

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

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

Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma:

Návrh metody výpočtu výchozího povrchu brusného nástroje pro ostření šnekových odvalovacích fréz

vypracovala samostatně, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:.....

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě děkuji mému školiteli doc. Ing. Jiřímu Česánkovi, Ph.D. za jeho vedení, připomínky a podporu v průběhu studia a vypracovávání této práce. Také děkuji Ing. Kamilu Ekštejnovi, Ph.D. a RNDr. Světlaně Tomiczkové za věnovaný čas a konzultace při vypracování teoretické části práce.

Dále děkuji Katedře technologie obrábění a Regionálnímu technologickému institutu za zázemí, které mi umožnilo tuto práci dokončit, a za poskytnutí prostoru a vybavení, na kterém bylo umožněno provést experimentální ověření teoretické části práce. Děkuji všem osloveným kolegům za jejich rady a připomínky, které mi v souvislosti s prací poskytli. Jmenovitě děkuji Ing. Lubošovi Kroftovi a Laboratoři technologie obrábění a Ing. Janu Kutlwašerovi, Ph.D. a Laboratoři dílenské metrologie za podporu při realizaci části experimentu, měření a konzultace k vyhodnocení dat a výstupů práce.

Další poděkování náleží firmě PilsenTools, s.r.o za poskytnutí prostor a zařízení pro realizaci druhé části experimentu.

Velké díky náleží mé rodině za podporu v průběhu vypracování.

ANOTACE

AUTOR	Příjmení (včetně titulů) Ing. Milsimerová	Jméno Aneta
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie-technologie obrábění	
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Česánek, Ph.D.	Jméno Jiří
PRACOVISŤE VEDOUcíHO	Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra technologie obrábění ZČU – FST - KTO	
DRUH PRÁCE	disertační	
NÁZEV PRÁCE	Návrh metody výpočtu výchozího povrchu nástroje pro ostření šnekových odvalovacích fréz	

Fakulta: Strojní
Katedra: Technologie obrábění
Rok odevzdání: 2018

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

Celkem	126	Textová část	68	Grafická část	58
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Práce je zaměřena na problematiku ostření šnekových odvalovacích fréz, kdy aplikací brusného nástroje s nevyhovující geometrií řezné části dochází k podřezání šroubové drážky a nedodržení požadované rovinnosti čela zubu. Na základě teoretické rešerše je navržena matematická metoda pro výpočet výchozího povrchu brusného nástroje pro tyto typy fréz a pomocí výpočtového modulu napsaného v syntaxi Visual Basic a implementovaného do Catia V5 jako makro je vygenerován 3D model brusného kotouče s odpovídající geometrií vzhledem ke geometrickým parametrům zadané odvalovací frézy. Správnost matematického řešení je ověřena experimentem orovnání brusného kotouče a broušení typového představitele šnekové odvalovací frézy.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	Šneková odvalovací fréza, podřezání šroubové drážky, matematický model, makro, Catia V5

SUMMARY

AUTHOR	Surname (including of Degrees) Ing. Milsimerová	Name Aneta
FIELD OF STUDY	Technology of Metal Cutting	
SUPERVISOR	Surname (including of Degrees) doc. Ing. Česánek, Ph.D.	Name Jiří
INSTITUTION	University of West Bohemia in Pilsen, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Metal Cutting	
TYPE OF WORK	dissertation	
TITLE OF THE WORK	Designing a mathematical method for determining the initial tool surface for sharpening a hobbing worm	

Faculty: Mechanical Engineering
 Department: Department of Machining Technology
 Submitted in: 2018

Number of pages (A4 a eq. A4)

Totally	126		Text part	68		Graphical part	58
----------------	-----	--	------------------	----	--	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis is focused on the issue of sharpening of hobbing worms. Using a grinding tool with inadequate geometrical parameters of its cutting parts causes undercutting of the helical groove and non-compliance with the required flatness of the tooth. A mathematical method for determining the initial tool surface is designed based on theoretical research of this issue. A 3D model of a grinding wheel with appropriate geometry for the geometric parameters of a hobbing worm is designed based on a computational module written in Visual Basic and implemented into Catia V5. The mathematical method was verified by experimental dressing of a grinding wheel according to the designed solution and the grinding operation of the selected type of hobbing worm.
KEY WORDS	Hobbing worm, face teeth undercut, mathematical model, macro, Catia V5

Obsah

Seznam obrázků	3
Seznam tabulek	6
Seznam zkratk	7
Úvod	9
1 Moderní trendy v broušení složitých tvarových ploch	9
1.1 Trendy ve vývoji brusných strojů	9
1.1.1 Řídicí systémy.....	9
1.2 NC programování broušení tvarově složitých ploch se zaměřením na šroubové drážky šnekových odvalovacích fréz	10
2 Přehled problematiky broušení šnekových odvalovacích fréz	17
2.1 Kinematika procesu	18
2.2 Problematika broušení tvarově složitých ploch na světové úrovni	22
2.2.1 Matematický model pro počítačem ovládané programování brusných kotoučů v oblasti broušení válcových fréz [10]	22
2.2.2 Geometrické modelování tvaru brusného kotouče pro šroubové drážky rovnaného pomocí nástroje s kruhovou geometrií [11].....	23
2.2.3 Metodika v několika krocích pro broušení plochy čel zubů odvalovacích fréz [12]	23
2.2.4 Automatické určení profilu brusného nástroje pro obrábění šroubových ploch pomocí rozhraní Catia / VB [13].....	23
2.2.5 Metodika výpočtu korekce zubu pro ostření šnekových odvalovacích fréz na pěti-osém CNC brusném centru [15]	24
3 Cíle disertační práce	25
3.1 Výběr typového přestavitele pro návrh graficko-početní metody	26
3.1.1 Odvalovací fréza se zvolenou geometrií.....	26
3.1.2 Stanovený brusný nástroj	28
4 Návrh analytické metody řešení.....	30
4.1 Matematický tvar odpovídajícího tvaru brusného kotouče.....	31
4.2 Parametrické vyjádření bodů výchozího povrchu brusného kotouče	47
4.3 Interpolace křivek.....	51
5 Návrh výpočtového modulu pro určení výchozího povrchu brusného nástroje pro broušení šnekových odvalovacích fréz	54
5.1 Analýza automatizačních nástrojů Catia V5.....	55
5.1.1 VB a VBA.....	55
5.1.2 CAA.....	56

5.2	Definice jazyků automatizačního nástroje VBA	56
5.2.1	Definice CATScript a CATVBS	57
5.3	Automatizace návrhu výpočtu tvaru výchozího povrchu brusného nástroje pro ostření šnekových odvalovacích fréz.....	58
5.3.1	Parametrický model se základní geometrií.....	63
5.3.2	Podprogramy.....	66
6	Experimentální ověření navržené metody	70
6.1	Výběr typového představitele pro experimentální ověření návrhu graficko-početní metody	70
6.1.1	Odvalovací fréza se zvolenou geometrií – Odvalovací fréza nástrčná levá	70
6.1.2	Stanovený brusný nástroj	71
6.2	Experimentální ověření – vstupní podmínky	72
6.3	Experiment	74
6.3.1	Vygenerování navrženého tvaru brusného kotouče vzhledem ke vstupním parametrům	74
6.3.2	Orovnání brusného kotouče	76
6.3.3	Měření tvaru orovnaného brusného kotouče	79
6.3.4	Broušení typového představitele odvalovací frézy.....	82
6.3.5	Měření brusného kotouče po broušení – shrnutí a diskuze výsledků experimentu.....	87
	Závěr.....	91
7	Citovaná literatura.....	94
	Seznam publikované literatury	97
	Přílohy.....	I

Seznam obrázků

Obrázek 1 Walter CAD/CAM tool studio[6]	12
Obrázek 2 Okamoto IQ - data brusného kotouče[7].....	13
Obrázek 3 ANCA I flute	14
Obrázek 4 ANCA I flute – zadání vstupních parametrů.....	14
Obrázek 5 Simulace broušení	15
Obrázek 6 Simulace broušení – detail	15
Obrázek 7 Odvalovací fréza šneková[8]	17
Obrázek 8 Odvalovací fréza šneková – detail zubů[8]	17
Obrázek 9 Geometrické charakteristiky odvalovací frézy šnekové[8]	18
Obrázek 10 Element tvořící šroubovou drážku	18
Obrázek 11 Pohled kolmo na osu nástroje	19
Obrázek 12 Poloha brusného kotouče ve drážce při broušení	19
Obrázek 13 Křivka záběru [8]	20
Obrázek 14 Podřezání šroubové plochy [8]	21
Obrázek 15 Grafická metoda – pohled do drážky[8]	21
Obrázek 16 Odchylna tvarů kotouče v pracovní části [8].....	22
Obrázek 17 Grafický model pro určení tvaru brusného nástroje [14].....	23
Obrázek 18 Model pro metodiku výpočtu korekce zubu [15]	24
Obrázek 19 Výkres typového představitele	27
Obrázek 20 Úhel čela [8]	27
Obrázek 21 Detail profilu kolmo na stoupání [8]	28
Obrázek 22 Základní rozměry brusného kotouče – geometrie [8]	29
Obrázek 23 Brusný kotouč – 3D model [8]	29
Obrázek 24 Diskretizace brusného kotouče [14]	31
Obrázek 25 Plocha čel zubů jako souvislá šroubová plocha	31
Obrázek 26 Základní parametry - definice	32
Obrázek 27 Charakteristika šroubovice [19]	32
Obrázek 28 Graf závislosti posunutí na délce oblouku [19].....	33
Obrázek 29 Řídící šroubovice	34
Obrázek 30 Profil zubu, plocha čel zubů	36
Obrázek 31 Tečna k řídící šroubovici v bodě B.....	37
Obrázek 32 Rovina α (modrá), rovina β_0 (zelená)	38
Obrázek 33 Vlevo: pohled kolmo do roviny α ; Vpravo: pohled kolmo do roviny β_0	39
Obrázek 34 Parametrický výpočet poloměru kružnice [19].....	40
Obrázek 35 Repräsentace rovnice (8) a (24) v softwaru Wolfram Mathematica pro zvolený interval $T \in 0, \pi[20, 5]$	41
Obrázek 36 Rovina β_{11} (modrá); Osa brusného kotouče O (oranžová); Kružnice K_{11} definující velký průměr brusného kotouče(zelená)	41
Obrázek 37 Pohled do roviny β_{11}	42
Obrázek 38 Soustava řezných rovin β_i (modrá)a soustava průniků S_i (zelená) jednotlivých řezných rovin β_i s osou nástroje O	43
Obrázek 39 Řezy soustavy rovin β_i a šroubové plochy.....	45
Obrázek 40 Soustava kružnic K_i definující aktuální průměr $R\beta_i$ brusného kotouče.....	46
Obrázek 41 Průběh funkce sinus a cosinus [21].....	48

Obrázek 42 Jednotková kružnice [22]	49
Obrázek 43 Vypočítané body výchozího povrchu brusného kotouče.....	50
Obrázek 44 Interpolace křivek [19]	51
Obrázek 45 Interpolace křivek pomocí polynomů [19].....	51
Obrázek 46 Fergusonova kubika [19]	52
Obrázek 47 Propojení vypočítaných bodů výchozího povrchu brusného nástroje kubickou spline křivkou	52
Obrázek 48 Automatizační nástroje Catia V5 [14]	55
Obrázek 49 Spuštění automatizačního nástroje VBA.....	57
Obrázek 50 Zadání vstupních parametrů	58
Obrázek 51 Potvrzení hodnot zadaných uživatelem.....	59
Obrázek 52 Zjednodušená interpretace šnekové odvalovací frézy	59
Obrázek 53 Graficko-početní metoda návrhu výchozího povrchu brusného nástroje pro ostření šnekových odvalovacích fréz.....	60
Obrázek 54 Graficko-početní metoda návrhu – detail vyšetřených bodů výchozího povrchu brusného nástroje	60
Obrázek 55 Graficko-početní metoda – pohled do roviny kolmé na stoupání řídicí šroubovice (rovina α).....	61
Obrázek 56 Vývojový diagram výpočtového modulu	62
Obrázek 57 Parametrický model se základní geometrií.....	63
Obrázek 58 Parametrický model se základní geometrií.....	64
Obrázek 59 Vývojový diagram generování řídicí šroubovice	65
Obrázek 60 Cyklus generování řídicí šroubovice.....	65
Obrázek 61 Vývojový diagram generování řezných rovin β_i	67
Obrázek 62 Vývojový diagram generování konstrukce jednotlivých bodů A_i brusného kotouče.....	69
Obrázek 63 Odvalovací fréza nástrčná levá	71
Obrázek 64 Výchozí sestava pro orovnění	72
Obrázek 65 Multifunkční soustružnické centrum DMG Mori CTX Beta 1250 TC.....	73
Obrázek 66 3D souřadnicový měřicí stroj Zeiss Prismo	73
Obrázek 67 4-osý broušicí stroj Shutte	73
Obrázek 68 Kinematika broušicího stroje Shutte [8]	74
Obrázek 69 Zadání vstupních parametrů typového představitele pro experiment	74
Obrázek 70 Model brusného kotouče vytvořeného na základě vypočítaných a vygenerovaných dat	75
Obrázek 71 Model sestavy polotovaru a upínače.....	75
Obrázek 72 Podříznutí typového představitele s použitím výchozího tvaru brusného kotouče	76
Obrázek 73 Simulace orovnění brusného kotouče v SolidCAM.....	76
Obrázek 74 Destička DCMT 11T308 ID.....	77
Obrázek 75 Sestava upnutí destičky v držáku	77
Obrázek 76 Zakrytí prostoru soustružnického centra.....	78
Obrázek 77 Měření házení upnuté sestavy brusného kotouče	78
Obrázek 78 Orovnaný brusný kotouč.....	79
Obrázek 79 Měření brusného kotouče po orovnění.....	80
Obrázek 80 Nastavení podmínek měření.....	81
Obrázek 81 Naměřená data po orovnění.....	81

Obrázek 82 Průběh orovnaného profilu tvaru brusného kotouče.....	82
Obrázek 83 Upnutí orovnaného kotouče a typového představitele pro broušení.....	83
Obrázek 84 Detail pohledu do drážky před broušením	84
Obrázek 85 Zakřivení šroubovice	84
Obrázek 86 Pohled do pracovního prostoru po broušení.....	85
Obrázek 87 Finální drážka	85
Obrázek 88 Měřicí protokol odvalovacích fréz	87
Obrázek 89 Měření odchylky rovinnosti čela zubu	87
Obrázek 90 Měření tvaru brusného kotouče po broušení.....	88
Obrázek 91 Naměřená data po broušení	88
Obrázek 92 Naměřený profil 1 po broušení.....	89
Obrázek 93 Naměřený profil 2 po broušení.....	89

Seznam tabulek

Tabulka 1 Geometrické parametry zvoleného typového představitele	26
Tabulka 2 Geometrické parametry typového představitele – požadavky na přesnost.....	27
Tabulka 3 Geometrické parametry stanoveného brusného nástroje.....	28
Tabulka 4 Definice programovacích jazyků Catia V5 [25]	57
Tabulka 5 Geometrické parametry zvoleného typového představitele pro realizaci experimentu	70
Tabulka 6 Geometrické parametry typového představitele pro realizaci experimentu – požadavky na přesnost.....	70
Tabulka 7 Charakteristika stanoveného brusného nástroje	71
Tabulka 8 Parametry stanoveného brusného nástroje (viz Obrázek 22, str. 28)	71
Tabulka 9 Podmínky pro orovnění brusného kotouče	78
Tabulka 10 Podmínky měření brusného kotouče po orovnění.....	80
Tabulka 11 Podmínky pro broušení typového představitele	83
Tabulka 12 Odchylka rovinnosti zubu	86
Tabulka 13 Naměřené hodnoty u hlavy zubu před operací broušení.....	90
Tabulka 14 Naměřené hodnoty u hlavy zubu po operaci broušení	90
Tabulka 15 Naměřené hodnoty u hlavy zubu před operací broušení.....	90
Tabulka 16 Naměřené hodnoty u hlavy zubu po operaci broušení	90

Seznam zkratek

CAD	Počítačem podporované konstruování
CAM	Počítačem podporované obrábění
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci
NC	Číslicové řízení
CNC	Číslicové řízení pomocí počítače
3D	Třírozměrné zobrazení
γ	Úhel čela [°]
2D	Dvourozměrné zobrazení
v	Stoupání řídicí šroubovice [mm]
v_0	Redukovaná výška závitu [mm]
R_{PK}	Poloměr patní kružnice [mm]
PPK	Průměr patní kružnice [mm]
T	Parametr řídicí šroubovice
$PočNat$	Úhel počátečního natočení vůči výchozímu souřadnicovému systému [°]
tt	Hodnota odpovídající hodnotě $PočNat$ [rad]
B	Počáteční bod šroubovice
\overrightarrow{BC}	Přímka daná profilem broušeného zubu
V	Parametr přímky \overrightarrow{BC}
\vec{n}	Směrový vektor profilu zubu
x_W, y_W, z_W	Složky směrového vektoru \vec{n}
$\overrightarrow{BC}_x, \overrightarrow{BC}_y, \overrightarrow{BC}_z$	Složky přímky \overrightarrow{BC}
W	Parametr výšky zubu
\vec{t}	Vektor tečny k řídicí šroubovici
t_{Bx}, t_{By}, t_{Bz}	Složky tečného vektoru \vec{t}
u	Parametr tečného vektoru \vec{t}
C	Počátek souřadnicového systému
α	Rovina kolmá na stoupání řídicí šroubovice
β_0	Rovina kolmá na rovinu α
β_{11}	První řezná rovina, která demonstruje natočení a polohu brusného kotouče ve drážce jako při reálném procesu broušení
D	Velký průměr brusného kotouče [mm]
$\frac{D}{2}$	Poloměr brusného kotouče [mm]

K_{11}	Kružnice definující velký průměr brusného kotouče
S_{11}	Střed brusného kotouče
O	Osa brusného kotouče
\vec{n}_O	Směrový vektor osy brusného kotouče O
w	Parametr osy brusného kotouče
a_1	Parametr kružnice definující velký průměr brusného kotouče K_{11}
β_i	Soustava řezných rovin
i	počet řezných rovin
δ	Přesnost diskretizace brusného kotouče [mm]
S_i	Soustava průniků rovin β_i a osy brusného kotouče O
d_{β_i}	Konstanta určující rovinu β_i
S_{2Norm}	Velikost jednotkového vektoru
S_{2X}	Jednotkový vektor v ose x
S_{2Y}	Jednotkový vektor v ose y
R_{β_i}	Poloměr brusného kotouče v aktuální řezné rovině β_i [g mm]
$NejkratsiVzdalenost_{\beta_i}$	Hodnota odpovídající hodnotě R_{β_i} [mm]
W_i	Parametr řezu roviny β_i a šroubové plochy
K_i	Soustava jednotlivých kružnic diskretizovaného brusného kotouče
W_{β_i}	Parametr vyjádření bodů navrženého tvaru brusného kotouče
VB	Visual Basic
VBA	Visual Basic for Applications

Úvod

1 Moderní trendy v broušení složitých tvarových ploch

V současné době s nárůstem technického vývoje obráběcích strojů a řezných materiálů se stále rozšiřují výrobní možnosti s cílem uspokojit zákazníka a dosahovat stále úspornějších časů obrábění se zaručením požadované kvality a přesnosti obrobeného povrchu. Neustálý vývoj technologií dovoluje zkracovat strojní časy a umožňuje nasadit progresivní řezné podmínky, než jak tomu bylo v předchozích letech. Vzdávající nároky na design a funkčnost součástí způsobují nutnost opracovávat i tvarově složitě a členitě součásti s jinými než dosud používanými konvenčními technologickými postupy.

1.1 Trendy ve vývoji brusných strojů

Se vzdávajícím nárokem na přesné opracování tvarově složitých součástí vzdává nárok na kinematiku a přesnost polohování os brusných strojů. S požadavky na složité součásti a jejich mnohdy tvarově komplikované plochy k ostření přestaly dostačovat možnosti konvenčních brusných strojů a jejich kinematika, která neumožňovala broušení těchto ploch se zaručením tečných přechodů a dosažení požadovaných přesností povrchu. Využívají se ve všech odvětvích výroby a jejich výhodou je především stabilní přesnost výrobků v malých tolerancích a velmi dobrá integrita obrobeného povrchu. Mnoho takových součástí vyžaduje použití více-osých brusných center, jejichž kinematika a softwarové prostředí umožňuje spolehlivé ostření i s časovou úsporou. Proto v posledních letech prodělal vývoj brusných center velký pokrok. Jedná se především o změnu v koncepci strojů a přechod od jednoúčelových strojů k víceúčelovým nástrojařským brusům.

V současné době se vyrábí stroje, které mají až 7 současně řízených os. Další změny se projeví v upínání brusných nástrojů. V současné době se upínají pomocí válcových trnů v podobě ucelených brousících sad k eliminaci nepřesností, které by byly zaneseny do brusného procesu při opětovném pře-upínání brusného kotouče. Vzhledem k tvarové složitosti broušených součástí a měření jejich rozměru po broušení a s tím související volba polohy nulového bodu bylo rozšířeno příslušenství stroje o aplikaci měřicí sondy. Tyto sondy primárně slouží k polohování čela broušeného nástroje a jeho břítu, potažmo k určení stoupání tvarových ploch. Házení upínače nástroje je měřeno současně s řezným nástrojem. Nedílnou součástí moderních strojů je automatické vyvažování brusného kotouče a integrované orovnávací zařízení brusných kotoučů.

Velká pozornost je věnována vývoji softwaru. Měl by být lehce ovladatelný, programovatelný s jednoduchou grafickou podporou a s názornou simulací procesu. Softwary musí mít modul pro vytváření a správu brousících kotoučů, dále pak systémy pro automatické vyvažování brousícího kotouče a automatické orovnáání kotouče s kompenzací úbytku.

1.1.1 Řídicí systémy

Vzhledem k vývoji technologie broušení tvarově složitých součástí, která mnohdy zahrnuje know-how a jeho dlouholetý vývoj, výrobci moderních brusných center vyvíjejí i vlastní softwarovou podporu pro tyto stroje, se kterými je dodávají. Z těchto důvodů se jedná o tzv. uzavřené systémy, jejichž datové zpracování a řídicí instrukce jsou uzamčené a

nejsou tak uživateli přístupné. Výhodou u těchto systémů je jejich poměrně dobrá vybavenost podprogramy pro ostření a výrobu některých druhů nástrojů. Podprogramy jsou realizovány ve formě modulů, které obsahují geometrické informace o řezných nástrojích a brousících kotoučích doplněné příslušnými řeznými podmínkami. Určitou nevýhodou těchto systémů je nemožnost nebo velmi malá možnost přístupu uživatele do NC programu, což vede v konečném efektu k odkázání se na zkušenosti a know-how firmy, která takový produkt dodává. [1]

Vzhledem k tomu, že až do nedávné doby složité úkoly v přesném broušení velmi závisely na zkušenostech a zručnosti operátora, firmy zabývající se touto problematikou na tento jev reagovaly vývojem nových řídicích systémů se snadno použitelným softwarem. Rozdělení složitých tvarů do jednoduchých základních operací umožňuje dokonce i nezkušenému operátorovi využívat stroj efektivně a dosahovat požadovaných geometrických přesností. Proces nastavení broušení je rozdělen do dvou částí: orovnění kotouče a broušení. Systém broušení provede uživatele volbou potřebných parametrů jako je metoda broušení a všechny další parametry, např. tvar kotouče, volba režimu, typ broušení a jiné, přes výběr nulového bodu, řezných podmínek a parametrů obrobků. Následuje systém orovnění, který opět nabízí uživateli škálu možností a voleb dle výchozího tvaru obrobku. Možnosti systému se samozřejmě odvíjejí od účelu brusky a typu broušení, pro který je určena. [2]

Tvarové broušení:

Jako zvláštní příslušenství je nabízeno broušení obecných tvarů z ISO programu nebo lze brousit tyto tvary samostatně s dodávaným softwarem pro off-line přípravu ISO programů na PC. Tyto softwary představují velmi efektivní nástroj speciálně vyvinutý pro brousící stroje, které umožňují rychlou a snadnou tvorbu ISO programů jednak pro orovnění kotouče do obecného tvaru, respektive dle CAD dat importovaných z výkresu či modelu finálního výrobku, tak pro generování drah brousícího kotouče sloužících k profilovému broušení rozměrných dílců. Nedílnou součástí je i jednoduché CAD prostředí umožňující přípravu profilů pro bezproblémové zpracování a následný export ISO programu. U digitalizovaného profilu je třeba dodržet správnou posloupnost jednotlivých segmentů křivky a také dodržet jejich spojitost. Posledním krokem je tvorba ISO programu pro konkrétní stroj. Tyto CAMy jsou vždy dodávány s postprocesorem odladěným pro daný brousící stroj. U opracování velkoprofilových prvků je rozdíl v tom, že připravený profil je umístěn na obrobek a kotouč je orovněn pomocí připravených standardních cyklů. Opět lze simulovat a optimalizovat celý proces dle potřeby a po dokončení exportovat dráhy brousícího kotouče do podoby ISO programu. [3]

1.2 NC programování broušení tvarově složitých ploch se zaměřením na šroubové drážky šnekových odvalovacích fréz

V současné době roste podíl využití NC technologií v oblasti broušení vzhledem k požadavku opracování tvarově složitých ploch se zajištěním požadovaných rozměrových vlastností a zachování kvality povrchu. Aby tedy bylo dosaženo pokud možno co největší efektivity výroby, je nutné, aby při obrábění byly používány vysoce kvalitní řezné nástroje a kvalitní stroje s požadovanou kinematikou a tuhostí. Kvalita výroby ovlivňuje výrazně užité vlastnosti daného produktu [30]. Význam použité technologie vystupuje do popředí zejména při výrobě a ostření výkonných tvarově složitých nástrojů. Řešení těchto úloh vyžaduje kromě jiného nasazení kvalitních a výkonných nástrojařských brusek s CNC řízením, které

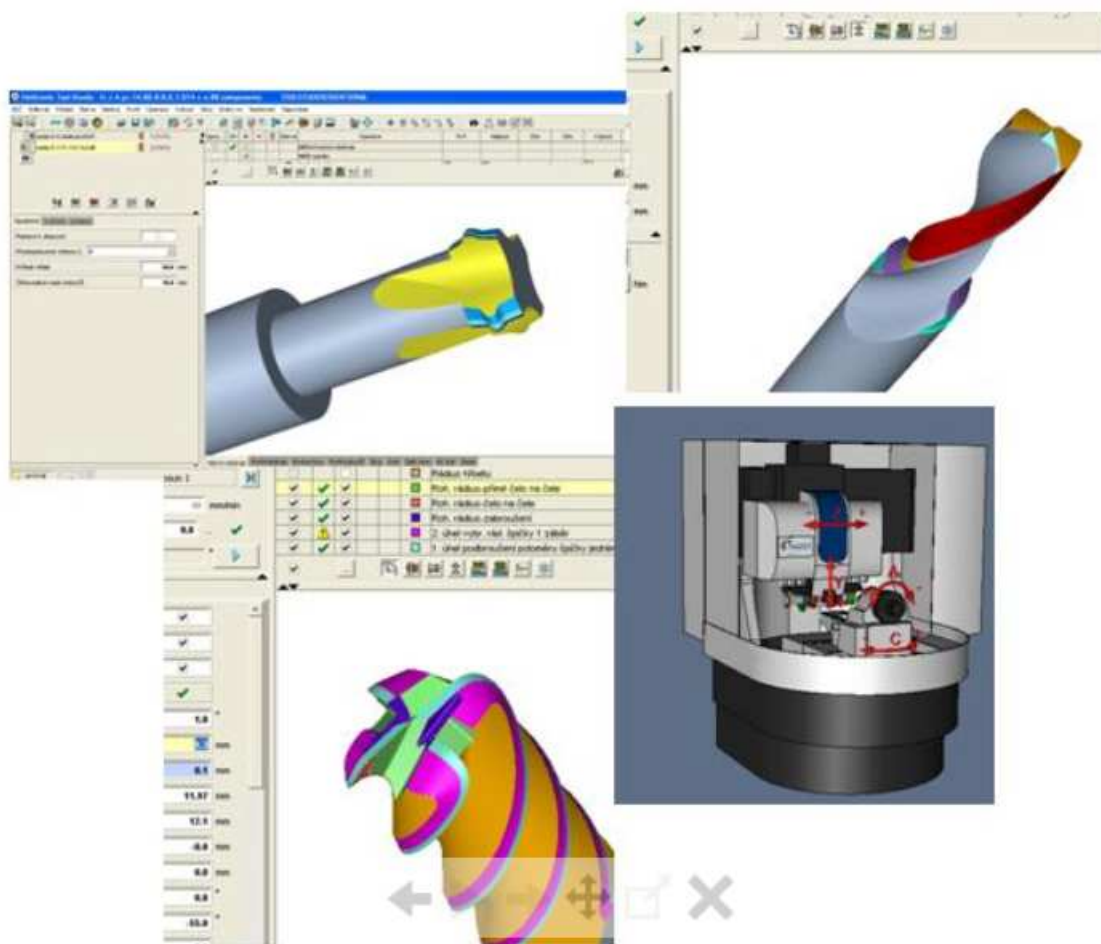
umožňují provádět jak kompletní výrobu nových nástrojů, tak i přeastřování již otupených nástrojů. Na tyto stroje jsou tak kladeny vyšší nároky než na klasické brusky pro standardní obrábění jednoduchých tvarů. Při broušení tvarově složitých součástí je většinou nutné využít více-osých brusných center, což klade vyšší nároky na prostor, řízení, přesnost a výkon pohonů jednotlivých os. [4]

S uvažováním vývoje moderních brusných center a rozvoji brusných technologií a materiálů se lze zaměřit na oblasti broušení, které jsou velmi problematické z hlediska jejich specifikace a složitosti broušené plochy. Z prvního pohledu se u těchto oblastí nejedná o náročné operace, ale při bližším zkoumání se jedná o obtížně řešitelné úlohy, které vyžadují zahrnutí jistého know-how a výzkumu. S uvažováním tvaru broušené plochy, velikosti obrobku a použitého brusného nástroje, který musí být dimenzovaný na broušený materiál, nejsme v mnoha případech schopni i s použitím moderní CNC řízeného brusného centra a s použitím základních tvarů dostupných brusných nástrojů obrobek danou plochu v požadované kvalitě. Moderní stroje umožňují dosahovat řízení i v 7 osách současně s přesným polohováním, v těchto případech jsou tyto aspekty nedostačující a je třeba přistupovat k alternativním řešením v podobě úprav brusných nástrojů tak, aby se vykompenzovala chybějící kinematika. Mnohdy se jedná o matematické úlohy, kdy je nutno dostupnými nebo nově navrženými metodami vyšetřit výchozí povrch nástroje tak, aby vyhovoval dané kinematice dostupného stroje a matematickému popisu geometrie broušené plochy. Jedná se o poměrně složité úlohy, jejichž náročnost se odvíjí od nároku na kompenzaci nedostačující kinematiky stroje a složitosti vyšetřované plochy obrobku. U některých případů se stane, že vyšetřený povrch brusného nástroje se neskládá pouze ze základního tvaru, který je složen např. z přímek a radiusů, ale který se skládá z obecných křivek n -tého řádu. Čím vyšší řád, tím přesnější popis hledané křivky tvaru brusného nástroje, ale tím vyšší výpočetní nároky. Záleží však na skladbě bodů, kterými tato křivka prochází, jelikož s vyšším řádem může docházet k nežádoucím deformacím prokládající křivky právě vlivem vyššího řádu a jejím vlastnostem v uzlových bodech daných právě tímto řádem. Jelikož jsme systémově limitováni, tyto plochy lze nahradit jednoduššími, ale mnohdy se ztrátou přesnosti. Degradace řádu popisované plochy/křivky závisí však na výsledné požadované přesnosti broušeného povrchu. Pokud se hledaná křivka skládá z více na sebe napojených křivek, je dále nutné výpočetně vyřešit jejich přechody opět s ohledem na požadovanou výslednou přesnost. Čím složitější matematicky popsany přechod, tím vyšší nároky na systémové řešení [27]. Účelem je dosáhnout co nejjednoduššího popisu a docílit tak co nejpřesnějšího tvaru, který se blíží ideálnímu požadovanému, a docílit tak co možná nejkratších přípravných časů. Těmto úlohám je věnována velká pozornost, jelikož se s nimi setkáváme ve strojírenské výrobě např. speciálních obráběcích nástrojů. Bohužel se jedná o tak složitou problematiku, že se jí věnují pouze specializované firmy a svůj případný výzkum a informace si přísně střeží jako firemní know-how.

Např. firma Brusnar dodává ke svým strojům software Tool studio, což je software pro tvorbu široké škály typů nástrojů. Umožňuje vytvořit nástroj na PC a následně importovat do stroje. Na strojích HELITRONIC software nabízí téměř neomezenou flexibilitu, v kombinaci s velmi jednoduchým ovládáním. V "HELITRONIC Tool Studio" je možné vytvářet programy pro vrtáky, frézy, stupňovité nástroje, tvářecí nástroje, trny nebo rotační frézy a to velmi snadno, díky přednastaveným typům nástrojů, které se následně upravují. 3D reálná simulace na obrazovce umožňuje přesné znázornění výsledku broušení. Kdykoliv je parametr změněn v rozhraní "HELITRONIC Tool Studio", 3D simulace je také automaticky přepočítána. Velkou

výhodou je simulace kolizí, kdy na základě zadaných údajů stroj předem simuluje proces broušení a vyhodnotí jeho bezproblémovost. "HELITRONIC Tool Studio" kombinuje flexibilitu a produktivitu v jednom softwarovém řešení. [6]

Moderní brusné stroje a centra disponují vlastním uzavřeným systémem, se kterým komunikuje kinematika daného stroje a který bývá současně dodáván se strojem. Tyto systémy neumožňují nahlédnutí do jádra a do matematického pozadí řešených úloh. Jedná se o 3D CAD/CAM programy navržené výrobcem a dodávané s daným strojem (viz Obrázek 1), které jsou specializovány na určitý druh vyráběné součásti a jsou rozděleny do několika podprogramů (modulů) dle typových představitelů. Každý tento podprogram pracuje na bázi analytických geometrických úloh, které se od sebe liší vstupními parametry a vlastnostmi budoucího broušeného komponentu.



Obrázek 1 Walter CAD/CAM tool studio[6]

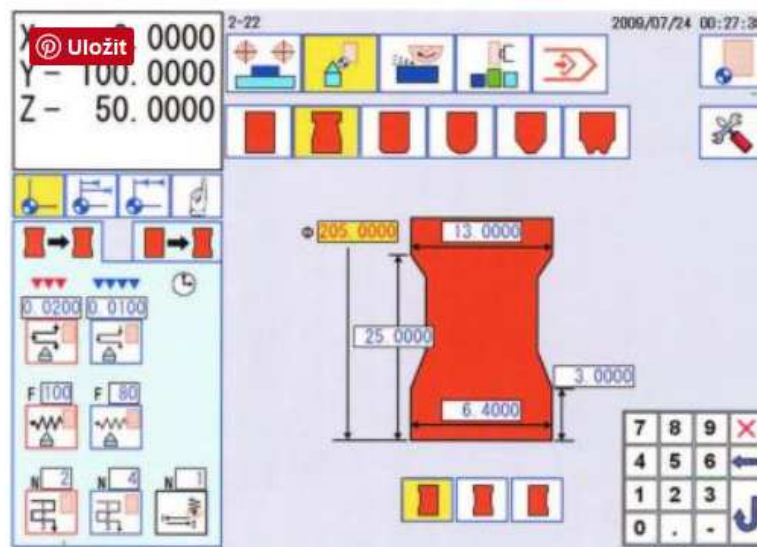
Programování beze slov – řídicí systém IQ firmy Okamoto [7]:

Systém programování brousících operací a ořovnávání kotouče vychází z obvyklých dialogových zvyklostí, avšak v porovnání s běžnými řídicími systémy pro obrábění či broušení pracuje výhradně s grafickými symboly v oknech, kde se doplňují pouze číselné hodnoty. Systém je postaven na struktuře běžného PC. Proces zadávání dat vychází z mnohaletých zkušeností brusníků po celém světě. Jednotlivé procesy na sebe logicky navazují v naprostém souladu s tradičním postupem, jak je zažitý při ručním broušení. V čem se nový systém

výrazně odlišuje od všech dosavadních a zásadně je tímto kvalitativně překonává, je možnost programování a broušení až pěti odlišných dílů upnutých najednou v různých místech na upínacím stole.

Na příkladu seřízení a naprogramování broušení lze předvést jednoduchost a pohodlnost sestavení hlavního programu i programu pro tvarování a orovnění brusného kotouče. Postup se kromě výběru režimů, které jsou kdykoliv během vlastního broušení bezprostředně dostupné, větví do dvou základních obrazovek vstupních seřizovacích dat:

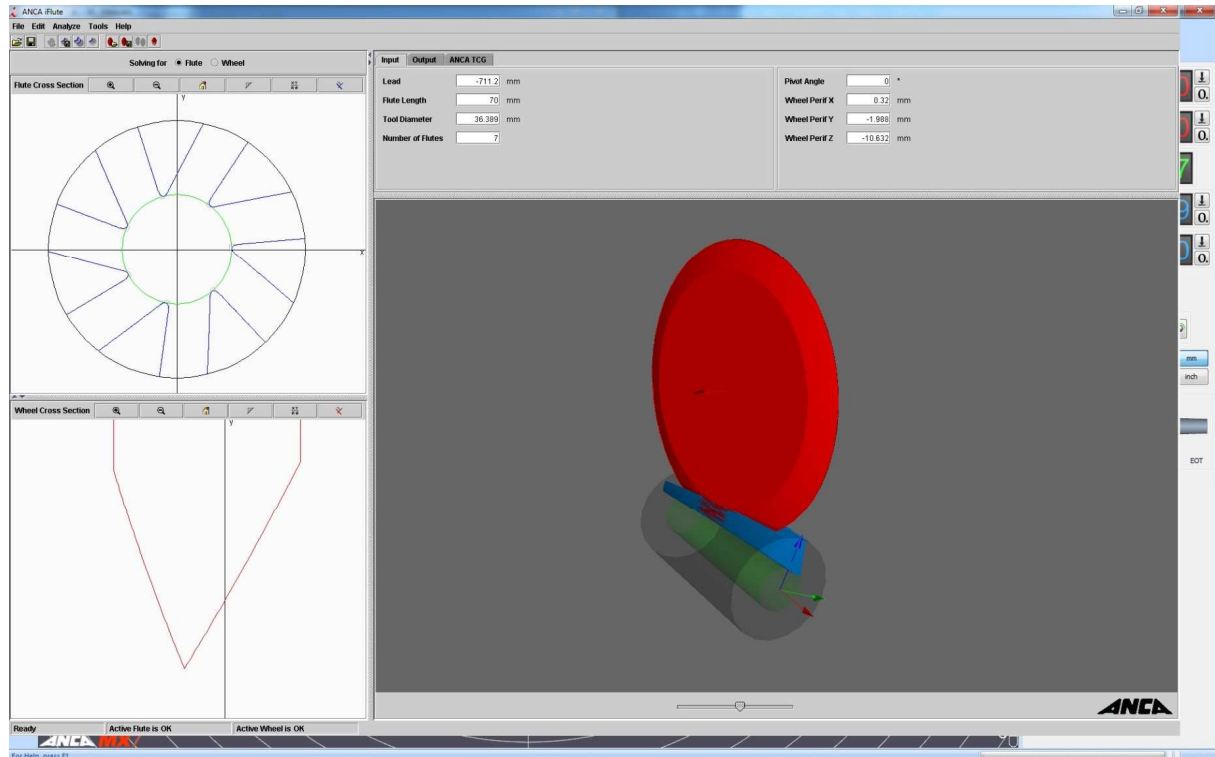
- výběr tvaru a zadání parametrů broušeného dílu
- výběr a popis tvaru a zadání specifikace brusného kotouče (viz Obrázek 2)



Obrázek 2 Okamoto IQ - data brusného kotouče[7]

Většina řešených úloh navrhovaných součástí je tedy na té bázi, že je známa přesná geometrie budoucí vyrobené součásti, na kterou je potřeba vytvořit technologii broušení s využitím určité kinematiky použitého stroje a zvolení vhodného druhu a tvaru obráběcího nástroje. Geometrii vyráběného komponentu lze vytvořit v CAD/CAM systému dodaného výrobce, ve kterém se bude navrhovat kinematika broušení, nebo lze tuto geometrii vytvořit v jiném 3D CAD/CAM systému a tuto geometrii následně přenést do systému brusky. Tato možnost není doporučována, protože pro přenos je mnohdy nutné využít univerzálních formátů, které při přenášeni mohou ztratit svoji výchozí přesnost geometrie a zároveň je mnohdy nutné takto přenesený formát následně upravit – ať už se jedná o neodpovídající měřítko, či natočení souřadného systému výchozího modelu.

Po úpravě si systém převezme geometrii broušené drážky a po zadání požadovaných vstupních parametrů, jako je úhel šroubovice, stoupání šroubovice, průměr patní a hlavové kružnice, délka řezné části budoucího nástroje a počtu drážek, systém vypočítá profil brusného nástroje (většinou se v této oblasti jedná o brusné kotouče), který odpovídá geometrii broušené drážky (viz Obrázek 3 a Obrázek 4).



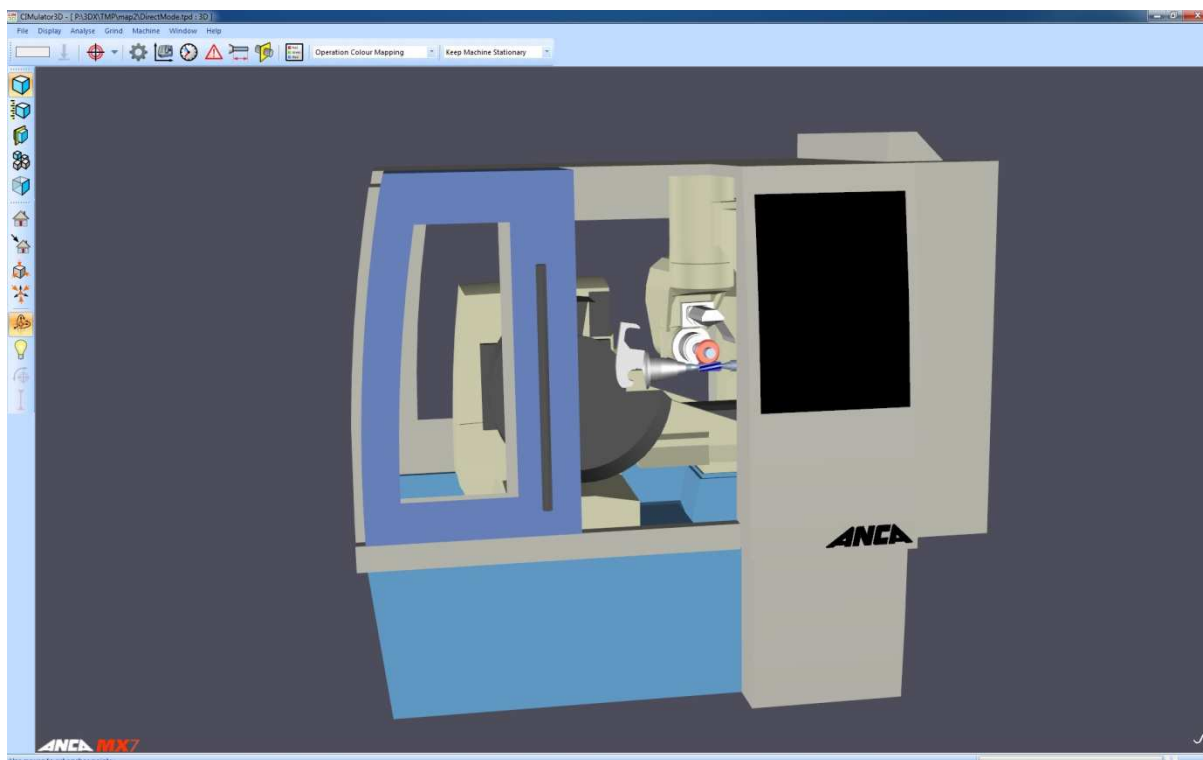
Obrázek 3 ANCA IFlute



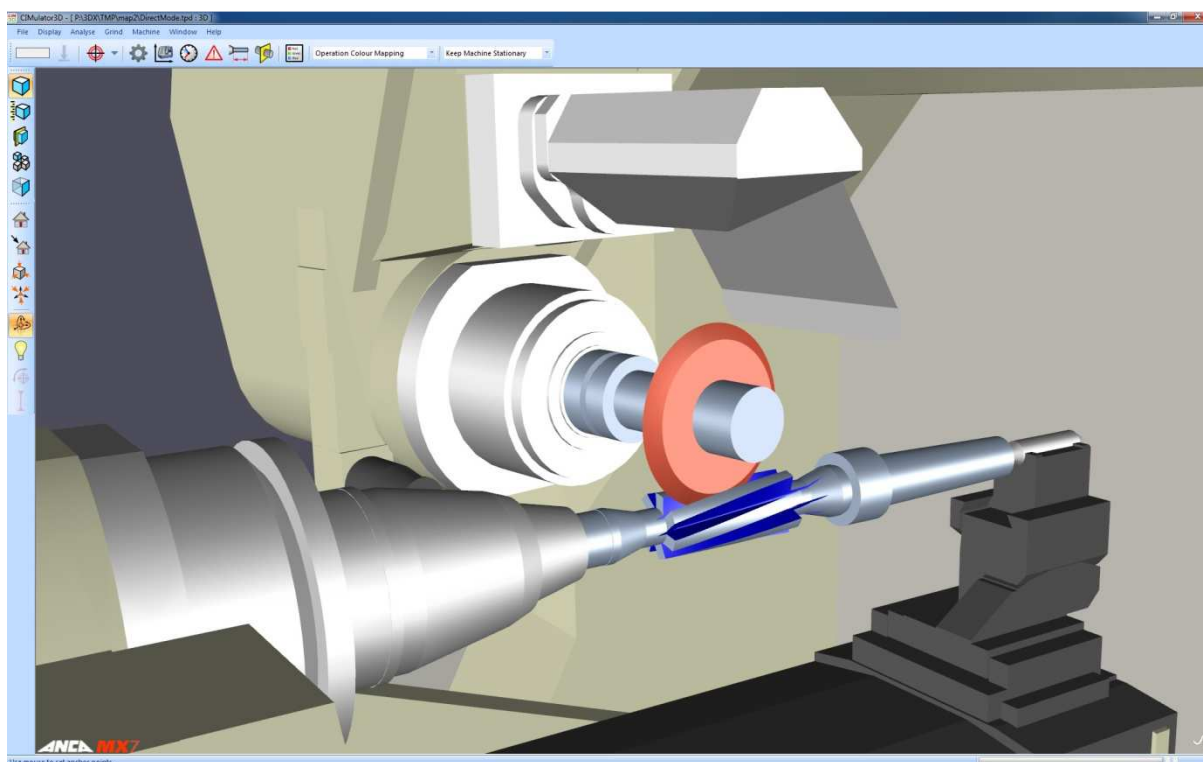
Obrázek 4 ANCA IFlute – zadání vstupních parametrů

Vzhledem k tomu, že se stále pohybujeme v CAD/CAM systému a pokud je známa geometrie obráběné součásti a geometrii brusného nástroje, následující kroky jsou v souladu s tradičním NC programováním. Do systému je následně potřeba zadat vstupní polotovary a jeho rozměry, definovat nulový bod a definovat nájezdy a odjezdy brusného nástroje. Zadáním řezných podmínek lze nakonec vygenerovat NC kód, který je přenesen na použitý stroj. Součástí technologie je také nastavení vhodných axiálních a radiálních hloubek v případě, že se nejedná pouze o přebroušení součásti, ale jedná se o kompletní výrobu komponentu i s hrubovacími cykly.

Další výhodou těchto systémů je možnost simulace broušení součásti včetně integrace použitého stroje a jeho kinematiky do simulačního procesu a díky této geometrii mimo jiné hlídání případných kolizí, či upozornění na možnosti pracovního prostoru stroje (viz Obrázek 5 a Obrázek 6).



Obrázek 5 Simulace broušení



Obrázek 6 Simulace broušení – detail

Struktura vygenerovaného NC programu může být ve formátu ISO kódu s příslušnými příkazy a funkcemi a lze jej již na stroji číst, popř. provádět úpravy v aktivaci chlazení, úprav nájezdů, korekcí, apod. Struktura je tedy shodná s programy vygenerovanými např. pro

frézky. V NC kódu jsou zahrnuty pohyby v jednotlivých osách stroje, kterými disponuje, na základě geometrických dat převzatých z přidruženého CAD/CAM systému.

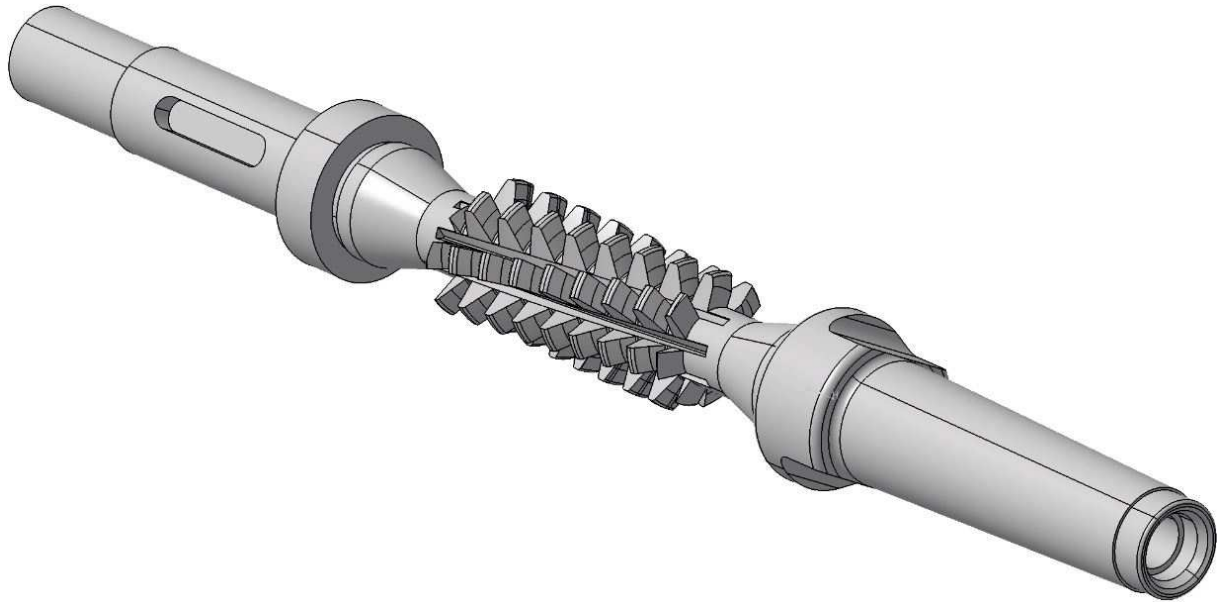
Z vnějšího pohledu tak celý proces naprogramování broušení tvarově složitě plochy vypadá celkem jednoduše:

- výběr stroje s vhodnou kinematikou,
- výběr brusného nástroje, jehož materiál, tvrdost a pórovitost odpovídá vlastnostem obráběného materiálu a požadovaným povrchovým vlastnostem po obrábění,
- následné převzetí broušené geometrie,
- pomocí „jednoduchého“ softwaru navržení příslušného tvaru brusného nástroje, který odpovídá tvaru broušené drážky,
- navržení vhodných řezných podmínek,
- vygenerování NC kódu pomocí integrovaného postprocesoru.

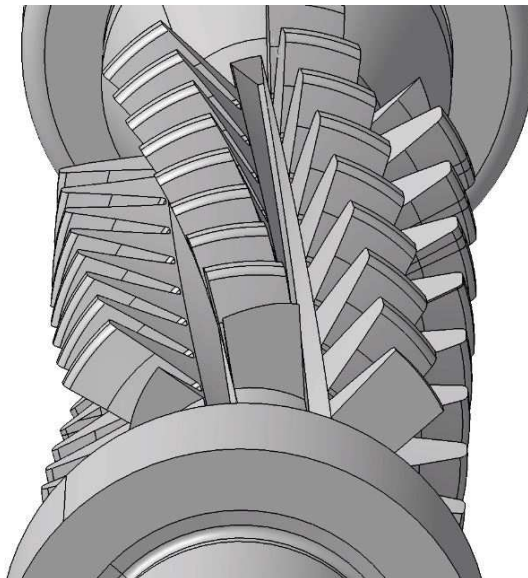
Když přejdeme k meritu věci, výrobci si střeží své výrobní know-how v této oblasti broušení z důvodu jedné velmi problematické oblasti tohoto procesu, a to identifikaci geometrie broušené drážky a návrh vyhovujícího tvaru brusného nástroje. Proto se jedná o ucelené podprogramy, do jejichž struktury nelze nahlédnout a číst informace. Tyto úlohy jsou poměrně geometricky a matematicky náročné a vývoj parametrických řešičů je poměrně náročný. Broušené drážky budoucích nástrojů jsou tvořené různými geometrickými tvary, jejichž kombinace se vstupními požadovanými parametry výsledné drážky mnohdy utváří složité geometrické plochy, které nelze brousit standardními tvary brusných kotoučů, jelikož následně nedochází k dodržení předepsané přesnosti tvaru a povrchu. Typovým představitelem jsou šnekové odvalovací frézy, jejich čela zubů jsou tvořena šroubovicemi. Přesnosti těchto broušených komponentů jakožto budoucích obráběcích nástrojů jsou udávány v setinách milimetrů a jejich přesnost ovlivňuje přesnost vyráběných součástí. V těchto případech nelze ovlivnit výrobu jiným materiálem brusného nástroje, nebo jen velmi okrajově co se týče vlastností materiálu použitého brusného kotouče, tak ani kinematikou daného stroje, a přistupuje se tak k modifikaci tvaru brusných nástrojů. Z tohoto hlediska jsou ke strojům dodávána orovnávací zařízení, která slouží k těmto úpravám výchozích tvarů brusných kotoučů a jejich úpravám při již vzniklém opotřebením a deformaci výchozího/požadovaného tvaru pro broušení. Nevýhodou těchto programů pro navržení tvaru brusného nástroje odpovídajícího broušené geometrii je jejich vysoká cena.

2 Přehled problematiky broušení šnekových odvalovacích fréz

Šnekové odvalovací frézy pro výrobu šnekového soukolí (viz Obrázek 7) je nutno vzhledem k jejich geometrickým vlastnostem a tvaru broušené drážky brousit tvarovými brusnými kotouči. Při strojním broušení v oblasti čel zubů (viz Obrázek 8) těchto fréz dochází k podřezávání šroubové drážky vlivem plošného kontaktu řezné části brusného kotouče a broušené oblasti a tím k nedodržení požadované přesnosti zaručující potřebnou geometrii tvaru vzhledem k jejich následné aplikaci.



Obrázek 7 Odvalovací fréza šneková[8]

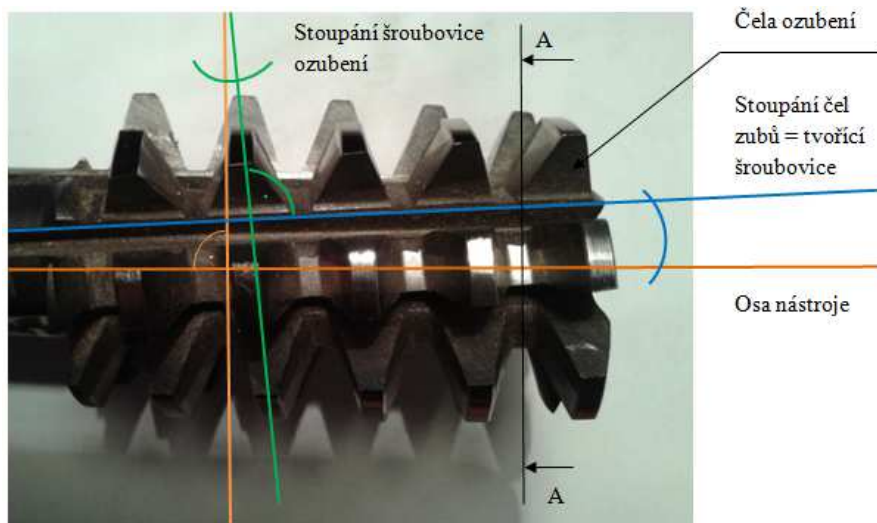


Obrázek 8 Odvalovací fréza šneková – detail zubů[8]

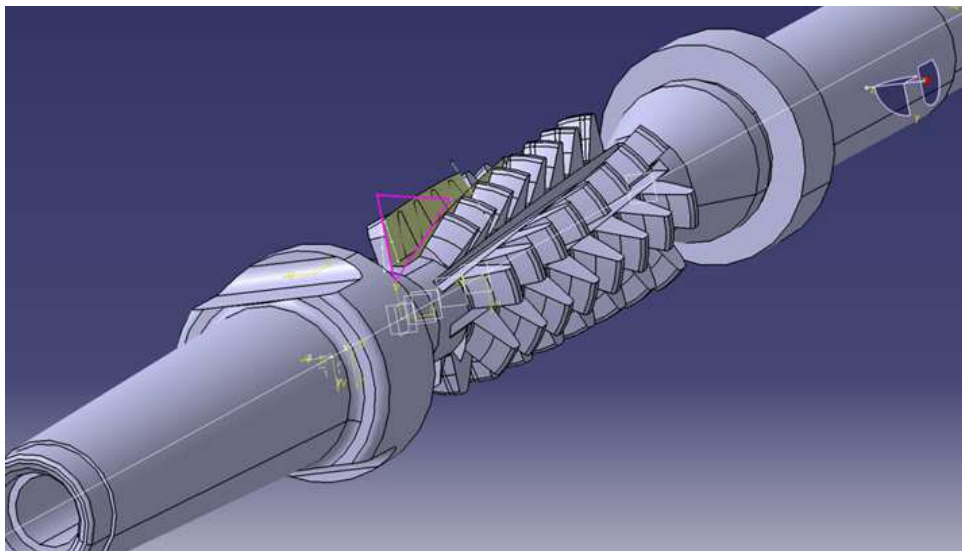
Standardní tvary dodávaných kotoučů např. dle katalogu Tyrolit [9] jsou tvořeny přímkovým či rádiovým profilem nebo kombinací obou k vytvoření základního tvarového profilu složeného z těchto základních geometrických komponentů.

2.1 Kinematika procesu

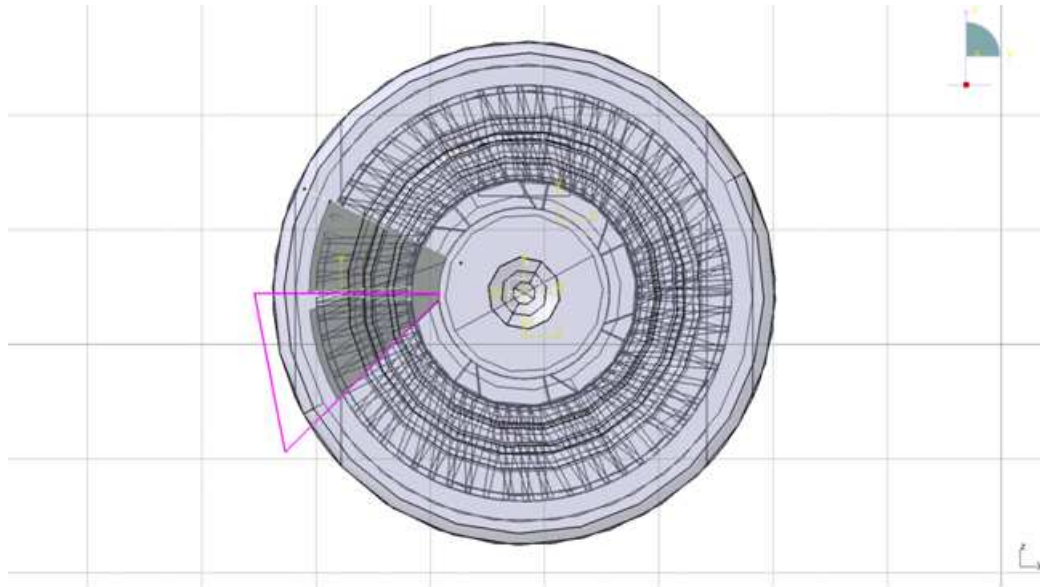
Geometrie plochy čel jednotlivých zubů je tvořena šroubovou plochou, jejíž řídicí křivka je šroubovice (viz Obrázek 9) o daném stoupání na daném poloměru - patní kružnici. Na Obrázku 10 je znázorněna žlutou barvou šroubová plocha, která pokrývá plochu čel zubů, která je tvořena různou geometrií dle požadavku výrobce. Jeden z příkladů geometrického elementu, který tvoří šroubovou drážku, je zobrazen fialovou barvou. Může se jednat jak o přímkový tak i tvarový profil (ve výjimečných případech, většinou je tato geometrie tvořena přímkami) [8], kterým následně vzniká čelo nástroje, což je dáno požadavkem vyráběného ozubení. Tento profil pak lze následně nalézt v každé rovině kolmé na tvořící šroubovici (viz Obrázek 11).



Obrázek 9 Geometrické charakteristiky odvalovací frézy šnekové[8]

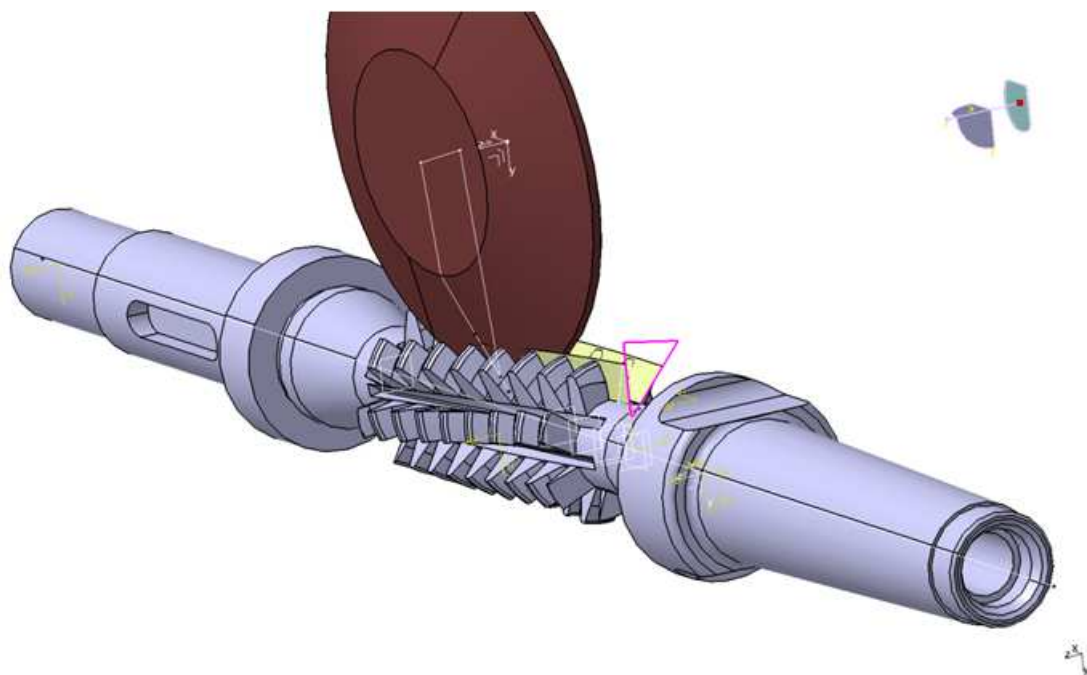


Obrázek 10 Element tvořící šroubovou drážku



Obrázek 11 Pohled kolmo na osu nástroje

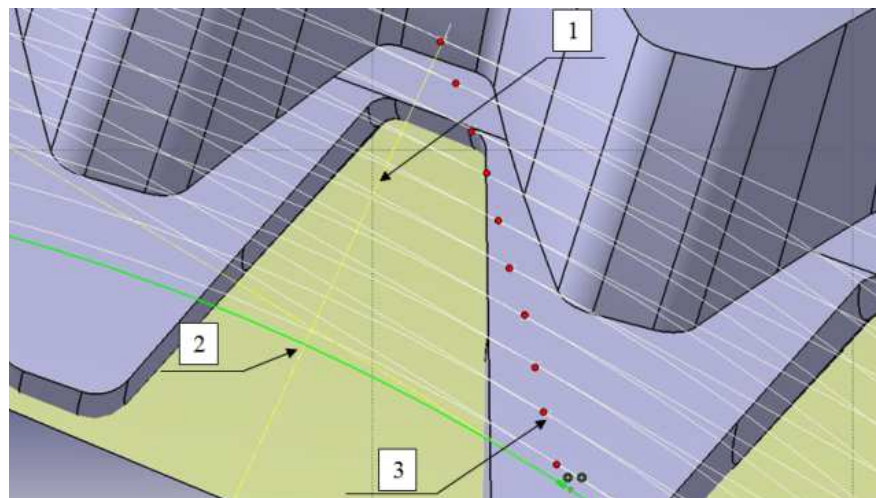
Primární postavení brusného kotouče ve drážce při daném procesu je v daném bodě řídicí šroubovice pokud možno tečně k broušenému povrchu (viz Obrázek 12).



Obrázek 12 Poloha brusného kotouče ve drážce při broušení

Díky tomuto tvaru lze polohovat kotouč ve drážce a přiblížit se tečnému styku řezné části s broušenou plochou. Pokud je křivka tvořící čela zubů tvořena přímkovým profilem a pracovní plocha kotouče je tvořena také přímkou, mělo by teoreticky dojít k tečnému dotyku v dané rovině kolmé na stoupání řídicí šroubovice v každém bodě jejího průběhu a nemělo by docházet k podřezávání šroubové drážky. V praxi však dochází k zanoření řezné části brusného kotouče do broušené plochy.

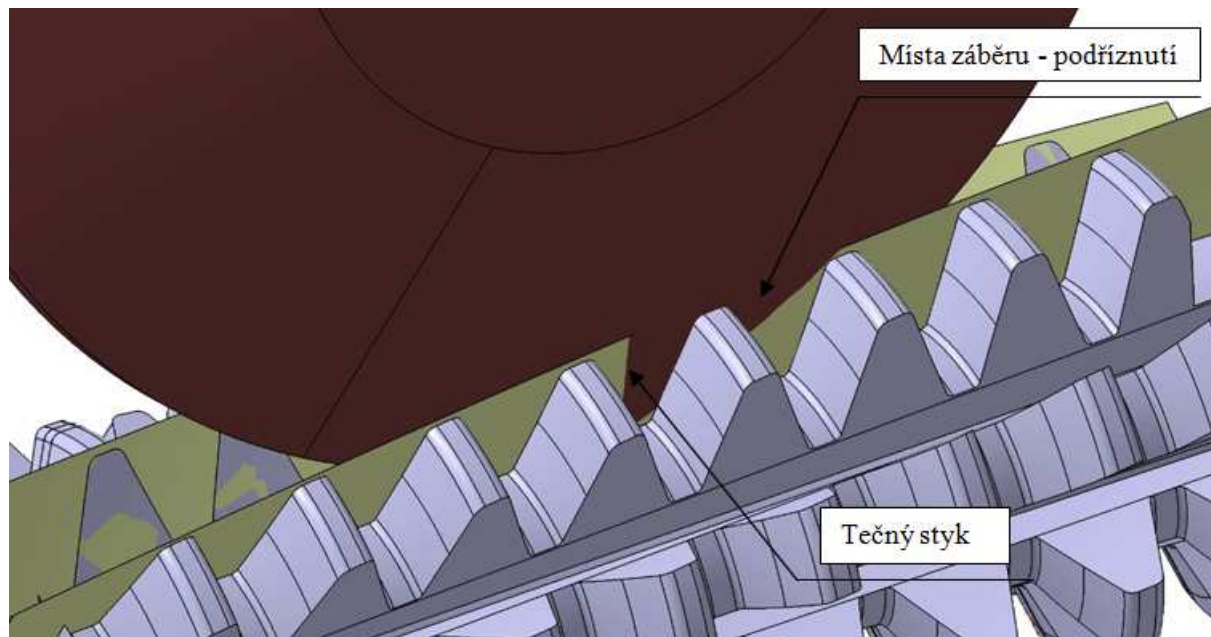
Jev zanoření řezné části brusného kotouče do plochy čel zubů odvalovací frézy se vyskytuje při uvažování geometrie broušené drážky a se zahrnutím vlivu geometrie brusného nástroje. Úhel řídicí šroubovice broušeného nástroje, tvar a velikost brusného nástroje jsou hlavními faktory, které mají vliv na míru podřezání. Čím vyšší zakřivení řídicí šroubovice a čím větší průměr kotouče, tím se vyskytuje větší oblast podřezání, což má za následek narůstající nepřesnost. Pokud budeme uvažovat velikost brusného kotouče jako bod, neobjeví se žádné podřezání. Se vzrůstajícím průměrem se však zvyšuje plocha podříznutí. Pro kladný výsledek po broušení je nutné dosáhnout tečného kontaktu mezi akčními činiteli (plocha čel zubů odvalovací frézy a řezná část brusného kotouče) a to v rovině kolmé na stoupání řídicí šroubovice v každé poloze během celého procesu broušení. S uvažováním zakřivení řídicí šroubovice a dodržováním tečného kontaktu mezi oběma činiteli dochází k podřezání broušené plochy a to v místech křivky záběru (viz Obrázek 13). Se vzrůstajícím průměrem brusného kotouče a zakřivení broušené plochy se pak tato plocha rozšiřuje.



Obrázek 13 Křivka záběru [8]

Vysvětlivky:

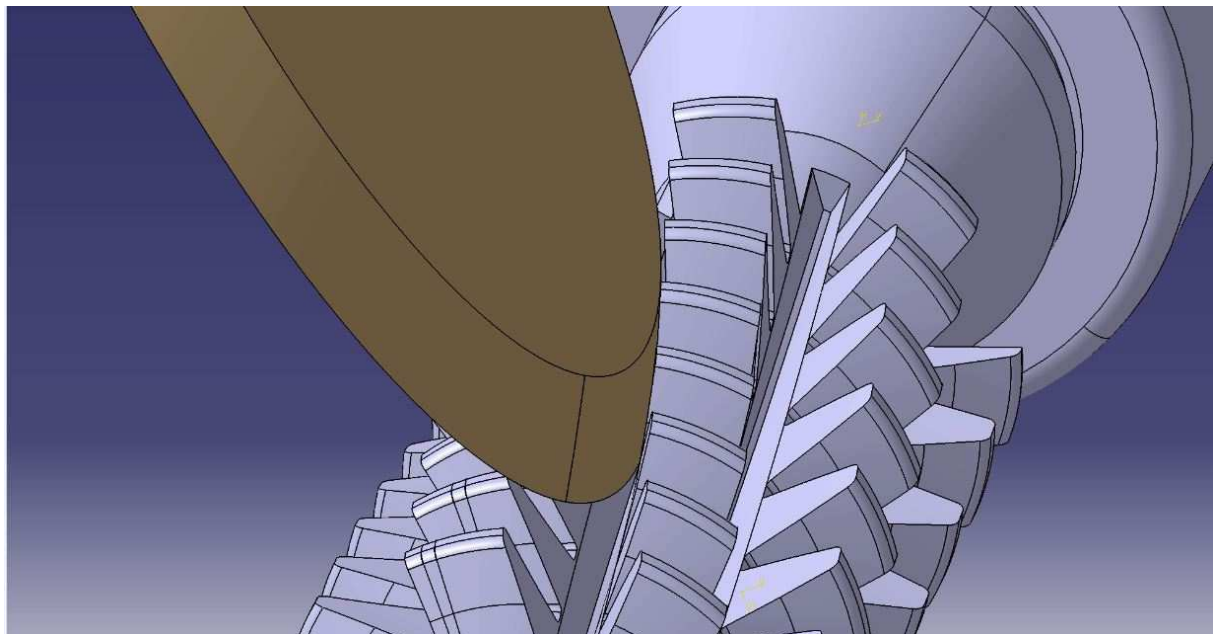
- 1 Rovina kolmá na stoupání řídicí šroubovice
- 2 Průnik aktuální kružnice diskretizovaného brusného kotouče a roviny kolmé na stoupání řídicí šroubovice
- 3 Body křivky záběru



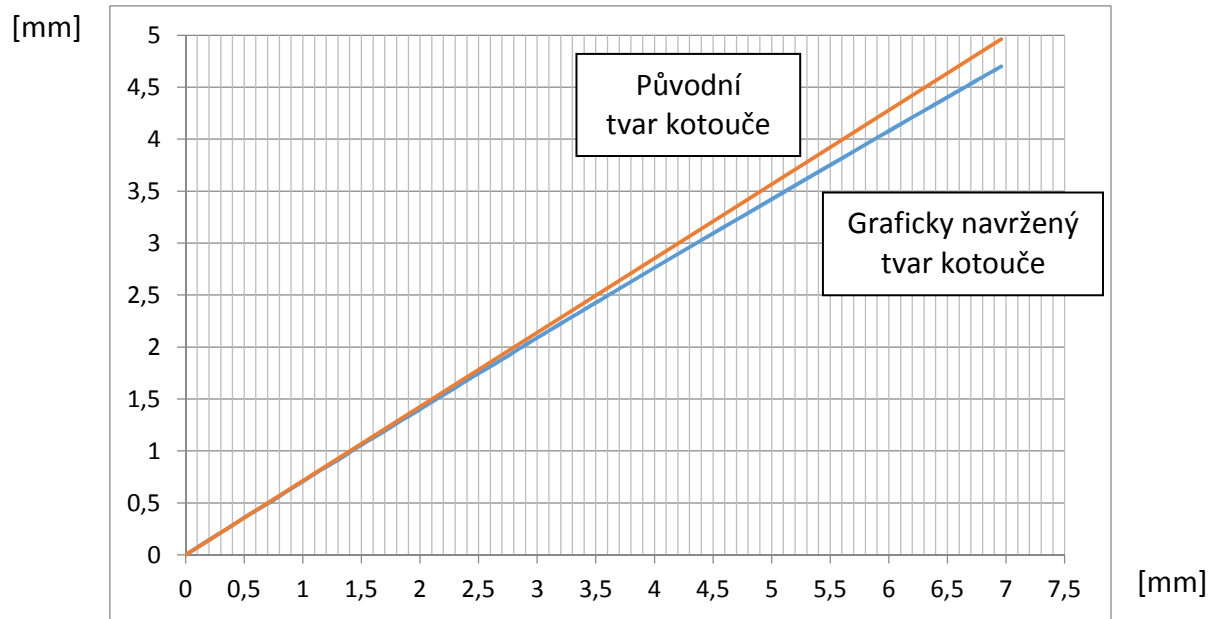
Obrázek 14 Podřezání šroubové plochy [8]

Místo záběru a jeho tvar se budou lišit podle tvaru šroubové plochy, tvarem a velikostí brusného kotouče a jeho postavením ve drážce, jelikož kinematika brusného stroje dovoluje „podtočit“ brusný kotouč o určitý úhel oproti úhlu řídicí šroubovice (viz Obrázek 14). Tímto se v mnoha případech eliminuje nežádoucí podřezání a zajistí se plynulejší chod broušení.

V rámci diplomové práce [8] byl graficky navržen tvar brusného kotouče pro zadané parametry odvalovací frézy užitím metody řezných rovin. Výsledkem je tvar, který je tvořený obecnou křivkou, jejíž tvar se blíží rádiu, přesný popis křivky není dosud znám, a svým tvarem kopíruje šroubovou drážku (viz Obrázek 15). Vzhledem k tomu, že zadaná šroubovice měla mírné stoupání, odchylka původní a nově navržené křivky je v řádech setin (viz Obrázek 16).



Obrázek 15 Grafická metoda – pohled do drážky[8]



Obrázek 16 Odchylka tvarů kotouče v pracovní části [8]

Takto vyšetřený tvar brusného kotouče pro zadané parametry odvalovací frézy dokazuje, že kvalitu broušeného povrchu a tvarovou přesnost neovlivňuje jen kinematika použitého stroje potažmo kinematika brusného procesu, ale vzhledem ke složitosti broušené drážky je nutno počítat i s vlivem tvaru brusného kotouče, který by měl kopírovat broušenou plochu při svém pohybu ve drážce a svým tvarem by měl zajistit pokud možno tečný dotyk i v místech křivky záběru.

2.2 Problematika broušení tvarově složitých ploch na světové úrovni

Ve strojírenské praxi se vyskytuje celá škála tvarových ploch, jejichž aplikace se liší vzhledem k jejich geometrickým vlastnostem a konkrétnímu použití. Důležitá však zůstává tvarová přesnost broušené drážky a dosažení požadované tolerance a drsnosti povrchu po procesu. Současně tyto oblasti nepodléhají běžné a masové výrobě a tak se nelze setkat s bohatými informačními zdroji. Z toho důvodu neexistuje přesný a souhrnný strukturovaný popis této problematiky a lze dohledat pouze neucelené informace zabývající se řešením této problematiky z různých pohledů.

2.2.1 Matematický model pro počítačem ovládané programování brusných kotoučů v oblasti broušení válcových fréz [10]

Zdroj se zabývá řešením výroby drážek válcových fréz a jejich problematikou vzhledem ke tvarové drážce, která je tvořena řídicí šroubovicí a má rozhodující vliv na pracovní vlastnosti nástroje. Na základě identifikace klíčových parametrů se autoři zabývají problematikou zubové mezery a jejím vztahem ke generování NC programu s uvažováním konkrétního tvaru brusného kotouče. Je zde zmíněno, že se v oblasti nevyskytují ucelené informace ohledně tohoto jevu, a je potřeba používat brusné kotouče složitých tvarů pro broušení různých tvarů drážek se specifickými parametry. Pro řešení je vybrán určitý typ kotouče a zdroj navrhuje matematický model, který zahrnuje vztah parametrů broušené drážky a nastavení úhlu vybraného brusného kotouče. Práce tak pokládá základy použití

komplexních kotoučů k broušení tvarově složitých tvarů a tím dosažení optimálních řezných vlastností broušeného nástroje.

2.2.2 Geometrické modelování tvaru brusného kotouče pro šroubové drážky orovnaného pomocí nástroje s kruhovou geometrií [11]

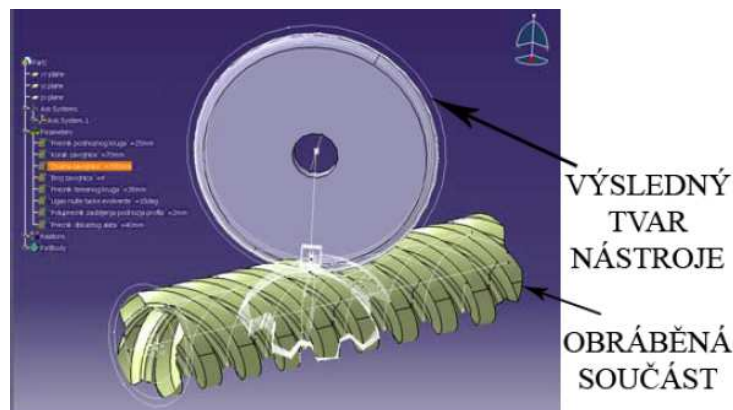
V této práci je konstatován fakt, že přesný tvar orovnaného brusného kotouče má velký dopad na výkon broušení. Navržení přesné geometrie kotouče je velmi důležité k dosažení kvality povrchu po broušení a umožňuje tak využít simulaci procesu. Opět je práce založena na matematickém 3D geometrickém modelu brusného kotouče, který je ale navržen vzhledem k vlastnostem po orovnání do požadovaného tvaru. Pro orovnání je použit nástroj s kruhovou špičkou namísto ostrého nástroje tak, aby výsledný tvar kotouče odpovídal geometrii dané drážky. Navržený matematický model je vykreslen pomocí softwaru Matlab. Tento model může být použit pro předpověď tvaru drážky, který je docílen navrženým tvarem kotouče, nebo může být použit pro optimalizaci aktuální orovnávací strategie.

2.2.3 Metodika v několika krocích pro broušení plochy čel zubů odvalovacích fréz [12]

Autoři se zabývají kontaktní plochou mezi řeznou částí brusného kotouče a broušené šroubové plochy vytvořením matematického modelu jednotlivých geometrií, které vstupují do brusného procesu. Na základě zjištěných informací a styčných ploch je navržena tzv. vícekroková metoda pro kompletní broušení pracovní části nástroje. Navržená metoda je ověřena opět pomocí softwaru Matlab, již předchází teoretická analýza problému. Pro porovnání tradiční metody broušení a navržené metody je použit systém VERICUT k ověření simulací obou procesů a jejich výsledků. Deklarují, že tato studie poskytuje efektivní a přesný přístup k broušení šroubových ploch.

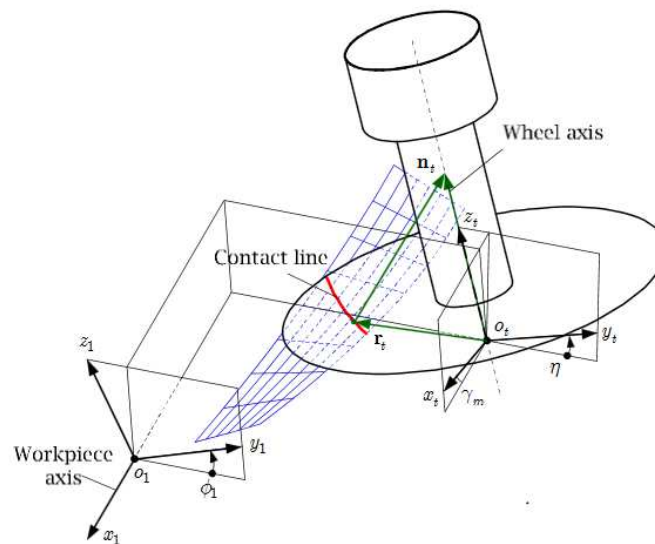
2.2.4 Automatické určení profilu brusného nástroje pro obrábění šroubových ploch pomocí rozhraní Catia / VB [13]

Zdroj použil nástroj VBA integrovaný v 3D CAD Catia pro zjištění výchozího povrchu nástroje vytvořením modelu odpovídajícího brusného nástroje vzhledem k broušené drážce. Model je vytvořen pomocí jazyka Visual Basic využitím příkazů a funkcí, kterými je možno vyvolávat konstrukční a modelářské nástroje dostupné v Catii. Autor tak vytvořil parametrický grafický model pro určení tvaru brusného nástroje (viz Obrázek 17).



2.2.5 Metodika výpočtu korekce zubu pro ostření šnekových odvalovacích fréz na pěti-osém CNC brusném centru [15]

Zdroj se zabývá výzkumem oblasti broušení šnekových odvalovacích fréz a to návrhem metodiky ke korekci řezné části brusného nástroje při vzniku a nárůstu jeho opotřebení. Navržením tvaru brusného nástroje a vytvořením matematického modelu pěti-osé brusky jsou získána geometrická data, která jsou využita pro návržení korekcí řezné části brusného nástroje pro vykompenzování opotřebení v průběhu ostření (viz Obrázek 18).



Obrázek 18 Model pro metodiku výpočtu korekce zubu [15]

3 Cíle disertační práce

Vzhledem ke studiu tuzemských a zahraničních materiálů a analýze dostupných zdrojů se autoři zabývající se problematikou broušení různých tvarově složitých ploch shodují v některých krocích ke koncepčnosti postupu řešení. Každá metoda tak zahrnuje analýzu geometrických vlastností řešení a analýzu vstupních parametrů do procesu a na základě těchto informací jsou navržena řešení, která jsou postavena na matematickém modelu a verifikaci řešení ve vybraném výpočtovém softwaru a simulaci procesu. Všechny zdroje uvádějí a soustředí se na tvar brusného nástroje a jeho dopad na přesnost broušené drážky, popř. ovlivnění dalších vstupních faktorů do procesu jako např. vliv přesnosti orovnění brusného kotouče či metodu přístupu ke korekci tvaru v průběhu opotřebení řezné části brusného nástroje. Každé řešení však zahrnuje jiný přístup k problematice a buď se zaměřují na modifikaci vlastností brusného kotouče a vlastnostech orovnávacího procesu do požadovaného tvaru, nebo na zahrnutí vlivu naklopení kotouče ve drážce či kompenzaci orovnaného tvaru kotouče tvarem orovnávače. Další zdroje se zabývají návrhem nového přístupu k broušení tvarových drážek návrhem vícekrokové metody na základě analýzy styčných ploch při procesu broušení. Dále se prostudované zdroje zabývají pouze vytvořením modelu daného řešení a jeho matematickým popisem, ale nikde není zmínka k využití dat a poznatků pro další výzkum a řešení, a to zejména v konkrétní speciální oblasti broušení šnekových odvalovacích fréz.

Cílem řešení je tedy navrhnout parametrický matematický model pro vyšetření odpovídajícího tvaru brusného nástroje vzhledem k požadovaným vstupním parametrům broušené drážky, které přímo ovlivňují dané řešení. Inspirace návrhu řešení vychází z výsledků diplomové práce [8], kde byla využita teorie metody řezných rovin pro návrh výchozího povrchu brusného nástroje. Tato metoda byla však navržena jako jednoúčelová pro zvoleného typového představitele s konkrétními geometrickými daty. Řešení bylo realizováno v 3D CAD Catia V5. Vytvořením analytického modelu řešení tak bude vyšetřen a popsán geometrický tvar brusného nástroje a tato data budou následně použita pro návrh výpočtového modulu pro grafickou interpretaci analytických dat. Bude taky využito vyhovujícího programovacího jazyka a programovacího rozhraní implementovaného do zvoleného 3D CAD systému jako bylo využito zdrojem [16], vytvořený modul však bude pracovat s matematickými daty, jako využil zdroj [14] při automatizaci návrhu šroubovitého vrtáku, nikoliv pouze s příkazy vyvolávající modelářské funkce integrované v použitém systému (např. zdroj [28] využívá tohoto druhu automatizace pro tvorbu modelu vrtáku a jeho výkresové dokumentace). Tyto výstupy mohou být použity pro orovnění reálného brusného nástroje a jeho aplikaci pro realizaci experimentu broušení odvalovací frézy s konkrétními parametry.

Předpokladem je, že analytický návrh řešení a jeho vypovídající hodnota ponese proměnné (parametry), které vstupují na začátku do procesu. Vzhledem k tomu, že je cílem nalézt tvar brusného nástroje bez ohledu na nutnost uvažování možností a kinematiky použitého brousícího stroje (zdroj [15] uvažuje návrh a korekci tvaru vzhledem k více-osému brusnému centru), tyto parametry se na základě předpokladu týkají převážně geometrických vlastností šnekové odvalovací frézy.

Data získaná z experimentu broušení budou dále použita pro návrh úpravy matematického řešení, popř. pro rozšíření matematického řešení pro složitější geometrie

šnekových odvalovacích fréz než geometrie aktuálně zvoleného typového představitele (viz Kapitola 2.4) a popř. k návrhu řešení ke korekci vypočítaných geometrických dat vzhledem k nepřesnostem propojení vyšetřených bodů matematického řešení [31], výroby, použitého stroje, apod.

Shrnutí cílů:

1. Analytický návrh výpočtu tvaru brusného nástroje
2. Návrh výpočtového modulu pro grafické vyšetření výchozího povrchu brusného nástroje a vytvoření tak graficko-početní metody
3. Využití získaných dat pro návrh experimentu orovnění brusného nástroje
4. Realizace experimentu broušení vybraného typového představitele
5. Návrh pro další aplikaci získaných dat

3.1 Výběr typového představitele pro návrh graficko-početní metody

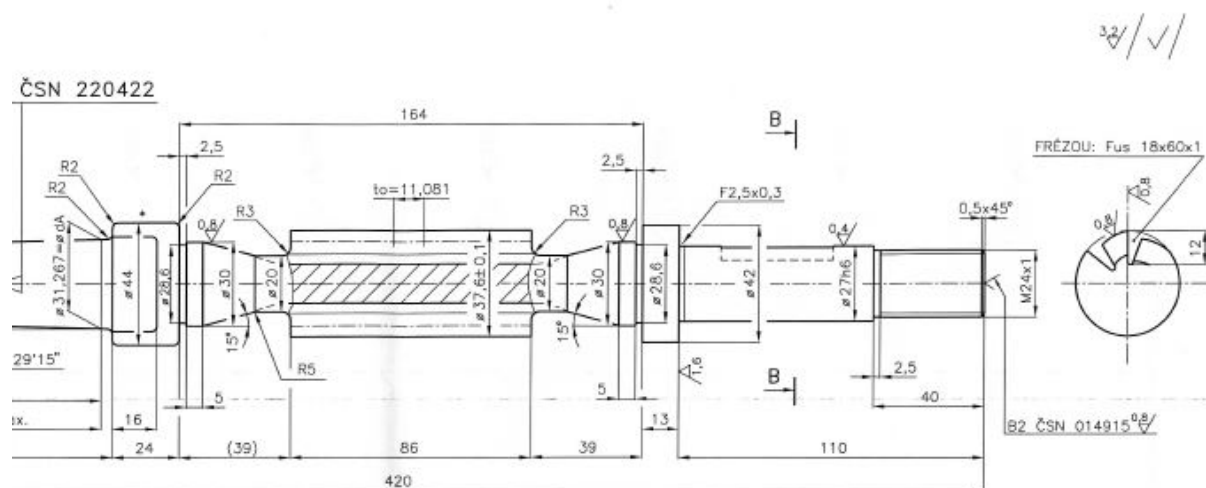
Vzhledem k tomu, že tato práce vychází z [8], pro návrh matematické metody bylo využito stejných geometrických vlastností vstupních činitelů (odvalovací frézy a brusného kotouče) pro zachování kontinuity vývoje výzkumu v této oblasti a ověřování průběžných výsledků v průběhu tvorby a návrhu současného řešení.

3.1.1 Odvalovací fréza se zvolenou geometrií

Průběh návrhu řešení problematiky se bude ve výchozím stavu opírat o geometrické parametry odvalovací frézy, která byla použita v diplomové práci [8] (viz Tabulka 1, Obrázek 19 a 21, Příloha č. 1):

Tabulka 1 Geometrické parametry zvoleného typového představitele

Parametr odvalovací frézy	Rozměr [mm]
Průměr patní kružnice	20,6
Průměr hlavové kružnice	37,6
Délka ozubení	86,0
Výška zubu	8,5
Stoupání řídicí šroubovice	711,2 (28 palců)

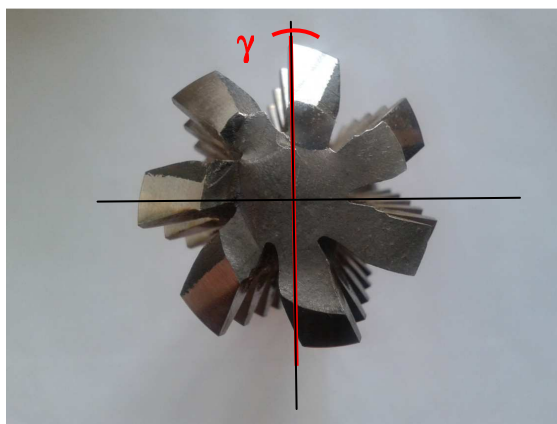


Obrázek 19 Výkres typového představitele

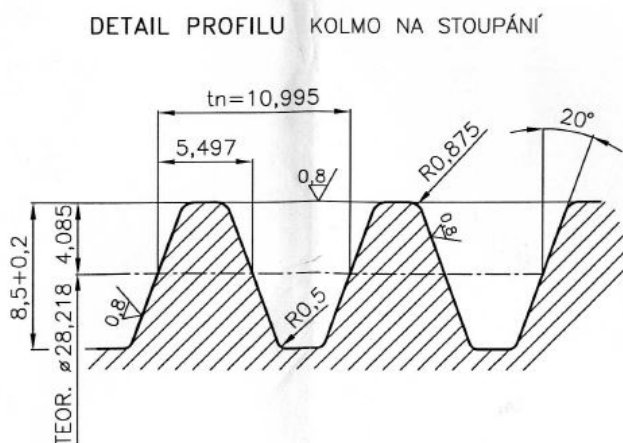
Jeden z nejdůležitějších parametrů, který je třeba při broušení odvalovacích fréz dodržet, je úhel čela jednotlivých zubů uvažovaný k ose nástroje tak, aby profil každého zubu byl kolmo k ose, tzn. v aktuálním případě $\gamma = 0^\circ$ (viz Obrázek 20). Dalším parametrem ozubení je profil zubů v rovině kolmé na stoupání tvořící šroubovice. V tomto případě se jedná o profil tvořený přímkami (viz Obrázek 10, str. 18 a Obrázek 11, str. 19) [8]. Jedná se tedy o dodržení tolerance rovinnosti čela zubu.

Tabulka 2 Geometrické parametry typového představitele – požadavky na přesnost

Parametr odvalovací frézy	Charakteristika
Úhel γ	0 [°]
Tvar profilu zubu (v rovině kolmé na stoupání řídicí šroubovice)	Přímka
Tolerance rovinnosti čela zubu	Třída AA až C dle výkresu



Obrázek 20 Úhel čela [8]



Obrázek 21 Detail profilu kolmo na stoupání [8]

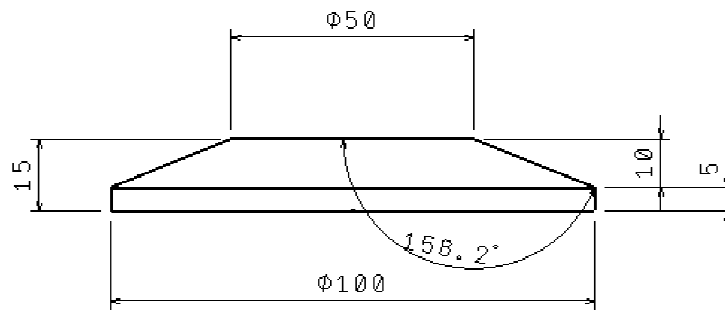
Pozn.: Výše uvedené parametry jsou společné pro všechny základní typové představitele šnekových odvalovacích fréz, na které bude navrženo uvažované řešení. Mění se pouze jejich hodnota.

3.1.2 Stanovený brusný nástroj

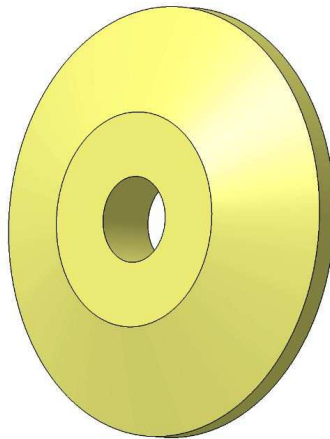
V surovém stavu se brusné nástroje dodávají o definované geometrii od výrobce [9] (viz Tabulka 2, Obrázek 22 a 23). Většinou se jedná o brusné nástroje, které mají základní tvar řezné části jako profil definovaný pomocí přímkou či rádiu [8].

Tabulka 3 Geometrické parametry stanoveného brusného nástroje

Parametr brusného kotouče	Rozměr [mm]
Malý průměr	50
Velký průměr	100
Celková šířka	15
Výška neřezné hrany	5
Výška řezné části	10
Průměr upínacího otvoru	20



Obrázek 22 Základní rozměry brusného kotouče – geometrie [8]



Obrázek 23 Brusný kotouč – 3D model [8]

Standardní tvary profilu kotoučů neumožňují přesné broušení plochy čel zubů a dochází k jejímu podřezávání (Pozn.: **Podříznutí [18]** - Podříznutí šroubové drážky nástroje vzniká zanořením brusného kotouče do odvalovací frézy v důsledku různých křivostí styčných povrchů a tvarů při vedení po řídicí křivce (dráze kotouče) a obráběné šroubovice.).

4 Návrh analytické metody řešení

Na základě dosavadních výsledků je cílem navrhnout matematické řešení, respektive navržení graficko-početní metody pro vyšetření výchozího povrchu brusného nástroje pro šnekové odvalovací frézy jako analytického řešení, jehož výsledky přispějí k hlubšímu pochopení geometrických procesů při kontaktu broušený nástroj – brusný nástroj v průběhu operace ostření a přispějí k výzkumu a popisu tvaru řezné části brusného nástroje a jejímu vlivu na pozitivní výsledek po broušení. Řešení bude postaveno na parametrickém matematickém modelu pro navržení odpovídajícího tvaru kotouče vzhledem ke vstupním parametrům broušené drážky. Získané výsledky a znalosti z grafického řešení, které byly předmětem diplomové práce, budou použity jako vstupní data pro matematický popis řešení. Grafické řešení má několik klíčových kroků, které jsou důležité pro získání korektních výsledků. Tyto kroky jsou použity jako základ pro algoritmus matematického řešení (podobný postup a návrh algoritmu využívá zdroj při výpočtu pro návrh šroubovitého vrtáku [29]).

Je velmi důležité převést každý tento krok do analytického popisu k nalezení správného směru a odpovídajících rovnic k řešení. Vzhledem k tomu, že se jedná o parametrické řešení, proměnné musí být voleny s ohledem ke vstupním parametrům do brusného procesu. Pokud jsou nalezené rovnice naplněny odpovídajícími hodnotami a proměnnými, řešení každého kroku může následně být přepočítáno ve správném směru a pozici. Každý tento krok je vyšetřen a popsán prakticky ručně. Každá takto nalezená a vypočítaná rovnice je následně zkontrolována pomocí softwaru Wolfram Mathematica a takto navržený popis je následně vykreslen pomocí syntaxe tohoto programu ke grafické kontrole. Pro některé výpočty je využito také podpory softwaru Matlab a MuPad pro verifikaci v průběhu návrhu.

Algoritmus návrhu jednotlivých kroků matematického řešení:

- 1 Klíčový krok grafické metody
- 2 Převod do matematického popisu
- 3 Nalezení správného směru řešení a vhodných rovnic
- 4 Naplnění rovnic vhodnými hodnotami a proměnnými
- 5 Vypočítání rovnic ve správném směru a pozici

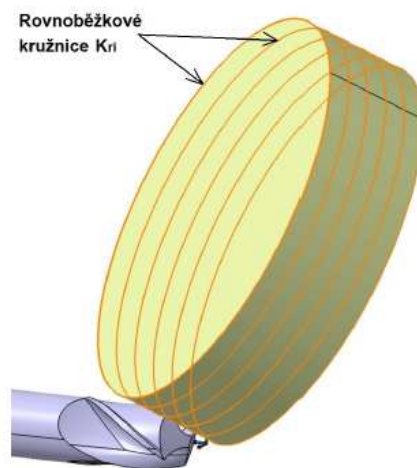
Popis navrhovaného řešení vychází ze šroubové plochy čel zubů a pro určité výpočetní zjednodušení je použita souvislá šroubová plocha, která neuvažuje tvar boku zubů a jeho parametry, které nejsou nezbytně nutné pro získání odpovídajících výsledků (viz Obrázek 25). Hlavní informace jsou tedy v patní kružnici, v hlavové kružnici, řídící šroubovici a hloubce broušené drážky (viz Obrázek 26). Primárně se jedná o matematický model, který obsahuje informace ohledně odvalovací frézy, brusného kotouče a geometrie nezbytné pro řešení celého procesu.

Parametry primárně ovlivňující navrhované řešení:

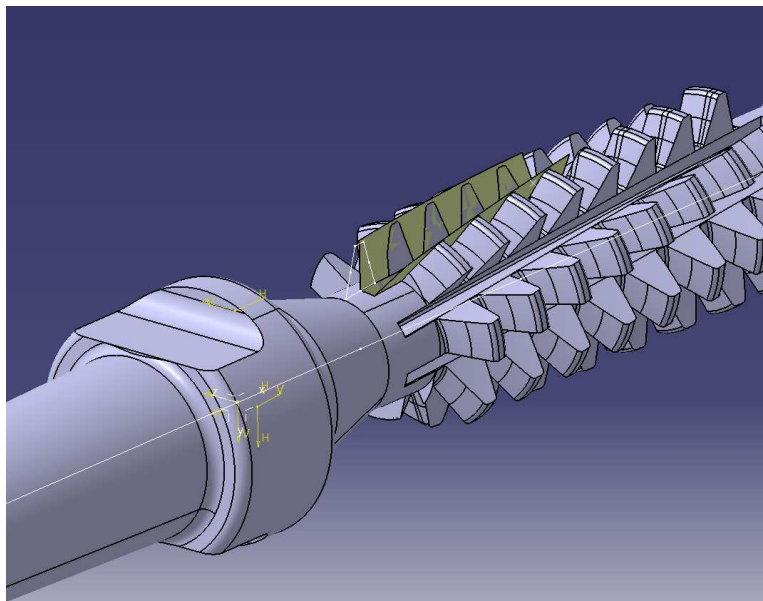
- Stoupání řídící šroubovice
- Úhel čel zubů vzhledem k ose nástroje
- Řídící profil elementu tvořící broušenou drážku
- Průměr brusného kotouče
- Výška broušené drážky = výška zubu (dána hlavovou a patní kružnicí odvalovací frézy)

4.1 Matematický tvar odpovídajícího tvaru brusného kotouče

Model navrhovaného řešení vychází z teorie grafické metody řezných rovin a diskretizace brusného kotouče (jako využil zdroj [14], viz Obrázek 24) a je sestaven na základě znalostí řešené problematiky, geometrie uvažovaných nástrojů a znalostí analytické a diferenciální geometrie. Vzhledem k tomu, že hlavním činitelem a zároveň hlavním problémem je broušená šroubová drážka (viz Obrázek 25), se řešení opírá a zároveň odvozuje od geometrie plochy čel zubů a její poloze v prostoru vzhledem k výchozímu souřadnému systému, který byl zvolen pro návrh řešení, a která současně udává geometrické vlastnosti celého nástroje (viz Obrázek 26).



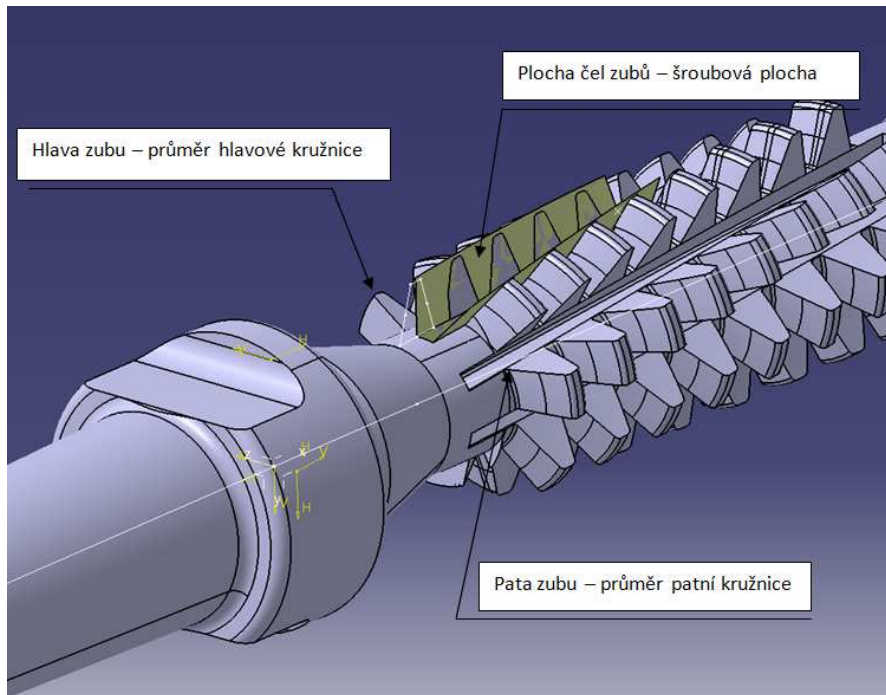
Obrázek 24 Diskretizace brusného kotouče [14]



Obrázek 25 Plocha čel zubů jako souvislá šroubová plocha

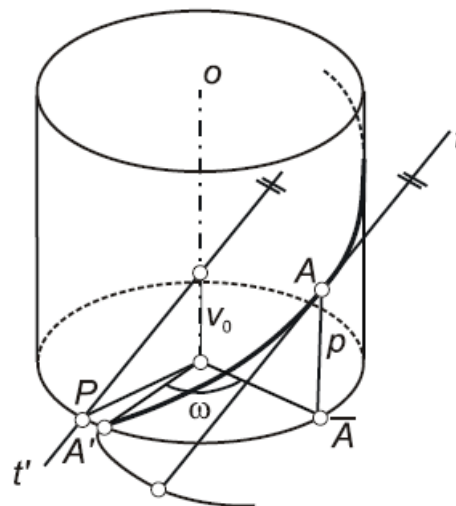
Pozn.: Níže uvedené matematické řešení je strukturováno tak, jak bylo v průběhu vypracování vytvářeno. Pro snazší orientace v textu je vždy vyznačena modrou barvou a pruhem teorie

aktuálně aplikovaná na sestavení rovnic uváděných pod touto teorií. Pro tyto účely bylo využito převážně zdroje [19].



Obrázek 26 Základní parametry - definice

Šroubová plocha je charakterizována stoupáním řídicí šroubovice, šířkou ozubení (tedy výškou šroubovice = p ; posunutí počátečního bodu A při šroubovém pohybu), průměrem šroubovice r , a dále parametrem, který udává výšku šroubové plochy (viz Obrázek 27). [19]



Obrázek 27 Charakteristika šroubovice [19]

Důležitým charakteristickým znakem šroubovice je výška závitu v , což je velikost posunutí bodu při otočení o 2π radiánů. Jestliže otočíme tento bod o 1 rad, značí se velikost posunutí v_0 jako redukovaná výška závitu. [19]

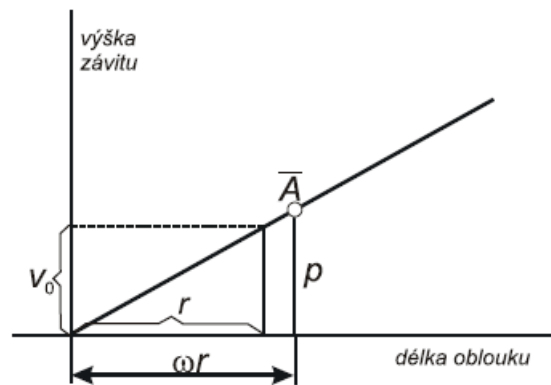
Redukovaná výška závitu v_0 řídicí šroubovice:

$$v_0 = \frac{v}{2\pi} \quad (1)$$

Řídicí šroubovice leží na rotační válcové ploše, tato plocha je vlastním tělem nástroje a je charakterizována poloměrem těla nástroje R_{PK} . Pro zjednodušení výpočtu bez ovlivnění výsledků řešení je poloměr těla nástroje ztotožněn s poloměrem patní kružnice $\frac{PPK}{2}$ (viz Obrázek 26; na reálném nástroji je průměr patní kružnice větší než průměr těla nástroje, jelikož jsou zde vyvedeny drážky pro snazší odchod tříšek), tedy:

$$R_{PK} = \frac{PPK}{2} \quad (2)$$

Jestliže rozvineme válcovou plochu nástroje do roviny, šroubovice se rozvine do přímky. Pokud zavedeme lokální souřadnicový systém tak, aby ležel v počátku a osa šroubovice byla rovnoběžná s osou nástroje (= osa x), je toto rozvinutí šroubovice grafem závislosti posunutí na délce oblouku (neboli úhlu otočení), (viz Obrázek 28). [19]



Obrázek 28 Graf závislosti posunutí na délce oblouku [19]

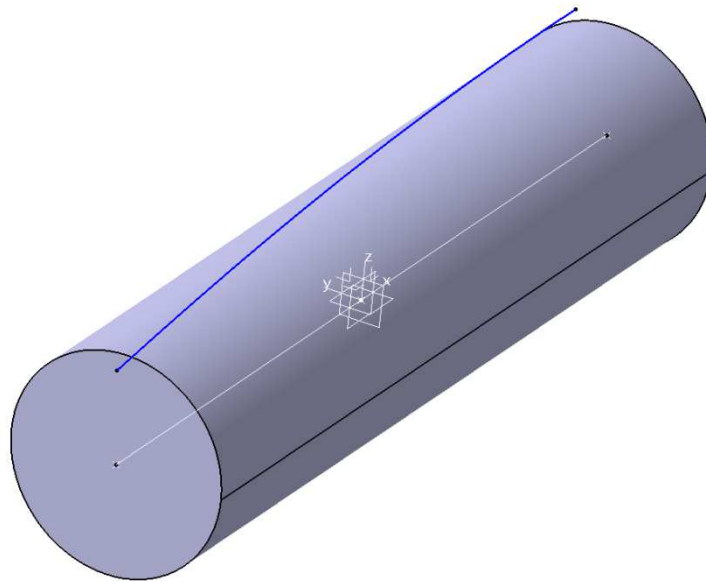
Parametrické vyjádření řídicí šroubovice s počátkem souřadnicového systému v ose nástroje a počátečním natočením o úhel počátečního natočení vůči výchozímu souřadnicovému systému (viz Obrázek 29, řídicí šroubovice je vyznačena modrou barvou), dále značeno jako *PočNat*, který v přepočtu odpovídá hodnotě tt [rad], je tedy:

$$x = v_0 * T$$

$$y = \frac{PPK}{2} * \cos(T + tt)$$

$$z = \frac{PPK}{2} * \sin(T + tt)$$

$T \in I$, kde I je interval odpovídající délce ozubení šnekové odvalovací frézy pro aktuální parametry (3)



Obrázek 29 Řídící šroubovice

Šroubová plocha vzniká šroubovým pohybem dané řídicí křivky vzhledem ke stoupání a dalším geometrickým vlastnostem řídicí šroubovice. [19]

V tomto případě je řídicí křivka daná profilem broušeného zubu a křivkou, která jej popisuje v rovině kolmé na stoupání řídicí šroubovice (přímka BC s parametrem V ; viz Obrázek 30, značeno modrou barvou). V aktuálně řešeném případě, který vychází z geometrických charakteristik typového představitele, se jedná o přímkový profil, který je určen směrovým normálovým vektorem $\vec{n} = (x_W, y_W, z_W)$ a bodem v počátečním bodě řídicí šroubovice (bod B).

Počáteční bod řídicí šroubovice, bod B :

$$B = [0, -\sin(\text{PočNat}) * \frac{PPK}{2}, -\cos(\text{PočNat}) * \frac{PPK}{2}] \quad (4)$$

Směrový vektor \vec{n} :

$$\vec{n} = \left(0, (-\sin(\text{PočNat})) * \frac{PPK}{2}, (-\cos(\text{PočNat})) * \frac{PPK}{2}\right) \quad (5)$$

Přímka BC :

$$BC_x = 0 + V * 0$$

$$BC_y = -\sin(\text{PočNat}) * \frac{PPK}{2} + V * (-\sin(\text{PočNat})) * \frac{PPK}{2}$$

$$BC_z = -\cos(\text{PočNat}) * \frac{PPK}{2} + V * (-\cos(\text{PočNat})) * \frac{PPK}{2}$$

$$V \in R \quad (6)$$

Šroubová plocha je vinuta např. jako schodiště, tzn., že tyto tvořící přímky protínají osu šroubovice a zároveň osu nástroje a jsou k ní kolmé. Na šroubové ploše tak lze nalézt dvě soustavy tvořících křivek:

1. soustava křivek, která vzniká šroubováním profilu zubu
2. soustava křivek, která je tvořena šroubovým pohybem jednotlivých bodů profilu zubu, tyto křivky mají společné vlastnosti jako řídicí šroubovice, ale každá se nalézá na jiném průměru [19]

Šroubová plocha vzniká složením pohybu translace a rotace křivky k , kde vektor křivky $\vec{s}_k = (0, 0, 1)$.

Výsledný pohyb pro výpočet šroubové plochy odpovídá:

$$(0, 0, W, 1) * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos T + tt & \sin T + tt & 0 \\ 0 & -\sin T + tt & \cos T + tt & 0 \\ v_0 * T & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = (X, Y, Z, 1) \quad (7)$$

Rovnice šroubové plochy (plochy čel zubů) s parametrem definujícím výšku zubu W a uvažováním počátečního natočení vůči výchozímu souřadnicovému systému odpovídající hodnotě tt (volba natočení je uvažována s ohledem pro snazší další výpočty; viz Obrázek 30, značeno žlutou barvou):

$$X = v_0 * T$$

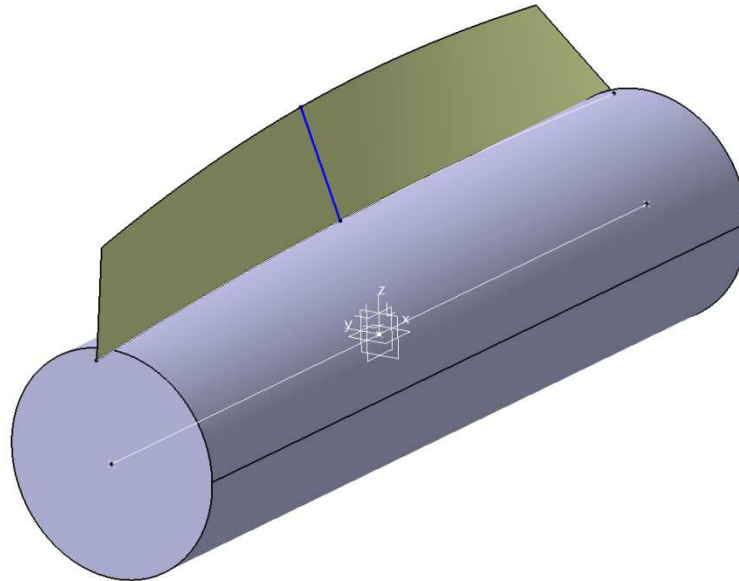
$$Y = -W * \sin(T + tt)$$

$$Z = W * \cos(T + tt)$$

$T \in I$, kde I je interval odpovídající délce ozubení šnekové odvalovací frézy pro aktuální parametry

$$W \in \left(0, \frac{PHK - PPK}{2}\right) \quad (8)$$

Pozn.: Hodnota $\frac{PHK}{2}$ odpovídá hodnotě poloměru hlavové kružnice R_{HK}



Obrázek 30 Profil zubu, plocha čel zubů

Metoda řezných rovin je založena na soustavě rovnoběžných rovin a na ortogonálním promítání na dvě průmětny. Vyšetřením křivky záběru tvarového nástroje a vytvořením soustavy řezných rovin kolmých na rovinu kolmou na stoupání řídicí šroubovice (uvažováno včetně natočení nástroje dle úhlu stoupání šroubovice drážky) jsou získány průniky jednotlivých kružnic tvarového nástroje vzniklé vytvořením soustavy řezných rovin a jednotlivými body povrchu drážky v dané řezné rovině. Takto vznikne soustava jednotlivých průsečíků, které tvoří body výchozího povrchu nástroje vhodného pro daný typ úlohy [8]. Dochází tak k diskretizaci brusného kotouče na jednotlivé elementární části a jeho rozřezání a vyšetření styčných bodů pomocí soustavy kolmých rovin.

Pro sestavení soustavy řezných rovin je potřeba nalézt tečnu k řídicí šroubovici, jejíž vektor \vec{t} bude určující pro nalezení roviny, ve které leží a která je kolmá na rovinu kolmou na stoupání této šroubovice.

Tečný vektor řídicí šroubovice, kdy její osou je osa x a tedy směrový vektor $\vec{s}_x = (x_{\vec{s}}, y_{\vec{s}}, z_{\vec{s}}) = (0, 0, 1)$, je získán derivováním složek parametrické rovnice šroubovice podle parametru T [19].

Derivováním jednotlivých složek rovnice řídicí šroubovice (viz rovnice (3), str. 33) získáme:

$$\frac{dx}{dT} = v_0$$

$$\frac{dy}{dT} = -\frac{PPK}{2} * \sin(T)$$

$$\frac{dz}{dT} = \frac{PPK}{2} * \cos(T)$$

$T \in I$, kde I je interval odpovídající délce ozubení šnekové odvalovací frézy pro aktuální parametry (9)

$$\vec{t} = (v_0, -\frac{PPK}{2} * \sin(T), \frac{PPK}{2} * \cos(T)) \quad (10)$$

Tečna křivky je tedy limitní poloha přímky BT pro $A \rightarrow B$, pro zvolený bod B na křivce a bod A v jeho blízkosti. Pomocí vektoru první derivace lze definovat tečnu křivky jako přímku určenou bodem křivky a jejím tečným vektorem v tomto bodě. Platí tedy, že [19]:

$$X = B + u * P'$$

$$u \in R \quad (11)$$

$$P' = (x'(t), y'(t), z'(t)) \quad (12)$$

Tečna k řídicí šroubovici daná vektorem \vec{t} (viz rovnice (10)) v bodě B (= počáteční bod šroubovice s jejím uvažovaným natočením vůči výchozímu souřadnému systému; viz rovnice (4), str. 34) s parametrem u ; viz Obrázek 31, značeno modrou barvou:

Po úpravě:

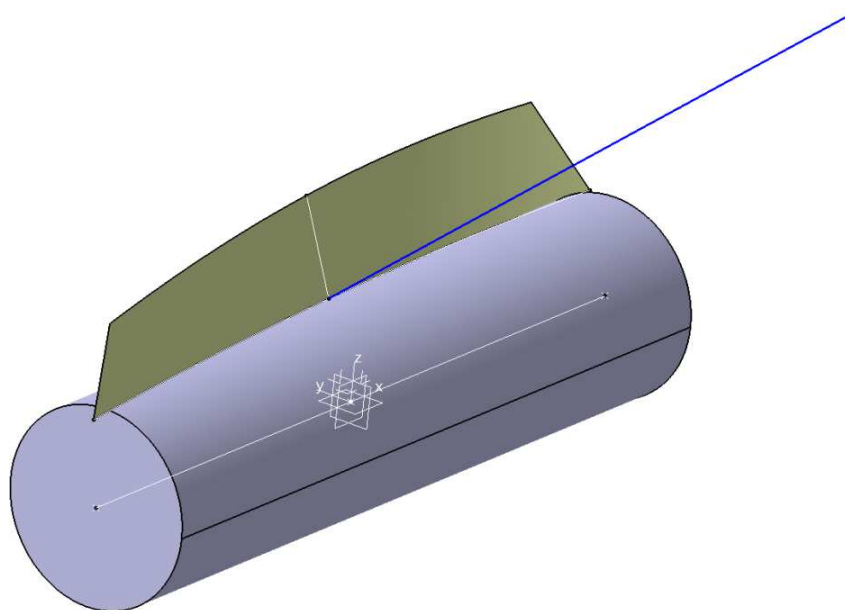
$$\vec{t}_B = (v_0, \frac{PPK}{2}, 0) \quad (13)$$

$$t_B x = u * v_0$$

$$t_B y = -\sin(\text{PočNat}) * \frac{PPK}{2} + u * \frac{PPK}{2}$$

$$t_B z = -\cos(\text{PočNat}) * \frac{PPK}{2}$$

$$u \in R \quad (14)$$



Obrázek 31 Tečna k řídicí šroubovici v bodě B

Normála křivky v bodě B je každá přímka kolmá k tečně v tomto bodě a zároveň jím prochází. Normálová rovina je množina všech normál v bodě křivky, je to rovina kolmá k tečně. Tečná rovina ke šroubové ploše je většinou určena tečnou ke šroubovici a tečnou k tvořící křivce. Normála šroubové plochy je kolmice k tečné rovině v bodě dotyku [19]. Pro další výpočty jsou uvažované rovnice rovin dle obecného zápisu roviny, který vychází z Hessesova normálového tvaru rovnice roviny:

$$a * x + b * y + c * z + d = 0 \quad (15)$$

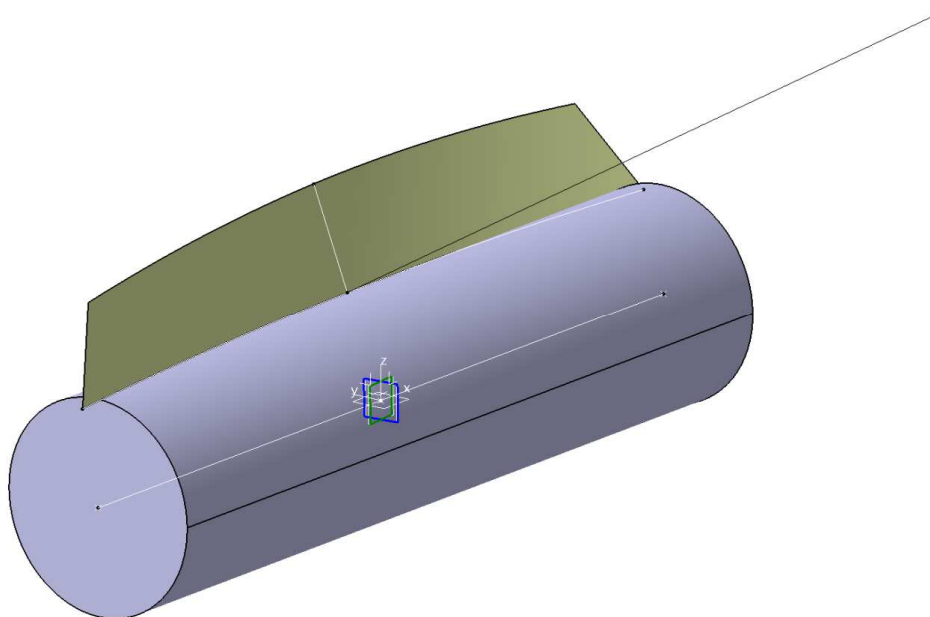
Kde a, b, c jsou složky odpovídajícího normálového vektoru a d je určující konstanta roviny získaná dosazením souřadnic libovolného bodu do rovnice [19].

Rovina kolmá na stoupání řídicí šroubovice, tj. rovina kolmá k tečně řídicí šroubovice $\vec{t} = (v_0, \frac{PPK}{2}, 0)$, v bodě $C = [0, 0, 0]$ (počátek zvoleného souřadnicového systému); rovina α ; viz Obrázek 32, značeno modrou barvou:

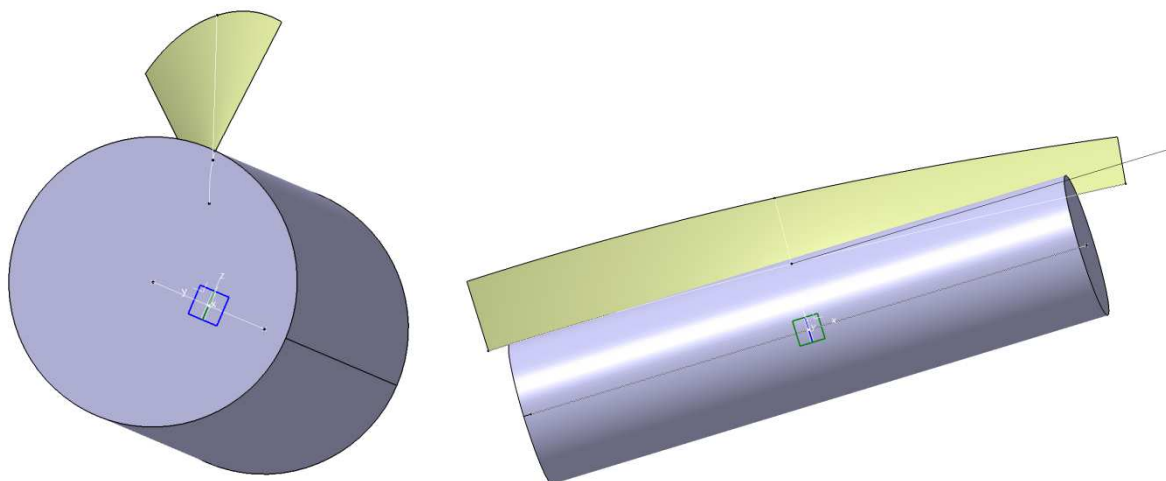
$$\alpha: v_0 * x + \frac{PPK}{2} * y = 0 \quad (16)$$

Rovina kolmá na rovinu kolmou na stoupání řídicí šroubovice (rovina α , rovnice (16)); rovina β_0 , určená normálovým vektorem $\vec{n}_{\beta_0} = (-\frac{PPK}{2}, -v_0, 0)$; viz Obrázek 32, značeno zelenou barvou:

$$\beta_0: -\frac{PPK}{2} * x - v_0 * y = 0 \quad (17)$$



Obrázek 32 Rovina α (modrá), rovina β_0 (zelená)



Obrázek 33 Vlevo: pohled kolmo do roviny α ; Vpravo: pohled kolmo do roviny β_0

Rovina β_0 a její popis je klíčový k určení soustavy řezných rovin, jelikož tečný vektor, normálový vektor a počáteční bod (bod B , viz rovnice (4), str. 34) řídicí šroubovice jsou směřodonné pro vypočítání první řezné roviny β_{11} , která demonstruje natočení a polohu brusného kotouče ve drážce jako při reálném procesu broušení, kdy je brusný nástroj polohován v dané pozici tečně k ploše čel zubů, respektive tečně k řídicí šroubovici.

První řezná rovina, rovina β_{11} (je rovnoběžná s rovinou β_0 ; viz rovnice (17), str. 38) a posunutá ve směru vektoru \vec{n}_{β_0} (viz rovnice (17), str. 38) o hodnotu přesnosti diskretizace brusného kotouče δ); viz Obrázek 36, značeno modrou barvou:

$$\beta_{11}: -\frac{PPK}{2} * x - v_0 * y + v_0 * \sin(PočNat) * \frac{PPK}{2} = 0 \quad (18)$$

V této rovině lze demonstrovat velký průměr brusného kotouče D , který je dán kružnicí K_{11} s jeho poloměrem $\frac{D}{2}$ se středem v bodě S_{11} a na tuto rovinu je kolmá jeho osa O procházející tímto bodem a daná směrovým vektorem \vec{n}_O .

Střed brusného kotouče S_{11} je získán výpočtem průniku první řezné roviny β_{11} (viz rovnice (18)) a osy brusného kotouče O (viz rovnice (21), str. 40),

kde $v_0 * \sin(PočNat) * \frac{PPK}{2}$ je značeno jako $d\beta_{11}$:

$$S_{11} = \left(\frac{d\beta_{11}}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * \left(-\frac{PPK}{2}\right), \frac{d\beta_{11}}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * (v_0), -\cos(PočNat) * \frac{PPK}{2} + \frac{D}{2} \right) \quad (19)$$

Směrový vektor \vec{n}_O osy brusného kotouče O :

$$\vec{n}_O = \vec{t}_B \times \vec{s}_z = \left(v_0, \frac{PPK}{2}, 0 \right) \times (0, 0, 1) = \left(-\frac{PPK}{2}, v_0, 0 \right) \quad (20)$$

kde \vec{s}_z je směrový vektor osy z výchozího souřadnicového systému.

Parametrické vyjádření osy brusného kotouče O s parametrem w s počátkem ve výchozím souřadnicovém systému, viz Obrázek 36, značeno oranžovou barvou:

$$\begin{aligned} O_x &= w * \frac{-PPK}{2} \\ O_y &= w * v_0 \\ O_z &= -\cos(PočNat) * \frac{PPK}{2} + \frac{D}{2} \\ w &\in \mathbb{R} \end{aligned} \tag{21}$$

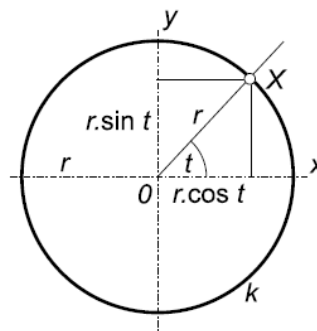
Kružnice o středu O a poloměru r ($r > 0$) má vektorovou rovnici:

$$\begin{aligned} X(t) &= (r * \cos t, r * \sin t) \\ t &\in \langle 0, 2\pi \rangle \end{aligned} \tag{22}$$

Parametr t je úhel, který svírá polohový vektor $X(t)$ s kladnou poloosou x :

$$|X(t)| = \sqrt{r^2 \cos^2 t + r^2 \sin^2 t} = r \tag{23}$$

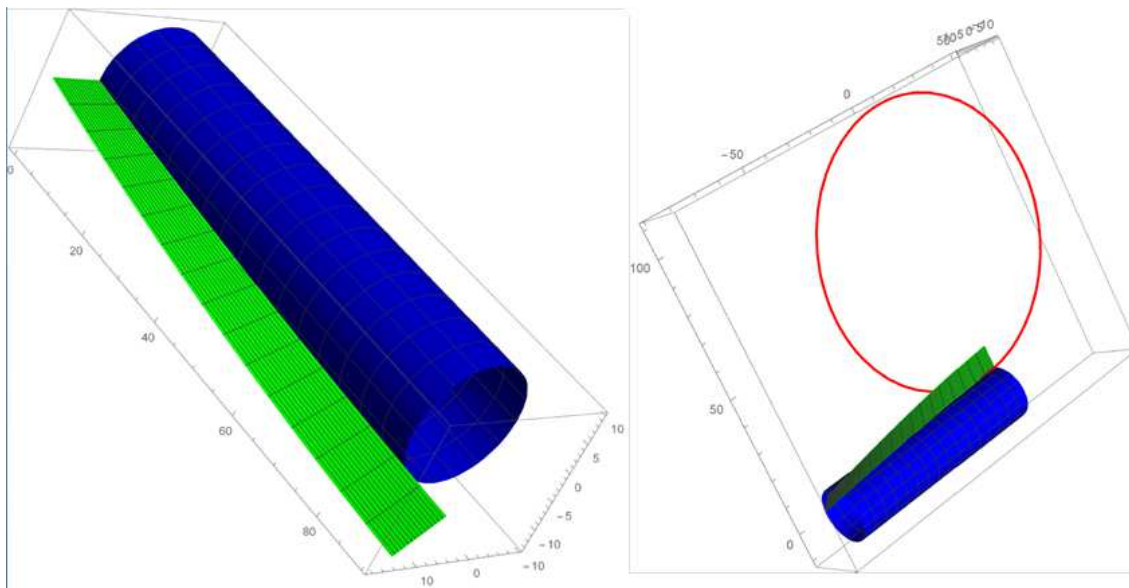
[19]



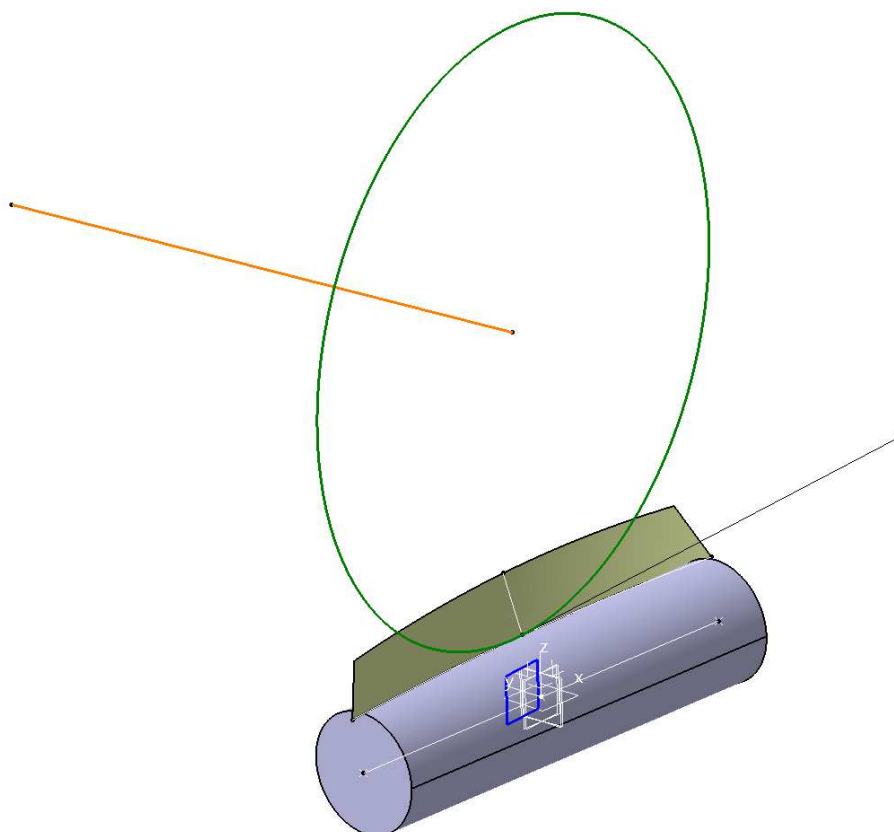
Obrázek 34 Parametrický výpočet poloměru kružnice [19]

Vyjádření velkého průměru brusného kotouče se středem S_{11} (rovnice (19)) pomocí parametrické rovnice kružnice K_{11} s parametrem a_1 ; viz Obrázek 36, značeno zelenou barvou (na Obrázku 35 je ukázka stejného výstupu dle rovnic v programu Wolfram Mathematica):

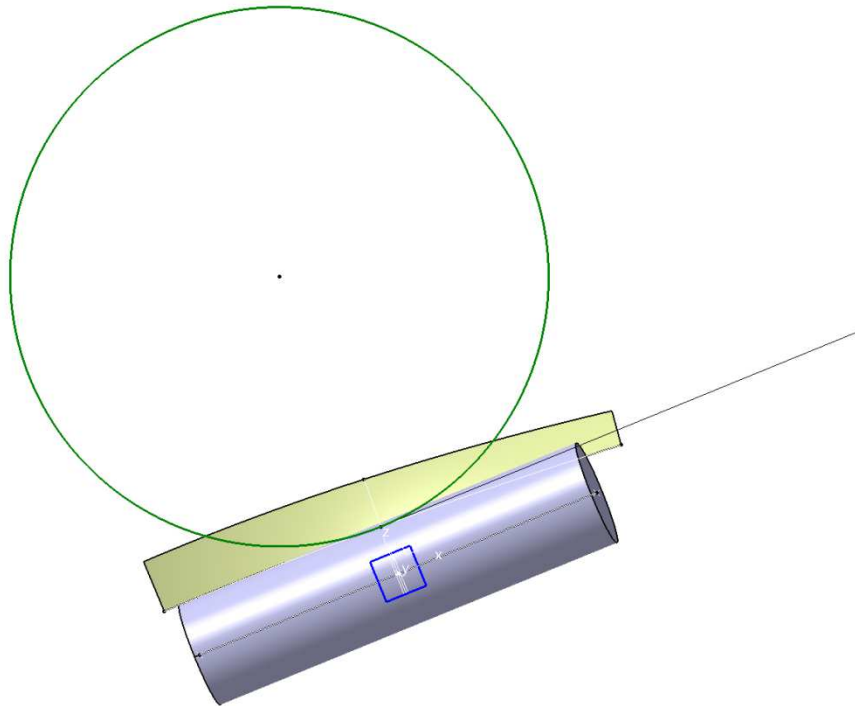
$$\begin{aligned} K_{11}x &= \frac{d\beta_{11}}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * \left(-\frac{PPK}{2}\right) + \frac{D}{2} * \cos(a_1) * v_0 * \frac{1}{\sqrt{(v_0)^2 + \left(\frac{PPK}{2}\right)^2}} \\ K_{11}y &= \frac{d\beta_{11}}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * (v_0) + \frac{D}{2} * \cos(a_1) * \frac{PPK}{2} * \frac{1}{\sqrt{(v_0)^2 + \left(\frac{PPK}{2}\right)^2}} \\ K_{11}z &= \left(-\cos(PočNat) * \frac{PPK}{2} + \frac{D}{2}\right) + \frac{D}{2} * \sin(a_1) * 1 \\ a_1 &\in \langle 0, 2\pi \rangle \end{aligned} \tag{24}$$



Obrázek 35 Repräsentace rovnice (8) a (24) v softwaru Wolfram Mathematica pro zvolený interval $T \in (0, \pi)[20, 5]$



Obrázek 36 Rovina β_{11} (modrá); Osa brusného kotouče O (oranžová); Kružnice K_{11} definující velký průměr brusného kotoučev(zelená)



Obrázek 37 Pohled do roviny β_{11}

Soustava řezných rovin β_i , i udává jejich počet, se odvíjí od výchozí roviny β_{11} (rovnice (18)), jejíž předpis udává podobu předpisu této soustavy. Jedná se o soustavu rovnoběžných rovin, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu δ , neboli hodnoty přesnosti výsledného řešení, ve směru normálového vektoru této soustavy a pokrývající rozsah šroubové plochy. Tyto roviny jsou následně použity pro výpočty průniků těchto rovin s plochou čel zubů.

Každá z těchto rovin prochází daným bodem S_i , které jsou od sebe vzdáleny právě o hodnotu δ , a mají společný normálový vektor \vec{n}_O (rovnice (20), str. 39). Vzhledem k tomu, že se jedná o soustavu rovin rovnoběžných, lišících se v konstantě d_{β_i} a které jsou vzájemně posunuty o hodnotu přesnosti, byla zavedena velikost jednotkového vektoru S_{2Norm} tak, aby dané posunutí ve směru normálového vektoru v rovině XY odpovídalo měřítku.

Zavedení jednotkového vektoru v rovině XY :

$$\begin{aligned} S_{2X} &= \frac{PPK}{2} \\ S_{2Y} &= v_0 \end{aligned} \quad (25)$$

Velikost jednotkového vektoru v rovině XY :

$$S_{2Norm} = \sqrt{(S_{2X})^2 + (S_{2Y})^2} \quad (26)$$

Konstanta d_{β_i} :

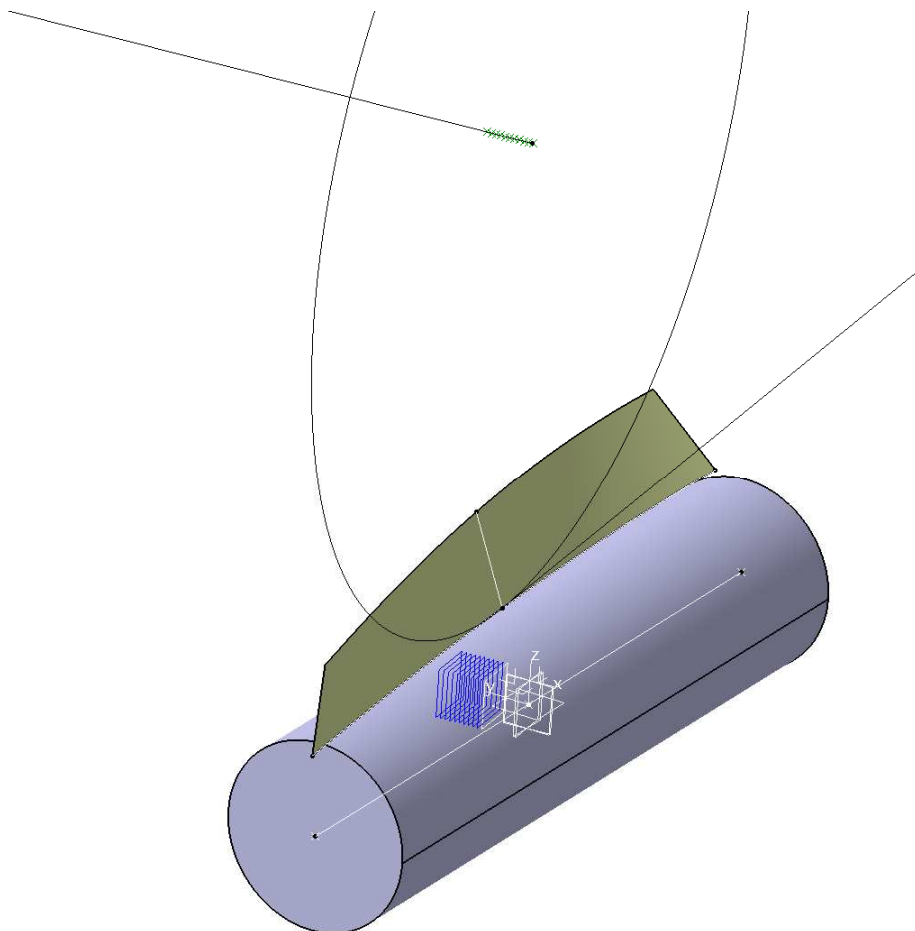
$$d_{\beta_i} = \frac{-PPK}{2} * \frac{S_{2X}}{S_{2Norm}} * \delta * i - v_0 * (-\sin(PočNat)) * \frac{PPK}{2} + \frac{S_{2Y}}{S_{2Norm}} * \delta * i \quad (27)$$

Soustava řezných rovin β_i ; viz Obrázek 38, značeno modrou barvou:

$$\beta_i: -\frac{PPK}{2} * x - v_0 * y + d_{\beta_i} = 0 \quad (28)$$

Průniky řezných rovin s osou nástroje S_i definující střed nástroje v každé řezné rovině β_i ; viz Obrázek 38, značeno zelenou barvou:

$$S_i = \left(\frac{d_{\beta_i}}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * \left(-\frac{PPK}{2}\right), \frac{d_{\beta_i}}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * (v_0), -\cos(PočNat) * \frac{PPK}{2} + \frac{D}{2} \right) \quad (29)$$



Obrázek 38 Soustava řezných rovin β_i (modrá) a soustava průniků S_i (zelená) jednotlivých řezných rovin β_i s osou nástroje O

Pro získání odpovídajícího tvaru brusného kotouče je nutné získat poloměry jeho aktuální řezné části R_{β_i} v každé řezné rovině β_i (rovnice (28), str. 43). Pokud vypočítáme křivky průniků každé řezné roviny a šroubové plochy, použijeme následně algoritmus pro výpočet minima funkce – nejkratší vzdálenosti aktuálního středu brusného kotouče od křivky průniku v aktuální řezné rovině (*NejkratsiVzdalenost β_i*). Tato hodnota udává aktuální poloměr R_{β_i} brusného kotouče v uvažované řezné rovině.

Křivky průniků řezných rovin a šroubové plochy se získají dosazením jednotlivých souřadnic X, Y, Z šroubové plochy (rovnice (8), str. 35) do obecného popisu řezné roviny β_i (rovnice (28), str. 43) a vyjádřením zvoleného parametru W_i ; tento parametr je následně dosazen za odpovídající proměnnou do rovnic šroubové plochy, což po dosazení odpovídá parametrickému popisu křivky řezu.

Dosazení souřadnic rovnice (8) do rovnice (28):

$$-\frac{PPK}{2} * (v_0 * T) - v_0 * \left[- \left(\frac{PHK-PPK}{2} \right) * \sin(T + tt) \right] + d_{\beta_i} = 0 \quad (30)$$

Zvolení parametru W_i :

$$W_i = \frac{PHK-PPK}{2} \quad (31)$$

Parametr W_i po dosazení:

$$W_i = \frac{d_{\beta_i} + \frac{PPK}{2} * v_0 * T}{v_0 * \sin(T + tt)}$$

$T \in I$, kde I je interval odpovídající délce ozubení šnekové odvalovací frézy pro aktuální parametry (32)

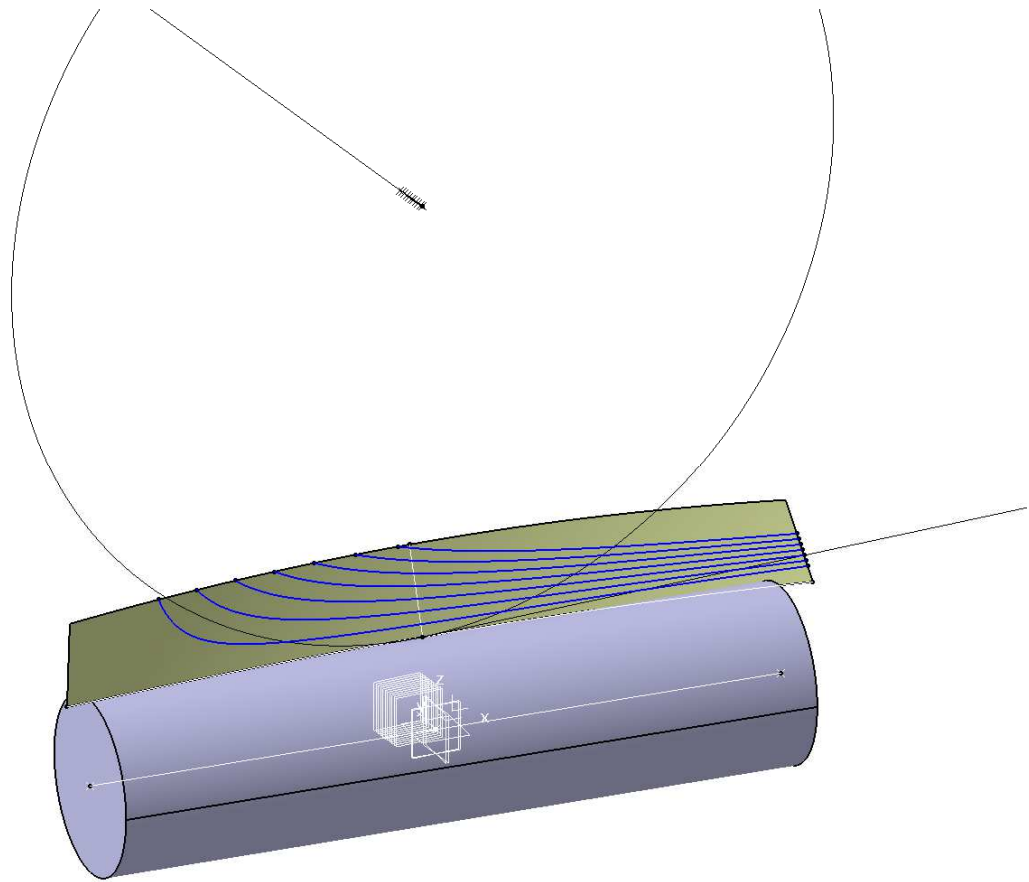
Parametrické vyjádření řezu roviny β_i a šroubové plochy (dosazení rovnice (32) do rovnice (8), str. 35); viz Obrázek 39, značeno modrou barvou:

$$L_x = v_0 * T$$

$$L_y = \frac{1}{v_0} * \left(\left(\frac{-PPK}{2} * \frac{S_{2X}}{S_{2Norm}} * \delta * i + v_0 * (-\sin(\text{PočNat})) * \frac{PPK}{2} + \frac{S_{2Y}}{S_{2Norm}} * \delta * i \right) + \right. \\ \left. PPK2 * v_0 * T \right)$$

$$L_z = \frac{1}{v_0} * \left(\left(\frac{-PPK}{2} * \frac{S_{2X}}{S_{2Norm}} * \delta * i + v_0 * (-\sin(\text{PočNat})) * \frac{PPK}{2} + \frac{S_{2Y}}{S_{2Norm}} * \delta * i \right) + \right. \\ \left. PPK2 * v_0 * T * \tan(T + tt) \right)$$

$T \in I$, kde I je interval odpovídající délce ozubení šnekové odvalovací frézy pro aktuální parametry (34)



Obrázek 39 Řezy soustavy rovin β_i a šroubové plochy

Poloměry jednotlivých kružnic R_{β_i} jako *NejkratsiVzdalenost β_i* :

$$NejkratsiVzdalenost_{\beta_i} = \sqrt{(S_i x - L_x)^2 + (S_i y - L_y)^2 + (S_i z - L_z)^2} \quad (35)$$

Nejkratší vzdálenost, tedy hledaný poloměr R_{β_i} platí tehdy, pokud:

$$\frac{dNejkratsiVzdalenost_{\beta_i}}{dT} = 0 \quad (36)$$

Rovnice jednotlivých kružnic brusného kotouče vycházejí z rovnic popisu jeho velkého průměru (rovnice (24)), avšak je potřeba zavést jednotkový vektor S_{2Norm} vzhledem k jejich vzájemnému posunutí o přesnost δ . Jejich poloměr nabývá hodnoty lokálního minima funkce řezu vzhledem k aktuální řezné rovině.

Rovnice kružnice K_i definující aktuální průměr $R_{\beta i}$ brusného kotouče; viz Obrázek 40, značeno oranžovou barvou:

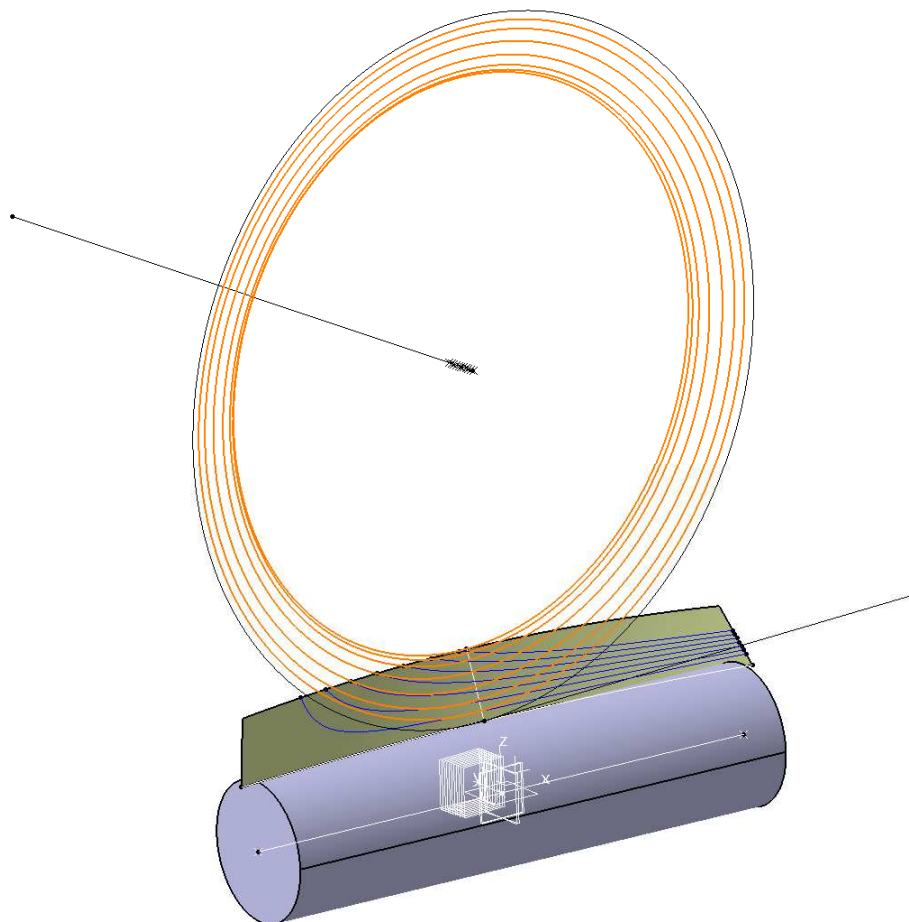
$$K_i x = \frac{d\beta_i}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * \left(-\frac{PPK}{2}\right) + R_{\beta i} * \cos(a) * v_0 * \frac{1}{\sqrt{(v_0)^2 + \left(\frac{PPK}{2}\right)^2}}$$

$$K_i y = \frac{d\beta_i}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * (v_0) + R_{\beta i} * \cos(a) * \frac{PPK}{2} * \frac{1}{\sqrt{(v_0)^2 + \left(\frac{PPK}{2}\right)^2}}$$

$$K_i z = \left(\left(-\cos(PočNat) * \frac{PPK}{2}\right) + \frac{D}{2}\right) + R_{\beta i} * \sin(a)$$

$$a \in \langle 0, 2\pi \rangle$$

(37)



Obrázek 40 Soustava kružnic K_i definující aktuální průměr $R_{\beta i}$ brusného kotouče

Vypočítáním minima funkce, což jsou jinak řečeno místa na křivce, kde je zaručen dotyk aktuální kružnice brusného kotouče a křivky řezu, jsou mimo jiné získány tzv. body záběru. Tyto body de facto určují plochu, ve které dochází k zanoření (dotyku) řezné části brusného nástroje do plochy čel zubů.

4.2 Parametrické vyjádření bodů výchozího povrchu brusného kotouče

Pro vypovídající hodnotu bodů navrženého tvaru brusného kotouče jsou souřadnice těchto bodů vypočítány v rovině procházející středem brusného kotouče, kdy osa jeho středu O (rovnice (21), str. 40) v této rovině leží. Pro tento výpočet tak lze použít již definovanou rovinu kolmou na stoupání řídicí šroubovice (rovina α ; rovnice (16), str. 38), jelikož od této roviny se odvíjí celá soustava řezných rovin β_i (rovnice (28), str. 43).

Jednotlivé body jsou získány tak, že jsou vypočteny průniky jednotlivých kružnic brusného kotouče a roviny kolmé na stoupání řídicí šroubovice. Body průniků jednotlivých kružnic a roviny kolmé na stoupání řídicí šroubovice se získají dosazením jednotlivých souřadnic kružnic K_ix , K_iy , K_iz (rovnice (37), str. 46) do obecného popisu roviny α (rovnice (16), str. 38) a vyjádřením zvoleného parametru W_{β_i} ; tento parametr je následně dosazen za odpovídající proměnnou do rovnic jednotlivých kružnic, což po dosazení odpovídá parametrickému popisu souřadnic bodů nového tvaru.

Dosazení souřadnic rovnice (37) do rovnice (16):

$$v_0 * \frac{d\beta_i}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * \left(-\frac{PPK}{2}\right) + R_{\beta_i} * \cos(a) * v_0 * \frac{1}{\sqrt{(v_0)^2 + \left(\frac{PPK}{2}\right)^2}} + \frac{PPK}{2} * \frac{d\beta_i}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * (v_0) + R_{\beta_i} * \cos(a) * \frac{PPK}{2} * \frac{1}{\sqrt{(v_0)^2 + \left(\frac{PPK}{2}\right)^2}} = 0 \quad (38)$$

Zvolení parametru W_{β_i}

$$W_{\beta_i} = \frac{1}{\sqrt{(v_0)^2 + \left(\frac{PPK}{2}\right)^2}} \quad (39)$$

Parametr W_{β_i} po dosazení:

$$W_{\beta_i} = \frac{-v_0 * \frac{d\beta_i}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * \left(-\frac{PPK}{2}\right) - \frac{PPK}{2} * \frac{d\beta_i}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * (v_0)}{R_{\beta_i} * \cos(a) * v_0^2 + \left(\frac{PPK}{2}\right)^2 * R_{\beta_i} * \cos(a)} \quad (40)$$

Parametrické vyjádření bodů navrženého tvaru brusného kotouče (dosazení rovnice (40) do rovnice (37)):

$$A_x = \frac{d\beta_i}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * \left(-\frac{PPK}{2}\right) + R_{\beta i} * \cos(a) * v_0 * W_{\beta i}$$

$$A_y = \frac{d\beta_i}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * (v_0) + R_{\beta i} * \cos(a) * \frac{PPK}{2} * W_{\beta i}$$

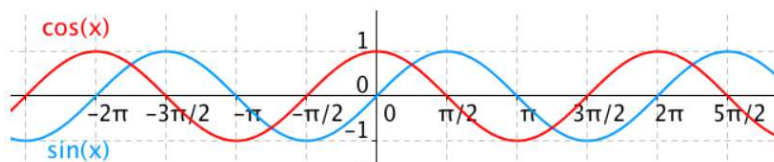
$$A_z = -\cos(PočNat) * \frac{PPK}{2} + \frac{D}{2} + R_{\beta i} * \sin(a) \quad (41)$$

Výpočtem průniků kružnic diskretizovaného brusného kotouče (rovnice (37), str. 46) a roviny kolmé na stoupání řídicí šroubovice (rovnice (16), str. 38) nabývají jednotlivé složky rovnice (41) dvou hodnot, respektive tento výsledek je ovlivněn hodnotami, které nabývá proměnná a pro funkci \sin a \cos . Tato proměnná nabývá v tomto případě dvou různých hodnot pro obě funkce. Jedná se tedy o celkové hodnoty obou funkcí, pro první případ je to hodnota 1 a pro druhý případ je to hodnota -1 . Vzhledem k potřebám řešení je potřeba nalézt hodnoty parametru a takové, aby celková hodnota pro obě funkce odpovídala hodnotě -1 .

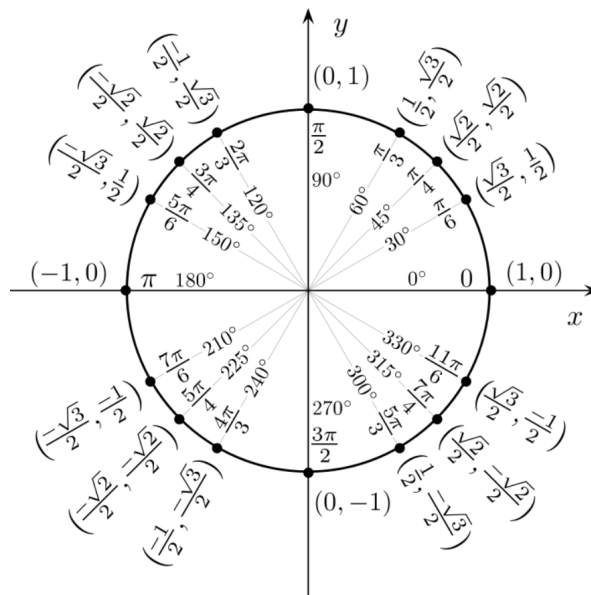
Hodnoty parametru a pro dosazení do rovnic pro funkci \cos a \sin , aby celková hodnota obou funkcí odpovídala hodnotě -1 , lze zjistit z grafu průběhu těchto dvou funkcí (viz Obrázek 41) a jednotkové kružnice (viz Obrázek 42):

$$\cos(a) = \cos(\pi) \quad (42)$$

$$\sin(a) = \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \quad (43)$$



Obrázek 41 Průběh funkce sinus a cosinus [21]



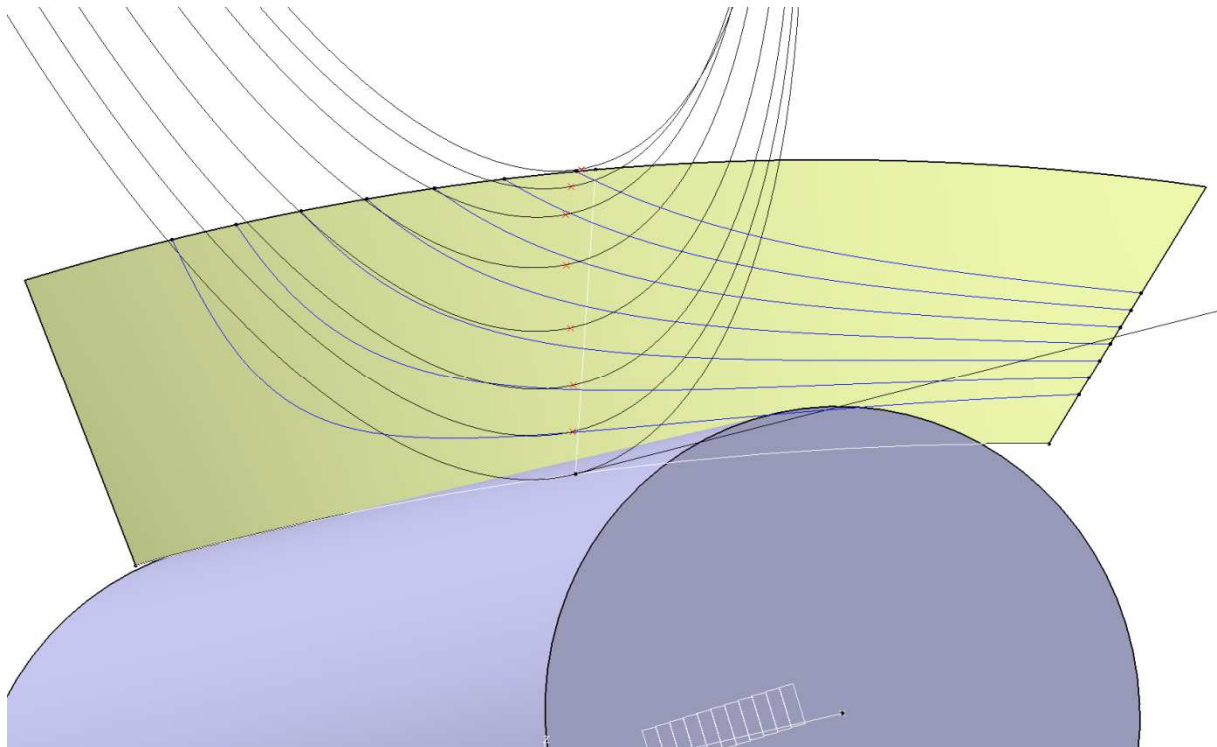
Obrázek 42 Jednotková kružnice [22]

Parametrické vyjádření bodů navrženého tvaru výchozího povrchu brusného kotouče pro ostření šnekových odvalovacích fréz po dosazení odpovídajících parametrů a (dosazení rovnic (42) a (43) do rovnice (41), str. 48); viz Obrázek 43, značeno červenou barvou:

$$A_x = \frac{d\beta_i}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * \left(-\frac{PPK}{2}\right) + R_{\beta i} * \cos(\pi) * v_0 * W_{\beta i}$$

$$A_y = \frac{d\beta_i}{-\left(\frac{PPK}{2}\right)^2 - (v_0)^2} * (v_0) + R_{\beta i} * \cos(\pi) * \frac{PPK}{2} * W_{\beta i}$$

$$A_z = -\cos(\text{PočNat}) * \frac{PPK}{2} + \frac{D}{2} + R_{\beta i} * \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \quad (44)$$



Obrázek 43 Vypočítané body výchozího povrchu brusného kotouče

Z výpočtu souřadnic odpovídajícího tvaru brusného kotouče je patrné, že nesou informace o vstupních proměnných, které ovlivňují dané řešení. Prakticky se jedná o geometrické informace šnekové odvalovací frézy, výchozího tvaru brusného kotouče a vzdálenosti jednotlivých bodů neboli zvolená hodnota diskretizace brusného kotouče. Byla tak potvrzena prognóza předpokladu parametrů ovlivňující tvar brusného nástroje. Tyto parametry jsou na sobě navzájem závislé a změna jejich hodnoty má vliv na změnu průběhu tvaru.

Parametry ovlivňující odpovídající tvar brusného kotouče vzhledem ke vstupním parametrům:

- Průměr patní kružnice šnekové odvalovací frézy (PPK)
- Průměr hlavové kružnice šnekové odvalovací frézy (PHK)
- Stoupání řídicí šroubovice (v)
- Velký průměr brusného kotouče (D)

Parametry ovlivňující přesnost výpočtu odpovídajícího tvaru brusného kotouče:

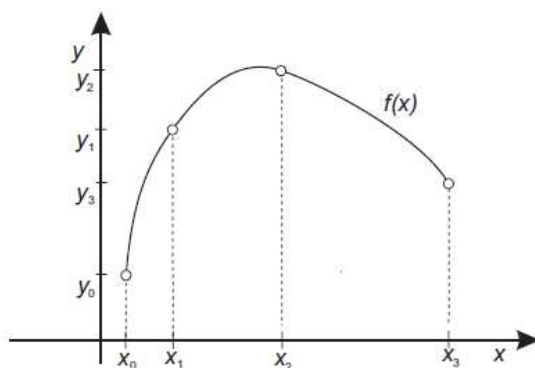
- Hodnota diskretizace brusného kotouče (δ, i)

Pokud chceme získat samotnou křivku popisující průběh tohoto tvaru, která je určena výše vypočítanými body, lze použít určité interpolační nástroje. Tyto nástroje pak pracují numericky, tzn., že dané řešení je počítáno pro konkrétní hodnoty vyšetřených bodů.

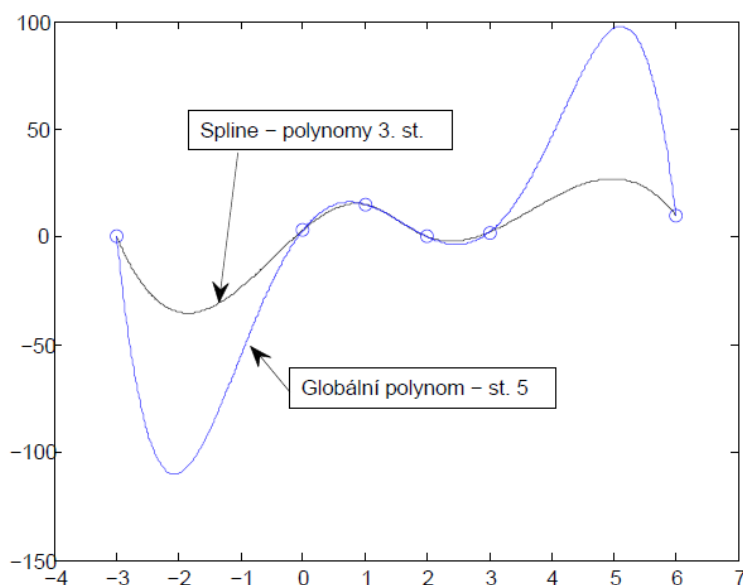
4.3 Interpolace křivek

Interpolací rozumíme funkci nebo křivku, která prochází zadanými body. V technických aplikacích se interpolace použije např. při doplňování tabulky o chybějící hodnoty nebo při určení popisu funkce nebo křivky, pro kterou známe jen konečný počet bodů, a chceme s ní dále pracovat analytickými nástroji. [19]

V numerické matematice se používá interpolace funkcí zejména k náhradě funkce polynomem. Na tomto principu pracují algoritmy pro výpočet určitého integrálu apod. V počítačové grafice interpolace slouží k definování křivky, pro kterou známe několik bodů (nazýváme je opěrnými body nebo uzly interpolace). Interpolační křivka těmito body vždy prochází. [19]

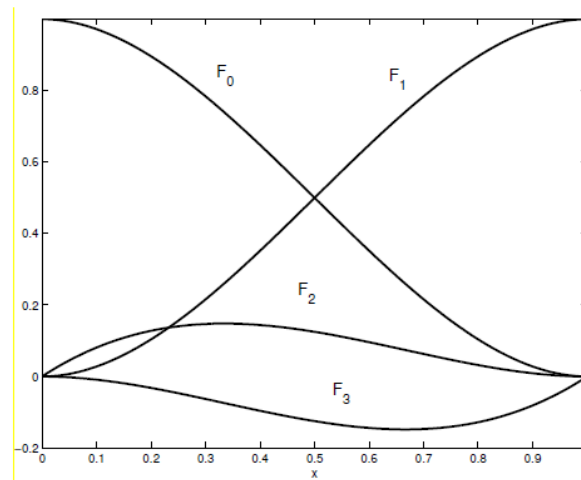


Obrázek 44 Interpolace křivek [19]



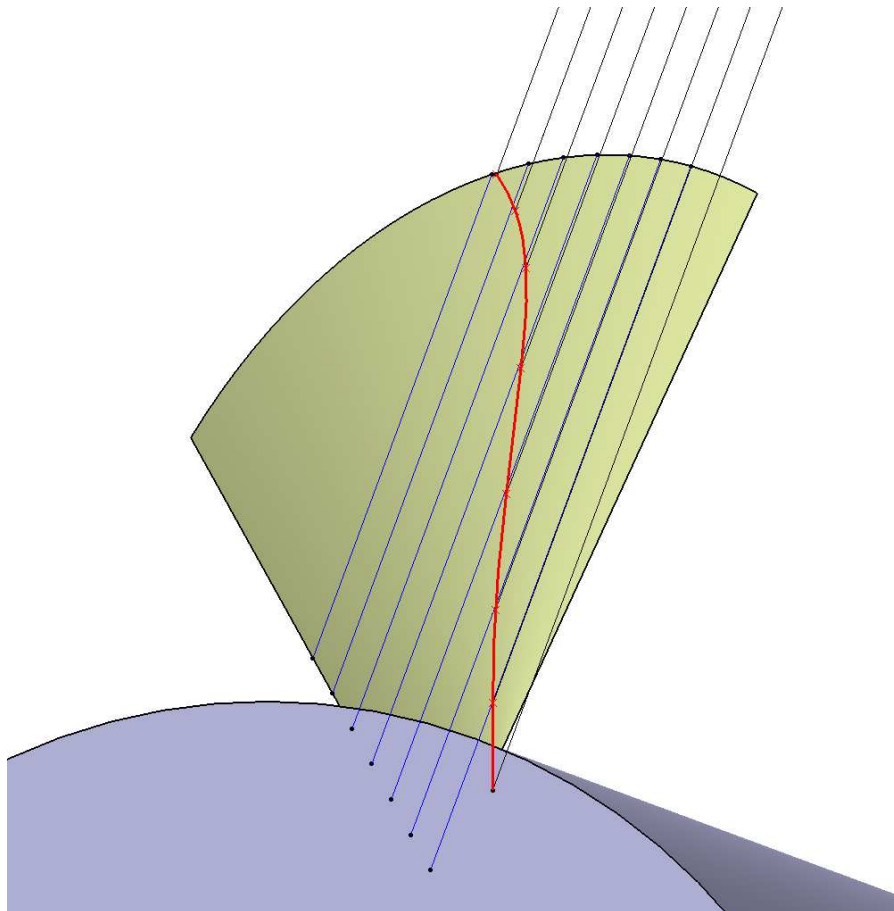
Obrázek 45 Interpolace křivek pomocí polynomů [19]

Interpolační křivka se tedy vytváří z jednotlivých oblouků křivky. Základem pro výpočet interpolační křivky po obloucích je tzv. Fergusonova kubika. [19]



Obrázek 46 Fergusonova kubika [19]

Spline křivky patří k často užívaným interpolačním křivkám v technické praxi. Zásadní význam mají kubické spline křivky, které jsou implementovány téměř v každém modelovacím grafickém systému. [19]



Obrázek 47 Propojení vypočítaných bodů výchozího povrchu brusného nástroje kubickou spline křivkou

Pozn.: Pro bližší studium teorie tvorby interpolačních křivek lze použít zdroj [19], který byl použit k čerpání uvedené teorie v této podkapitole.

Pro určité zhmotnění navržené matematické metody a reprezentaci geometrie takto navrženého modelu řešení pro zvoleného typového představitele je vhodné využití některého automatizačního nástroje implementovaného do 3D CAD systému. Tento krok dále rozšíří možnosti definování výsledného tvaru výchozího povrchu nástroje jako propojení vypočítaných bodů pomocí interpolačního nástroje, který bude načítat konkrétní vypočtené hodnoty jednotlivých bodů navrženého tvaru a umožní vypočítání jednotlivých koeficientů interpolační křivky pro konkrétní zadání. Navržením výpočtového modulu se tak analytické řešení rozšíří o grafické zobrazení výstupu pro aktuální hodnoty šnekové odvalovací frézy zadané uživatelem. Výstupem by tak měla být kontinuální křivka tvaru brusného kotouče procházející body dle výpočtu podle rovnice (44), str. 49, viz Obrázek 47, která může být dále využita pro orovnění reálného brusného nástroje podle jejího průběhu.

5 Návrh výpočtového modulu pro určení výchozího povrchu brusného nástroje pro broušení šnekových odvalovacích fréz

V současné době se nejen v technické praxi, ale i na univerzitním prostředí využívají různé 3D CAD systémy, které lze dělit do tří úrovní podle jejich možnosti využití a rozšíření o další moduly. Prozatím jsou zavedeny tři úrovně rozpoznávání těchto CADů a to:

- Nízké
- Střední
- Vysoké

V nejnižší třídě lze vytvářet neparametrické 2D modely a možnosti těchto systémů jsou značně omezené. Zejména se také mimo jiné jedná o určité tzv. „open source“ softwary, které nabízejí jednoduché možnosti využití modelování ekvivalentní základním funkcím jejich vyšších příbuzných.

Ve střední třídě těchto softwarů lze nalézt takové, které umožňují vytváření parametrických 2D a 3D modelů a je možno je rozšířit o základní moduly, např. o moduly obrábění, které nabízejí možnosti parametrické tvorby NC kódu. Tyto moduly však nenabízejí možnosti operací pro více-osé souvislé frézování nebo jejich možnosti nastavení jsou velmi omezené a lze je aplikovat pouze pro určité typy tvarových ploch. Je jasné, že jejich výpočetní pozadí není na takové úrovni, aby tyto možnosti nabízelo a spolehlivě provádělo výpočty k získání uživatelem požadovaného výsledku. V některých případech se samozřejmě dá nalézt určitý kompromis řešení, ale čas věnovaný k nastavení a „přesvědčení“ systému je mnohem vyšší, než by byl při použití nejvyšších tříd systémů, které lze na trhu nalézt.

V nejvyšší třídě tak lze nalézt velmi propracované 3D CAD systémy, které nabízejí rozšíření o různé výpočetní a simulační moduly pro různá odvětví praxe a mimo jiné disponují funkcemi pro 3D parametrické modelování. Tyto systémy mimo jiné nabízejí možnosti ukládání a načítání 3D modelů v několika univerzálních formátech podle použití. Tyto softwary jsou však díky svým vlastnostem a silnému výpočetnímu pozadí velmi drahé, ale při jejich použití pro složité výpočetní, simulační, CAM, atd. možnosti nabízejí komplexní podporu při životním cyklu produktu od jeho návrhu až po realizaci. Některé tyto CADY dominují např. v oblasti ploch, 3D modelování, výpočtů či NC obrábění.

Pro účely navrhovaného řešení je tak potřeba vybírat software z nejvyšší třídy 3D CAD systémů. V tomto případě je využito možností systému Catia V5. Tato volba je zohledněna k tomu, že v tomto systému byl graficky navržen tvar výchozího povrchu nástroje jako součást diplomové práce [8] a také vzhledem k tomu, že:

- plocha čel zubů šnekové odvalovací frézy je poměrně složitá
- je potřeba využití složitějších funkcí modelování a podpory automatizačních nástrojů, které umožňují „komunikovat“ se systémem pomocí syntaxe některého z programovacích jazyků a umožnit implementaci navrženého matematického modelu do řešení
- je uvažována případná implementace do praxe, kde je v současné době využíváno této třídy CAD systémů, zejména v oblasti návrhů složitějších nástrojů

5.1 Analýza automatizačních nástrojů Catia V5



Obrázek 48 Automatizační nástroje Catia V5 [14]

Automatizační nástroje dostupné v tomto CADu lze rozdělit do několika úrovní, jak je patrné na Obrázku 48. Jednotlivé úrovně se liší podle komplexnosti vyvinutí aplikace a nároků na vývojáře.

Základní nástroje umožňují racionalizovat práci se systémem pomocí definice uživatelských parametrů, parametrizačních tabulek a sdílených součástí. Vyšší modul knowledgeware, který se skládá z několika submodulů, umožňuje využívat pokročilejší funkce tohoto systému [23]. Jedná se např. o možnosti:

- Implementovat znalostní prvky do návrhu součástí
- Zjišťovat charakteristiky součástí a dále ji optimalizovat
- Vytvářet prostředí, která vedou méně zkušeného konstruktéra při práci
- Vytvářet schematické definice výrobku [14]

5.1.1 VB a VBA

Tyto nástroje jsou v odborných zdrojích uváděny společně jako druhý největší prostředek pro automatizaci. Oba nástroje pracují na základě programovacího jazyka Visual Basic [24]. Úroveň konečného výsledku a uživatelská náročnost použití se v obou případech liší. Hlavní výhody VBA editoru oproti VB [32] editoru jsou:

- Využití možnosti objektového programování, tzn. uživatelsky jednodušší způsob vytváření a modifikace vytvářené aplikace
- Možnost vytváření komplexnější aplikace zkompileváním několika jednodušších aplikací dohromady, což má za výhodu další možnosti pro snazší odlazení programu a možnost dalšího využití jednotlivých aplikací v jiných projektech; to s sebou nese opakovanou využitelnost a efektivnější tvorbu nových aplikací
- Editor poskytující:
 - Vlastní debugger pro odstranění syntaktických chyb (rychlejší tvorba funkčního programu)
 - Funkce našeptávání příkazů (rychlejší získání informací)
 - Přímé napojení do nápovědy systému CATIA (rychlejší získání informací) [14]

5.1.2 CAA

Modul CAA je nejvyšším možným nástrojem pro tvorbu aplikací v prostředí CATIA V5. Pro jejich tvorbu lze použít dva programovací jazyky:

- C++
- JAVA

Tento modul umožňuje vytvářet aplikace, které:

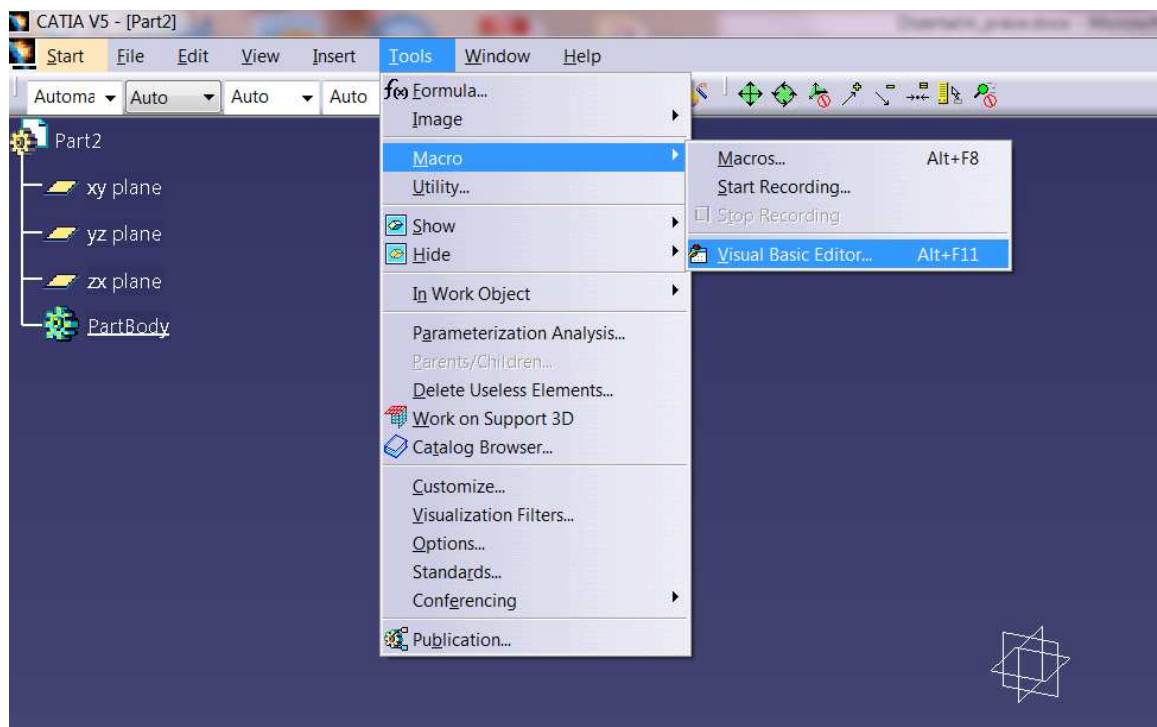
- Využívají vyšších rychlostí zpracování instrukcí oproti projektům vytvářeným s pomocí VBA
- Využívají přístupu k základnímu rozhraní systému CATIA V5 a umožňují tak vytvářet nové součásti systému od funkcí až po vlastní prostředí

Pro snazší vytváření kódu dané aplikace lze použít tzv. RADE prostředí. Toto prostředí slouží uživateli k rychlejšímu vytvoření aplikace, jelikož kromě standardních nástrojů jako např. debuggeru obsahuje další pokročilé nástroje pro zpracování zdrojového kódu. V případě použití jazyka C++ jsou navíc k dispozici další rozšiřující moduly obsahující např. průvodce pro vytváření aplikací, čímž je možné dále zefektivnit proces jejich návrhu. Nicméně síla tohoto nástroje se projevuje v náročnosti na znalosti uživatele, který aplikaci vytváří z oblasti programovacích jazyků a dalších technických disciplín [26].

Vzhledem k tomu, že pro současné řešení jsou nároky na tvorbu aplikace nižší, než co nabízí možnosti CAA modulu v podobě zásahů do součástí systému a vytváření vlastního prostředí, je využito modulu VBA a programovacího jazyka Visual Basic jakožto nástroje pro reprezentaci navrhovaného matematického modelu a jakousi automatizaci návrhu výchozího povrchu brusného nástroje pro šnekové odvalovací frézy. Modul VBA tak nabízí dostačující nástroje a možnosti pro tvorbu makra implementovaného do zvoleného systému a možnosti parametrického vykreslení geometrie výpočtu. [14]

5.2 Definice jazyků automatizačního nástroje VBA

V prostředí Catia V5 je k dispozici možnost vytvoření automatizačního nástroje pomocí využití tvorby maker použitím implementovaného Visual Basic editoru (viz Obrázek 49). Tento editor umožňuje komunikovat s prostředím pomocí syntaxe jazyka Visual Basic a možností objektového programování. S tímto nástrojem lze automatizovat konstrukci a vytvářet tak složitější parametrické modely, ať už v prostředí pro návrh dílu, sestavy nebo v prostředí plošného modeláře. K dispozici je možnost tvorby maker využitím možností CATScript nebo CATVBS, což je rozšíření základního skriptu „Microsoft Visual Basic Script“ (MS VBScript). Jsou nezávislé na platformě a je možné je spouštět pod Windows a UNIX [25].



Obrázek 49 Spuštění automatizačního nástroje VBA

5.2.1 Definice CATScript a CATVBS

CATScript a CATVBS jsou oba programovací jazyky VBScript. Oba makro jazyky pracují s objekty a metodami. Objekt je správce, který ukládá informace. Tyto informace mohou být objemovým tělesem, ale i přímkou nebo plochou. Metoda je příkaz, který lze použít k vytvoření a úpravě objektu nebo ke čtení informací.

- CATVBS - je Microsoft VBScript, který je určen pro objekty a metody Catia v5
- CATScript - je variace MS VBScript

Další možnosti programování poskytuje aplikace CATIA Visual Basic Application (CATVBA). CATVBA má vlastní kompilátor a poskytuje mnoho nástrojů pro navrhování uživatelského rozhraní. Tyto vlastnosti ji odlišují od CATVBS a CATScript.

Tabulka 4 Definice programovacích jazyků Catia V5 [25]

Jazyk	Formát dat	Popis	Rozsah použití
CATScript	*.CATScript	Redukovaný interpretátor VBScript	Tvorba maker, Catia Knowledgeware
CATVBS	*.catvbs	Kompletní interpretátor VBScript	Tvorba maker, Catia Knowledgeware
CATVBA	*.catvba	Visual Basic Application kompilátor	Tvorba aplikací podporovaných v menu

Syntaxe programu CATSript, CATVBS a CATVBA je velmi podobná. Drobnými úpravami mohou být komponenty programu velmi snadno přenášeny z jedné platformy do druhé, pokud jsou použité metody k dispozici jiným objektům v jiné platformě. Ve většině případů se tyto tři jazyky liší pouze způsobem, ve kterém jsou odvozeny proměnné, funkce a postupy. Pro potřeby vytvoření makra pro automatizaci výpočtu tvaru výchozího povrchu brusného nástroje je využito syntaxe programu CATVBA, právě pro možnost tvorby aplikací podporovaných v menu [25].

5.3 Automatizace návrhu výpočtu tvaru výchozího povrchu brusného nástroje pro ostření šnekových odvalovacích fréz

Zadání vstupních parametrů

Pozn.: Vstupní parametry zadávejte v mm!

Průměr patní kružnice [mm]

Průměr hlavové kružnice [mm]

Stoupání řídicí šroubovice [mm]

Šířka ozubení [mm]

Přesnost diskretizace [mm]

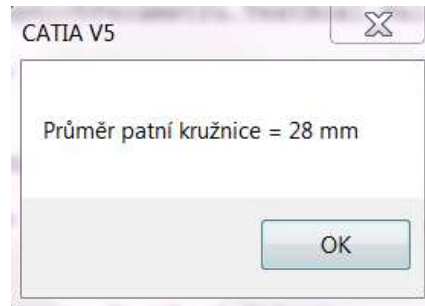
Potvrdit

Obrázek 50 Zadání vstupních parametrů

Makro je navrženo jako samostatně pracující podprogram implementovaný do prostředí Catia V5 bez nutnosti zásahů uživatele. Je vytvořeno na základě matematického modelu, který popisuje výpočet jednotlivých bodů tvaru výchozího povrchu nástroje v podkapitole 3.1. Toto makro, jakožto i matematický model, vychází z geometrických údajů konkrétní šnekové frézy, pro kterou uživatel požaduje vypočítat odpovídající tvar brusného kotouče pro ostření. Tyto údaje zadává uživatel pomocí okna „Zadání vstupních parametrů“:

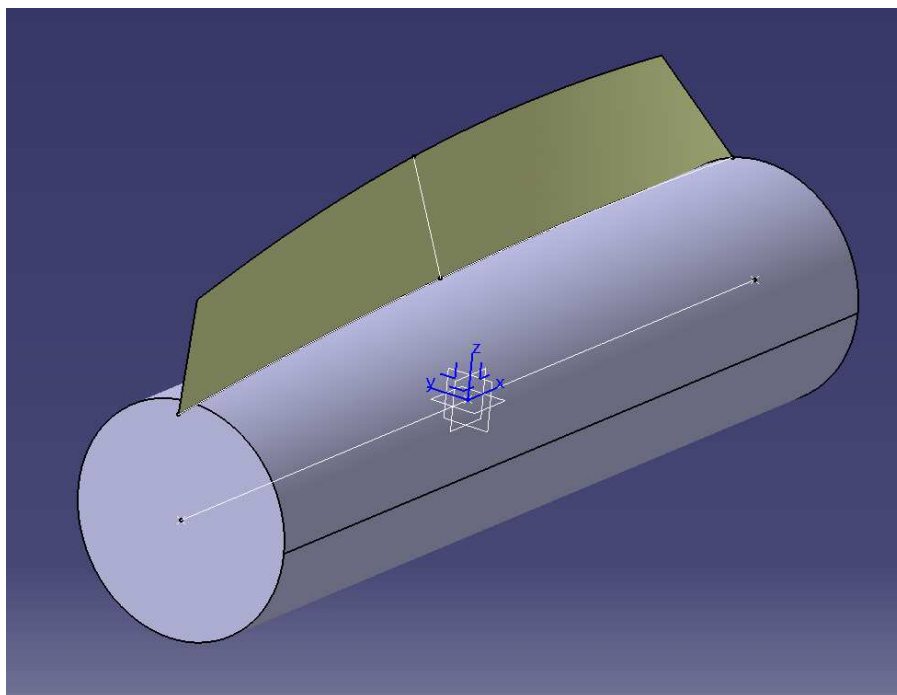
- Průměr patní kružnice
- Průměr hlavové kružnice
- Stoupání řídicí šroubovice
- Šířka ozubení

Po potvrzení uživatelem zadaných parametrů následují okna s potvrzením těchto hodnot (viz příklad Obrázek 51) a následuje automatická konstrukce parametrického modelu interpretace geometrie „šneková odvalovací fréza – navržený tvar brusného kotouče“.



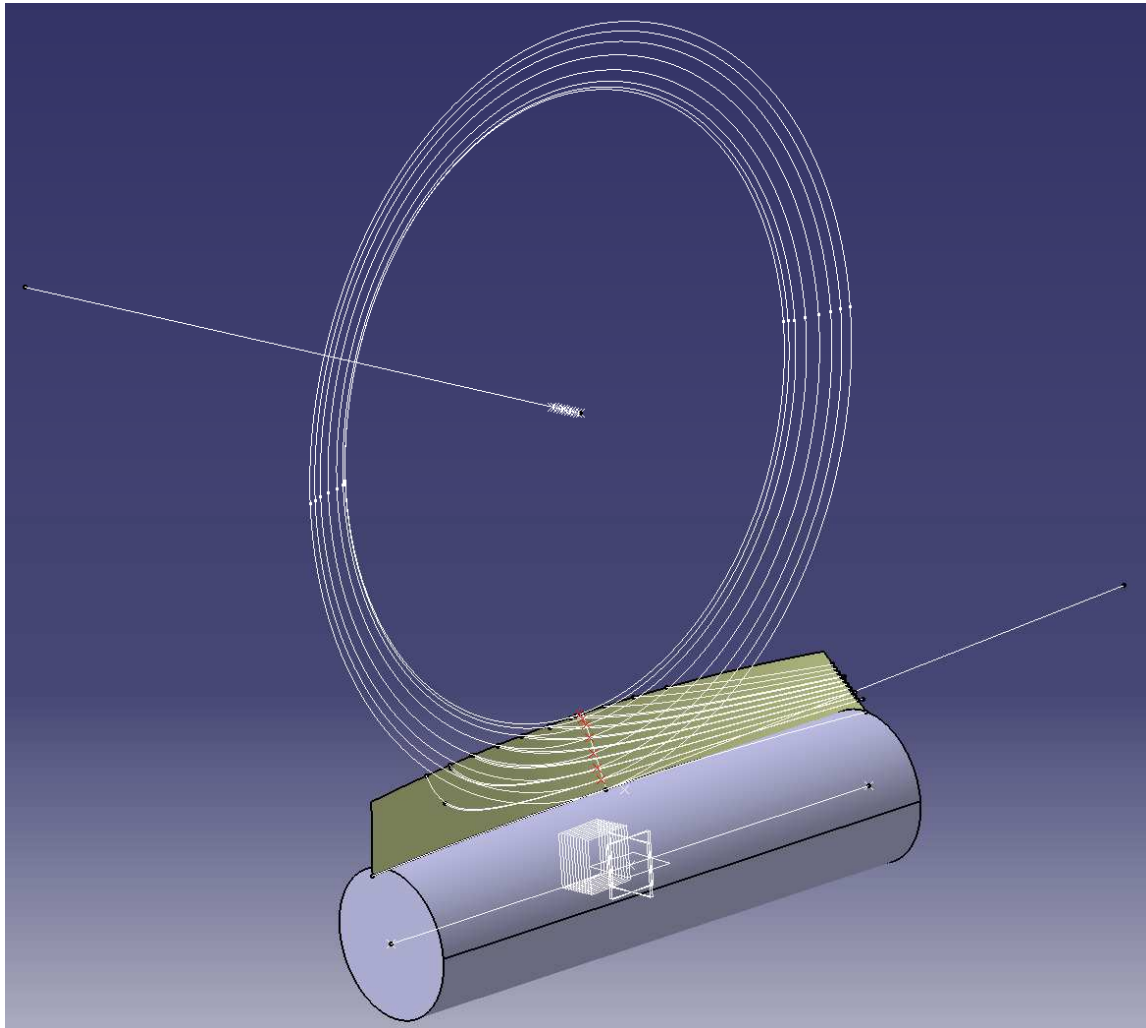
Obrázek 51 Potvrzení hodnot zadaných uživatelem

Je tak vytvořena zjednodušená interpretace šnekové odvalovací frézy jako objemové válcové těleso, které definuje tělo nástroje a šroubová plocha, která definuje plochu čel jednotlivých zubů jako souvislou šroubovou plochou. Jak již bylo zmíněno v úvodu, pro účely tohoto řešení není potřeba vykreslovat jednotlivé boky zubů a jejich tvar, jelikož se jedná o řešení zaměřené na broušení plochy čel zubů (viz Obrázek 52).

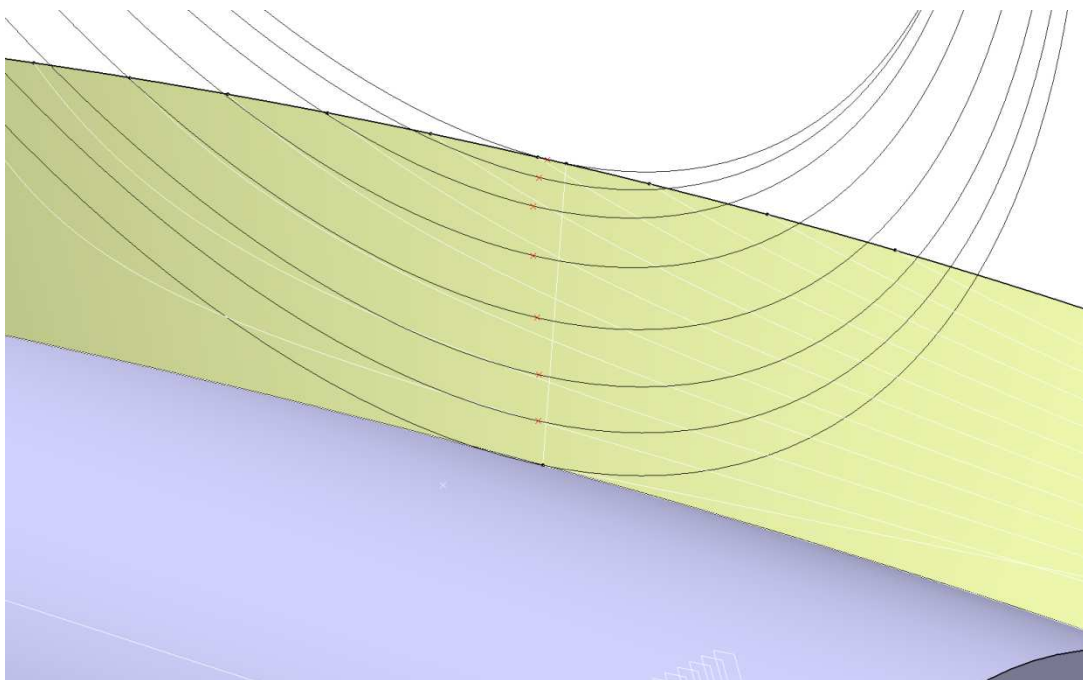


Obrázek 52 Zjednodušená interpretace šnekové odvalovací frézy

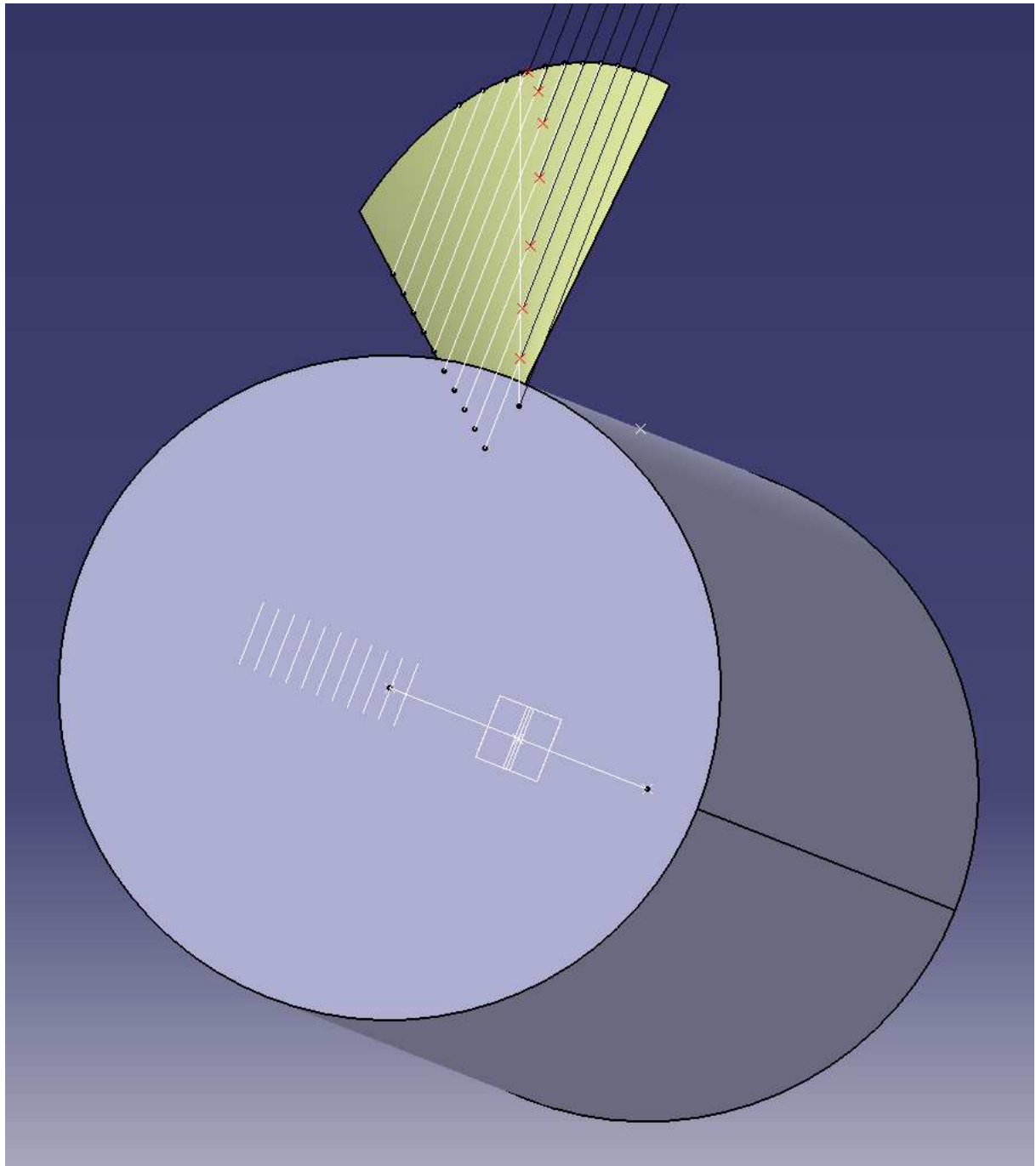
Celá konstrukce tak zobrazuje geometrický model řešení jako graficko-početní metodu návrhu výchozího povrchu brusného nástroje (viz Obrázek 53, 54 a 55; pozn.: body navrženého tvaru brusného kotouče jsou vyznačeny červeně). Struktura výpočtového modulu viz Obrázek 56.



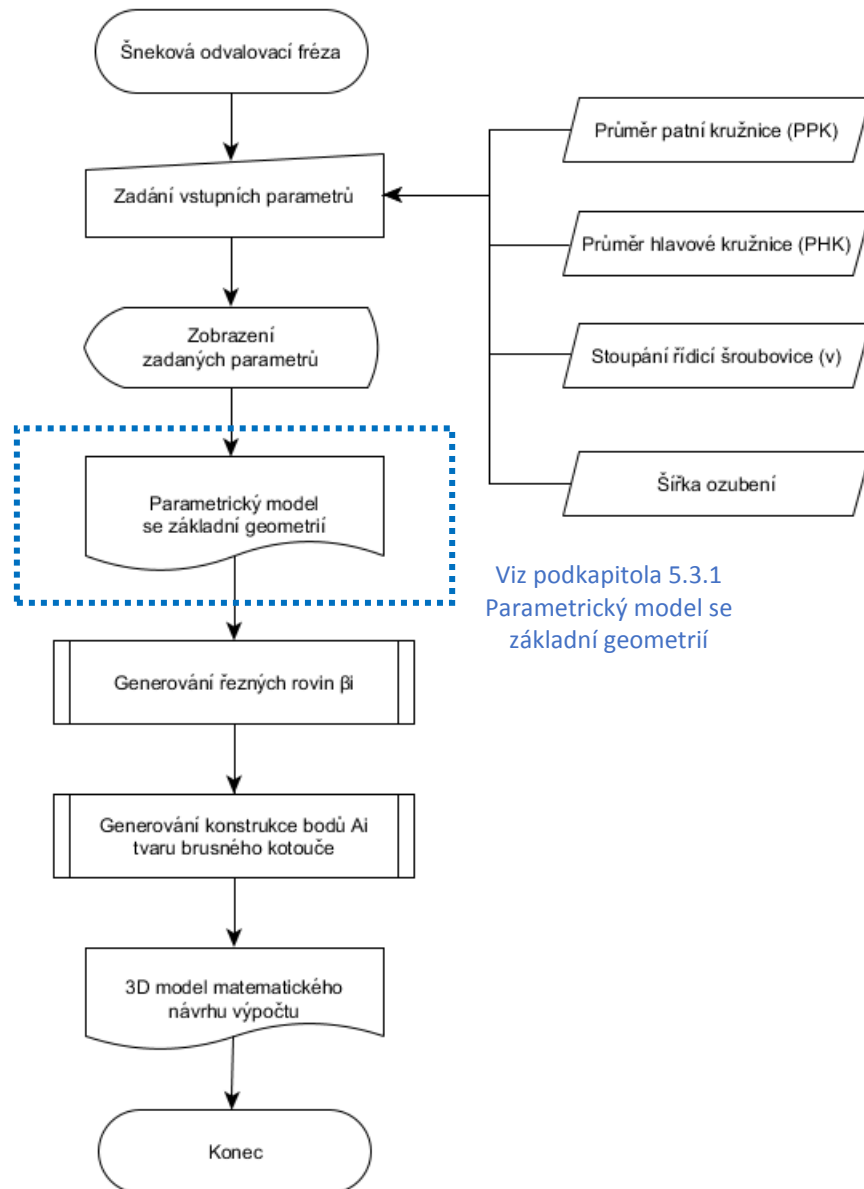
Obrázek 53 Graficko-početní metoda návrhu výchozího povrchu brusného nástroje pro ostření šnekových odvalovacích fréz



Obrázek 54 Graficko-početní metoda návrhu – detail vyšetřených bodů výchozího povrchu brusného nástroje

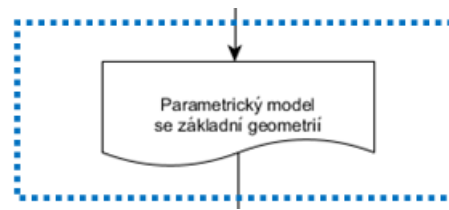


Obrázek 55 Graficko-početní metoda – pohled do roviny kolmé na stoupání řídicí šroubovice (rovina α)



Obrázek 56 Vývojový diagram výpočtového modulu

5.3.1 Parametrický model se základní geometrií



Obrázek 57 Parametrický model se základní geometrií

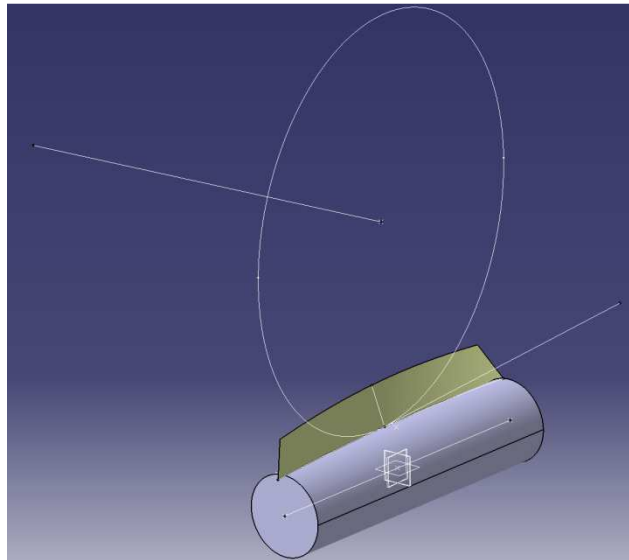
Na základě vstupních hodnot zadaných uživatelem je vytvořen 3D parametrický model se základní geometrií, tzn. geometrií šnekové odvalovací frézy (viz Obrázek 58, str. 64):

- Tělo odvalovací frézy jako válcová plocha
- Počáteční bod řídicí šroubovice, bod B (dle rovnice (4), str. 34)
- Řídicí šroubovice (dle rovnice (3), str. 33)
- Profil zubu jako přímka BC (dle rovnice (6), str. 34)
- Šroubová plocha¹, která demonstruje plochu čel zubů (dle rovnice (8), str. 35)

¹ Šroubová plocha je vzhledem k možnostem vytvořena v modulu příkazem „Sweep“, tedy tažením profilu zubu BC (viz rovnice (6)) po křivce dle řídicí šroubovice (rovnice (3)) a šroubová plocha tak odpovídá rovnici (8)

Vytvářené geometrie v rámci parametrického modelu se základní geometrií, od které se odvíjí následná konstrukce navrženého řešení dle podprogramů (viz vývojový diagram na obrázku 56, str. 62):

- Počátek souřadnicového systému
- Rovina kolmá na stoupání řídicí šroubovice, rovina α (dle rovnice (16), str. 38)
- Rovina kolmá na rovinu α , rovina β_0 (dle rovnice (17), str. 38)
- Tečna k řídicí šroubovici s počátkem v bodě B , tečna t_B (dle rovnice (14), str. 37)
- Střed brusného kotouče S_{11} (dle rovnice (19), str. 39)
- Osa brusného kotouče O (dle rovnice (21), str. 40)
- Kružnice demonstrující velký průměr brusného kotouče jako kružnice K_{11} (dle rovnice (24), str. 40)



Obrázek 58 Parametrický model se základní geometrií

Geometrie, která je tvořena přímkami či křivkami je vytvářena pomocí cyklů, kde jsou generovány jednotlivé body dané přímkou/křivkou v zadané přesnosti dle odpovídající rovnice a jsou vzájemně propojeny spline funkcí. Struktura těchto cyklů je stejná, mění se pouze deklarované proměnné, se kterými cyklus pracuje a struktura rovnic, podle kterých jsou příslušné body přímkou/křivkou generovány, proto bude uveden pouze jeden cyklus jako příklad, a to pro generování řídicí šroubovice dle rovnice (3), str. 33.

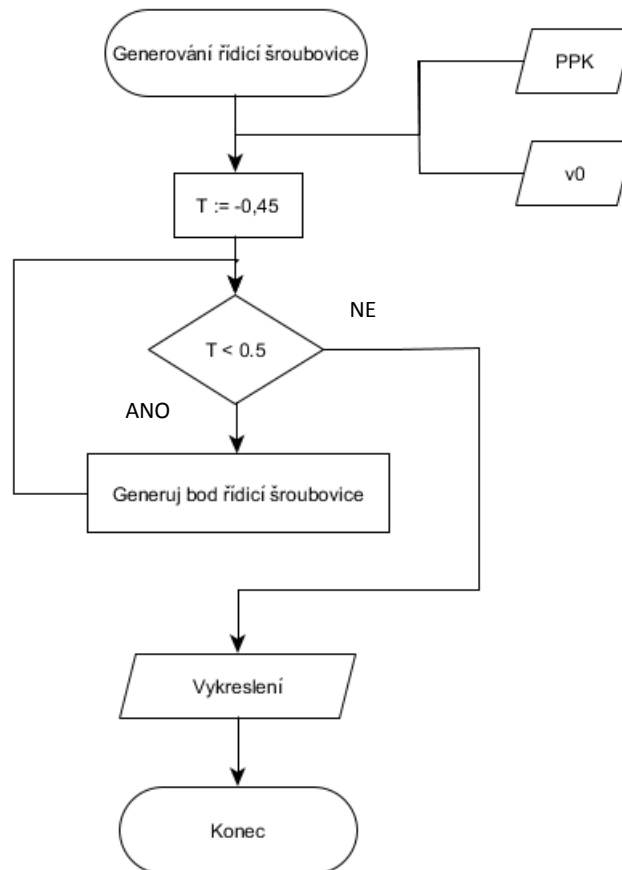
Pozn.: Celé makro je k dispozici v příloze disertační práce na CD-Romu

5.3.1.1 Generování řídicí šroubovice

Cyklus pro generování řídicí šroubovice načítá vstupní proměnné, které ovlivňují souřadnice generovaných bodů a na základě zadaných rovnic (viz rovnice (3), str. 33) generuje jednotlivé body křivky v přesnosti 0.01 mm odstupe jednotlivých bodů v zadaném intervalu. Při dosažení podmínky $T < 0.5$ dojde k vykreslení dané křivky a ukončení cyklu (ukázka cyklu ze skriptu viz Obrázek 59 a 60, str. 65).

Vstupní proměnné:

- Průměr patní kružnice PPK
- Redukovaná výška závitu v_0 (viz rovnice (1), str. 33)



Obrázek 59 Vývojový diagram generování řídicí šroubovice

```

Dim x As Double, y As Double, z As Double, T As Double
Dim Pi

    Pi = 3.14

    Dim v0 As Double
    v0 = StoupaniRidiciSroubovice / (2 * Pi)

    Dim tt As Double
    tt = 0.374

    T = -0.45

    While T < 0.5

        x = v0 * T
        y = (PrumerPatniKruznice / 2) * Sin(T + tt)
        z = (PrumerPatniKruznice / 2) * Cos(T + tt)

        Dim BodSroubovice As HybridShapePointCoord
        Set BodSroubovice = PanelNastroju.AddNewPointCoord(x, y, z)

        RidiciSpline.AddPoint BodSroubovice

        T = T + 0.01
    Wend

HBody_Ridici_sroubovice.AppendHybridShape RidiciSpline
    
```

Obrázek 60 Cyklus generování řídicí šroubovice

5.3.2 Podprogramy

Pro lepší přehled a funkčnost výpočtového modulu jsou některé výpočty prováděny pomocí procedur a funkcí, kdy vypočítaná hodnota je vracena zpět do hlavního programu, se kterou je dále. Podprogramy postupně pracují s aktuálním parametrickým modelem a jeho aktuální dokončenou geometrií, která je vždy do podprogramu načtena včetně vstupních proměnných, které ovlivňují řešení. Po dokončení podprogramu je geometrie parametrického modelu zaktualizována o dokončené příkazy a tato geometrie je následně předávána dále do dalšího podprogramu, který následně navazuje. Generování konstrukce jednotlivých bodů A_i brusného kotouče zahrnuje několik činností generování konstrukčních prvků v jednom cyklu, jelikož tato geometrie na sebe přímo navazuje a ovlivňuje tak výslednou pozici bodů tvaru brusného kotouče.

5.3.2.1 Generování řezných rovin

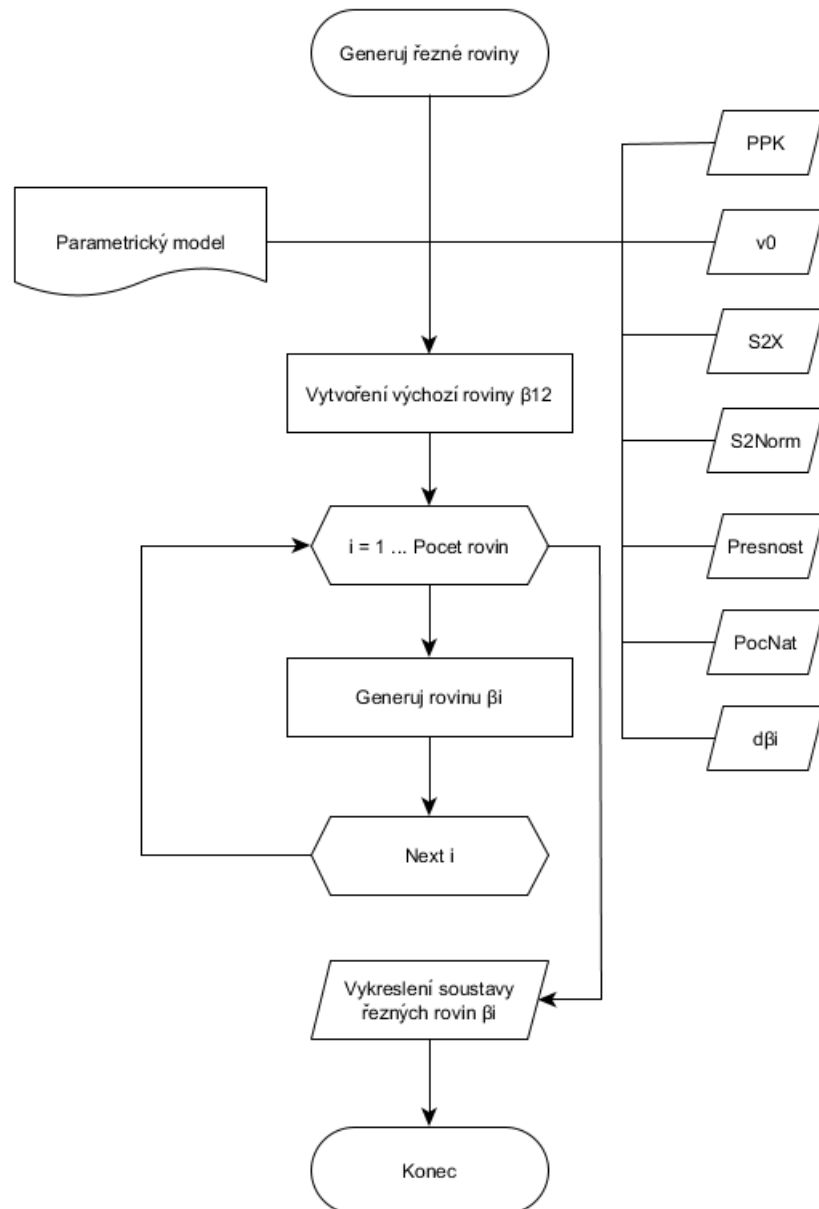
Podprogram načítá údaje o parametrickém modelu a dále načítá proměnné, na jejichž základě je vytvořena výchozí rovina β_{12} dle rovnice (28), str. 43, pro příslušnou konstantu $d_{\beta_{12}}$ dle rovnice (27), str. 43. Cyklus následně generuje soustavu řezných rovin β_i (viz rovnice (28), str. 43) dle hodnoty diskretizace brusného kotouče δ a zadaného počtu i .

Vstupní údaje:

- Parametrický model

Vstupní proměnné:

- Průměr patní kružnice PPK
- Redukovaná výška závitu v_0 (viz rovnice (1), str. 33)
- Jednotkový vektor v rovině XY S_{2X} (viz rovnice (25), str. 42)
- Velikost jednotkového vektoru v rovině XY S_{Norm} (viz rovnice (26), str. 42)
- Hodnota diskretizace brusného kotouče δ
- Hodnota úhlu počátečního natočení řídicí šroubovice vůči výchozímu souřadnicovému systému $PocNat$ (viz Obrázek 29, str. 34)



Obrázek 61 Vývojový diagram generování řezných rovin β_i

5.3.2.2 Generování konstrukce jednotlivých bodů A_i brusného kotouče

Tento cyklus načítá údaje o parametrickém modelu, údaje o šroubové ploše¹ a soustavu řezných rovin β_i (viz rovnice (28), str. 43).

Pozn.: Vzhledem ke složitosti matematického popisu jednotlivých řezů řezných rovin a šroubové plochy a jejich generování v rámci podprogramu je v modulu k vytvoření řezů využito naprogramování příkazu „Intersect“.

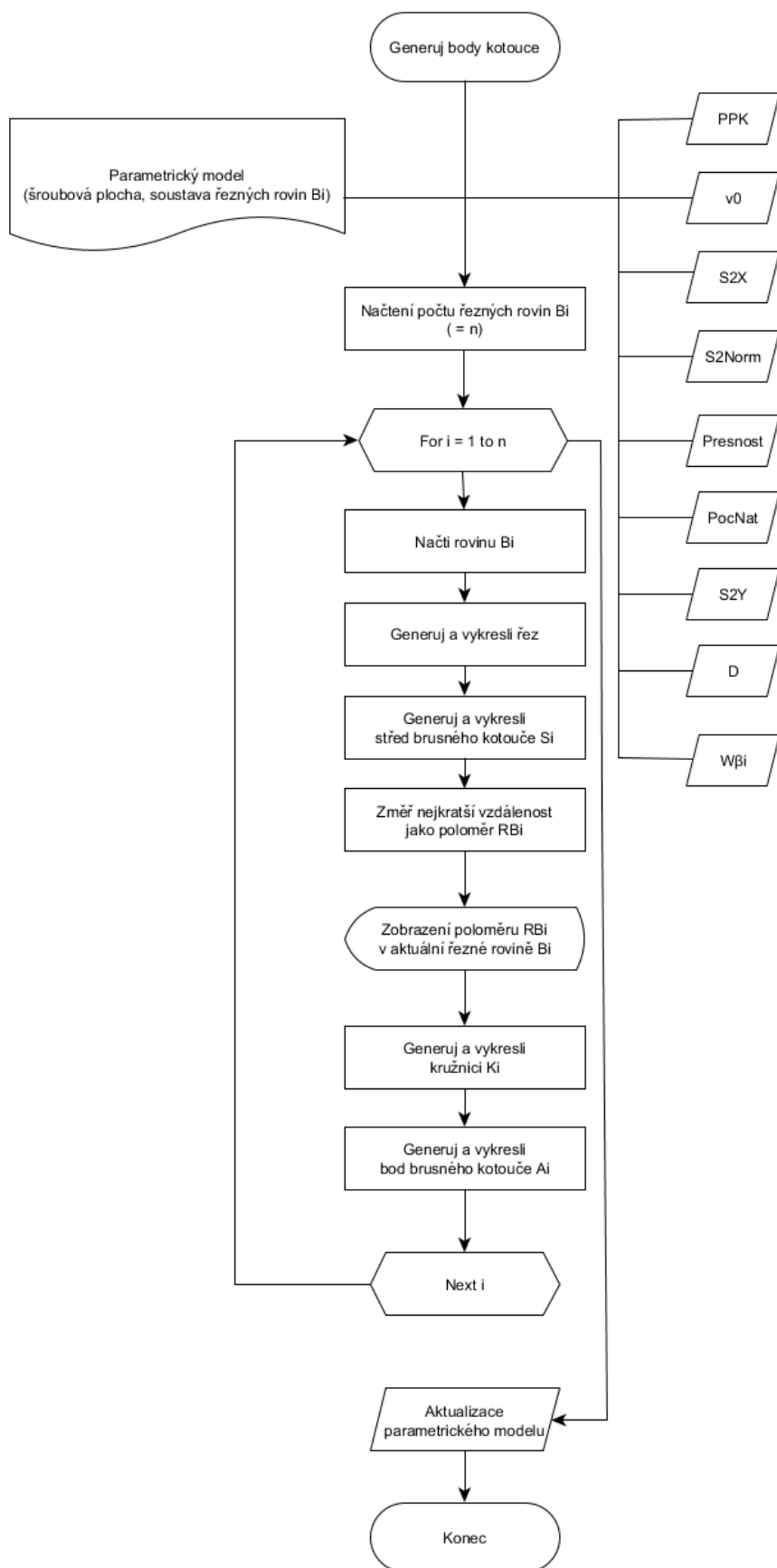
V každém kroku tohoto cyklu je tak načtena řezná rovina β_i dle jejího pořadí a následně je vyvolán příkaz „Intersect“ pro vytvoření průniku s definovanou šroubovou plochou. Následně jsou načteny údaje o parametrickém modelu a proměnné, na jejichž základě je vytvořen střed brusného kotouče S_i v aktuální řezné rovině dle rovnice (29), str. 43, jako průnik roviny kolmé na stoupání řídicí šroubovice (rovina α , viz rovnice (16), str. 38) a osy brusného kotouče O (dle rovnice (31), str. 37). Následně je změřena nejkratší vzdálenost R_{β_i} (viz rovnice (35) a (36), str. 43-44) středu S_i a řezu šroubové plochy jako poloměr brusného kotouče v aktuální řezné rovině β_i . Tato hodnota je uživateli zobrazena na obrazovku vyskakovacím oknem. V dalším kroku je vytvořena kružnice diskretizovaného brusného kotouče K_i dle rovnice (37), str. 46 v aktuální řezné rovině. V posledním kroku tohoto cyklu je vygenerován bod nového tvaru brusného kotouče A_1 dle rovnice (44), str. 49, jehož poloha je dána aktuální řeznou rovinou β_i , tvarem řezu této roviny a šroubové plochy a průměrem brusného kotouče D . Po vytvoření této soustavy dané aktuální řeznou rovinou β_i je načtena následující rovina a celý cyklus se takto opakuje dle počtu vygenerovaných řezných rovin, který je dán hodnotou přesnosti δ diskretizovaného brusného kotouče a výškou zubu odvalovací frézy.

Vstupní údaje:

- Parametrický model
- Šroubová plocha (odpovídá rovnici (8), str. 35)
- Soustava řezných rovin β_i (rovnice (28), str. 43, podprogram 5.3.2.1 Generování řezných rovin, str. 66)

Vstupní proměnné:

- Průměr patní kružnice PPK
- Redukovaná výška závitu v_0 (viz rovnice (1), str. 33)
- Jednotkový vektor v rovině XY S_{2X} (viz rovnice (25), str. 42)
- Velikost jednotkového vektoru v rovině XY S_{Norm} (viz rovnice (26), str. 42)
- Hodnota diskretizace brusného kotouče δ
- Hodnota úhlu počátečního natočení řídicí šroubovice vůči výchozímu souřadnicovému systému $PocNat$ (viz Obrázek 29, str. 34)
- Jednotkový vektor v rovině XY S_{2Y} (viz rovnice (25), str. 42)
- Velký průměr brusného kotouče D
- Parametr W_{β_i} (viz rovnice (40), str. 48) vycházející z průsečíků kružnic K_i (rovnice (37), str. 46) diskretizovaného brusného kotouče a roviny α (rovnice (16), str. 38)



Obrázek 62 Vývojový diagram generování konstrukce jednotlivých bodů A_i brusného kotouče

6 Experimentální ověření navržené metody

Pro realizaci experimentu broušení s tvarem profilu brusného kotouče ořvaného dle geometrie vygenerované na základě matematického modelu (viz Podkapitola 3.2, str. 49) bylo využito zvoleného typového představitele odvalovací frézy nástrčné (viz Obrázek 63) o daných parametrech deklarovaných normou ČSN ISO 2490 a ČSN 014607 (viz Příloha č. 2 a Příloha č. 3). Broušení bylo realizováno s brusným kotoučem zvoleným dle podkapitoly 2.4.2 Stanovený brusný nástroj (viz str. 28).

6.1 Výběr typového představitele pro experimentální ověření návrhu graficko-početní metody

6.1.1 Odvalovací fréza se zvolenou geometrií – Odvalovací fréza nástrčná levá

Tabulka 5 Geometrické parametry zvoleného typového představitele pro realizaci experimentu

Parametr odvalovací frézy	Rozměr [mm]
Upínací průměr	20,0
Průměr hlavové kružnice	115,0
Průměr patní kružnice	83,5
Délka ozubení	105,0
Výška zubu	15,75
Stoupání řídicí šroubovice	3810 (130 palců)
Modul	7

Tabulka 6 Geometrické parametry typového představitele pro realizaci experimentu – požadavky na přesnost

Parametr odvalovací frézy	Charakteristika
Úhel γ	0 [°]
Tvar profilu zubu (v rovině kolmé na stoupání řídicí šroubovice)	Přímka
Tolerance rovinnosti čela zubu	Třída AA až C



Obrázek 63 Odvalovací fréza nástrčná levá

6.1.2 Stanovený brusný nástroj

Tabulka 7 Charakteristika stanoveného brusného nástroje

Parametr brusného kotouče	Charakteristika
Materiál	Korund
Typ	Tyrolit F18A60HH11V
Výchozí tvar řezné části	Přímka

Tabulka 8 Parametry stanoveného brusného nástroje (viz Obrázek 22, str. 28)

Parametr brusného kotouče	Rozměr [mm]
Malý průměr	50
Velký průměr	100
Celková šířka	15
Výška neřezné hrany	5
Výška řezné části	10
Průměr upínacího otvoru	20

6.2 Experimentální ověření – vstupní podmínky

Pro realizaci orvnání bylo využito jednoho brusného kotouče, na kterém bylo provedeno orvnání v sestavě kotouč-upínač (viz Obrázek 64) na základě geometrie typového představitele odvalovací frézy, a následně byl proveden experiment broušení s touto sestavou. Tímto se eliminoval vliv nepřesností způsobených neustálým pře-upínáním brusného kotouče. Pro orvnání kotouče bylo využito grafického výstupu z výpočtového modulu.



Obrázek 64 Výchozí sestava pro orvnání

Algoritmus experimentálního ověření:

1. Upnutí brusného kotouče s výchozí geometrií do sestavy
2. Vygenerování navrženého tvaru brusného kotouče vzhledem ke vstupním parametrům
3. Orvnání brusného kotouče pro typového představitele
4. Měření tvaru orvnaného brusného kotouče
5. Broušení typového představitele odvalovací frézy
6. Měření typového představitele odvalovací frézy
7. Měření tvaru brusného kotouče po broušení

Experimentální ověření probíhalo v kooperaci laboratoří RTI/LTO, RTI/LDM a společnosti PilsenTools, s.r.o.. Orvnání brusného kotouče bylo realizováno v Laboratoři technologie obrábění (RTI/LTO) na multifunkčním soustružnickém centru DMG Mori CTX Beta 1250 TC (viz Obrázek 65) a jeho měření bylo realizováno v akreditované Laboratoři dílenské metrologie (RTI/LDM) na 3D souřadnicovém měřicím stroji Zeiss (viz Obrázek 66). Samotné broušení bylo realizováno ve společnosti PilsenTools na 4-osém broušicím stroji Shutte (viz Obrázek 67 a 68).



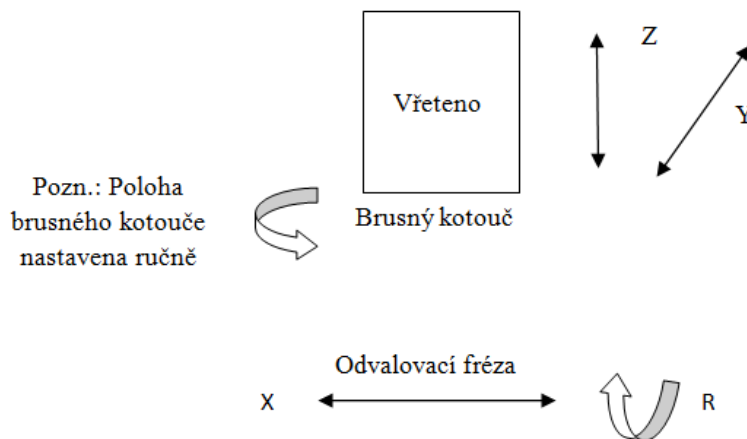
Obrázek 65 Multifunkční soustružnické centrum DMG Mori CTX Beta 1250 TC



Obrázek 66 3D souřadnicový měřicí stroj Zeiss Prismo



Obrázek 67 4-osý brousicí stroj Shutte



Obrázek 68 Kinematika broušícího stroje Shutte [8]

6.3 Experiment

6.3.1 Vygenerování navrženého tvaru brusného kotouče vzhledem ke vstupním parametrům

Na základě vstupních parametrů (viz Obrázek 69) byly vygenerovány pomocí automatického nástroje pozice jednotlivých bodů dle matematického modelu. Tyto body byly pak ručně propojeny pomocí spline funkce a bylo vytvořen 3D model nového tvaru brusného kotouče (viz Obrázek 70). Pro vygenerování programu pro orvnání dle tohoto modelu byly ještě vymodelovány 3D modely polotovaru (výchozího tvaru brusného kotouče) a upínacího trnu (viz Obrázek 71). Takto vytvořené modely byly převedeny do univerzálního formátu a následně se s nimi pracovalo v softwaru SolidCAM, kde se také vytvářel program pro orvnání brusného kotouče.

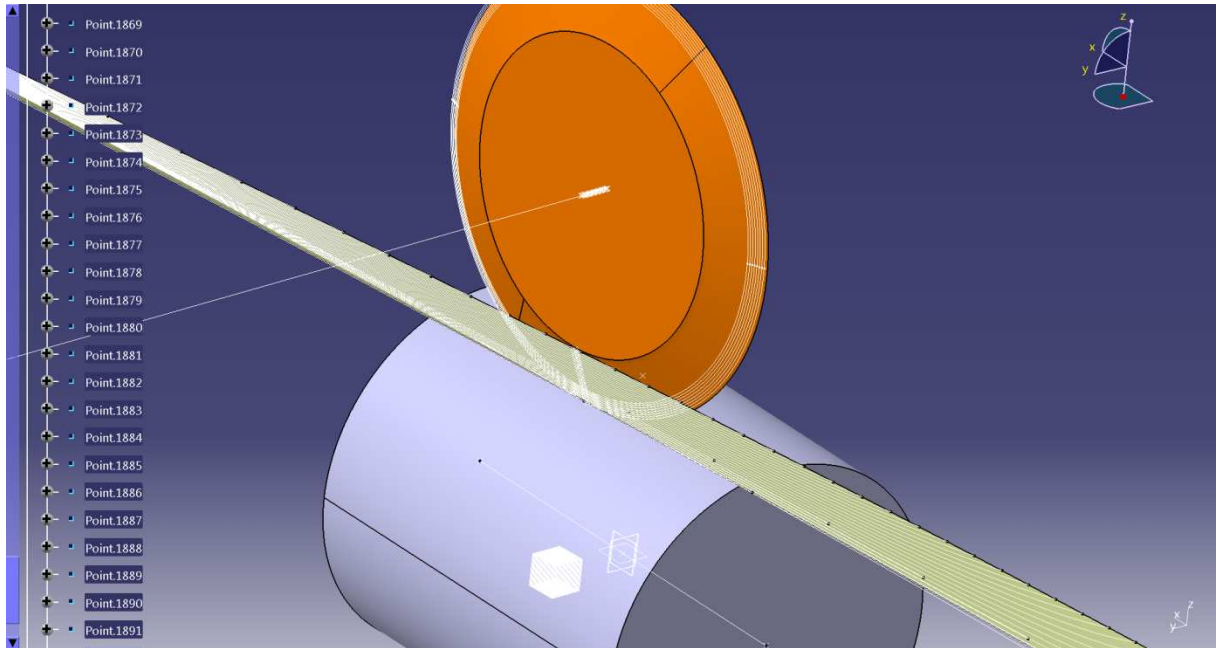
Zadání vstupních parametrů

Pozn.: Vstupní parametry zadávejte v mm!

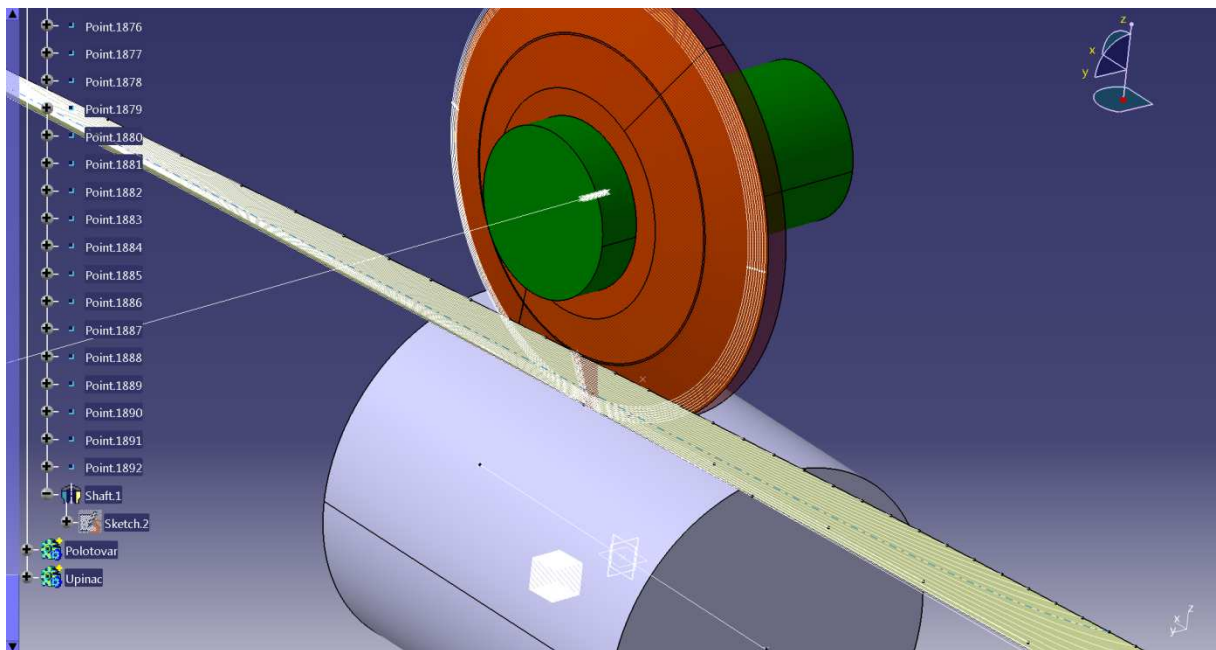
Průměr patní kružnice	83,5	[mm]
Průměr hlavové kružnice	115	[mm]
Stoupání řídicí šroubovice	3810	[mm]
Šířka ozubení	110	[mm]
Přesnost diskretizace	0,2	[mm]

Potvrdit

Obrázek 69 Zadání vstupních parametrů typového představitele pro experiment

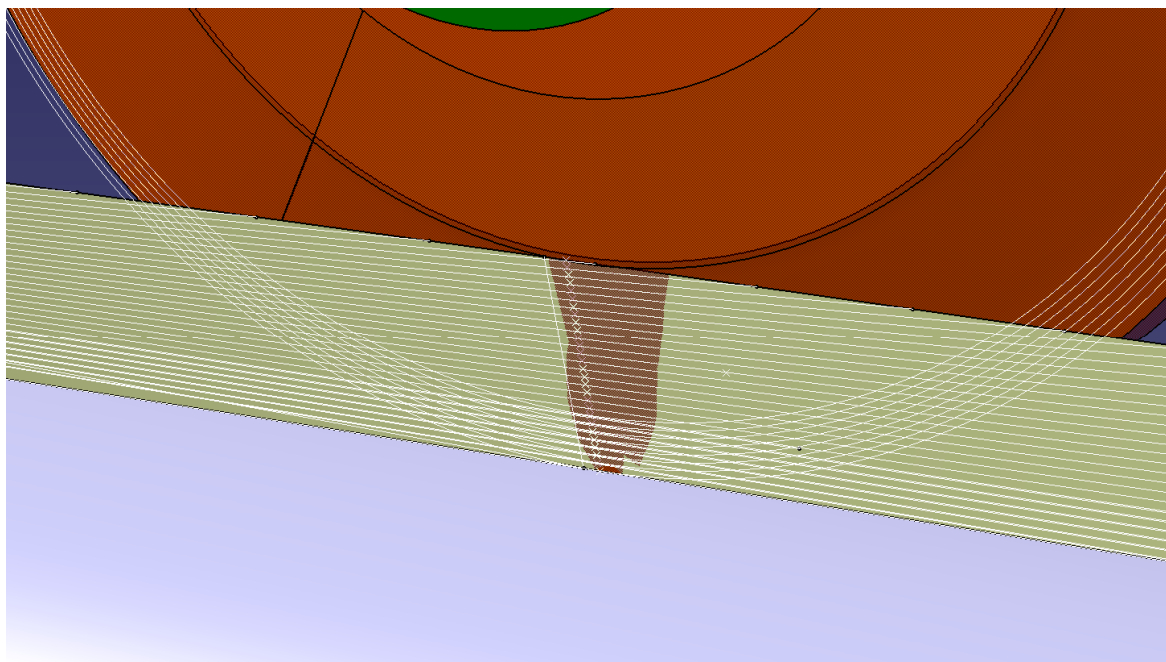


Obrázek 70 Model brusného kotouče vytvořeného na základě vypočítaných a vygenerovaných dat



Obrázek 71 Model sestavy polotovaru a upínače

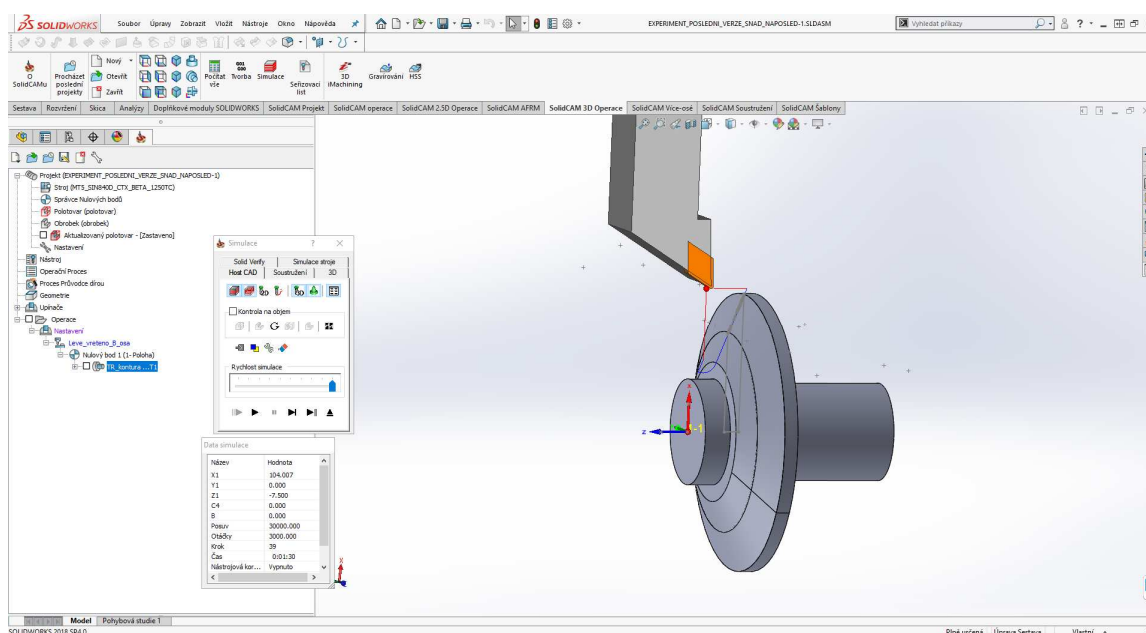
Na detailu viz Obrázek 72 je patrné, v kterých místech by docházelo k podřezání plochy čel zubů při použití brusného kotouče s výchozí geometrií.



Obrázek 72 Podříznutí typového představitele s použitím výchozího tvaru brusného kotouče

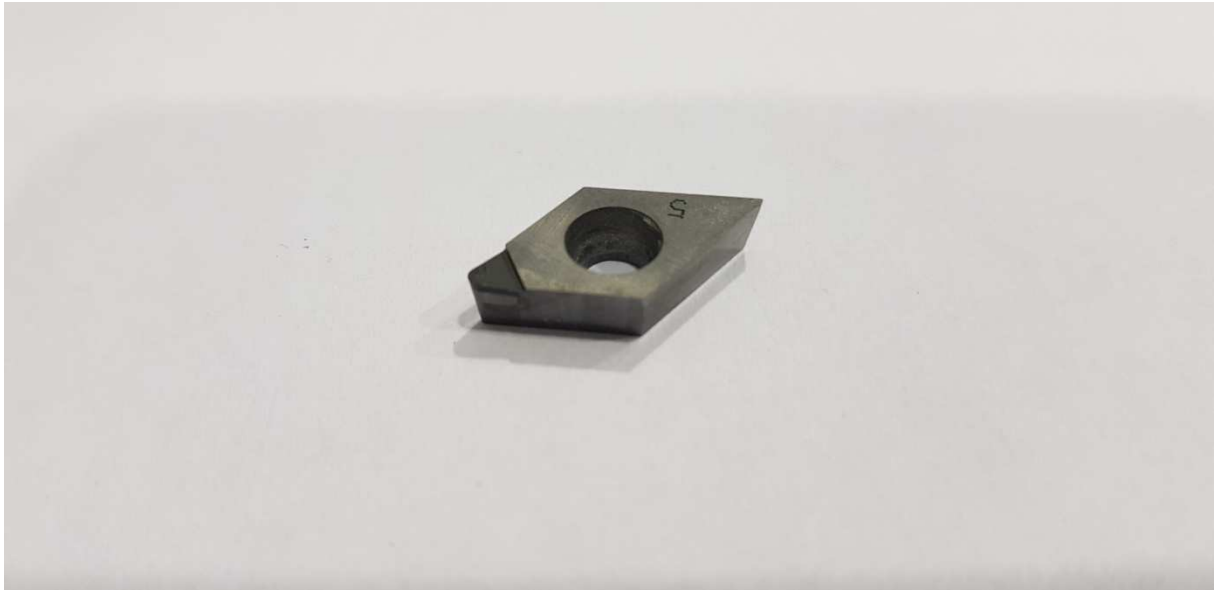
6.3.2 Orovnaní brusného kotouče

Orovnaní brusného kotouče bylo provedeno v laboratoři Technologie obrábění Regionálního technologického institutu na multifunkčním soustružnickém centru DMG Mori CTX Beta 1250 TC s použitím postprocesoru s výstupem ze softwaru SolidCAM (viz Obrázek 73). Tento stroj byl zvolen z důvodu vyhovující kinematiky a možností řídicího systému, jelikož bylo potřeba orovnat brusný kotouč podle křivky tvořené vypočtenými body dle návrhu proložených spline funkcí. Vzhledem k absenci spline interpolátoru bylo využito automatické aproximace takto spočítané a vygenerované křivky dvěma rádiemi bez předpokládaného většího vlivu na výslednou přesnost. Tuto funkci má integrovanou software SolidCAM jako výchozí při načítání externího modelu.



Obrázek 73 Simulace orovnaní brusného kotouče v SolidCAM

Orovnání bylo realizováno destičkou typu DCMT 11T308 ID5 s diamantovým plátkem (viz Obrázek 74) upnuté v držáku SDJCR 25x25M – 11 (viz Obrázek 75).



Obrázek 74 Destička DCMT 11T308 ID



Obrázek 75 Sestava upnutí destičky v držáku

Celá sestava držáku s destičkou v upínači byla naměřena na měřícím stroji Zoller (viz měřící protokol Příloha č. 4)

Vzhledem k nestandardní operaci orovnání korundového brusného kotouče na soustružnickém centru byl pracovní prostor zakryt, aby nedošlo k úniku odebraných částic kotouče do pracovních částí stroje a tím způsobení poškození činných elementů (viz Obrázek 76).



Obrázek 76 Zakrytí prostoru soustružnického centra

Sestava byla upnuta do měkkých čelistí a házení celé sestavy po upnutí do stroje bylo vyrovnáno pomocí kalibrovaného číselníkového úchylkoměru s hodnotou do 0,015 mm (viz Obrázek 77). Nicméně nerovnost na válcové části upínacího kužele byla naměřena v jednom místě podél osy upínače 0,03 mm. Orovnaný brusný kotouč viz Obrázek 78.



Obrázek 77 Měření házení upnuté sestavy brusného kotouče

Podmínky pro orovnění:

Tabulka 9 Podmínky pro orovnění brusného kotouče

Řezné podmínky	Hodnota
Vstupní házení sestavy	Do 0,015 mm
Otáčky	3000 ot.min ⁻¹

Posuv	0,01 mm.ot ⁻¹
Přísuv	0,01 mm
Chlazení	Vzduch

Parametr orovnění	Charakteristika
Destička	DCMT 11T308 ID5
Typ destičky	S diamantovým plátkem
Držák	SDJCR 25x25M – 11



Obrázek 78 Orovnaný brusný kotouč

6.3.3 Měření tvaru orovnaného brusného kotouče

Měření bylo provedeno v akreditované Laboratoři dílenské metrologie Regionálního technologického institutu na 3D souřadnicovém měřicím stroji Zeiss ve stejné sestavě brusný kotouče-upínač jako pro orovnění. Měření bylo provedeno dotykově metodou odstupů bodů tvaru od modelu (viz Obrázek 79). Základnou pro měření byla zvolena osa válcové části upínače, která byla změřena dotykově mrakem bodů po obvodu ve dvou rovnoběžných rovinách a z těchto naměřených údajů byla osa následně vypočítána softwarově. Průměr dotykového snímače byl zvolen 3 mm vzhledem k pórovitosti brusného kotouče. Při použití

průměru dotykového snímače 6 mm docházelo ke zkreslení naměřených dat. Naměřená data byla zpracována v softwaru Calypso.

Měření probíhalo v několika rovinách procházejících naměřenou osou a jednotlivé naměřené body profilu a jejich vzdálenost byla vztažena k základně definující velký průměr. Parametry měření viz Obrázek 80, výsledky měření viz Obrázek 81, detail naměřených dat viz Příloha č. 5.

Pozn.: Naměřené hodnoty na obrázku 81 jsou posunuty o hodnotu +0,2 mm vzhledem ke skutečnému tvaru. Při orovnění došlo k posunutí nulového bodu o tuto hodnotu oproti jeho výchozí pozici v programu pro orovnění. Toto posunutí bylo způsobeno vzhledem k nepřesnosti upínací matice na čele a pórovitosti brusného kotouče a tím rovinné nepřesnosti jeho zadní části, která udává velký průměr (tyto aspekty mají tedy vliv při určování polohy nulového bodu na reálné součásti).

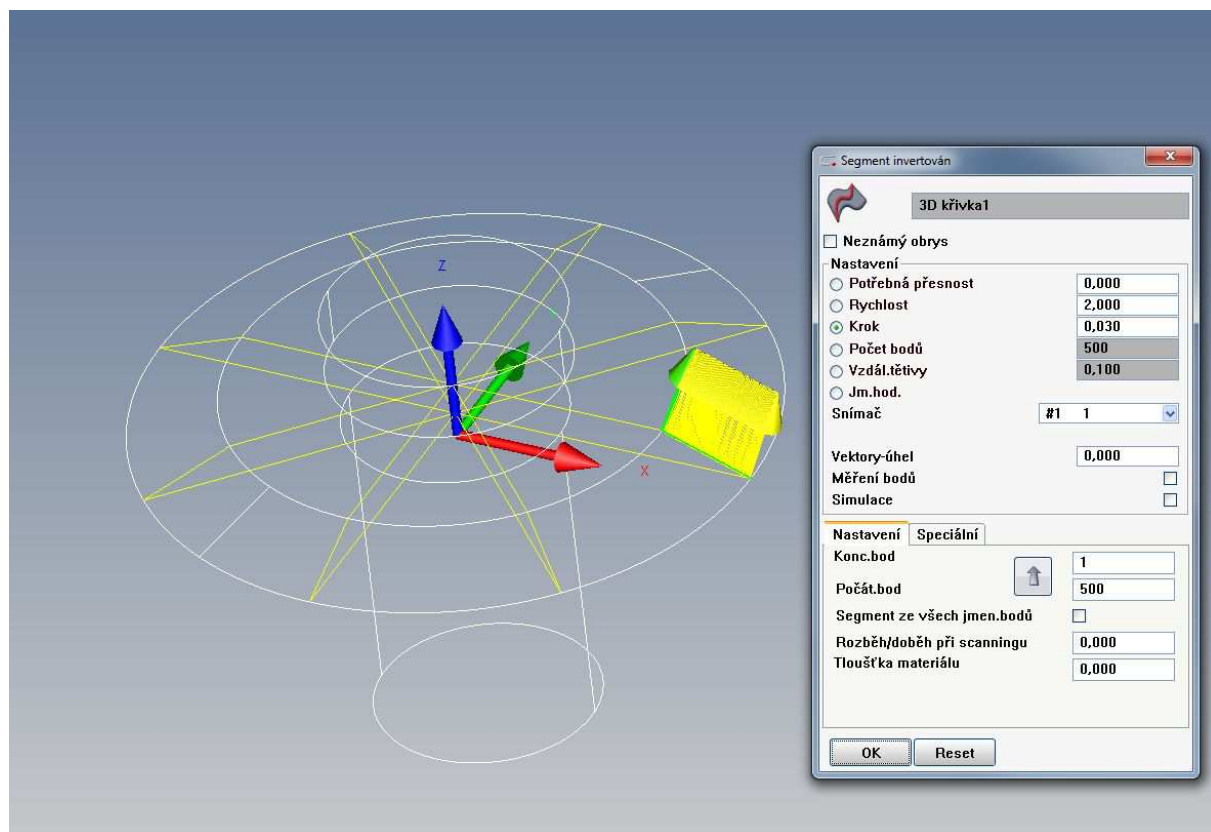


Obrázek 79 Měření brusného kotouče po orovnění

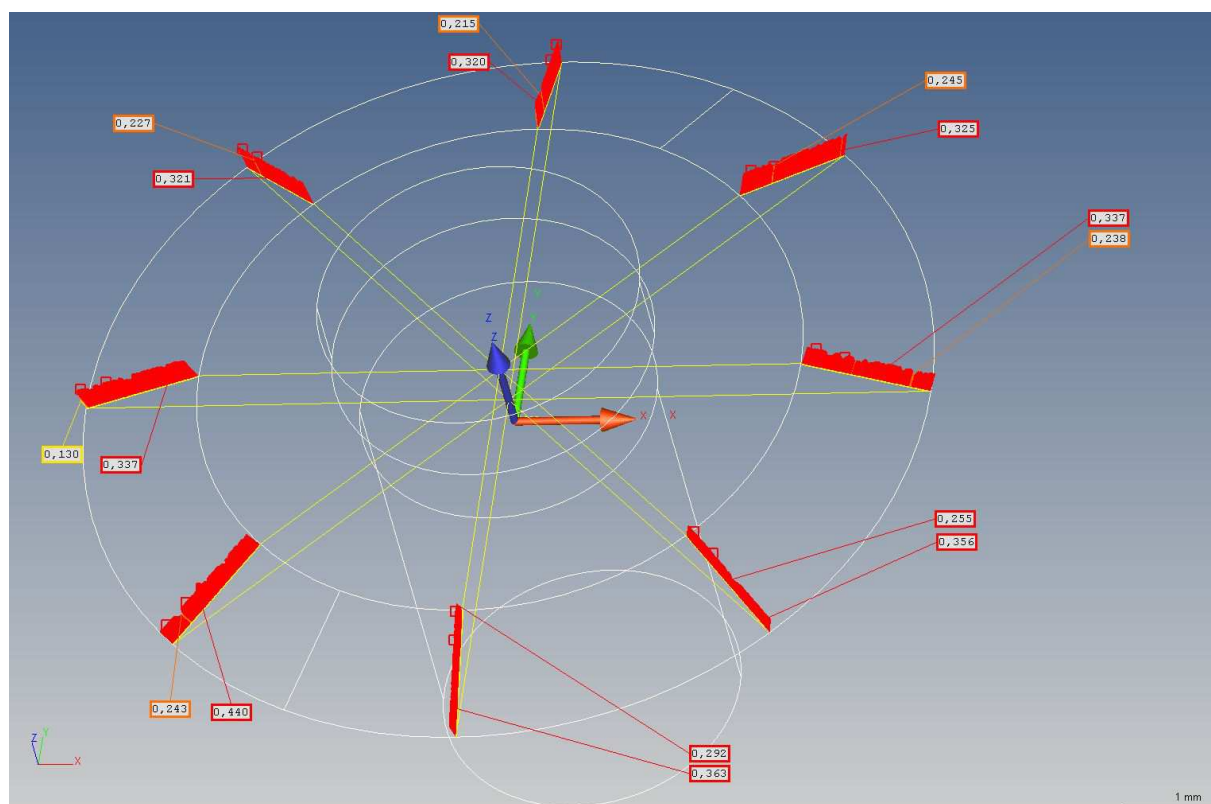
Podmínky měření:

Tabulka 10 Podmínky měření brusného kotouče po orovnění

Řezné podmínky	Hodnota
Rychlost měření	2 mm.min ⁻¹
Krok	0,03 mm
Počet naměřených bodů	500
Průměr měřicího dotyku	3 mm
Počet měřených rovin	4
Počet náměrů	8

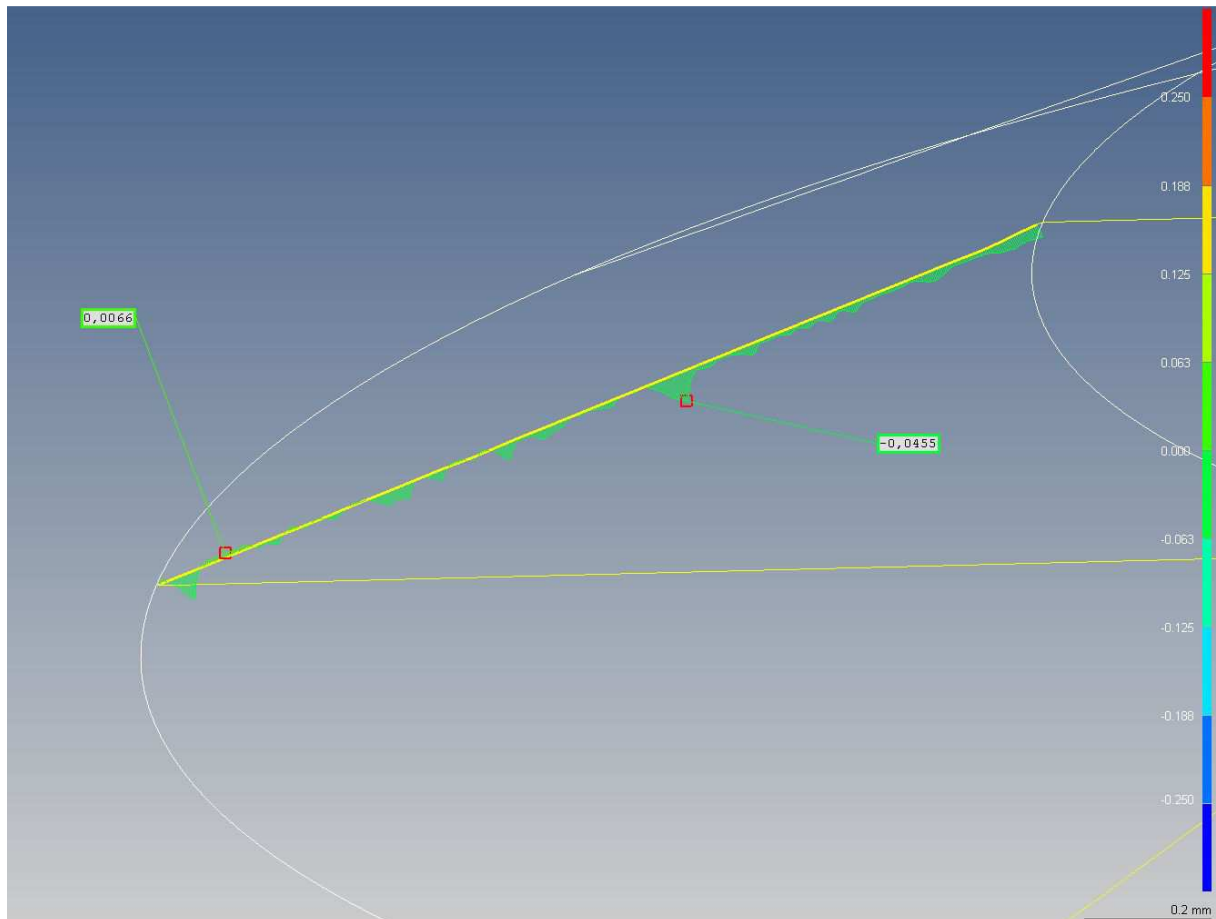


Obrázek 80 Nastavení podmínek měření



Obrázek 81 Naměřená data po orvnání

Na obrázku 82 je zobrazen průběh profilu zubu po posunutí o hodnotu odpovídající posunutí nulového bodu o 0,2 mm. Na základě měření tvaru orovnaná křivka odpovídá svým tvarem křivce modelu vygenerované na základě vypočítaných dat. S použitím průměru dotyku 3 mm, který sám o sobě působí jako filtr dat, je z měření patrná i pórovitost měřeného kotouče. Detail viz Příloha č. 6



Obrázek 82 Průběh orovnaného profilu tvaru brusného kotouče

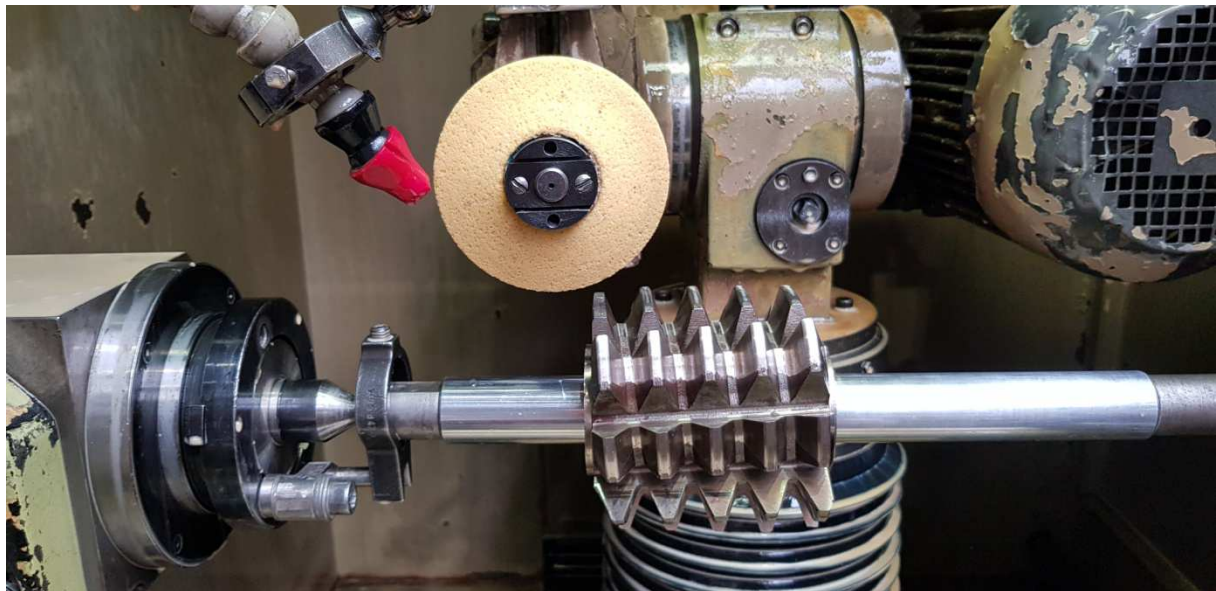
6.3.4 Broušení typového představitele odvalovací frézy

Broušení bylo realizováno ve společnosti PilsenTools, s.r.o. na 4-osém brousicím stroji Shutte ve stejné sestavě jako byla použita pro orovnění a následné měření (viz Obrázek 83). Celý proces broušení včetně přípravy upnutí probíhal standardně jako při reálném procesu broušení odvalovacích fréz ve výrobě.

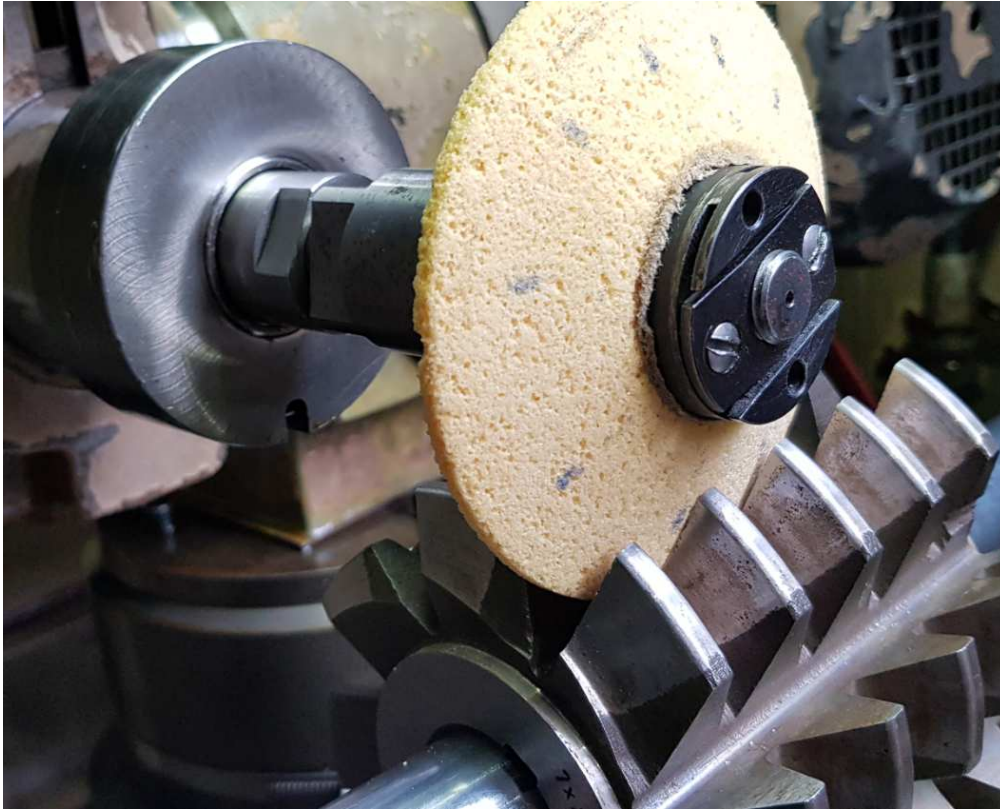
Podmínky pro broušení:

Tabulka 11 Podmínky pro broušení typového představitele

Řezné podmínky	Hodnota
Otáčky	3000 ot.min ⁻¹
Posuv	0,02 mm.ot ⁻¹
Přísuv	0,05 mm
Počet přísuvů	5
Chlazení	Chladicí emulze

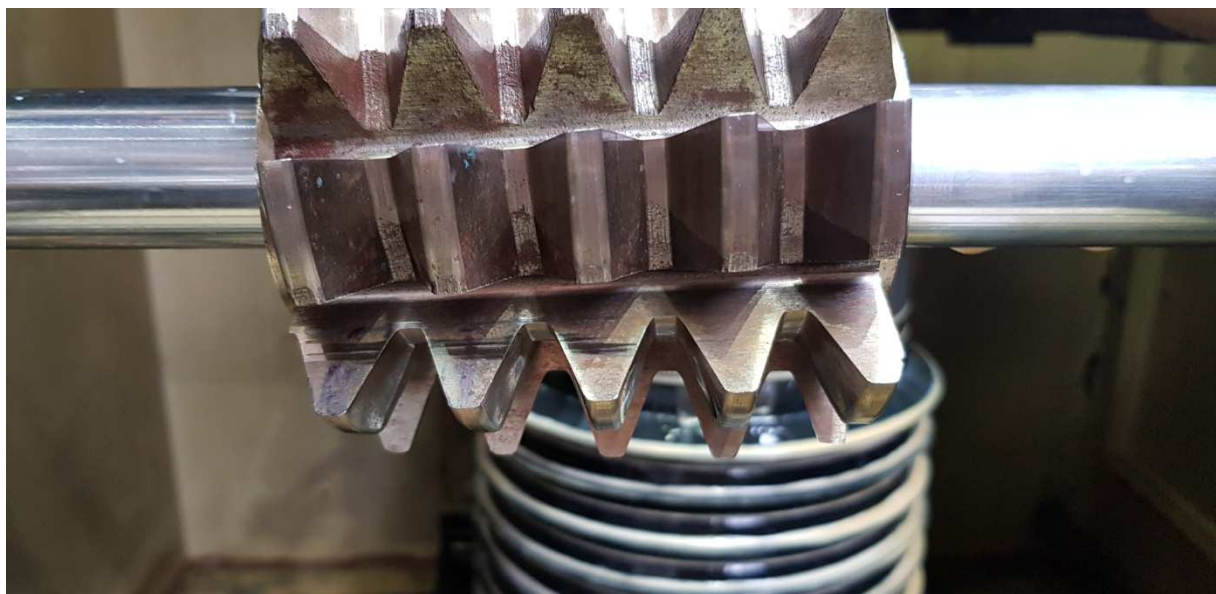


Obrázek 83 Upnutí ořevnaného kotouče a typového představitele pro broušení

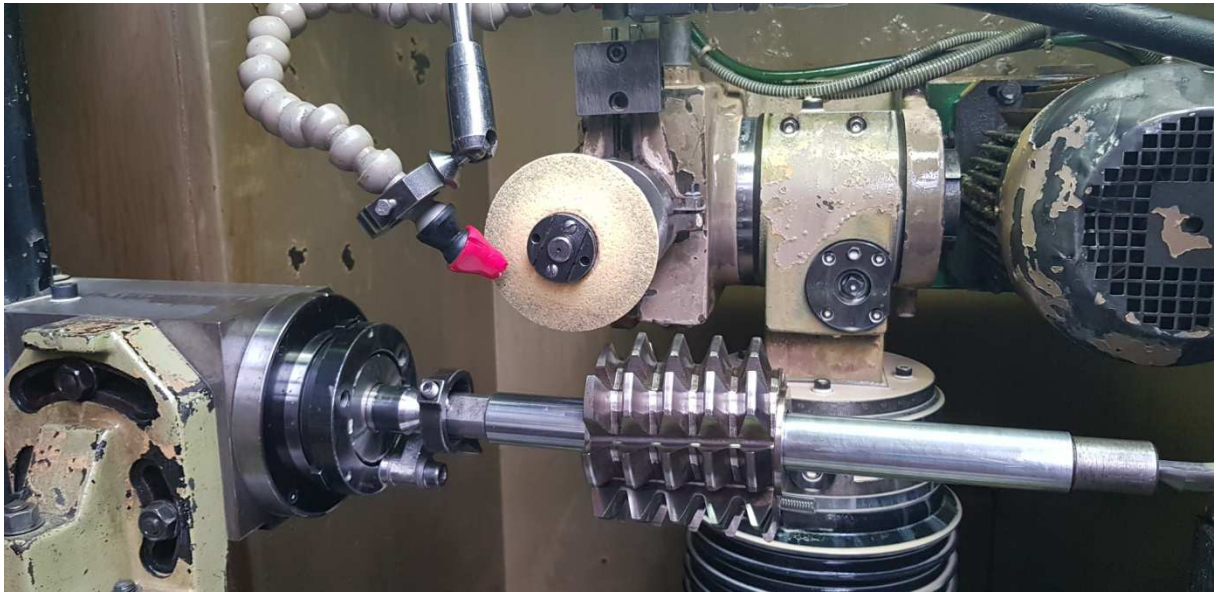


Obrázek 84 Detail pohledu do drážky před broušením

Při detailním pohledu do drážky před broušením (viz Obrázek 84) bylo již od pohledu patrné, že orovnaný tvar brusného kotouče kopíruje zakřivení zubu. Výchozí šroubovice určující drážku typového představitele byla již z hrubovací operace výroby mírně zakřivená oproti hodnotě uvedené na čele frézy (jednalo se o odvalovací frézu v majetku Katedry technologie obrábění ZČU určenou pro výzkumné účely, viz Obrázek 85), bylo nutné nejdříve tuto šroubovici srovnat dle údaje stoupání a následně pokračovat v samotném experimentu broušení (viz Obrázek 86).

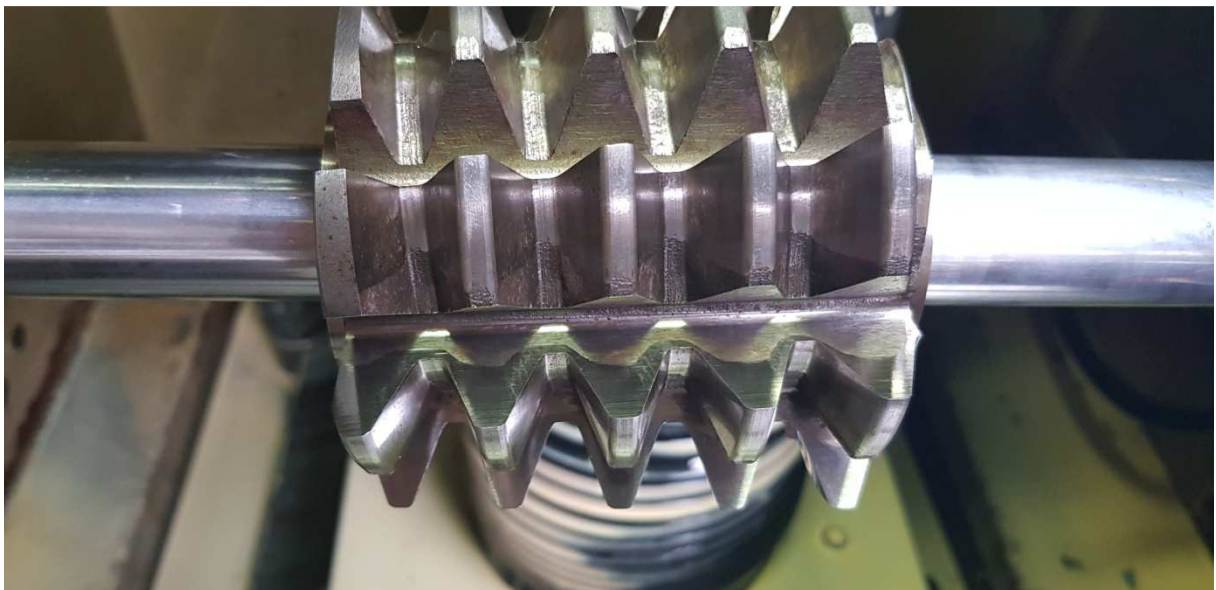


Obrázek 85 Zakřivení šroubovice



Obrázek 86 Pohled do pracovního prostoru po broušení

V průběhu experimentu broušení jednotlivých drážek docházelo k nežádoucímu jevu rozvibrování soustavy při třetím a dalším přisuvu a k postupnému zalepování brusného kotouče. Proto není šroubovice v konečné drážce celá srovnaná a je vybroušen pouze jeden zub pro účely přeměření a ověření výsledků (viz Obrázek 87).



Obrázek 87 Finální drážka

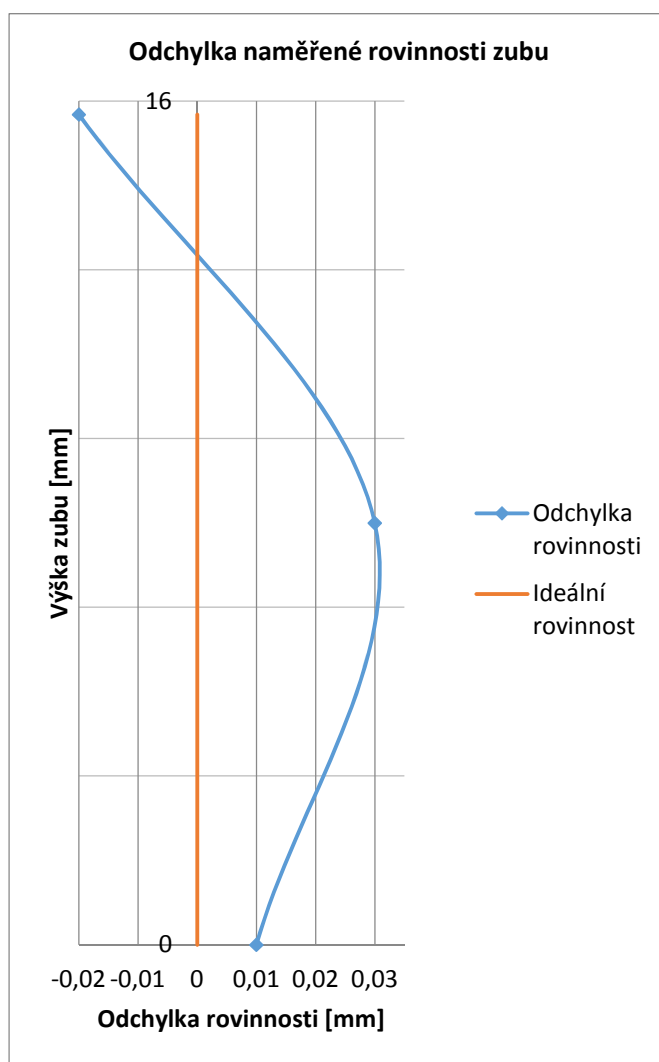
Výsledný profil zubu byl strojově přeměřen ve firmě (viz Obrázek 89) s výsledkem celkové odchytky rovinnosti čela zubu do 0,05 mm s tím, že se celková odchytka od paty zubu směrem k hlavě zubu pohybovala mezi 0,02 mm až 0,03 mm, přibližně od hloubky 2 mm směrem k hlavě zubu až k hlavové kružnici byl zub oproti zbylé ploše podříznut a hodnota odchytky k celkové hodnotě rozdílu byla naměřena 0,05 mm (viz Vyhodnocení odchytky rovinnosti zubu). Na základě měřicího protokolu používaného ve firmě lze výslednou přesnost broušení zařadit do třídy přesnosti B – pro modul 7 se jedná o hodnoty do 0,053 mm (viz Obrázek 88, Příloha č. 7). Vzhledem k těmto výsledkům bylo realizováno

měření brusného kotouče po broušení pro celkovou konfrontaci výsledků a vyvození závěrů experimentu.

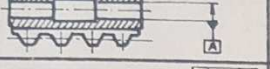
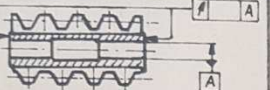
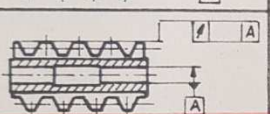
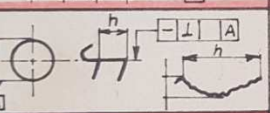
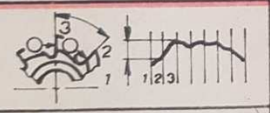
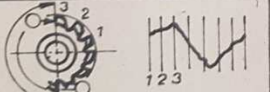
Vyhodnocení odchylky rovinnosti zubu:

Tabulka 12 Odchylka rovinnosti zubu

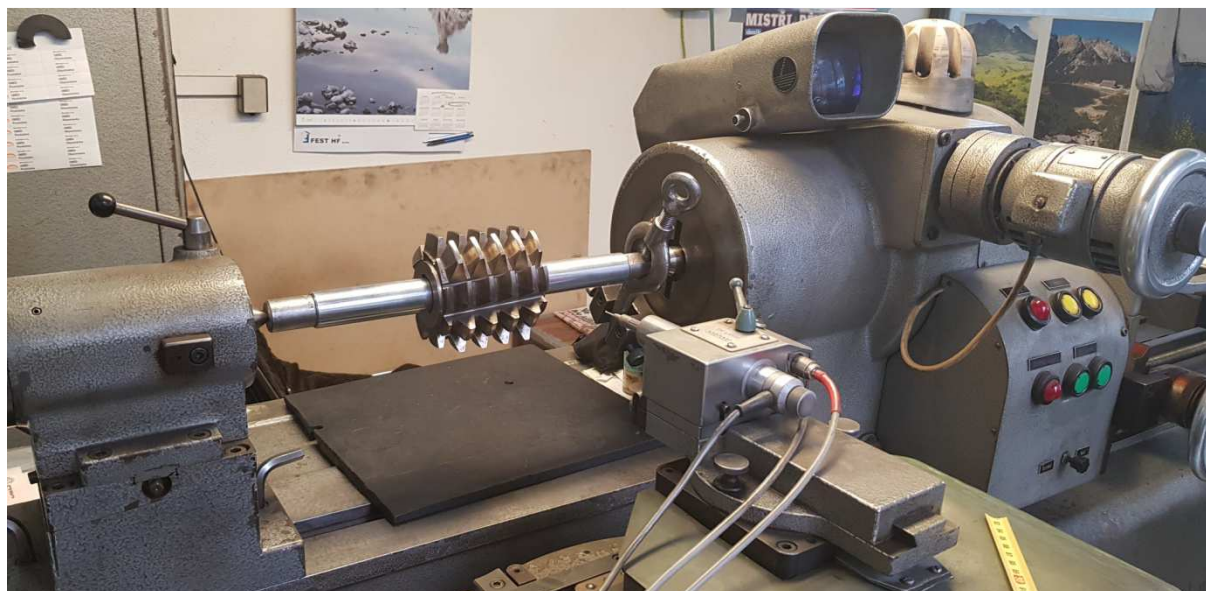
Odchylka rovinnosti zubu [mm]	
Max.	+0,03
Min.	-0,02
Celkem	0,05



Graf 1 Odchylka rovinnosti zubu

2		NÁKRUŽKŮ	A	5	5	6	8	10	14
			B	7	8	10	12	16	22
			C	7	8	10	12	16	22
3		ČELNÍ HÁZENÍ NÁKRUŽKŮ	AA	2	3	3	4	5	7
			A	4	4	5	6	8	11
			B	6	6	8	10	12	18
			C	6	6	8	10	12	18
4		OBVODOVÉ HÁZENÍ VNĚJŠÍHO PRŮMĚRU	AA	14	16	19	24	32	45
			A	22	25	30	38	50	70
			B	40	45	53	65	90	125
			C	80	90	105	130	180	250
5		ROVINNOST ČELA ZUBŮ	AA	11	12	15	19	25	36
			A	18	20	24	30	40	55
			B	32	36	42	53	70	100
			C	32	36	42	53	70	100
6		ROZDĚLENÍ MEZI DVĚMA SOUSED. HŘEBENY	AA	14	16	19	24	32	45
			A	22	25	30	38	50	70
			B	40	45	53	65	90	125
			C	40	45	53	65	90	125
7		ROZDĚLENÍ ZUBŮ NA 1 OTOČKU	AA	26	30	36	45	60	85
			A	42	48	55	70	95	130
			B	75	85	100	125	170	240
			C	75	85	100	125	170	240

Obrázek 88 Měřicí protokol odvalovacích fréz



Obrázek 89 Měření odchylky rovinnosti čela zubu

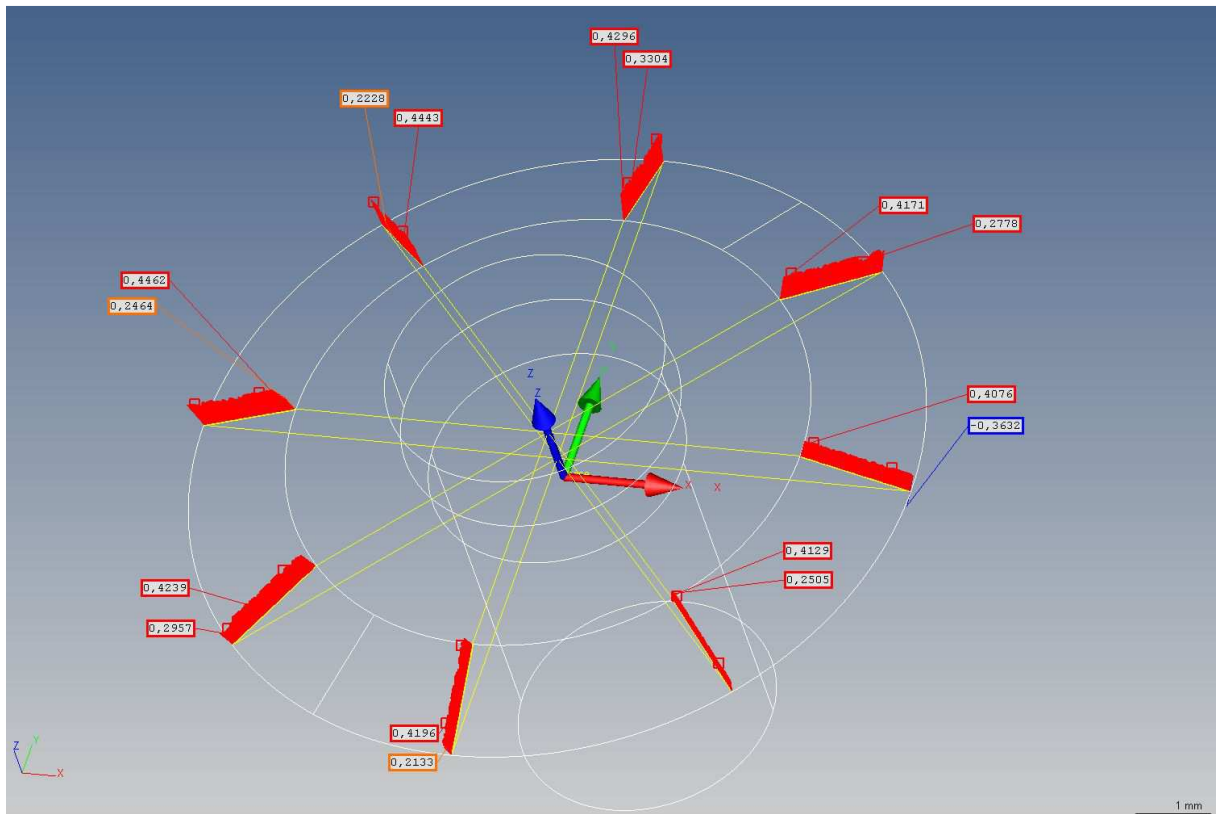
6.3.5 Měření brusného kotouče po broušení – shrnutí a diskuze výsledků experimentu

Pro komplexní pohled na problematiku broušení odvalovacích fréz a objektivnímu zhodnocení výsledků experimentu byl brusný kotouč přeměřen opět v původní sestavě upnutí v akreditované laboratoři Dílenské metrologie (viz Obrázek 90). Měření probíhalo stejným způsobem jako před broušením (viz podkapitola 6.3.3, str. 80). Měřené roviny však neodpovídají svojí polohou (natočením okolo osy Z) jako předchozím, jelikož nebyla možnost, jak zajistit stejnou polohu. Výsledky měření viz Obrázek 91, Příloha č. 8.

Pozn.: Naměřené hodnoty na obrázku 91 jsou posunuty o hodnotu +0,2 mm vzhledem ke skutečnému tvaru. Při orovnáni došlo k posunutí nulového bodu o tuto hodnotu oproti jeho výchozí pozici v programu pro orovnáni. Toto posunutí bylo způsobeno vzhledem k nepřesnosti upínací matice na čele a pórovitosti brusného kotouče a tím rovinné nepřesnosti jeho zadní části, která udává velký průměr (tyto aspekty mají tedy vliv při určování polohy nulového bodu na reálné součásti).



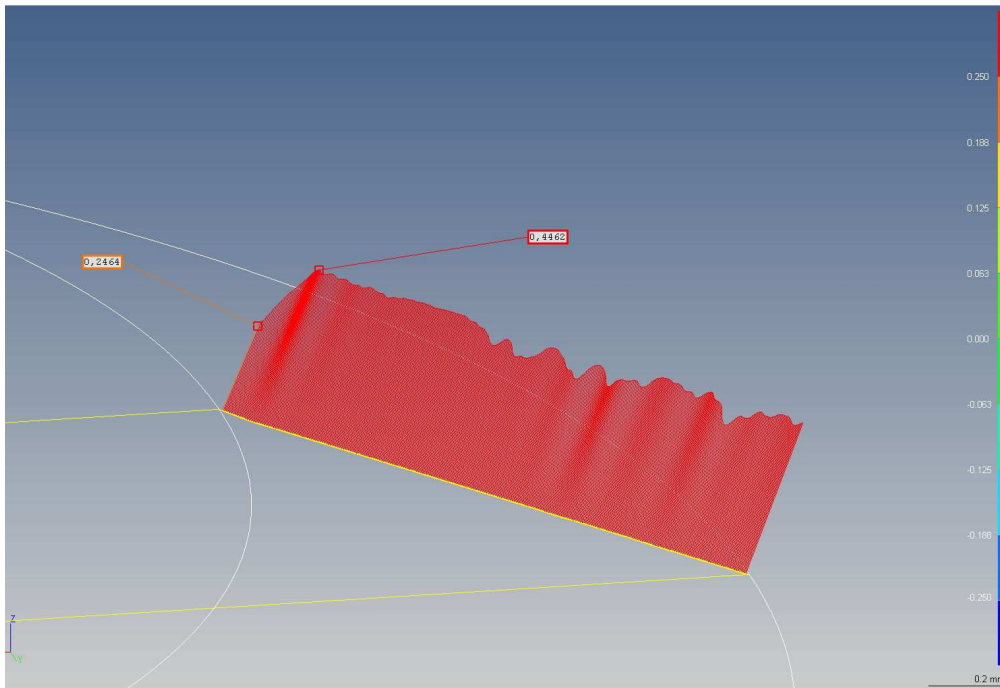
Obrázek 90 Měření tvaru brusného kotouče po broušení



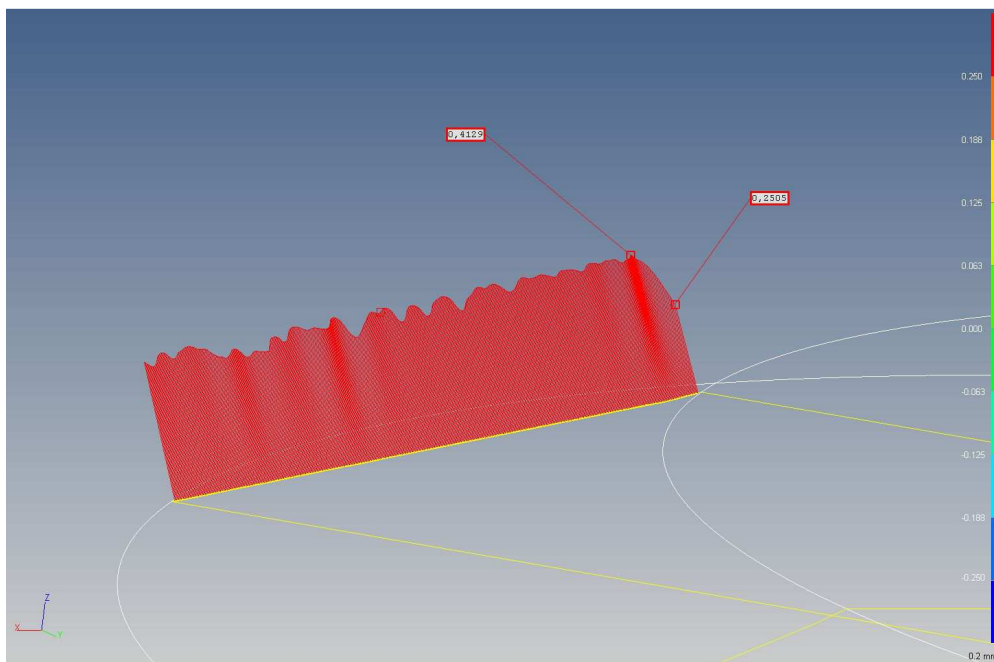
Obrázek 91 Naměřená data po broušení

Výsledky měření prokázaly vytvoření nánosu materiálu na ploše brusného kotouče, která byla v řezu v průběhu broušení, a to zejména v oblasti hlavy zubu (na obrázku 92 a 93 horní části křivky), kde dochází k „nahuštění“ naměřených dat a k největšímu nárůstu odchylky od původní naměřené před broušením (Obrázek 92 detail viz Příloha č. 9, a obrázek 93, detail viz Příloha č. 10). Právě v těchto místech, tedy u hlavové kružnice, by měla křivka tvaru brusného kotouče nejvíce uhýbat oproti původnímu vzhledu ke tvaru šroubové drážky a tím omezení podřezání plochy čel zubů. Nánosem materiálu však dochází

k deformaci jejího průběhu a tím k negativnímu vlivu na výslednou přesnost. Vzhledem k mírnému stoupání šroubovice může negativně ovlivnit přesnost i tvorba nánosu v rádech setin. Tato tvorba „nárůstku“ materiálu tak způsobila „vyrovnání“ křivky tvaru brusného kotouče odpovídajícího vstupním parametrům (viz Porovnání naměřených hodnot, str. 90) a výše zmiňované vibrace soustavy v průběhu broušení při postupném přísuvu do materiálu a k navyšování tlaku v místech řezu. Nicméně i s přihlédnutím k těmto faktorům, které ovlivnily výslednou přesnost, došlo k prokázání správnosti výpočtu navrhovaného řešení v určité toleranci. Na ostatních částech zubu je patrný již povětšinou rovnoměrný nános materiálu a jsou také patrná místa, kde došlo k vylomení brusných zrn.



Obrázek 92 Naměřený profil 1 po broušení



Obrázek 93 Naměřený profil 2 po broušení

Při porovnání skutečných hodnot naměřených u hlavy zubu a u paty zubu před operací broušení a po realizaci experimentu broušení je patrné, že došlo k deformaci ořvnané křivky a k nárůstu „zanesení“ materiálu brusného kotouče. Na první pohled se jedná o nepatrné rozdíly v řádech desetin, tato deformace však způsobuje zařazení výsledku do nižší třídy přesnosti rovinnosti čela zubu po broušení vzhledem k uvažování mírného zakřivení šroubové plochy typového představitele.

Porovnání naměřených hodnot brusného kotouče u hlavy zubu:

Tabulka 13 Naměřené hodnoty u hlavy zubu před operací broušení

Před broušením	Naměřená hodnota u hlavy zubu [mm]	Korekce [mm]	Skutečná hodnota [mm]
Profil 3	0,292	-0,2	0,092
Profil 5	0,321	-0,2	0,121

Tabulka 14 Naměřené hodnoty u hlavy zubu po operaci broušení

Po broušení	Naměřená hodnota u hlavy zubu [mm]	Korekce [mm]	Skutečná hodnota [mm]
Profil 1	0,446	-0,2	0,246
Profil 2	0,412	-0,2	0,212

Porovnání naměřených hodnot brusného kotouče u paty zubu:

Tabulka 15 Naměřené hodnoty u hlavy zubu před operací broušení

Před broušením	Naměřená hodnota u paty zubu [mm]	Korekce [mm]	Skutečná hodnota [mm]
Profil 3	0,363	-0,2	0,163
Profil 5	0,227	-0,2	0,027

Tabulka 16 Naměřené hodnoty u hlavy zubu po operaci broušení

Po broušení	Naměřená hodnota u paty zubu [mm]	Korekce [mm]	Skutečná hodnota [mm]
Profil 1	0,4	-0,2	0,2
Profil 2	0,4	-0,2	0,2

Pozn.: Hodnoty u paty zubu byly převzaty z grafů na obrázcích pro naměřené profily pro broušení, viz Obrázek 92 a 93.

Závěr

Proces automatizace broušení šnekových odvalovacích fréz včetně přípravných procesů předcházejících této operaci je z hlediska dodržení požadovaných přesností po ostření komplexní problematika vzhledem k množství faktorů, které ovlivňují výsledek. Na základě teoretických poznatků z oblasti broušení odvalovacích fréz a s použitím teoretických základů grafického řešení výchozího povrchu nástroje byla navržena matematická metoda pro výpočet jednotlivých bodů tvaru brusného kotouče odpovídajícího vstupním parametrům do procesu, jejichž hodnota ovlivňuje dané řešení.

Těmito parametry byly identifikovány:

- Stoupání řídicí šroubovice
- Úhel čel zubů vzhledem k ose nástroje
- Řídicí profil elementu tvořící broušenou drážku
- Průměr brusného kotouče
- Výška broušené drážky = výška zubu (dána hlavovou a patní kružnicí odvalovací frézy)

Na základě identifikovaných parametrů byl vytvořen matematický model řešení, který vychází ze stoupání řídicí šroubovice a šroubové plochy, která utváří čela jednotlivých zubů a tím šroubovou drážku, která je určena pro přeostřování těchto nástrojů.

Matematický model je tak navržen a pracuje s těmito geometrickými charakteristikami odvalovacích fréz:

- Stoupání řídicí šroubovice
- Úhel čela zubu vzhledem k ose nástroje - $\gamma = 0^\circ$
- Řídicí profil elementu tvořící broušenou drážku - přímka
- Průměr brusného kotouče
- Hlavová kružnice
- Patní kružnice

Ideální tvar výchozího povrchu brusného kotouče je tak ovlivněn výše uvedenými parametry a jeho průběh by měl odpovídat zakřivení šroubové drážky a nemělo by tak docházet k jejímu podřezání v místech záběru brusného nástroje do materiálu. Ideální tvar je tak tvořen vypočítanými body dle matematického návrhu vzájemně propojených spline funkcí, která je standardně využívána v CAD software pro konstrukční účely. Výhodou těchto křivek je hladké propojení uzlových bodů a přiblížení se ideálnímu průběhu tvaru mezi jednotlivými uzlovými body dle trendu předpokládaného tvaru křivky. Lze namítat, že tak nelze predikovat, nebo s určitou pravděpodobností, skutečný průběh mezi jednotlivými body. Ale vzhledem ke geometrickým charakteristikám, kdy tvořícím elementem šroubové plochy je přímka a kdy jsou dány přesné matematické popisy obou elementů, je předpoklad náhlé skokové změny průběhu mezi těmito body (nebo riziko větší odchylky) takřka nepravděpodobný.

Nicméně, jak již bylo výše uvedeno, do procesu broušení vstupuje více faktorů než pouze faktor tvaru brusného kotouče, a to předcházející proces orovnění brusného kotouče a s tím

spojené řezné podmínky, tvar orovnávače, materiál a pórovitost brusného kotouče, a následující charakteristiky brusného procesu jako jsou řezné podmínky a opět materiál brusného kotouče. Kombinace těchto faktorů může mít opět za následek zpřesnění výroby a degradaci vlivu tvaru orovnaného kotouče. Experiment broušení s orovnaným kotoučem prokázal tuto prognózu, kdy došlo k zanesení materiálu brusného kotouče a jeho nahuštění zejména v oblasti, která byla v kontaktu s hlavou zubu, což mělo za následek deformaci orovnaného tvaru brusného kotouče a navýšení nepřesnosti výroby s hodnotou rovinnosti čela zubu $0,05\text{mm}$ a zařazení tedy do třídy přesnosti B. Tento jev zanesení materiálu brusného kotouče byl s největší pravděpodobností způsoben navýšením tlaku v této oblasti při postupném přísuvu do materiálu, jelikož v oblasti hlavy zubu byl poměrově ke zbytku největší úběr. Tento faktor měl pak za následek rozvibrování celé soustavy v průběhu broušení. Dalším faktorem bylo orovnění brusného kotouče pomocí destičky s definovanou geometrií s poloměrem zaoblení špičky $0,8\text{mm}$, což mělo za následek vyhlazení orovnávané plochy a mohlo mít vliv na chování brusného kotouče v řezu v průběhu broušení a snazšímu zanášení řezné části. Na vliv tvaru orovnávače poukazuje také zdroj [17].

Zvolený materiál brusného kotouče byl vhodný k dosažení pozitivního výsledku po orovnění, což bylo prokázáno naměřenými daty průběhu tvaru po orovnění, avšak tento materiál nemusel být zcela vyhovující vzhledem ke zvoleným podmínkám broušení, které byly použity stejné, jako při broušení odvalovacích fréz s přímým ozubením pomocí borazonových kotoučů. Tento materiál vykazuje hladší průběh broušení bez negativního rozvibrování soustavy při zvolení těchto podmínek.

Experiment tak prokázal správnost navrženého matematického modelu, kdy bylo dosaženo určité přesnosti po broušení s vypočítanou geometrií brusného nástroje.

Tato přesnost však byla degradována ostatními vlivy vstupujícími do celého procesu. Je také však nutné uvažovat míru přesnosti polohy geometrie, která je definována pomocí vypočítaných rovnic a generována syntaxí jazyka Visual Basic, a tudíž jejího vlivu na výslednou přesnost.

Další faktory ovlivňující výslednou přesnost po broušení:

- Tvar orovnávače
- Materiál brusného kotouče
- Řezné podmínky při broušení
- Přesnost polohy geometrie generované pomocí rovnic na základě syntaxe programovacího jazyka

Přínosy práce pro teoretickou oblast:

1. Komplexní rozbor problematiky ostření šnekových odvalovacích fréz
2. Vytvoření parametrického matematického modelu výchozího povrchu brusného nástroje odpovídajícího parametrům broušené drážky bez nutnosti uvažování kinematiky použitého broušícího stroje
3. Vytvoření grafického řešení návrhu implementovaného v 3D CAD pracujícího s daty matematického modelu

4. Identifikace faktorů, které vstupují do procesu broušení a jeho přípravy a které ovlivňují přesnost navrženého tvaru brusného nástroje v jeho průběhu

Přínosy práce pro aplikační oblast:

1. Automatizace návrhu odpovídajícího tvaru brusného nástroje pro ostření šnekových odvalovacích fréz
2. Zkrácení času potřebného pro tvorbu návrhu odpovídajícího tvaru
3. Výstup z bodu 3 z přínosů práce pro teoretickou oblast je možné použít pro CAM modul pro potřeby orovnáání brusného kotouče v praxi
4. Prokázání vlivu zanášení brusného kotouče v průběhu broušení na výslednou přesnost broušené drážky

Vzhledem k výsledkům experimentu a identifikování dalších faktorů, které ovlivňují výslednou přesnost po broušení, je doporučeno v rámci budoucích kroků navrhnout experiment pro typového představitele odvalovací frézy s menším stoupáním řídicí šroubovice, než byl použit v tomto experimentu, a omezení faktorů, které mají nepřímý vliv na výsledek, jež byly identifikovány v průběhu realizace experimentu.

Doporučení pro směrování dalších kroků:

- Návrh experimentu pro typového představitele odvalovací frézy s menším stoupáním řídicí šroubovice
- Použití orovnávače s menším poloměrem zaoblení špičky
- Návrh experimentu s jiným materiálem brusného kotouče
- Upravení podmínek pro broušení

Dalším námětem pro hlubší výzkum v této oblasti je identifikování váhy jednotlivých parametrů vstupujících do matematického modelu a ovlivňujících výsledný tvar navrhované křivky tvaru brusného kotouče. Jelikož tyto parametry jsou na sobě navzájem závislé, jejich kombinace ovlivňuje tvar výsledné křivky, respektive pozice jednotlivých vypočítaných bodů. S určitou pravděpodobností lze předpokládat, že některé parametry budou mít vyšší váhu a tak budou výsledek ovlivňovat více a některé budou mít váhu nižší a jejich vliv na výsledek nebude tak významný vzhledem ke změně výsledku, jelikož se může jednat o setiny milimetru. Je třeba vyhodnotit, do jaké míry hodnoty lze uvažovat vliv jako významný a nevýznamný.

Doporučení pro další výzkum problematiky:

- Výzkum váhy vlivu jednotlivých parametrů vstupujících do matematického modelu řešení na výsledný tvar křivky a polohu jednotlivých bodů

7 Citovaná literatura

- [1] 2nd International Conference ICTKI 2008. *Sborník příspěvků*. Vyd.1., Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 2008, 378 s., ISBN 978-80-7044-696-1.
- [2] Misan. Stroje pro dokončovací operace. [Online]. 2017 [Cit. 2018-08-19]. Dostupné z: http://www.misan.cz/download/okamoto/Okamoto_souhrnny_katalog.pdf
- [3] Tech Magazín. V Misanu se zabydlují nové technologie. [Online]. 2013 [Cit. 2018-08-19]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/761>
- [4] JANDEČKA, Karel. *Úvod k broušení tvarově složitých nástrojů*. Plzeň: Fakulta výrobních technologií a managementu UJEP, 2006. ISBN 80-704-4857-1
- [5] MILSIMEROVÁ, A. The solution design of hobbing worm milling cutters face teeth undercut. In *Material Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2017. s. 59-67. ISBN: 978-3-0357-1265-0, ISSN: 0255-5476
- [6] Brusnar. Technologie ostření. [Online]. [Cit. 2018-08-19]. Dostupné z: <http://www.ostreninastroju.cz/technologie-ostreni>
- [7] MMSpektrum. Programování beze slov. [Online]. 2010 [Cit. 2018-08-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/programovani-beze-slov.html>
- [8] MILSIMEROVÁ, A.. *Návrh řešení orovnávaní tvarové plochy brusného kotouče pro ostříčku „SHÜTTE“*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. FST, ZČU v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.
- [9] Tyrolit. Katalog výrobků pro univerzální broušení. [Online]. 2018 [Cit. 2018-08-25] Dostupné z: https://www.tyrolit.cz/fileadmin/Documents/Trade/Catalogues/TYROLIT_CZ_2016_A5_Univerza_Ini_.pdf
- [10] SILAI, X., LIMING, W., ZEZHONG., C., CH., SEQUAN, W., AIMING T., *A New and Accurate Mathematical Model for Computer Numerically Controlled Programming of 4Y1 Wheels in 21/2-Axis Flute Grinding of Cylindrical End-Mills*, 2013, Journal of manufacturing science and engineering-transactions of the ASME, 135s, ISSN: 1087-1357
- [11] MOFIZUL, MD., I., HOCHAN, K., TAEJO, K., *Geometry Modeling of Screwed Wheel Dressed by Rounded Tool*, 2015, Journal of the Chinese society of mechanical engineers, s 283-290, ISSN: 0257-9731
- [12] YUANSHENG, Z., JINYUAN, T., HENG, Z., FENG, Y., *Multistep Method for Grinding Face-Gear by Worm*, 2016, journal of manufacturing science and engineering-transactions of the ASME, ISSN: 1087-1357
- [13] Saša ČUKOVIĆ, Goran DEVEDŽIĆ, Ionuț GHIONEA, *Automatic determination of grinding tool profile for helical surfaces machining using Catia/VB interface*, 2010, UPB Scientific Bulletin, Series D, s 85-96
- [14] ROUD, P.. *Metody zefektivnění konstrukce řezných nástrojů*. Plzeň, 2013. Dizertační. FST, ZČU v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Škarda, CSc.

- [15] PIOTROWSKI, Andrzej. Hob Identification Methods. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 2018, 12.1. Dostupné z: <http://www.astri.com/Hob-Identification-Methods,81801,0,2.html>
- [16] CHEN, Yong-Hong, et al. Development and classification of worm drive. In: *14th World Congress in Mechanism and Machine Science, Taipei, Taiwan*. 2015. p. 25-30. Dostupné z: <http://www.iftomm2015.tw/IFTomm2015CD/PDF/PS6-008.pdf>
- [17] GRAVEL, Günther. Simulation of deviations in hobbing and generation grinding. In: *VDI International Conference on Gears, Munich*. 2013. Dostupné z: http://www.ptuv.de/files/downloads/simulation_hobbing_generation_grinding.pdf
- [18] JANDEČKA, K., *Podříznutí při broušení tvarových drážek*, 2009, Transfer inovací, Strojnická fakulta, Technická univerzita v Košiciach, Košice, s 138-142. Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/15-2009/pdf/138-142.pdf>
- [19] JEŽEK, F., TOMICZKOVÁ, S.. *Geometrie pro FST 2*, Pomocný učební text 2016, verze 7.2, ZČU v Plzni, FAV, Plzeň, 124 s.
- [20] MILSIMEROVÁ, A., Mathematical method design for calculation of the initial tool surface for the sharpening of hobbing worms, 2018, SVOČ 2018, FST, ZČU v Plzni, s 283-290, ISSN: 0257-9731
- [21] Matematika.cz. Funkce sinus a cosinus jsou jen posunuté o $\frac{\pi}{2}$. [Online] 2006-2014 [Cit. 2018-07-15]. Dostupné z: <https://matematika.cz/sinus-cosinus>
- [22] Maths.cz. Jednotková kružnice. [Online] 2008 [Cit. 2018-07-15]. Dostupné z: <https://maths.cz/clanky/140-jednotkova-kruznice>
- [23] CAD/CAM Lab. Courseware Knowledgeware. Wichita state university [Online] [Cit. 2018-08-25]. Dostupné z: <https://www.cadcamlab.org/courseware/pdfs/knowledgeware.pdf>
- [24] FUCHS, J., BARCHFELD, A.. *Visual Basic, Velká kniha řešení*. Computer Press, 2010. Vydání první. 721 stran. ISBN 978-80-251-2212-9
- [25] ZIETHEN, R., DIETER. *CATIA V5 Makroprogra mmierung mit Visual Basic Script*. Carl Hanser Verlag Munchen, 2011. Vydání 3. 558 stran. ISBN 978-3-446-42494-4
- [26] DVOŘÁK, J.. *Expertní systémy*, 2004, VUT v Brně, FST, Ústav automatizace a informatiky, Brno. 92stran. Dostupné z: <http://www.uai.fme.vutbr.cz/~jdvorak/Opory/ExpertniSystemy.pdf>
- [27] Hughes, T.J.R., Cottrell, J.A., Bazilevs, Y. *Isogeometric analysis: CAD, Inite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement*, 2005, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 194, str. 4135-4195. Dostupné z: <https://www.ljll.math.upmc.fr/~frey/papers/meshing/Hughes%20T.J.R.,%20Isogeometric%20analysis,%20CAD,%20finite%20elements,%20NURBS,%20exact%20geometry%20and%20mesh%20refinement.pdf>

- [28] ŠUSTR, M.. *Automatizace modelu a výkresové dokumentace v systému CATIA V5*. Plzeň, 2010. Diplomová. FST, ZČU v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
- [29] Vijayaraghavan, A., Dornfeld, D.. *Automated Drill Modeling for Drilling Process Simulation*. 2006. Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory for Manufacturing and Sustainability, UC Berkeley. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/David_Dornfeld/publication/242934927_Automated_Drill_Modeling_for_Drilling_Process_Simulation/links/0f31752dab3f5cd84b000000/Automated-Drill-Modeling-for-Drilling-Process-Simulation.pdf
- [30] ROWE, W. B. *Principles of modern grinding technology*. Norwich, NY: William Andrew, c2009. ISBN 978-081-5520-184.
- [31] LINKEOVÁ, Ivana. *NURBS křivky: NeUniformní Racionální B-Spline křivky*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03893-2
- [32] VB Scripting for Catia V5, Nick Weisenberger, expanded ebook edition. [Online] [Cit. 2018-07-04]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/356445405/285342729-VB-Scripting-for-CATIA-V5-eBook-pdf>

Seznam publikované literatury

Seznam vlastních prací vztahujících se k tématu disertace:

- [1] MILSIMEROVÁ, A. Vliv metody vyšetřování tvaru brusného kotouče na výslednou přesnost obrobku. In *Strojírenská technologie – Plzeň 2015: Sborník příspěvků*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 152-161. ISBN: 978-80-261-0304-2
- [2] MILSIMEROVÁ, A. Sharpening hobbing worm milling cutters issue. In *Online Proceedings of the 10th International DAAAM Baltic Conference "Industrial Engineering"*. Tallinn: DAAAM International, 2015. s. 57-62. ISBN: 978-1-5108-2263-4 , ISSN: 2346-612X
- [3] MILSIMEROVÁ, A. The solution design of hobbing worm milling cutters face teeth undercut. In *Material Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2017. s. 59-67. ISBN: 978-3-0357-1265-0 , ISSN: 0255-5476
- [4] MILSIMEROVÁ, A. Výzkum kinematiky nástroje při broušení šnekových odvalovacích fréz. In *MANUFACTURING TECHNOLOGY - PILSEN 2017: Conference proceeding*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 1-12. ISBN: 978-80-261-0636-4
- [5] MILSIMEROVÁ, A. Mathematical method design for calculation of the initial tool surface for the sharpening of hobbing worms. In *Elektronický sborník příspěvků SVOČ 2018*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018. s. 1-8. ISBN: 978-80-261-0779-8

Postery vztahující se k tématu disertace:

- [1] ČESÁNEK, J., MILSIMEROVÁ, A., KROFT, L., VYŠATA, J. *Problematika technologie programování NC strojů*. Plzeň, 2017.

Funkční vzorky a ověřené technologie:

- [1] MILSIMEROVÁ, A., BÍCOVÁ, K., FULEMOVÁ, J., KROFT, L. *Optimalizace tvaru dutiny lisovacího přípravku*. 2015.
- [2] KROFT, L., MILSIMEROVÁ, A., FULEMOVÁ, J., BÍCOVÁ, K. *Geometrická úprava lisovacího trnu*. 2015.
- [3] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., MILSIMEROVÁ, A. *Úprava vodící lišty pro ohýbačku trubek*. 2015.
- [4] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., MILSIMEROVÁ, A. *Geometrická úprava dílce z materiálu POM*. 2015.
- [5] FULEMOVÁ, J., BÍCOVÁ, K., KROFT, L., MILSIMEROVÁ, A. *Přípravek pro dovaření držáku čidla*. 2015.
- [6] SKLENIČKA, J., MILSIMEROVÁ, A., KROFT, L., FULEMOVÁ, J. *Optimalizace stříhacího nástroje I.* 2015.
- [7] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., MILSIMEROVÁ, A. *Optimalizace povrchu upínacího nástroje*. 2015.

- [9] SKLENIČKA, J., MILSIMEROVÁ, A., KROFT, L., FULEMOVÁ, J. *Optimalizace stříhacího nástroje II.*. 2015.
- [10] MATĚJKA, J., KROFT, L., MILSIMEROVÁ, A., BÍCOVÁ, K. *Optimalizace tvaru trnu lisovacího přípravku.* 2015.
- [11] MILSIMEROVÁ, A., KROFT, L., BÍCOVÁ, K., SKLENIČKA, J. *Dělený lisovací přípravek.* 2015.
- [13] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., BÍCOVÁ, K., MILSIMEROVÁ, A. *Tvarový frézovaný trn II.*. 2015.
- [14] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., KROFT, L. *Inovativní technologie frézování tvarové desky využitím progresivních strategií.* 2015.
- [15] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., BÍCOVÁ, K., MILSIMEROVÁ, A. *Tvarový frézovaný trn I.*. 2015.
- [16] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., KROFT, L. *Upínací svařovací přípravek z elektrodové mědi CuCrZr.* 2016.
- [17] SKLENIČKA, J., BÍCOVÁ, K., MILSIMEROVÁ, A. *Přípravek pro přivařování a zakládání tenké příruby.* 2016.
- [18] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., KROFT, L. *Přípravek pro dovařování držáku výfukové soustavy.* 2016.
- [19] FULEMOVÁ, J., BÍCOVÁ, K., MILSIMEROVÁ, A., KROFT, L. *Odlehčení dovařovacího přípravku.* 2016.
- [20] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., KROFT, L. *Sada speciální upínek pro svařovací přípravek DACIA II.*. 2016.
- [21] FULEMOVÁ, J., BÍCOVÁ, K., MILSIMEROVÁ, A., KROFT, L. *Speciální ohýbací čelisti pro ohýbačku SILFAX.* 2016.
- [22] HNÁTÍK, J., BÍCOVÁ, K., MILSIMEROVÁ, A. *Geometrická úprava zakládacího dílce z elektrodové mědi CuCrZr.* 2016.
- [23] SKLENIČKA, J., MILSIMEROVÁ, A., BÍCOVÁ, K. *Upínací kostky pro ustavení výfukové soustavy v měřícím přípravku.* 2016.
- [24] MILSIMEROVÁ, A., FULEMOVÁ, J., BÍCOVÁ, K. *Technologie obrábění svařovaného dílce falcovacího přípravku.* 2016.
- [25] FULEMOVÁ, J., BÍCOVÁ, K., MILSIMEROVÁ, A., KROFT, L. *Regenerace vyhlazovacího členu pro výfukové potrubí.* 2016.
- [26] HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., KROFT, L. *Technologie obrobení tvarového dílce ze slitiny elektrodové mědi.* 2016.
- [27] HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., MILSIMEROVÁ, A. *Úprava geometrie tvarových elektrod.* 2016.
- [28] MILSIMEROVÁ, A., BÍCOVÁ, K., FULEMOVÁ, J. *Tvarová kostka pro měřící a řezací přípravek.* 2016.
- [29] KROFT, L., MATĚJKA, J., MILSIMEROVÁ, A. *Technologie obrobení základny měřícího přípravku z cementační oceli.* 2016.

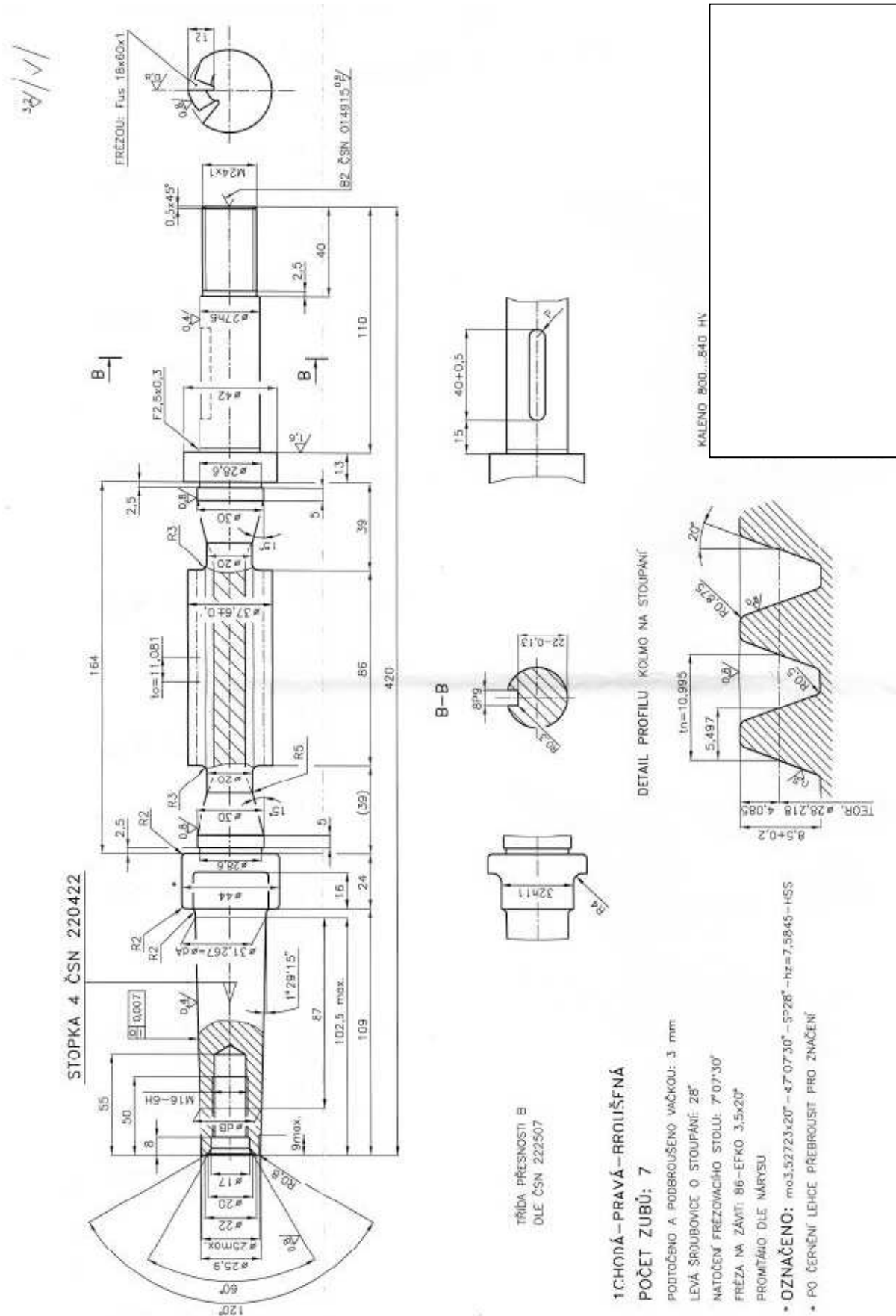
- [30] KROFT, L., FULEMOVÁ, J., MILSIMEROVÁ, A. *Speciální lisovací nástroj průvlastkového typu*. 2016.
- [31] BAKŠA, T., ZETEK, M., MILSIMEROVÁ, A. *Přípravek pro broušení vyvažovacích elementů*. 2017.
- [32] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., BÍCOVÁ, K. *Typová technologie obrobení lisovací vložky*. 2017.
- [33] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., MATĚJKA, J. *Technologie výroby tvarových měděných elektrod II*. 2017.
- [34] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A. *Čelist pro tvarové dělení výfukových trubek*. 2017.
- [35] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A. *Výrobní technologie dílce pro cihlářský průmysl*. 2017.
- [36] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., KROFT, L. *Technologie výroby tvarového trnu z otěruvzdorného materiálu*. 2017.
- [38] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., MILSIMEROVÁ, A., DUCHEK, V. *Geometrická úprava základacího přípravku*. 2017.
- [39] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., FULEMOVÁ, J. *Oprava funkčních ploch lisovacího přípravku*. 2017.

Shrnutí publikačních aktivit autora:

- | | |
|---------------------------|-----|
| - Statě ve sborníku | 5x |
| - Poster | 1x |
| - Prototyp/funkční vzorek | 28x |
| - Ověřená technologie | 9x |

PŘÍLOHA č. 1

Výkres typového představitele odvalovací frézy 1



PŘÍLOHA č. 2

Úryvek normy ČSN ISO 2490

Poskytnuto za poplatek - Západočeská univerzita v Plzni - Ing. Jan Matejka
Rozmnozování a rozšiřování českých technických norem nebo jejich částí bez souhlasu ČAS je porušením zákona č. 22/1997 Sb. a podleha pokutě

ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA

ICS 21.200

Únor 2012

**Celistvé odvalovací frézy na evolventní
ozubení nástrčné, s čelní nebo axiální drážkou,
modul 0,5 až 40 – Jmenovité rozměry**

**ČSN
ISO 2490**

22 2552

Solid (monobloc) gear hobs with tenon drive or axial keyway, 0,5 to 40 module – Nominal dimensions

Fraises-mères monoblocs à entraînement par tenon ou par clavette, de modules 0,5 à 40 – Dimensions nominales

Tato norma je českou verzí mezinárodní normy ISO 2490:2007. Překlad byl zajištěn Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Má stejný status jako oficiální verze.

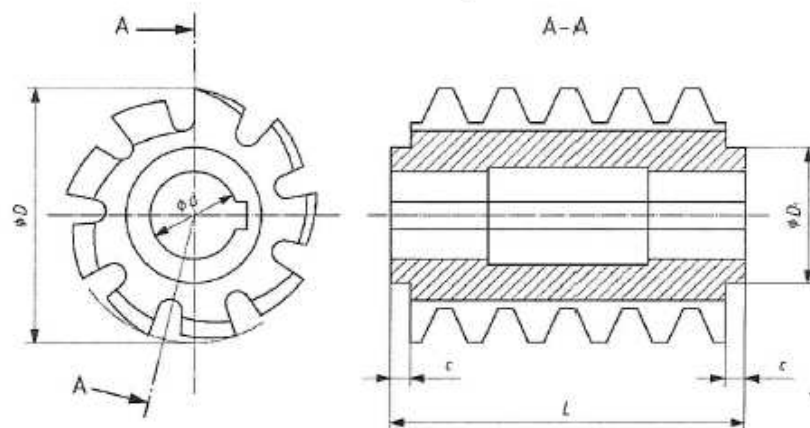
This standard is the Czech version of the International Standard ISO 2490:2007. It was translated by Czech Office for Standards, Metrology and Testing. It has the same status as the official version.

Poskytnuto za poplatek - Západočeská univerzita v Plzni - Ing. Jan Matejka
Rozmnožování a rozšiřování českých technických norem nebo jejich částí bez souhlasu ČAS je porušením zákona č. 22/1997 Sb. a podleha pokutě

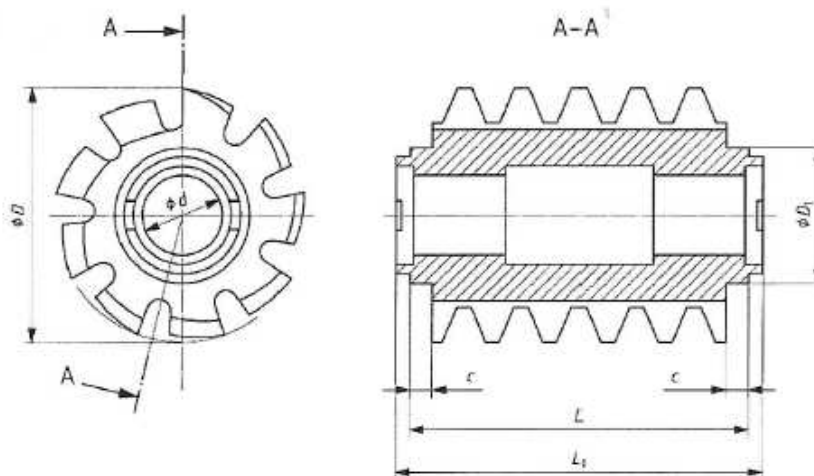
ČSN ISO 2490

3 Jmenovité rozměry

Jmenovité rozměry musí být tak, jak jsou uvedeny v obrázku 1 a dány v tabulkách 1 a 2.



a) Odvalovací fréza s axiální drážkou



b) Fréza s čelní drážkou

Legenda

- ϕD_1 průměr středícího nákrčku (mm)
- ϕD vnější průměr (mm)
- ϕd průměr upínací díry (mm)
- L celková délka frézy s axiální drážkou (mm)
- L_1 celková délka frézy s čelní drážkou (mm)
- c minimální délka frézy (mm)

POZNÁMKA Rozměry drážky jsou specifikovány v ISO 240 a rozměry čelní drážky jsou specifikovány v ISO 2780.

Obrázek 1 – Rozměry odvalovací frézy

Poskytnuto za poplatek - Západočeská univerzita v Plzni - Ing. Jan Matejka
Rozmnožování a rozšiřování českých technických norem nebo jejich částí bez souhlasu CAS je porušením zákona č. 22/1997 Sb. a podléhá pokutě

ČSN ISO 2490

Tabulka 2 – Jmenovité rozměry odvalovacích fréz

Modul, m		Průměr středícího nákrůžku D_1 mm	Vnější průměr D^a mm	Průměr upínací díry d^b mm	Odkaz			
Řady					Celková délka L^a mm	Celková délka L_0^a mm	Minimální délka frézy c mm	Obvyklý počet řezných drážek
I	II							
1	–	Průměr je na volbě výrobce	50	22	50	65	4	14
–	1,125		50	22	50	65	4	14
1,25	–		50	22	50	65	4	14
–	1,375		50	22	50	65	4	14
1,5	–		55	22	55	70	4	14
–	1,75		55	22	55	70	4	14
2	–		65	27	60	75	4	14
–	2,25		65	27	60	75	4	14
2,5	–		70	27	65	80	4	14
–	2,75		70	27	65	80	4	14
3	–		75	32	70	85	4	14
–	3,5		80	32	75	90	4	14
4	–		85	32	80	95	4	14
–	4,5		90	32	85	100	4	14
5	–		95	32	90	105	4	14
–	5,5		100	32	95	110	5	12
6	–		105	32	100	115	5	12
–	6,5		110	32	110	125	5	12
–	7		115	32	115	130	5	12
8	–		120	32	140	160	5	10
–	9		125	32	140	160	5	10
10	–		130	32	170	190	5	10
–	11		150	40	170	190	6	9
12	–		160	40	200	220	6	9
–	14		180	40	200	220	6	9
16	–		200	50	250	275	6	9
–	18		220	50	250	275	6	9
20	–		240	60	300	325	6	9
–	22		250	60	300	325	6	9
25	–		280	60	360	385	6	9
–	28		320	80	400	430	6	9
32	–		350	80	450	480	6	9
–	36		380	80	450	480	6	9
40	–		400	80	480	510	6	9

^a Tolerance rozměrů D , L a L_0 musí být „hrubá“ třída, jak je uvedeno v ISO 2768-1.
^b ISO 2780 (rozměry čelní drážky) udává pouze průměrné hodnoty pro upínací díry nad 50 mm.

PŘÍLOHA č. 2

Úryvek normy ČSN ISO 014607

Poskytnuto za poplatek - Západočeská univerzita v Plzni - Ing. Jan Matojka
Rozmnozování a rozšiřování českých technických norem nebo jejich částí bez souhlasu CAS je porušením zákona č. 22/1997 Sb. a podléhá pokutě

MDT 621.838.1

ČESKOSLOVENSKÁ STÁTNÍ NORMA

Schválena: 20. 11. 1978

ČSN 01 4607 ★
ST SEV 308-76



OZUBENÁ KOLA ČELNÍ
S EVOLVENTNÍM OZUBENÍM
Základní profil

ČSN 01 4607 ★
ST SEV 308-76

= 2015-20

Передачи зубчатые цилиндрические
эвольвентные.
Исходный контур

Involute cylindrical gears.
Basic rack

Touto normou se zavádí

ST SEV 308-76 Ozubená kola čelní s evolventním ozubením. Základní profil (viz str. 3 až 8) jako čs. státní norma.

Ve smluvně právních vztazích při hospodářské a vědeckotechnické spolupráci mezi státy, které normu RVHP schválily (viz str. 8), se používá (v odvolávkách, citacích a odkazech) přímo norma RVHP.

V ČSSR nebudou používána ustanovení informační přílohy 1.

DODATEK

Související čs. normy

ČSN 01 4608 Ozubená kola. Moduly (obsahuje ST SEV 310-76)

V ST SEV 308-76 je odkaz na:

ST SEV 641-77 — zpracování do čs. norem se připravuje, zatím platné

RS 3352-71, které do čs. norem zpracováno nebylo.

Obdobné mezinárodní normy

ISO 53-1974 Cylindrical gears for general and heavy engineering
— Basic rack

(Čelní ozubená kola pro všeobecné a těžké strojírenství
— Základní profil)

ČSN 01 4607 odpovídá této mezinárodní normě mimo velikost mezní hodnoty součinitele výšky modifikace hlavy zubu h^*_g .

Změny proti předchozímu vydání

Norma dovoluje zvětšení hlavové vůle c způsobené změnou patního průměru pro určité, v normě vyjmenované, případy.

Nahrazuje ČSN 01 4607 z 18. 2. 1966

Účinnost od:
1. 1. 1980

00121

Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, Praha

Poskytnuto za poplatek - Západočeská univerzita v Plzni - Ing. Jan Matejka
Rozmnožování a rozšiřování českých technických norem nebo jejich částí bez souhlasu CAS je porušením zákona č. 22/1997 Sb. a podléhá pokutě

MDT 621.833.1

RADA VZÁJEMNĚ HOSPODÁŘSKÉ POMOCI	NORMA RVHP	ST SEV 308-76
	Základní pravidla vyměnitelnosti OZUBENÁ KOLA ČELNÍ S EVOLVENTNÍM OZUBENÍM Základní profil	Nahrazuje RS 176-64 Skupina G 15

20.5.20. 14

Tato norma RVHP se vztahuje na čelní ozubená kola s evolventním ozubením a stanoví normální jmenovitý základní profil ozubených kol s modulem 1 mm a větším.

1. Tvar a rozměry základního profilu musí odpovídat údajům na obr. 1.

SDRUŽENÉ ZÁKLADNÍ PROFILY

Obr. 1

Stanoví se následující parametr a součinitelé základního profilu:

- úhel profilu $\alpha = 20^\circ$;
- součinitel výšky hlavy zubu $h_a^* = 1$;
- součinitel výšky paty zubu $h_f^* = 1,25$;
- součinitel výšky zubu základního profilu nad přechodovou křivkou $h_t^* = 2$;
- součinitel poloměru kružnice zaoblení přechodové křivky $\rho^*_1 = 0,38$;
- součinitel společné výšky zubů sružených základních profilů $h_w^* = 2$;
- součinitel hlavové vůle sružených základních profilů $c^* = 0,25$.

Schváleno Stálou komisí pro normalizaci
Friedrichroda, prosinec 1976

Tato norma RVHP je závazná v rámci Úmluvy o uplatňování norem RVHP

(Str. 3 — ČSN 01 4607)

PŘÍLOHA č. 4

Zkušební protokol z měřicího zařízení Zoller

Zkušební protokol

1 / 1

»genius Standard«

6.9.2018

Uživatel

zoller

10:51:32



Ident-č. _____

Ozn. _____

Komentář _____

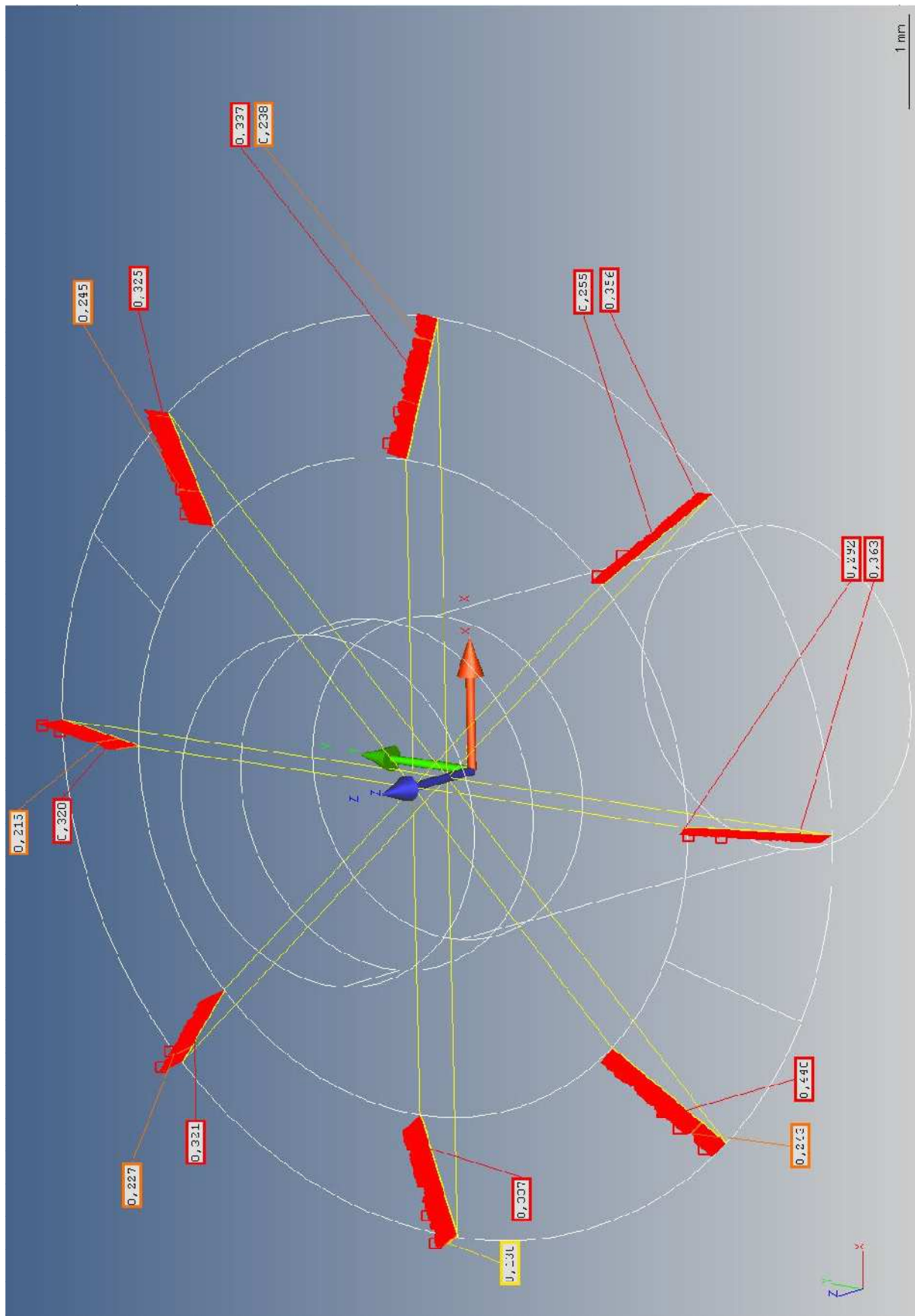
Zkušební technik _____

Stupeň/Výsledek	.	Mod.	řad.hodn.	H. tol.	S. tol.	Skut.hodn.	řzd.hodn.	Tolerance
1	Délka	Z	RA	185,783		186,339	0,556	
1	Příčná hodn.	X	RA	44,723		45,463	0,740	
1	Rádus	R				0,827		
1	Úhel 1	U1				183,77		
1	Úhel 2	U2				57,27		

Všechny jednotky délky v Milimetr, všechny jednotky úhlu v Stupně decimálně

PŘÍLOHA č. 5

Naměřená data po orovnění brusného kotouče



PŘÍLOHA č. 6

Naměřená data po korekci



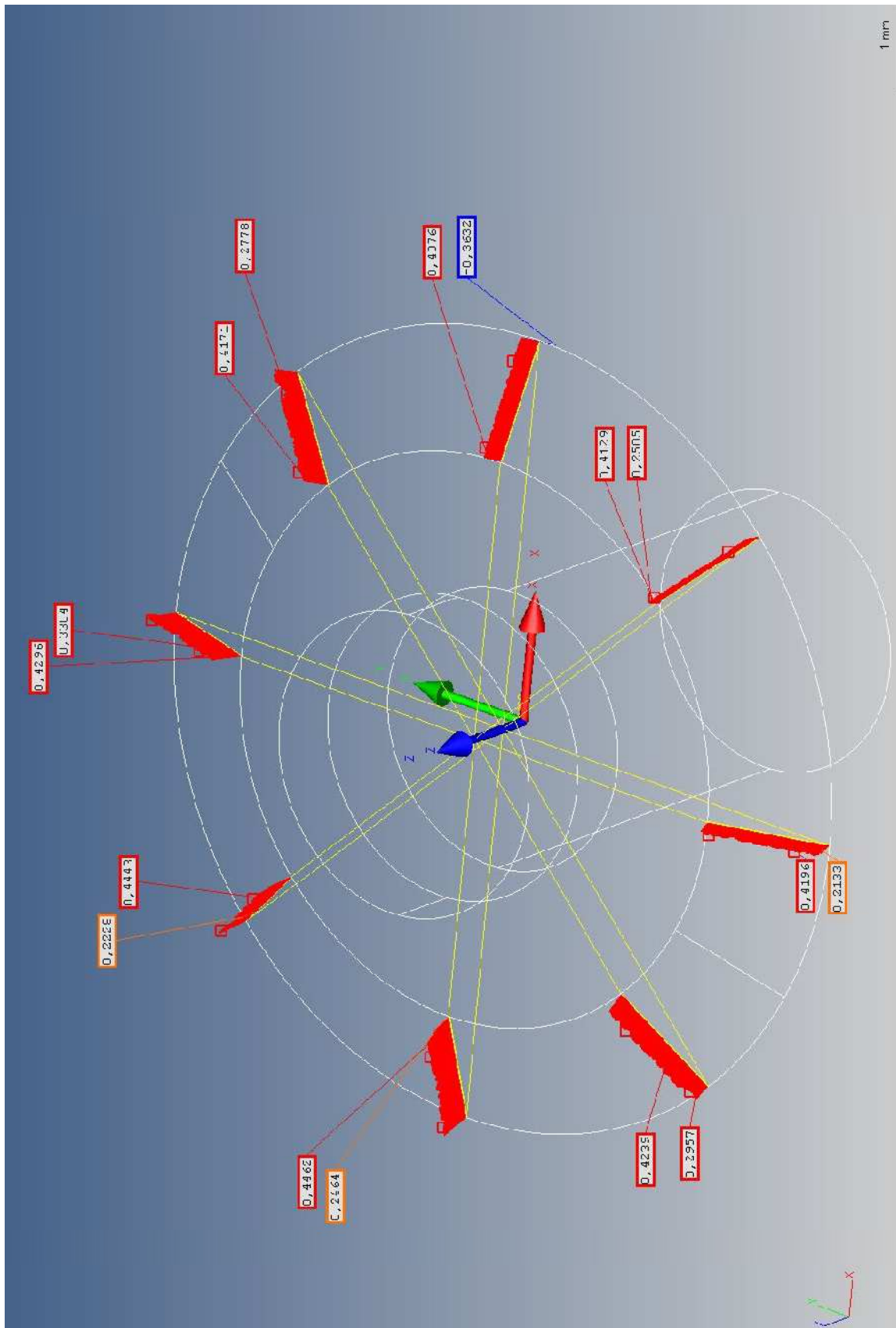
PŘÍLOHA č. 7

Měřicí protokol odvalovacích fréz

MERICI PROTOKOL ODVALOV. FŘEZ			MODUL PŘEDDIS						NAMĚŘENÁ HODNOTA	
ZN.	ČV.	ČÍSLO	OD	21	36	64	101	161		
DATUM		PODPIS	DO	2	35	63	10	16	25	
1		ÚCHYLKA UPÍNAČÍ DÍRY	AA	H5						
			A	H5						
			B	H6						
			C	H6						
2		OBVODOVÉ HÁZENÍ NÁKRUŽKŮ	AA	3	3	4	5	6	9	
			A	5	5	6	8	10	14	
			B	7	8	10	12	16	22	
			C	7	8	10	12	16	22	
3		ČELNÍ HÁZENÍ NÁKRUŽKŮ	AA	2	3	3	4	5	7	
			A	4	4	5	6	8	11	
			B	6	6	8	10	12	18	
			C	6	6	8	10	12	18	
4		OBVODOVÉ HÁZENÍ VNĚJŠÍHO PRŮMĚRU	AA	14	16	19	24	32	45	
			A	22	25	30	38	50	70	
			B	40	45	53	65	90	125	
			C	60	90	105	130	180	250	
5		ROVINNOST ČELA ZUBŮ	AA	11	12	15	19	25	36	
			A	18	20	24	30	40	55	
			B	32	36	42	53	70	100	
			C	32	36	42	53	70	100	
6		ROZDĚLENÍ MEZI DVĚMA SOUSED. HŘEBENŮ	AA	14	16	19	24	32	45	
			A	22	25	30	38	50	70	
			B	40	45	53	65	90	125	
			C	40	45	53	65	90	125	
7		ROZDĚLENÍ ZUBŮ NA 1 OTOČKU	AA	26	30	36	45	60	85	
			A	42	48	55	70	95	130	
			B	75	85	100	125	170	240	
			C	75	85	100	125	170	240	
8		ÚCHYLKA STOUP ŠROUBOVICE NA 100mm DÉLKY	AA	±60						
			A	±80						
			B	±100						
			C	±140						
9		ÚCHYLKA PROFILU ŘEZNÉ HRANY	AA	5	5	6	8	10	14	
			A	7	8	10	12	16	22	
			B	14	16	19	24	32	45	
			C	28	32	38	48	60	80	
10		ÚCHYLKA TLOUŠŤKY ZUBU (JEN MINUS)	AA	32	36	42	53	70	100	
			A	32	36	42	53	70	100	
			B	60	70	85	105	140	200	
			C	60	70	85	105	140	200	
11		ÚCHYLKA STOUP ŠROUBOVICE DOKŮ ZUBŮ SOUSED. HŘEBENŮ	AA	4	5	5	7	9	12	
			A	6	7	9	11	14	20	
			B	12	14	17	21	28	40	
			C	25	28	34	42	55	80	
12		ÚCHYLKA ZÁKLADNÍCH ROZTEČÍ NA 1 OTOČKU	AA	7	8	10	12	16	22	
			A	11	12	15	19	25	36	
			B	22	25	30	38	50	70	
			C	45	50	60	75	100	140	
13		SOUČTOVÁ ÚCHYLKA ZÁKLADNÍCH ROZTEČÍ NA 3 OTOČKY	AA	12	14	17	21	28	40	
			A	20	22	26	34	45	60	
			B	40	45	53	65	90	125	
			C	80	90	105	130	180	250	
14		ÚCHYLKA ZÁBĚROVÉ ROZTEČE SOUSED. ŘEZ. HLAVN. ZUBŮ	AA	4	5	5	7	9	12	
			A	6	7	9	11	14	20	
			B	12	14	17	21	28	40	
			C	25	28	34	42	55	80	
15		SOUČTOVÁ ÚCHYLKA ZÁBĚROVÝCH ROZTEČÍ V ROZSAHU DÉLKY ZÁBĚRU	AA	9	10	12	15	20	28	
			A	14	16	19	24	32	45	
			B	28	32	38	48	60	90	
			C	56	64	76	96	120	180	

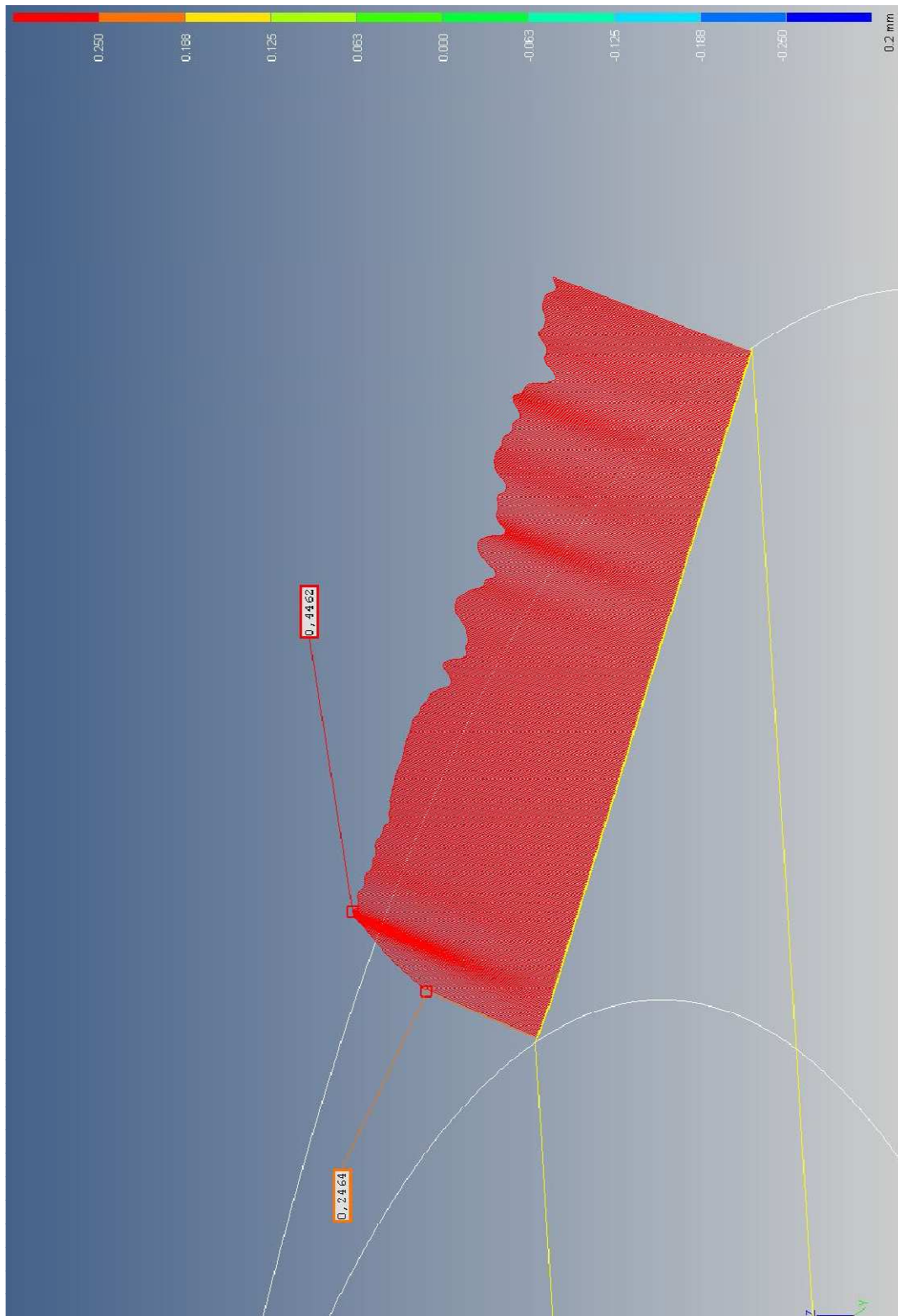
PŘÍLOHA č. 8

Naměřená data brusného kotouče po broušení



PŘÍLOHA č. 9

Naměřená data brusného kotouče po broušení – detail profilu 1



PŘÍLOHA č. 10

Naměřená data brusného kotouče po broušení – detail profilu 2

