejich zmenšování, neboli jinak řečeno k opotřebení. Zároveň je pro toto broušení je použit zcela nový brusný kotouč u kterého dochází k velkému opotřebení při prvním broušení, než dojde k tzv. „zaříznutí“ brusného kotouče, kdy po tomto „zaříznutí“ brusného kotouče nedochází k tak razantnímu průběhu opotřebení. Dále je při experimentu potřeba, aby opotřebení již nabývalo minimálních hodnot. Na obrázku (Obr. 78) je zobrazena profilová křivka nového brusného kotouče (zelenou barvou) a kotouče po poslední hrubovací operaci (modrou barvou) označenou jako HR01. Výstupek na modré profilové křivce je výsledkem zanechání nečistoty na brusném kotouči při tvorbě scanu profilu kotouče, jelikož další křivky průběhu opotřebení jsou již téměř totožné a pouze se liší vlivem nečistot, které z nich nebylo možné odstranit, a přesností při tvorbě profilu na měřícím stroji Zoller. Není možné je pro přehlednost zobrazit na obrázku v takovém měřítku, aby byl zachován celý profil brusného kotouče.



Obr. 78 Profilová křivka opotřebení brusného kotouče při hrubování

Níže na grafu (Graf 13) je zobrazen průběh opotřebení v závislosti na změně průměru na brusném kotouči. Zde je patrné, že při odebrání vrstvy pro hrubování dochází k zmenšení průměrové hodnoty z průměru 99,95 mm na průměr 99,65 mm, tím pádem o 0,3 mm na průměr. Této hodnoty je již dosaženo při hrubování označené HR00-3. Z toho je patrné, že při samotném experimentu není zanesena chyba vlivem změny průměru brusného kotouče, jelikož opotřebení, kterého zde bylo dosaženo, je 0,01 mm na průměru brusného kotouče. Kdy je potřeba brát v potaz, že této hodnoty mohlo být dosaženo nepřesností při měření průměru brusného kotouče.

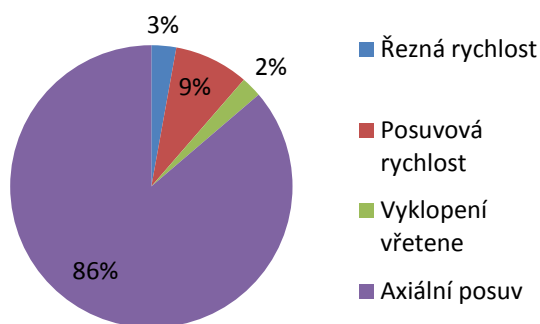


Graf 13 Průběh opotřebení na průměru brusného kotouče

4.7 Zhodnocení všech dosažených výsledků

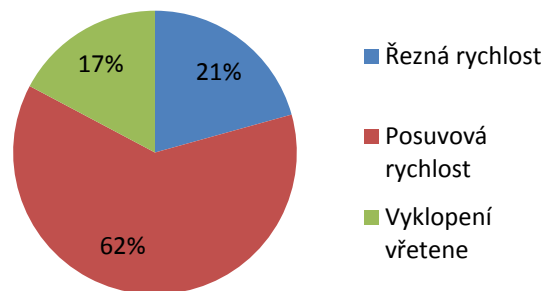
Z naměřených a vyhodnocených hodnot pro jednotlivé navržené experimenty vyplývá, že při změně řezných parametrů dochází ke změně kvality povrchu a zatížení vřetene, jak bylo předpokládáno z provedeného rozboru současného stavu. Pokud si shrneme jednotlivé vyhodnocované parametry, které jsou uvedeny výše, má na drsnost povrchu má nejvyšší vliv změna axiálního posuvu, která je zde zastoupena hodnotou „*maximal scallop height*“ značenou jako *sc*. Při hodnotě $sc = 0,005$ mm je dosaženo drsnosti přibližně 2x horší než u hodnoty parametru $sc = 0,001$ mm. Snížení tohoto parametru vedlo k prodloužení doby broušení až o dvojnásobek. Dalším hlavním parametrem, který má vliv na drsnost povrchu, je posuvová rychlost, kdy při zvýšení tohoto parametru došlo k předpokládanému průběhu, tedy ke zmenšení naměřených hodnot drsností. U změny řezné rychlosti byl průběh změny drsnosti závislý na parametru *sc*, kdy při vyšší hodnotě maximální výšky výstupku byl očekávaný průběh zcela opačný – se zvýšením řezné rychlosti došlo ke zhoršení drsnosti povrchu. U hodnoty *sc*, která byla menší, byl tento průběh totožný s očekávaným průběhem – při zvýšení řezné rychlosti došlo k zlepšení drsnosti broušené plochy. Posledním parametrem, který má znatelný vliv na drsnost povrchu, je naklopení vřetena. Hodnoty drsností povrchu u všech experimentů vyházely lépe u broušení bez vyklopení vřetene. Pro lepší porovnání, jak velký vliv mají jednotlivé vstupní parametry na drsnost povrchu je ukázáno na grafu (Graf 14). Pokud se však zanedbá vliv axiálního posuvu, který sice má nejvyšší vliv na hodnotu drsnosti povrchu a porovnají se mezi sebou zbývající tři parametry, tak výsledný vliv jednotlivých faktorů je zobrazen v grafu (Graf 15). Nejvyšší vliv z těchto tří parametrů potom má posuvová rychlost, jako další je řezná rychlost a nejmenší vliv má vyklopení brusného kotouče.

Velikost vlivu vstupních parametrů na drsnost povrchu



Graf 14 Velikost vlivu vstupních parametrů na drsnost 1

Velikost vlivu vstupních parametrů na drsnost povrchu bez axiálního posuvu



Graf 15 Velikost vlivu vstupních parametrů na drsnost 2

Dalším hlavním hodnoceným parametrem je úroveň dosažené geometrické přesnosti při broušení vybraných ploch na kolenním implantátu. U tohoto výstupního parametru byl hodnocen vliv vyklopení vřetena na geometrickou přesnost, jelikož již po prvním experimentálním broušení bylo na pohled znatelné, že plochy na sebe nejsou napojeny. U ploch, které byly broušeny bez vyklopení vřetena, byla naměřena odchylka od ideálních rozměrů v řádech setin mm. Větších odchylek bylo naměřeno na plochách, které byly broušeny s vyklopením vřetene, a to až v řádech desetín mm. Obě tyto hodnoty, které by měly vypovídat o přesnosti stroje, jsou velmi vysoké. Mohly však být způsobeny součtem nepřesností v rámci soustavy obrobek – přípravek, změnou profilu brusného kotouče při jeho

opotřebení a vlivem možné chyby při tvorbě NC dat. Zároveň existuje podezření, zda nemůže být chyba i v postprocesoru přímo v přepočtu 3D korekce nástroje.

Posledním výstupním parametrem je zatížení vřetena a vliv změny řezných podmínek na jeho průběh. Průběh zatížení je zaznamenáván přímo na stroji do grafů, ze kterých byla odečtena přibližná procentuální hodnota zatížení pro jednotlivé experimenty. Vliv zatížení byl znát nejvíce při změně řezné rychlosti, kdy při zvýšení řezné rychlosti došlo k zvýšení i zatížení. Dalším parametrem, který měl vliv na zatížení, bylo vyklopení vřetena. Při broušení bez vyklopení bylo zatížení vyšší než při broušení s vyklopeným vřetenem. Je potřeba ale uvést, že vzniklé zatížení bylo velmi malé a velikost zatížení závisí na velikosti odebírané vrstvy. Z tohoto je patrné, že lze odebírat i větší velikosti odebírané vrstvy s tím, že může dojít ke změně hodnoty drsnosti povrchu k horším hodnotám.

Vedlejším parametrem, který byl sledován, bylo opotřebení brusného kotouče, aby nebyla zanesena chyba do experimentu, jelikož při broušení docházelo k jeho opotřebení a to vedlo ke změně jak jeho profilu i průměru. Hodnoty, které byly naměřeny po každém experimentu, byly zapsány do tabulky a byla provedena průměrová korekce v programu. Z naměřených hodnot je pak patrné, že při hrubování došlo k největšímu opotřebení, až o 0,3 mm na průměru brusného kotouče. Při samotných experimentech pak již byla zaznamenána pouze jenom jedna změna této hodnoty, o 0,01 mm na průměru.

5 Závěr

Cílem této práce bylo ověřit vliv řezných podmínek na kvalitu povrchu a zatížení vřetene při broušení na pětiosé brusce obecných tvarových ploch na vybraném představiteli. Vedlejším cílem této práce bylo ověření funkčnosti nového postprocesoru od výrobce nástrojařské brusky, který je implementován v softwaru NX ve verzi 9. Zvoleným představitelem pro navržení experimentu je horní část kolenního implantátu, který byl vybrán jako vhodný představitel obecné tvarové plochy kvůli své tvarově složitě obalové ploše. Aby mohlo být provedeno vyhodnocení těchto cílů, bylo zapotřebí navrhnout vlastní experiment ve variantním řešení a vybrat tu variantu experimentu, která byla pro provedení nejvíce výhodná z navržených variant. Na základě navrženého experimentu bylo potřeba vytvořit NC data pro broušení horní části kolenního implantátu, který je označován v této práci jako Knee_implant. Vytvořením funkčního programu a realizací navrženého experimentu bylo ověřeno, že je možno na nástrojařské brusce, která je především určena pro broušení rotačních nástrojů, brousit i libovolné součásti, jelikož volba představitele byla provedena tak, aby se na základě jeho vybroušení dalo potvrdit, zda je možné brousit i jiné součásti, které mohou být méně nebo naopak i více tvarově složitě. To lze realizovat za podmínek použití CAD/CAM softwaru NX s postprocesorem od společnosti ANCA k vytvoření NC dat.

Na začátku však bylo potřeba provést základní rozbor současného stavu, který v sobě zahrnoval základní informace ohledně broušení a vlivu řezných podmínek na kvalitu povrchu s tím, které parametry nejvíce ovlivňují právě jeho dosahované kvality. Dále zde byla popsána základní pravidla a informace ohledně použití CAM softwaru NX k tvorbě NC dat pro experiment. Na základě této rešeršní části bylo možno provést navržení vlastního experimentu a potřebných kroků k jeho realizaci. Jednalo se o návrh a konstrukce upínacího přípravku, úpravu modelu součásti a o samotnou tvorbu NC dat a vše s tím spojené jak v softwarech NX a iGrind.

Na základě navrženého experimentu a vytvoření NC dat pro jeho realizaci bylo provedeno experimentální broušení. Po každém provedeném experimentu byla součást předána do metrologické laboratoře, kde bylo provedeno měření drsnosti povrchu a geometrické přesnosti broušených ploch na součásti. Výsledkem tohoto experimentu je potvrzení vlivů řezných podmínek na kvalitu broušených ploch. V poslední části této práce bylo provedeno vyhodnocení jednotlivých experimentů, kdy byl potvrzen očekávaný průběh drsnosti povrchu a zatížení vřetena při změně řezných podmínek, ale u geometrické přesnosti bylo dosaženo hodnot neodpovídajících přesnosti této brusky. Na drsnost povrchu měl nejvyšší vliv axiální posuv, neboli v tomto případě maximální výška výstupku, která vzniká od axiálního posunutí brusného kotouče, kdy při nastavení hodnoty $sc = 0,005$ mm bylo dosaženo hodnot drsnosti povrchu 2x vyšší než u hodnoty $sc = 0,001$ mm. Z dalších navržených parametrů více ovlivňuje drsnost povrchu velikost posuvové rychlosti, nejmenší vliv měla zde řezná rychlost, i když se předpokládalo, že právě řezná rychlost bude mít větší vliv na kvalitu povrchu. Na drsnost povrchu mělo také vliv vyklopení vřetena, při němž bylo dosahováno horší drsnosti. Zároveň byla ověřena dosahovaná geometrická přesnost po broušení, kdy z naměřených hodnot vyplývá, že při vyklopení brusného kotouče dochází k velké nepřesnosti broušené plochy v řádech desetin mm. Tento fakt může být způsoben změnou profilu brusného kotouče při jeho opotřebení, ale zároveň je zde možnost chyby v postprocesoru. Také bylo sledováno zatížení při jednotlivých experimentech. Výsledné zatížení při takto navrženém experimentu bylo velmi nízké, avšak i při takto nízkých hodnotách byly znát rozdíly zatížení u jednotlivých experimentů.

Realizací navrženého experimentu, byl potvrzen vedlejší cíl této práce, a to ověření funkčnosti nového postprocesoru od společnosti ANCA, který je implementován do softwaru NX ve verzi 9. Pro vytvoření NC dat bylo zapotřebí použít CAM softwaru z důvodu, že klasický řídicí softwaru iGrind neumožňuje tvorbu libovolných programů, ale je zaměřen na tvorbu programu pro broušení rotačních nástrojů. Zároveň experiment ukázal, jakých je možné dosahovat geometrických přesností a kvality povrchu při navrženém experimentu. Je ale potřeba brát v potaz, že se jednalo o prvotní broušení tohoto typu, na této brusce a za použití softwaru NX k tvorbě NC dat. Proto je možné, že při dalších experimentech bude dosahováno lepších geometrických přesností, kterých zde nebylo dosaženo z důvodu součtu nepřesností jak z upínacího přípravku, tak i ze změny profilu brusného kotouče z důvodu jeho opotřebení.

Výsledky této diplomové práce slouží pro budoucí účely výzkumu a využití víceosého broušení obecných tvarových ploch.

Seznam použité literatury

- [1.] **Malkin, Stephne a Guo, Changsheng.** *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives.* New York : Industrial Press, 2008. 0831132477, 9780831132477.
- [2.] **Brychta, Josef, a další.** Nové směry v progresivním obrábění. [Online] 2007. <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>.
- [3.] **Doc. Ing. Anton Humár, CSc.** TECHNOLOGIE I - TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část [Online] 2005. http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf.
- [4.] **Řasa, Jaroslav a Gabriel, Vladimír.** *Strojírenská technologie 3. 1. díl, Metody, stroje a nástroje pro obrábění.* Praha : Scienta, 2005. ISBN 80-7183-337-1.
- [5.] **Davim, J. Paulo.** *Modern machining technology - A practical guide.* Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi : Woodhead Publishing Limited, 2011. 978-0-85709-099-7.
- [6.] **Ing. Bartoňová, Renáta.** Technologie Broušení. [Online] 2012. http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U01_Technologie_brouseni.pdf.
- [7.] **Klocke, Fritz.** *Manufacturing Processes 2 - Grinding, Honing, Lapping.* Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 978-3-540-92258-2.
- [8.] **Holešovský, Prof. Dr. Ing. František.** Abrazivní metody dokončování povrchu. *Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i. , Praha.* [Online] 2015. http://www.csvs.cz/projekty/2014_veda_pro_zivot/data/12_KA3_Frantisek_Holesovsky_Abrazivni_metody_dokoncovani_povrchu_metodicka_prirucka.pdf.
- [9.] **Ing. Stavinoha, Zdeněk.** Řezné podmínky při broušení. [Online] <http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=39223&docGroup=-1&cmd=0&instance=2>.
- [10.] Uživatelský manuál ke stroji ANCA MX7.
- [11.] Nástrojové brusky. [Online] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1249>.
- [12.] **SANDVIK, Coromat.** Machines for milling. [Online] http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/getting_started/machines_for_milling/pages/default.aspx.
- [13.] **HNATIK, J.** *NC technika a DP. 1.* [CD-ROM] Plzeň : SmartMotion, 2012. ISBN: 978-80-87539-11-8.
- [14.] **SIEMENS.** PLM software. [Online] <http://newsletter.ricoh.co.in/wp-content/uploads/2015/09/plm-banner.jpg>.
- [15.] **ANCA.** Interní materiál od společnosti ANCA určený ke školení na použití posprocesoru v systému NX, k nahlédnutí v kanceláři LEO na RTI.
- [16.] **MACHINES, ANCA CNC.** iGrind. [Online] <http://www.anca.com/Application/Tap-Grinding/Software/iGrind>.
- [17.] —. CIMulator3D. [Online] <http://www.anca.com/Products/Software/Enhancements/CIM3D-v8-1>.
- [18.] **CIMulator3D.** [Online] <http://www.anca.com/getattachment/125e3b24-548e-4361-b383-ee00056a3bbf/CIM3D.aspx>.

- [19.] OVMT - Drsnost povrchu. [Online] <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwi3mszq7fvRAhVH1hoKHRYBBccQFggZMAA&url=http%3A%2F%2Ffiles.ovmt.webnode.cz%2F200000030-3094f328a0%2FDrsnost%2520povrchu.pdf&usg=AFQjCNHcC27Ucy7TeUcOGTKqo6JhMu76JA&sig2=DVyGi0hEArAvwa->
- [20.] ČSN, EN ISO 4287 (01 4450). Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. místo neznámé : Český normalizační institut, 1999.
- [21.] Pata, Vladimír. Měření jakosti povrchu. [Online] http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=1985.
- [22.] Souřadnicové měřicí stroje. [Online] <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>.
- [23.] ZEISS. [Online] https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/bridge-type-cmms/prismo-navigator/j/s/stage/slide_2094/stageimage_cb6/image.mobile.980.jpg/1401733518802.jpg/ZEISS-PRISMO.jpg.
- [24.] Drsnost povrchu. [Online] http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/TEK/Drsnost_povrchu.pdf.

Seznam obrázků:

Obr. 1 Základní schéma broušení	12
Obr. 2 Nepravidelný úběr třísky [2]	13
Obr. 3 Geometrie brusného zrna a deformace povrchu [2]	13
Obr. 4 Obvodové a čelní broušení [2]	14
Obr. 5 Struktura brusného kotouče [2].....	16
Obr. 6 Označení brusného kotouče podle normy ČSN ISO 0525 (22 4503)	16
Obr. 7 Schéma závislosti řezné rychlosti na průběhu broušení [7]	18
Obr. 8 Závislost řezné rychlosti na teplotě [7]	18
Obr. 9 Schéma závislosti axiálního posuvu na průběhu broušení [7]	18
Obr. 10 ANCA MX7 Kinematika stroje [10]	20
Obr. 11 Vertikální pětiosé frézovací centrum [12]	20
Obr. 12 PLM systém [14]	21
Obr. 13 Hlavní myšlenka tvorby ANCA CAD/CAM procesu [15]	21
Obr. 14 Bod na nástroji [15]	22
Obr. 15 Tool Path, Drive and Part [15].....	22
Obr. 16 Generates Tool Path [15]	22
Obr. 17 Uživatelské prostředí iGrind [16]	23
Obr. 18 Toolroom [16].....	23
Obr. 19 Operation options [16]	23
Obr. 20 CIMulator3D [18]	23
Obr. 21 Výběr posprocesoru v NX.....	24
Obr. 22 Obecný povrch a jeho části [19]	25
Obr. 23 Průměrná aritmetická úchylka Ra [20]	26
Obr. 24 Vliv reálného povrchu na hodnotu Ra [20].....	26
Obr. 25 Nejvyšší výška profilu Rz [20].....	26
Obr. 26 Vzorkovnice drsnosti povrchu [19].....	27
Obr. 27 Schéma dotykové metody [21]	27
Obr. 28 Schéma bezdotykové metody [21].....	27
Obr. 29 Souřadnicový měřicí stroj ZEISS PRISMO [23]	28

Obr. 30 Kinematické schéma měřicí hlavy [22]	28
Obr. 31 Zobrazení zatížení vřetena	29
Obr. 32 Rozmístění řezů na součásti pro drsnost povrchu	33
Obr. 33 Rozmístění řezů pro geometrickou přesnost	33
Obr. 34 Ukázka křivky, na níž je prováděno měření	33
Obr. 35 Zatížení vřetene při roztočení kotouče	34
Obr. 36 Ukázka měření opotřebení brusného kotouče	34
Obr. 37 Posunutí drah mezi broušeními	35
Obr. 38 Horní část kolenního implantátu	35
Obr. 39 Nástrojářská bruska ANCA MX7	36
Obr. 40 Rádiový brusný kotouč 1FF1	36
Obr. 41 Sestava brusný kotouč + kazeta s přívodem chlazení	36
Obr. 42 ZOLLER genius 3s	37
Obr. 43 CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator	37
Obr. 44 Měření součásti Knee_implant	37
Obr. 45 Drsnoměr HommelEtamic T8000	38
Obr. 46 Součást Knee_implant měřená na drsnoměru	38
Obr. 47 3D tiskárna EOS M290	38
Obr. 48 Součást po tisku	38
Obr. 49 Součást Knee_implant	39
Obr. 50 Přidání dvou závitových otvorů na součást	39
Obr. 51 První varianta upínacího přípravku	40
Obr. 52 Chybný návrh upínacího přípravku	41
Obr. 53 Rádiový náběh na střední část	41
Obr. 54 Vyrobená finální verze upínacího přípravku s upnutou součástí Knee_implant	41
Obr. 55 Sestava modelů součástí	42
Obr. 56 Požití funkce Move Component	42
Obr. 57 První pomocná plocha	43
Obr. 58 Dvojice pomocných ploch	43
Obr. 59 Pomocné plochy ve středu	43
Obr. 60 Kolize boku nástroje se součástí	43
Obr. 61 Rádiové pomocné plochy	43
Obr. 62 Řídící geometrie ve formě ploch	44
Obr. 63 Definice řezného nástroje v NX	45
Obr. 64 Souřadný systém MCS	45
Obr. 65 Umístění souřadného systému MCS na sestavě	45
Obr. 66 Definice obrobku, upínačů a obráběné plochy	46
Obr. 67 Kolize vřetena s upínačem	46
Obr. 68 Broušení bez vyklopení	47
Obr. 69 Broušení s vyklopením o 30°	47
Obr. 70 Nastavení dialogového okna pro experiment EXP08 v softwaru iGrind	48
Obr. 71 Dry run mode 2. stupeň kontroly	49
Obr. 72 Viditelnost v pracovním prostoru při broušení	49
Obr. 73 Součást po broušení HR00	50
Obr. 74 Součást po broušení HR01	50
Obr. 75 Součást po broušení s hodnotou sc = 0,005 mm	50
Obr. 76 Součást po broušení s hodnotou sc = 0,001 mm	50
Obr. 77 Průběh zatížení při EXP07	58
Obr. 78 Profilová křivka opotřebení brusného kotouče při hrubování	60

Seznam tabulek:

Tabulka 1 Vztah mezi velikostí brusného zrna a drsnosti povrchu [5]	15
Tabulka 2 Volba tvrdosti kotouče	16
Tabulka 3 Vstupní faktory ovlivňující kvalitu povrchu	30

Tabulka 4 Návrh variant pro řeznou rychlost.....	31
Tabulka 5 Návrh hodnot posuvové rychlosti a "maximal scallop height" pro experiment	31
Tabulka 6 Parametry experimentu Knee_implant	32
Tabulka 7 Hodnoty drsnosti povrchu pro experimenty s hodnotou sc 0,005 mm	51
Tabulka 8 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro EXP01	51
Tabulka 9 Hodnoty drsnosti povrchu pro experimenty s hodnotou $sc = 0,001$ mm.....	53
Tabulka 10 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro EXP05	53
Tabulka 11 Naměřené hodnoty geometrické přesnosti EXP01 v řezu 6	55
Tabulka 12 Řezné podmínky pro geometrické posunutí drah	56
Tabulka 13 Výpočet geometrické přesnosti posunutí drah mezi EXP01 a HR01	57
Tabulka 14 Hodnoty průměru brusného kotouče po opotřebení.....	59

Seznam grafů:

Graf 1 Průměrná hodnota Ra při $sc = 0,005$ mm	52
Graf 2 Průměrná hodnota Rz při $sc = 0,005$ mm.....	52
Graf 3 Průměrná hodnota Rq při $sc = 0,005$ mm	52
Graf 4 Průměrná hodnota Ra při $sc = 0,001$ mm	53
Graf 5 Průměrná hodnota Rq při $sc = 0,001$ mm	54
Graf 6 Průměrná hodnota Rz při $sc = 0,001$ mm.....	54
Graf 7 Vliv naklonění brusného kotouče na drsnost povrchu	54
Graf 8 Geometrická přesnost EXP01	56
Graf 9 Geometrická přesnost posunutí drah.....	57
Graf 10 Průběh zatížení při řezné rychlosti 30 m/s	58
Graf 11 Průběh zatížení při řezné rychlosti 40 m/s	59
Graf 12 Porovnání zatížení mezi řeznými rychlostmi	59
Graf 13 Průběh opotřebení na průměru brusného kotouče	60
Graf 14 Velikost vlivu vstupních parametrů na drsnost 1	61
Graf 15 Velikost vlivu vstupních parametrů na drsnost 2	61

Seznam příloh

- Příloha č. 1 – Ukázka NC kódu za použití postprocesoru: Anca_tx7_5-axis_metric_v1.0 (všité do vazby)
- Příloha č. 2 – Ukázka NC kódu za použití postprocesoru: anca_tx7_polar_metric_v1.0 (všité do vazby)
- Příloha č. 3 – Technická specifikace nástrojařské brusky ANCA MX7 (všité do vazby)
- Příloha č. 4 – Výrobní výkres upínacího přípravku (všité do vazby)
- Příloha č. 5 – Měřicí protokol drsnosti povrchu EXP01 a EXP05(všité do vazby)
- Příloha č. 6 – Měřicí protokol pro geometrickou přesnost (všité do vazby)
- Příloha č. 7 – Průběh zatížení vřetena experimentu EXP07 (všité do vazby)
- Příloha č. 8 – Grafy drsnosti povrchu parametrů Rz a Rq v závislosti na vyklopení brusného kotouče (všité do vazby)
- Příloha č. 9 – Grafy geometrické přesnosti posunutí drah (všité do vazby)

Příloha č. 1

**Ukázka NC kódu za použití postprocesoru:
Anca_tx7_5-axis_metric_v1.0**

(celý NC kód je umístěn na CD ve složce
NC data/program_sc0,005/Knee_final_sc005_MFG_5axis1)

```

{*** Local Variables ***}

impact_feedrate = g_fv1
grind_feedrate = g_fv2
RW = g_fv3
gap_x = g_fv5
gap_y = g_fv6
gap_z = g_fv7
dressToothNum = g_iv2
sDrsBetTeethOn = g_bv2
passNum = g_iv12
{*****}
CRCOFF
N1
if (teeth_num != 1) goto N2
(cnc)g_fv79 = 1
{ NX Wheel Radius :- 50.000 }
{ NX Wheel Width or Tool Flute Length: - 6.000 }
{ NX Main MCS :- MCS_MASTER }
{ NX Operation Name :- POUS }
{ Initial Move }
if (passNum = 1) then
else
ifend
C-60.
sync
(lm1)cs_sv1 = "RAPID Move"
G00 G71 Y99.744 Z-50.691 C-60. A3.539
X-104.598
{ Approach Move }
A3.539
sync
(lm1)cs_sv1 = "APPROACH Move"
G90 Y70.162 Z-52.852 X-104.598 C-60. A3.539 {Combine Rapid XYZAC Move - UDE activated}
{ Start Grinding Moves }
G01 F(impact_feedrate)
{ START TGP SETUP Set up TGP to show the move progress bar }
cs_iv1 = 2
(cnc)g_iv0 = 9 { A Axis is the progress indicator }
(cnc)g_fv70 = 3.539000 { TGP move progress start position }
(cnc)g_fv71 = -85.295000 { TGP move progress end position }
{ END TGP SETUP }
sync
(lm1)cs_sv1 = "ENGAGE Move"
SPLINEON ST(UNIFORM) TF0.0
Y(69.55975+(-0.86586*RW)) Z(-52.80538+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(68.96779+(-0.86586*RW)) Z(-52.68644+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(68.39449+(-0.86586*RW)) Z(-52.49702+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(67.84820+(-0.86586*RW)) Z(-52.23988+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(67.33688+(-0.86586*RW)) Z(-51.91877+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(66.86800+(-0.86586*RW)) Z(-51.53836+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(66.44840+(-0.86586*RW)) Z(-51.10421+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(66.08418+(-0.86586*RW)) Z(-50.62265+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(65.78066+(-0.86586*RW)) Z(-50.10070+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(65.54228+(-0.86586*RW)) Z(-49.54596+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(65.37249+(-0.86586*RW)) Z(-48.96654+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(65.27379+(-0.86586*RW)) Z(-48.37088+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(65.24760+(-0.86586*RW)) Z(-47.76766+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
SPLINEOFF
{Spl count=13}
F(grind_feedrate)
sync
(lm1)cs_sv1 = "Grinding Move"
SPLINEON ST(UNIFORM) TF0.0
Y(65.27325+(-0.86586*RW)) Z(-46.26193+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(65.34615+(-0.86586*RW)) Z(-41.98194+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(65.34626+(-0.86586*RW)) Z(-41.97564+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(65.34637+(-0.86586*RW)) Z(-41.96934+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
Y(65.34658+(-0.86586*RW)) Z(-41.95674+(0.01966*RW)) X(-104.59808+(0.49990*RW)) C-60. A3.539
.
.
.
Y(66.44704+(-0.86029*RW)) Z(11.75717+(-0.11486*RW)) X(-135.88365+(0.49669*RW)) C-60. A-237.125
Y(66.95221+(-0.86029*RW)) Z(11.86315+(-0.11486*RW)) X(-136.19690+(0.49669*RW)) C-60. A-237.125
SPLINEOFF
{Spl count=13}
sync
(lm1)cs_sv1 = "DEPARTURE Move"
sync
cs_iv1 = 3
G00 Y104.527 Z-30.765 X-136.197 C-60. A-237.125 {Combine Rapid XYZAC Move - UDE activated}
{End of Tool Path for Operation :- POUS}
N3
g_bv1 = true {Stop}
return

```

Příloha č. 2

Ukázka NC kódu za použití postprocesoru: anca_tx7_polar_metric_v1.0

(celý NC kód je umístěn na CD ve složce NC
data/program_sc0,005/Knee_final_sc005_MFG_polar)


```

{*** Initialise Local Variables ***}
impact_feedrate = g_fv1
grind_feedrate = g_fv2
{cnc_offset} RW = g_fv3
gap_x = g_fv5
gap_y = g_fv6
gap_z = g_fv7
dressToothNum = g_iv2
IsDrsBetTeethOn = g_bv2
{*****}

{***}
{ Operation Group Name :- POLAR }
{ Operation Name :- RADIUS }
{ NX Operation MCS Name :- MCS_MASTER }
{***}

{ ** 2D Cutter Compenstation applied **}
{!! Output is at Wheel centre and Compenstating Y,Z !!}

{ Initial Move}
N1
if (teeth_num != 1) goto N2
(cnc)g_iv79 = 1
{ Continue Grinding }

cs_sv1 = "Move to Gap position"
G00 Z(84.5216 + gap_Z) Y(0.0 + gap_Y) X( -50.0061 + gap_X)

C-90.0 {Default C-Axis Position}
A207.078
SPLINEOFF
cs_sv1 = "RAPID Move"
Z84.522 Y0.0
X-50.006
cs_sv1 = "APPROACH Move"
Z72.372 Y0.0
G90
G01 F(1.0 * impact_feedrate)
cs_sv1 = "ENGAGE Move"
Z(71.773555+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.006113+(0.000000*RW)) A207.615 {Xoff0.00000}
{ START TGP SETUP Set up TGP to show the move progress bar }
cs_iv1 = 2
(cnc)g_iv0 = 9 { A Axis is the progress indicator }
(cnc)g_fv70 = 0.000000 { TGP move progress start position }
(cnc)g_fv71 = 432.405177 { TGP move progress end position }
{ END TGP SETUP }
SPLINEON
Z(71.188764+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.006113+(0.000000*RW)) A207.736 {Xoff0.00000}
Z(70.626922+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.006113+(0.000000*RW)) A207.914 {Xoff0.00000}
Z(70.096870+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.006113+(0.000000*RW)) A208.15 {Xoff0.00000}
Z(69.607148+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.006113+(0.000000*RW)) A208.44 {Xoff0.00000}
Z(69.165824+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.006113+(0.000000*RW)) A208.78 {Xoff0.00000}
Z(68.780324+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.006113+(0.000000*RW)) A209.166 {Xoff0.00000}
Z(68.457253+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.006113+(0.000000*RW)) A209.592 {Xoff0.00000}
Z(68.202241+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.006113+(0.000000*RW)) A210.051 {Xoff0.00000}
Z(68.019787+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.006113+(0.000000*RW)) A210.535 {Xoff0.00000}
Z(67.913145+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.006113+(0.000000*RW)) A211.036 {Xoff0.00000}
Z(67.884229+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.006113+(0.000000*RW)) A211.545 {Xoff0.00000}
Z(67.933560+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.006113+(0.000000*RW)) A212.052 {Xoff0.00420}
F(1.0 * grind_feedrate)
cs_sv1 = "Grinding Move"
Z(68.170732+(-0.990535*RW)) Y(0.000000+(0.137257*RW)) X(-50.008795+(0.000000*RW)) A213.309 {Xoff0.00556}
Z(68.473630+(-0.987990*RW)) Y(0.000000+(0.154518*RW)) X(-50.008994+(0.000000*RW)) A214.965 {Xoff0.00567}
Z(68.765138+(-0.989995*RW)) Y(0.000000+(0.141103*RW)) X(-50.008681+(0.000000*RW)) A216.624 {Xoff0.00557}
.
.
.
Z(93.592142+(-0.992028*RW)) Y(0.000000+(0.126021*RW)) X(-81.500000+(0.000000*RW)) A487.794 {Xoff0.00000}
Z(94.116472+(-0.992028*RW)) Y(0.000000+(0.126021*RW)) X(-81.500000+(0.000000*RW)) A487.611 {Xoff0.00000}
SPLINEOFF
cs_sv1 = "DEPARTURE Move"
G00 Z105.69 Y0.0

N4
g_bv1 = true {Stop Grinding}
return

{--- INITIALISE TGP WINDOW VARs ---}
(cnc)g_iv80=3 {Num Cuts}
return
{-----}

```

Příloha č. 3

Technická specifikace nástrojařské brusky ANCA MX7

3 MACHINE SPECIFICATIONS

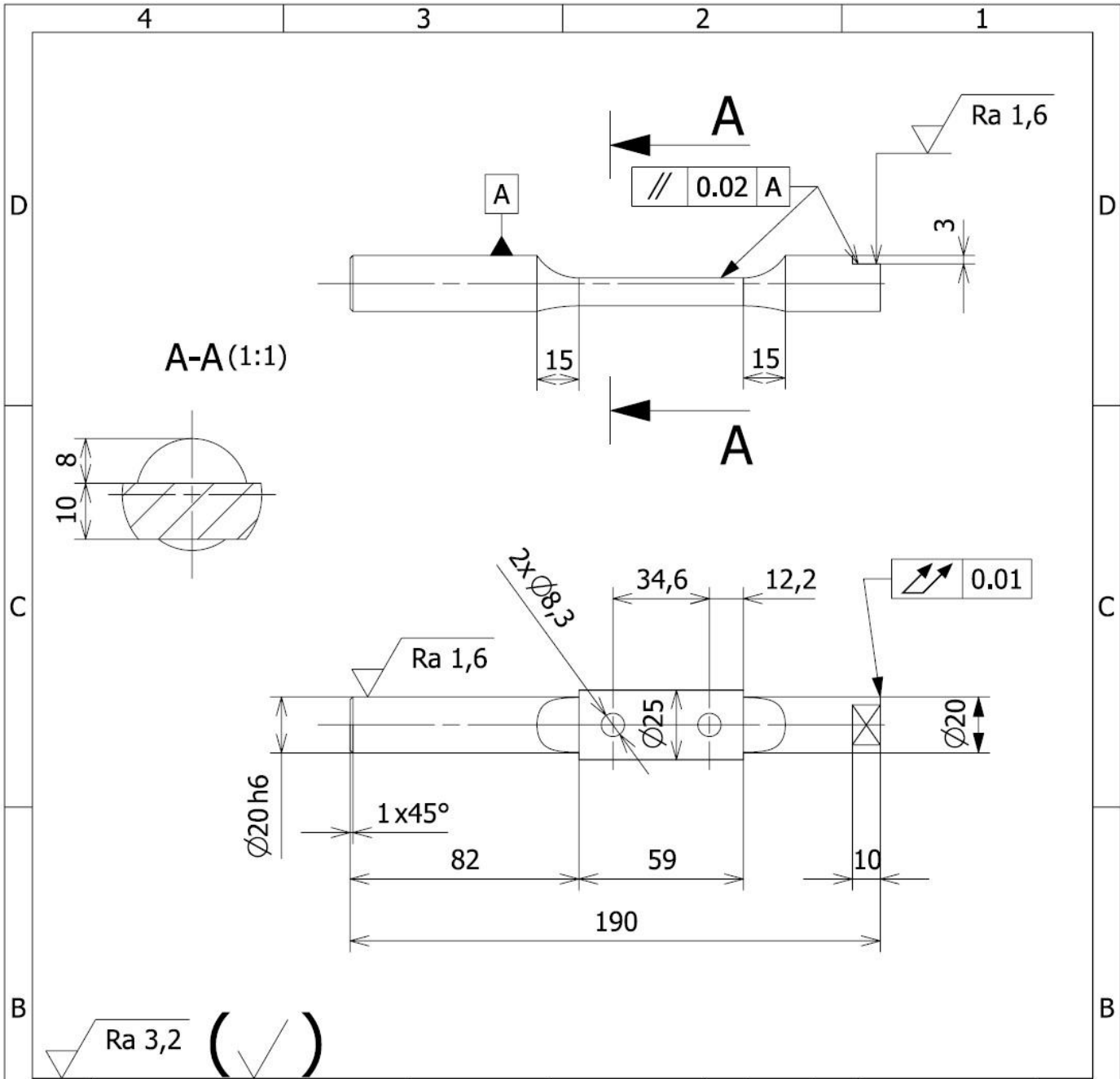
Model	MX7					
CNC System	ANCA 6DX					
Processor	Intel Core 2 Duo or higher					
Memory	1Gb or higher					
Hard Disk	80 Gbyte or higher					
Display	15" LCD					
Touch Screen	Touch Screen					
RS232	2 Channels					
Parallel	1 Channel					
Expansion	2 USB ports					
Working Range	Hard Axes					
	X-axis	Y-axis	Z-axis	A-axis	C-axis	Q-axis
Pitch	10mm	10mm	5mm			
Travel	536 mm	507 mm	215 mm	360deg	264deg	360deg
Position Feedback Resolution	0.0001mm	0.0001mm	0.0001mm	0.0001deg	0.0001deg	0.03deg
Programming Resolution	0.001mm 0.000039"	0.001mm 0.000039"	0.001mm 0.000039"	0.001deg	0.001deg	0.3deg
Max. feed rate	18m/min	18m/min	9m/min	3000 RPM as spindle 600 RPM as A-Axis	21600deg/ min	
Lube System	Auto	Auto	Auto			
Drive System	ANCA Digital (SERCOS)/ Linear axes direct-drive ballscrew			Rotary axes direct drive		
	Soft Axes					
	B-axis	U-axis	V-axis	W-axis		A`-axis
Programming Resolution	0.001deg	0.001mm	0.001mm	0.001mm		0.001deg
	Software driven					
Work head						
Work piece Taper	ISO 50 Pull stud retention ready					
Speed Range	0-3000 RPM					
Max. Swing	350mm			13.8"		
	50Kg (max.)			550Lb		
Sealing	Continuous Air Purge					
Cooling	Oil Cooled					
Capacity (tool size)	3 - 16mm			Maximum Dia 100 mm		
System Type	Hydraulic Precision Collet Chuck					

Dresser (option)		
Drive	Integral direct drive	
Roll	8"	
Speed	0 - 3000 RPM	
Internal Lights	1 off	
Air Conditioner*	optional	
Grinding Spindle		
Drive	Integral direct drive	
Power	20kW(S1) / 26.8Hp	
Speed range	1-10000 RPM CW & CCW	
Sealing	Continuous Air Purge	
Cooling	Oil Cooled	
Taper	Big Plus HSK50F	
Wheel Bore	31.75mm max. / 1.250"	
Wheel Packs with wheel exchanger	6	
Wheels per Pack	4	
Max. Wheel Diameter	203 mm (8")	
Max. Wheel Speed	refer to wheel manufacturer specifications	
Max. Wheel Arbor Length	75 mm	
Wheel Pack Weight (total Wheel Pack Assembly)	11 kg	
Grinding Wheel Material	No restrictions	
Probe		
Type	Renishaw Probe LP2	
Tip Construction	Replaceable Carbide	
Machine		
Colour	RAL7035/RAL5014	
Electrical Power	25 kVA	
Air Pressure	6.0 Bar	88 Psi
Max. Hydraulic System Pressure	120 Bar	
Weight	5500 Kg	12,125 Lb
Base Material	"ANACRETE" Polymer Concrete	
Footprint of machine		
With Tool Loader	2325 x 2240 x 2015mm	92"x 88" x 80"
Loading system (option)		
Manufacturer	ANCA	
Number of tools	3 mm - 16 mm	840 tools - 154 tools
Diameter of Shank	3-16mm	1/8" - 5/8"
Max. Tool length	220mm	8.5"
Max. Tool diameter	100mm	
Drive System	Digital closed loop	

*Recommended when ambient is above 35 °C (95 °F)

Příloha č. 4

Výrobní výkres upínacího přípravku



---		---	/	---	---	---	---	-
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychozi	T.O.	C,hmot.	H,hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R,weig.	Assembly drawing no.	Quant.

CAD 1 Datum / Date Jmeno / Name

Kreslil / Drawn by		
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		



FAKULTA STROJNÍ
ZAPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznámka / Note:

<p>Tolerance / Tolerovani</p> <p>ISO 128</p> <p>ISO 8015 ISO 2768mK ISO 13715</p>	Soubor-model / ASM-file	Projekt / Project:	Meritko / Scale
	Upinac	C.sestavy / Assembly No.	
	Soubor-vykres / DRW-file	Upinac	1:2
Material	16 341	Rev.	Formát
		Cislo vykresu / Drawing No.	A4
		List / sheet no. 1	Pocet listu / sheets 1

4 3 2 1

Příloha č. 5

Měřicí protokol drsnosti povrchu EXP01 a EXP05

(Všechny protokoly z měření drsnosti jsou umístěny na CD ve složce Drsnost)

Měřicí protokol

HOMMEL-ETAMIC
TURBO WAVE V7.45

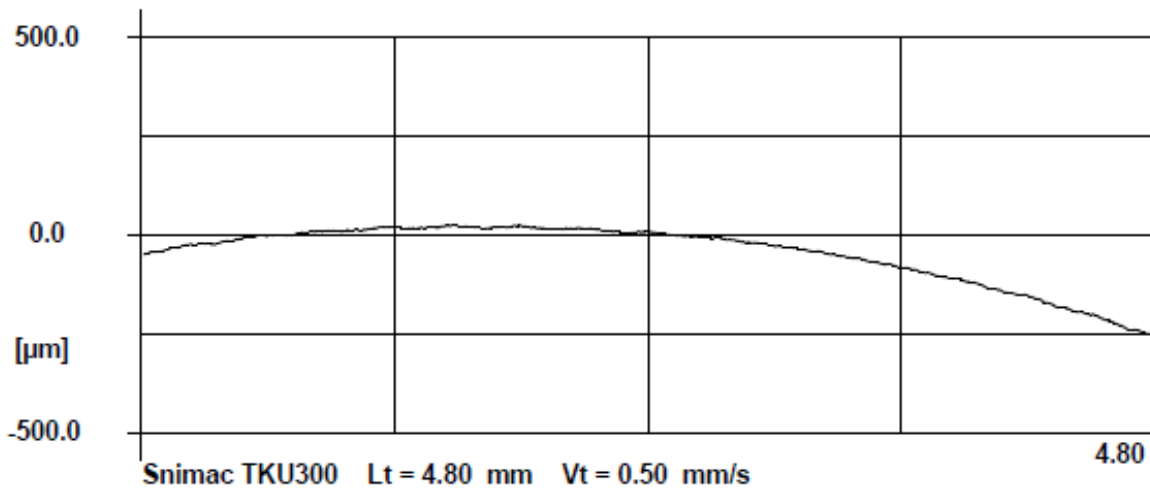
Merici podmínky

Snimac: TKU300
Mer.rozsah: 800 μm
Linearni pos. pristroj: waveline 120
Merici draha (Lt) : 4.80 mm
Posuvova rychlost (Vt): 0.50 mm/s
Mer.hodnoty: 711

Zakaznik:

4-2

P- Profil vyrovnan Lc/Ls = VYP

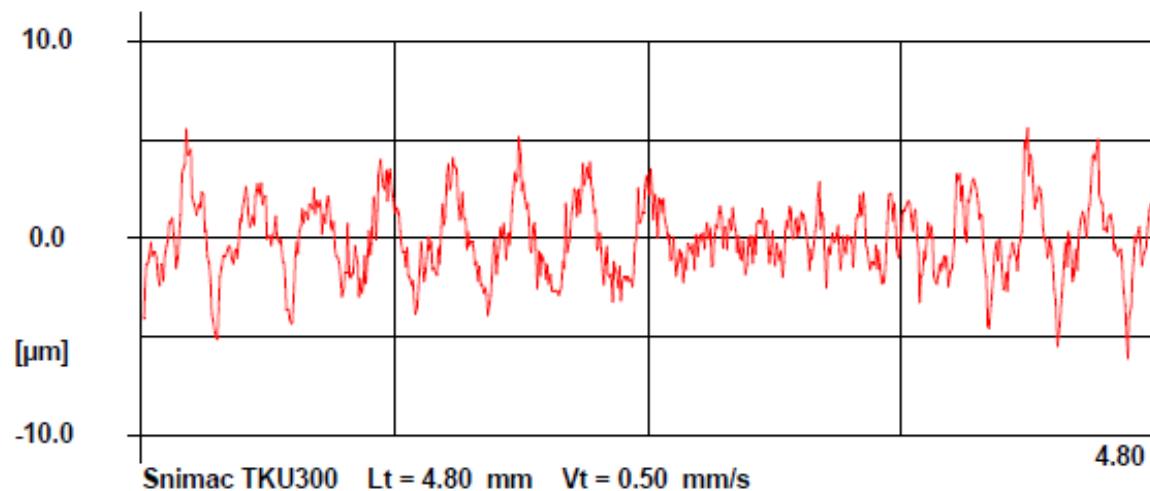


Pt 284.1 μm
Pz 220.1 μm
Pa 44.2 μm
PSm --- mm

Rz 8.9 μm
Ra 1.5 μm
RSm 0.171 mm
Rq 1.9 μm

Wt 279.2 μm
Wz 68.6 μm
Wa 57.6 μm
WSm --- mm

R- Profil vyrovnan Filtr ISO 16610-22 Lc = 0.800 mm



Měřil: Kutlwašer

20.02.17
08:21

Měřicí protokol

HOMMEL-ETAMIC
TURBO WAVE V7.45

Merici podmínky

Snimac:

TKU300

Mer.rozsah:

800 μm

Linearni pos. pristroj:

waveline 120

Merici draha (Lt) :

4.80 mm

Posuvova rychlost (Vt):

0.50 mm/s

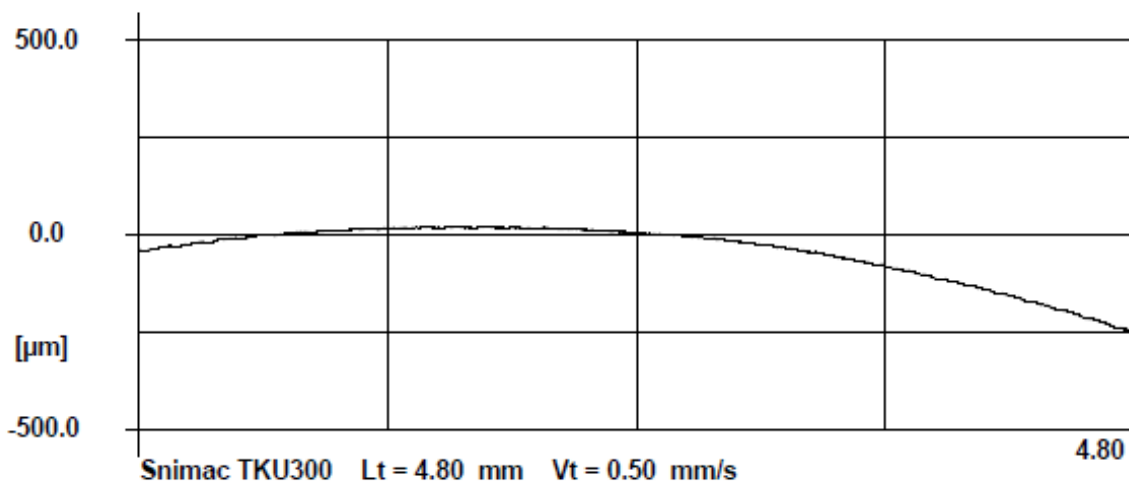
Mer.hodnoty:

2000

Zakaznik:

4-2

P- Profil vyrovnan Lc/Ls = VYP

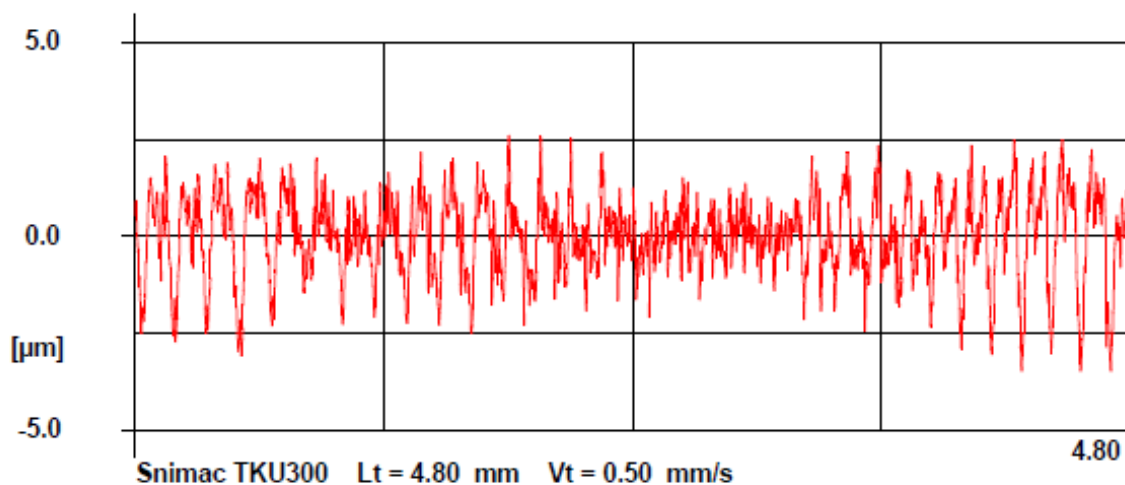


Pt 275.5 μm
Pz 212.7 μm
Pa 42.9 μm
PSm --- mm

Rz 5.1 μm
Ra 0.8 μm
RSm 0.065 mm
Rq 1.0 μm

Wt 271.8 μm
Wz 66.3 μm
Wa 56.3 μm
WSm --- mm

R- Profil vyrovnan Filtr ISO 16610-22 Lc = 0.800 mm



Měřil: Kutlwašer

24.02.17
07:44

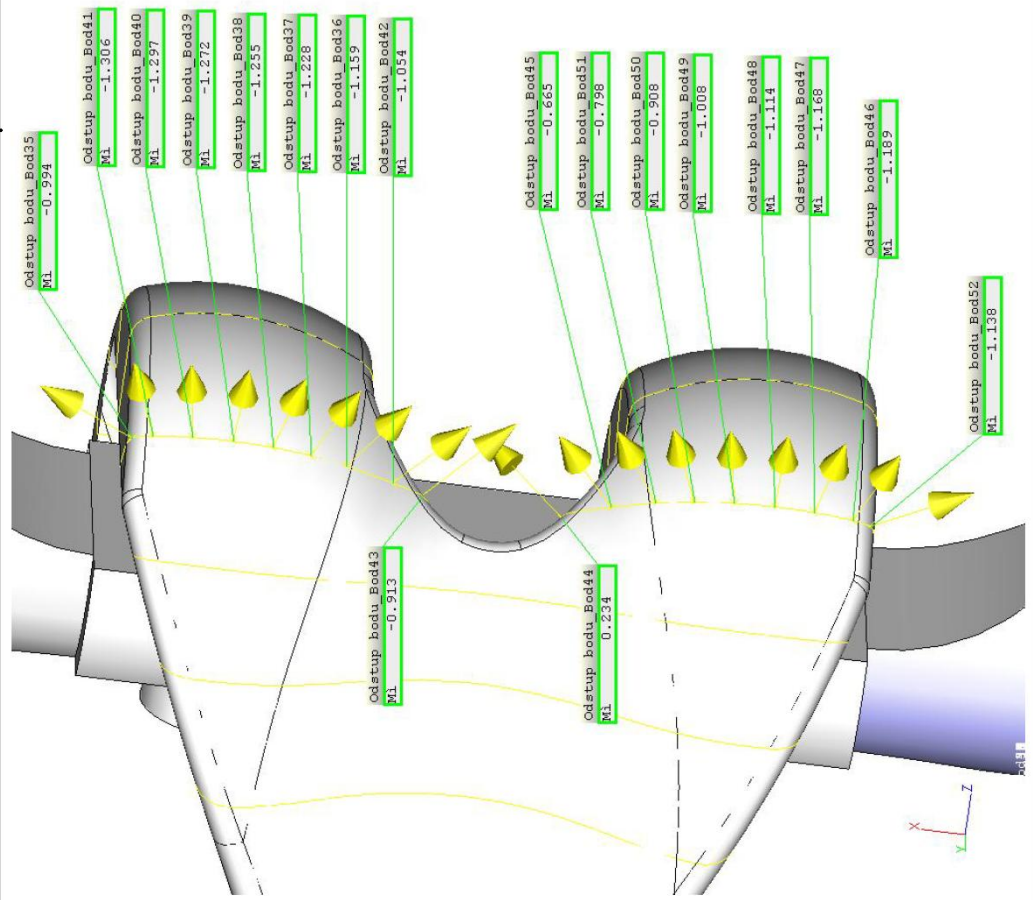
Příloha č. 6

Měřicí protokol pro geometrickou přesnost

(Všechny protokoly z měření geometrické přesnosti jsou umístěny na CD ve složce Geometrická přesnost)



Programme Všechny charakteristiky Č. dílu inkrementálně 9	Náz.souč. 007-17	Datum 22 Februar 2017	Tepl. souč.	Číslo výkresu * drawingno *
	Zpráva č.: * vda_auditno *	Čas 14:11:52	Operátor Master	Datum změny 22 Februar 2017 10:35:26



10 mm

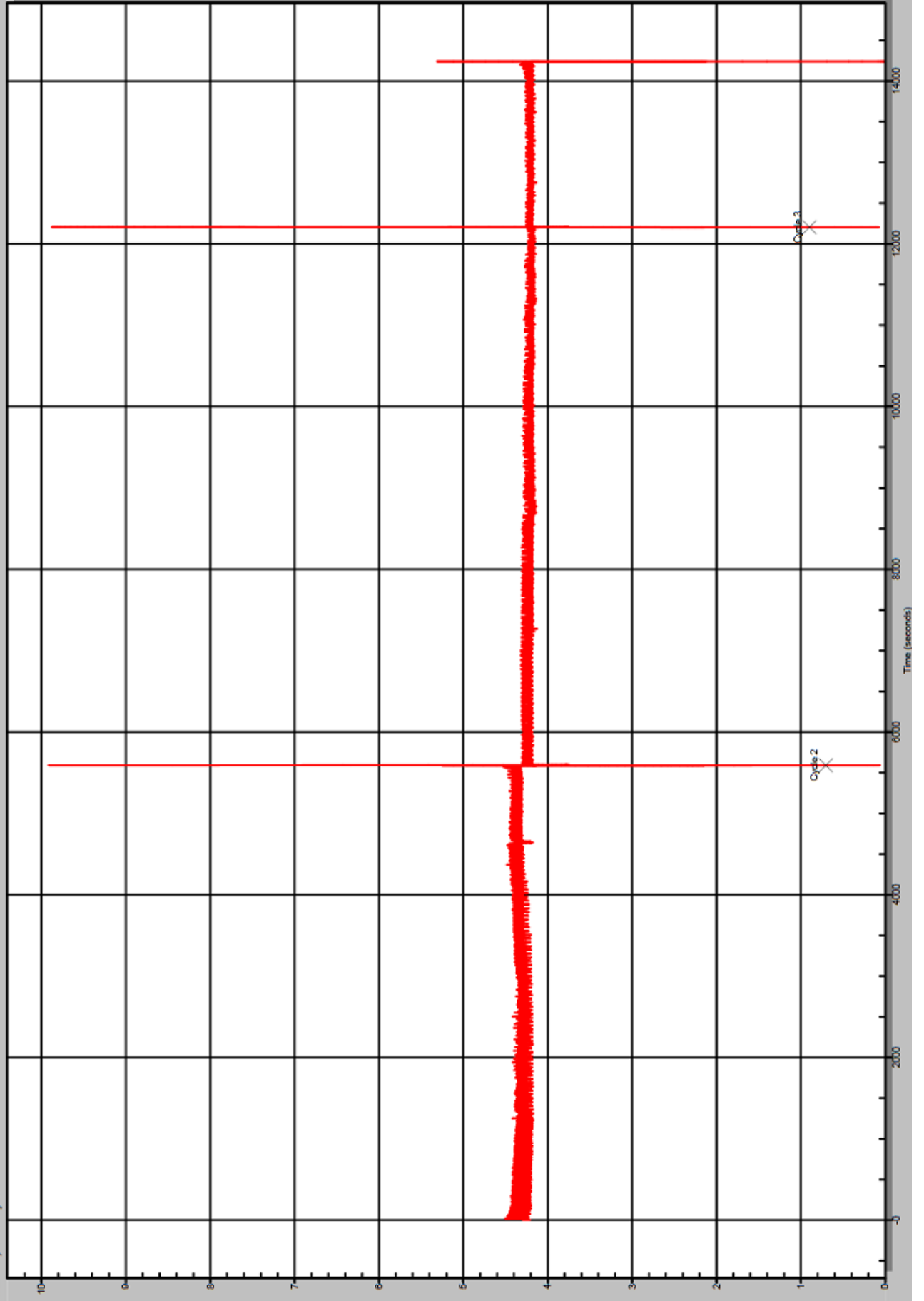
Příloha č. 7

Průběh zatížení vřetena experimentu EXP07

(Všechny průběhy zatížení vřetena jsou umístěny na CD ve složce Zatížení)

chart_out.datx

12:17:53 PM, 27 February 2017

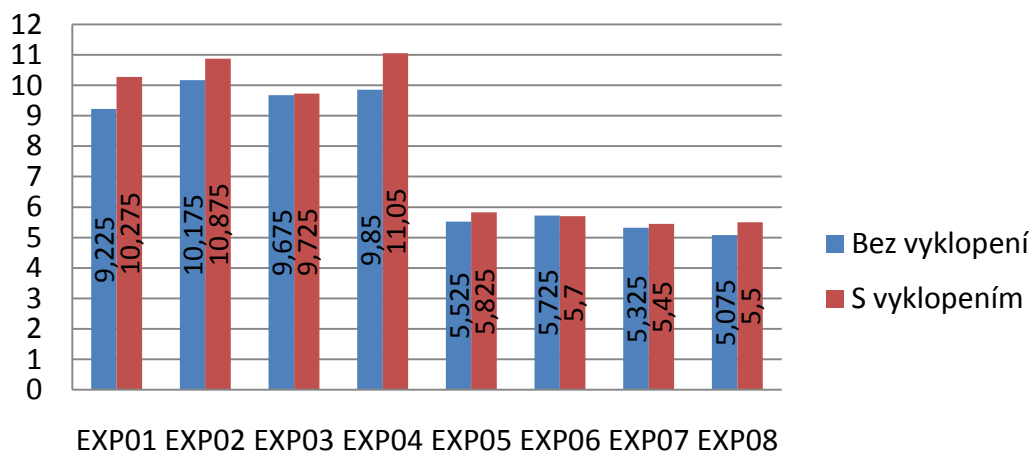


Příloha č. 8

Grafy drsnosti povrchu parametrů Rz a Rq v závislosti na vyklopení brusného kotouče

Rz [μm]

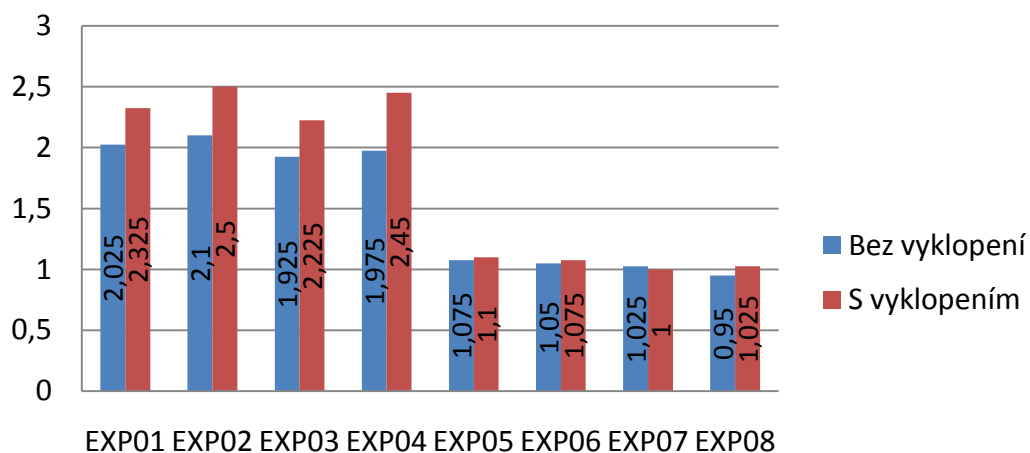
Průměrná hodnota Rz



Označení

Rq [μm]

Průměrná hodnota Rq

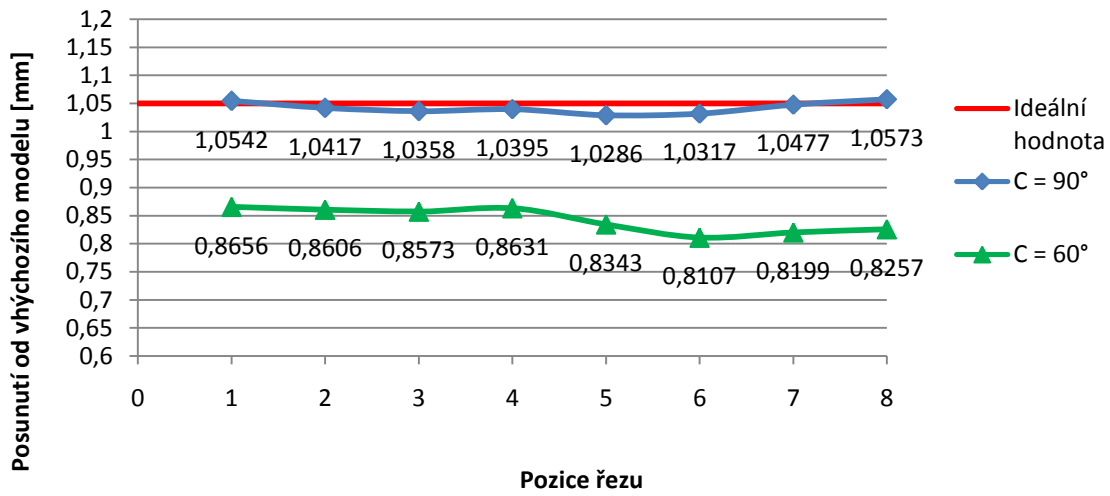


Označení

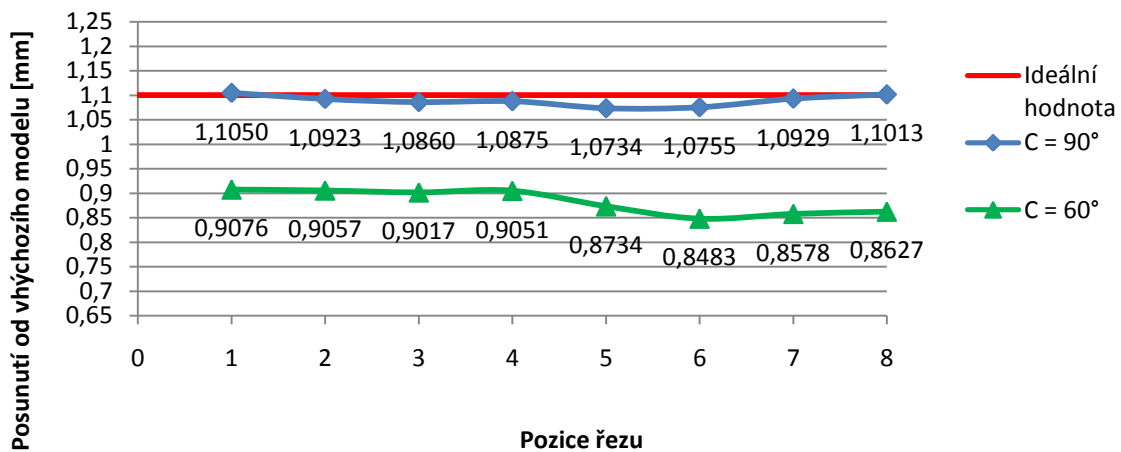
Příloha č. 9

Grafy geometrické přesnosti posunutí drah

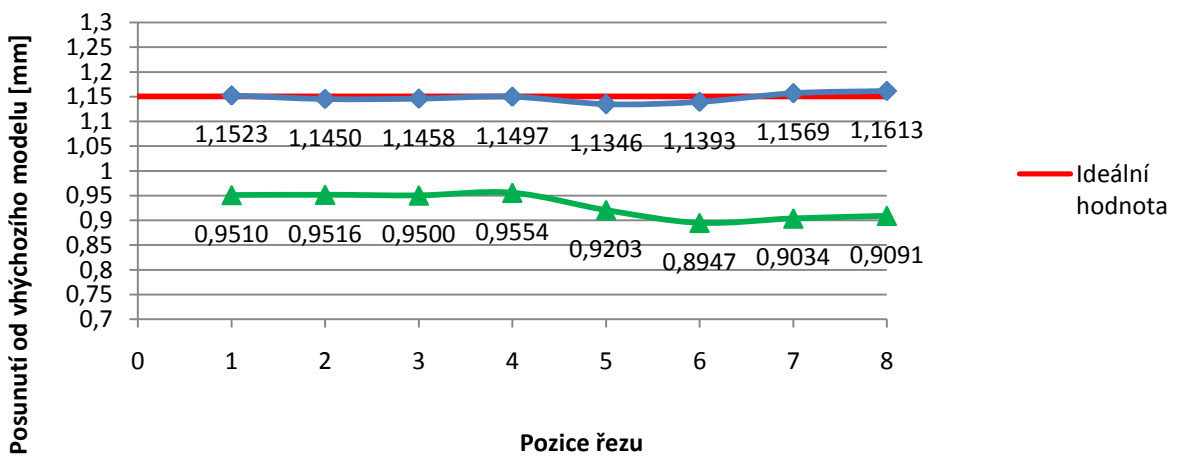
Geometrická přesnost hr 04



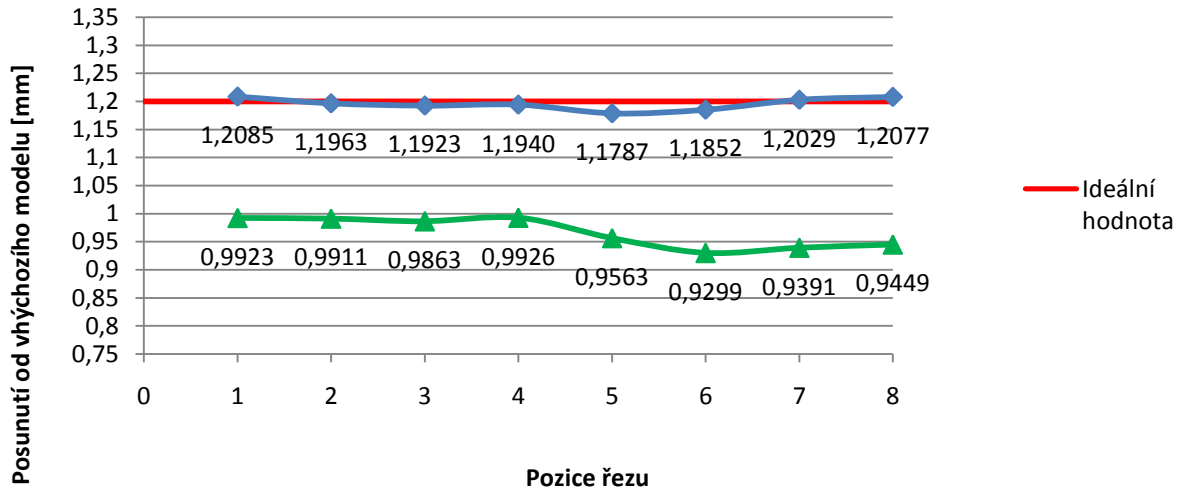
Geometrická přesnost EXP01



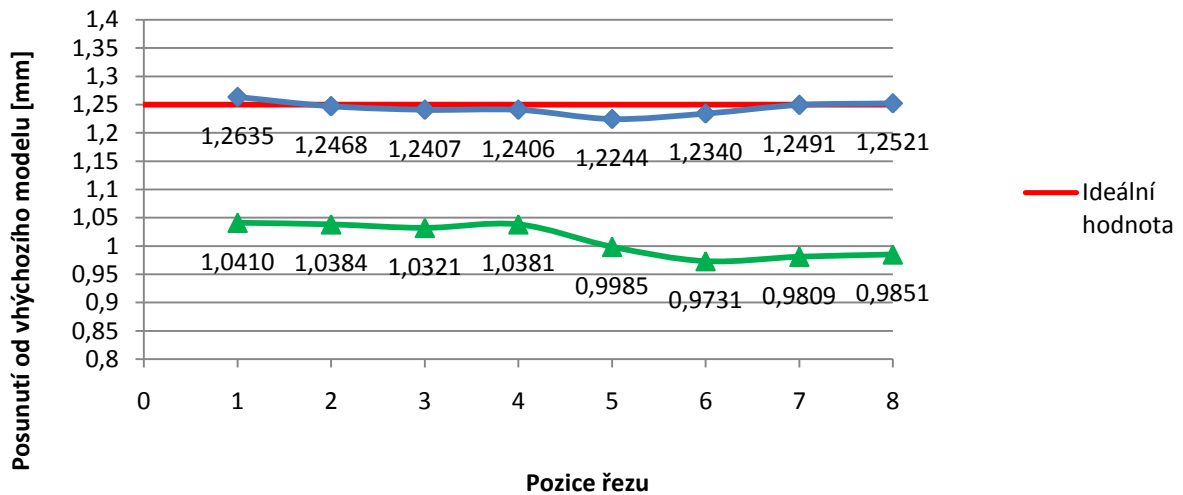
Geometrická přesnost EXP02



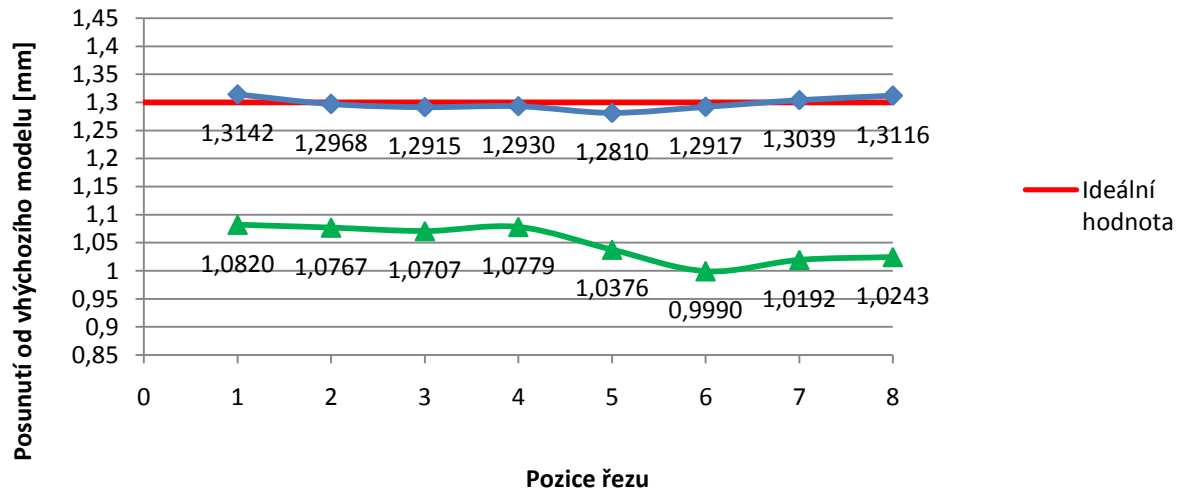
Geometrická přesnost EXP03



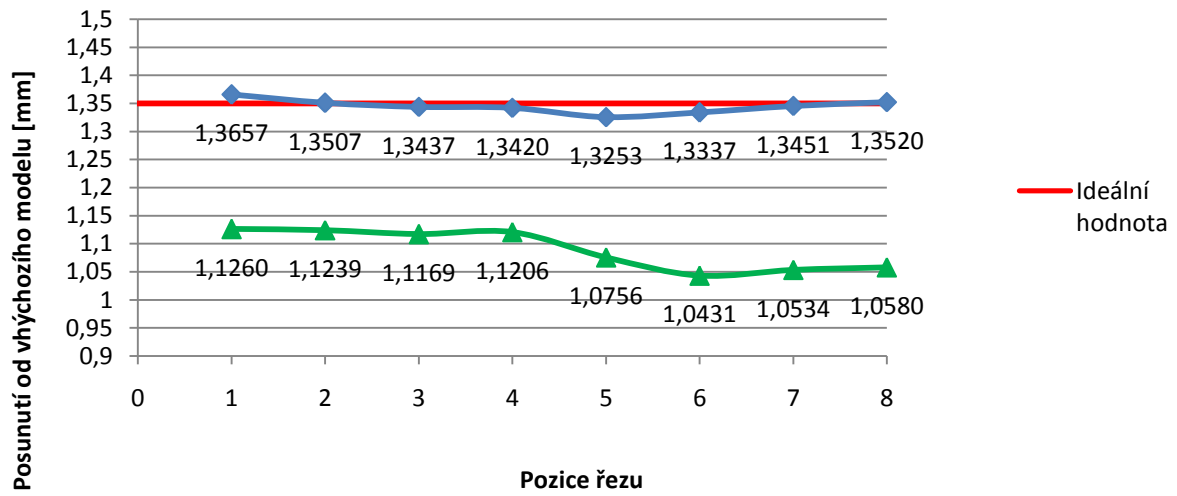
Geometrická přesnost EXP04



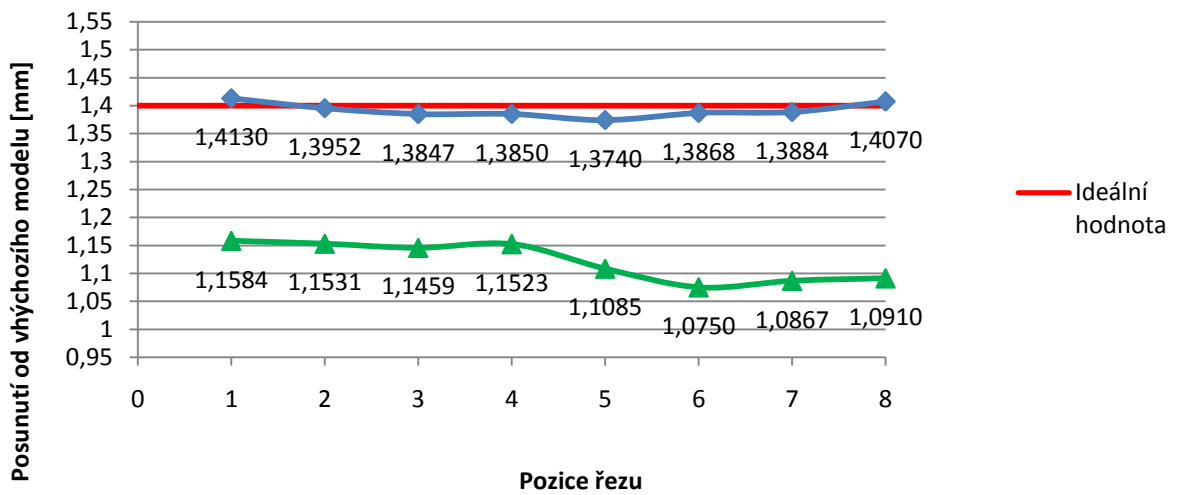
Geometrická přesnost EXP05



Geometrická přesnost EXP06



Geometrická přesnost EXP07



Geometrická přesnost EXP08

