

Metody zefektivnění konstrukce rezných nástrojů

Disertační práce

Autor: Ing. Pavel Roud

Školitelé: Doc. Ing. Josef Škarda CSc.

Ing. Pavel Kožmín Ph.D.

Březen 2013

Garance a vedení disertační práce

Vedoucí katedry :	Doc.Ing. Jan Řehoř Ph.D	ZČU, FST-KTO
Vedoucí oddělení :	Ing. Miroslav Zetek Ph.D	ZČU, FST-KTO
Školitelé :	Doc. Ing. Josef Škarda CSc.	ZČU, FST-KTO
	Ing. Pavel Kožmín Ph.D.	HOFMEISTER s.r.o.

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne 18.2.2013

.....

podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků disertační práce včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval mým dvěma školitelům Doc. Ing. Josefu Škardovi CSc. a Ing. Pavlu Kožmínovi Ph.D. za jejich vedení, cenné rady včetně morální podpory během mého studia i zpracování této disertační práce.

Dále bych chtěl poděkovat Katedře Technologie Obrábění a firmě HOFMEISTER s.r.o. za zázemí, které mi během celého studia poskytovaly. Nemale poděkování směřuji ke Katedře Matematiky při Fakultě Aplikovaných Věd za cenné rady z oblasti matematických výpočtů a geometrického modelování. Rovněž velice děkuji Ing. Kamilu Ekštejnovi Ph.D. a Bc. Janu Vodičkovi z Katedry Informatiky při Fakultě Aplikovaných Věd za pomoc v oblasti programování.

Velký dík patří také mojí rodině a přátelům, bez jejichž podpory bych nemohl tuto práci zpracovat.

Tato disertační práce vznikla také za podpory projektu ESF OP VpK. Realizace projektu „Posílení spolupráce mezi vysokými školami, výzkumnými ústavami a průmyslovými partnery v Plzeňském kraji - CZ.1.07/2.4.00/17.0052“ umožnila konzultaci s předními odborníky z průmyslové sféry. Dále bylo využito spolupráce v rámci projektu SGS-2012-044 „Aplikace progresivních vrstev na řezné nástroje s důrazem na integritu obrobeneho povrchu a řezné hrany“. Dále práce využila podpory projektu OPPI na podporu znalostního transferu *„Zlepšení technicko-technologických procesů ve firmě HOFMEISTER“*.

Anotace

Disertační práce *Metody zefektivnění konstrukce řezných nástrojů* se zabývá zefektivněním oblasti technologické přípravy výroby monolitních řezných nástrojů pomocí obecných CAD systémů.

V úvodní části této práce je provedeno představení základních typů řezných nástrojů ve vazbě na systém přípravy jejich výroby. Z tohoto pohledu jsou monolitní nástroje specifické, jelikož lze využít dva různé způsoby. První spočívá ve využití speciálních CAD systémů, které jsou dodávány spolu s výrobním zařízením. Druhý způsob spočívá ve využití obecných CAD systémů. Jejich hlavní výhodou spočívá ve svobodě návrhu a v možnosti tvorby výkresové dokumentace přímo v prostředí CAD systému. Nicméně s ohledem na efektivitu a způsob vytváření jednotlivých prvků na monolitním řezném nástroji s pohledu technologie výroby, obecné CAD systémy nedosahují takových kvalit jako speciální CAD systémy. Zejména z pohledu efektivity vytváření modelu řezného nástroje. Jediný způsob, jak tyto nevýhody odstranit spočívá ve využití automatizačních technik dostupných v dnešních obecných CAD systémech. Proto je součástí úvodní části analýza těchto automatizačních nástrojů v CAD systému CATIA V5 R19. Úvodní část dále obsahuje výběr typového představitele monolitního řezného nástroje. Z analýzy specifik jednotlivých technologií třískového obrábění byla vybrána oblast vrtacích nástrojů. Jako typový představitel byl vybrán monolitní šroubovitý vrták. Hlavním důvodem je složitost geometrie břitu, která spočívá v proměnlivosti řezných úhlů čela, hřbetu a sklonu hlavního ostří po průměru tohoto nástroje.

Obsahem druhé kapitoly je hlubší analýza geometrie monolitního šroubovitého vrtáku, která se opírá o informace získané z odborných zdrojů či z přímé zkušenosti autora. V této analýze je zvolený řezný nástroj rozdělen na jednotlivé prvky. U šroubovitě drážky se popis zaměřuje na popis přístupů k jejímu návrhu s ohledem na odvod třísek, pevnost a tuhost nástroje a jeho hlavního břitu. V případě hrotu jsou představeny různé tvořící plochy a jejich vliv na silové zatížení nástroje či na tvar příčného ostří. Oblast fazet se zaměřuje na představení jejich jednotlivých modifikací a popisu vlivu na stabilitu nástroje, která ovlivňuje přesnost vyráběného otvoru. Samostatnou část tvoří popis úprav, které zvyšují užité vlastnosti monolitního šroubovitého vrtáku. Tato část obsahuje popis způsobů redukce délky příčného ostří a mikrogeometrické úpravy hlavního břitu ve formě fazet či zaoblení.

V třetí a stěžejní kapitole této disertační práce je představen nový přístup k modelování monolitního šroubovitého vrtáku. Tento přístup využívá spojení automatizačních nástrojů dostupných v systému CATIA V5 s vlastně vytvořeným externím matematickým řešičem pro provedení potřebných výpočtů. Cílem tohoto přístupu je zohlednění technologie výroby monolitního šroubovitého vrtáku při vytváření jeho jednotlivých prvků, ale pouze tam, kde je nezbytný. Konkrétně pro šroubovitou drážku a fazety.

U těchto prvků jsou popsány matematické metody spolu s jejich praktickou aplikací, která vede na odvození konkrétních rovnic potřebných pro prováděné výpočty. U hrotu a redukce délky příčného ostří jsou představeny iterační polohovací algoritmy pro dosažení požadované efektivity modelování těchto prvků. Současně jsou představeny i konkrétní časové úspory plynoucí s využitím popisovaných metod. Kapitola dále obsahuje popis dodatečných modulů sloužících např. pro analýzu geometrie monolitního šroubovitého vrtáku, jejichž výstup mohou využívat další programy. Dále je představen modul sloužící pro vymodelování ochranné fazety na hlavním břitu v kvalitě přesahující možnosti nativních funkcí CAD systému CATIA V5 R19.

Čtvrtá a poslední kapitola této práce představuje další nástroje pro zefektivnění návrhu monolitního šroubovitého vrtáku. Konkrétně se jedná o využití expertních systémů pro podporu volby geometrie řezného nástroje. Dále kapitola představuje využití metody MKP pro analýzu vlivu geometrie řezného nástroje na tvorbu třísky a termomechanické zatížení nástroje i obráběného materiálu pomocí speciálního softwaru AdvantEdge FEM. Součástí popisu jsou i omezení použitého softwaru, které byly zjištěny na základě autorovi zkušenosti a které nejsou obsahem většiny odborných článků. V závěru je provedeno shrnutí a představení hlavních přínosů této disertační práce.

Anotation

This Ph.D thesis "Methods for effective creation of solid cutting tools" is focused on improving effectivity in the field of cutting tools modeling using general CAD systems.

The basic types of cutting tools with respect to the system of their modeling for manufacturing purposes is presented in the first chapter. The solid cutting tools are specific from this point of view, due to presence of two different approaches. The first one uses for modeling process dedicated CAD systems, which are delivered with machine tools. The second one uses the general CAD systems. The main advantages of this approach is the freedom of design process and ability to create drawing documentation directly from CAD system. However these systems do not achieved desired modeling productivity and do not reflect the technological process of solid cutting tool as dedicated CAD systems do. The only way how to eliminate these disadvantages of general CAD systems is to use automation techniques which are available in these systems. For this reason the description of automation techniques is also presented in the first chapter. Furthure more the first chapter includes the analysis of specified properties of different manufacturing processes. Based upon this analysis the field of drilling technology was selected. The solid twist drill was selected as representative of cutting tools used in this field. Mainly due to the variation of rake, flank angles and cutting lip shape over the diameter of this cutting tool.

The second section includes deeper analysis of solid twist drill geometry based upon information gathered from technical papers and from author's experience. In this analysis the solid twist drill is split into basic elements. In the case of flute the description is focused on design approaches used in order to satisfy chip removal, strength and stiffnes of cutting tool and cutting wedge. Types of creation surfaces and their influence on mechanical loads and the shape of chisel edge are presented in section focused on twist drill point. Facets and their the influence of their modification on twist drill stability which ifluences hole quality is furthure presented. The separate section is focused on types of chisel edge thinning and cutting lip microgeometry preparation using facets and rounding.

The third and main chapter of this work presents new approach for solid twist drill modeling. This approach uses combination of automation techniques in CATIA V5 R19 and ownly developed external solver in order to provide necessary calculations. The main aim of this approach is to include the technological process in solid twist drill modeling, but only where it's necessary. This means only in the case of the flute and facets of solid twist drill.

In the description of these features the description of mathematical methods and their application, which leads on derivation of formulas used in calculations. In order to achieve desired modeling productivity the iterative positioning algorithms are presented for the case of drill point and chisel edge thinning. The chapter includes description of additional modules f.eg which is focused on analysis of solid twist drill geometry and the results of this analysis can be further used in other programs. The other module creates the cutting lip facet in higher quality than native function of CAD system CATIA V5 R19.

The fourth and last chapter describes additional tools for improving of solid twist drill design process. Use of expert systems for cutting tool geometry selection is presented. The description also includes the use of FEM for cutting tool geometry analysis and its influence on chip formation and thermomechanical load of cutting tool and workpiece material using dedicated FEM software AdvantEdge FEM. Limitations which aren't included in technical papers of this software are also presented and was gathered by author's experience. In the summary the main benefits of this work are presented.

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Řezné nástroje z pohledu konstrukce	1
1.2 Výběr typového představitele řezného nástroje	3
1.3 Využití automatizace CAD systému pro efektivní vytváření modelu monolitního šroubovitého vrtáku	5
1.3.1 Analýza automatizačních nástrojů v CATIA V5	6
2 Geometrické prvky na monolitním šroubovitém vrtáku	10
2.1 Drážka	10
2.2 Hrot	14
2.3 Fazety	17
2.4 Úpravy zvyšující užité vlastnosti	19
2.4.1 Redukce délky příčného ostří	19
2.4.2 Úpravy mikrogeometrie břitu	21
3 Nový přístup k modelování monolitního šroubovitého vrtáku	25
3.1 Drážka	29
3.1.1 Vytváření šroubovité drážky pomocí graficko-početní metody	29
3.1.2 Implementace vytváření drážky pomocí graficko-početní metody	35
3.2 Fazety	38
3.2.1 Vytváření fazet pomocí graficko - početní metody	38

3.3	Hrot	44
3.3.1	Vytváření hrotu s kuželovou plochou hřbetu	44
3.3.2	Implementace vytváření kuželové plochy hrotu	46
3.4	Redukce délky příčného ostří	51
3.4.1	Vytváření redukce délky příčného ostří	51
3.4.2	Implementace redukce příčného ostří	53
3.5	Implementace mikroúprav na břitu nástroje	59
3.6	Implementace analýzy geometrie monolitního šroubovitého vrtáku	61
3.7	Implementace vytváření výkresové dokumentace	64
4	Závěr a vyvození budoucích trendů	66
4.1	Budoucí trendy v oblasti rezných nástrojů	66
4.1.1	Expertní systémy	66
4.1.2	Využití metody MKP pro analýzu břitu rezného nástroje	67
5	Závěr	69
	Literatura	73
A	Příloha	I
I	Uživatelské rozhraní jednotlivých modulů	II
II	Ukázka výkresové dokumentace	XII

Seznam použitých zkratk

A [%] - Tažnost

A_{OK} - Počáteční bod na ose brousícího kotouče pro danou hodnotu parametru t

A_{OKfa} - Počáteční bod na ose brousícího kotouče pro danou hodnotu parametru t při vytváření šroubovitě drážky

A_{TK} - Počáteční bod na tvaru brousícího kotouče pro danou hodnotu parametru t

b_{fa} [mm] - Šířka ochranné fazety hlavního ostří v rovině P_f u ochranné fazety

B_k [mm] - Šířka brousícího kotouče

B_{kfa} [mm] - Šířka brousícího kotouče při vytváření fazet

B_s [mm] - Bod na ose brousícího kotouče

CBN - Cubic Boron Nitride - Kubický nitrid boru

CAD - Computer Aided Design - Počítačová podpora konstruování

CAM - Computer Aided Manufacturing - Počítačová podpora výroby

D_j [mm] - Požadovaný průměr jádra ve vzdálenosti špičky vrtáku

D_{jk} [mm] - Průměr jádra na konci drážky nástroje $D_{(jm)}$ [mm] - teoretická hodnota průměru jádra (k)

$D_{(jm+1)}$ [mm] - Teoretická hodnota průměru jádra v kroku ($k+1$)

D_k [mm] - Diskretizace brousícího kotouče

D_d [mm] - Diskretizace dráhy brousícího kotouče

D_D [mm] - Jmenovitý průměr vyráběné díry

D_c [mm] - Jmenovitý průměr nástroje

D_s [mm] - Diskretizace dráhy středu kulové plochy

D_{sm} [mm] - Hodnota skutečného průměru jádra v kroku k při vytváření příčného ostří

DXF - Drawing Interchange Format - Formát pro výměnu dat u technických výkresů

F_f [N] - Posuvová složka rezné síly

HRC - Tvrdost materiálu dle Rockwella při použití diamantového kužele jako indentoru

HSS - High Speed Steel - Rychlořezná ocel

$HSS-Co$ - High Speed Steel - Rychlořezná ocel s obsahem kobaltu

$IGES$ - Initial Graphics Exchange Specification - Počáteční specifikace výměny grafických dat

IT - Stupeň přesnosti

K_{IC} [$MPa^{-1}m^{1/2}$] - Lomová houževnatost

K_{ch} - Charakteristika kulové plochy v daném řezu brousícího kotouče

K_{chfa} - Charakteristika kulové plochy v daném řezu brousícího kotouče při vytváření fazet

K_{ri} - Rovnoběžková kružnice brousícího kotouče, která vzniká řezem brousícího kotouče kolmou rovinou na jeho osu

K_{sfa} - Dráha středu kulové plochy při vytváření fazet

K_{TR} - Transformovaná kružnice představující řez brousícího kotouče do výchozí polohy

- K_{TRfa} - Transformovaná kružnice představující řez brousícího kotouče do výchozí polohy při vytváření fazet
- K_{TR2} - Transformovaná kružnice představující řez brousícího kotouče do vyšetřované polohy
- k_{TRv} - Homogenní matice kružnice transformované do požadované polohy při vytváření redukce délky příčného ostří
- K_{xy} - Kružnice představující charakteristiku kulové plochy umístěná v rovině xy
- K_{xyfa} - Kružnice představující charakteristiku kulové plochy umístěná v rovině xy při vytváření fazet
- K_{yz} - Kružnice představující řez brousícího kotouče umístěná v rovině yz
- K_{yzv} - Homogenní matice kružnice transformované v rovině yz při vytváření redukce délky příčného ostří
- L_D [mm] - Hloubka vyráběné díry
- L_{Dr} [mm] - Délka šroubovitě drážky
- L_{Dfa} [mm] - Délka šroubovitě drážky při vytváření fazet
- L_p [mm] - Délka příčného ostří
- $L_{(pi)}$ [mm] - Teoretická hodnota délky příčného ostří v kroku (i), který ovlivňuje hodnotu příčného ostří
- $L_{(pi+1)}$ [mm] - Teoretická hodnota délky příčného ostří v kroku (i+1)
- L_{ps} [mm] - Skutečná hodnota délky příčného ostří
- L_{pp} [mm] - Požadovaná hodnota délky příčného ostří
- L_v [mm] - Délka vyjetí
- L_{psi} [mm] - Hodnota skutečné délky příčného ostří v kroku i
- MKP* - Metoda konečných prvků
- PLM* - Product lifecycle management - Správa životního cyklu výrobku
- R_a [μm] - Drsnost povrchu vyhodnocená dle průměrné aritmetické odchylky
- R_e [MPa] - Mez pevnosti v kluzu
- r_k [mm] - Poloměr kružnice představující řez brousícím kotouče umístěná v rovině yz
- R_K [mm] - Poloměr brousícího kotouče při vytváření redukce délky příčného ostří
- R_{Kuz} [mm] - Poloměr kuželové plochy
- R_m [MPa] - Smluvní mez pevnosti v tahu
- R_v [mm] - Poloměr vyjetí u příčného ostří
- PCD* - Polycrystalline Diamond - Polykrystalický diamant
- R_n [μm] - Poloměr zaoblení hlavního ostří v normálové rovině P_n
- SK* - Slinutý Karbid
- STEP* - Standard for the exchange of product model data ISO 10303 - Norma pro výměnu dat výrobku dle normy ISO 10303
- S_α [μm] - Vzdálenost od teoretického průsečíku ideálně ostrého břitu na začátek poloměru zaoblení hlavního ostří na ploše hřbetu
- S_γ [μm] - Vzdálenost od teoretického průsečíku ideálně ostrého břitu na začátek poloměru zaoblení hlavního ostří na ploše čela

- TRS [MPa] - Transverse Rupture Strength - Pevnost v ohybu SK dle normy EN 23 327 [72]
 s [mm] - Hodnota stoupání šroubovice
 s_{fa} [mm] - Hodnota stoupání šroubovice u fazet
 T_{K1} - Matice posunutí řezu kotouče do počátku souřadného systému
 T_{kv1} - Homogenní matice posunutí kružnice při vytváření redukce délky příčného ostří
 T_{kv2} - Homogenní matice rotace okolo osy Y obrobku při vytváření redukce délky příčného ostří
 T_{kv3} - Homogenní matice rotace okolo osy Z obrobku při vytváření redukce délky příčného ostří
 T_{kv4} - Homogenní matice posunutí do požadované polohy při vytváření redukce délky příčného ostří
 T_{K2} - Homogenní matice rotace okolo osy Z obrobku o úhel γ_{na}
 T_{Kfa2} - Homogenní matice rotace okolo osy Y obrobku o úhel β_{fa}
 T_{K3} - Homogenní matice rotace okolo osy Y obrobku o úhel β_k
 T_{Kfa3} - Homogenní matice rotace okolo osy Z obrobku o úhel γ_{fa}
 T_{K4} - Homogenní matice posunutí do bodu na ose kotouče
 T_{Kfa4} - Homogenní matice posunutí do bodu na ose kotouče
 T_{K5} - Homogenní matice posunutí do bodu ve směru jádra
 T_{K5fa} - Homogenní matice posunutí do bodu ve směru jádra
 T_{K6} - Homogenní matice posunutí ve směru osy Z obrobku
 T_{kfa6} - Homogenní matice posunutí kružnice ve směru osy Z obrobku pro danou hodnotu l při vytváření fazet
 T_{K7} - Homogenní matice rotace okolo osy Z obrobku
 T_{Kfa7} - Homogenní matice rotace kružnice okolo osy Z vyjadřující pootočení při posunutí o hodnotu l při vytváření fazet
 T_{K8} - Homogenní matice rotace kolem osy X obrobku o odchylku α_2 mezi vektorem v_{sT} a jeho průmětem do roviny xz
 T_{Kfa8} - Homogenní matice posunutí z počátku souřadného systému do bodu na ose brousícího kotouče v základní poloze
 T_{k9} - Homogenní matice rotace kolem osy Y obrobku o odchylku β_2 mezi vektorem v_{sT} a osou Z
 T_{kfa9} - Homogenní matice rotace okolo souřadné osy X o hodnotu α_{fa}
 T_{k10} - Homogenní matice rotace kolem osy Z o odchylku γ_4 vyjadřující pootočení brousícího kotouče při jeho pohybu drážkou nástroje
 T_{kfa10} - Homogenní matice rotace okolo souřadné osy Y obrobku o hodnotu β_{fa2}
 T_{k11} - Homogenní matice posunutí do vyšetřované polohy řezu kotouče
 T_{kfa11} - Homogenní matice rotace okolo souřadné osy Z obrobku o hodnotu γ_{fa4}
 T_{Lp} [mm] - Povolená odchylka mezi L_{ps} a L_{pp}
 T_α [°] - Povolená odchylka mezi α_{fs} a α_{fp}
 T_ϵ [°] - Povolená odchylka mezi ϵ_{fs} a ϵ_{fp}
 T_{λ_v} [°] - Povolená odchylka mezi λ_{vs} a λ_{vp}
 T_Ψ [°] - Povolená odchylka mezi Ψ_{ps} a Ψ_{pp}

\vec{p} [mm] - Vektor posunutí brousícího kotouče vůči počátku souřadného systému obrobku

\vec{p}_{fa} [mm] - Vektor posunutí brousícího kotouče vůči počátku souřadného systému obrobku - Při vytváření fazet

p_{fax} - X-ová souřadnice vektoru posunutí brousícího kotouče vůči počátku

\vec{u} - Polohový vektor přímky určující tvar brousícího kotouče

\vec{v}_s [mm] - Tečný vektor šroubovice při vytváření plochy drážky

\vec{v}_{sT} [mm] - Transformovaný tečný vektor v počátku souřadného systému

\vec{v}_{sf} [mm] - Tečný vektor k dráze středu kulové plochy v bodě na ose brousícího kotouče

\vec{v}_{sfa} [mm] - Tečný vektor k dráze středu kulové plochy v bodě na ose brousícího kotouče při vytváření fazet

\vec{v}_{sTfa} [mm] - Transformovaný tečný vektor \vec{v}_{sfa} do základní polohy brousícího kotouče

\vec{v}_{sTfa2} [mm] - Transformovaný tečný vektor \vec{v}_{sTfa} do počátku souřadného systému obrobku

\vec{v}_{sTfa3} [mm] - Transformovaný tečný vektor \vec{v}_{sTfa2} do počátku souřadného systému obrobku, který slouží pro zjištění odchylky mezi vektorem \vec{v}_{sTfa2} s souřadnou osou X

\vec{v}_{sTfa4} [mm] - Transformovaný tečný vektor \vec{v}_{sTfa3} do počátku souřadného systému obrobku, který slouží pro zjištění odchylky mezi vektorem \vec{v}_{sTfa3} s souřadnou osou Z

\vec{v}_{sTfa5} [mm] - Transformovaný tečný vektor \vec{v}_{sTfa4} do počátku souřadného systému obrobku, který slouží pro zjištění odchylky mezi vektorem \vec{v}_{sTfa4} s souřadnou osou Z v rovině YZ

VB - Programovací jazyk Visual basic

VBA - Programovací jazyk Visual basic for application

VBD - Vyměnitelná břitová destička

VB_{max} - Maximální opotřebení na hřbetu nástroje

X_{OK} - Bod na ose brousícího kotouče pro danou hodnotu parametru v

X_{OKfa} - Bod na ose brousícího kotouče pro danou hodnotu parametru v při vytváření fazet

X_{TK} - Bod na tvaru brousícího kotouče pro danou hodnotu parametru t

Z [%] - Kontrakce

α_f [°] - Úhel hřbetu řezného nástroje v rovině P_f

α_o [°] - Úhel hřbetu řezného nástroje v rovině P_o

α_{fp} [°] - Požadovaná hodnota úhlu příčného ostří

α_{fsm} [°] - Hodnota skutečného úhlu hřbetu v kroku m

α_{fs} [°] - Skutečná hodnota úhlu příčného ostří

α_v [°] - Úhel vyjetí u příčného ostří

α_{v2} [°] - Úhel boku vyjetí u příčného ostří

β [°] - Úhel rotace tvořící přímky u kuželové plochy

β_f [°] - Úhel břitu řezného nástroje v rovině P_f

β_{fa} [°] - Úhel přednastavení brousícího kotouče vůči obrobku při vytváření fazety

β_k [°] - Úhel přednastavení brousícího kotouče vůči obrobku při vytváření šroubovitě drážky

β_o [°] - Úhel břitu řezného nástroje v rovině P_o

γ_f [°] - Úhel čela řezného nástroje v rovině P_f

- γ_{fa} [°] - Úhel naklopení brousícího kotouče vůči obrobku při vytváření fazet
 γ_{faz} [°] - Úhel čela řezného nástroje v rovině P_f u ochranné fazety
 γ_{fv} [°] - Úhel čela redukce příčného ostří
 γ_n [°] - Úhel čela mikrofazety
 γ_o [°] - Úhel čela řezného nástroje v rovině P_o
 δd_{jk} [mm] - Jednotkové posunutí ve směru jádra nástroje
 δr_{fa} [mm] - Jednotkové posunutí ve směru jádra nástroje
 $\epsilon_{(l)}$ [°] - Hodnota úhlu ϵ v kroku (l)
 $\epsilon_{(l+1)}$ [°] - Hodnota úhlu ϵ v kroku (l+1)
 ϵ_r [°] - Úhel hrotu řezného nástroje v rovině P_r
 ϵ_{rp} [°] - Požadovaná hodnota úhlu hrotu
 ϵ_{rs} [°] - Skutečná hodnota úhlu hrotu
 ϵ_{rsl} [°] - Hodnota skutečného úhlu hřbetu v kroku l
 λ [$Wm^{-1}K^{-1}$] - Koefficient teplotní vodivosti
 λ_l [-] - Štíhlostní poměr otvoru
 λ_s [°] - Úhel sklonu hlavního ostří řezného nástroje v rovině P_s
 λ_v [°] - Úhel pootočení od hlavního břitu
 $\lambda_{(vj)}$ [°] - Teoretická hodnota úhlu pootočení od břitu v kroku (j)
 $\lambda_{(vj+1)}$ [°] - Teoretická hodnota úhlu pootočení od břitu v kroku (j+1)
 λ_{vp} [°] - Požadovaná hodnota úhlu pootočení od břitu
 λ_{vs} [°] - Skutečná hodnota úhlu pootočení od břitu
 λ_{vsi} [°] - Hodnota skutečné délky příčného ostří v kroku i
 $\mu_{(m)}$ [°] - Hodnota úhlu μ v kroku (m)
 $\mu_{(m+1)}$ [°] - Hodnota úhlu μ v kroku (m+1)
 ω [°] - Úhel stoupání šroubovice
 ω_c [°] - Úhel stoupání šroubovice na jmenovitém průměru nástroje D_c
 Ψ_p [°] - Úhel příčného ostří v rovině P_p
 Ψ_{pp} [°] - Požadovaná hodnota úhlu příčného ostří
 Ψ_{ps} [°] - Skutečná hodnota úhlu příčného ostří
 Ψ_{psi} [°] - Hodnota skutečného úhlu příčného ostří v kroku i
 $\sigma_{(i)}$ [°] - Hodnota úhlu σ v kroku (i), který ovlivňuje hodnotu úhlu příčného ostří
 $\sigma_{(i+1)}$ [°] - Hodnota úhlu σ v kroku (i+1)

Seznam obrázků

1.1	Základní nástrojové úhly monolitního šroubovitého vrtáku	4
1.2	Struktura automatizačních nástrojů v systému CATIA V5	6
1.3	Grafické rozhraní pro zadání požadovaných parametrů [78]	7
1.4	Zahrnutí obrázku do dialogových oken	8
1.5	Použití VBA při stanovení výchozího povrchu nástroje	8
2.1	Základní parametry drážky	10
2.2	Tvar drážky	12
2.3	Ověření vhodnosti tvaru drážky z pohledu odvodu třísky dle [1]	12
2.4	Tvary hlavních ostří	13
2.5	Základní úhly charakterizující hrot nástroje	14
2.6	Používané plochy pro vytváření hřbetu monolitního šroubovitého vrtáku	15
2.7	Používané plochy pro vytváření hřbetu monolitního šroubovitého vrtáku	15
2.8	Porovnání tvaru příčného ostří pro jednotlivé tvořící plochy hřbetu	16
2.9	Vliv fazet na přesnost otvoru	17
2.10	Třífazetkový vrták s asymetricky rozloženým ostřím	17
2.11	Čtyřfazetkový vrták	18
2.12	Úpravy fazet pro zvýšení trvanlivosti	18
2.13	Základní úhly charakterizující hrot nástroje	19
2.14	Redukce vyštipování základního materiálu	20
2.15	Různé modifikace redukce příčného ostří	20

2.16	Porovnání různých mikroúprav břitu	21
2.17	Porovnání stavu břitu, převzato z [11]	22
2.18	Parametry zaoblení břitu R_n , převzato z [21]	22
2.19	Porovnání záběrových podmínek	24
3.1	Základní přístup k modelování šroubovitého vrtáku	25
3.2	Koncept maker	26
3.3	Diskretizace brousícího kotouče	27
3.4	Defekty na obalové ploše způsobené hrubou diskretizací	28
3.5	Vliv délky drážky na dobu jejího vytvoření	28
3.6	Vzájemná poloha brousícího kotouče a obrobku	29
3.7	Poloha jednotlivých kružnic pro vyšetření charakteristiky obalové plochy	30
3.8	Algoritmus vytváření šroubové drážky	37
3.9	Porovnání časové náročnosti na vytvoření drážky pomocí různých metod	37
3.10	Vzájemná poloha brousícího kotouče a obrobku	38
3.11	Systém polohování plochy kužele vůči obrobku	44
3.12	Systém polohování plochy kužele vůči obrobku	45
3.13	Porovnání charakteristiky obalové plochy s tvořící přímkou	45
3.14	Průniky jednotlivých ploch při vytváření hrotu	46
3.15	Způsob vytváření hrotu obrobku	48
3.16	Porovnání časové náročnosti při vytváření hrotu	50
3.17	Dráha brousícího kotouče při vytváření redukce příčného ostří	51
3.18	Parametry redukce délky příčného ostří	54
3.19	Vývojový diagram vytváření redukce příčného ostří	56
3.20	Porovnání časové náročnosti při vytváření redukce délky příčného ostří	58
3.21	Vývojový diagram vytváření ochranné fazety na hlavním břitu nástroje	59
3.22	Příklad použité geometrie	60
3.23	Vytváření fazety	60

3.24	Porovnání časové náročnosti	60
3.25	Vývojový diagram analýzy geometrie	61
3.26	Způsob měření	62
3.27	Průběh úhlu hřbetu v nástrojových rovinách P_f, P_n, P_o	62
3.28	Průběh úhlu čela v rovinách P_f, P_n, P_o	63
3.29	Detail zaoblení přechodu na hlavním břitu	63
3.30	Vývojový diagram vytváření výkresové dokumentace	64
4.1	Rozdíly mezi výsledky ze simulace a reálným procesem	68
A.1	Uživatelské rozhraní pro vytváření polotovaru	II
A.2	Uživatelské rozhraní pro vytváření drážky	III
A.3	Uživatelské rozhraní pro vytváření hrotu	IV
A.4	Uživatelské rozhraní pro vytváření fazet	V
A.5	Uživatelské rozhraní pro vytváření fazet	VI
A.6	Informace pro uživatele o výsledku polohování při automatickém modelování hrotu	VII
A.7	Informace pro uživatele o výsledku polohování při automatickém modelování redukce délky příčného ostří	VII
A.8	Uživatelské rozhraní pro vytváření zaoblení přechodu zabroušení a kanálek . . .	VIII
A.9	Uživatelské rozhraní pro vytváření ochranné fazety na hlavním břitu nástroje . .	IX
A.10	Uživatelské rozhraní pro vytváření ochranné fazety na hlavním břitu nástroje 2 .	IX
A.11	Uživatelské rozhraní pro analýzu geometrie břitu nástroje	X
A.12	Uživatelské rozhraní pro analýzu geometrie břitu nástroje 2	X
A.13	Uživatelské rozhraní pro vytvoření výkresové dokumentace	XI
A.14	Základní výkres	XII
A.15	Výkres polotovaru	XIII
A.16	Výkres drážky	XIV
A.17	Výkres vyšpicování	XV
A.18	Výkres vyšpicování	XVI

A.19 Výkres zaoblení přechodu na hlavním břitu XVII

Kapitola 1

Úvod

1.1 Řezné nástroje z pohledu konstrukce

Řezné nástroje slouží k odebrání přebytečného materiálu obrobku ve formě třísek. Hlavním účelem je přeměna výchozího tvaru polotovaru na hotovou součást. Konstrukce nástroje odráží výrobní technologii pro kterou je určen. Z tohoto hlediska rozeznáváme následující typy nástrojů:

- Soustružnické
- Frézovací
- Vrtací a vyvrtávací
- Brousící

Konkrétní technologie obrábění následně určuje mechanické, teplotní a chemické namáhání rezného nástroje. Nicméně bez ohledu na druh technologie obrábění, resp. na druhu rezného nástroje ¹ lze rezné nástroje rozdělit na :

- Monolitní
- S vyměnitelnými reznými částmi

Zatímco nástroje s vyměnitelnými reznými částmi se konstruují ryze pomocí obecných CAD systémů různé úrovně, ² jsou monolitní rezné nástroje konstruovány dvěma odlišnými způsoby. Konkrétně pomocí:

- Speciálních CAD systémů vázaných na výrobní stroj
- Obecných CAD systémů

První způsob spočívá ve využívání specializovaného softwaru, který je vázán na konkrétní výrobní stroj. Tento typ systémů je vyvíjen samotnými výrobci, či v kooperaci. Zástupci této skupiny jsou Anca, Numroto a Walter. Hlavní předností těchto systémů je rychlé vytváření geometrie nástroje ve vazbě na technologii výroby, přičemž je možné vyrábět veškeré typy monolitních řezných nástrojů. Nicméně z toho vyplývá i jejich značná nevýhoda, která spočívá ve stížené možnosti návrhu vlastního unikátního nástroje s novými inovativními prvky. Jediný způsob jak realizovat vlastní návrh, je pomocí ručního vkládání příkazů do NC programu, což snižuje efektivitu vytváření nástroje. Další nevýhodou je systém vytváření výkresové dokumentace, který pokud je vůbec k dispozici, používá např. převodový DXF formát. Převod komplikované geometrie má za následek vznik nepřesností, které je třeba ručně upravit. V případě změny tvaru nástroje je nutné celý proces opakovat bez možnosti využití automatické úpravy výkresu.

Tyto nevýhody jsou důvodem používání druhého způsobu, tedy obecných CAD systémů. Zejména pak 3D systémů jako CATIA, NX či ProE. Jejich výhody spočívají ve volnosti návrhu a tudíž potenciální možnosti vytvoření inovativního řešení. Dále CAD systémy umožňují na základě geometrie vytvořit výkresovou dokumentaci, kterou lze automaticky aktualizovat. Rovněž tyto systémy nabízí možnost automatizovat rutinní úkoly a tím konkurovat v rychlosti vytváření nástrojů pomocí speciálních CAD systémů.

Nicméně hlavní nevýhoda CAD systémů spočívá v tom, že není možné zahrnout objem kotouče při vytváření prvků řezného nástroje. Odstranění této nevýhody si klade za cíl tato disertační práce.

1.2 Výběr typového představitele rezného nástroje

Každá technologie obrábění má svá určitá specifika, která je při návrhu rezného nástroje nutné respektovat. Technologie vrtání slouží k výrobě průchozích či neprůchozích kruhových otvorů do plného materiálu. Tato oblast se od jiných konvenčních technologií jako např. soustružení či frézování vyznačuje tím, že:

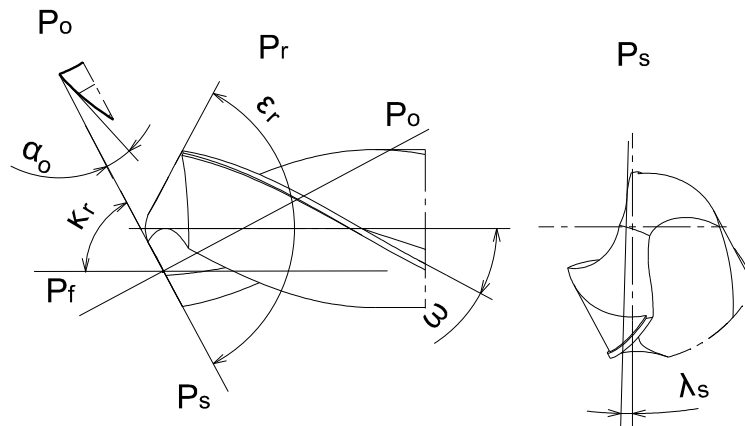
- Operace je prováděná již na hotových výrobcích \Rightarrow vyšší důraz na celý proces vrtání
 - V případě poškození výrobku jsou vyšší finanční ztráty ³
- Místo řezu je uzavřené \Rightarrow vyšší nároky na volbu geometrie břitu:
 - Ztížený odvod třísek z místa řezu \Rightarrow nutnost tvorby krátké článkovité třísky
 - Vyšší celkové namáhání nástroje, způsobené vyšším teplotním a následně i chemickým zatížením ⁴

Volba konkrétního typu vrtacího nástroje pak závisí především na parametrech vyráběné díry. Konkrétně na:

- Průměru D_D
- Hloubce L_D , resp. na poměru $\frac{L_D}{D_D}$

S ohledem na potřeby běžného strojírenství, kde je potřeba vyrábět kruhové otvory pro šrouby, kolíky aj., lze za nejpoužívanější nástroj v této oblasti označit šroubovitý vrták. Hlavními důvody jsou:

- Průměr vrtaných otvorů od 3⁵ - 60mm ⁶
- Hloubka vrtaných otvorů 30 až 70D ⁷



Obrázek 1.1: Základní nástrojové úhly monolitního šroubovitého vrtáku

Další výhody, které použití tohoto typu nástroje přináší, vyplývají z jeho topologie:

- Dvě až tři šroubovitě drážky:
 - Rovnoměrný řezný účinek ⁸
 - Není potřeba pouze vnitřního přívodu chladicí kapaliny pro odvod třísek z místa řezu ⁹

Nicméně oproti jiným představitelům vrtacích nástrojů má jeho geometrie, viz obr. 1.1, významné odlišnosti, které lze shrnout následovně:

- Proměnlivost úhlu čela γ po průměru nástroje
- Proměnlivost úhlu hřbetu α po průměru nástroje
- Proměnlivost úhlu sklonu ostří λ_s po průměru nástroje D_c
- Příčné ostří nástroje

Proměnlivost úhlu čela γ způsobuje, že jeho největší hodnota je na vnějším průměru nástroje. Z toho vyplývá, že břit je nejslabší v místě, kde je vystaven nejvyšší řezné rychlosti a tudíž i teplotě. Proměnlivý průběh má i úhel hřbetu α . Změna úhlu sklonu ostří λ_s je závislá na tvaru drážky a na způsobu snížení délky příčného ostří. Oblast příčného ostří má naopak značně negativní geometrii, což v kombinaci s nízkou řeznou rychlostí blíží se nule ve středu nástroje způsobuje tváření materiálu místo jeho odřezávání. Výsledkem jsou vysoké hodnoty posuvové složky řezné síly F_f .

Na základě všech uvedených faktorů, vyzdvihující složitost geometrie břitu, byl jako typový představitel vybrán monolitní šroubovitý vrták ¹⁰.

1.3 Využití automatizace CAD systému pro efektivní vytváření modelu monolitního šroubovitého vrtáku

V technické praxi jsou dnes využívány CAD systémy různé úrovně, které lze rozdělit na :

- Low-end
- Mainstream
- High-end

S pomocí low-end řešení lze vytvářet neparametrické "modely"¹¹ omezené pouze na 2D. Mezi zástuce patří např. SolidEdge 2D drafting.

Do střední třídy patří CAD systémy umožňující tvorbu parametrických 3D modelů a lze je rozšiřovat o další moduly pro pětiosé frézování umožňující automatické vytváření NC kódu. Mezi představitele patří SolidWorks, Autodesk Inventor aj.

High-end třída jsou komplexní 3D parametrické CAD systémy obsahující kromě modulů pro CAM, MKP a také speciální moduly pro konkrétní průmyslové odvětví např. formy, zápusky, karoserie apod. Dále obsahují moduly pro PLM, čímž umožňují řídit životní cyklus výrobku v jednom vývojovém prostředí. Tím se odstraňují problémy s kompatibilitou, mezi jednotlivými softwary a ztráta automatické aktualizace modelu kvůli použití převodových formátů např. STEP, IGES atd. Představiteli této třídy jsou ProEngineer, NX, CATIA.

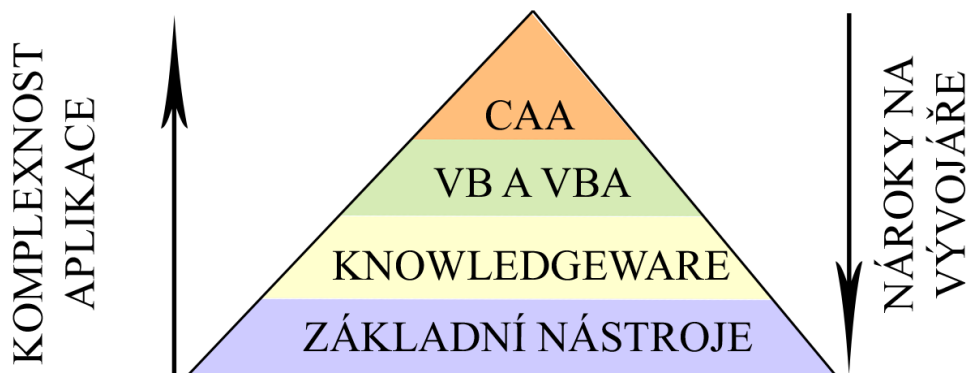
Poslední jmenovaný high-end CAD systém CATIA disponuje pokročilými funkcemi v oblasti plošného modelování. Z tohoto důvodu je velmi rozšířen v automobilovém¹² a leteckém průmyslu.

Řezné nástroje jsou rovněž tvarově složité výrobky a proto byl pro vytváření modelu monolitního šroubovitého vrtáku a jeho výkresové dokumentace zvolen právě systém CATIA V5 R19.

Nicméně díky neustálemu tlaku na zkracování výrobních časů je nutné vytvářet i tvarově složité výrobky efektivněji. Jedním ze způsobů, jak tohoto cíle dosáhnout, je snížit podíl rutinní práce konstruktéra a technologa v přípravné fázi výroby. Příkladem může být potřeba polohování rezného kuželu vůči polotovaru monolitního šroubovitého vrtáku s cílem dosáhnout požadovaný úhel hrotu ϵ_R , úhel hřbetu α_f a úhel příčného ostří ψ_p . Je rovněž nutné poznamenat, že tento úkol je značně časově náročný.

Na základě výše uvedených důvodů bude dalším a hlavním cílem budoucí disertační práce zautomatizovat vytváření modelu monolitního šroubovitého vrtáku a jeho výkresové dokumentace pomocí automatizačních nástrojů dostupných v CAD/CAM systémech, v našem případě konkrétně v systému CATIA V5 R19.

1.3.1 Analýza automatizačních nástrojů v CATIA V5



Obrázek 1.2: Struktura automatizačních nástrojů v systému CATIA V5

Automatizační nástroje dostupné v CATIA V5 lze rozdělit do několika úrovní dle obr. 1.2. Jak je z obrázku patrné, jednotlivé úrovně se liší:

- Komplexností vyvinuté aplikace
- Nároky na vývojáře

První dvě úrovně nejsou automatizačními nástroji v pravém významu. Základní nástroje umožňují racionalizovat práci se systémem skrze definici uživatelských parametrů, parametrizačních tabulek a sdílených součástí. Naproti tomu modul Knowledgeware, skládající se z několika submodulů, umožňuje využívat pokročilejší funkce systému CATIA V5. Jedná se např. o možnost:

- Implementovat znalostní prvky do návrhu součásti
- Zjišťovat charakteristiky součásti a dále jí optimalizovat
- Vytvářet prostředí, která vedou méně zkušené konstruktéry při jejich práci
- Vytvářet sémantické definice výrobku

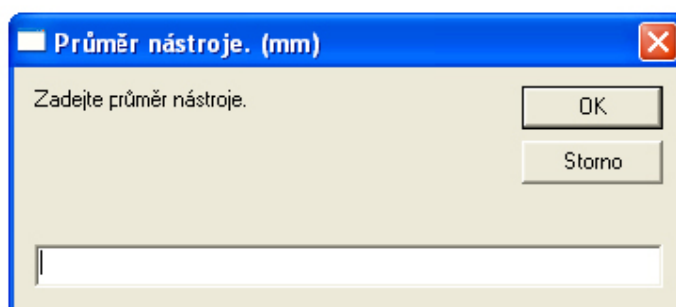
Nicméně jak bylo uvedeno výše, nejsou ryzími automatizačními nástroji. Z tohoto důvodu nebude uveden jejich podrobnější popis. Po tento účel lze použít zdroje [36], [18], [65] a [84].

1.3.1.1 VB a VBA

Tyto nástroje jsou v odborných zdrojích uváděny společně jako druhý největší prostředek pro automatizaci, viz obr. 1.2. Oba nástroje využívají jako programovací jazyk Visual basic¹³. Nicméně úroveň výsledné aplikace a uživatelská náročnost použití daného řešení se v obou případech značně odlišují. Hlavní výhody VBA editoru oproti VB editoru¹⁴ jsou:

- Lze využít možnosti objektového programování \Rightarrow uživatelsky jednodušší způsob vytváření aplikace
- Možnost vytvářet komplexnější aplikace zkompilováním více jednodušších aplikací dohromady \Rightarrow možnost snáze odladit program, ale hlavně lze jednotlivé aplikace dále využívat v jiných projektech \Rightarrow opakovaná využitelnost a efektivnější tvorba nových aplikací
- Editor poskytující
 - Vlastní debugger pro odstranění syntaktických chyb \Rightarrow rychlejší vytvoření funkčního programu
 - Funkce našeptávání příkazů při vytváření programu \Rightarrow rychlejší získání informací
 - Přímě napojení do nápovědy v systému CATIA \Rightarrow rychlejší získání informací

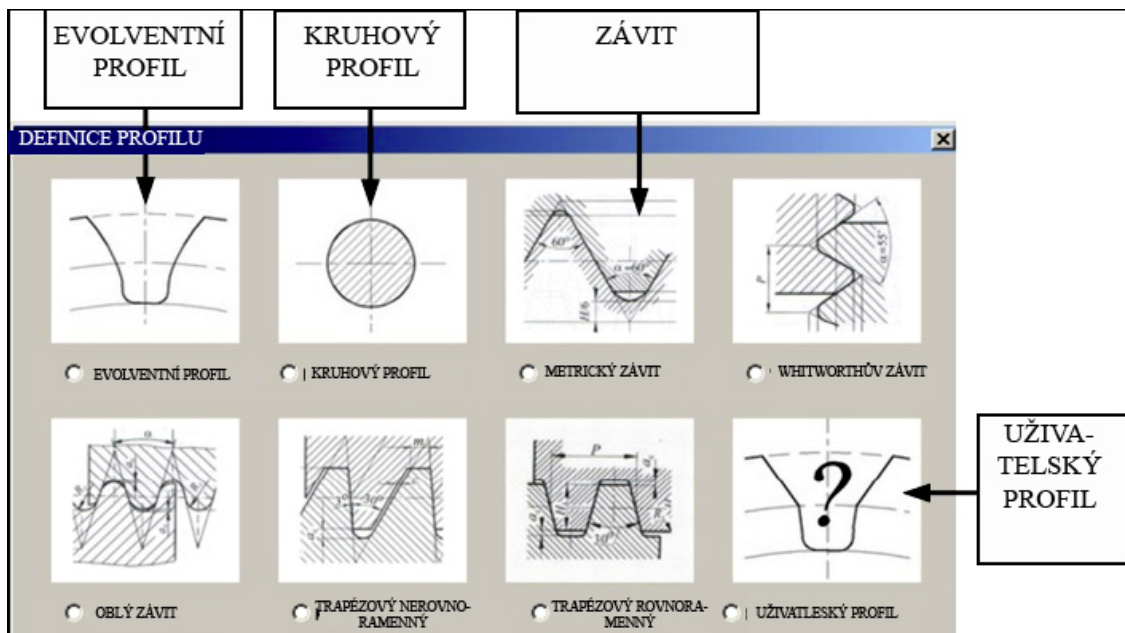
Systém vytváření aplikací pomocí VB editoru v CATIA V5 byl použit zdrojem [78] při vytváření modelu monolitního šroubovitého vrtáku. Způsob zadávání jednotlivých parametrů je patrný z obr. 1.3. Je však nutné poznamenat, že toto uživatelské rozhraní nelze za pomoci VB editoru dále zdokonalovat.



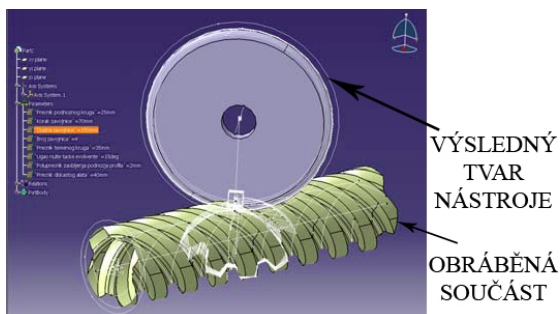
Obrázek 1.3: Grafické rozhraní pro zadání požadovaných parametrů [78]

Nicméně zdroj uvádí, že:

- Bylo velice náročné odstranění chyb v programu - důsledek chybějící funkce našeptávání příkazů
- Nebylo možné vložit ilustrativní obrázky k jednotlivým zadávaným parametrům ⇒ klesá uživatelský komfort
- Pro jednotlivé funkční prvky jako drážka, hrot apod. byly vytvořeny samostatné aplikace, které však bylo potřeba spouštět odděleně ⇒ klesá uživatelský komfort
- Aplikace "pouze" aktivovala či deaktivovala již předmodelované prvky ⇒ ohrožení konzistence modelu v případě jeho opakovaného použití



Obrázek 1.4: Zahrnutí obrázku do dialogových oken



Obrázek 1.5: Použití VBA při stanovení výchozího povrchu nástroje

Naproti tomu zdroj [19] použil nástroj VBA pro zjištění výchozího povrchu nástroje. Kromě jiného byla výhodou možnost zahrnout do dialogových oken doplňující obrázky, viz obr. 1.4, čímž se značně zvyšuje uživatelský komfort při používání aplikace.

Je nutné poznamenat, že nástroj resp. jeho tvar, viz obr. 1.5 byl vytvářen za pomoci příkazů a funkcí. Tím došlo k odstranění problému s konzistencí modelu vlivem jeho opakovaného používání.

1.3.1.2 CAA

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

- C++
- JAVA

Modul CAA umožňuje vytvářet aplikace, které:

- Využívají vyšší rychlosti zpracování instrukcí oproti projektům vytvářených s pomocí VBA ¹⁵
- Využívají přístupu k základnímu rozhraní ¹⁶ systému CATIA V5 ⇒ umožňují vytvářet nové součásti systému od funkcí až po vlastní prostředí

Příkladem použití tohoto silného nástroje je aplikace XV5, která byla vytvořena zdrojem [83]. Tato aplikace např. umožňuje vytvářet parametrické plochy z ploch, které vznikly 3D skenováním, např. karoserie automobilu. Tím je možné dále s plochou pracovat a upravovat ji dle konkrétních potřeb, což nativní funkce systému CATIA V5 neumožňují. Dále má aplikace zabudované speciální typy nelineárního vyhlazování a aproximací, které dovolují vytvářet plochy v designové kvalitě, které jsou potřeba např. pro výrobu karoserie automobilu, díly palubní desky apod.

Pro snažší vytvářením kódu dané aplikace ¹⁷ lze použít tzv. RADE prostředí ¹⁸. 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:

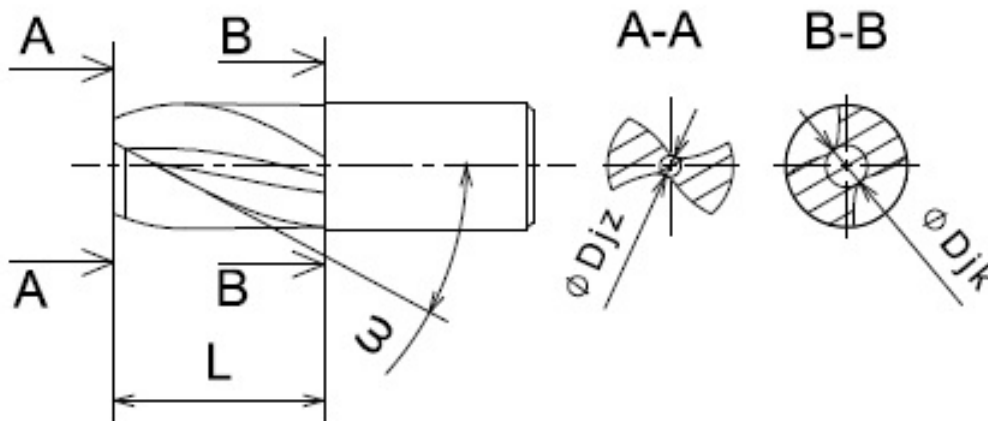
- Náročnosti na znalosti uživatele, který aplikaci vytváří, z oblasti výše jmenovaných programovacích jazyků či dalších technických disciplín, které nelze označit za základní
- Ceně komerční licence, která se pohybuje okolo 10 000 000 Kč

Na základě výše uvedených informací, bude pro vytvoření aplikace zajišťující vytvoření modelu monolitního šroubovitého vrtáku a jeho výkresové dokumentace použito prostředí VBA.

Kapitola 2

Geometrické prvky na monolitním šroubovitém vrtáku

2.1 Drážka



Obrázek 2.1: Základní parametry drážky

Šroubovitá drážka je charakteristickým prvkem monolitního šroubovitého vrtáku. Tento prvek způsobuje změnu úhlu čela po průměru nástroje, kde maximálních hodnot nabývá na obvodě nástroje. Další vlastností šroubovité drážky je pomoc při odvodu třísek z místa řezu díky převodu rotačního pohybu na přímočarý. Této vlastnosti se využívá např. při vrtání děr, jejichž štíhlostní poměr $\lambda_l = \frac{L}{d}$ dosahuje u standardních nástrojů hodnoty do 30 a v případě speciálních aplikací hodnoty až 70.

Výsledkem je možnost zvýšení produktivity až o 600%, viz [93] v porovnání s dělovými vrtáky, u nichž je odvod třísek z místa řezu závislý pouze na procesní kapalině, která se musí dodávat ve zvýšených objemech a tlacích. Je však nutné poznamenat, že nástroje těchto parametrů se rovněž opírají o vlastnosti základního materiálu. V případě SK o karbidy typu TaC a NbC, které zvyšují jeho houževnatost.

Na obr. 2.1 jsou představeny základní parametry šroubovité drážky. Základním prvkem je úhel stoupání šroubovice ω . Tento úhel ovlivňuje změnu úhlu čela γ po průměru nástroje. Změnu pro nástrojovou rovinu P_f lze vyjádřit následujícím vztahem 2.1

$$\gamma_f = 90^\circ - \arctg\left(\frac{D_c}{D} * \tan(90^\circ - \omega_c)\right) \quad (2.1)$$

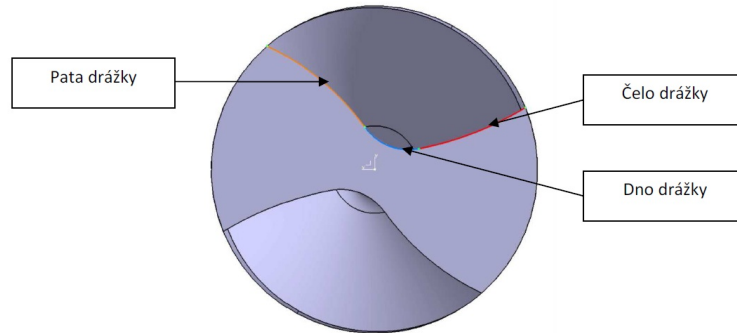
kde:

- D_c je jmenovitý průměr nástroje
- ω_c je úhel stoupání šroubovice na jmenovitém průměru nástroje
- D je průměr bodu na hlavním ostří, ve se zjišťuje hodnota γ_f

Úhel stoupání šroubovice je volen s ohledem na mechanické a fyzikální vlastnosti obráběného materiálu. Do této skupiny lze zařadit i následnou potřebu vnitřního přívodu procesní kapaliny k břítu nástroje, kvůli snížení jeho celkového zatížení, které se skládá z jednotlivých složek mechanického, teplotního a chemického zatížení. Konkrétní hodnoty úhlu šroubovice se tedy pohybují v intervalu $< 0^\circ; 35^\circ >$. Hodnota $\omega < 0^\circ; 15^\circ >$, se používá např. pro zušlechtné nástrojové oceli pro výrobu zápustek, přičemž je nutné poznamenat, že nástroje s $\omega = 0^\circ$ nelze použít pro $\lambda_t > 1,5D$, pokud nástroj neumožňuje vnitřní přívod procesní kapaliny. Naproti tomu se hodnoty $\omega = 35^\circ$ používají např. pro hliníkové slitiny.

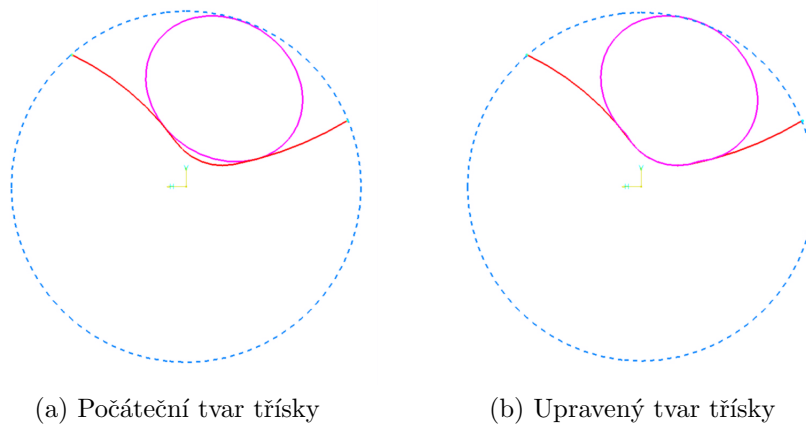
Dalším parametrem je velikost průměru jádra. Tento parametr významně ovlivňuje pevnost a tuhost nástroje, jak dokládají výsledky práce Ni a kol. [60], který se zabýval optimalizací tvaru drážky z pohledu pevnosti a tuhosti nástroje. Výsledky práce dokazují, že při zachování stejného průřezu drážky má významnější vliv změna průměru jádra, než úprava tvaru drážky. V závislosti na průměru nástroje a základním materiálu vrtáku se průměr jádra volí v intervalu 30-50% jmenovitého průměru nástroje. Horní hranice platí pro nástroje menších průměrů $\leq 6\text{mm}$, kdežto spodní hranice pro nástroje průměru $\geq 12\text{mm}$.

Dalším parametrem, který ovlivňuje pevnostní vlastnosti nástroje je změna průměru jádra po délce nástroje, viz obr. 2.1. U dřívějších typů nástrojů platilo, že se průměr jádra kuželovitě zvětšoval na konečnou hodnotu D_{jk} . Nicméně dnešní nástroje mají opačný průběh jádra tzn., že se průměr jádra snižuje. Hlavním důvodem této úpravy je zvětšení prostoru pro odvod třísek, aby se usnadnil jejich pohyb drážkou a tím se snížila možnost nárůstu rezného momentu vlivem jejich zhoršeného odvodu. Otázka odpovídajícího prostoru pro odvod třísek je rovněž spojena s tvarem drážky, viz obr. 2.2.



Obrázek 2.2: Tvar drážky

Celkový prostor lze ovlivňovat tvarem paty drážky a způsobem jejího napojení na dno drážky čímž se rovněž zabýval Ni kol. [60]. Další práce Abele et al [1] se zabýval rovněž návrhem tvaru drážky. Pro ověření vhodnosti tvaru drážky z pohledu dostatečného prostoru pro odvod třísek byla použita elipsa, která dle autorů lépe vystihuje plochu, kterou tříška zabírá při svém pohybu. Elipsa byla nejprve polohována tak, aby se dotýkala drážky ve dvou bodech a stěny otvoru v jednom bodě, viz obr. 2.3a.

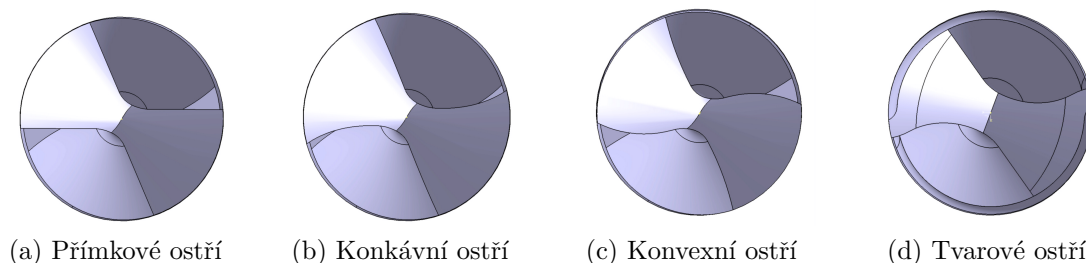


(a) Počáteční tvar třísky

(b) Upravený tvar třísky

Obrázek 2.3: Ověření vhodnosti tvaru drážky z pohledu odvodu třísky dle [1]

Následně byl ještě tvar elipsy upraven tak, že se dotýkala drážky nástroje v určité délce, viz obr. 2.3b. Je však nutné poznamenat, že velikost elipsy, resp. velikosti vznikající třísky byla stanovena na základě experimentálního modelu. Podobný přístup zmínil už i Řasa a kol. [61], který se opíral o experimentálně zjištěné tvary třísek na základě geometrie nástroje a technologických podmínek. Z toho vyplývá, že i v dnešní době moderních výpočtových systémů a progresivního vývoje řezných materiálů atd. mají experimentální modely svoje nezastupitelné místo a jejich výsledky mohou sloužit jako kvalitní vstupní data do numerických modelů.



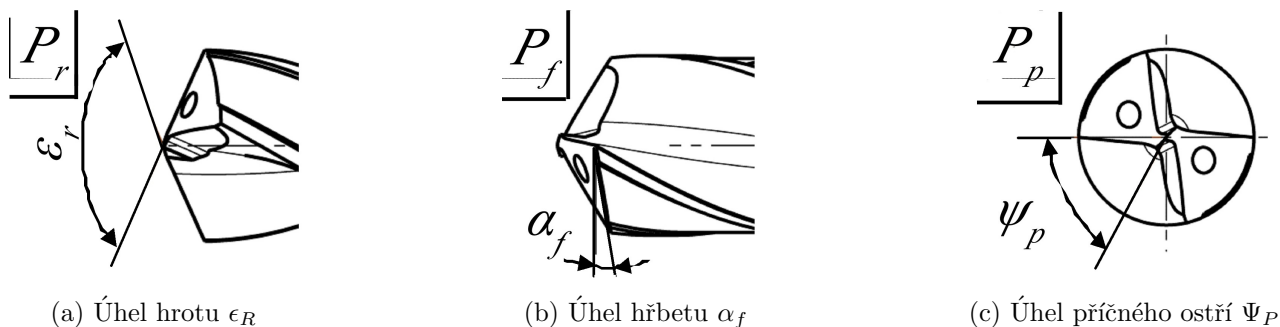
Obrázek 2.4: Tvary hlavních ostří

Naproti tomu ani využití možnosti dnešních výpočetních systémů nezaručuje nalezení optimálního řešení a konečný výběr je ponechán na zkušenostech uživatele, viz závěry v práci Abele a Fujara [1].

Posledním parametrem, který ovlivňuje chování nástroje, je čelo drážky. To ovlivňuje výsledný tvar hlavního ostří, resp. změnu úhlu sklonu ostří λ_s po průměru nástroje v závislosti na použité geometrii hrotu. Obecně lze charakterizovat 4 základní typy hlavního ostří, viz obr. 2.4.

Přímkové ostří, viz obr. 2.4a, se používá u nástrojů pro obrábění litiny, běžných uhlíkových ocelí, ale i např. u zušlechtěných nástrojových ocelí. Konkávní typ hlavního ostří, viz obr. 2.4b, se používá zejména u hliníkových slitin, kde tento tvar podporuje tvorbu článkovité třísky. Dále zajišťuje její lepší směřování do drážky nástroje, čímž snižuje riziko kontaktu mezi třískou a stěnou otvoru, což vyústí ve zlepšení drsnost povrchu. Tento tvar je naopak nevhodný pro obrábění zušlechtěných materiálů, nerez ocelí či superslitin na bázi Ti a Ni, jak dokládá práce Sharman a kol. [73], která se zabývala porovnáním geometrií monolitních šroubovitých vrtáků při obrábění niklové superslitiny Inconel 718. Hlavním důvodem snížené trvanlivosti bylo vyštipování na obvodu nástroje vlivem ostré špičky na nástroji, která je charakteristická pro tento průběh ostří. Naopak konvexní tvar hlavního ostří vykazoval nárůst v trvanlivosti o více jak 40% v porovnání s konkávním typem hlavního ostří. Je nutné poznamenat, že všechny nástroje umožňovaly vnitřní přívod procesní kapaliny. Tvarové ostří je možné použít např. pro obrábění autenitických nerez ocelí, jak dokládají práce Wen-Chou a kol. [88], Lin [45] či vysokopevných ocelí, viz Wang a kol. [87].

2.2 Hrot



Obrázek 2.5: Základní úhly charakterizující hrot nástroje

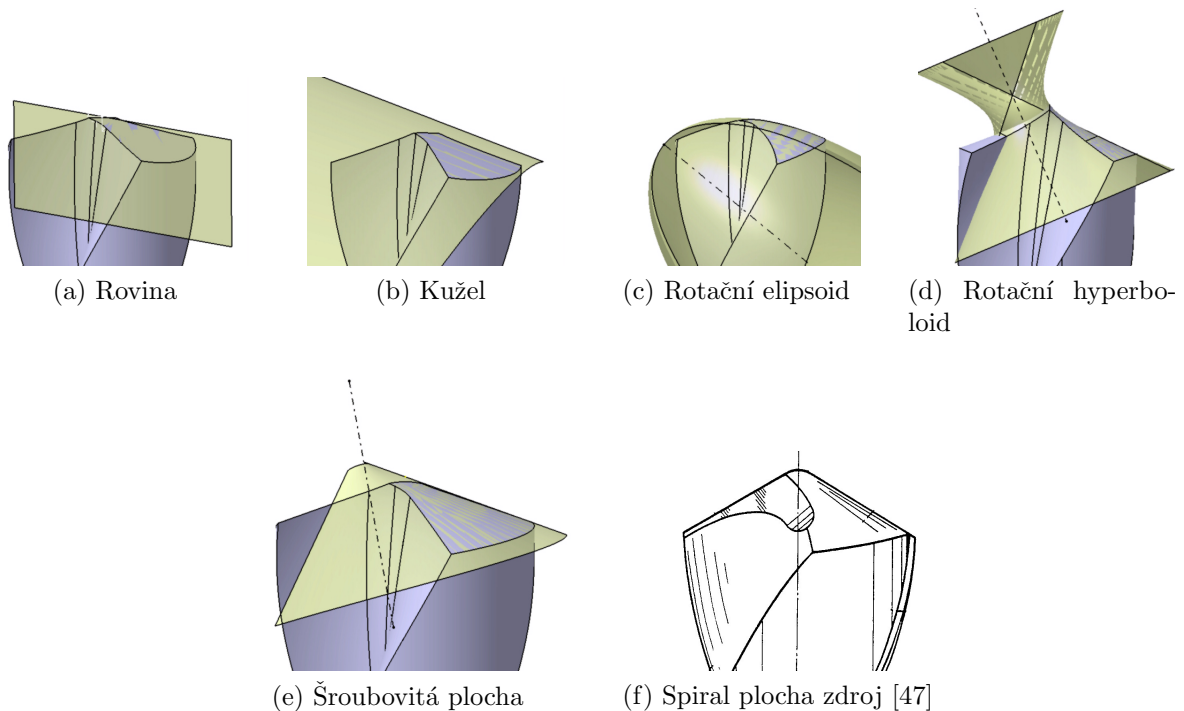
Na obr. 2.5 je znázorněn hrot monolitního šroubovitého vrtáku. Ten lze charakterizovat úhlem:

- Hrotu ϵ_R , který se pohybuje $\langle 118^\circ - 145^\circ \rangle$
- Hřbetu α_f , který se pohybuje $\langle 4^\circ - 15^\circ \rangle$
- Příčného ostří Ψ_P , který se pohybuje $\langle 35^\circ - 60^\circ \rangle$

Úhel hrotu ovlivňuje zavrtávací schopnosti nástroje, resp. velikost složky rezné síly F_f . Další faktor, který úhel hrotu ovlivňuje, je utváření třísky v kombinaci s úhlem γ .

Úhel hřbetu α_f ovlivňuje velikost deformací v terciální oblasti v obráběném materiálu, což přímo ovlivňuje schopnost břitů vnikat do obráběného materiálu¹⁹. Kromě velikosti vzniklých deformací ovlivňuje rovněž tření, konkrétně velikost kontaktní plochy mezi nástrojem a obráběným materiálem.²⁰ Dále v kombinaci s úhlem čela γ přímo ovlivňuje pevnost a tuhost břitů a tím i jeho trvanlivost. Jak již bylo zmíněno v předchozí části práce, je úhel hřbetu α_f proměnlivý po průměru nástroje. Jeho konkrétní průběh je dán typem tvořící plochy, která je pro vytvoření plochy hřbetu použita.

Na obr.2.6 jsou znázorněny typy používaných ploch pro vytváření hřbetu u monolitního šroubovitého vrtáku. Na obr. 2.6a je znázorněna rovina jako tvořící plocha. Tento typ se používá zejména u tzv. vícehřbetých geometrií, viz obr. 2.7. Tento typ hřbetní plochy se používá např. pro nástroje do uhlíkových ocelí, ale rovněž např. pro mikrovrtáky, kterými se zhotovují otvory do tištěných spojů, viz zdroj [82]. Na obr. 2.6b je znázorněna jako tvořící plocha kužel. Tento typ plochy bývá označován za nejpoužívanější. Důvodem je jednodušší kinematika stroje²¹, která zajišťuje vytvoření plochy hřbetu na reálném nástroji a tím přímo ovlivňuje přesnost a opakovatelnost výroby.

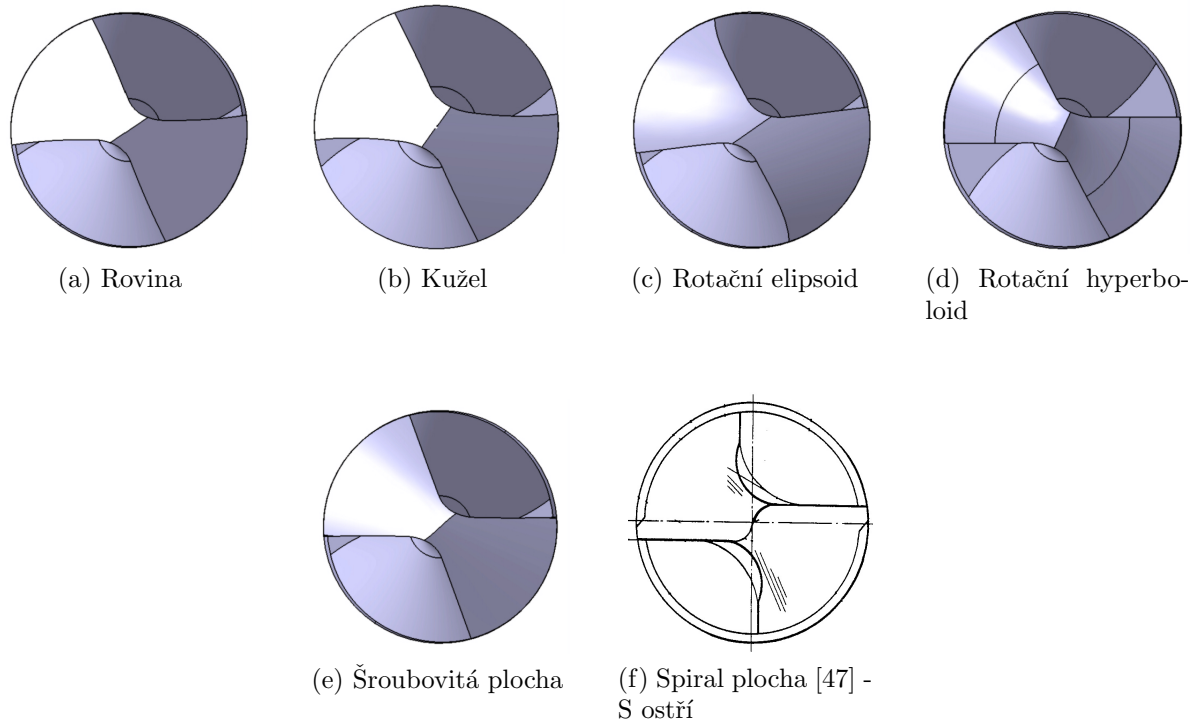


Obrázek 2.6: Používané plochy pro vytváření hřbetu monolitního šroubovitého vrtáku



Obrázek 2.7: Používané plochy pro vytváření hřbetu monolitního šroubovitého vrtáku

Dalšími typy tvořících hřbetní ploch je rotační elipsoid, resp. hyperboloid, viz obr. 2.6c, resp. obr. 2.6d. Tyto typy ploch nebylo možné identifikovat na reálných nástrojích. Nicméně byly použity zdrojem [2] pro optimalizaci silového zatížení nástroje, viz dále. Předposledním typem tvořící plochy je šroubovitá plocha, viz obr. 2.6e. Tento typ plochy se rovněž používá např. u mikrovrtáků pro vrtání do tištěných spojů. Navíc byl zdrojem [82] označen za vhodnější typ tvořící plochy než rovina, zejména díky jednodušší kinematice stroje, která zvyšuje přesnost výroby. Dále tento zdroj uvádí, že lze úpravou kinematiky broušení dosáhnout vytvoření kuželové plochy. Tzn., že kuželovou plochu lze označit za speciální případ šroubové plochy. Posledním typem je tzv. Spirální plocha. V podstatě se jedná o šroubovou plochu s progresivním stoupáním. Tento typ tvořící plochy vytváří tzv. S-tvar příčného ostří. Tento typ geometrie využívá v praxi firma Kennametal pro své vrtací nástroje.



Obrázek 2.8: Porovnání tvaru příčného ostří pro jednotlivé tvořící plochy hřbetu

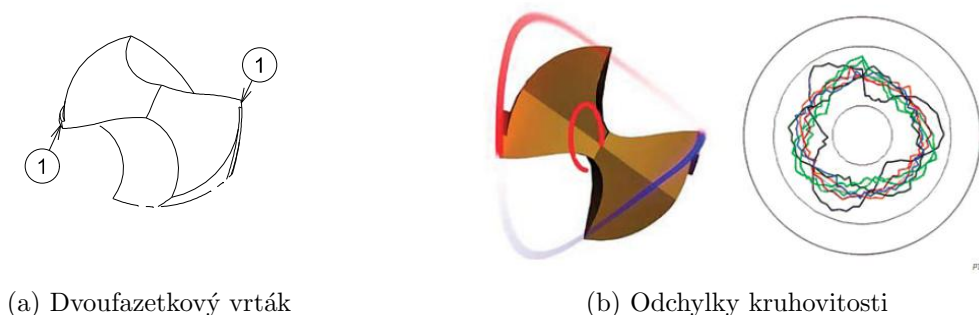
Z poslední věty vyplývá, že typ použité plochy má rovněž vliv na tvar příčného ostří, viz. 2.8 a jeho geometrii břitu. Tím zásadně ovlivňuje velikost posuvové složky řezné síly F_f a tím celkové zatížení nástroje. Jak bylo zmíněno výše, zdroj [2] použil hyperboloidní a elipsoidní plochy hřbetu pro optimalizaci silového zatížení nástroje. Výsledkem bylo snížení posuvové složky řezné síly F_f o 25% u elipsoidní plochy hřbetu v porovnání s kuželovou plochou hřbetu, resp. snížení o 50% v případě hyperboloidní plochy hřbetu.

Nástroje s tzv. S - tvarem příčného ostří se vyznačují nižší složkou posuvové řezné síly F_f dle zdroje [17] o 34%. Díky tomu se zlepšují zavrtávací schopnosti nástroje, roste přesnost vrtané díry²², redukují se otřepy na výjezdu z otvoru, což snižuje nutnost dodatečných operací a tím se zvyšuje hospodárnost obrábění.

Z uvedených informací vyplývá, jak významný vliv má plocha hřbetu, resp. její konkrétní typ na řezivost nástroje a jaký potenciál skrývá pro výrobce řezných nástrojů z pohledu optimalizace geometrie.

2.3 Fazety

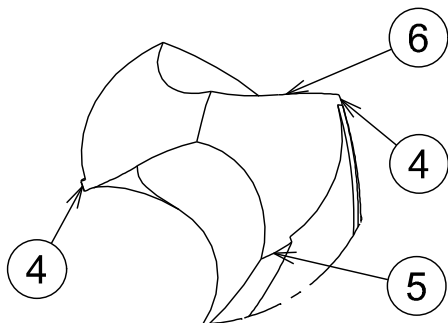
Kromě tuhosti je pro přesnost děr rovněž důležité, aby měl nástroj při pohybu dírou dostatečné vedení. Tuto funkci plní fazetky vrtáku. Na obr. 2.9a je vidět běžný vrták s dvěma fazetkami.



Obrázek 2.9: Vliv fazet na přesnost otvoru

Na obr. 2.9b vpravo jsou znázorněny odchytky kruhovitosti, které vznikají během vrtání dvoufazetkovým nástrojem, který navíc nemá odlehčené příčné ostří. Jak je vidět, díky velké délce příčného ostří dochází k odchýlení nástroje v radiálním směru, čímž vzniká oválná díra. K nepřesnosti díry rovněž přispívají výrobní nepřesnosti nástroje. Oválný tvar díry následně kopíruje celý vrták. Tím místo plynulého osového pohybu vzniká pohyb podobný frézování se šroubovitou interpolací. Konečným důsledkem je nesymetrické zatížení břitu, možný vznik kmitání atd.

Pro zvýšení přesnosti se konstruuje vrtáky se třemi fazetami a nesymetricky rozloženým ostřím po obvodu nástroje, viz obr. 2.10.



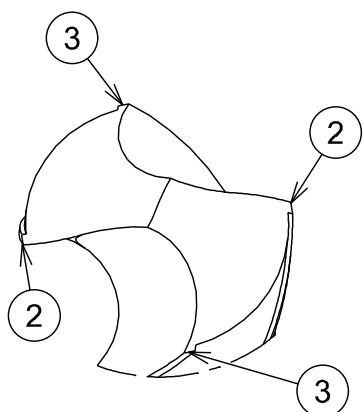
Tento nástroj má dvě standardní fazety (4). Třetí fazeta (5) je umístěna proti osově předsazenému hlavnímu ostří (6). Tím se cíleně vytváří nerovnoměrný řezný účinek, který tlačí nástroj na třetí fazetu (5). Zbylé dvě fazety (4) poskytují nástroji potřebné vedení [94]. Na následující stránce je uvedeno srovnání dvoufazetkového a třífazetkového vrtáku. Vrtaným materiálem byla duplexní nerezová cel. Vrtání probíhalo v laboratorních podmínkách.

Obrázek 2.10: Třífazetkový vrták s asymetricky rozloženým ostřím

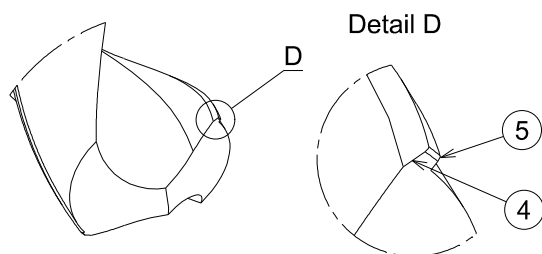
Tabulka 2.1:

Použitý nástroj		
	Třífazetkový vrták	Dvoufazetkový vrták
Kruhovitost [μm]	13	52
Válcovitost [μm]	19	117
Přímmost [μm]	20	23
Rovnoběžnost [μm]	20	36
Sklon díry [μm]	4	33

Jak je z tabulky 2.1 patrné, třífazetkový vrták s asymetricky rozloženými břity po obvodu nástroje zlepšuje zejména kruhovitost a válcovitost díry. Je však nutné poznamenat, že nástroj má sníženou délku příčného ostří, které má na zvýšení přesnosti otvoru také vliv. Poslední modifikací jsou čtyřfazetkové vrtáky, jak je ukázáno na obr. 2.11.



Obrázek 2.11: Čtyřfazetkový vrták



Obrázek 2.12: Úpravy fazet pro zvýšení trvanlivosti

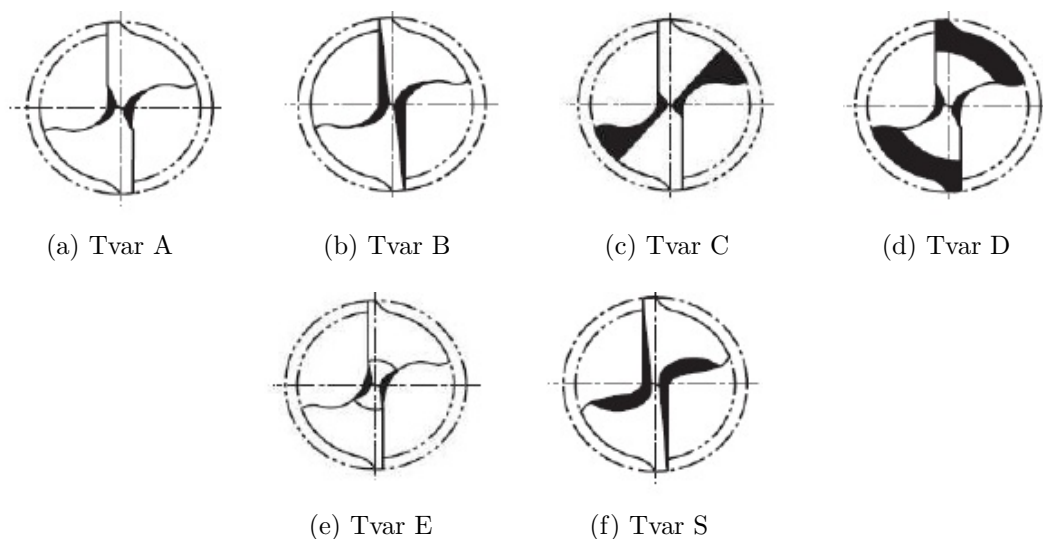
Tato koncepce obsahuje dvě fazetky (**2**), které jsou u hlavního ostří a dvě fazetky (**3**), které jsou proti hlavnímu ostří. Fazetky (**3**) vyrovnávají nerovnoměrnosti zatížení jednotlivých břitů způsobené výrobními nepřesnostmi popřípadě nehomogenitou materiálu. Tento typ nástroje je konstrukčně jednodušší, jelikož u třífazetkové varianty má předsazení břitu vliv na vzniklé radiální síly, které směřují nástroj na opěrnou třetí fazetku, čímž je ovlivňováno opotřebení této vodící fazetky. Srovnání těchto variant se však nepodařilo nalézt, jelikož třífazetkový vrták je úplně novou koncepcí. Nehledě na počet fazetek vždy platí, že fazetky jsou nejnamáhanějším místem na vrtáku. Přispívá k tomu pozitivní geometrie břitu a nejvyšší řezná rychlost a z toho plynoucí teplotní zatížení.

Z tohoto důvodu jsou fazetky místem, na němž se nejdříve projevuje opotřebení, popřípadě, dochází u nich k vyštípnutí břitu atd. Z těchto důvodů se fazetky upravují, jak je vidět na obr. 2.12. Na něm je znázorněno zkosení fazetky ve směru stoupání šroubovice (**4**) a její zaoblení v axiálním směru (**5**). Těmito úpravami lze zvýšit trvanlivost až o 600% [46].

2.4 Úpravy zvyšující užité vlastnosti

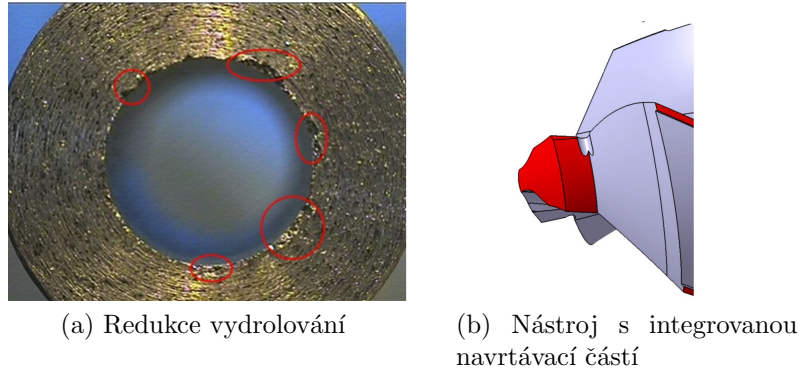
2.4.1 Redukce délky příčného ostří

Oblast příčného ostří je značně problematickým místem monolitních šroubovitých vrtáků. Hlavním důvodem je kombinace nízké řezné rychlosti s negativními úhly břitu, která způsobuje tváření obráběného materiálu místo jeho řezání. Důsledkem toho je nárůst řezných sil, zejména posuvové složky řezné síly F_f . Konkrétní hodnota F_f dále ovlivňuje kromě opotřebení nástroje jeho zavrtávací schopnosti a následně tak přesnost vrtaného kruhového otvoru. Mimo přesnosti rozhoduje o velikosti a tvaru vznikajících otřepů na vstupu, ale zejména na výstupu nástroje z materiálu a tím o potřebě použití dalších operací jako např. odjehlování. Velikost F_f je značně důležitá při obrábění kompozitních materiálů, jelikož přímo ovlivňuje možný vznik delaminace základního materiálu jak dokládá zdroj [80]. Je nutné poznamenat, že musí být přihlédnuto i k velikosti posuvu. Z výše uvedených důvodů se délka příčného ostří redukuje.



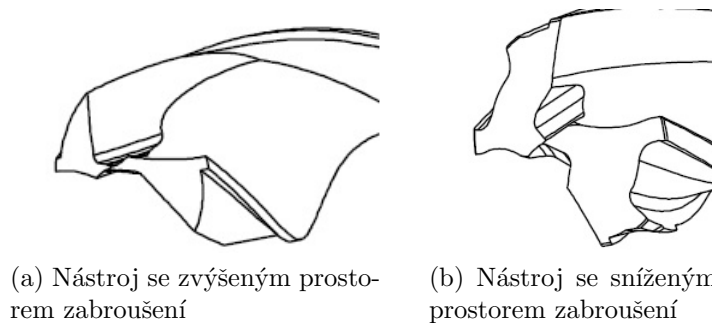
Obrázek 2.13: Základní úhly charakterizující hrot nástroje

Na obr. 2.13 jsou uvedeny normalizované tvary hrotu nástroje dle DIN 1412, které obsahují různé způsoby redukce příčného ostří. Tvar A má obvyklou délku příčného ostří kolem 8% průměru nástroje. Tvar B má kromě redukováné délky příčného ostří i ovlivněnou velikost úhlu čela na nástroji. Tento prvek se může použít u nástrojů pro zušlechťené materiály pro zvýšení pevnosti a tím trvanlivosti břitu. U příčného ostří dle tvaru C zasahuje zabroušení více do plochy hřbetu a výsledná délka příčného ostří je nižší než v případě typu A. Tím se vytvoří větší prostor pro vznikající třísku a zlepší se její odvod z místa řezu.



Obrázek 2.14: Redukce vyštipování základního materiálu

Tento tvar se používá nejčastěji u nástrojů z SK pro obrábění většiny typů materiálu. Tvar příčného ostří D má kromě snížené délky příčného ostří i upravený tvar hrotu nástroje. Tento typ se používá pro nástroje do křehkých materiálu jako je litina za účelem snížení vydrolování obráběného materiálu na výstupu nástroje z obrobku, viz obr. 2.14a. Je nutné poznamenat, že tento efekt lze dosáhnout i nástrojem s integrovanou navrtávací částí, viz obr. 2.14b, jak dokládá práce [67]. Tvar E se používá pro nástroje z HSS-Co pro vrtání do plechů či tenkostěnných profilů. Tvar S se používá pro nástroje z tzv. parabolickými drážkami a jak je patrné z obr. 2.13f, tvar zabroušení ovlivňuje i velikost úhlu čela hlavního břitu nástroje.



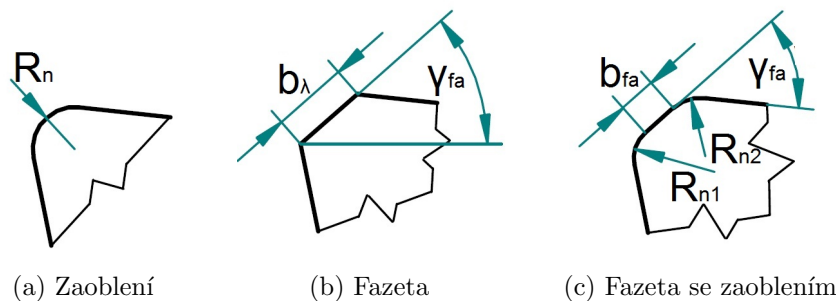
Obrázek 2.15: Různé modifikace redukce příčného ostří

Kromě těchto standardních typů zabroušení používají výrobci nástrojů různé modifikace, jak dokládají obr. 2.15a a 2.15b. Při návrhu vlastních tvarů musí konstruktér brát v úvahu mechanické vlastnosti obráběného a řezného materiálu. Dále pak je třeba brát v úvahu i tvar drážky nástroje pro možnost korekce úhlu čela hlavního břitu. Všechny tyto parametry ovlivňují zejména velikost odebraného materiálu při výrobě redukovaného příčného ostří a tím následně pevnost nástroje v této oblasti. Při nedostatečné pevnosti může dojít ke zničení nástroje.

2.4.2 Úpravy mikrogeometrie břitu

S neustále rostoucími požadavky na řezné nástroje se hledají možnosti zvýšení řezivosti nástrojů. Aplikací progresivních tenkých vrstev, založených na nanokompozitní struktuře či na kombinaci různých druhů tenkých vrstev, lze dosáhnout zvýšení řezivosti nástrojů zejména díky jejich ochraně před teplotními a chemickými vlivy obrábění, kterým je břit vystaven.

Další cestou ve zvyšování užitečných vlastností řezných nástrojů je tzv. rektifikace hlavního břitu pomocí jeho definovaného zaoblení, zkosením či kombinací obou způsobů, viz obr. 2.16.

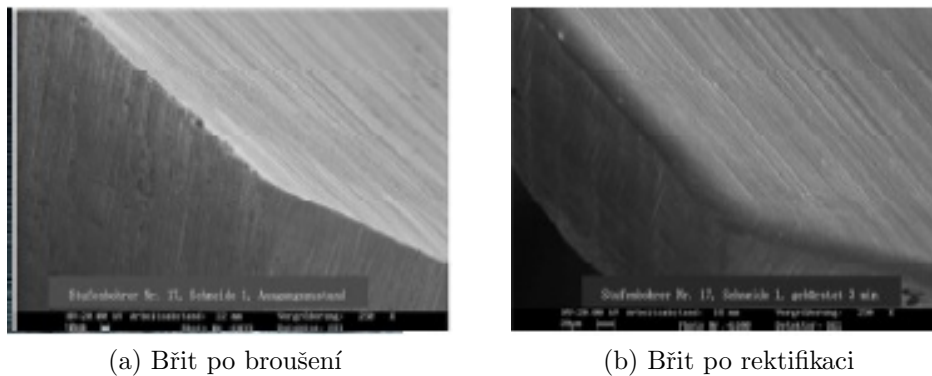


Obrázek 2.16: Porovnání různých mikroúprav břitu

Výše uvedené prvky lze vyrábět pomocí různých technologií, které pochází z oblastí zabývajících se odstraňováním otřepů a konvenčních či nekonvenčních dokončovacích technologií. Tyto technologie lze rozdělit na:

- Technologie využívající mechanickou energii
 - Mikrotryskání
 - Kartáčování
 - Magnetické leštění
 - Obrábění vodním paprskem
 - Mikrobroušení
 - Obrábění ultrazvukem
 - Lapování
- Technologie využívající tepelnou energii
 - Elektrojiskrové obrábění
 - Obrábění laserem, plasmou či elektronovým paprskem
- Technologie využívající chemických reakcí
 - Chemické leštění

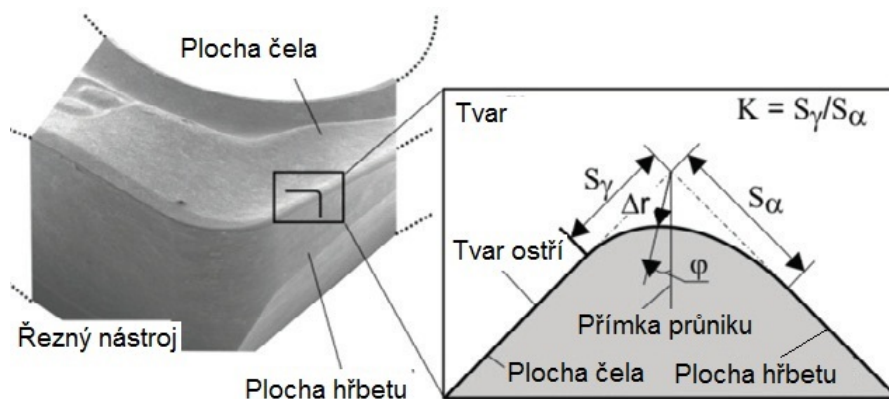
2.4.2.1 Rektifikace hlavního ostří zaoblením



Obrázek 2.17: Porovnání stavu břitu, převzato z [11]

Hlavní podstata rektifikace břitu pomocí jeho zaoblení spočívá v odstranění defektů na břitu nástroje, viz obr. 2.17b a vytvoření definovaného zaoblení R_n , viz obr. 2.17b. Tím dojde k odstranění koncentrátorů napětí a současně k lepšímu rozložení napětí na břitu. Konečným důsledkem je zvýšení trvanlivosti řezného nástroje.

Vedlejším efektem výše uvedených technologií je rovněž zlepšení drsnosti povrchu nástroje. Kombinací zaoblení a zlepšené drsnosti povrchu se zvyšuje adheze tenké vrstvy k základnímu materiálu nástroje, zejména v oblasti zaoblení, které je vystaveno největšímu zatížení. Dále se některé z výše uvedených technologií, např. vlečné omílání, mohou použít i pro odstranění makročásteček z povrchu nástroje po jeho depozici tenkou vrstvou²³ a tím dále příznivě ovlivňovat výslednou trvanlivost nástroje.



Obrázek 2.18: Parametry zaoblení břitu R_n , převzato z [21]

Zaoblení břitu je charakterizováno třemi parametry, viz obr. 2.18. Vlastní velikostí, resp. poloměrem R_n a jeho přimknutím vůči hřbetu a čelu nástroje, které je udáváno pomocí parametrů S_α , S_γ . Vzájemný poměr $\frac{S_\gamma}{S_\alpha}$ je označován jako tzv. k-faktor.

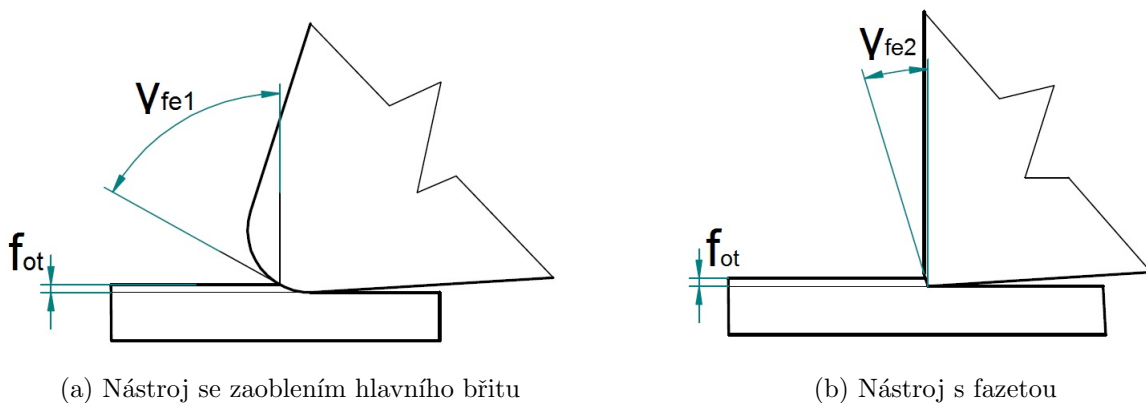
Práce [9] se zabývala studiem vlivu poloměru zaoblení ostří na trvanlivost nástroje při vrtání oceli C45 monolitním šroubovým vrtákem. Nástroj se zaoblením $R_n = 60\mu m$ se vyznačoval trojnásobnou trvanlivostí oproti nástroji bez zaoblení a dvojnásobnou trvanlivostí oproti nástroji s $R_n = 20\mu m$. Autoři tento výsledek připisovali kombinaci redukce napětí na břitu a lepší adhezi tenké vrstvy. Zajímavým závěrem vyplývajícím z provedených experimentů je, že kombinace zaoblení $R_n = 60\mu m$ ve střední části nástroje a $R_n = 20\mu m$ na vnější straně nástroje se vyznačovala vyšším opotřebením než nástroj bez zaoblení. Tento výsledek lze vysvětlit vyšším zpevněním obráběného materiálu díky vyššímu zaoblení ve střední části, které způsobilo celkově vyšší namáhání břitu na obvodu nástroje i za přítomnosti zaoblení.

Konkrétní velikost zaoblení hlavního břitu může být rovněž použita jako kritérium opotřebením nástrojů pro vrtání do kompozitních materiálů, jak dokládá práce [24]. Ta se zabývala vlivem velikosti zaoblení R_n na velikost posuvové složky rezné síly F_f , která přímo ovlivňuje možný vznik delaminace obráběného materiálu. Význam sledování R_n oproti standardně používanému kritériu V_{Bmax} autoři ospravedlňují silnou korelací mezi velikostí R_n a delaminací základního materiálu. Je však nutné poznamenat, že sledování takového typu opotřebením vyžaduje rovněž nové typy měřících zařízení.

2.4.2.2 Ochranné fazety

Fazeta je charakterizována pomocí šířky b_λ u úhlu čela γ_{fa} , viz obr. 2.13b. Její přínos je stejně jako v případě zaoblení ve snížení napětí na břitu a v pozitivní změně směru působení rezných sil na nástroji. Vlivu úpravy hlavního břitu pomocí ochranné fazety na trvanlivost nástroje u monolitních vrtacích nástrojů není věnována v odborné literatuře pozornost. Nicméně výrobci rezných nástrojů tento prvek používají u monolitních šroubových vrtáků pro obrábění běžných uhlíkových ocelí či nerezových celů, které se vyznačují vyšším zpevněním, během obrábění a nízkou teplotní vodivostí.

Hlavní zájem odborné literatury se soustřeďuje na oblast frézování či soustružení zušlechťených materiálů pomocí VBD s CBN, které zkoumali vliv mikroúpravy na integritu povrchu obrobeného povrchu. Práce [81] pozorovala vliv mikroúpravy hlavního břitu na velikost a hloubku vzniklých povrchových napětí u materiálu AISI 52100. Porovnávanými úpravami bylo zaoblení břitu nástroje $R_n = 122\mu\text{m}$ a zkosení řezné hrany o šířce $b_\lambda = 25,4\mu\text{m}$ a úhlu $\gamma_{fa} = -17^\circ$. Úprava břitu pomocí zaoblení vytvářela velikost maximálního napětí 1800MPa do hloubky $38\mu\text{m}$, zatímco úprava pomocí fazetky vytvářela napětí 1190MPa do hloubky $25\mu\text{m}$.

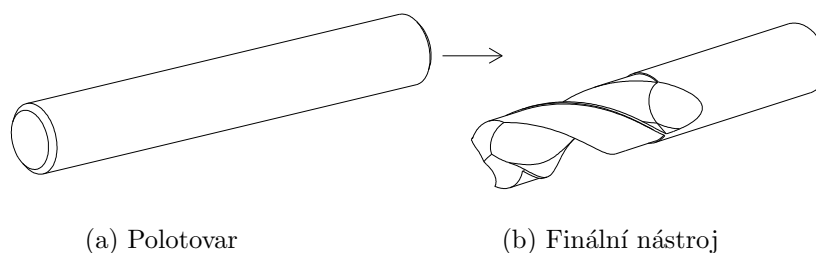


Obrázek 2.19: Porovnání záběrových podmínek

Tyto výsledky lze vysvětlit rozdílným efektivním úhlem čela mezi oběma nástroji, jak dokládá obr. 2.19a, resp. 2.19b. Z něho je patrné, že efektivní úhel čela u nástroje se zaoblením hlavního břitu je značně vyšší, konkrétně $\gamma_{fe1} = -60^\circ$, než v případě nástroje s ochrannou fazetkou, kde $\gamma_{fe2} = \gamma_{fa} = -17^\circ$. Dalším pozitivním přínosem u nástroje se zaoblením bylo vytvoření přechodové oblasti v obráběném materiálu, kde byl materiál značně deformován, zatímco nástroj s fazetkou tuto oblast v obráběném materiálu nevytvářel.

Kapitola 3

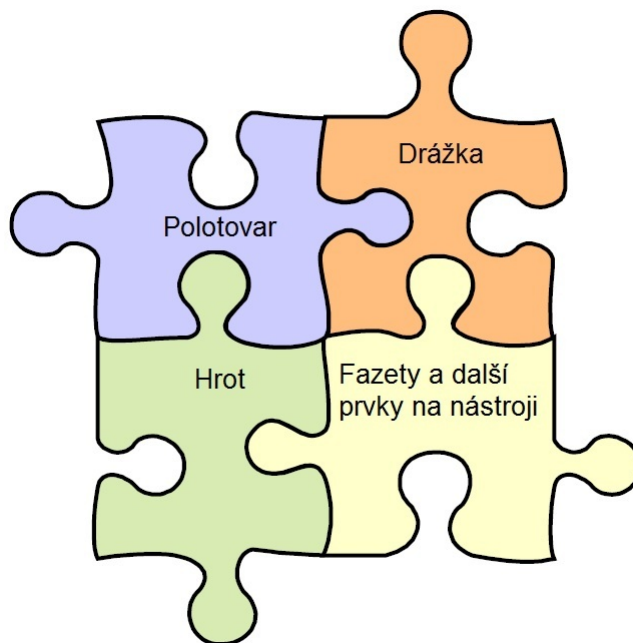
Nový přístup k modelování monolitního šroubovitého vrtáku



Obrázek 3.1: Základní přístup k modelování šroubovitého vrtáku

Nový přístup k modelování monolitního šroubovitého vrtáku spočívá ve využití kombinovaného způsobu modelování. Tento způsob uvažuje při vytváření jednotlivých prvků na nástroji tvar brousícího kotouče, ale pouze tam, kde je potřeba. Dále tento způsob kopíruje technologii výroby tím, že systém vytváření jednotlivých prvků probíhá od polotovaru po finální nástroj, viz obr. 3.1. S ohledem na efektivitu vytváření celého nástroje byly vytvořeny jednotlivé moduly pomocí jazyka VBA. Filozofie vytváření těchto modulů je naznačena na obr. 3.2. Každý modul má za úkol vytvořit určitý prvek na nástroji. Výhodou tohoto přístupu je, že pokud model obsahuje potřebnou referenční geometrii, např. drážku, je možné použít modul pro vytváření hrotu samostatně. Tzn., že pro vytvoření referenční geometrie není potřeba nutně používat předchozí moduly. Toto platí pro všechny vytvořené moduly. Další výhody tohoto uspořádání jsou:

- Přenositelnost
- Využití na jiné typy nástrojů
- Efektivita vytváření modelu



Obrázek 3.2: Koncept maker

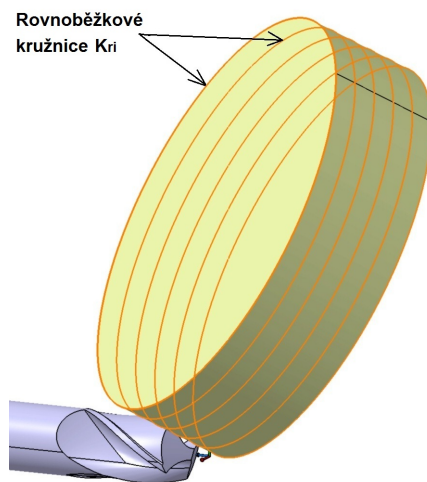
Jednou z možností, jak zahrnout tvar brousícího kotouče, spočívá v určení charakteristiky obalové plochy, kterou kotouč vytváří během svého pohybu. Pro zjištění charakteristiky lze využít tři základní metody:

- Grafické
- Početní
- Graficko-početní

S ohledem na aplikaci v CAD systémech a díky možnosti využití jejich automatizačních nástrojů se jeví jako nejvýhodnější využití grafických metod, které zahrnují tyto metody:

- Metoda tečných rovin
- Metoda kulových ploch

Metoda tečných rovin je omezená pouze na rozvinutelné typy tvořících ploch. Z tohoto důvodu lze uvažovat pouze metodu kulových ploch, kterou lze použít na všechny typy rotačních tvořících ploch. V následujícím textu budou představeny hlavní prvky použité metody, pro její bližší popis autor odkazuje na zdroj [33].

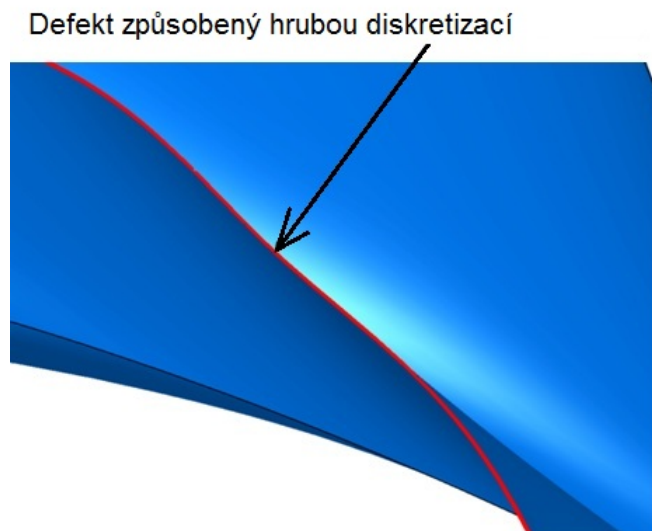


Obrázek 3.3: Diskretizace brousícího kotouče

Metoda spočívá v diskretizaci brousícího kotouče na sérii rovnoběžkových kružnic K_{ri} , viz obr. 3.3 a konstrukci kulových ploch pro jednotlivé řezy. Bod charakteristiky obalové plochy se obrtí jako průnik rovnoběžkové kružnice s charakteristikou kulové plochy K_{ki} . Tzn., že obecně je potřeba i řezů, kde i závisí na kroku diskretizace D_k . Pokud např. je požadavek, aby šroubovitý vrták měl kuželovité jádro, je nutné, aby brousící kotouč konal pohyb po šroubovici navinuté na kužel, který určuje průběh jádra nástroje. Tzn., že je nutné vyšetřovat charakteristiku obalové plochy v jednotlivých bodech j dráhy brousícího kotouče. Hodnota j závisí na volbě kroku diskretizace D_d . Z toho vyplývá, že je potřeba vykonat celkem $i*j$ iteračních kroků. Dalším problémem je fakt, že pro dráhu středu kulové plochy je potřeba použít spline funkci, jelikož standardní funkce systému CATIA neumožňuje vytvořit šroubovici, která by držela konstantní směr vysunutí ve směru jádra. Je nutné poznamenat, že přesnost aproximace šroubovice spline funkcí je rovněž závislá na jemnosti její diskretizace D_s , resp. na počtu bodů, kterými spline funkce prochází. Pokud diskretizace není dostatečně jemná, vznikají na výsledné obalové ploše nepřijatelné defekty, viz obr. 3.4. Z provedených pokusů se jako dostatečně jemná diskretizace pro jednotlivé prvky jeví:

- Diskretizace kotouče $D_k = 1mm$
- Diskretizace dráhy kotouče $D_d = 1mm$
- Diskretizace dráhy středu kulové plochy $D_s = 0.1mm$

Takto nastavené hodnoty mají za následek značný nárůst času potřebného pro vytvoření šroubovité drážky. Tato závislost je naznačena na obr. 3.5. Z grafu je patrné, že s rostoucí délkou drážky roste časová náročnost exponenciálně. Pro automatické vymodelování drážky o délce 20mm je čas potřebný na vytvoření větší než 40min, což je z praktického hlediska neúnosné.



Obrázek 3.4: Defekty na obalové ploše způsobené hrubou diskretizací

Z tohoto důvodu se jako další možné řešení naskýtá, výpočet souřadnic charakteristiky přímo pomocí vztahu viz zdroj [33]:

$$f(x, y, z, \alpha) = 0, \frac{\partial}{\partial \alpha} f(x, y, z, \alpha) = 0 \quad (3.1)$$

Nicméně tento výpočet je vhodný pouze pro jednoduché případy. Z tohoto důvodu je výhodnější pro stanovení charakteristiky obalové plochy graficko-početní metoda, která kombinuje grafickou metodu kulových ploch s potřebnými výpočty.

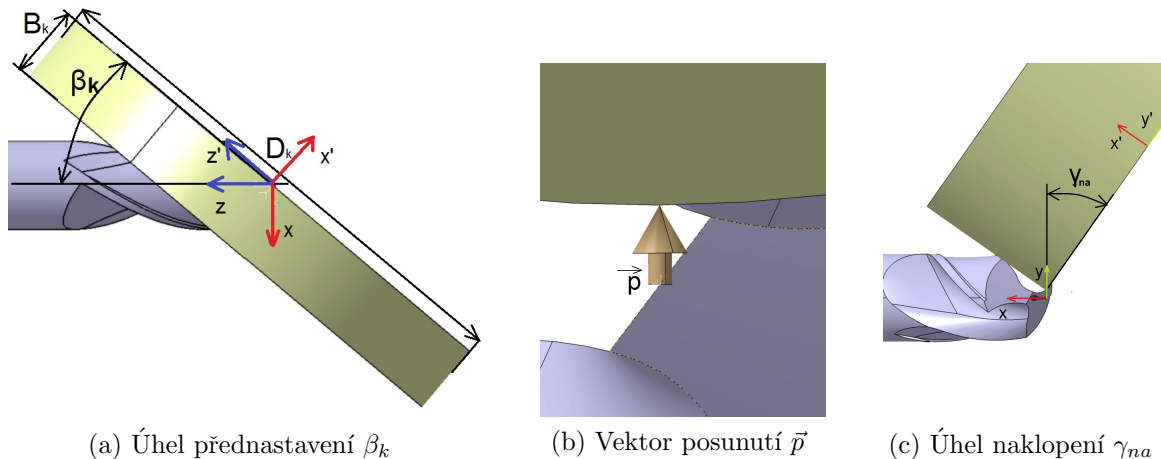
Tato metoda bude představena na monolitním šroubovitým vrtáku, jehož drážka je vytvořena pomocí standardního válcového kotouče 1A1²⁴.



Obrázek 3.5: Vliv délky drážky na dobu jejího vytvoření

3.1 Drážka

3.1.1 Vytváření šroubovitě drážky pomocí graficko-početní metody



Obrázek 3.6: Vzájemná poloha brousícího kotouče a obrobku

Výsledný tvar drážky je závislý na vzájemné poloze brousícího kotouče a obrobku, resp. na poloze jejich souřadných systémů. Konkrétně polohou souřadného systému brousícího kotouče (x' , y' , z') vůči souřadnému systému obrobku (x , y , z). Jejich vzájemnou polohu lze charakterizovat těmito parametry:

- Úhlem přednastavení β_k , který svírá osa brousícího kotouče s osou X obrobku dle 3.6a
- Posunutím brousícího kotouče vůči počátku souřadného systému obrobku $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)$ dle 3.6b
- Úhlem naklonění γ_{na} , který svírá bok brousícího kotouče s osou Y obrobku dle 3.6c

Jak bylo zmíněno výše, byl pro vytváření šroubovitě drážky použit brousící kotouč 1A1, který lze z geometrického pohledu charakterizovat jako rotační válcovou plochu. Tato plocha vzniká rotací přímky okolo rovnoběžné osy. Tvar kotouče lze tudíž popsat pomocí parametrické rovnice přímky dle vztahu 3.2. Je nutné poznamenat, že veškeré rovnice jsou vyjádřeny v souřadném systému obrobku (x , y , z).

$$X_{TK} = A_{TK} + \vec{u} * t \quad (3.2)$$

kde:

- X_{TK} je bod na tvaru kotouče pro danou hodnotu parametru t
- A_{TK} je počáteční bod na tvaru kotouče, v tomto případě $A_{TK} = [0, \frac{-D_k}{2}, 0]$

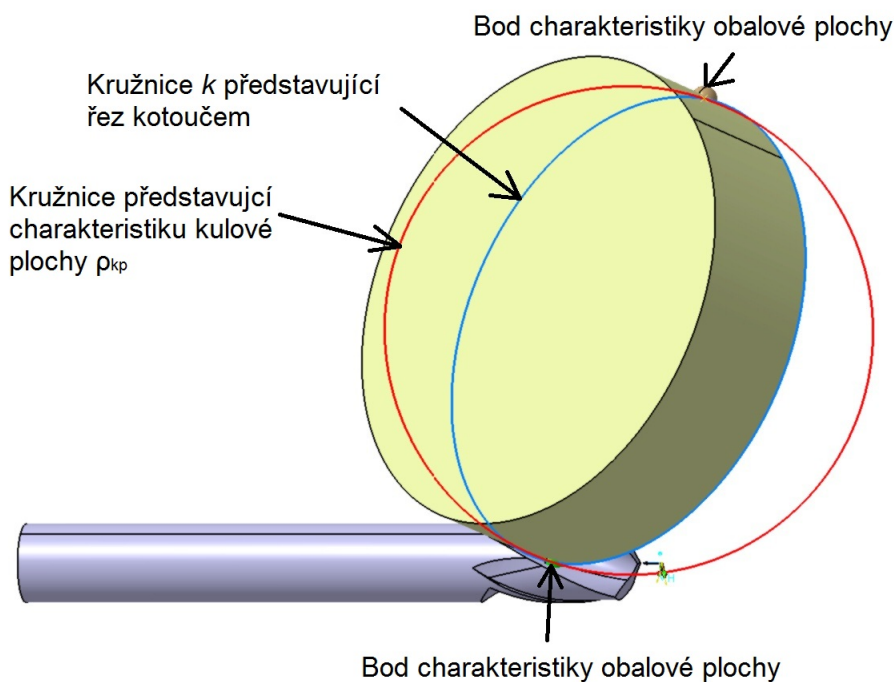
- \vec{u} je polohový vektor přímky, v tomto případě $\vec{u} = (B_k, 0, 0)$
 - Kde B_k je šířka brousícího kotouče, viz obr. 3.6a

Osu rotace brousícího kotouče lze vyjádřit stejným způsobem. V tomto případě bude mít parametrická rovnice 3.3 tvar

$$X_{OK} = A_{OK} + \vec{u} * v \quad (3.3)$$

kde:

- X_{OK} je bod na ose kotouče pro danou hodnotu parametru v
- A_{OK} je počáteční bod na ose kotouče, v tomto případě $A_{OK} = [0, 0, 0]$
- \vec{v} je polohový vektor osy brousícího kotouče, v tomto případě $\vec{v} = \vec{u} = (B_k, 0, 0)$



Obrázek 3.7: Poloha jednotlivých kružnic pro vyšetření charakteristiky obalové plochy

Pro samotné zjištění bodu charakteristiky obalové plochy je potřeba zjistit průsečík kružnice k , která představuje průměr kotouče v daném řezu kotouče. Druhá kružnice představuje charakteristiku kulové plochy ρ_{kp} . Souřadnice průsečíku se získá řešením soustavy rovnic popisující zmíněné kružnice. Z toho vyplývá, že je nejprve potřeba odvodit příslušné rovnice. K tomuto účelu lze použít geometrických transformací.

Kružnice představující řez kotouče v daném bodě je umístěná v počátku souřadného systému obrobku, konkrétně v rovině yz. Parametrická rovnice této kružnice je dána vztahem:

$$k_{yz} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{2}\sqrt{r_k^2} \cos(\alpha) \\ -\frac{1}{2}\sqrt{r_k^2} \sin(\alpha) \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Poloměr kružnice r_k získáme následujícím vztahem :

$$r_k = \sqrt{(A_{OK} - A_{TK})^2} = \sqrt{(x_{OK} - x_{TK})^2 + (y_{OK} - y_{TK})^2 + (z_{OK} - z_{TK})^2} \quad (3.5)$$

Kde souřadnice bodu A_{TK} , A_{OK} získáme dosazením do parametrických rovnic 3.2, resp. 3.3 pro $u=v$.

Kružnici k_{yz} je třeba transformovat do polohy, která odpovídá výchozí poloze kotouče vůči obrobku, resp. do bodu osy tohoto kotouče, viz obr. 3.7. Toto se provede pomocí následující transformace:

$$k_{TR} = k_{yz} T_{k1} T_{k2} * T_{k3} * T_{k4} \quad (3.6)$$

kde matice:

- T_{k1} je homogenní matice posunutí kružnice
- T_{k2} je homogenní matice rotace okolo osy Z obrobku
- T_{k3} je homogenní matice rotace okolo osy Y obrobku
- T_{k4} je homogenní matice posunutí do bodu na kotouči, který reprezentuje polohu řezu

$$T_{k1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & r_k & 0 & 1 \end{pmatrix} T_{k2} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_{na} & \sin \gamma_{na} & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_{na} & \cos \gamma_{na} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{k3} = \begin{pmatrix} \cos \beta_k & 0 & -\sin \beta_k & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta_k & 0 & \cos \beta_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{k4} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ Bt \cos \beta_k \cos \gamma_{na} + \frac{1}{2}r_k \cos \alpha & Bt \sin \gamma_{na} + r_k \sin \alpha & -Bt \sin \beta_k \cos \gamma_{na} & 1 \end{pmatrix}$$

V případech, je požadováno vytvoření kuželového jádra na vrtáku, je potřeba vyšetřovat charakteristiku v jednotlivých bodech dráhy brousícího kotouče. Z toho vyplývá, že je dále potřeba kružnici transformovat pomocí následujícího vztahu.

$$k_{TR2} = k_{TR}T_{k5}T_{k6}T_{k7} \quad (3.7)$$

kde matice:

- T_{k5} je homogenní matice posunutí kružnice ve směru jádra
- T_{k6} je homogenní matice posunutí ve směru osy Z obrobku
- T_{k7} je homogenní matice rotace okolo osy Z

$$T_{k5} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \Delta d_{jk}l \cos \alpha_2 & \Delta d_{jk}l \sin \alpha_2 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{k6} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{ls}{2\pi} & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{k7} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_{na2} & \sin \gamma_{na2} & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_{na2} & \cos \gamma_{na2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

kde matice:

- T_{k5} je homogenní matice posunutí kružnice ve směru jádra obrobku
- T_{k6} je homogenní matice posunutí kružnice ve směru osy Z obrobku pro danou hodnotu l
- T_{k7} je homogenní matice rotace kružnice okolo osy Z obrobku vyjadřující pootočení při posunutí o hodnotu l
- Δd_{jk} je hodnota jednotkového posunutí kružnice ve směru jádra ²⁵
- s je hodnota stoupání šroubovice, která vyjadřuje dráhu brousícího kotouče

Dalším krokem je transformace kružnice, která vyjadřuje charakteristiku kulové plochy do polohy kotouče. Tato kružnice je umístěna v rovině xy se středem v počátku souřadného systému obrobku. Rovnici této kružnice lze vyjádřit vztahem 3.8:

$$k_{xy} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}\sqrt{r_k^2} \cos \alpha \\ -\frac{1}{2}\sqrt{r_k^2} \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Zde je situace značně komplikovanější, protože poloha této kružnice závisí na poloze tečny ke křivce, která určuje dráhu středu kulové plochy ²⁶. Z tohoto důvodu je nejprve třeba zjistit příslušné hodnoty úhlů, o které bude kružnice vyjadřující charakteristiku kulové plochy transformována.

Výše zmiňovaná křivka je šroubovice k_s , jejíž parametrická rovnice je vyjádřena vztahem 3.20:

$$k_s = B_s T_{k5} T_{k6} T_{k7} \quad (3.9)$$

Bod $B_s = [B_{sx}, B_{sy}, B_{sz}]$ je bodem na ose kotouče. Jeho souřadnice získáme po transformaci bodu osy kotouče X_{OK} získaného dle vztahu 3.3. Transformace je obdobná jako pro šroubovici K_s s tím rozdílem, že místo bodu B_s dosadíme bod X_{OK} .

Po úpravě vztahu 3.9 obdržíme vztah 3.10:

$$k_s = \begin{pmatrix} \cos(\gamma_3) \left(B_{sx} + \frac{\gamma_3 \delta s \cos \alpha}{2\pi L_{Dr}} \right) - \sin \gamma_3 \left(B_{sy} + \frac{\gamma_3 \delta d_{jks} \sin \alpha}{2\pi L_{Dr}} \right) \\ \sin \gamma_3 \left(B_{sx} + \frac{\gamma_3 \delta d_{jks} \cos \alpha}{2\pi L_{Dr}} \right) + \cos \gamma_3 \left(B_{sy} + \frac{\gamma_3 \delta d_{jks} \sin \alpha}{2\pi L_{Dr}} \right) \\ B_{sz} + \frac{\gamma_3 s}{2\pi} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Složky tečného vektoru obdržíme po následující úpravě za současného předpokladu, že $\gamma_3 = 0$:

$$\vec{v}_s = \frac{dk_s}{d\gamma_3} \quad (3.11)$$

$$\vec{v}_s = \begin{pmatrix} \frac{\delta d_{jks} \cos \alpha}{2\pi L_{Dr}} - B_{sy} \\ B_{sx} + \frac{\delta d_{jks} \sin \alpha}{2\pi L_{Dr}} \\ \frac{s}{2\pi} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Tento vektor se následně transformuje do počátku souřadného systému obrobku, kde se zjistí odchylka tečného vektoru od osy Z a odchylka od jeho průmětu v rovině xz . K provedení transformace se použije následujícího vztahu:

$$\vec{v}_{sT} = \vec{v}_s T_{k5}^{-1} T_{k6}^{-1} T_{k7}^{-1} \quad (3.13)$$

Zjištěné odchytky se použijí pro transformaci kružnice, která představuje charakteristiku kulové plochy v daném řezu brousícího kotouče dle následujícího vztahu:

$$k_{ch} = k_{xy} T_{k8} T_{k9} T_{k10} T_{k11} \quad (3.14)$$

kde:

- k_{ch} je charakteristika kulové plochy v daném řezu brousícího kotouče
- k_{xy} je kružnice dle vztahu 3.8, vyjadřující charakteristiku kulové plochy, umístěná v rovině xy
- T_{k8} je homogenní matice rotace kolem osy X o odchytku α_2 mezi vektorem \vec{v}_s a jeho průmětem do roviny xz
- T_{k9} je homogenní matice rotace kolem osy Y o odchytku β_2 mezi vektorem \vec{v}_s osou Z obrobku
- T_{k10} je homogenní matice rotace kolem osy Z obrobku o odchytku γ_4 vyjadřující pootočení brousícího kotouče při jeho pohybu drážkou nástroje
- T_{k11} je homogenní matice posunutí do vyšetřované polohy řezu kotouče

$$T_{k8} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{k9} = \begin{pmatrix} \cos \beta_2 & 0 & -\sin \beta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta_2 & 0 & \cos \beta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{k10} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_4 & \sin \gamma_4 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_4 & \cos \gamma_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{k11} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ B_{sX} & B_{sY} & B_{sZ} & 1 \end{pmatrix}$$

Tímto způsobem byla obdržena rovnice charakteristiky kulové plochy k_{ch} , jak je uvedeno v následujícím vztahu 3.15, který určuje polohu charakteristiky kulové plochy v daném řezu kotouče:

$$k_{ch2} = \begin{pmatrix} B_{sx} + r_k \cos \gamma_4 (\sin \alpha_2 \sin \beta_2 \cos \delta - \cos \beta_2 \sin \delta) - r_k \cos \alpha_2 \sin \gamma_4 \cos \delta \\ B_{sy} + r_k \sin \gamma_4 (\sin \alpha_2 \sin \beta_2 \cos \delta - \cos \beta_2 \sin \delta) + r_k \cos \alpha_2 \cos \gamma_4 \cos \delta \\ B_{sz} + r_k \sin \alpha_2 \cos \beta_2 \cos \delta + r_k \sin \beta_2 \sin \delta \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

V samotném výpočtu souřadnic bodu charakteristiky se řeší soustava tří rovnic pro neznámé parametry obou kružnic β , δ a souřadnice bodu charakteristiky $c = (c_x, c_y, c_z)$. Přitom se vychází z předpokladu, že neznámé souřadnice charakteristiky obalové plochy $c = (c_x, c_y, c_z)$ nabývají stejné hodnoty pro obě kružnice k_{TR2} , k_{ch2} , jelikož se jedná o jejich průsečík. Řešená soustava je symbolicky vyjádřena :

$$c = \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{pmatrix} = k_{TR2} = \begin{pmatrix} k_{TR2x} \\ k_{TR2y} \\ k_{TR2z} \end{pmatrix} = k_{ch} = \begin{pmatrix} k_{ch2x} \\ k_{ch2y} \\ k_{ch2z} \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

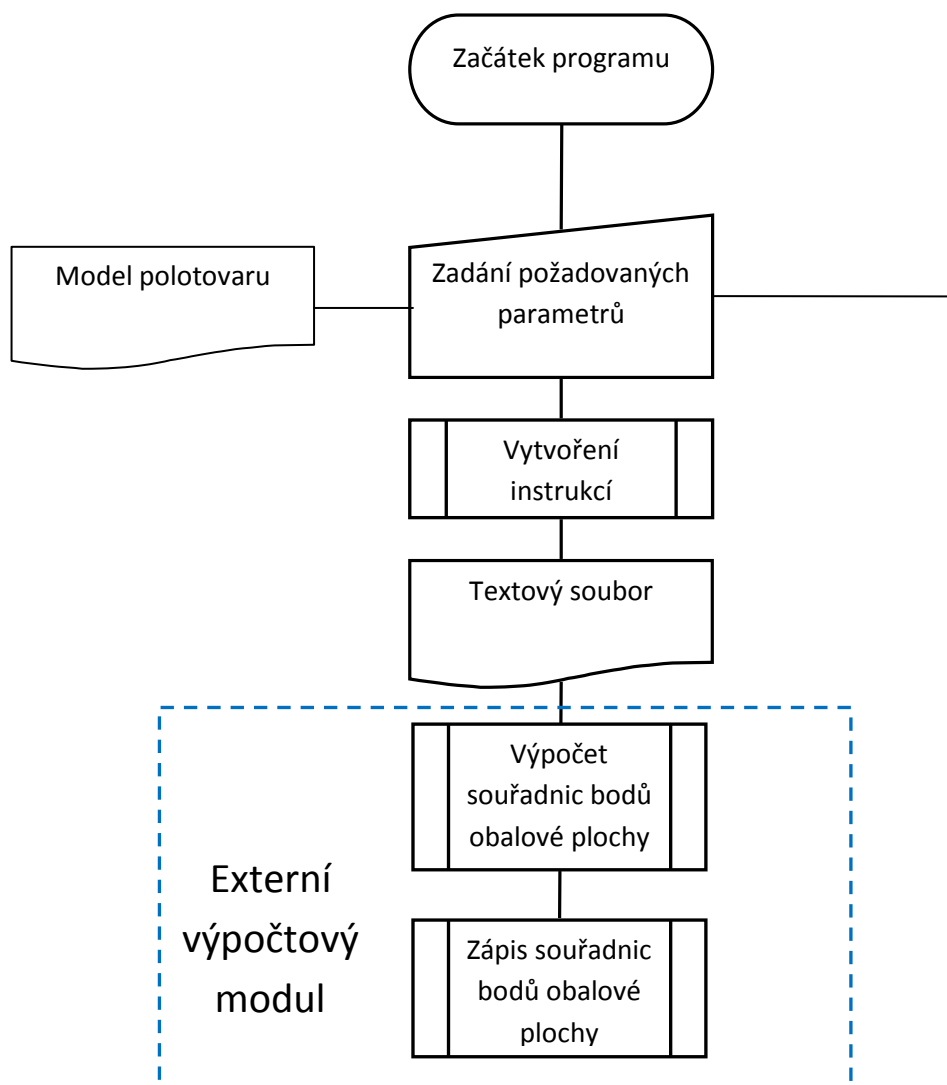
3.1.2 Implementace vytváření drážky pomocí graficko-početní metody

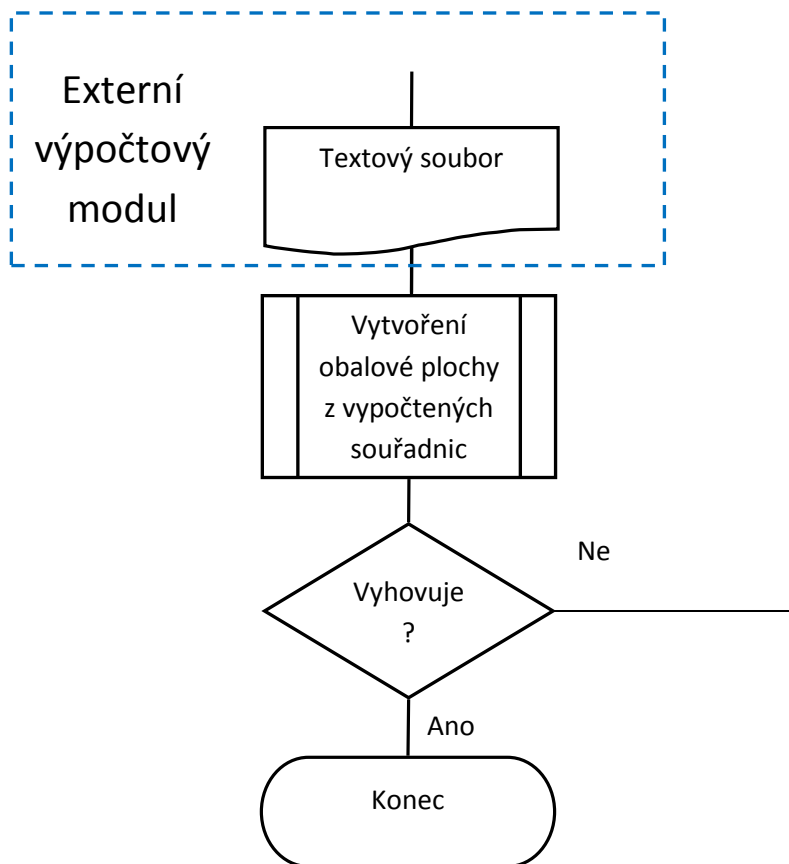
Z hlediska dosažení vyšší efektivity při vytváření plochy drážky byl použit algoritmus, který je zobrazen ve vývojovém diagramu na obr. 3.8. V prvním kroku uživatel spustí aplikaci vytvořenou pomocí jazyka VBA v systému CATIA V5. Po zadání požadovaných parametrů pomocí uživatelského rozhraní, viz obr. A.2, které se týkají:

- Šroubové drážky
 - Stoupání
 - Průběh jádra po délce nástroje
- Brousícího kotouče
 - Tvar
 - Průměr D_k
 - Šířka B_k
 - Poloha vůči nástroji

Následně dojde ke spuštění skriptu, který vytvoří textový soubor obsahující uživatelem zadané parametry ve formě instrukcí. Tyto instrukce slouží jako vstup pro samostatný výpočtový modul. Výpočtový modul vytvořený pomocí jazyka C++ má za úkol vypočítat souřadnice bodů charakteristiky dle metody popisované v předchozí kapitole. Po proběhnutí výpočtu modul vytvoří textový soubor, do něhož zapíše výsledky výpočtu. V tomto okamžiku již známé souřadnice bodů obalové plochy jsou automaticky načteny aplikací v systému CATIA V5 a je z nich vytvořena příslušná plocha drážky.

Na obr. 3.9 je graf znázorňující porovnání časové náročnosti mezi graficko-početní a grafickou metodou. Z uvedeného grafu vyplývá, že využitím graficko-početní metody se dosáhne více než osmdesátinásobného zrychlení při vytváření drážky o délce 20mm. Navíc pro grafickou metodu je tato délka limitní. Tzn., že grafická metoda není schopná delší drážky vytvářet, zatímco graficko-početní metoda takové omezení nemá.





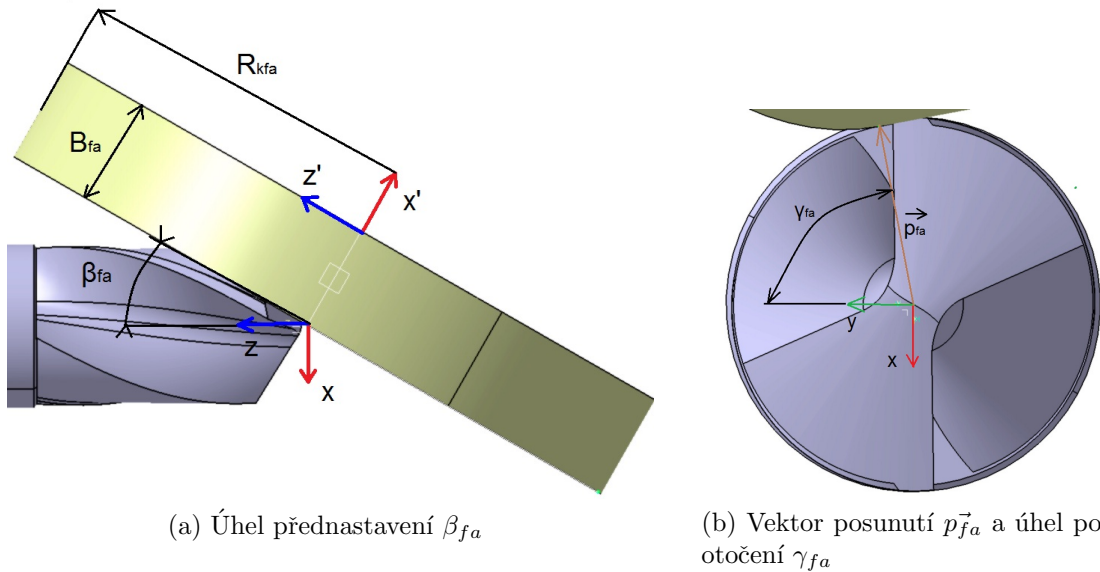
Obrázek 3.8: Algoritmus vytváření šroubové drážky



Obrázek 3.9: Porovnání časové náročnosti na vytvoření drážky pomocí různých metod

3.2 Fazety

3.2.1 Vytváření fazet pomocí graficko - početní metody



Obrázek 3.10: Vzájemná poloha brousícího kotouče a obrobku

Shodně jako v případě šroubovitě drážky, tak i v případě fazet bude použita k vytváření plochy fazet graficko-početní metoda. Použitý brousící kotouč je válcový tvaru 1A1. Poloha kotouče vůči nástroji je definována těmito parametry, viz obr. 3.10:

- Úhlem přednastavení β_{fa} , který svírá osa brousícího kotouče s osou Z obrobku
- Posunutím brousícího kotouče vůči počátku souřadného systému obrobku

$$p_{fa} = (p_{fax}, p_{fay}, p_{faz})$$
- Úhlem pootočení γ_{fa} , kotouče vůči ose Y obrobku

V případě získání parametrické rovnice kružnice reprezentující řez brousícím kotoučem se postupuje obdobně jako v případě šroubovitě drážky a tudíž lze použít vztahů 3.2 a 3.3 jako pro definici kružnice umístěné v počátku souřadného systému resp. v rovině yz. Jedinou úpravou použitého vztahu je záměna použitých parametrů $X_{ok} \rightarrow X_{okfa}$, $A_{ok} \rightarrow A_{okfa}$ a $B_k \rightarrow B_{kfa}$. Pro zjištění poloměru kružnice se využije vztahu 3.5. Tato kružnice se dále transformuje do výchozí polohy kotouče pomocí následujícího vztahu 3.17:

$$k_{TRfa} = k_{yzfa} T_{k1} T_{kfa2} T_{kfa3} T_{kfa4} \quad (3.17)$$

kde matice:

- k_{TRfa} je homogenní matice transformované kružnice do výchozí polohy kotouče
- k_{yzfa} je homogenní matice kružnice v rovině yz
- T_{k1} je homogenní matice posunutí kružnice
- T_{kfa2} je homogenní matice rotace okolo osy Y obrobku
- T_{kfa3} je homogenní matice rotace okolo osy Z obrobku
- T_{kfa4} je homogenní matice posunutí do bodu na kotouči, který reprezentuje polohu řezu na ose kotouče

$$T_{k1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & r_{kfa} & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad T_{kfa2} = \begin{pmatrix} \cos \beta_{fa} & 0 & -\sin \beta_{fa} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta_{fa} & 0 & \cos \beta_{fa} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{kfa3} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_{fa} & \sin \gamma_{fa} & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_{fa} & \cos \gamma_{fa} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{kfa4} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ B_{fa}t \cos \beta_{fa} \cos \gamma_{fa} + \frac{1}{2}r_{kfa} \cos \alpha & B_{fa}t \sin \gamma_{fa} + r_{kfa} \sin \alpha & -B_{fa}t \sin \beta_{fa} \cos \gamma_{fa} & 1 \end{pmatrix}$$

Je nutné poznamenat, že úhel γ_{fa} je dán rozměry fazet. Konkrétně jejich šířkou a hloubkou viz obr. 3.10b. Hodnota úhlu γ_{fa} se získá dosazením do vztahu 3.18:

$$\gamma_{fa} = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{|p_{fa}^{\vec{}}|}{p_{fax}} \quad (3.18)$$

kde:

- $|p_{fa}^{\vec{}}|$ je velikost polohového vektoru bodu fazety
- p_{fax} je x-ová souřadnice polohového vektoru bodu fazety

Z důvodu dodržení konstantní šířky fazety po délce nástroje musí brousící kotouč měnit radiální vzdálenost od osy nástroje ve směru vektoru $p_{fa}^{\vec{}}$, viz obr. 3.10b. Z tohoto důvodu je nutné, aby byla charakteristika obalové plochy vyšetřována v jednotlivých bodech šroubovice, která představuje dráhu brousícího kotouče při vytváření fazet. Proto je potřeba dále kružnici transformovat ve směru dráhy brousícího kotouče pomocí následujícího vztahu 3.19:

$$k_{TRfa2} = k_{TRfa} T_{kfa5} T_{kfa6} T_{kfa7} \quad (3.19)$$

kde matice:

- T_{kfa5} je homogenní matice posunutí kružnice ve směru jádra obrobku
- T_{kfa6} je homogenní matice posunutí ve směru osy Z obrobku
- T_{kfa7} je homogenní matice rotace okolo osy Z obrobku

$$T_{kfa5} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \Delta r_{fa} l \cos \alpha_{fa2} & \Delta r_{fa} l \sin \alpha_{fa2} & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{kfa6} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{ls}{2\pi} & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{kfa7} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_{fa2} & \sin \gamma_{fa2} & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_{fa2} & \cos \gamma_{fa2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

kde matice:

- Δr_{fa} je hodnota jednotkového posunutí kružnice ve směru jádra obrobku ²⁷
- s_{fa} je hodnota stoupání šroubovice, která vyjadřuje dráhu brousícího kotouče

Obdobně jako v případě šroubovitě drážky je v dalším kroku potřeba transformovat kružnici představující charakteristiku kulové plochy. Ta je opět umístěna v rovině xy a tudíž pro její popis lze použít vztahu 3.8. Pro transformaci této kružnice do počátku souřadného systému je potřeba znát její odchylky od jednotlivých souřadnicových os X, Y, Z. K tomuto účelu lze využít tečný vektor dráhy středu kulové plochy. Dráhou středu kulové plochy je šroubovice k_{sfa} , jejíž parametrická rovnice je výjádřena vztahem 3.20:

$$k_{sfa} = B_s T_{k5} T_{k6} T_{k7} \quad (3.20)$$

Bod $B_{sfa} = [B_{sxfa}, B_{syfa}, B_{szfa}]$ je opět bodem na ose kotouče. Jeho souřadnice získáme po transformaci bodu osy kotouče X_{okfa} získaného dle vztahu 3.3. Transformace je obdobná jako pro šroubovici k_{sfa} s tím rozdílem, že místo bodu B_{sfa} dosadíme bod X_{okfa} .

Po úpravě vztahu 3.20 obdržíme vztah 3.21:

$$k_{sfa} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_{fa3} \left(B_{sxfa} + \frac{\gamma_{fa3} \delta s_{fa} \cos \alpha_{fa}}{2\pi L_{dfa}} \right) - \sin \gamma_{fa3} \left(B_{syfa} + \frac{\gamma_{fa3} \delta d_{jks_{fa}} \sin \alpha_{fa}}{2\pi L_{dfa}} \right) \\ \sin \gamma_{fa3} \left(B_{sxfa} + \frac{\gamma_{fa3} \delta r_{kfa} s_{fa} \cos \alpha_{fa}}{2\pi L_{dfa}} \right) + \cos \gamma_{fa3} \left(B_{syfa} + \frac{\gamma_{fa3} \delta r_{kfa} s_{fa} \sin \alpha_{fa}}{2\pi L_{dfa}} \right) \\ B_{szfa} + \frac{\gamma_{fa3} s_{fa}}{2\pi} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

Složky tečného vektoru obdržíme po následující úpravě za současného předpokladu, že $\gamma_{fa3} = 0$:

$$v_{sfa}^{\vec{}} = \frac{dk_{sfa}}{d\gamma_{fa3}} \quad (3.22)$$

$$v_{sfa}^{\vec{}} = \begin{pmatrix} \frac{\delta r_{kfa} s_{fa} \cos \alpha_{fa}}{2\pi L_{d}} - B_{syfa} \\ B_{sxfa} + \frac{\delta r_{kfa} s_{fa} \sin \alpha_{fa}}{2\pi L_{dfa}} \\ \frac{s_{fa}}{2\pi} \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

Tento tečný vektor se následně transformuje do výchozí polohy kotouče, k čemuž se použije vztahu:

$$v_{sTfa}^{\vec{}} = v_{sfa}^{\vec{}} T_{kfa7}^{-1} T_{kfa6}^{-1} T_{kfa5}^{-1} \quad (3.24)$$

Nicméně v tomto případě není možné použít stejný systém měření odchylek jako v případě šroubovitě drážky, jelikož dochází k výpočtu nesprávných hodnot. To se následně projeví v chybném výpočtu souřadnic charakteristiky a následně i obalové plochy. Proto je potřeba způsob zjišťování odchylek upravit.

Nejprve je potřeba dále transformovat tečných vektor v_{sTfa} do počátku souřadného systému nástroje pomocí vztahu 3.25:

$$v_{sTfa2}^{\vec{}} = v_{sTfa}^{\vec{}} T_{kfa8}^{-1} \quad (3.25)$$

kde:

$$T_{kfa8}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ X_{okfaX} & X_{okfaY} & X_{okfaZ} & 1 \end{pmatrix}$$

je inverzní matice posunutí z bodu na ose kotouče v základní poloze. Je nutné poznamenat, že tento bod se mění v závislosti na poloze řezu kotouče. V dalším kroku dochází k odměření úhlu mezi vektorem $v_{s\vec{T}fa2}$ a souřadnicovou osou X obrobku. Tento úhel je označen jako γ_{fa4} a slouží pro další transformaci dle vztahu:

$$v_{s\vec{T}fa3} = v_{s\vec{T}fa2} T_{kfa9}^{-1} \quad (3.26)$$

kde:

$$T_{kfa9}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_{fa4} & -\sin \gamma_{fa4} & 0 & 0 \\ \sin \gamma_{fa4} & \cos \gamma_{fa4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Po provedení transformace dochází ke zjištění úhlu mezi vektorem $v_{s\vec{T}fa3}$ a souřadnou osou Z obrobku. Zjištěný úhel je následně dosazen do vztahu 3.27:

$$v_{s\vec{T}fa4} = v_{s\vec{T}fa3} T_{kfa10}^{-1} \quad (3.27)$$

kde:

$$T_{kfa10}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos(\beta_{fa2}) & 0 & \sin(\beta_{fa2}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta_{fa2}) & 0 & \cos(\beta_{fa2}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Posledním krokem je zjištění úhlu α_{fa} mezi vektorem $v_{s\vec{T}fa4}$ a souřadnou osou Z obrobku tentokrát v rovině YZ. Tento úhel se použije pro poslední transformaci dle vztahu 3.28:

$$v_{s\vec{T}fa5} = v_{s\vec{T}fa4} T_{kfa11} \quad (3.28)$$

kde:

$$T_{kfa11} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_{fa}) & -\sin(\alpha_{fa}) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_{fa}) & \cos(\alpha_{fa}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Touto poslední transformací se dosáhlo toho, že vektor $v_{s\vec{T}fa5}$ je umístěn v počátku souřadného systému a je rovnoběžný se souřadnou osou Z obrobku. Zjištěné hodnoty úhlů α_{fa} , β_{fa2} a γ_{fa4} se použijí při transformaci kružnice reprezentující charakteristiku kulové plochy do základní polohy brousícího kotouče. K této transformaci se použije vztahu:

$$k_{chfa} = k_{xyfa} T_{kfa11} T_{kfa10} T_{kfa9} T_{kfa8} \quad (3.29)$$

kde:

- k_{chfa} je charakteristika kulové plochy kotouče

- k_{xyfa} je kružnice o poloměru kotouče, která je umístěna v počátku souřadného systému obrobku, konkrétně v rovině XY
- T_{kfa8} je homogenní matice posunutí z počátku souřadného systému obrobku do bodu na ose brousícího kotouče v základní poloze
- T_{kfa9} je homogenní matice rotace okolo souřadné osy X obrobku o hodnotu α_{fa}
- T_{kfa10} je homogenní matice rotace okolo souřadné osy Y obrobku o hodnotu β_{fa2}
- T_{kfa11} je homogenní matice rotace okolo souřadné osy Z obrobku o hodnotu γ_{fa4}

$$T_{kfa8} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ B_{faX} & B_{faY} & B_{faZ} & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{kfa9} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{fa} & \sin \alpha_{fa} & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_{fa} & \cos \alpha_{fa} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{kfa10} = \begin{pmatrix} \cos \beta_{fa2} & 0 & -\sin \beta_{fa2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta_{fa2} & 0 & \cos \beta_{fa2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{kfa11} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_{fa4} & \sin \gamma_{fa4} & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_{fa4} & \cos \gamma_{fa4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Posledním krokem je transformace charakteristiky kulové plochy podél dráhy brousícího kotouče podle vztahu:

$$k_{chfa2} = k_{chfa} T_{k5} T_{k6} T_{k7} \quad (3.30)$$

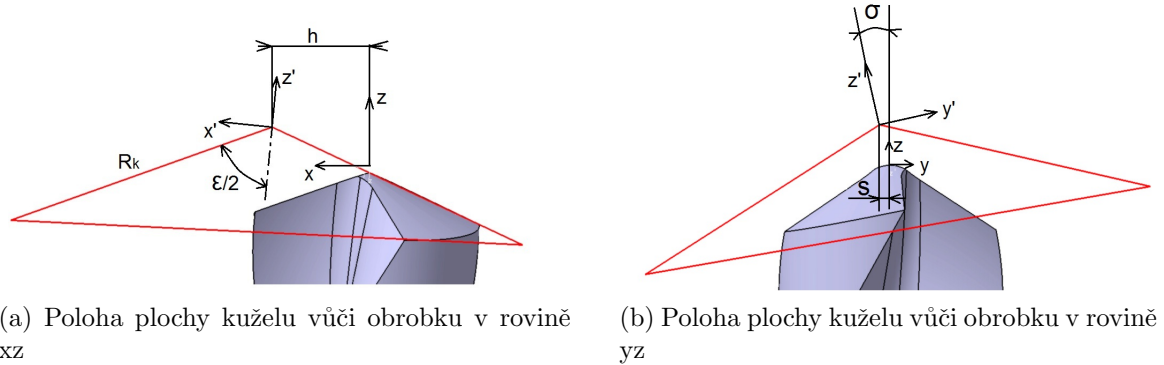
Následně se může přistoupit k výpočtu bodu charakteristiky c_{fa} . V něm opět řešíme soustavu tří rovnic pro neznámé parametry:

$$c = \begin{pmatrix} c_{fax} \\ c_{fay} \\ c_{faz} \end{pmatrix} = k_{TR2} = \begin{pmatrix} k_{TRfa2} \\ k_{TRfa2} \\ k_{TRfa2} \end{pmatrix} = \rho_{kp} = \begin{pmatrix} k_{chfa2x} \\ k_{chfa2y} \\ k_{chfa2z} \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

Tato soustava se řeší pro každý bod charakteristiky obalové plochy, resp. pro každý řez kotouče v každé jeho poloze při jeho pohybu drážkou. Jelikož vlastní implementace je totožná jako v případě vytváření šroubovitě drážky tzn., že využívá externí výpočtový modul pro zjištění souřadnic obalové plochy, bude tímto odkázána na část 3.1.2. Hlavní rozdíl spočívá v uživatelském rozhraní modulu, pro který se poukazuje na přílohu této práce, viz obr. A.4.

3.3 Hrot

3.3.1 Vytváření hrotu s kuželovou plochou hřbetu



Obrázek 3.11: Systém polohování plochy kužele vůči obrobku

Kuželovou plochu lze zařadit do třídy rotačních kvadrik a vzniká rotací přímky okolo osy, se kterou svírá daný úhel. Vzájemnou polohu kuželové plochy, která vytváří plochu hřbetu na obrobku lze určit pomocí souřadných systémů obrobku (x, y, z) a souřadného systému vlastní kuželové plochy (x^l, y^l, z^l) , viz obr. 3.11. Tvořící přímka a osa rotace jsou umístěny v rovině, která není rovnoběžná s rovinou xz, ale je pootočena o úhel σ , který ovlivňuje úhel hřbetu α . Dále je kuželové plocha vyosena vůči ose obrobku o hodnotu, která je dána úhlem vyosení μ a délkou L, dle obr. 3.12. Vlivem vyosení dochází k vytvoření příčného ostří. Parametrickou rovnici této kuželové plochy τ_k získáme její transformací dle vztahu:

$$\tau_{k2} = \tau_{k1} T_{\tau1} T_{\tau2} \quad (3.32)$$

kde matice:

- τ_{k1} je matice popisující kuželovou plochu umístěnou v počátku souřadného systému, jejíž osa rotace je rovnoběžná s osou obrobku Z
- $T_{\tau1}$ je matice rotace okolo osy X obrobku
- $T_{\tau2}$ je matice posunutí ve směru vyosení dle obr. 3.12

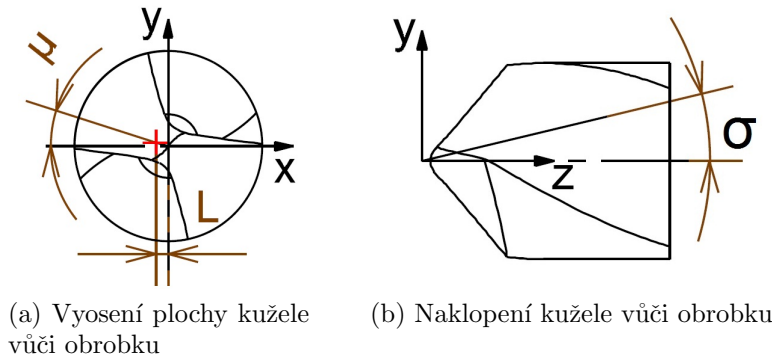
$$\tau_{k1} = \begin{pmatrix} t \cos \beta R_{\text{kuz}} \sin\left(\frac{\epsilon_r}{2}\right) \\ -t R_{\text{kuz}} \cos\left(\frac{\epsilon_r}{2}\right) \\ -t \sin(\beta) R_{\text{kuz}} \sin\left(\frac{\epsilon_r}{2}\right) \\ 1 \end{pmatrix} T_{\tau1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \sigma & \sin \sigma & 0 \\ 0 & -\sin \sigma & \cos \sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} T_{\tau2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ L \cos \mu & L \sin \mu & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Výsledná rovnice kuželové plochy je uvedena ve vztahu:

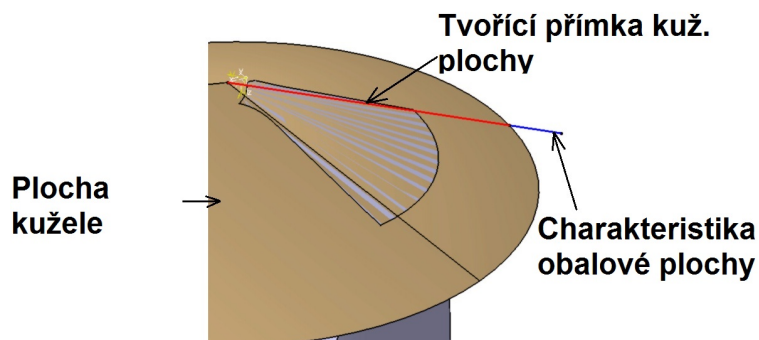
$$\begin{pmatrix} \frac{1}{2}L_k \cos \mu + t \cos \beta R_{\text{kuz}} \sin \left(\frac{\epsilon_r}{2}\right) \\ \frac{1}{2}L_k \sin(\mu) + t \sin(\alpha) \sin(\beta) R_{\text{kuz}} \sin \left(\frac{\epsilon_r}{2}\right) - t \cos(\alpha) R_{\text{kuz}} \cos \left(\frac{\epsilon_r}{2}\right) \\ -t \cos(\alpha) \sin(\beta) R_{\text{kuz}} \sin \left(\frac{\epsilon_r}{2}\right) - t \sin(\alpha) R_{\text{kuz}} \cos \left(\frac{\epsilon_r}{2}\right) \\ 1 \end{pmatrix}$$

kde:

- β je úhel rotace tvořící přímky $\beta \in (0, 2\pi)$
- t je hodnota parametru tvořící přímky
- R_{kuz} je poloměr kuželové plochy
- ϵ_r je vrcholový úhel kuželové plochy



Obrázek 3.12: Systém polohování plochy kužele vůči obrobku



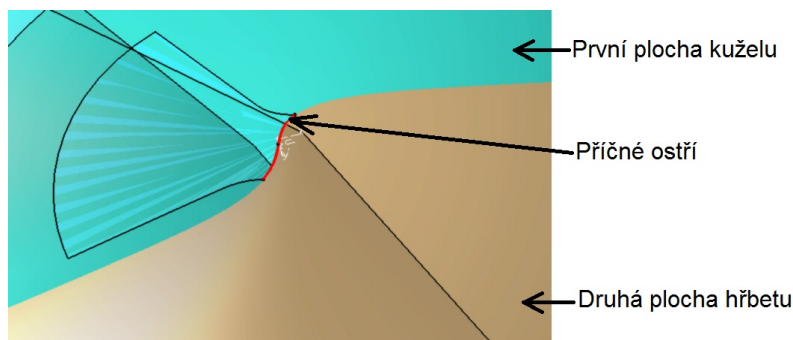
Obrázek 3.13: Porovnání charakteristiky obalové plochy s tvořící přímkou

Z pohledu vytváření této plochy na obrobku se jedná rovněž o část obalové plochy, kterou brousící kotouč vytvoří při svém pohybu. Nicméně v případě kuželové plochy je charakteristikou obalové plochy přímo tvořící přímka rotační kuželové plochy, viz. obr. 3.13. Z tohoto pohledu není nutné používat pro tento speciální případ graficko-početní metodu jako v případě šroubovitě drážky.

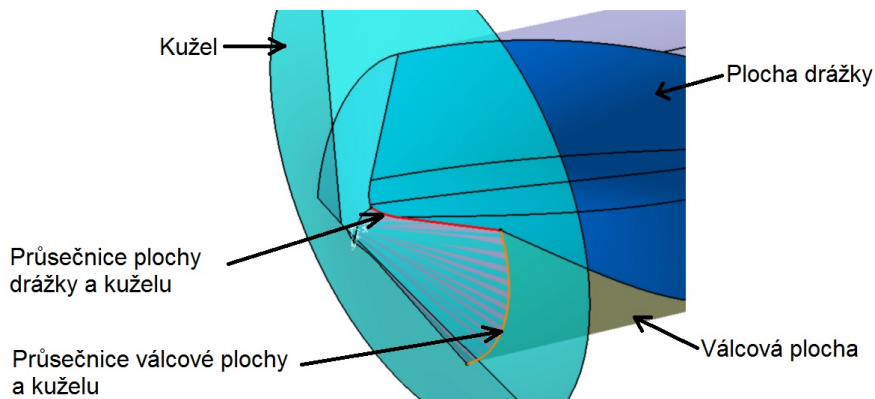
3.3.2 Implementace vytváření kuželové plochy hrotu

S ohledem na informace uvedené v předchozí části je postačující k vytvoření kuželové plochy hrotu využít standardní funkce, který systém CATIA V5 nabízí. Nicméně dalším problémem je efektivní vytváření tohoto prvku na nástroji. Tento problém vyplývá z podstaty vytváření, protože :

- Úhel příčného ostří Ψ_{pp} je určen vzájemným průnikem kuželových ploch, viz obr. 3.14a
- Úhel hrotu ϵ_r a hřbetu α_f je určen vzájemným průnikem kuželové plochy se šroubovitou plochou drážky, resp. s válcovou plochou těla obrobku, viz obr. 3.14b



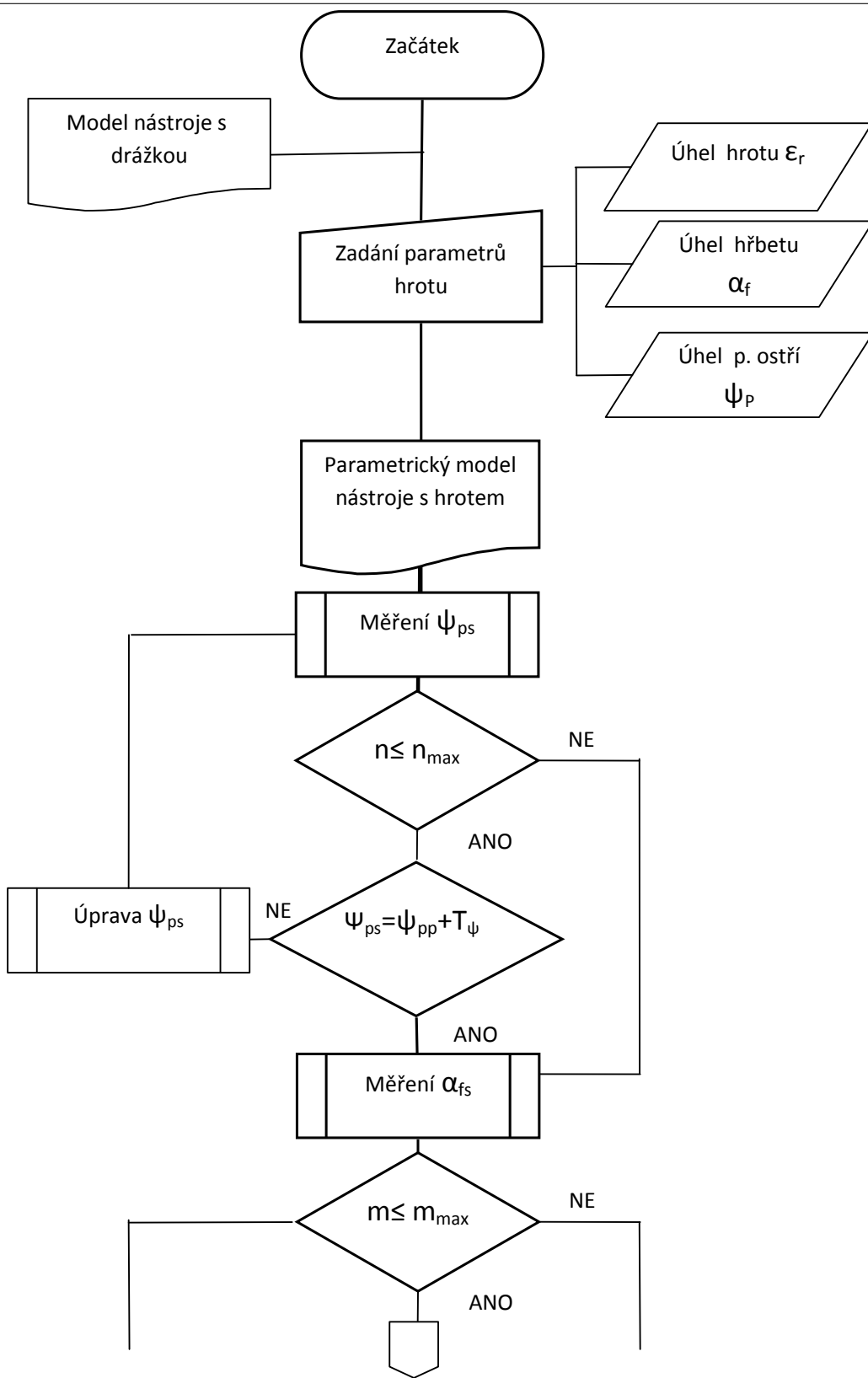
(a) Průnik ploch kuželů

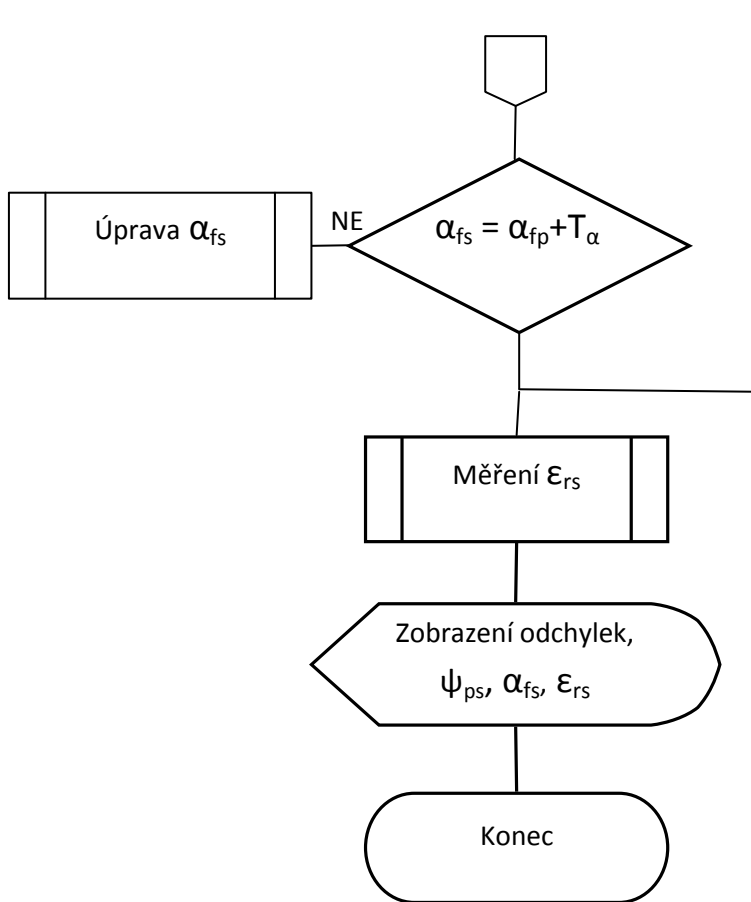


(b) Průnik plochy kuželu s tělem obrobku

Obrázek 3.14: Průniky jednotlivých ploch při vytváření hrotu

Vlivem těchto složitých průniků dochází ke vzniku odlišností mezi požadovanými a skutečnými hodnotami výše uvedených úhlů. Konstruktor je pak nucen postupovat systémem pokus-omyl což je značně časově náročný úkol. Z tohoto důvodu je v následujícím textu uveden modul, který obsahuje polohovací algoritmus k efektivnímu vytvoření hrotu.





Obrázek 3.15: Způsob vytváření hrotu obrobku

Proces práce s modulem je znázorněn na blokovém schématu na obr. 3.15. Konstruktor, který má již vytvořený model obrobku s drážkou, využije k zadání požadovaných parametrů uživatelské rozhraní, viz obr. A.3 v příloze. Po zadání parametrů hrotu ϵ_r , příčného ostří Ψ_{pp} a úhlu hřbetu α_f se spustí vlastní proces.

V prvním kroku dojde k vytvoření nezbytné geometrie a následnému vytvoření hrotu na obrobku. Poté dojde ke kontrole skutečné hodnoty příčného ostří Ψ_s podle vztahu 3.33:

$$\Psi_{ps} = \Psi_{pp} + T_{\Psi} \quad (3.33)$$

kde:

- Ψ_{ps} je skutečná hodnota úhlu příčného ostří
- Ψ_{pp} je požadovaná hodnota úhlu příčného ostří
- T_{Ψ} je povolená odchylka mezi Ψ_{ps} a Ψ_{pp}

V případě, že neplatí vztah 3.33 dochází, ke spuštění algoritmu, který má za úkol upravit polohu kuželové plochy vůči obrobku tak, aby byla splněna podmínka daná vztahem 3.33. Tento algoritmus je založen na iterační bázi a nachází svoje uplatnění např. při učení neuronových sítí. Jeho podstatou je úprava úhlu σ dle následujícího vztahu 3.34:

$$\sigma_{(n+1)} = \sigma_{(n)} - k * (\Psi_{psi} - \Psi_{pp}) \quad (3.34)$$

kde:

- $\sigma_{(n)}$ je hodnota úhlu σ v kroku (n), který ovlivňuje hodnotu příčného ostří
- $\sigma_{(n+1)}$ je hodnota úhlu σ v kroku (n+1)
- $k \in 0, 1$ je brzdící konstanta, bráníci polohovacímu algoritmu uvíznutí v tzv. lokálním minimu²⁸
- Ψ_{psn} je hodnota skutečného úhlu příčného ostří v kroku n

Ke zjištění skutečné hodnoty Ψ_{psn} je použito funkce systému CATIA V5 pro zjištění průniku ploch. Následně je vytvořen pomocný náčrt v rovině P_p a změřena skutečná hodnota úhlu Ψ_{psn} . Takto algoritmus pokračuje, dokud není splněna podmínka daná vztahem 3.33 nebo $n = n_{max}$.

V dalším kroku algoritmus přechází na úpravu úhlu hřbetu α_f . Ta probíhá shodným způsobem jako v případě úhlu příčného ostří. Symbolicky je vyjádřena vztahem:

$$\alpha_{fs} = \alpha_{fp} + T_\alpha \quad (3.35)$$

kde:

- α_{fs} je skutečná hodnota úhlu příčného ostří
- α_{fp} je požadovaná hodnota úhlu příčného ostří
- T_α je povolená odchylka mezi α_{fs} a α_{fp}

V této fázi algoritmus upravuje hodnotu úhlu μ , který ovlivňuje úhel hřbetu α_f . Úprava je vyjádřena vztahem 3.36:

$$\mu_{m+1} = \mu_{(m)} - k * (\alpha_{fsm} - \alpha_{fp}) \quad (3.36)$$

kde:

- $\mu_{(m)}$ je hodnota úhlu μ v kroku (m)
- $\mu_{(m+1)}$ je hodnota úhlu μ v kroku (m+1)
- $k \in 0, 1$ je opět brzdící konstanta
- α_{fsm} je hodnota skutečného úhlu hřbetu v kroku m

Způsob zjištění hodnoty α_{fsm} je shodný jako v případě Ψ_{psn} . Algoritmus probíhá, dokud není splněna podmínka daná vztahem 3.35 nebo není dosažen maximální počet cyklů $m = m_{max}$.

V posledním kroku se provede kontrola úhlu hrotu ϵ_r podle vztahu 3.37:

$$\epsilon_{rs} = \epsilon_{rp} + T_\epsilon \quad (3.37)$$

kde:

- ϵ_{rs} je skutečná hodnota úhlu hrotu
- ϵ_{rp} je požadovaná hodnota úhlu hrotu
- T_ϵ je povolená odchylka mezi ϵ_{rs} a ϵ_{fp}

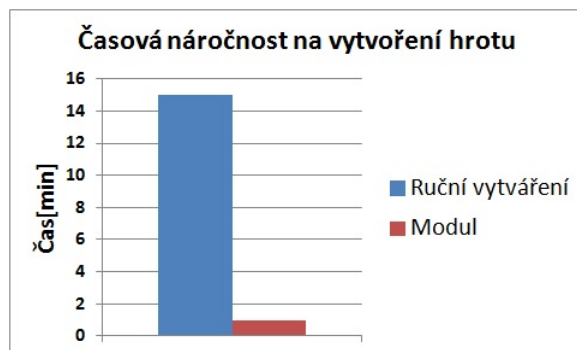
V tomto případě však postačuje úprava dle vztahu 3.38:

$$\epsilon_{(rl+1)} = \epsilon_{(rl)} - (\epsilon_{rsl} - \epsilon_{rp}) \quad (3.38)$$

kde:

- $\epsilon_{(rl)}$ je hodnota úhlu ϵ_r v kroku (l)
- $\epsilon_{(rl+1)}$ je hodnota úhlu ϵ_r v kroku (l+1)
- ϵ_{rsl} je hodnota skutečného úhlu hřbetu v kroku l

Je nutné poznamenat, že l nabývá hodnoty 1. Tzn., že zde žádná iterace neprobíhá, jelikož není třeba. V posledním kroku dojde znovu ke kontrole platností vztahů 3.33, 3.35 a 3.37. Pokud jeden z kontrolovaných parametrů nesplňuje příslušnou podmínku, celý algoritmus probíhá od začátku. V opačném případě je uživatel informován pomocí dialogového okna, viz obr. A.6 v příloze. V grafu na obr. 3.16 je provedeno porovnání časové náročnosti mezi ručním vytvářením hrotu a jeho vytvořením pomocí modulu. Z grafu je patrné patnáctinásobné zrychlení celého procesu.

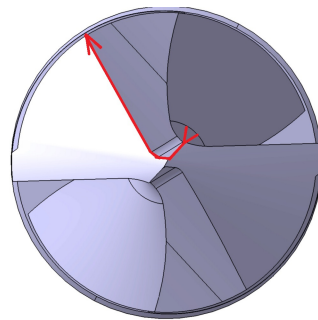


Obrázek 3.16: Porovnání časové náročnosti při vytváření hrotu

3.4 Redukce délky příčného ostří

3.4.1 Vytváření redukce délky příčného ostří

Jak bylo zmíněno v předchozích částech této práce, existují normalizované tvary redukováných příčných ostří nebo upravené tvary - tzv. volné formy, kdy konstruktér navrhne vlastní tvar. Z hlediska volnosti návrhu bude další postup zaměřen na tzv. volnou formu.



Obrázek 3.17: Dráha brousícího kotouče při vytváření redukce příčného ostří

Tento typ redukce délky příčného ostří nevyužívá obalových ploch stejně jako je tomu v případě hrotu nástroje. Důvodem tohoto postupu je fakt, že při volné formě se brousící kotouč pohybuje tak, jak je naznačeno na obr. 3.17. Z toho vyplývá, že jmenovitý průměr brousícího kotouče kopíruje zadanou dráhu v celé délce a tudíž je výsledný tvar zabroušení v nástroji tvořen pouze tímto jmenovitým průměrem. Díky tomu je možné celý tvar kotouče nahradit kružnicí, která má stejný průměr jako jmenovitý průměr kotouče, lze následně vyjádřit vztahem 3.40:

$$k_{TRv} = k_{yzv} T_{kv1} T_{kv2} T_{kv3} T_{kv4} \quad (3.39)$$

Kde matice :

- k_{TRv} je homogenní matice kružnice transformované do požadované polohy
- k_{yzv} je homogenní matice kružnice transformované v rovině YZ obrobku
- T_{kv1} je homogenní matice posunutí kružnice
- T_{kv2} je homogenní matice rotace okolo osy Y obrobku
- T_{kv3} je homogenní matice rotace okolo osy Z obrobku
- T_{kv4} je homogenní matice posunutí do požadované polohy

$$T_{kv1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & R_k & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{kv2} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_{fv} & 0 & -\sin \gamma_{fv} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma_{fv} & 0 & \cos \gamma_{fv} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{kv3} = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\pi}{2} - \lambda_v) & (\frac{\pi}{2} - \lambda_v) & 0 & 0 \\ -\sin(\frac{\pi}{2} - \lambda_v) & \cos(\frac{\pi}{2} - \lambda_v) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{kv4} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ p_{vx} & p_{vy} & p_{vz} & 1 \end{pmatrix}$$

kde:

- R_k je poloměr brousícího kotouče
- γ_{fv} je úhel čela redukce příčného ostří, viz obr. 3.18d
- λ_v je úhel pootočení od hlavního břitu, viz obr. 3.18b
- \vec{p}_v je vektor posunutí do požadované polohy daná velikostí příčného ostří

Výsledné maticové vyjádření parametrické rovnice kružnice je dáno vztahem:

$$\begin{pmatrix} -\sin(\alpha) \sin(\lambda_v) R_k \sin(\gamma_{fv}) - \cos(\lambda_v) (R_k - \cos(\alpha) R_k) + p_{vx} \\ -\sin(\alpha) \cos(\lambda_v) R_k \sin(\gamma_{fv}) + \sin(\lambda_v) (R_k - \cos(\alpha) R_k) + p_{vy} \\ p_{vz} - \sin(\alpha) R_k \cos(\gamma_{fv}) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.40)$$

Tato kružnice je pak výchozím prvkem při vytváření vlastní redukce příčného ostří popisovaného v další části.

3.4.2 Implementace redukce příčného ostří

K vytváření prvku redukce příčného ostří v systému CATIA V5 slouží standardní funkce. Nicméně, aby bylo možné vytvářet prvek efektivně, byl pro tento účel vytvořen speciální modul. Jeho funkce je zobrazen na blokovém schématu na obr. 3.19.

V prvním kroku uživatel zadá požadované parametry pomocí uživatelského rozhraní, viz obr. A.8 v příloze:

- Úhel pootočení od břítu λ_v , viz obr. 3.18a
- Délka příčného ostří L_p , viz obr. 3.18b
- Požadovaný průměr jádra ve vzdálenosti špičky vrtáku D_j , viz obr. 3.18c
- Úhel čela příčného ostří γ_v , viz obr. 3.18d
- Délka vyjetí L_v , viz obr. 3.18b
- Úhel vyjetí α_{v1} , viz obr. 3.18b
- Rádus vyjetí R_v , viz obr. 3.18b
- Úhel boku vyjetí α_{v2} , viz obr. 3.18a

Následně dojde automaticky k vytvoření plochy, kterou brousící kotouč vytvoří během svého pohybu. Tím je dosaženo efektivního vytváření potřebné geometrie. Z pohledu vytváření prvku dochází k průnikům potřebné geometrie s plochou hřbetu nástroje. Tím dochází ke zkreslení mezi požadovanými a skutečnými hodnotami. Pro korekci vzniklých zkreslení byl použit polohovací algoritmus, který je založen na stejné bázi jako v případě vytváření hrotu nástroje.

Po vytvoření vlastní geometrie dojde ke kontrole délky příčného ostří dle vztahu 3.41:

$$L_{ps} = L_{pp} + T_{Lp} \quad (3.41)$$

kde:

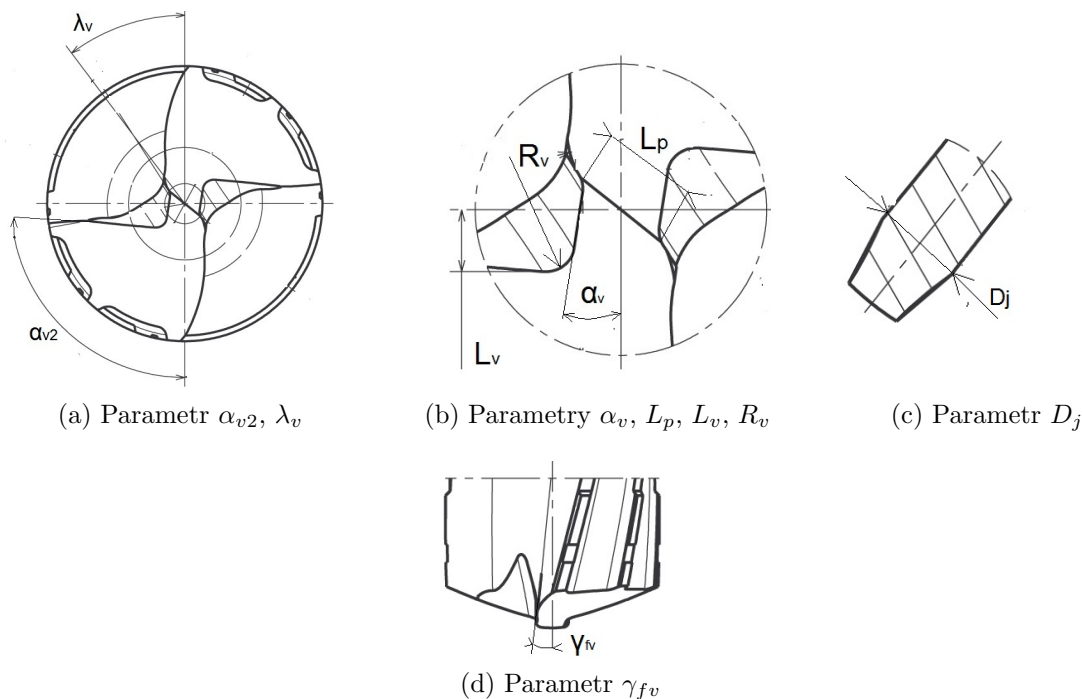
- L_{ps} je skutečná hodnota délky příčného ostří
- L_{pp} je požadovaná hodnota délky příčného ostří
- T_{Lp} je povolená odchylka mezi L_{ps} a L_{pp}

V případě, že byla zjištěna odchylka mezi kontrolovanými hodnotami, dojde ke spuštění polohovacího algoritmu následujícího vztahu:

$$L_{(pi+1)} = L_{(pi)} - k * (L_{psi} - L_{pp}) \quad (3.42)$$

kde:

- $L_{(pi)}$ je teoretická hodnota délky příčného ostří v kroku (i), který ovlivňuje hodnotu příčného ostří
- $L_{(pi+1)}$ je teoretická hodnota délky příčného ostří v kroku (i+1)



Obrázek 3.18: Parametry redukce délky příčného ostří

- $k \in 0,1$ je brzdící konstanta bránící polohovacímu algoritmu uvíznutí v tzv. lokálním minimu ²⁹
- L_{psi} je hodnota skutečné délky příčného ostří v kroku (i)

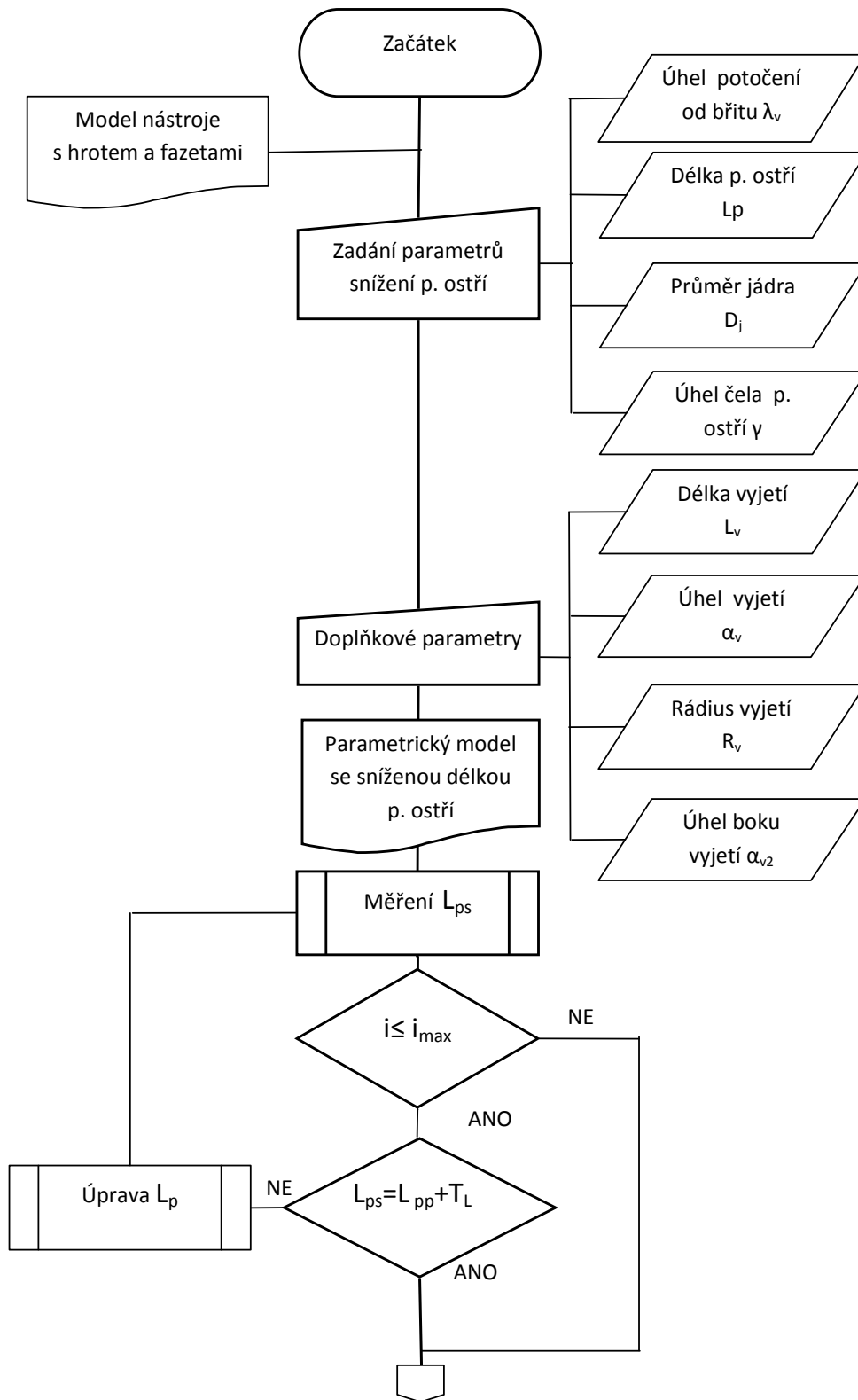
Algoritmus probíhá do doby než je dosažena platnost vztahu 3.41 nebo pokud je $i = i_{max}$.

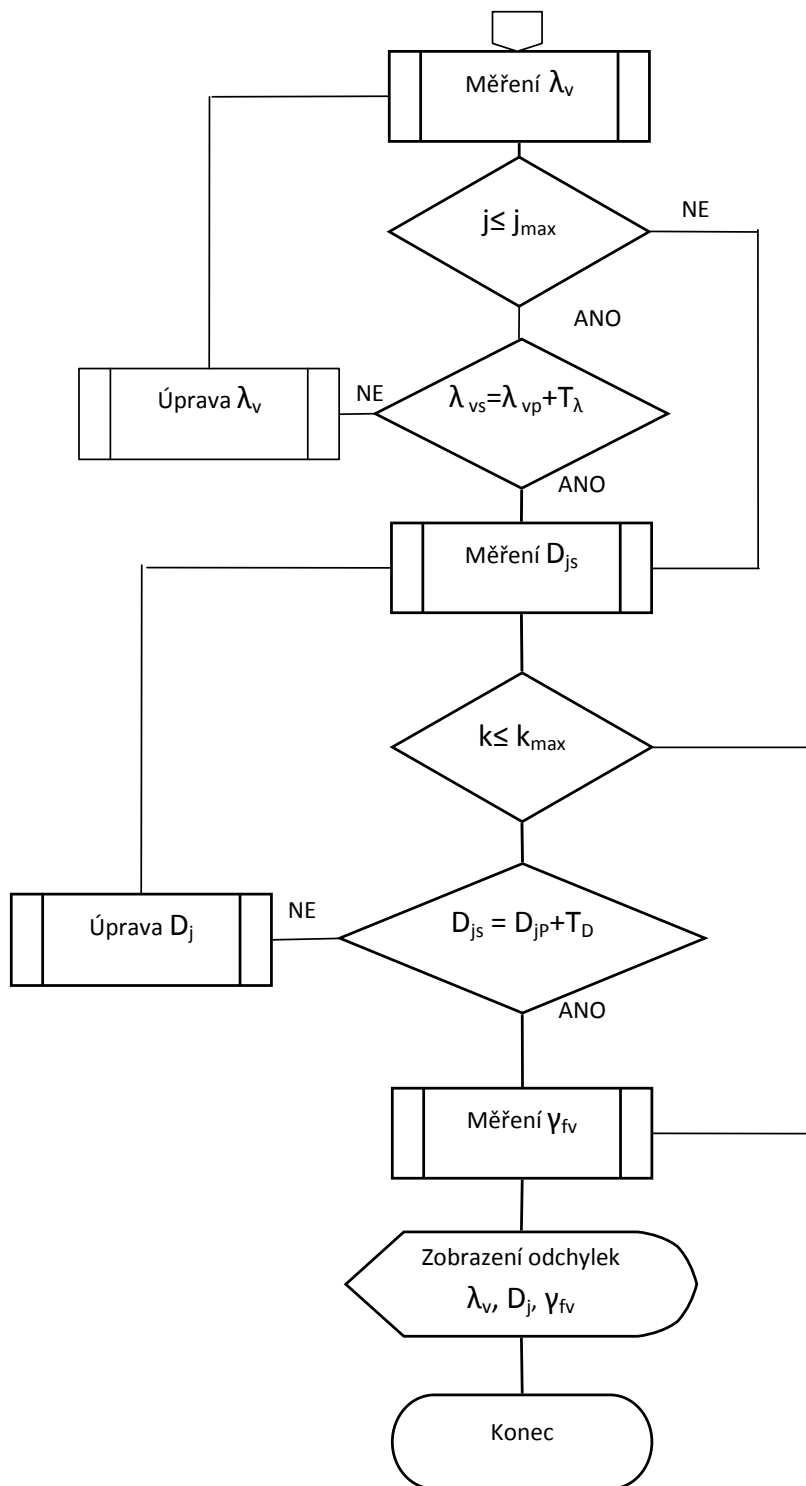
V dalším kroku dochází ke kontrole úhlu pootočení od břitu λ_v podle vztahu 3.43:

$$\lambda_{vs} = \lambda_{sp} + T_{\lambda_s} \quad (3.43)$$

kde:

- λ_{vs} je skutečná hodnota úhlu pootočení od břitu
- λ_{vp} je požadovaná hodnota úhlu pootočení od břitu
- T_{λ_s} je povolená odchylka mezi λ_{vs} a λ_{vp}





Obrázek 3.19: Vývojový diagram vytváření redukce příčného ostří

Pokud kontrola zjistí, že neplatí výše uvedený vztah, spustí algoritmus dle vztahu:

$$\lambda_{(vj+1)} = \lambda_{(vj)} - k * (\lambda_{vsj} - \lambda_{vp}) \quad (3.44)$$

kde:

- $\lambda_{(vj)}$ je teoretická hodnota úhlu pootočení od břitu v kroku (j)
- $\lambda_{(vj+1)}$ je teoretická hodnota úhlu pootočení od břitu v kroku (j+1)
- $k \in 0, 1$ je brzdící konstanta, bránící polohovacímu algoritmu uvíznutí v tzv. lokálním minimu ³⁰
- λ_{vsj} je hodnota skutečného úhlu pootočení od břitu v kroku (j)

Po dosažení platnosti vztahu 3.43 nebo hodnoty $j = j_{max}$, přechází algoritmus do své poslední fáze. V této fázi dochází nejprve ke kontrole skutečného průměru jádra dle vztahu 3.45.

$$D_{js} = D_{jp} + T_{D_j} \quad (3.45)$$

kde:

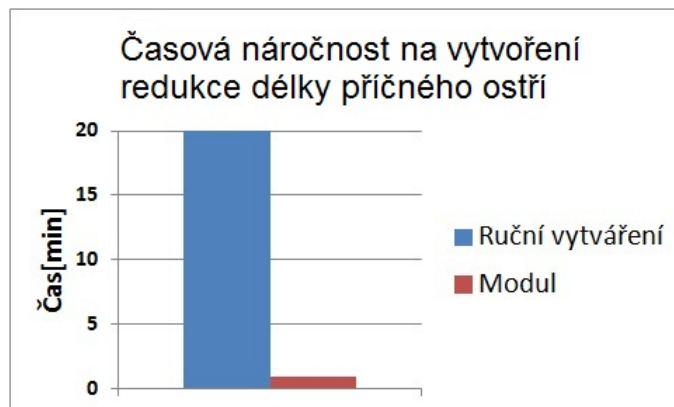
- D_{js} je skutečná hodnota průměru jádra
- D_{jp} je požadovaná hodnota průměru jádra
- T_{D_j} je povolená odchylka mezi D_{js} a D_{jp}

V případě, že není splněna výše uvedená podmínka následuje úprava velikosti průměru jádra D_j podle vztahu 3.46:

$$D_{(jk+1)} = D_{(jk)} - k * (D_{jsk} - D_{jp}) \quad (3.46)$$

kde:

- $D_{(jk)}$ je teoretická hodnota průměru jádra v kroku (k)
- $D_{(jk+1)}$ je teoretická hodnota průměru jádra v kroku (k+1)
- $k \in 0, 1$ je brzdící konstanta
- D_{jsk} je hodnota skutečného průměru jádra v kroku (k)
- D_{jp} je hodnota požadovaného průměru jádra

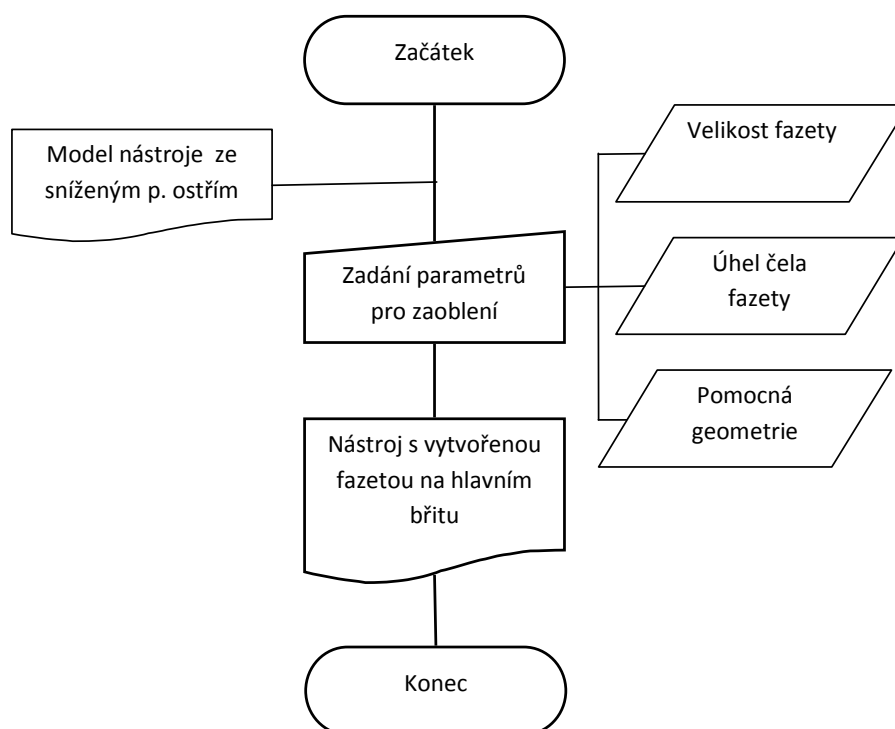


Obrázek 3.20: Porovnání časové náročnosti při vytváření redukce délky příčného ostří

V případě, že se nepodaří algoritmu dosáhnout platnosti vztahu 3.46 a hodnota $k = k_{max}$ udávající maximální počet úprav daného parametru, je uživatel informován o výsledku pomocí dialogového okna, viz obr. A.7. Na obr. 3.20 je provedeno porovnání časové náročnosti mezi ručním vytvářením redukce příčného ostří a modulem. Z grafu je patrné, že vytváření tohoto prvku je pomocí modulu dvacetinásobně rychlejší.

3.5 Implementace mikroúprav na břitu nástroje

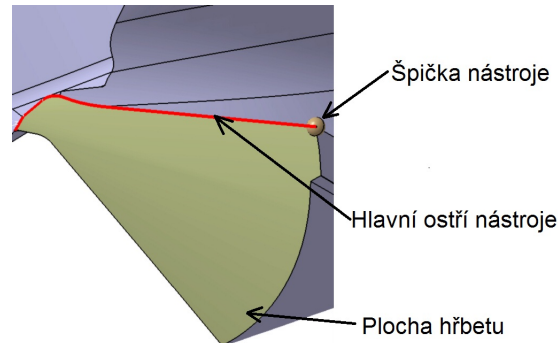
Jak bylo vyjádřeno v části 2.4.2, má mikrogeometrie významný vliv na zvýšení užitečných vlastností řezného nástroje. K vytvoření zaoblení ostří R_n stačí využít standardní funkce systému CATIA V5. V případě ochranné fazety tento postup nelze aplikovat, jelikož dochází k vytváření zborcených ploch a výsledná modelovaná geometrie není kvalitní. Z tohoto důvodu byl vytvořen modul pro vytváření ochranné fazety na hlavním břitu nástroje.



Obrázek 3.21: Vývojový diagram vytváření ochranné fazety na hlavním břitu nástroje

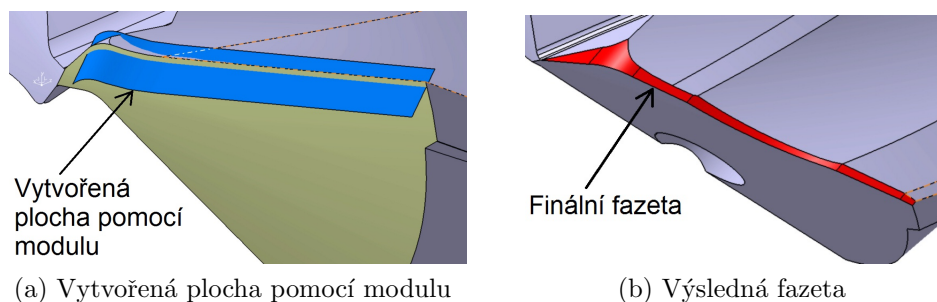
Průběh vytváření tohoto prvku je naznačen na vývojovém diagramu na obr. 3.21. Uživatel je po spuštění modulu vyzván skrze uživatelské rozhraní, viz obr. A.9, A.10 v příloze k vytvoření pomocné geometrie, viz obr. 3.22, která bude použita pro vytváření vlastní fazety. Tato geometrie obsahuje:

- Plochu hřbetu nástroje
- Tvar hlavního ostří
- Špičku nástroje
- Náčrt definující úhel čela γ_n mikrofazety



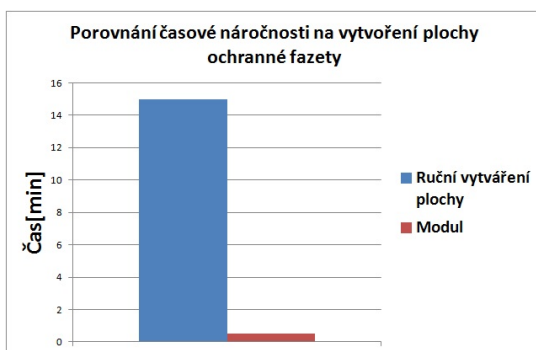
Obrázek 3.22: Příklad použité geometrie

Je nutné poznamenat, že uživatel je i upozorněn na typ modelovací funkce, kterou má pro vytvoření použité geometrie zvolit. Jakmile uživatel vytvoří potřebnou geometrii a zadá velikost zkosení, dojde k automatickému vytvoření plochy, která představuje část výsledné plochy ochranné fazety, jak je naznačeno na obr. 3.23.



Obrázek 3.23: Vytváření fazety

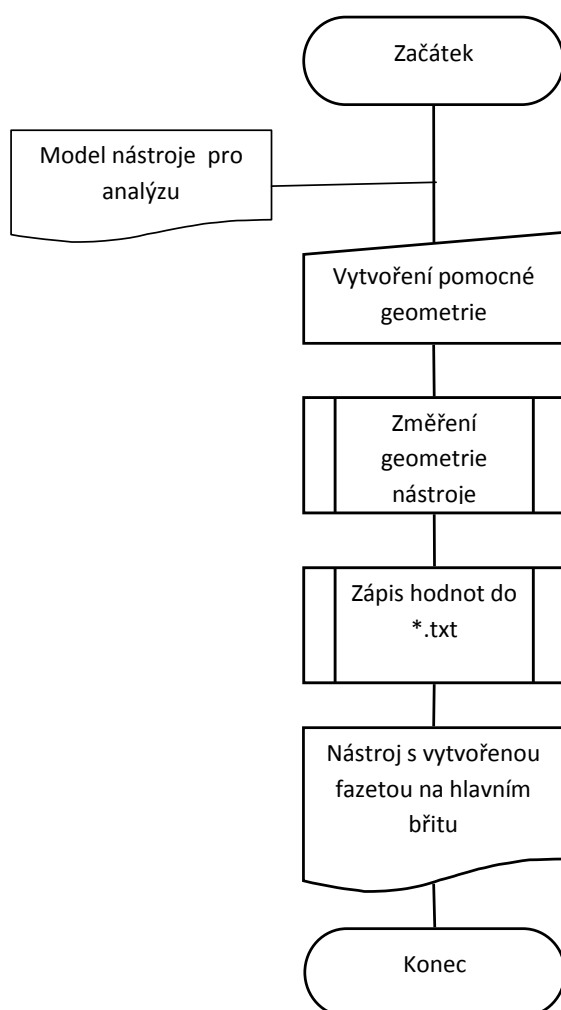
Zbylou část je potřeba vytvořit ručně. Nicméně její vytvoření je jednoduché v porovnání s vytvářením plochy pomocí modulu a proto je ponechána na schopnostech uživatele. Porovnání časové úspory při použití tohoto modulu je zobrazeno na obr. 3.24.



Obrázek 3.24: Porovnání časové náročnosti

Z grafu vyplývá, že na ruční vytvoření ochranné fazety je potřeba 15 minut, zatímco vytváření pomocí modulu trvá pouze 30 sekund.

3.6 Implementace analýzy geometrie monolitního šroubovitého vrtáku

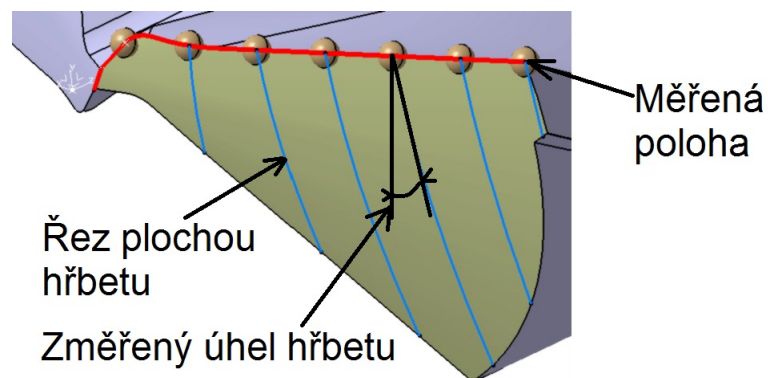


Obrázek 3.25: Vývojový diagram analýzy geometrie

V části 2.2 byly zmíněny práce zabývající se optimalizací geometrie monolitního šroubovitého vrtáku z hlediska silového zatížení. Pro provedení těchto optimalizačních úloh je potřeba znát detailní průběh úhlu hřbetu, čela a sklonu hlavního ostří po průměru nástroje, jelikož jsou tyto parametry proměnné. Pro tento účel byl vytvořen samostatný modul.

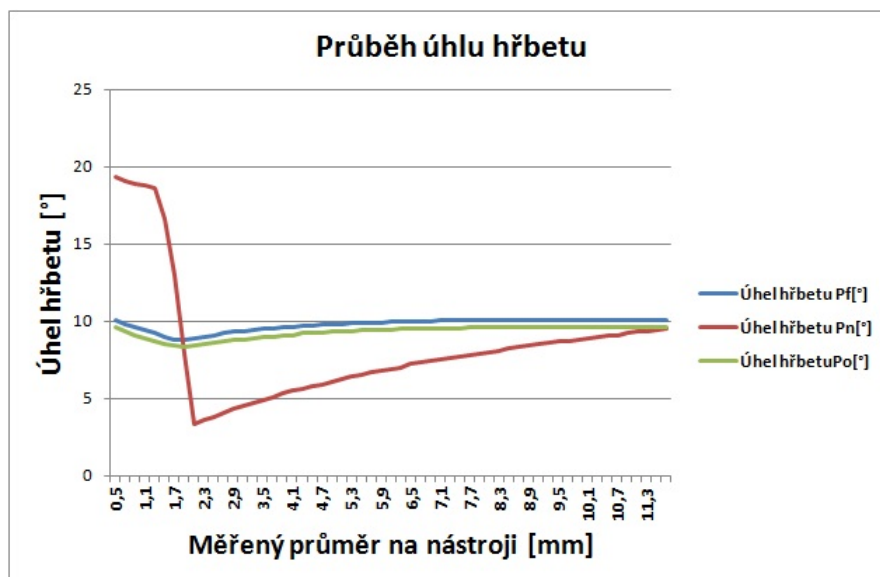
Princip funkce modulu je znázorněn na vývojovém diagramu dle obr. 3.25. Po spuštění modulu se objeví uživatelské rozhraní, které je uvedeno v příloze na obr. A.11 a A.12. V něm si uživatel vybere, jaké úhly požaduje na geometrii nástroje analyzovat. Následně je vyzván, aby vytvořil pomocnou geometrii, která zahrnuje konkrétní analyzované prvky, konkrétně :

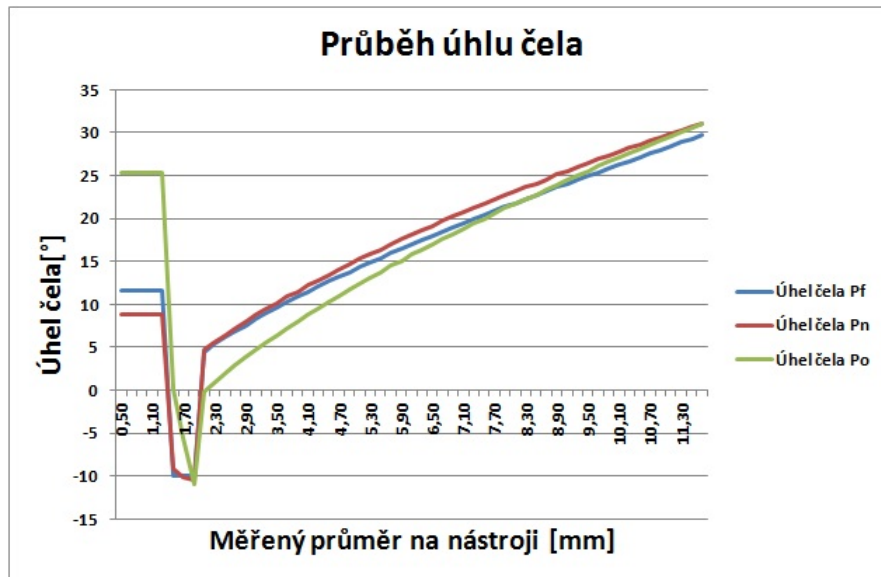
- Plochu čela
- Plochu hřbetu
- Tvar ostří
- Špičku nástroje



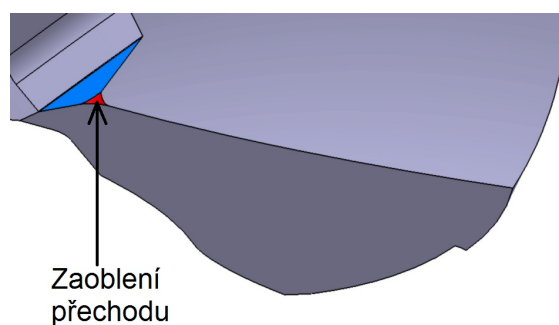
Obrázek 3.26: Způsob měření

Následně uživatel spustí skript, který diskretizuje hlavní břit na množinu bodů a v každém bodě provede měření jeho geometrie. Naměřené hodnoty jsou následně zapsány do textového souboru. Tento soubor může být díky neutrálnímu formátu dále zpracován, např. do formy grafu v MS Excel, viz obr. 3.27 a 3.28, kde jsou zobrazeny grafy průběhu úhlu hřbetu, resp. čela v nástrojových rovinách P_f, P_n a P_o .

Obrázek 3.27: Průběh úhlu hřbetu v nástrojových rovinách P_f, P_n, P_o

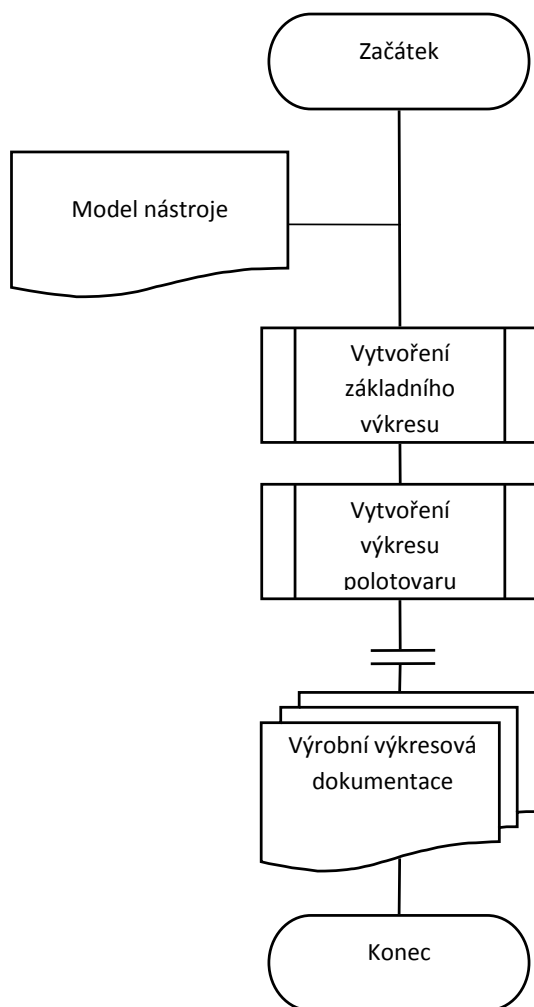
Obrázek 3.28: Průběh úhlu čela v rovinách P_f, P_n, P_o

V tomto případě byla měřena geometrie monolitního šroubovitého vrtáku s úhlem šroubovice $\omega = 30^\circ$ a úhlem hřbetu na obvodu nástroje $\alpha_f = 10^\circ$. V případě průběhu úhlu hřbetu v rovině P_f je vidět rovnoměrný průběh s mírným vychýlením v intervalu $< 0,5 - 3mm >$. Velmi podobný průběh lze sledovat i v rovině P_o . Značně odlišný průběh úhlu hřbetu je pak vidět v rovině P_n . Ten v intervalu $< 0,5 - 1,3mm >$ nabývá přibližně o 10° vyšší hodnoty než v obou rovinách P_f, P_o a následně prudce klesá na hodnotu o cca. 5° nižší než v obou rovinách. Oblast poklesu se nachází na zaoblení, které je vytvořeno na přechodu zabroušení, které redukuje délku příčného ostří a hlavního břitu, viz červená plocha v obr. 3.29. Podobný průběh lze vidět na úhlu čela v rovinách P_f a P_n , kde hodnota poklesu je -10° , což odpovídá konstruovanému úhlu čela zaoblení. Nicméně v případě roviny P_o úhel čela začíná na hodnotě přibližně o 15° vyšší, následuje pokles v oblasti zaoblení na shodnou hodnotu úhlu čela -10° a pak úhel opět roste dle teoretického předpokladu.



Obrázek 3.29: Detail zaoblení přechodu na hlavním břitu

3.7 Implementace vytváření výkresové dokumentace



Obrázek 3.30: Vývojový diagram vytváření výkresové dokumentace

Hlavní předností obecných CAD systémů oproti CAD systémům dodávaných s výrobním strojem je vytváření výkresové dokumentace, kterou lze kdykoliv aktualizovat v případě změny na modelu rezného nástroje. Při aktualizaci se automaticky překreslují všechny pohledy a dojde ke změně příslušných kót. Nicméně ruční vytvoření výkresové dokumentace je značně časově náročný úkol. Hlavním důvodem je potřebný rozsah dokumentace, jelikož je nutné převést veškeré informace na výkres, který slouží k pozdějšímu vytváření technologického postupu výroby rezného nástroje. Dále díky tomu, že jsou tyto nástroje tvarově složité, je z hlediska přehlednosti účelné rozdělit celou dokumentaci na několik listů. Tím se dosáhne snadné čitelnosti výkresu a předání pouze těch informací, které jsou pro danou fázi výroby potřebné.

Práce s vytvořeným modulem pro efektivní vytváření výkresové dokumentace je znázorněna na obr. 3.30. Uživatel s modulem komunikuje pomocí uživatelského rozhraní, které je uvedeno v příloze na obr. A.13. V prvním kroku uživatel vytvoří tzv. základní výkres. Tento typ výkresu je uveden v příloze na obr. A.14 a slouží k úvodnímu seznámení s vytvářeným nástrojem. Výkres proto obsahuje základní pohledy na finální nástroj a obsahuje pouze základní rozměry jako např. průměr, délku řezné a upínací části atd. V dalším kroku uživatel vytvoří již první ryze výrobní výkres polotovaru, který slouží jako vstup pro brusku na kulato. Výkres obsahuje všechny důležité rozměry včetně tolerancí tvaru a polohy. Následně uživatel vytvoří výkres šroubovitě drážky, viz obr. A.15 v příloze, kde jsou uvedeny její základní rozměry včetně rozměrů vodících fazet. Tento výkres slouží k pozdějšímu vytvoření šablony, která slouží pro kontrolu tvaru drážky při její výrobě. Šablona je vytvořena na čirou fólii a přes profilprojektor je následně kontrolován tvar drážky. V dalším kroku je vytvořen výkres hrotu nástroje, viz obr. A.17, který obsahuje úhel hrotu ϵ_r , úhel hřbetu α_f a úhel příčného ostří Ψ_p . Na tomto výkresu je záměrně zobrazen vrtací nástroj bez redukce délky příčného ostří, aby byla zajištěna výše zmiňovaná přehlednost výkresu a snadná orientace obsluhy stroje. Tento prvek je zobrazen na samostatném výkresu, jak je uvedeno na obr. A.18 v příloze. Výkres obsahuje všechny důležité pohledy a rozměry, které jsou pro definici redukce délky příčného ostří potřebné, viz část 3.4.1 této práce. Další listy výkresové dokumentace mohou obsahovat informace o úpravě mikrogeometrie bříty atd., viz obr. A.19 v příloze.

Kapitola 4

Závěr a vyvození budoucích trendů

4.1 Budoucí trendy v oblasti rezných nástrojů

4.1.1 Expertní systémy

Expertní systémy využívají při hledání řešení určitého problému dostupných znalostí a narozdíl od jiných typů systémů informace pouze nepředkládají, ale snaží se s nimi pracovat, syntetizovat je a podat návrh na řešení určité úlohy. Informace jsou nejčastěji reprezentovány pomocí tzv. produkčních pravidel. Tzn., ve formě podmínky, která určuje, kdy je informace použitelná. Řešení expertní systém nalézá pomocí tzv. inferenčního mechanismu, kdy dochází na základě vstupních informací zadaných uživatelem k aktivaci příslušného pravidla ze znalostní báze ³¹. Pokud příslušné pravidlo není přímo řešením dané úlohy, dochází k aktivaci dalších pravidel a k jejich následnému řetězení, dokud není řešení nalezeno. V případě komplexních expertních systémů a rozsáhlých znalostních databází jsou jednotlivé znalosti uskupeny v tzv. rámcích, čímž dojde k omezení počtu pravidel, která lze při hledání řešení aktivovat, čímž se snižují časové nároky na nalezení řešení. V následujícím textu jsou uvedeny příklady dosavadního použití expertních systémů.

Expertní systém založený na fuzzy logice, byl použit zdroji [85] a [89] pro zjištění optimálních parametrů rezné rychlosti a posuvu při soustružení. Vstupními údaji byla hloubka řezu, tvrdost materiálu HB a materiál rezného nástroje. Chyby mezi doporučenými a skutečnými hodnotami byly v případě rezné rychlosti do 13%, v případě posuvu pak do 2,5%. Nicméně je nutné poznamenat, že systém vycházel z hodnot příručky obrábění z roku 1980. V případě využití aktuálnějších údajů by výsledky mohly být ještě přesnější.

Stejný systém byl použit i zdrojem [59] pro předpověď drsnosti povrchu Ra při ultrajemném soustružení hliníkové slitiny Al 2024. Tento zdroj navíc použil pro zlepšení vlastností fuzzy sítě, genetické algoritmy. Výsledkem byla maximální odchylka 20% od experimentálně naměřených hodnot.

Zdroj [71] rovněž použil genetické algoritmy pro zlepšení vlastností fuzzy sítě pro podobnou úlohu. Zde byl však obráběným materiálem kompozit Al6061/SiCp MMC. V tomto případě byla však maximální odchylka mezi předpovídanou a skutečnou hodnotou do 3%!

Právě poslední jmenovaný příklad ukazuje, jak mocným nástrojem mohou být expertní systémy. Přitom díky možnostem dnešního hardwaru je možné získávat výsledky z expertního systému v reálném čase i na běžných osobních počítačích. Z těchto důvodů lze očekávat masivnější využívání tohoto nástroje např. v kombinaci s metodou konečných prvků - MKP.

4.1.2 Využití metody MKP pro analýzu břitu řezného nástroje

Metoda konečných prvků - MKP je nejpoužívanější numerickou metodou v technické praxi. Poprvé byla tato metoda použita v 60. letech minulého století pro pevnostní analýzu trupu letadla. Od této doby se díky masivnímu rozvoji výpočetní techniky uplatnila v dalších průmyslových odvětvích. Její využití pro analýzu břitu řezného nástroje zmiňuje již zdroj [61]. Nicméně kvůli komplexnosti procesu obrábění, kde se vyskytují:

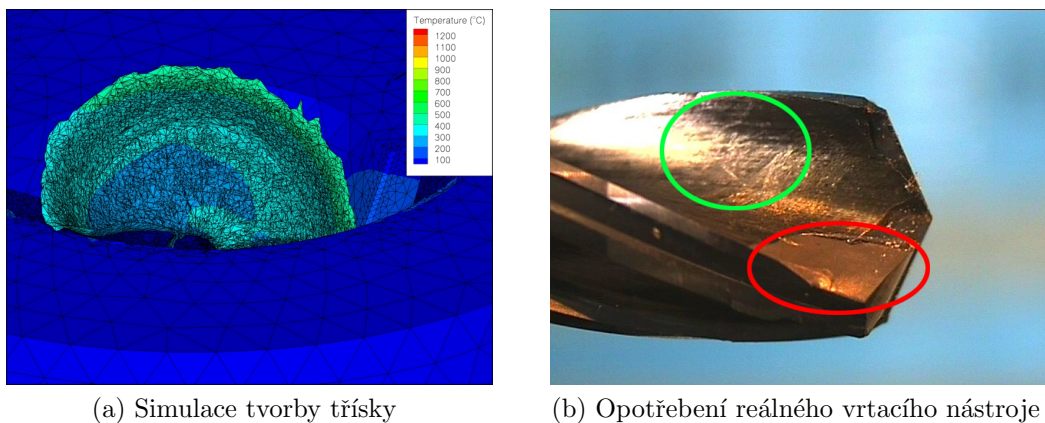
- Intenzivní plastické deformace v kombinaci s teplotami v místě řezu přesahující hranici až 1100°C³²
- Vysoké teplotní gradienty mezi čelem řezného nástroje a obráběným materiálem

Prováděné analýzy byly zaměřeny na jednoduché typy úloh jako je ortogonální řezání a rovněž se potýkaly s nedostatkem přesných dat pro provedení výpočtu, což mělo za následek snížení věrohodnosti výsledků. Další problém spočíval v rychlém nastavení okrajové úlohy, která se z pohledu numerických výpočtů řadí k nejsložitějším, viz zdroj [34]. Tyto aspekty bránili k širšímu uplatnění těchto analýz v technické praxi.

S rozvojem moderní výpočetní techniky, materiálového výzkumu a numerických metod se začaly vyvíjet speciální softwarové produkty zaměřené ryze na analýzu řezných nástrojů. V současné době existují dva tyto softwary:

- DeForm3D
- AdvantEdge FEM

Software DeForm3D se prozatím v technické praxi pro účely analýz řezných nástrojů příliš nerozšířil. Hlavním důvodem je nedostatečná databáze materiálových konstant, které popisují chování materiálu během obrábění. Software sice disponuje možností extrapolace, nicméně toto vede ke zkreslení výsledků, viz zdroj [7], kde byl zmíněn vznik teplot způsobující tavení obráběného materiálu již ve fázi zavrtávání. Tato předpověď byla později vyvrácena experimentálním měřením, viz zdroj [91].



Obrázek 4.1: Rozdíly mezi výsledky ze simulace a reálným procesem

Naproti tomu software AdvantEdge se začíná v technické praxi značně rozšiřovat, což dokládá jeho používání i u renomovaných firem jako Sandvik, Kennametal, Gühring a další. Hlavním důvodem je přesnost softwaru při predikci tvaru vznikající třísky, kdy se výsledky výpočtu shodují s experimentálním měřením, jak dokládají práce [66], [68] a [69]. Dalším důvodem je možnost porovnání různých variant nástrojů z pohledu jejich silového a teplotního zatížení. Nicméně těchto výsledků software dosahuje u materiálu z řady P, M, K, H. V oblasti S materiálů kam se řadí titanové a niklové superslitiny, se již takto uspokojivých výsledků nedosahuje, viz zdroj [70]. Program předpověděl vznik článkovité třísky, viz obr. 4.1a, která by měla zajišťovat stabilní řezný proces. Nicméně během praktických experimentů byl pozorován dynamický průběh řezných sil, který způsobil vyštípnutí materiálu vrtacího nástroje v oblasti drážky, resp. příčného ostří, viz obr. 4.1b. V červené oblasti lze pozorovat vlastní vyštípnutí, zatímco v zelené oblasti je patrné silné adhezivní opotřebení. Dalším problémem, který zdroje uvádí, je vysoká časová náročnost. Ta způsobuje, že analýzy lze prozatím provádět pouze u řezných nástrojů vyráběných ve velkých sériích. Nicméně tento problém je v současném stádiu řešení využitím výpočetních clusterů pro zrychlení výpočtu.

V budoucnosti lze rovněž očekávat širší uplatnění tohoto systému a s nárůstem výpočetního výkonu a schopností softwaru tento výkon využít bude možné analyzovat speciální řezné nástroje vyráběných v menších sériích.

Kapitola 5

Závěr

V této disertační práci byl představen nový přístup k modelování monolitních šroubovitých vrtáků pomocí CAD systémů. Tento přístup využívá zahrnutí objemu brousícího kotouče při vytváření drážky a fazet na nástroji. Hlavní důraz je kladen na kvalitu vytvářené plochy. Tento přístup prohlubuje současné možnosti využívání CAD systémů pro konstrukci monolitních šroubovitých vrtáků skrze využívání vlastně vytvořených autonomních modulů. Tyto moduly, v případě vytváření hrotu nástroje a redukce příčného ostří, disponují automatickými polohovacími algoritmy, jež jsou založené na iterační bázi. Ty vychází z algoritmů pro učení neuronových sítí a poskytují rychlost a přesnost při vytváření výše jmenovaných prvků. Další důležitou funkcí vyvinutých modulů je možnost vytvářet mikrogeometrické úpravy na hlavním břitu nástroje, konkrétně vytváření ochranných fazet.

Zpracovaná disertační práce dále prohlubuje možnosti používání dnešních CAD systémů při vytváření těchto úprav a vytváří kvalitní geometrii bez jakýchkoliv defektů.

Dále disertační práce představuje modul pro analýzu břitu monolitního šroubovitého vrtáku. Přínosem tohoto modulu je možnost vyhodnocování a následné úpravy geometrie břitu za účelem zvýšení užitných vlastností rezného nástroje. Výsledky této analýzy lze rovněž použít např. ve výpočtových modulech pro zjištění silového zatížení rezného nástroje, jelikož jsou výsledky přenášeny pomocí neutrálního formátu.

Hlavní přínosy této práce lze shrnout takto:

- Zahrnutí objemu kotouče při vytváření drážky a fazet na monolitním šroubovitým vrtáku
 - Prohloubení možností využívání dnešních CAD systémů
 - Možnost vytvářet prvky s ohledem na technologii výroby
 - Nárůst přesnosti modelování

- Představení obecné metodiky pro konstrukci výše uvedených prvků s využitím geometrických metod pro vyšetřování charakteristiky obalové plochy
- Využití obecného matematického řešiče za účelem provedení potřebných výpočtů
 - Možnost vytváření výše uvedených prvků v parametrech, které přesahují možnosti dnešních CAD systémů
 - Až osmdesátinásobné zrychlení doby vytváření výše uvedených prvků pro případy, kdy samotný CAD systém je schopen daný prvek vytvořit ³³
- Implementace iteračních polohovacích algoritmů z oblasti neuronových sítí
 - Patnáctinásobné zrychlení vytváření hrotu vrtáku
 - Dvacetinásobné zrychlení vytváření redukce příčného ostří na vrtáku
- Možnost efektivně vytvářet mikrogeometrické úpravy na monolitním šroubovitým vrtáku
 - Prohloubení možností využívání dnešních CAD systémů
- Možnost analýzy geometrie břitu nástroje a využití výsledků analýzy např. ve výpočtových modulech pro zjištění silového zatížení řezného nástroje
- Představení metodiky pro efektivní vytváření výkresové dokumentace s důrazem na:
 - Technologii výroby
 - Přehlednost a názornost dokumentace

Poznámky

¹Vyjímku tvoří brousící nástroje, které mají navíc tzv. nedefinovanou geometrii břitu

²Nejčastěji již ve 3D

³Zejména u kompozitních materiálů hrozí tzv. delaminace jednotlivých vrstev základního materiálu

⁴Pokud se pomine režim HSC obrábění u soustružení či frézování

⁵Monolitní provedení

⁶Provedení s vyměnitelnou řeznou částí

⁷Monolitní provedení

⁸Není potřeba vodících pouzder či předvrtání vodících otvorů jako např. u dělových vrtáků

⁹S ohledem na hloubku vrtané díry, vlastnosti obráběného a řezného materiálu ⇒ možnost snížení nákladů na obrábění

¹⁰Šroubovitě vrtáky s vyměnitelnými řeznými částmi nejsou rozpracovány, jelikož problematika jejich návrhu je značně obsáhlá a lze na ni zaměřit další samostatnou práci

¹¹Ve 2D je nelze hovořit o modelu v pravém významu slova

¹²Na autosalonu v Detroitu v roce 2010 bylo 80% vystavovaných automobilů navrženo v systému CATIA V5

¹³V případě projektů tvořených ve VB je dalším možným jazykem CATScript

¹⁴Myšleny editory v CATIA V5. Při využití SW MS Visual basic jsou k dispozici pokročilejší nástroje v porovnání s VBA editorem v CATIA V5. Nicméně pro praktické nasazení aplikace by bylo potřeba koupit komerční licenci tohoto programu

¹⁵Zejména s rostoucí složitostí aplikace. Nicméně i mezi odborníky z oblasti IT není jasná hranice komplexnosti aplikace, kde se přednosti jazyka C++ výrazně projeví. Je totiž nutné si uvědomit již představené vyšší technické a tudíž i časové nároky na vytvoření programu

¹⁶Nelze využít jakýmkoliv jiným nástrojem

¹⁷Např. ošetření přetékání paměti při použití jazyka C++

¹⁸RADE je zkrácené označení pro **R**apid **A**pplication **D**evelopment **E**nvironment. Prostředí pro rychlé vytváření aplikací

¹⁹Je nutné poznamenat, že velikost vzniklých deformací je kromě mechanických vlastností obráběného materiálu dána náchylností ke zpevňování během obrábění

²⁰Této vlastnosti se využívá např. u frézovacích nástrojů pro jejich stabilizaci v řezu. U vrtacích nástrojů se tento prvek zatím neobjevuje, zejména díky proměnlivosti úhlu hřbetu, viz později.

²¹Např. v porovnání se šroubovitým způsobem broušení hřbetní plochy

²²Kruhovitost, přímost

²³V případě PVD technologií

²⁴Postup vytváření polotovaru nástroje zde kvůli jednoduchosti nebude blíže vyjádřen

²⁵Jednotkové posunutí ve směru jádra je definováno jako velikost posunutí při posunutí kružnice ve směru osy Z obrobku o hodnotu l

²⁶Tento postup vyplývá z použité metody

²⁷Jednotkové posunutí v radiálním směru je definováno jako velikost posunutí při posunutí kružnice ve směru osy Z o hodnotu l

²⁸Tato konstanta zabraňuje, aby nedošlo k tomu, že hodnota $\sigma_{(n)} = \sigma_{(n+2)}$, resp. $\sigma_{(n+1)} = \sigma_{(n+3)}$

²⁹Funkce této konstanty je stejná jako v předchozím případě

³⁰Funkce této konstanty je stejná jako v předchozím případě

³¹K prohledávání znalostní báze lze využít možnosti logiky, indukce, abdukce, heuristiky aj. Tyto prostředky pak určují založení systému. Např. systémy založené na logice, indukci atd.

³²Obrábění superslitin na bázi Ti a Ni

³³Platí pro drážky do délky 20mm. Dále CAD systém není schopen daný prvek vytvořit bez využití externího modulu

Literatura

- [1] Abele, E., Fujara, M.,
Simulation based twist drill design and geometry optimization
CIRP Annals Manufacturing Technology 59 (2010), str. 145-150
- [2] Anish P., Kapoor S.G., DeVoor D.E. *Chisel edge and cutting lip shape optimization for improved twist drill design*
ASME Journal of Machine Tools and Manufacture for industry (2005), str. 421-431
- [3] Afazovm, S.M., Ratchev, S.M., Segal, J.
Modelling and simulation of micro-milling cutting forces
Journal of materials processing technology 59 (2010), str. 2154-2162
- [4] ASM Aerospace Specification Metals Inc.
Properties of allunimuim alloy 6061-T6, www.asm.matweb.com
- [5] Bäker, M., *Finite element simulation of high speed cutting forces*
Journal of materials processing technology 59 (2006), str. 117-126
- [6] Bäker, M., *Finite element investigation of the flow stress dependence of chip formation*
Journal of materials processing technology 167 (2005), str. 1-13
- [7] Benešová, S.
Numerická simulace procesu vrtání do slitiny Al6061 pomocí softwaru DeForm3D
Zpráva pro projekt MPO FI-IM4/226, Plzeň 2009
- [8] Beisheim, J.
Speed up simulations with a GPU, Ansys Advantage 2010
<http://www.ansys.com/magazine/issues/vol4-iss2-2010/AN-Advantage-GPU.pdf>
- [9] Biermann, D., Terway, I.,
Cuttting edge preparation to improve drilling tool for HPC processes
CIRP Annals Manufacturing Technology 1 (2008), str. 76-80

- [10] Bruchhaus, T.
Hochleistungs-Bohrerwerkzeuge Der Unterschied liegt im Detail
Zerspanen im modernen Produktionsprozess - 40-Jahre ISF (2012)
- [11] Celle, T.
Influence of edge preparation on the performance of coated cutting tools
International Conference on Metalurgical Coating and Thin Films (2007), str. 169-180
- [12] Cerreti, E., Fallböhmer, M., Wu, W.T., Altan, T.
Application of 2D FEM in orthogonal metal cutting
Journal of materials processing technology 59 (1996), str. 169-180
- [13] Cerreti, E., Lucci, M., Altan, T.
FEM simulation of orthogonal cutting: serrated chip formation
Journal of materials processing technology 95 (1999), str. 17-26
- [14] Cerreti, E., Lazzaroni, C., Menegardo, L., Altan, T.
Turning simulation using three-dimensional FEM code
Journal of materials processing technology 98 (2000), str. 99-103
- [15] Chang, C.S. *Prediction of cutting temperatures of stainless steel with chamfered main cutting edge tools*, Journal of materials processing technology 190 (2007), str. 332-341
- [16] Chen, W., Li, W., Liu, N., Haidong, Y.
Performance of Ti(C,N)- based cermets cutter and simulation technique of cutting process
Journal of materials processing technology 197 (2008), str. 36-42
- [17] Cincinnati inc. *The spiral point*
<http://www.wewilliams.net/docs/The%20Spiral%20Point.pdf>
- [18] Clark, N, Schneider, T.
Getting Started with KBE: Working With the CATIA/Visual Basic Interface
<http://sites.google.com/site/ntcoerug/archives2>
- [19] Čuković, S., Devedžić, G., Ghionea, I.
Automatic determination of grinding tool profile for helical surfaces machining using CATIA VB/Interface, www.scientificbulletin.upb.ro
- [20] DVOŘÁK, J., *Úvod do expertních systémů*,
www.uai.fme.vutbr.cz/~jdvorak/Opory/ExpertniSystemy.pdf, VUT v BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, Ústav automatizace a informatiky, 2004

- [21] Denkena, B., Koehler, J., Rehe, M.
Influence of the honed cutting edge on tool wear and surface integrity in slot milling of 42CrMo4Steel
5th CIRP conference on High Performance Cutting 2012, Procedia CIRP 1 (2012), str. 190-195)
- [22] Fang, N., Wu, Q.
The effect of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminium alloys, Journal of machine tools and manufacture 45 (2005), str. 1178-1187
- [23] Fang, G., Zeng, P.
Three-dimensional thermo-elastic-plastic coupled FEM simulations for metall oblique cutting processes, Journal of materials processing technology 168 (2005), str. 368-372
- [24] Faraz, A., Biermann, D., Weinert, K.
Cutting edge rounding: An inovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates
International Journal of Machine Tools and Manufacture 49 (2009), str. 1185-1196
- [25] Filice, L., Umbrello, D., Beccari, S., Micari, F.
On the FE codes capability for tool temperature calculation in machining processes
Journal of materials processing technology 174 (2006), str. 286-292
- [26] Ginting, A., Nouari, M., Nieslony, P.
Optimal cutting conditions when dry end milling the aeroengine material Ti-6242S
Journal of materials processing technology 184 (2007), str. 319-324
- [27] Grzesik, W., Bartoszek, M., Nieslony, P.
Finite element modeling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools
Journal of materials processing technology 164-165 (2005), str. 1204-1211
- [28] Gu, L. Z., Wang, D., Xing, L., Chang, J., Chen, G.J.
Computer simulation and optimization in metal cutting process for mild carbon steels
Journal of materials processing technology 129 (2002), str. 60-65
- [29] Guo, I.B., Yen, W.D.
A FEM study on mechanisms of discontinuous chip formation in hard machining
Journal of materials processing technology 155-156 (2004), str. 1350-1356
- [30] Hua, J., Umbrello, D., Shivpuri, R.
Investigation of cutting conditions and cutting edge preparations for enhanced comprehensive subsurface residual stress in hard turning of bearing steel
Journal of materials processing technology 171 (2006), str. 180-187

- [31] Hua, J., Rajiv S., Cheng.,X., Vikram, B., Matsumoto, Y., Hashimoto, F., Watkins ,T.R.
Effect of feedrate, workpiece hardness and cutting edge an subsurface residual stress in hard turning of bearing steel using chamfer + hone cutting edge geometry
Materials science and engineering A 394 (2005), str. 238-248
- [32] Hughes, T.J.R., Cottrell, J.A., Bazilevs, Y.
Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 194, (2005), str. 4135-4195
- [33] JEŽEK, F., TOMICZKOVÁ , S.,
Geometrie pro FST 2
5.vydání, Plzeň, ZČU,2010
- [34] Kim, J., Marinov, V.M., Kim, D.
Built-up edge analysis of orthogonal cutting by visco-plastic finite element method
Journal of materials processing technology 71 (1997), str. 367-372
- [35] Klocke, F., Beck, T., Hoppe, S., Krieg, T. ,Müller, N., Nöthe, T., Raedt, H.W., SWEENY, K.
Examples of FEM application in manufacturing technology
Journal of Material Processing Technology 120, (2002) 450-457
- [36] Konecny J.
Knowledgeware in aircraft design, <http://sites.google.com/site/ntcoerug/archives2>
- [37] Kojima, T., Seguchi, H., Kobayashi, H., Nakahara, S., Othani, S.
An expert system of machining operation planning in Internet environment
Journal of materials processing technology 107 (2000), str. 160-166
- [38] Kountanaya, R., Al-Zkeri, I., Branis, A.S., Altan, T.
Effect of tool edge geometry and cutting conditions on experimental and simulated chip morphology in orthogonal hard turning of 100Cr6 steel
Journal of materials processing technology 209 (2009), str. 5068-5076
- [39] Koutný, A., Jiroušek, Z.
Hluboko a ještě hlouběji
MM průmyslové spektrum 5 (2012), str. 36-38
- [40] Kose, E., Kurt, A., Seker, U.
Effect of feed rate on the cutting tool stresses in machining inconel 718
Journal of materials processing technology 196 (2008), str. 165-173

- [41] Kožmín P., *Mathematical model for drill point design and grinding*
ASME Journal of Engineering for industry (2000), str. 333-3
- [42] Li, K., Gao, X.L, Sutherland, J.W.
Finite element simulation in metal cutting process for qualitative understanding of the effect of crater wear on chip formation process
Journal of materials processing technology 127 (2002), str. 309-324
- [43] Li, J.L., Jing, L.L, Chen, M.
A FEM study on residual stresses induced by high-speed end-milling of hardened steel SKD11 , Journal of materials processing technology 209 (2009), str. 4515-4520
- [44] Liangchi, Z.
On the separation criteria in simulation of orthogonal metal cutting using finite element method, Journal of materials processing technology 89-90 (1999), str. 273-278
- [45] Lin T.S., *Cutting behaviour of TiN-coated carbide drill with curved cutting edges during high-speed machining of stainless steel*
Journal of Materials Processing Technology (2002), str. 8-16
- [46] SANDVIK intellectual property AB 811 81 Sandviken (SE), *Drill Vrták*
Vynálezce: Lindblom Stefan, Patentový spis: EP 0 907 445 B1
- [47] SANDVIK intellectual property AB 811 81 Sandviken (SE)
Drilling tool and indexable drill bit
Vynálezce: Limel Michalel, Wikblom Torbjörn, Patentový spis: EP 1 813 368 A2
- [48] Sandvik intellectual property AB 811 81 Sandviken (SE)
Drilling tool and indexable drill bit
Vynálezce: Limel M., Wikblom T., Patentový spis: EP 1 813 368 A2
- [49] Lorentzon, J., Järvstrat, N., Josefson, B.L
Modeling chip formation of alloy 718
Journal of materials processing technology 209 (2009), str. 4645-4653
- [50] MacGinley, T., Monaghan, J.
Modeling of orthogonal machining process using coated cemented carbide cutting tools
Journal of materials processing technology 118 (2001), str. 293-300
- [51] Mamalis, A.G., Branis, A.S., Manokalos, D.E.
Modelling of precision hard cutting using implicit finite element method
Journal of materials processing technology 123 (2002), str. 464-475

- [52] Mamalis, A.G., Horváth, M., Branis, A.S., Manokalos, D.E.
Finite element simulation of chip formation in orthogonal metal cutting
Journal of materials processing technology 110 (2001), str. 19-27
- [53] Marusich, T.D., Usui, S., Ma J., Stephenson, D.A
Finite element modeling of drilling processes with solid and indexable tooling in metal and stack-ups, www.thirdwavesys.com
- [54] Marusich, T.D., Oritz, M.
Modeling and simulation of high speed machining,www.thirdwavesys.com
- [55] Matsumoto, Y., Hashimoto, F., Lahoti, G.
Surface integrity generated by precision hard turning
Timken research (1999)
- [56] Mofid, M., Liangchi, Z.
An adaptive three-dimensional finite element algorithm for the orthogonal cutting of composite materials, Journal of materials processing technology 113 (2001), str. 368-372
- [57] Moookherjee, R., Bhattacharyya, B.,
Development of an expert system for turning and rotating tool selection in dynamic environment
Journal of materials processing technology 113 (2001), str. 306-311
- [58] Movahhedy, M., Gadala, M.S., Altintas, Y.
Simulation of orthogonal metal cutting process using arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method, Journal of materials processing technology 103 (2000), str. 267-275
- [59] Nandi, A.K., Pratihar, D.K.
An expert based on FBFN using GA to predict surface finish in ultra-precision turning
Journal of materials processing technology 155-156 (2004), str. 1150-1156
- [60] Li, J., Chen, Y.N.
Analysis and Optimization of Drill Cross Sectional Geometry
Konference NAMRC (1999)
- [61] Řasa a kol. , *Výpočetní metody v konstrukci řezných nástrojů*
SNTL Praha (1986)
- [62] Rhim, H.S., Oh, S.I., *Prediction of serrated chip formation in metal cutting process with the new flow stress model for AISI 1045 steel*
Journal of materials processing technology 171 (2006), str. 417-422

- [63] Rodríguez, C.,J.C., *Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrassive jet machining and brushing*, Unidrückerei der University Kassel, 2009, ISBN Online : 978-3-89958-719-5
- [64] Roud, P., *Návrh spojení vyměnitelné vrtací hlavice a držáku*, Zpráva pro projekt MPO FI-IM4/226, Plzeň 2010
- [65] Roud, P., *Doplnění nových poznatků*
Zpráva pro projekt inovativní akce OPPI "Zlepšení Technicko-technologických procesů ve firmě HOFMEISTER", Plzeň 2010
- [66] Roud, P., *Design and optimization of solid twist drill geometry for drilling aluminium alloy Al 6061-T6*
Report for Third Wave Systems - September 2009 , Plzeň 2009
- [67] Roud P., *Design of solid twist drill for drilling in to grey cast iron GG 20*
Sborník příspěvků SVOČ 2011 , Plzeň 2011
- [68] Roud, P., *Chip formation in drilling aluminium alloy Al 6061-T6 and cast iron GG4400*
Report for Third Wave Systems - January 2010 , Plzeň 2010
- [69] Roud P., *Chip formation in drilling tool teal AISI D3*
Report for Third Wave Systems - March 2010 , Plzeň 2010
- [70] Roud P., *Chip formation in drilling Inconel 718*
Report for Third Wave Systems - June 2010 , Plzeň 2010
- [71] Roy, S.S.
Design of genetic-fuzzy expert system for predicting surface finish in ultra-precision diamond turning o metal matrix composite
Journal of materials processing technology 173(2006), str. 337-344
- [72] Sandvik Hard Materials
Your perfect partner: Cemented Carbide, www.allaboutcementedcarbide.com
- [73] Sharman, A.R.C., Amarasinghe, A., Ridwway, K.
Tool life and surface integrity aspect when drilling an hole making Inconel 718
Journal of materials processing technology 200 (2008), str. 424-432
- [74] Shih A., Li, R.
Finite element modeling of 3D turning of titanium
International journal of advanced manufacturing technology 29 (2006), str. 253-261

- [75] Shih A., Li, R.
Finite element modeling of high throughput drilling of Ti6Al4V
Transaction of NAMRI/SME 35 (2007), str. 73-80
- [76] Shihozuka, J., Obigawa, R., Shirakashi, T.
Chip breaking analysis from the viewpoint of the optimum cutting tool geometry design
Journal of materials processing technology 62 (1996), str. 345-351
- [77] Soo, S.L., Aspinwall, D.K., Dewes, R.C.
3D model of cutting of Inconel 718
Journal of materials processing technology 150 (2004), str. 116-123
- [78] Šustr, M.
Automatizace modelu a výkresové dokumentace v systému CATIA V5, Diplomová práce ,
Plzeň 2010
- [79] Tsai W.D., Wu S.M., *Mathematical model for drill point design and grinding*
ASME Journal of Engineering for industry (1979), str. 333-340
- [80] Tsao, C.C., Hochheng, H.
The effect of chisel edge length and associated pilot hole on delamination on composite materials
International Journal of Machine Tools and Manufacture 46 (2003), str. 1087-1092
- [81] Thiele, D.J., Melkote, S.N.,
Effect of tool edge geometry on workpiece subsurface deformation and through-thickness residual stresses for hard turning of AISI 51100 steel, Journal of manufacturing processes vol.2/No.4 (2000), str. 270-277
- [82] Tweeny, , *Comparison of planar and helical flank surface*
dodám, str. 333-340
- [83] T-Systems, *XV5 Application Automotive Product Design*
<http://www.t-systems.cz/>
- [84] Urban, M.
Možnosti modulu knowledgware v systému CATIA V5R19, Zpráva pro projekt Stážista,
Plzeň 2010

- [85] Vitanov, V.I., Harrison, D.K., Mincoff, N.H., Vladimirova, T.V.
An expert system shell for selection a metal cutting parameters
Journal of materials processing technology 55 (1995), str. 111-116
- [86] Umbrello, D., Fillice, L., Rizzuti, S., Micari, F., Settineri, L.
On the effectiveness of Finite Element Simulation of orthogonal cutting with particular reference to temperature prediction
Journal of materials processing technology 189 (2007), str. 284-291
- [87] Wang X., Huang Ch., Zou B., Liu H., Wang. J,
Effect of twist drill geometric structure of twist drill bits and cutting condition on tool life in drilling 42CrMo ultra high strength steel
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2012), str. 221-228
- [88] Wen-Chou Ch. Kuang-Hua F., *The cutting performance of TiN-coated drill with curved primary cutting edges*
Journal of Materials Processing Technology (1995), str. 183-198
- [89] Wong, S.V., Hamouda, A.M.S., Baradie, E.
Generalized fuzzy model for metal cutting data selection
Journal of materials processing technology 89-90 (1999), str. 310-317
- [90] Yeng, Y.C., Söhner, J., Lilly, B., Altan, T.
Estimation of tool wear in orthogonal cutting using finite element analysis
Journal of materials processing technology 146 (2004), str. 82-91
- [91] Zetek, M., Sklenička, J.
Technologická zkouška vrtacích prototypů pr. 12 do Al slitiny Al6061
Zpráva pro projekt MPO FI-IM4/226, Plzeň 2009
- [92] Vijayaraghavan A. *Automated drill design software*
Berkeley University of California 2006
- [93] Walter-Titex.
Walter-Titex XD technology - a new dimension in depp hole drilling technology
- [94] Kennametal, *Y-tech drill* <http://www.ctemag.com/>

Příloha A

Příloha

Obsahem přílohy jsou uživatelská rozhraní vytvářených modulů, konkrétně rozhraní pro vytváření:

- Šroubovitě drážky
- Fazet
- Redukce délky příčného ostří
- Úpravy mikrogeometrie nástroje
- Analýzy geometrie nástroje

Dále příloha obsahuje návrh struktury výkresové dokumentace, kde jsou jednotlivé fáze výroby rozloženy do výkresů:

- Základního
- Polotovaru
- Drážky
- Fazet
- Redukce délky příčného ostří
- Výkresy pro zachycení mikroúprav na řezném nástroji

I Uživatelské rozhraní jednotlivých modulů

Definice vrtacího nástroje

Definice polotovaru | Definice Drazky | Hrot vrtaku | Fazety | Vyspicovani | Zaoblení ostří a kanálky

Definice řezné části

Průměr řezné části [mm] ?

Celková délka řezné části [mm] ?

Délka válce na řezné části [mm] ?

Ztažení řezné části [mm/100mm] ?

Úhel špičky polotovaru [°] ?

Definice upinací části

Průměr upinací části [mm] ?

Délka upinací části [mm] ?

Doplňkové parametry

Délka zkosení upinací části [mm] ?

Úhel zkosení upinací části [°] ?

Úhel náběhu mezi vrtací a upinací částí [°] ?

Vytvořit **Konec**

Obrázek A.1: Uživatelské rozhraní pro vytváření polotovaru

Definice vrtacího nástroje

Definice polotovaru | Definice Drazky | Hrot vrtaku | Fazety | Vyspicovani | Zaoblení ostří a kanálky

Definice drážky vrtáku

Délka drážky [°] ?

Úhel stoupání drážky [°] ?

Průměr jádra na začátku vrtáku [mm] ?

Průměr jádra na konci vrtáku [mm] ?

Zadat průměr šroubovice ručně

Definice brusného kotouče

Typ kotouče ?

Průměr kotouče [mm] ?

Šířka kotouče [°] ?

Definice polohy kotouče

Úhel naklopení kotouče [°] ?

Úhel pootočení kotouče vůči jádru [°] ?

Úhel přednastavení kotouče [°] ?

Vytvořit **Aktualizovat**

Obrázek A.2: Uživatelské rozhraní pro vytváření drážky

Definice vrtacího nástroje

Definice polotovaru | Definice Drazky | **Hrot vrtaku** | Fazety | Vyspicování | Zaoblení ostří a kanálky

Definice Hrotu nástroje

Úhel hrotu [°] ?

Úhel hřbetu [°] ?

Úhel příčného ostří [°] ?

Délka vyosení kužele [mm] ? A

Úhel předsazení kužele [°] ? A

Úhel opracování kužele [°] ? A

Stupňovitý nástroj

Parametry dalšího stupně

Úhel hrotu [°] ?

Úhel hřbetu [°] ?

Vytvořit **Aktualizovat**

Obrázek A.3: Uživatelské rozhraní pro vytváření hrotu

Definice vrtacího nástroje

Definice polotovaru | Definice Drazky | Hrot vrtaku | **Fazety** | Vyspicování | Zaoblení ostří a kanálky

Definice rozměrů fazet

Šířka fazety [mm] ?

Hloubka fazety [mm] ?

Definice brusného kotouče

Typ kotouče ?

Průměr kotouče [mm] ?

Šířka kotouče [°] ?

Definice polohy kotouče

Úhel naklonění kotouče [°] ?

Úhel přednastavení kotouče [°] ?












Vytvořit **Aktualizovat**

Obrázek A.4: Uživatelské rozhraní pro vytváření fazet

Definice vrtacího nástroje

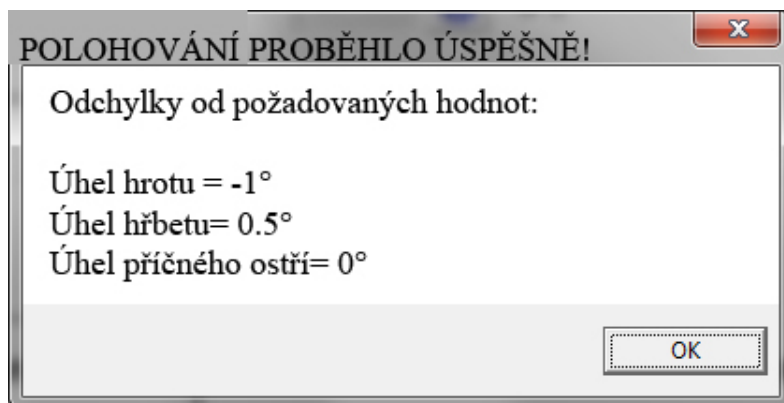
Definice polotovaru | Definice Drazky | Hrot vrtaku | Fazety | Vyspicování | Zaoblení ostří a kanálky

Definice vyspicování

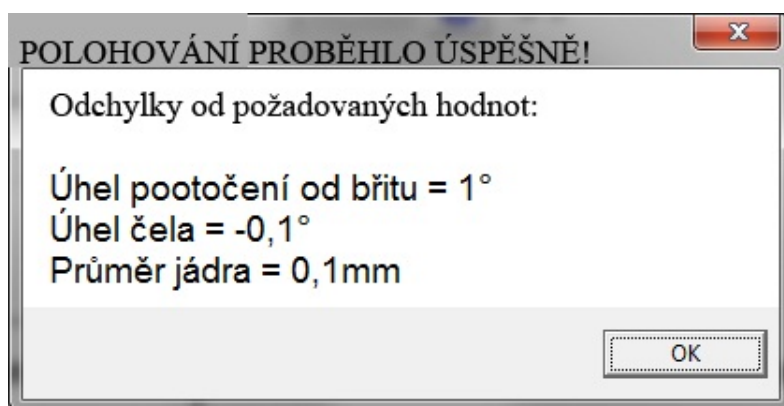
Délka příčného ostří [mm]	<input type="text"/>	
Úhel pootočení od břitu [°]	<input type="text"/>	
Požadovaný průměr jádra [mm]	<input type="text"/>	
Úhel čela [°]	<input type="text"/>	
Rádus vyjetí [mm]	<input type="text"/>	
Příčné přesazení [mm]	<input type="text"/>	
Úhel rozjetí do boku [°]	<input type="text"/>	
Délka rozjetí do boku [mm]	<input type="text"/>	
Poloměr zaoblení boku [mm]	<input type="text"/>	
Úhel vyjetí boku [°]	<input type="text"/>	
Průměr kotouče [mm]	<input type="text"/>	

Vytvořit **Aktualizovat**

Obrázek A.5: Uživatelské rozhraní pro vytváření fazet



Obrázek A.6: Informace pro uživatele o výsledku polohování při automatickém modelování hrotu



Obrázek A.7: Informace pro uživatele o výsledku polohování při automatickém modelování redukce délky příčného ostří

Definice vrtacího nástroje

Definice polotovaru | Definice Drazky | Hrot vrtaku | Fazety | Vyspicovani | **Zaoblení ostří a kanálky**

Zaoblit přechod příčného ostří

Definice zaoblení přechodu příčného ostří

Poloměr [mm] ?

Úhel čela [°] ?

Vnitřní kanálky

Definice vnitřních kanálků

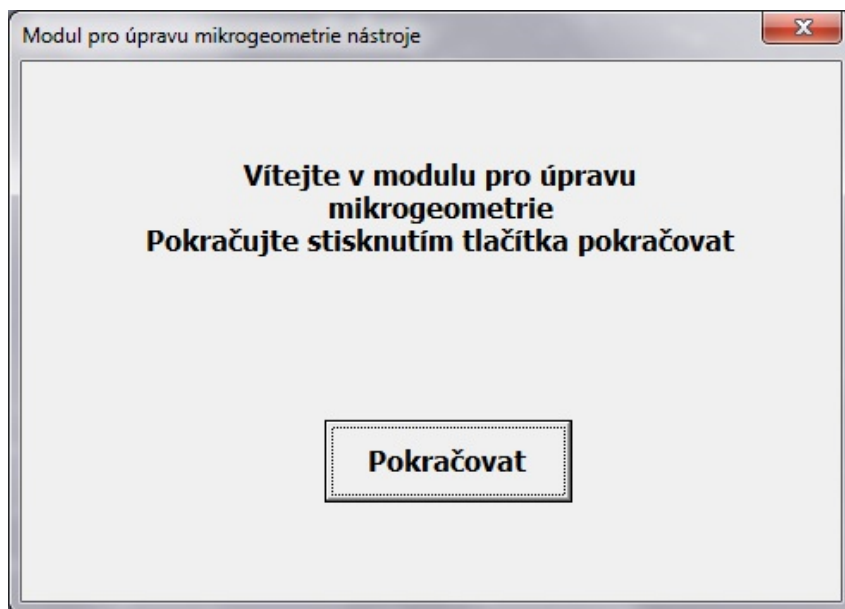
Průměr kanálku [mm] ?

Průměr roztečné kružnice [mm] ?

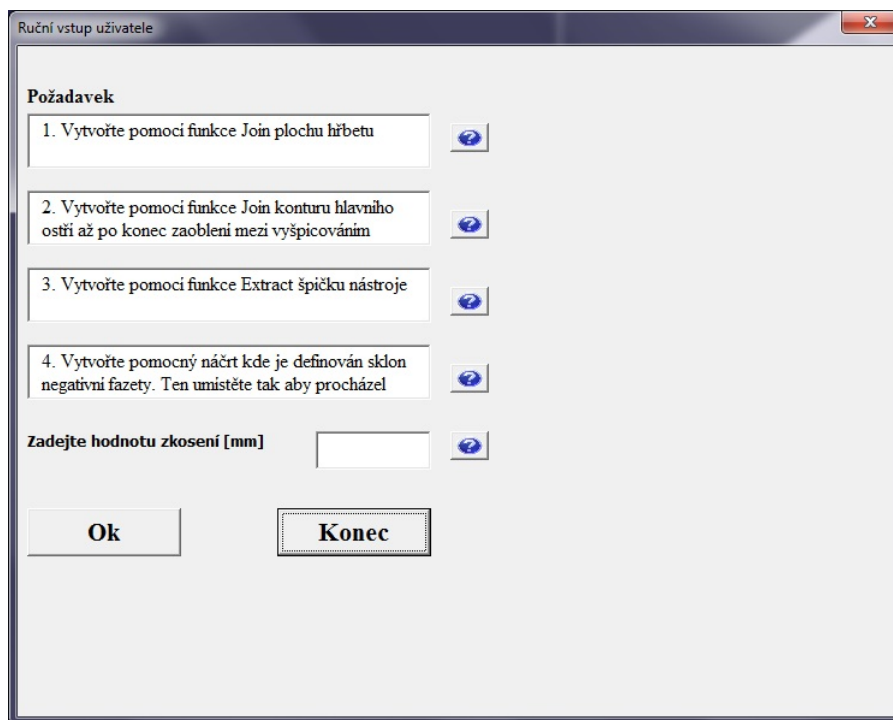
Úhel pootočení [°] ?

Vytvořit **Aktualizace**

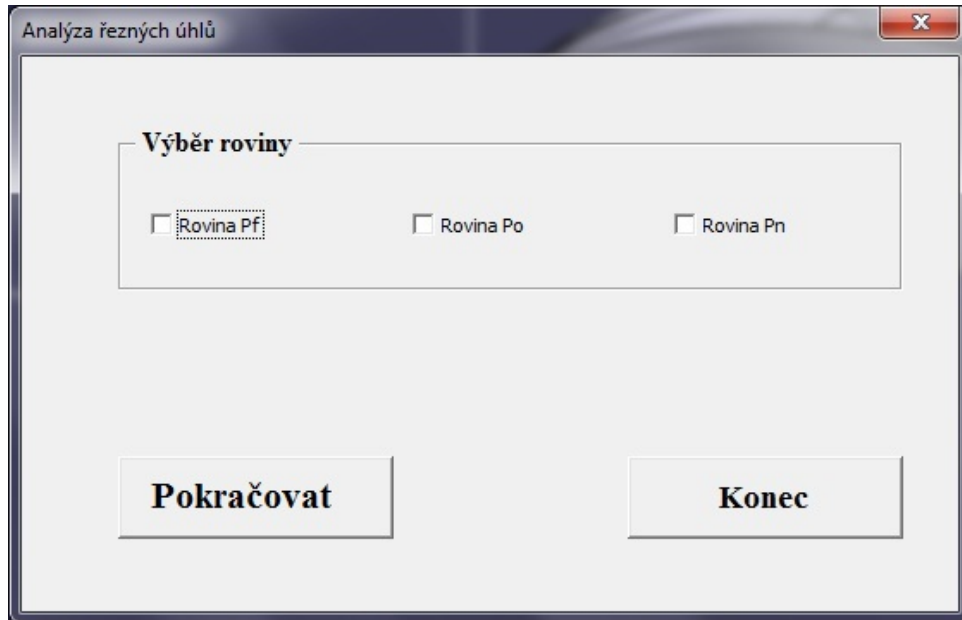
Obrázek A.8: Uživatelské rozhraní pro vytváření zaoblení přechodu zabroušení a kanálků



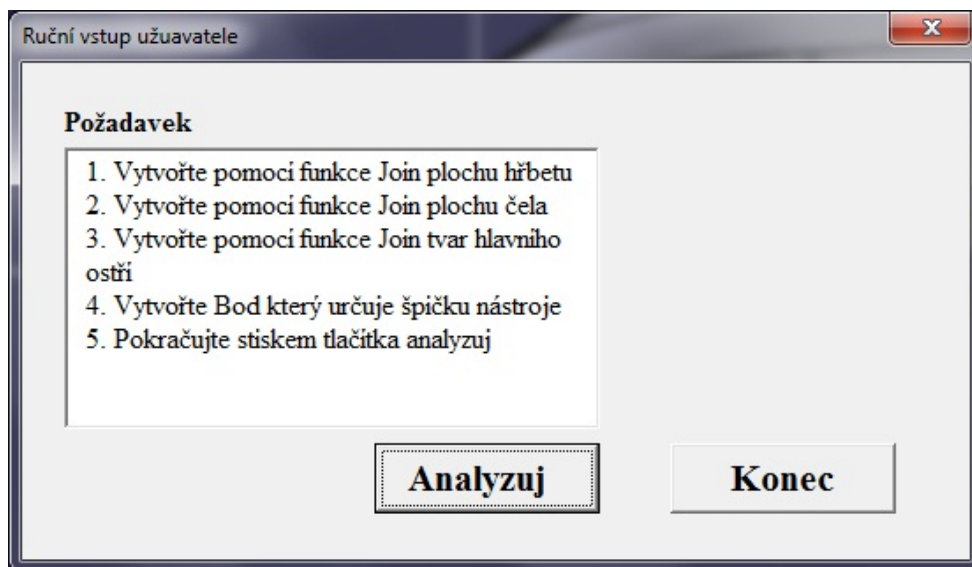
Obrázek A.9: Uživatelské rozhraní pro vytváření ochranné fazety na hlavním břitu nástroje



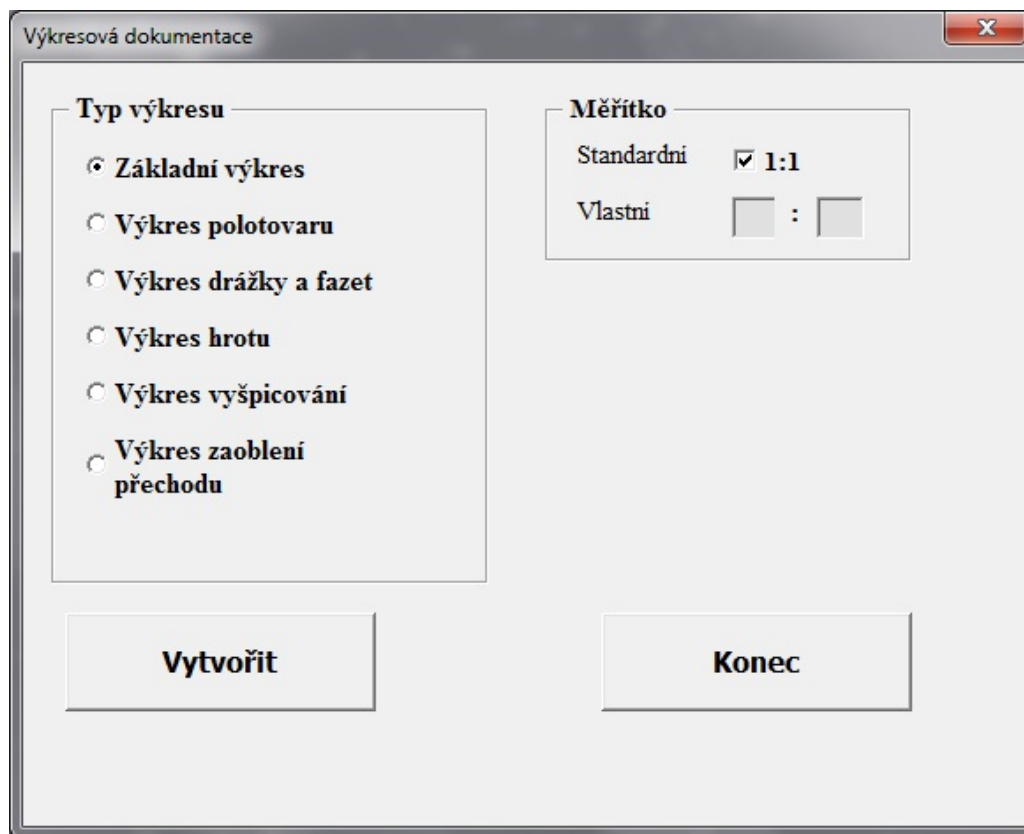
Obrázek A.10: Uživatelské rozhraní pro vytváření ochranné fazety na hlavním břitu nástroje 2



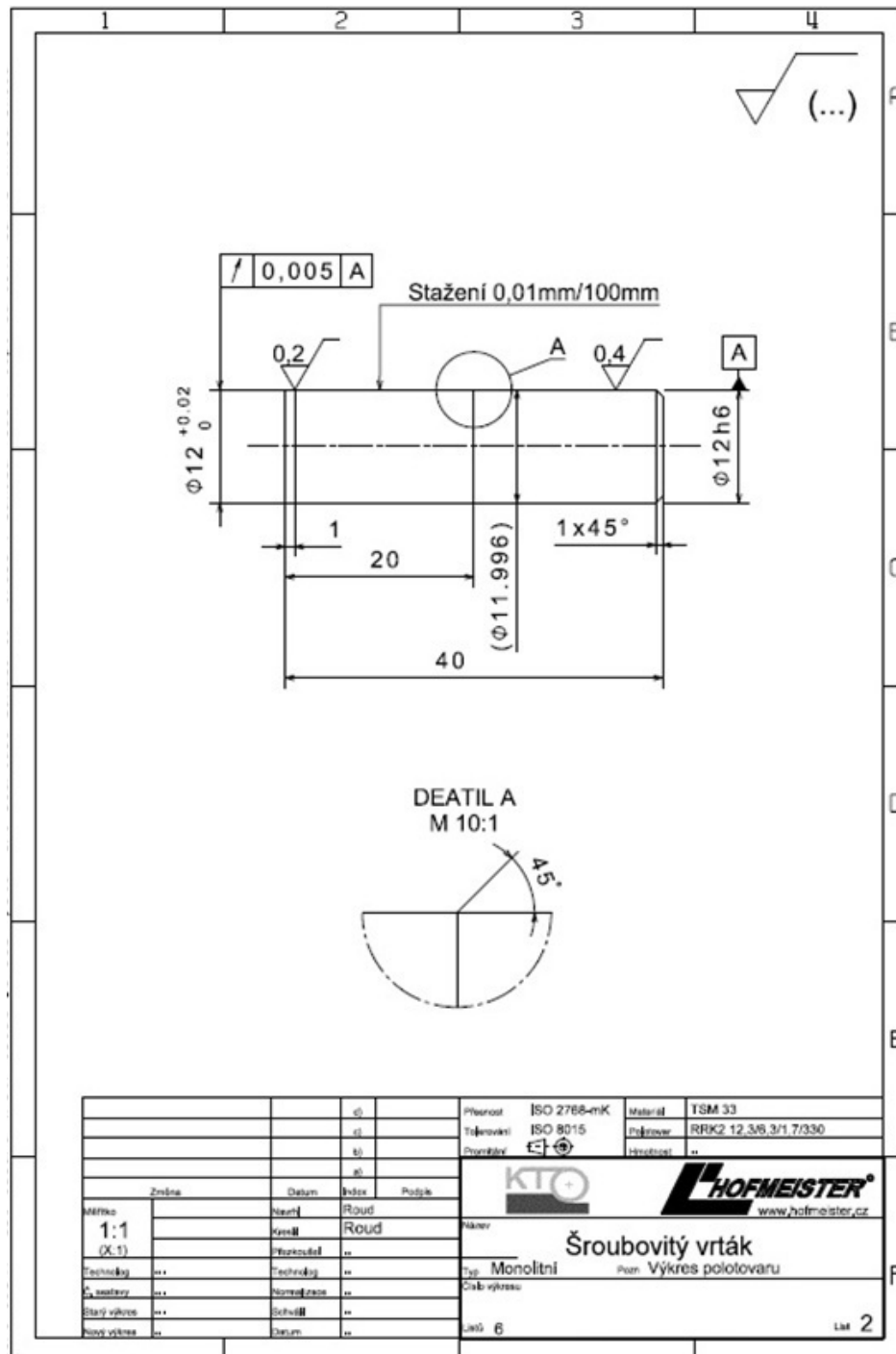
Obrázek A.11: Uživatelské rozhraní pro analýzu geometrie břitu nástroje



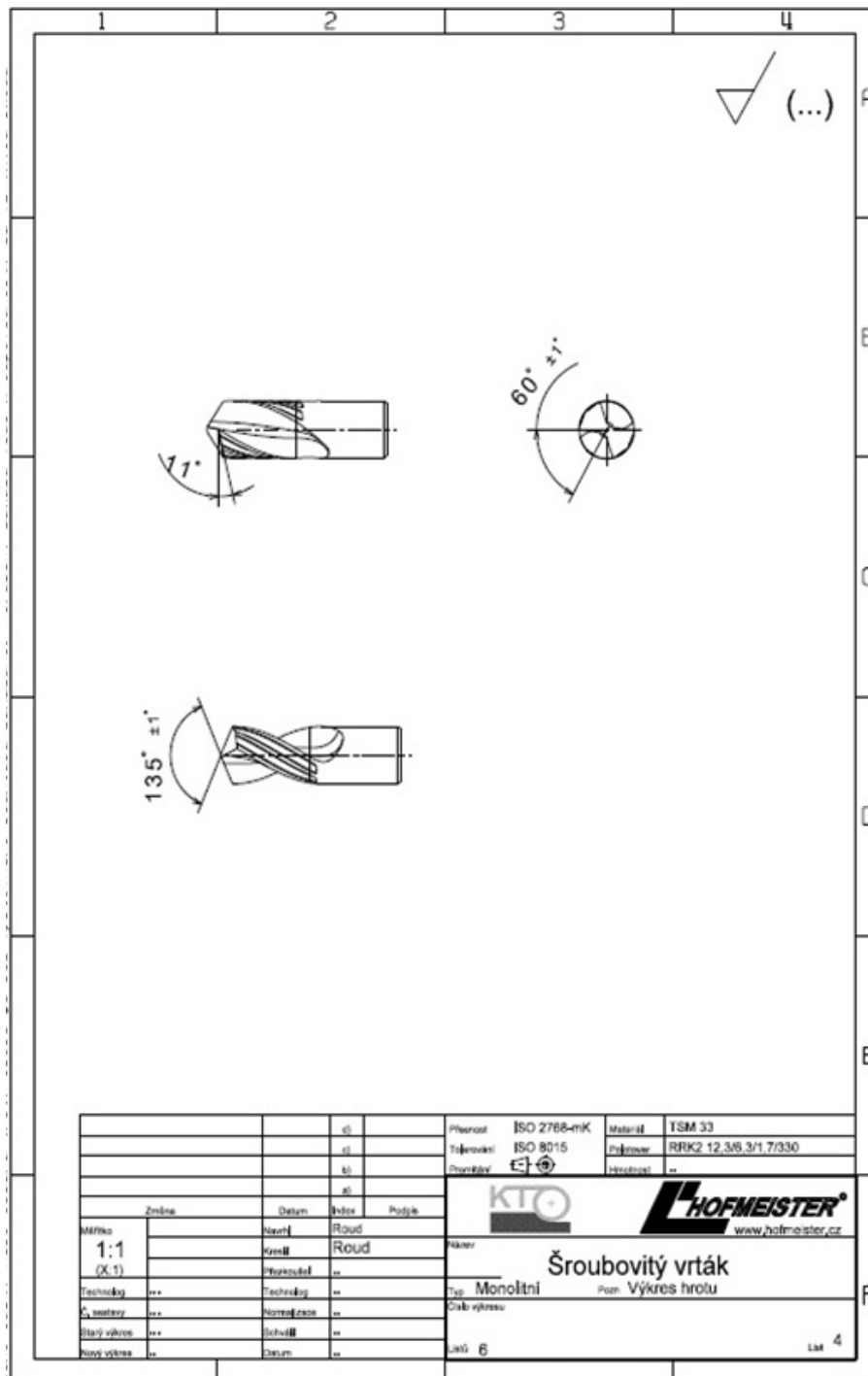
Obrázek A.12: Uživatelské rozhraní pro analýzu geometrie břitu nástroje 2



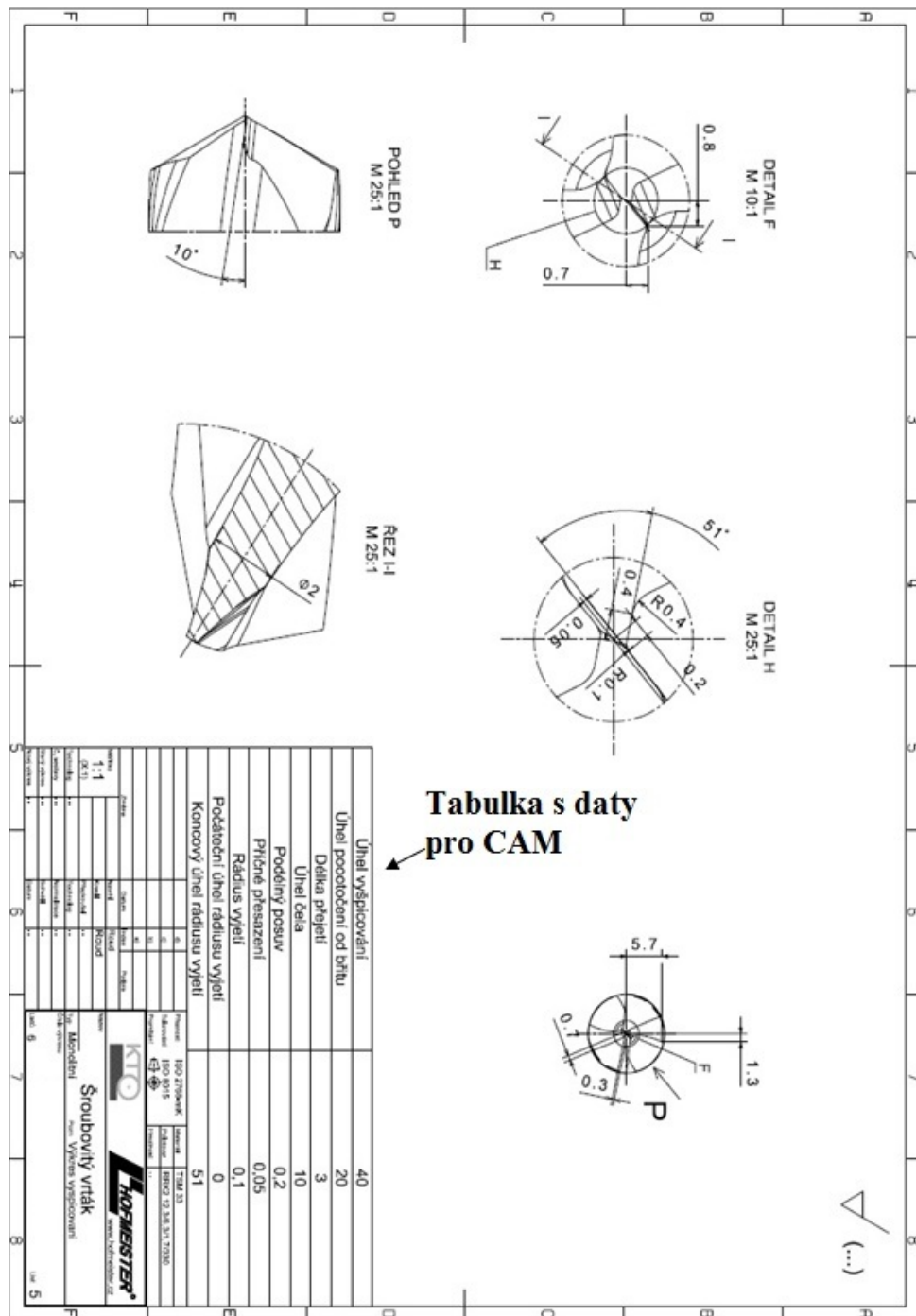
Obrázek A.13: Uživatelské rozhraní pro vytvoření výkresové dokumentace



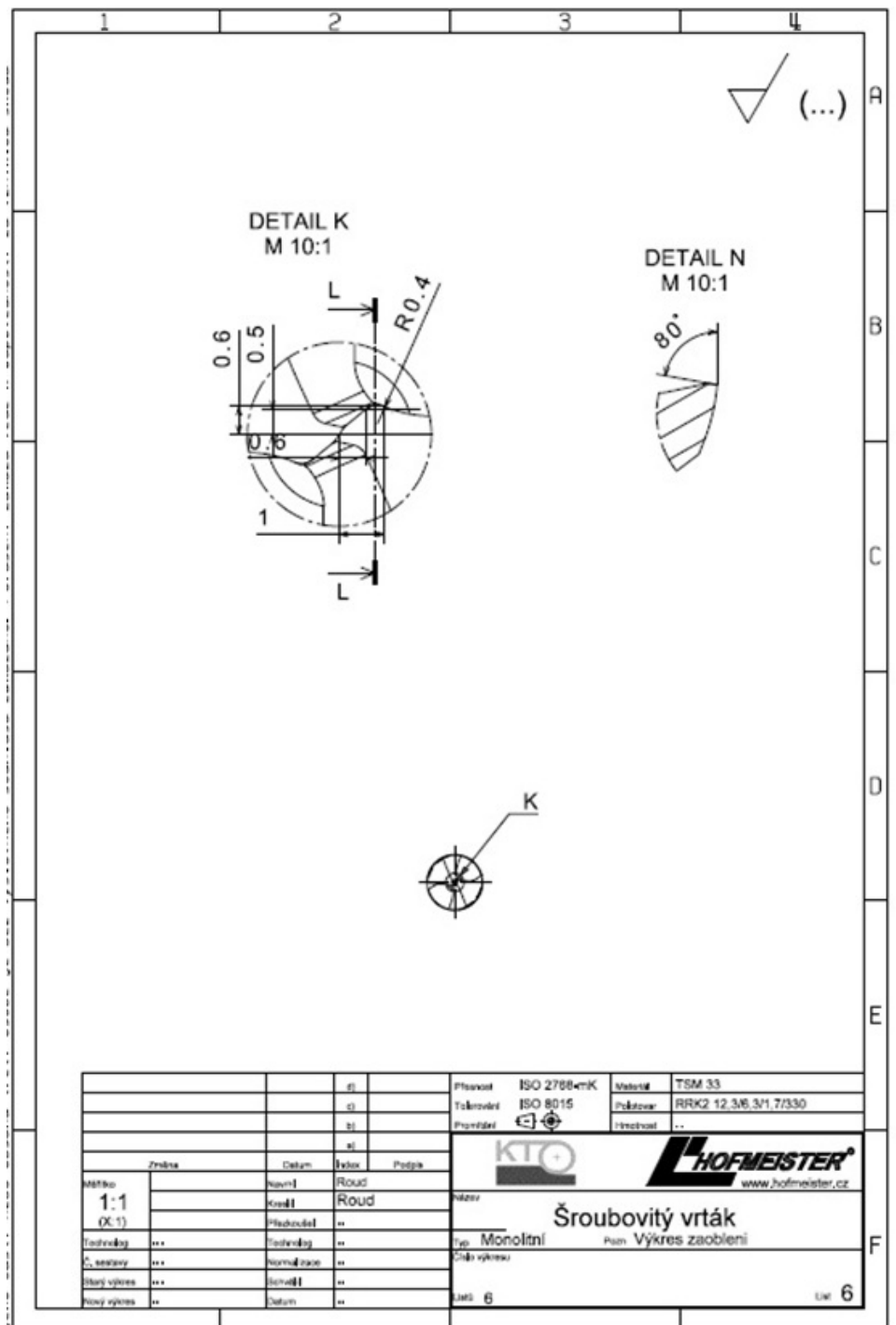
Obrázek A.15: Výkres polotovaru



Obrázek A.17: Výkres vyšpicování



Obrázek A.18: Výkres vyšpicování



Obrázek A.19: Výkres zaoblení přechodu na hlavním břitu