

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Strojírenská technologie-technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rozklad řezných sil na břitu šroubovitého vrtáku

Autor: **Martin Šmejkal**

Vedoucí práce: **Ing. Josef Sklenička**

Akademický rok 2011/2012

Zadání bakalářské práce

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování za pomoc při řešení bakalářské práce

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Josefu Skleničkovi za odborné vedení a ochotně poskytnuté rady, které mi poskytl při vypracovávání bakalářské práce.

Poděkování patří mé rodině, za podporu, kterou mi při studiích poskytovala.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Šmejkal	Jméno Martin	
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Strojírenská technologie-technologie obrábění“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Sklenička	Jméno Josef	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Rozklad řezných sil na břitu šroubovitého vrtáku		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	52	TEXTOVÁ ČÁST	36	GRAFICKÁ ČÁST	16
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tato bakalářská práce je zaměřena na rozklad řezných sil na břitu šroubovitého vrtáku při vrtání. V této práci jsou detailně popsány tři metody určování řezných sil.
KLÍČOVÁ SLOVA	Šroubovitý vrták, vrtání, řezná síla, posuvová síla, točivý moment, ECT, MKP

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Šmejkal	Name Martin	
FIELD OF STUDY	B2301 „Manufacturing processes – Technology of Metal Cutting“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Sklenička	Name Josef	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Decomposition of cutting forces on the cutting edge of twist drill		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Cutting technology	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	--------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	52	TEXT PART	36	GRAPHICAL PART	16
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	Topic of the Bachelor thesis is a decomposition of the cutting forces on the cutting edge of twist drill considering drilling. Three methods of determination of the cutting forces are described in detail in this bachelor thesis.
KEY WORDS	Twist drill, drilling, cutting force, thrust force, torque, ECT, FEM

Obsah

Obsah	6
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
Seznam použitých zkratk a symbolů	10
Úvod	15
1. Teorie vrtání	16
1.1. Charakteristika vrtání.....	16
1.2. Základní veličiny a vztahy při vrtání	16
2. Šroubovitý vrták	18
2.1. Hlavní části šroubovitého vrtáku	19
2.2. Geometrie břitu šroubovitého vrtáku.....	20
2.2.1. Nástrojové řezné úhly.....	20
2.2.2. Pracovní řezné úhly	21
2.3. Ostření šroubovitých vrtáků	22
3. Materiály pro výrobu řezných nástrojů	22
3.1. Rychlořezná ocel (RO)	23
3.2. Stellity	24
3.3. Slinuté karbidy (SK)	25
3.4. Cermety.....	28
3.5. Oxidická řezná keramika	29
3.6. Super tvrdé nástrojové materiály	30
4. Metody určování řezných sil na břitu šroubovitého vrtáku	31
4.1. První metoda určení řezných sil.....	31
4.1.1. Síly při vrtání šroubovitým vrtákem	31
4.1.1.1. Rozložení řezných sil na šroubovitém vrtáku v bodech ostří.....	32
4.1.1.2. Řezná síla.....	33
4.1.1.3. Posuvová síla	34
4.1.1.4. Řezný moment	34
4.2. Druhá metoda určení řezných sil	35
4.2.1. Základní popis metody	35

4.2.2.	Experimentální nastavení	36
4.2.3.	Model šroubovitého vrtáku	37
4.2.4.	Mechanika šikmého řezání v ECT	39
4.2.5.	Výsledky jednotlivých měření	41
4.3.	Třetí metoda určení řezných sil	47
4.3.1.	Ortogonální obrábění	47
4.3.2.	Vrtací model	49
4.3.2.1.	Silové účinky na řezné hraně	49
4.3.2.2.	Silové účinky na příčném ostří	52
4.3.3.	Experimentální ověření	52
5.	Závěr	54
	Seznam použité literatury	55

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Kinematika vrtacího procesu při vrtání šroubovým vrtákem [1].....	16
Obr. 1.2 Jmenovité rozměry třísek při vrtání šroubovým vrtákem [3]	18
Obr. 2.1 Technické názvosloví šroubovitého vrtáku [4]	19
Obr. 2.2 Geometrie břitu šroubovitého vrtáku [6].....	20
Obr. 2.3 Způsoby ostření šroubovitých vrtáků z leva rovinné, válcové, kuželové a šroubovitě [10] 22	
Obr. 3.1 Závislost jednotlivých materiálů na tvrdosti, řezné rychlosti a houževnatosti, posuvové rychlosti [14].....	23
Obr. 3.2 Mikrostruktura rychlořezné oceli [15]	24
Obr. 3.3 Schéma výroby slinutých karbidů [14]	25
Obr. 3.4 Naznačení jednotlivých vrstev v materiálu [14]	26
Obr. 3.5 (a) Průběh trhliny okolo zrn materiálu (b) průběh trhlin přes zrna materiálu [14] ...	27
Obr. 3.6 Průběh trhliny následkem technologické zkoušky vtisku HV [14].....	27
Obr. 3.7 Mikrostruktura cermetu [14]	28
Obr. 3.8 Srovnání trvanlivosti cermetů a slinutých karbidů [14].....	29
Obr. 3.9 (a) Břítové destičky třídy GC1115 [16] (b) Charakteristické opotřebení VBD z řezné keramiky [14]	30
Obr. 3.10 Diamantová břítová destička s lamačem třísek [17] a břítové destičky z PKNB CBN050C [18]	30
Obr. 4.1 (a) Rozložení řezných sil při soustružení (b) Rozložení řezných sil na břitu šroubovitého vrtáku [1]	31
Obr. 4.2 (a) Rozklad sil při ortogonálním obrábění (b) Rozklad sil při vrtání [11]	32
Obr. 4.3 Hodnoty měrného řezného odporu nejčastěji používané [21].....	33
Obr. 4.4 Průběh posuvové síly na velikosti jádra vrtáku [12].....	34
Obr. 4.5 Působíště řezné síly[4]	34
Obr. 4.6a Experimentální nastavení [22]	36
Obr. 4.6b Nastavení termočlánků [22]	36
Obr. 4.7 Průřez profilu šroubovitého vrtáku (K285A03906) [22]	37
Obr. 4.8 (a) Model šroubovitého vrtáku boční pohled, (b) horní pohled s jednotlivými ECT [22] 37	
Obr. 4.9 Úhel čela, úhel sklonu ostří, úhel mezi osou vrtáku a ECT [22].....	38

Obr. 4.10 Zobrazení postupného zajištění nástroje do obrobku [22]	39
Obr. 4.11 Model šikmého řezání v ECT [22].....	39
Obr. 4.12 Srovnání naměřených a vypočtených teplot na TC1 a TC2 [22]	41
Obr. 4.13 Rozložení teploty na jednotlivých ECT [22]	42
Obr. 4.14 Počítačový model znázorňující průběh teplot v jednotlivých experimentech (a) D183, (b) W183, (c) W91 a (d) W61 [22]	43
Obr. 4.15 Znázornění průběhu maximálního a minimálního hlavního napětí podél příčného ostří a řezné hrany [22].....	44
Obr. 4.16 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot posuvové síly a točivého momentu [22] 45	
Obr. 4.17 Rozložení teploty v experimentu D183 na vybraných ECT: (a) ECT1, (b) ECT4 a (c) ECT7 [22]	46
Obr. 4.18 Model šikmého řezání [24]	47
Obr. 4.19 Závislost úhlu sklonu ostří a úhlu čela na poloměru [24]	50
Obr. 4.20 Uspořádání působících sil na řezné hraně vrtáku [24]	51
Obr. 4.21 Eulerův model konečných prvků [24].....	51
Obr. 4.22 Srovnání naměřených a vypočtených posuvových sil [24].....	52

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Řezné podmínky pro šroubovitě vrtáky z rychlořezné oceli (RO) [1]	24
Tab. 3.2 Řezné podmínky pro šroubovitě vrtáky ze slinutých karbidů (SK) [25]	27
Tab. 4.1.1 Příklady hodnot konstant a exponentů pro výpočet řezné síly F_c [1].....	33
Tab. 4.1.2 Příklady hodnot konstant a exponentů pro výpočet posuvové síly F_f [1]	34
Tab. 4.2.1 Parametry vysokovýkonného vrtání slitiny Ti-6Al-4V [22]	35
Tab. 4.2.2 Srovnání posuvové síly, točivého momentu a výkonu [22]	46
Tab. 4.3.1 Srovnání vypočtených a naměřených hodnot posuvové síly a toč. momentu[24] .	53
Tab. 4.3.2 Sekce při šikmém řezání pro vrták s průměrem 12.7 mm, úhel sklonu šroubovice 30°, vrcholový úhel 118°, šířka sítě je 1.70 mm, otáčky vřetena jsou 302 ot/min. [24].....	53

Seznam použitých zkratk a symbolů

Značka veličiny, Symbol	Jednotka	Název - Popis
$2w$	[mm]	Šířka mřížky
2ρ	[°]	Vrcholový úhel
A	[mm ²]	Průřez třísky
a	[mm]	Tloušťka odřezávané vrstvy
a_c	[mm]	Tloušťka třísky
A_D	[mm ²]	Průřez třísky
a_p	[mm]	Šířka řezu
b	[mm]	Šířka řezu
b_D	[mm]	Jmenovitá šířka třísky
C_{Fc}	[-]	Konstanta
C_{Ff}	[-]	Konstanta
C_M	[-]	konstanta
\cos	[-]	Goniometrická funkce
\cotg	[-]	Goniometrická funkce
D	[mm]	Průměr nástroje
d	[mm]	Průměr předvrtané díry
f	[mm/ot]	Posuv na otáčku
F	[N]	Výslednice sil
F_c	[N]	Řezná síla
F_c	[N]	Složka výsledné síly v ose X
F_f	[N]	Posuvová síla
F_f	[N]	Paralelní složka výsledné síly
F_H	[N]	Řezná síla
F_l	[N]	Složka výsledné síly v ose Y
F_n	[N]	Normálová složka výsledné síly
F_p	[N]	Pasivní síla
F_{rad}	[N]	Radiální síla
F_{sh}	[N]	Tangenciální síla v rovině stříhu
F_t	[N]	Složka výsledné síly v ose Z
F_T	[N]	Příčná síla

F_{tang}	[N]	Tangenciální síla
F_{TH}	[N]	Posuvová síla
F_{thrust}	[N]	Posuvová síla
F_V	[N]	Posuvová síla
f_z	[mm]	Posuv na zub
F_γ	[N]	Tangenciální síla čela nástroje
$F_{\gamma N}$	[N]	Normálová síla čela nástroje
h	[mm]	Délka špičky vrtáku
h_D	[mm]	Jmenovitá tloušťka třísky
i	[°]	Úhel sklonu hlavního ostří
k_c	[MPa]	Měrný řezný odpor
L	[mm]	Délka těla vrtáku v záběru
M_c	[Nm]	Řezný moment
n	[ot/min]	Počet otáček
N_t	[N]	Normálová síla
P_b	[-]	Rovina největšího spádu hřbetu
P_f	[-]	Nástrojová boční rovina
P_{fe}	[-]	Pracovní boční rovina
P_g	[-]	Rovina největšího spádu čela
P_o	[-]	Normálová rovina
P_p	[-]	Nástrojová zadní rovina
P_{pe}	[-]	Pracovní zadní rovina
P_r	[-]	Nástrojová základní rovina
P_{re}	[-]	Pracovní základní rovina
P_s	[-]	Nástrojová rovina ostří
P_{se}	[-]	Pracovní rovina ostří
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
r_ϵ	[mm]	Poloměr špičky
\sin	[-]	Goniometrická funkce
T	[min]	Efektivní čas obrábění
T	[Nm]	Točivý moment
t_l	[mm]	Hloubka řezu
tg	[-]	Goniometrická funkce
U_f	[J]	Míra třecí energie

U_s	[J]	Míra střížné energie
V	[mm ³ /min]	Výkon obrábění
v_c	[m/s]	Řezná rychlost
V_c	[m/min]	Rychlost odvodu třísky
v_e	[m/s]	Rychlost řezného pohybu
v_f	[m/s]	Posuvová rychlost
V_s	[m/s]	Střížná rychlost ve střížné rovině
X_{Fc}	[-]	Konstanta
X_{Ff}	[-]	Konstanta
X_M	[mm]	Vzdálenost působíště síly od osy vrtáku
Y_{Fc}	[-]	Konstanta
Y_{Ff}	[-]	Konstanta
z	[-]	Počet zubů nástroje
z	[-]	konstanta
α	[°]	Nástrojový úhel čela
α_e	[°]	Efektivní úhel čela
β	[°]	Nástrojový úhel břitu
β	[°]	Třecí úhel
γ	[°]	Úhel čela
ε_r	[°]	Nástrojový úhel špičky
η	[°]	Úhel řezného pohybu
η	[°]	Úhel odvodu třísky
η_c	[°]	Úhel odvodu třísky
θ	[°]	Úhel mezi osou vrtáku a ECT
κ'_r	[°]	Nástrojový úhel nastavení vedlejšího ostří
κ_r	[°]	Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
λ	[°]	Úhel sklonu ostří
λ_s	[°]	Nástrojový úhel sklonu ostří
τ_s	[MPa]	Napětí ve střížné rovině
φ	[°]	Úhel posuvového pohybu
φ	[°]	Úhel střížné roviny
φ_e	[°]	Efektivní střížný úhel
ψ_r	[°]	Nástrojový doplňkový úhel

Zkratka	Popis
AISA 1020	Typ oceli
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
CA	Čistá lidická keramika
CD	Hlavní řezná hrana
CE	Střížná rovina
CJFD	Rovina, ve které působí střížná síla
CM	Směsná lidická keramika
Co	Kobalt
CoO	Oxid kobalnatý
Cr	Chrom
Cr ₃ C ₂	Karbid chromu
ČSN	Česká státní norma
ECT	Základní řezný nástroj („elementary cutting tool“)
FEM	Model konečných prvků („model finite element“)
HB	Tvrдость podle Brinella
HI	Neděformovatelná tloušťka třísky
HRC	Tvrдость podle Rocwella
HSS	Rychlořezná ocel („High speed steel“)
HV	Zkouška tvrdosti podle Vickerse
IHERQGC	Rovina ortogonální řezané vrstvy
MKP	Model konečných prvků
Mo	Molibden
N	Dusík
NbC	Karbid niobu
PD	Polykrystalický diamant
PKNB	Polykrystalický nitrid boru
RO	Rychlořezná ocel
SiC	Karbid křemíku
SK	Slinutý karbid
TaC	Karbid tantalu
TaN	Nitrid tantalu

TC1 - 2	Termočlánek 1 a 2
Ti-6Al-4V	Titanová slitina
TiC	Karbid titanu
TiCN	Karbonitrid titanu
TiN	Nitrid titanu
TiN	Nitrid titanu
V	Vanad
VBD	Vyměnitelná břitová destička
VC	Karbid vanadu
W	Wolfram
WC	Karbid wolframu
ZrO ₂	Oxid zirkoničitý

Úvod

Dnešní výroba strojírenských součástí třískovým obráběním představuje širokou znalost v oblasti materiálových vlastností nástrojů a obrobků, řezných podmínek, technologie výroby a v neposlední řadě i informačních systémů. Na základě těchto požadovaných vlastností je možné konstatovat, že inženýrská činnost v současné době vyžaduje stále víc informací o řešení uvedených problémů v jednotlivých činnostech. Velká zodpovědnost technologa vyplývá ze skutečnosti, že každé rozhodnutí v technologii zpracování podle materiálových vlastností nástroje, obrobku a optimální volbě informačních systémů na dosažení cíle, může mít vážný ekonomický dopad a ovlivňuje konstrukční schopnost výrobku.

Vrtání je jednou z nejstarších metod obrábění rotačních otvorů. Dochází k neustálému zlepšování nástrojů a informačních systému. Nejpoužívanějším nástrojem při vrtání je šroubovitý vrták. Pro svou jednoduchou výrobu a rozsah použitelnosti je z ekonomického a praktického hlediska zatím nepřekonatelný. Z druhé strany pohledu, ač se zdá šroubovitý vrták jednoduchým nástrojem, jeho exaktnější popis během vrtání je velmi složitý. Při vývoji vrtáků působí inženýrům problém složitá geometrie nástroje a složité řezné podmínky. V průběhu vývoje byly vyvinuty způsoby, jak nějaké negativní vlivy eliminovat, samozřejmě nelze podchytit všechny, vždy jde o kompromis mezi trvanlivostí, geometrií a tuhostí nástroje.

Avšak velká konkurenceschopnost na trhu s řeznými nástroji vyvíjí tlak na výrobce neustále vyvíjet nové produkty a tudíž je nutná dobrá znalost řezného procesu podél hlavního, vedlejšího a příčného ostří šroubovitého vrtáku.

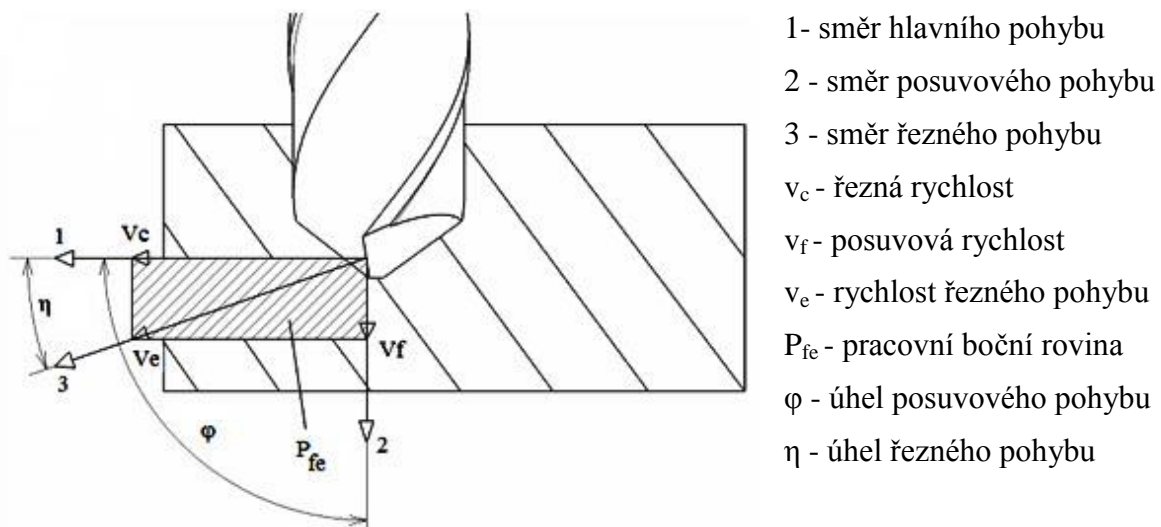
Hlavním cílem této bakalářské práce je napsat rešerši v oblasti určování řezných sil na břítu šroubovitého vrtáku při vrtání. U vybraných metod je detailně popsán postup určení řezných sil.

Toto téma bakalářské práce jsem si vybral, protože mne tato problematika zaujala a chtěl jsem si rozšířit znalosti v tom odvětví.

1. Teorie vrtání

1.1. Charakteristika vrtání [2]

Vrtání je takový způsob obrábění, kterým se zhotovují válcové díry do plného materiálu za použití řezných nástrojů. Vrtáky jsou nejčastěji dvoubřité, ale mohou být i jednobřité a vícebřité. Kromě vrtání krátkých a dlouhých děr zahrnuje tento pojem také další způsoby obrábění, jako je vystružování, vyhrubování a vyvrtávání, ale i některé operace obrábění na čisto např. válečkování. Společný jmenovatel všech těchto způsobů obrábění je rotační pohyb nástroje popřípadě obrobku a přímočarý pohyb nástroje popřípadě obrobku. U vrtání je důležitý požadavek na utváření třísky a její odvádění. Důležitost tohoto požadavku roste s délkou vrtané díry.



Obr. 1.1 Kinematika vrtacího procesu při vrtání šroubovitým vrtákem [1]

1.2. Základní veličiny a vztahy při vrtání [1, 2]

Bez ohledu na to, je-li používán vrták z materiálu HSS, slinutého karbidu nebo jedná-li se o vrták s vyměnitelnými břitovými destičkami, zůstávají podmínky vrtání vždy stejné. Hlavním pohybem při vrtání je rotace, rotovat může nástroj nebo obrobek.

Počet otáček n [ot/min] - vztahuje se k hlavnímu pohybu a je vyjádřen počtem otáček za minutu.

Řezná rychlost v_c [m/min] – je určena počtem otáček a průměrem nástroje.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [m/min] \quad (1.1)$$

D – průměr nástroje [mm]

n – rychlost rotace [ot/min]

Rychlost posuvu v_f [mm/min] – posuv nástroje vůči obrobku, případně posuv obrobku vůči nástroji, vyjádřený délkou dráhy za časovou jednotku. Tento údaj je znám také jako strojní posuv nebo posuv stolu.

$$v_f = f \cdot n \text{ [mm/min]} \quad (1.2)$$

f – posuv na otáčku [mm/ot]

n – rychlost rotace [ot/min]

Posuv na otáčku f [mm/ot] – vyjadřuje posuv nástroje popřípadě obrobku za jednu otáčku a slouží k výpočtu rychlosti posuvu.

Posuv na zub f_z [mm] – pokud je vrtací nástroj opatřen větším počtem břitů, používá se posuv na zub.

$$f_z = \frac{f}{z} \text{ [mm]} \quad (1.3)$$

f – posuv na otáčku [mm/ot]

z – počet zubů nástroje [-]

Výkon obrábění V [mm³/min] – objem se rovná řezné rychlosti, vynásobené počtem břitů a průřezem třísky.

$$V = A \cdot z \cdot v_c \cdot 1000 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (1.4)$$

A – průřez třísky [mm²]

z – počet zubů [-]

v_c – řezná rychlost [m/min]

Efektivní čas obrábění T [min] – dělíme-li délku posuvu L+h rychlostí posuvu, dostaneme efektivní čas obrábění T. Délka posuvu odpovídá hloubce vrtání s připočtením výšky špičky řezné části vrtáku.

$$T = \frac{L + h}{v_f} \text{ [min]} \quad (1.5)$$

$$h = \frac{D}{2} \cdot \cot g \frac{\kappa_r}{2} \text{ [mm]} \quad (1.6)$$

L – délka těla vrtáku v záběru [mm]

h – délka špičky vrtáku [mm]

v_f – rychlost posuvu [mm/min]

D – průměr nástroje [mm]

κ_r – úhel špičky [°]

Šířka řezu a_p [mm] – vztahuje se k té části obrobku, kterou nástroj obrábí. Jako hodnota pro šířku řezu při vrtání byla použita hodnota polovičního rozdílu průměrů.



Obr. 1.2 Jmenovité rozměry třísek při vrtání šroubovitým vrtákem [3]

$$a_p = \frac{D}{2} \text{ [mm]} \quad (1.7)$$

$$a_p = \frac{D - d}{2} \text{ [mm]} \quad (1.8)$$

b_D – jmenovitá šířka třísky při vrtání do plného materiálu.

$$b_D = \frac{D}{2 \cdot \sin \kappa_r} \text{ [mm]} \quad (1.10)$$

b_D – jmenovitá šířka třísky při rozšiřování díry.

$$b_D = \frac{D - d}{2 \cdot \sin \kappa_r} \text{ [mm]} \quad (1.11)$$

h_D – jmenovitá tloušťka třísky.

$$h_D = \frac{f}{2} \cdot \sin \kappa_r \text{ [mm]} \quad (1.12)$$

A_D – jmenovitý průřez třísky při vrtání do plného materiálu.

$$A_D = b_D \cdot h_D = \frac{D \cdot f}{4} \text{ [mm]} \quad (1.13)$$

A_D – jmenovitý průřez třísky při vrtání do předvrtané díry.

$$A_D = \frac{D - d}{4} \cdot f \text{ [mm]} \quad (1.14)$$

D – průměr vrtáku [mm]

d – průměr předvrtané díry [mm]

κ_r – úhel špičky [°]

f – posuv na otáčku [mm/ot]

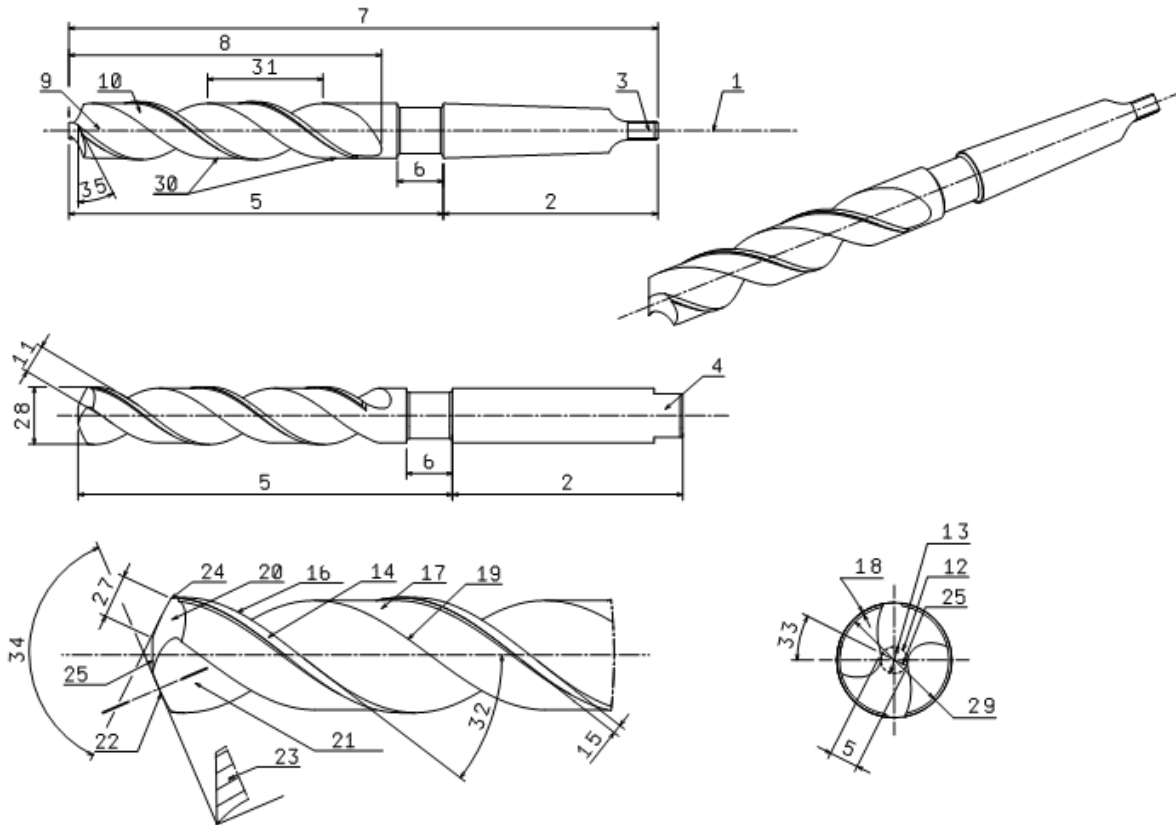
2. Šroubovitý vrták [7, 23]

Šroubovitý vrták je nejčastěji dvojbřitý nástroj s drážkami pro odvod třísek a přívod chladicí kapaliny. Samozřejmě může mít vrták i více břitů např. 3. Šroubovitý vrták má kuželovité tělo (na délce 100 mm se průměr vrtáku zmenšuje asi o 0,04 až 0,3 mm). Průměr jádra vrtáku se zvětšuje směrem ke stopce s kuželovitostí 1:70 z důvodu snížení tření a zároveň se zvětšuje tuhost vrtáku. Šroubovitými vrtáky se vrtají krátké díry do poměru $L/D = 10$ mm a dlouhé díry, jejichž poměr je $L/D > 10$ mm vrtáme speciálními vrtáky.

Fasetka je úzká válcová ploška na vedlejších ostřích vrtáku, jejímž hlavním úkolem je vedení vrtáku a snižování tření. Šroubovitý vrták má dvě hlavní ostří, které jsou položeny vůči sobě symetricky a jsou spojeny příčným ostřím.

Šroubovitě vrtáky se vyrábějí z RO, SK, zvýšení řezivosti vrtáku lze docílit povlakem např. nitrid titanu (TiN).

2.1. Hlavní části šroubovitého vrtáku



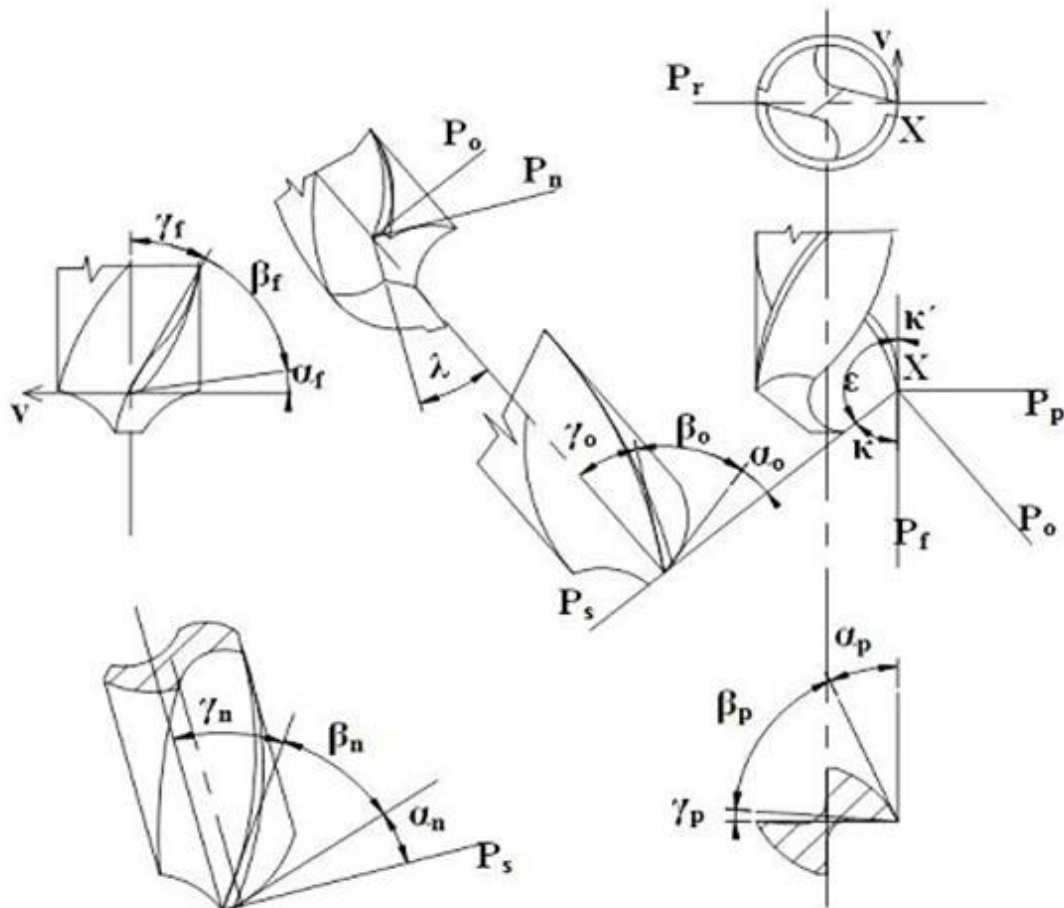
Obr. 2.1 Technické názvosloví šroubovitého vrtáku [4]

Popis obrázku 2.1:

1- osa, 2- stopka, 3- vyrážeč, 4- unášeč, 5- tělo vrtáku, 6- krček, 7- celková délka, 8- délka drážky (šroubovice), 9- drážka, 10- plocha vedlejšího hřbetu, 11- šířka plochy vedlejšího hřbetu, 12- jádro, 13- tloušťka jádra, 14- fasetka, 15- šířka fasetky, 16- vedlejší ostří, 17- odlehčení, 18- hloubka odlehčení, 19- pata, 20- hřbet, 21- čelo, 22- hlavní ostří, 23- břit, 24- vnější špička, 25- příčné ostří, 26- délka příčného ostří, 27- délka hlavního ostří, 28- průměr vrtáku, 29- průměr odlehčení, 30- zpětná kuželovitost, 31- stoupání šroubovice, 32- úhel šroubovice, 33- úhel příčného ostří, 34- úhel špičky, 35- úhel hřbetu.

2.2. Geometrie bříty šroubovitého vrtáku [13]

Geometrie bříty šroubovitého vrtáku je hodně důležitá, protože na ní závisí velikost řezných sil, jakost obrobeneé plochy a trvanlivost bříty. Geometrie bříty může být popsána dvěma způsoby a to kinematicky ze vztahu nástroje k obrobku pomocí pracovních úhlů nebo staticky pomocí nástrojových úhlů. Nástrojové úhly se používají hlavně ke konstrukci, výrobě a ostření nástrojů. Pracovní úhly se používají ke zjištění vztahu nástroje a obrobku při řezání.



Obr. 2.2 Geometrie bříty šroubovitého vrtáku [6]

2.2.1. Nástrojové řezné úhly

Jsou to takové úhly, které určují tvar bříty nástroje za klidu v souřadnicovém systému orientovanému vůči očekávanému směru hlavního řezného pohybu a směru podélného pohybu. Poloha čela, hřbetu, hlavních a vedlejších ploch bříty se určuje za použití nástrojových úhlů, které se definují pomocí nástrojových rovin, které jsou:

- Nástrojová základní rovina P_r - tato rovina prochází uvažovaným bodem ostří a je kolmá na vektor rychlosti hlavního pohybu.
- Nástrojová boční rovina P_f - tato rovina prochází uvažovaným bodem ostří ve směru vektoru rychlosti hlavního pohybu a je rovnoběžná s předpokládaným směrem posuvu.
- Nástrojová zadní rovina P_p - tato rovina prochází uvažovaným bodem ostří a je kolmá na roviny P_r a P_f .

- Nástrojová rovina ostří P_s - tato rovina je tečná k ostří a je kolmá na základní rovinu P_r .
- Normálová rovina P_o - tato rovina prochází uvažovaným bodem a je kolmá na základní rovinu P_r a rovinu ostří P_s .

Mimo výše uvedené jsou definovány další dvě roviny, jejich hlavní význam je při ostření nástrojů a jsou to:

- P_g - rovina největšího spádu čela
- P_b - rovina největšího spádu hřbetu

Pomocí všech těchto roviny jsou definovány nástrojové úhly břitu:

- Nástrojový úhel hřbetu α – je to úhel, který svírá nástrojová rovina ostří P_s s plochou hřbetu. Nejčastěji máme na mysli ortogonální úhel hřbetu α_o , který je měřený v ortogonální rovině. Můžeme samozřejmě určit normálový úhel hřbetu α_n , boční α_f a zadní α_p , měříme-li tento úhel v P_n , P_f a P_p rovině.
- Nástrojový úhel čela γ – toto je úhel, který je mezi čelem nástroje a nástrojovou základní rovinou P_r , měřený v P_o , P_n , P_f a P_p rovině.
- Nástrojový úhel břitu β – je úhel mezi čelem a hřbetem nástroje. Podle rovin měření máme stejně tak jako v předchozích případech β_o , β_n , β_p a β_f .
- Nástrojový úhel řezu δ – tento úhel je dán součtem úhlů hřbetu a břitu.
- Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří κ_r – tento úhel je mezi rovinami P_s a P_f měřený v základní nástrojové rovině P_r . Obdobným způsobem je definován nástrojový úhel nastavení vedlejšího ostří κ'_r .
- Nástrojový doplňkový úhel ψ_r – tento úhel je mezi rovinami P_s a P_p a je měřený na základní rovině P_r . Je stanoven pouze pro uvažovaný bod na hlavním ostří.
- Nástrojový úhel sklonu ostří λ_s – tento úhel je mezi ostřím a základní rovinou P_r a je měřený v rovině P_s .
- Nástrojový úhel špičky ϵ_r – tento úhel je mezi rovinami P_s a P'_s a je měřený v základní rovině P_r .
- Poloměr špičky r_e – je zaoblení špičky nástroje měřený v základní rovině P_r .

2.2.2. Pracovní řezné úhly

Roviny jsou orientovány ke směru hlavního pohybu a posuvu u pracovní souřadnicové soustavy. Z důvodu odlišení od nástrojové soustavy se značka roviny nebo úhlu doplňuje indexem "e". Rozložení pracovních rovin je následující.

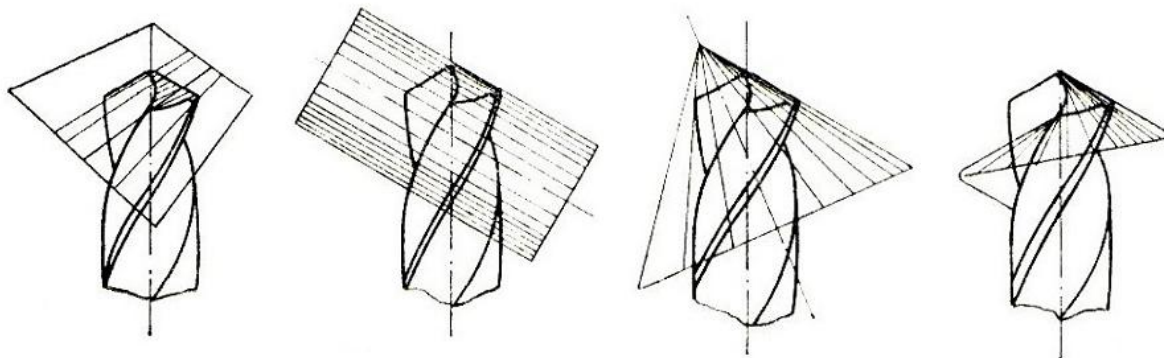
- Základní rovina P_{re} - je kolmá ke směru výsledného řezného pohybu.
- Rovina boční P_{fe} – je dána směrem rychlostí hlavního pohybu a posuvu.
- Rovina zadní P_{pe} – je kolmá na P_{re} a P_{fe} .
- Rovina ostří P_{se} – je tečná k ostří v uvažovaném bodě kolmá na P_{re} .

Pracovní úhly jsou vztaženy k těmto rovinám stejně tak jako nástrojové úhly v souřadnicové soustavě statické.

2.3. Ostření šroubovitých vrtáků [10]

Aby šroubovitý vrták pracoval s co nejvyšším výkonem, musí mít vrták identickou délku hlavních břitů, totožné úhly hřbetu a symetrický sklon břitu. Těmto podmínkám lze vyhovět výhradně při strojním ostření.

Jsou čtyři způsoby ostření a to: *rovinné, válcové, kuželové a šroubovité* (obr. 2.3).



Obr. 2.3 Způsoby ostření šroubovitých vrtáků zleva rovinné, válcové, kuželové a šroubovité [10]

- **Rovinné ostření** – tento způsob je základní, avšak nesplňuje podmínku zvětšení úhlu hřbetu v blízkosti příčného břitu. Tímto způsobem jsou ostřeny vrtáky do průměru 10 mm.
- **Válcové ostření** – tento způsob taktéž jako předešlý nedává výhodné úhly α u příčného břitu. Používá se pro malé vrtáky.
- **Kuželové ostření** – tento způsob ostření je nejpoužívanější. Plocha na hřbetu je vytvořena jako úsek pláště kužele, jehož vrchol je umístěn tak, aby u příčného břitu vznikl vlivem menšího poloměru zakřivení větší úhel α .
- **Šroubovité ostření** – slučováním axiálního a rotačního pohybu brousícího kotouče vznikne hřbetní plocha ve tvaru šroubovice. Vytvoří se velmi výhodné hřbetní úhly u příčného břitu, tedy vrták má lepší středící vlastnosti a klade menší odpor při vnikání do materiálu.

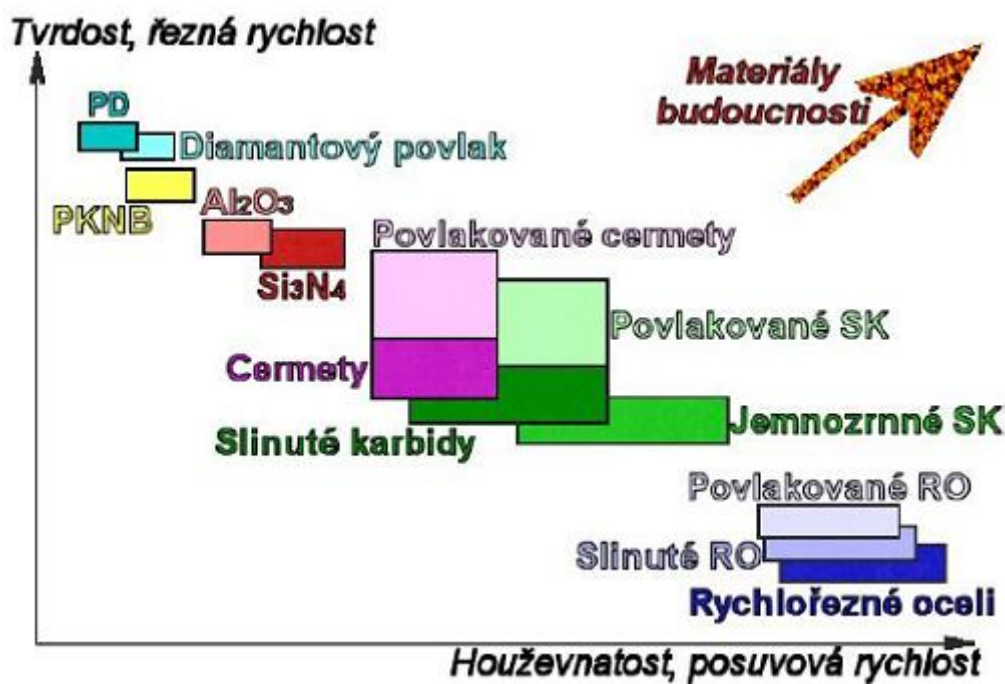
3. Materiály pro výrobu řezných nástrojů [1, 9, 14, 19, 20]

Nejdůležitější vlastností řezných nástrojů je zejména jejich řezivost. Z hlediska nástrojového materiálu zahrnuje tento pojem schopnost při uspokojivé houževnatosti zachovávat pevnostní charakteristiky za vysokých teplot a odolávat opotřebení v místě dotyku nástroje a obrobku a odcházející třískou. Volbu materiálu na řezné nástroje do velké míry ovlivňuje typ obráběného materiálu.

Volba vhodného typu materiálu na řezné nástroje je ovlivněno řadou činitelů a to:

- Konstrukce nástroje (monolitní, pájený, skládaný).
- Namáhání bříty i nástroje jako celku, ovlivněné zejména obrobiteľnosťí materiálu obrobku, řeznými podmínkami a prostředím, charakterem práce a tuhostí soustavy stroj-nástroj-obrobek-upínač.
- Požadovaný výkon nebo trvanlivost nástroje.
- Dostupnost zvoleného materiálu.
- Cena materiálu.
- Obrobiteľnosť broušením, především u nástrojů tvarových.
- Dostupnost zařízení pro tepelné nebo chemicko-tepelné zpracování.

Z těchto uvedených kritérií je vidět, že volba řezného nástroje není jednoduchý úkol, komplikovaný změnami tržní dostupnosti a cenovou variabilitou.



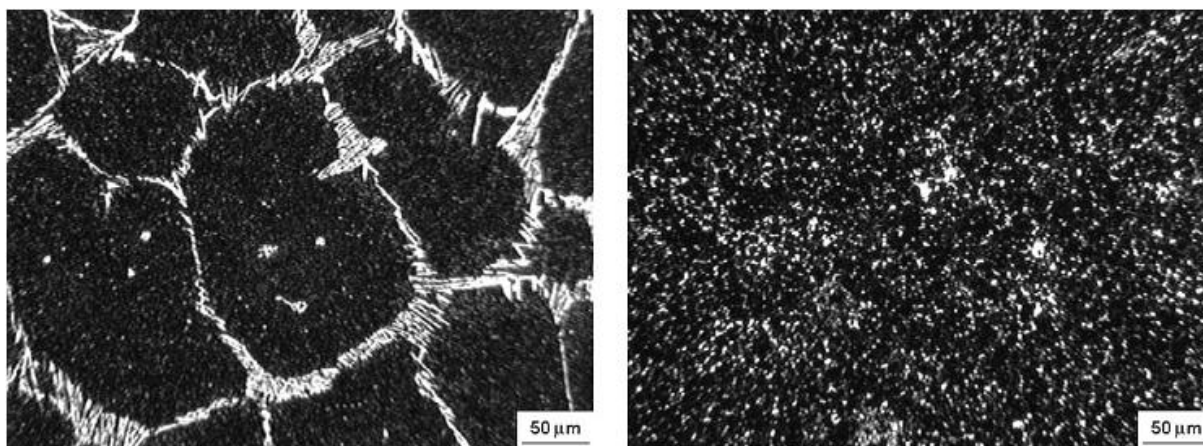
Obr. 3.1 Závislost jednotlivých materiálů na tvrdosti, řezné rychlosti a houževnatosti, posuvové rychlosti [14]

3.1. Rychlořezná ocel (RO) [9]

Tento materiál se v první řadě vyznačuje výjimečnou stálostí za tepla, tvrdost nad 60 HRC se zachovává do teploty okolo 650°C, dále vysokou pevností v ohybu 3500 až 4000MPa. Rychlořezná ocel má 0,7 až 1,3% uhlíku. Hlavními přísadami jsou W, Cr a V, tyto přísady zaujímají v celkovém objemu okolo 15 až 22%. Jejich karbidy, které jsou stále do vysokých teplot, jsou příčinou tvrdosti a řezivosti za tepla. Nejznámější rychlořezné oceli mají typické složení 18% W, 4% Cr, 1% V. Oceli se stále vyvíjejí a směřuje se k snižování obsahu W (10 až 12%) a naopak zvyšování V (až 5%) a to za současného zvyšování obsahu uhlíku.

Rychlořezné oceli, které jsou určeny pro vysoké výkony, mají ještě přísadu kobaltu do 10%, která působí disperzní vytvrzení intermetalickými fázemi a tím dále zvyšuje tvrdost oceli za vyšších teplot. U některých druhů rychlořezných je wolfram částečně nahrazován molybdenem.

Maximální rozpustnost uhlíku v austenitu je u tohoto druhu ocelí jen 0,7%, a proto mají většinou částečně ledeburitickou strukturu. Jestliže tvoří ledeburitické karbidy hrubé řádky, je rychlořezná ocel docela křehká a obzvláště při nepříznivém průběhu řádků vzhledem k namáhání nástroje je nebezpečí lomu. Z tohoto důvodu je snaha ovlivnit rozložení karbidů již při krystalizaci oceli i úpravou postupu kování polotovárů.



Obr. 3.2 Mikrostruktura rychlořezné oceli [15]

V tabulce (Tab. 3.1) jsou uvedeny řezné podmínky pro šroubovitě vrtáky vyrobené z rychlořezné oceli (RO).

Tab. 3.1 Řezné podmínky pro šroubovitě vrtáky z rychlořezné oceli (RO) [1]

Obráběný materiál	v_c [m/min]	Posuv na otáčku f [mm]						
		Průměr vrtáku D [mm]						
		2	5	8	12	16	25	40
Ocel $R_m = 700$ až 900 MPa	25 až 30	0,04	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
Ocel korozivzdorná	8 až 12	-	0,05	0,10	0,12	0,15	0,20	0,20
Šedá litina 200 HB	18 až 25	0,06	0,15	0,22	0,30	0,36	0,40	0,60
Mosaz	60 až 70	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,32	0,40
Měď	40 až 55	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,32	0,40
Hliníkové slitiny	70 až 85	0,06	0,12	0,20	0,28	0,32	0,40	0,50
Plasty	20 až 35	0,08	0,16	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70

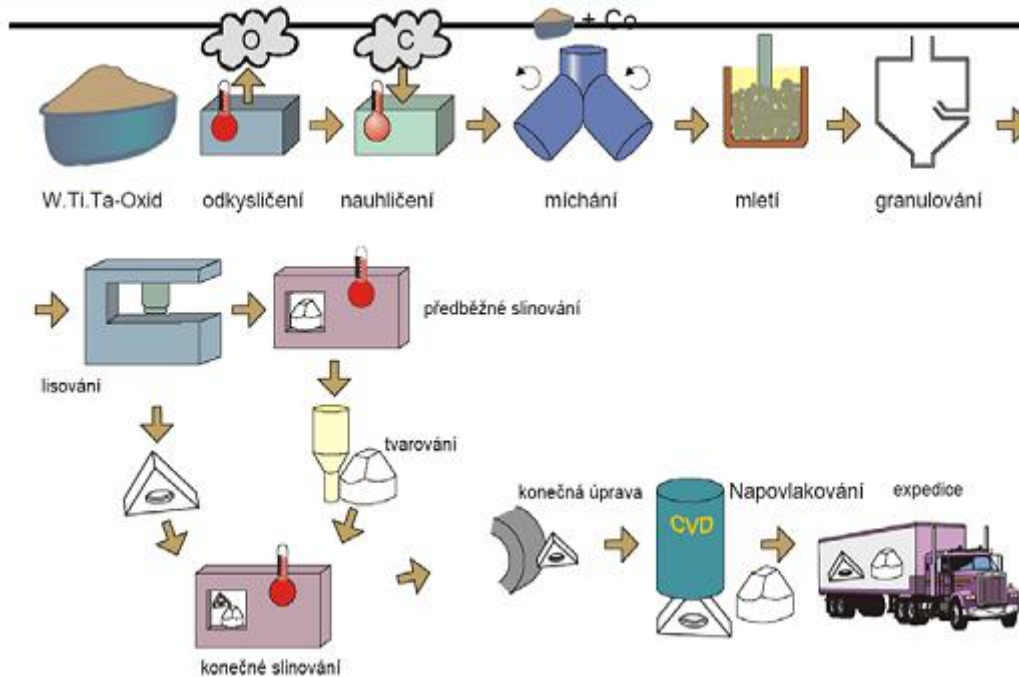
3.2. Stelity [1]

Stelity jsou takové řezné slitiny, jejichž řezivost a tvrdost má za následek velké množství karbidů chromu a wolframu. Stelity obsahují 2 až 4% uhlíku, 20 až 40% chromu, 10 až 30% wolframu 30 až 55% kobaltu a ještě se ve stelitech vyskytuje malé množství niklu, molybdenu a jiných prvků. V tomto materiálu se železo vyskytuje do 10% a jeho přítomnost se bere jako nečistota. Tento materiál je velmi křehký, nekujný, tepelné zpracování se neprovádí a běžné nástroje je neobrobí. Nástroje se vyrábějí odléváním a po odlití se pouze přebrousí.

3.3. Slinuté karbidy (SK) [14, 19, 20]

Slinuté karbidy jsou výrobkem práškové metalurgie a jejich základní charakteristikou je, že jsou to směsi karbidických fází jednotlivých karbidů a kovového pojiva, kterým bývá kobalt. Fáze karbidů jsou tvořeny z hodně tvrdých karbidů kovů s vysokou teplotou tavení, patří sem: Karbid wolframu WC, titanu TiC, tantalu TaC, niobu NbC, chromu Cr₃C₂, vanadu VC. Nejvýznamnějším z těchto karbidů je karbid wolframu WC.

Z hlediska použití mají největší podíl VBD, ale zároveň roste procento využívání monolitních nástrojů (vrtáky, kulové frézy) a díky vysokým tlumícím schopnostem se tyto materiály využívají i v oblasti držáků.



Obr. 3.3 Schéma výroby slinutých karbidů [14]

Slinuté karbidy se rozdělují do šesti základních skupin podle normy ISO na P, M, K, N, S a H, z důvodu lepšího odlišení se každá skupina označuje jinou barvou. Každá skupina těchto slinutých karbidů se používá na obrábění jiných materiálů.

1. Skupina P – modrá barva: Pro obrábění oceli, které tvoří dlouhou třísku. Při obrábění dochází ke značnému opotřebení nástroje z důvodu působení velkých řezných sil.
2. Skupina M – Žlutá barva: Tato skupina karbidů slouží pro obrábění feritických, chromových, chromniklových a austenitických ocelí. Při obrábění se tvoří středně dlouhá tříska. Tento karbid má vysokou houževnatost a je vhodný pro použití při hrubovacích operacích.
3. Skupina K – Červená barva: Tyto slinuté karbidy se používají pro obrábění materiálu, který tvoří krátkou třísku, to jsou všechny druhy litiny.
4. Skupina N – Zelená barva: Zejména pro obrábění nekovových a neželezných materiálů (slitiny hliníku a mědi).
5. Skupina S – oranžová barva: Slouží pro obrábění žárovevných a žáruvzdorných materiálů, které jsou na bázi titanu, niklu a kobaltu.
6. Skupina H – Šedivá barva: Používají se na obrábění kalené oceli a tvrzené litiny.

Jednotlivé materiály, které jsou obsaženy ve slinutých karbidech, značně ovlivňují vlastnosti a to technologické a provozní.

- Karbid wolframu WC – zaručuje odolnost proti abrazivnímu opotřebení a zvyšuje pevnost řezného klínu.
- Karbid titanu Tic – zvětšuje trvanlivost proti vylámání čela, avšak snižuje houževnatost, pevnost v ohybu.
- Karbid tantalu TaC a karbid niobu NbC – zvyšuje odolnost proti opotřebení za vysokých teplot ve spojení s karbidem wolframu WC. Také zvyšuje houževnatost a odolnost proti tepelným rázům, ale méně než karbid titanu TiC.
- Kobalt Co – zajišťuje funkci pojícího materiálu.

Dalšími ovlivňujícími faktory jsou: Velikost a typ jednotlivých zrn (jemné, středně hrubé a hrubé), obsah pojícího kovu (Co), množství a velikost strukturních vad, pórovitost a kvalita procesu výroby a vstupních surovin.

Relativně novou oblastí v práškové metalurgii představují tzv. *Gradientní materiály*. Do této skupiny lze zařadit materiály, kterým se mění struktura výsledného výrobku podle toho, jaké vyžadujeme finální vlastnosti vyměnitelné břitové destičky (VBD).

Kontrolováním technologie slinování je možno dosáhnout například:

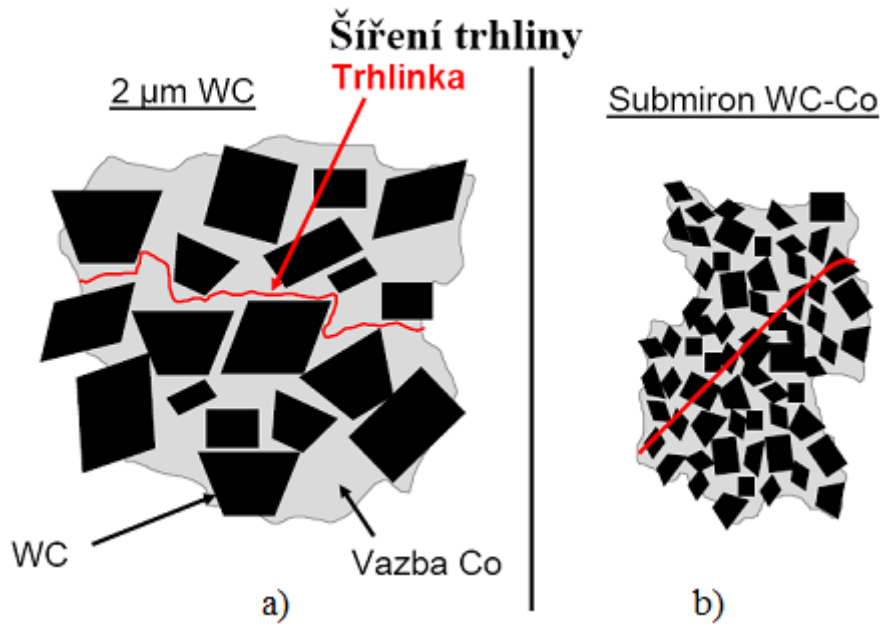
- Zvýšení obsahu pojící fáze (Co) v oblasti ostří.
- Zvýšení obsahu pojiva na povrchu vyměnitelné destičky.
- Nárůst podílu zrn tvrdých fází v oblasti špičky břitové destičky.
- Možnost místní změny koncentrace vybrané strukturní fáze.



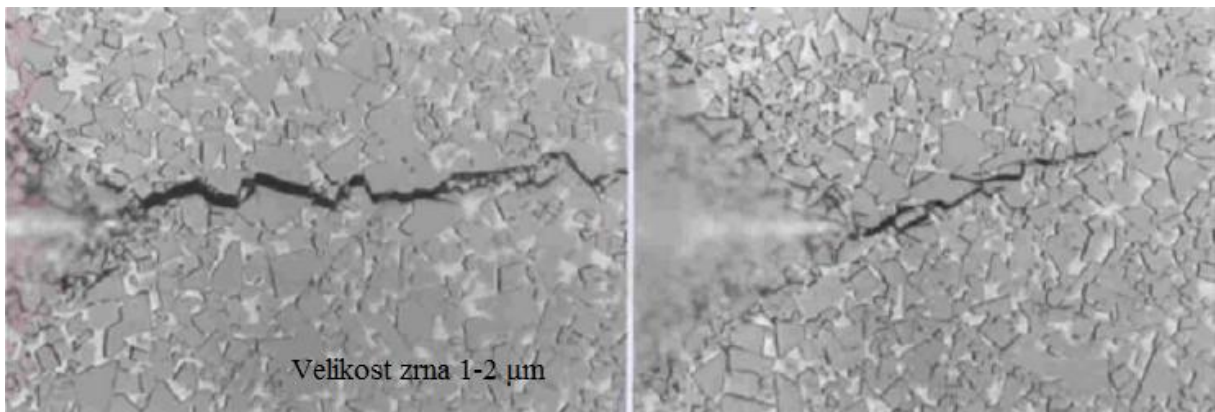
Obr. 3.4 Naznačení jednotlivých vrstev v materiálu [14]

Další struktury řezných materiálů mohou vzniknout na základě lomové mechaniky. Průběh trhliny u slinutých karbidů typu WC-Co probíhá po hranicích zrn tvrdé fáze v pojivu (obr. 3.5a). Jestliže struktura materiálu má zrna diskového tvaru, trhlina nemá možnost při určitém rozložení zrn možnost zrno obejít a z tohoto důvodu se musí trhlina šířit přes zrno (obr. 3.5b).

Zrna se vyznačují tím, že mají vyšší pevnost a tvrdost než pojivo a z tohoto důvodu se dobře brání šíření trhlin v materiálu. Tyto materiály jsou vyráběny novou technologií DRT a takto vyráběné materiály mají o dost vyšší tvrdost než materiály vyráběné klasicky.



Obr. 3.5 (a) Průběh trhliny okolo zrn materiálu (b) průběh trhlín přes zrna materiálu [14]



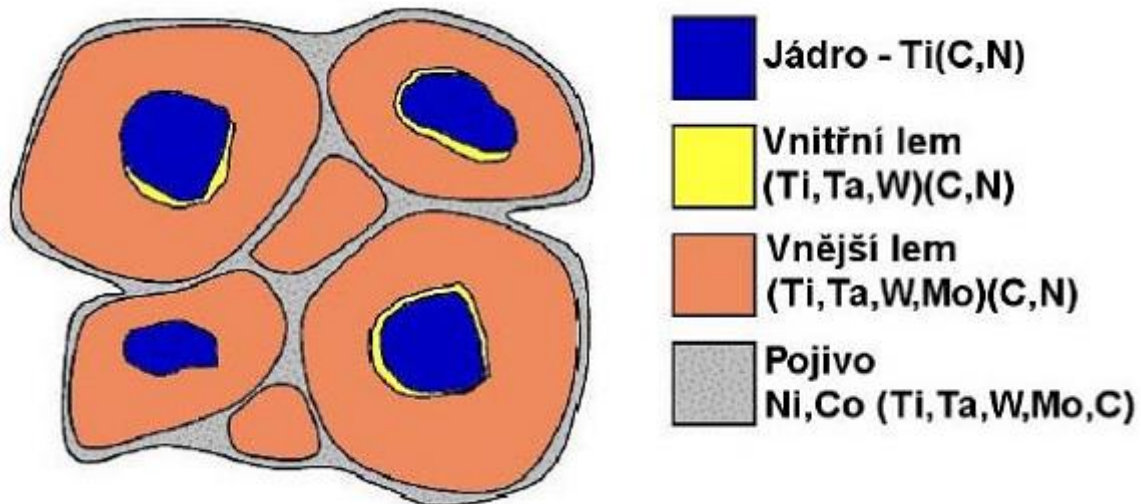
Obr. 3.6 Průběh trhliny následkem technologické zkoušky vtisku HV [14]

Tab. 3.2 Řezné podmínky pro šroubovité vrtáky ze slinutých karbidů (SK) [25]

Obráběný materiál	v [m/min]	f [mm/ot]
Šedá litina	10-25	0.2-0.8
Ocel $R_m = 600$ MPa	25-30	0.1-0.5
Ocel $R_m = 1000$ MPa	8-20	0.1-0.3
Hliník	50-150	0.3-1

3.4. Cermety [14]

Název tohoto materiálu vznikl složením prvních tří hlásek dvou slov a to CERamics a METal, tento materiál je složen kombinací tvrdosti keramiky a houževnatosti kovu. Tvrdé části materiálu jsou tvořeny u cermetů karbidem titanu TiC, karbonitridem titanu TiCN, nitridem titanu TiN, mohou zde být i složky z karbidu tantalů TaC, karbidu wolframu WC a nitridu tantalů TaN. U cermetů je pojivem nikl Ni, molybden Mo, kobalt Co. Cermety jsou produktem práškové metalurgie a postup výroby je stejný jako u slinutých karbidů.



Obr. 3.7 Mikrostruktura cermetu [14]

Ve srovnání se slinutými karbidy umožňují vyšší řezné rychlosti, z toho vyplývá, že TiC je thermochemicky stabilnější než WC. První generace cermetů (TiC-Mo-Ni a TiC-Mo₂C-Ni) je omezena na oblast lehkého obrábění. U druhé generace cermetů byly přidány TaC a WC a tím zlepšeny vlastnosti daného řezného materiálu, které měly za následek větší oblast použitelnosti, a to na soustružení středními rychlostmi a lehké frézování. Třetí generace se zakládá na složení TiC-TiN, měnil se obsah TiC na TiN nebo Ti (C,N). Dodáním nitridu titanu TiN se zvětšuje tvrdost a zmenšuje velikost zrna, ale stoupá zbytková pórovitost. Podaří-li se způsobem výroby zmenšit pórovitost, vytvoří se materiál vhodný pro použití při konkrétních řezných operacích, který má výrazně větší schopnost odolávat opotřebení a vydrolování břitu.

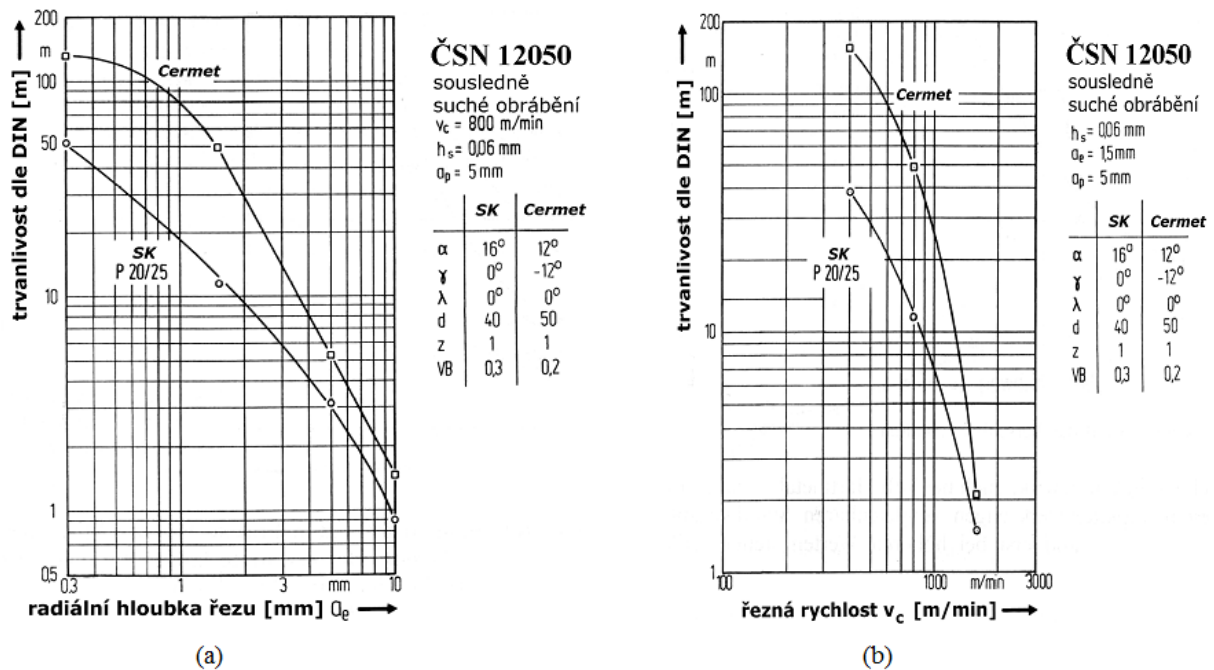
Typické vlastnosti cermetů:

- Nízká měrná hmotnost.
- Vysoká tvrdost a křehkost, ale nižší houževnatost.
- Vysoká tvrdost za tepla.
- Vysoká odolnost proti abrazivnímu opotřebení na hřbetu.
- Výborná chemická stálost.

Cermety mají výborné výsledky při řezání vysokými řeznými rychlostmi, malým posuvem a hloubkou řezu. Z důvodu pomalého průběhu opotřebovávání mají vyšší trvanlivost, ale při hrubování jsou omezeny křehkostí.

Změna velikosti zrna ovlivňuje mechanické vlastnosti. Velikost zrna ovlivňuje dusík (N), s větším obsahem dusíku se zmenšuje velikost zrna, naopak s nižším obsahem dusíku se zvyšuje pórovitost, která zhoršuje vlastnosti. To můžeme vyřešit slinováním cermetů v dusíkové atmosféře.

Stejně jako u slinutých karbidů můžeme vytvořit moderními metodami gradientní cermety s proměnlivou odlišností vlastností a to od houževnatého jádra až po tvrdou povrchovou vrstvu.



Obr. 3.8 Srovnání trvanlivosti cermetů a slinutých karbidů [14]

3.5. Oxidická řezná keramika [14, 20]

Řezná keramika je zařazena mezi anorganické materiály. Vyznačuje se nízkou měrnou hmotností vysokou tvrdostí, tepelnou a chemickou stálostí a odolností proti opotřebení.

Mechanické vlastnosti řezné keramiky jsou ovlivněny především:

- Charakterem chemické vazby, u řezné keramiky je iontová a kovalentní, tím se výrazně ovlivňuje pohyb dislokací a má za následek křehkost řezné keramiky.
- S porovnáním s kovovými materiály má řezná keramika složitější krystalickou mřížku.
- Uspořádání částic v prostoru nestejných tvarů, fází a rozměrů má za následek velký počet trhlin, defektů a pórů.

Čistá oxidická keramika (CA) – Tento druh řezné keramiky má obsah Al_2O_3 99,5%. Její vlastnosti jsou: vysoká tvrdost, otěruvzdornost, chemická odolnost a stabilita při vysokých teplotách. Naopak se vyznačuje nízkou odolností proti mechanickému a tepelnému rázovému zatížení a ohybové pevnosti. Tento druh řezné keramiky se používá pro jemné dokončovací operace.

Polosměsná oxidická keramika (disperzní keramika) – Obsahuje 15 až 20% ZrO_2 a také může obsahovat i jiné složky třeba CoO . Přísada ZrO_2 zmenšuje náchylnost proti lomu a zvětšuje houževnatost. Na rozdíl od čisté keramiky vykazuje větší pevnosti.

Směsná oxidická keramika (CM) – V tomto druhu keramiky se vyskytují složky TiN a TiC . Přísada TiC zvyšuje odolnost vůči tepelným rázům a přísada TiN taktéž vylepšuje odolnost proti tepelným rázům a zvyšuje pevnost.

Kompozitní oxidická keramika - Vyskytují se zde monokrystaly křemíku SiC , jinak řečeno whiskery v matici Al_2O_3 , které mají rovnoměrnou jemnozrnnou strukturu. Hlavní úkolem vláken z SiC , je zabraňovat mikrotrhlinám v základní matici. SiC vlákna mají průměr 0,1 až

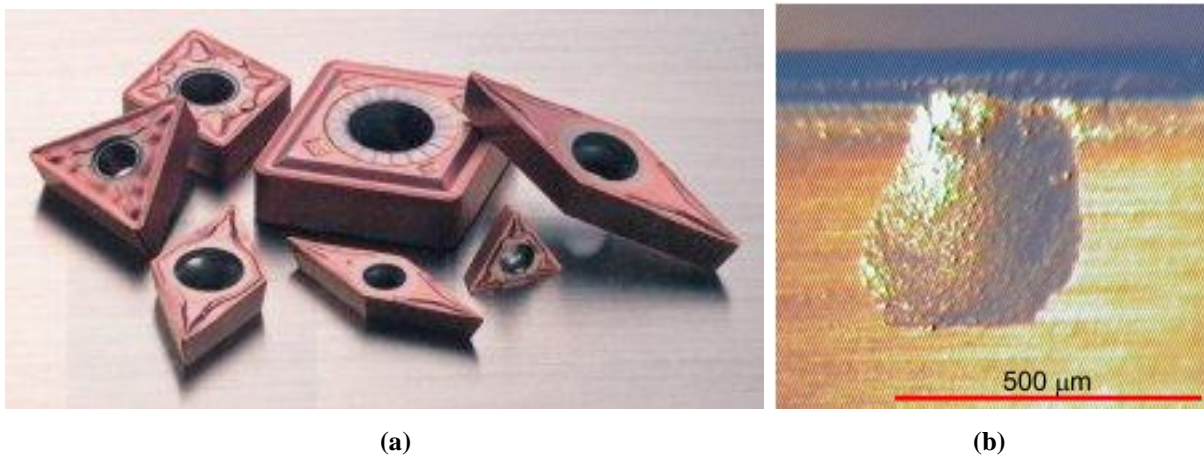
1 μm a délku 5 až 100 μm . Tyto vlákna zvyšují tvrdost za tepla, ohybovou pevnost, odolnost proti lomu, otěruvzdornost a odolnost vůči tepelným rázům.

Výroba řezné keramiky je srovnatelná v jednotlivých oblastech jako prášková metalurgie. Skládá se z:

- Přípravy hmoty přesného složení.
- Tvarování.
- Lisování (za studena, za vysokých teplot nebo izostatické lisování za vysokých teplot).
- Finální opracování.

Závažným problémem u tohoto materiálu je velký vznik mikrotrhlin, které ještě za působení tepelného a mechanického namáhání mohou mít za následek nenadálé porušení břitové destičky. Z toho důvodu jsou hledány způsoby ochrany řezného klína:

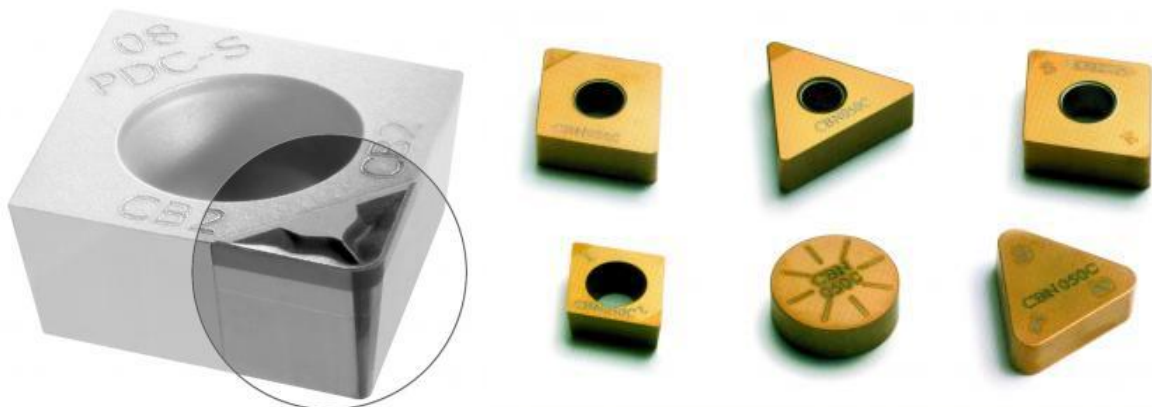
- Změna množství přísad (ZrO_2 , TiN, TiC, TiCN) a vyztužení whiskery.
- Zlepšení technologie výroby.
- Snížení tepelného zatížení břitu nástroje.
- Jemnozrnnosti a malým výskytem materiálových defektů.



Obr. 3.9 (a) Břítové destičky třídy GC1115 [16] (b) Charakteristické opotřebení VBD z řezné keramiky [14]

3.6. Super tvrdé nástrojové materiály [14]

Do skupiny super tvrdé řezné nástrojové materiály můžeme zařadit polykrystalický diamant (PD) a polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB). Tyto dva materiály se používají pro speciální operace, mají skvělé mechanické vlastnosti a to tvrdost a pevnost v tlaku.



Obr. 3.10 Diamantová břitová destička s lamačem třísek [17] a břitové destičky z PKNB CBN050C [18]

Nevýhodou polykrystalického diamantu je, že má malou teplotní stálost (nad 800°C se přeměňuje na grafit) a z tohoto důvodu je zakázáno obrábět materiály, jako jsou ocel a litina, protože při velkém ohřevu dochází k difúzi mezi řezným nástrojem a materiálem, který je obráběn a tím dochází k velkému opotřebení na čele nástroje. Jejich široké využití je v oblasti obrábění neželezných kovů: hliníkové slitiny, bronzy, mosazi, kompozity (skleněná, uhlíková, kevlarová vlákna atd.), slitiny titanu, keramika, tvrdé přírodní materiály (mramor, žula atd.)

Materiály na bázi polykrystalického kubického nitridu boru jsou velmi drahé a používají se tam, kde nelze použít řeznou keramiku. Nelze jimi obrábět měkké materiály, ale pouze materiálu s tvrdostí nad 48 HRC to jsou: povrchově kalené oceli, slitina na bázi železa a kobaltu.

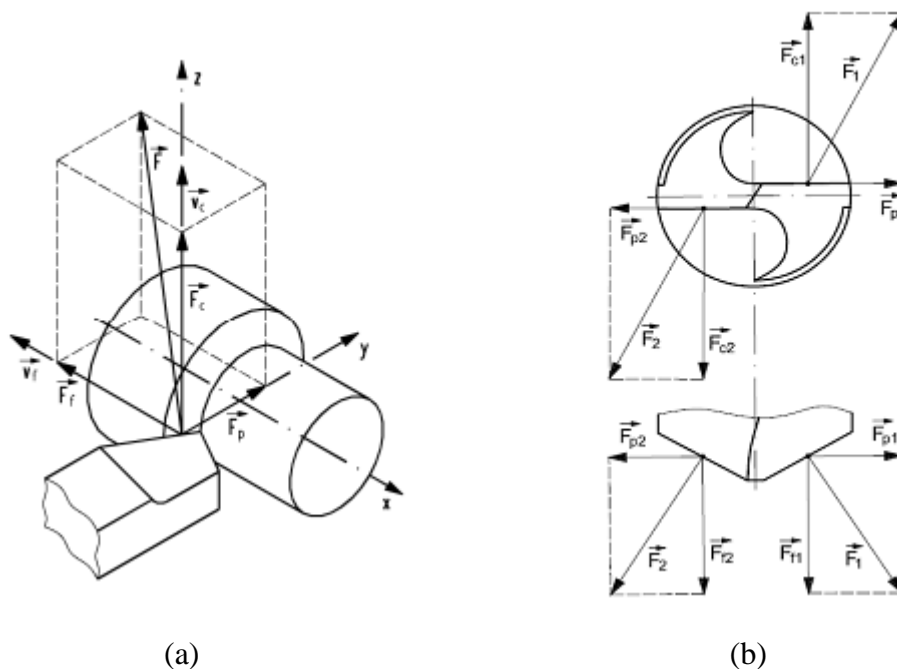
4. Metody určování řezných sil na břitu šroubovitého vrtáku

4.1. První metoda určení řezných sil [1, 4, 12, 14]

Tato metoda je úplně tou nejzákladnější při určování řezných sil na břitu šroubovitého vrtáku. Je založena na principu rozdělení výsledné síly na tři složky (řezná, posuvová a pasivní složka) a určení řezného momentu. Tato metoda je spíše určena pro orientační zjištění výsledné síly.

4.1.1. Síly při vrtání šroubovitým vrtákem [1, 14]

Jak už bylo uvedeno, výsledná síla se rozloží na tři složky: Řeznou složku F_c , posuvovou složku F_f a pasivní složku F_p . Na (obr.4.1a) je vidět rozložení řezných sil při soustružení a na (obr. 4.1b) vidíme rozložení řezných sil na šroubovitém vrtáku, který má dva břity symetrické vůči své ose. Na tomto druhu vrtáku vznikají dvě výsledné síly, které jsou tvořeny sečtením nebo odečtením jednotlivých složek na obou břitech šroubovitého vrtáku.



Obr. 4.1 (a) Rozložení řezných sil při soustružení (b) Rozložení řezných sil na břitu šroubovitého vrtáku [1]

$$\text{Řezná síla} \quad F_c = F_{c1} + F_{c2} \text{ [N]} \quad (4.1.1)$$

$$\text{Posuvová síla} \quad F_f = F_{f1} + F_{f2} \text{ [N]} \quad (4.1.2)$$

$$\text{Pasivní síla} \quad F_p = F_{p1} - F_{p2} \text{ [N]} \quad (4.1.3)$$

V případě máme-li šroubovité vrták správně a přesně naostřen, vychází nám síly na obou břitech shodné.

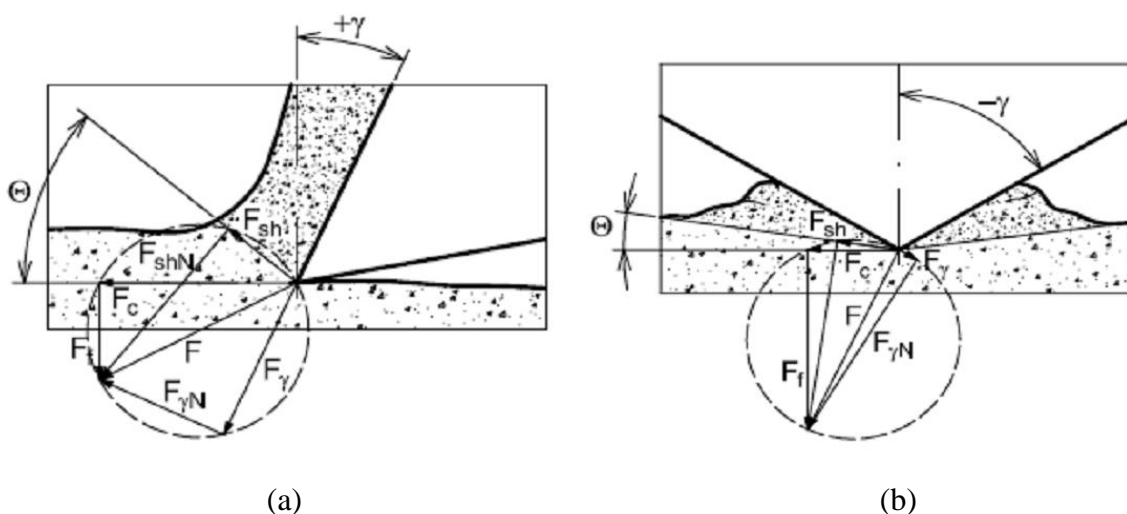
$$F_{c1} = F_{c2} = F_c/2 \text{ [N]} \quad (4.1.4)$$

$$F_{f1} = F_{f2} = F_f/2 \text{ [N]} \quad (4.1.5)$$

$$F_{p1} = F_{p2} = F_p/2 \text{ [N]} \rightarrow F_p = 0 \text{ [N]} \quad (4.1.6)$$

4.1.1.1. Rozložení řezných sil na šroubovitém vrtáku v bodech ostří [4]

Rozložení řezných sil v bodech ostří vrtacího nástroje je v podstatě totožné jako při ortogonálním obrábění, to je vidět na obrázku (obr. 4.2a). Na příčném ostří je úhel čela velice negativní a úhel střížné roviny ϕ je hodně malý. Na obrázku (obr. 4.2b) je vidět, že materiál je vytlačován příčným ostřím do šroubovitě drážky. Posuvová síla F_f je v bodech příčného ostří mnohem větší než v bodech hlavního ostří.



Obr. 4.2 (a) Rozklad sil při ortogonálním obrábění (b) Rozklad sil při vrtání [11]

Názvosloví obr. 4.2:

Φ – Úhel roviny maximálních smykových napětí [°].

γ – Úhel čela [°].

F_c – Řezná síla [N].

F_f – Posuvová síla [N].

F_{sh} – Tangenciální síla v rovině stříhu [N].

F_{γ} – Tangenciální síla čela nástroje [N].

$F_{\gamma N}$ – Normálová síla čela nástroje [N].

F – Výslednice sil [N].

4.1.1.2. Řezná síla [1, 4]

Tato síla se označuje jako F_c a nejčastěji se určuje z empirického vztahu (4.1.7). V tomto vztahu vystupují tři důležité vlivy (vliv obráběného materiálu, průměru vrtáku a posuvu na otáčku).

$$F_c = C_{F_c} \cdot D^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} [N] \quad (4.1.7)$$

Kde:

C_{F_c} – Tato konstanta vyjadřuje vliv obráběného materiálu [-].

x_{F_c} – Tento exponent vyjadřuje vliv průměru vrtáku [-].

y_{F_c} – Tento exponent vyjadřuje vliv posuvu na otáčku [-].

Všechny tyto tři hodnoty jsou určeny empiricky a můžeme je najít v technické literatuře. V tabulce (Tab. 4.1.1) jsou uvedeny příklady hodnot jednotlivých konstant pro výpočet řezné síly.

Tab. 4.1.1 Příklady hodnot konstant a exponentů pro výpočet řezné síly F_c [1]

Obráběný materiál	C_{F_c}	x_{F_c}	y_{F_c}
Ocel $R_m = 750$ MPa	3650	0,90	0,78
Litina 200 HB	2450	0,85	0,80

Jiný způsob jak určit řeznou sílu F_c je pomocí měrného řezného odporu nebo také nazývaný jako měrná řezná síla, která je definovaná jako síla ve směru hlavního řezného pohybu vztažená na jednotku průřezu třísky.

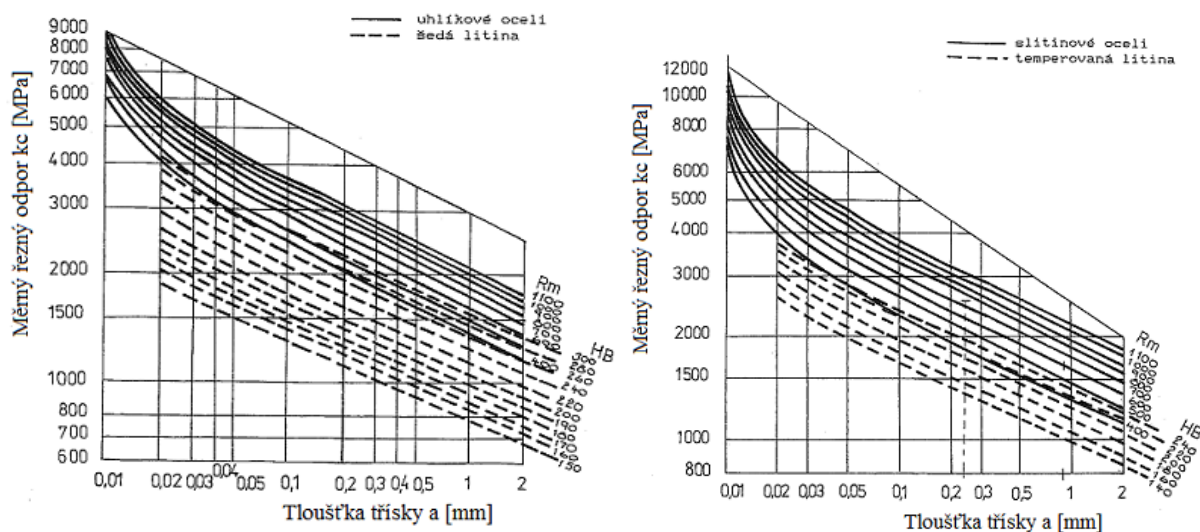
$$F_c = k_c \cdot A_D [N] \quad (4.1.8)$$

Kde:

k_c – měrný řezný odpor obráběného materiálu [MPa].

A_D – průřez třísky [mm²].

Stejně jako v předchozím případě můžeme hodnotu měrného řezného odporu vyhledat v odborné literatuře.



Obr. 4.3 Hodnoty měrného řezného odporu nejčastěji používané [21]

4.1.1.3. Posuvová síla [1]

Posuvová síla F_f se určí obdobným způsobem jako řezná síla F_c a to z empirického vztahu (4.1.8). Následující vztah zahrnuje stejně jako v předchozím případě tři důležité vlivy (vliv obráběného materiálu, průměru vrtáku a posuvu na otáčku).

$$F_c = C_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} [N] \quad (4.1.8)$$

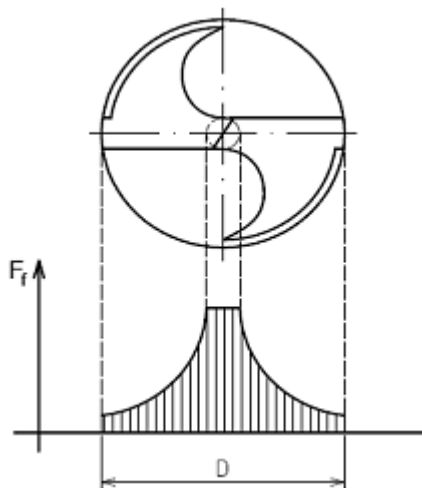
Kde:

C_{Ff} – Tato konstanta vyjadřuje vliv obráběného materiálu [-].

x_{Ff} - Tento exponent vyjadřuje vliv průměru vrtáku [-].

y_{Ff} - Tento exponent vyjadřuje vliv posuvu na otáčku [-].

Tyto hodnoty můžeme také najít v odborné literatuře, pro příklad jsou uvedeny hodnoty konstant dvou obráběných materiálů v tabulce (Tab. 4.1.2). Na velikost posuvové síly má velký vliv jádro. Dlouhodobé studie ukazují, že jádro má vliv z 50 až 60% na velikost posuvové síly [12].



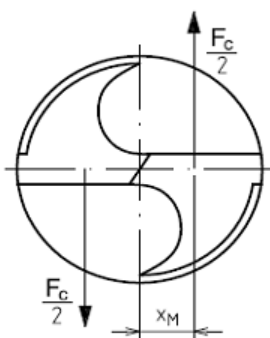
Na obrázku (obr. 4.4) je vidět průběh posuvové síly na velikost jádra. Průměr jádra ku průměru vrtáku bývá u větších vrtáků okolo 15 až 20% a u menších vrtáků je to až okolo 50%. Zvedne-li se poměr z 20% na 30% posuvová síla se zvětší na dvojnásobek, ale zvětší-li se poměr z 20% na 40%, vzroste posuvová síla na čtyřnásobek. Z tohoto důvodu se musí provádět korekce příčného ostří.

Obr. 4.4 Průběh posuvové síly na velikosti jádra vrtáku [12]

Tab. 4.1.2 Příklady hodnot konstant a exponentů pro výpočet posuvové síly F_f [1]

Obráběný materiál	C_{Ff}	x_{Ff}	y_{Ff}
Ocel $R_m = 750$ MPa	865	1	0,72
Litina 200 HB	630	1	0,78

4.1.1.4. Řezný moment [1, 14]



Řezný moment odvodíme ze znalosti empirického vztahu pro řeznou sílu F_c (4.1.7), tento vztah dosadíme do vztahu (4.1.9) a upravíme na požadovaný tvar (4.1.10).

$$M_c = 2 \cdot \frac{F_c}{2} \cdot \frac{D}{4} [N \cdot m] \quad (4.1.9)$$

$$\begin{aligned} M_c &= 2 \cdot \frac{F_c}{2} \cdot \frac{D}{4} = \frac{1}{4} \cdot F_c \cdot D = \frac{1}{4} \cdot C_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \cdot D \\ &= \frac{1}{4} \cdot C_{Fc} \cdot D^{(x_{Fc}+1)} \cdot f^{y_{Fc}} \end{aligned}$$

Obr. 4.5 Působíště řezné síly[4]

$$M_c = \frac{1}{4} \cdot C_{Fc} \cdot D^{(x_{Fc}+1)} \cdot f^{y_{Fc}} [N \cdot m] \quad (4.1.10)$$

Vztah (4.1.10) můžeme ještě dále upravit a to dosazením vztahů (4.1.11) a (4.1.12) do vztahu (4.1.10) a tím dostaneme konečný vztah pro výpočet řezného momentu (4.1.13).

$$C_M = \frac{C_{Fc}}{4} [-] \quad (4.1.11)$$

$$X_M = (x_{Fc} + 1)[mm] \quad (4.1.12)$$

$$M_c = C_M \cdot D^{X_M} \cdot f^{y_{Fc}} [N \cdot m] \quad (4.1.13)$$

Kde:

X_M – Vzdálenost působíště řezné síly od osy vrtáku [mm].

C_M – konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu [-].

D – průměr vrtáku [mm].

f – posuv na otáčku [mm/ot].

4.2. Druhá metoda určení řezných sil [22]

4.2.1. Základní popis metody

Při popisu této metody je vycházeno z experimentu, který byl proveden na Michigan-ské univerzitě. Základní myšlenkou je, že se řezná část šroubovitého vrtáku rozdělí na jednotlivé základní řezné nástroje, z anglického názvosloví (ECT). V jednotlivých ECT se řeší výsledná síla pomocí jednotlivých složek sil a ty jsou následně sumarizovány pomocí metody konečných prvků (MKP).

Na univerzitě v Michiganu byly provedeny 4 na sobě nezávislé testy, při kterých se měnily řezné podmínky (obvodová rychlost a posuv) a proces vrtání bez řezné kapaliny nebo s řeznou kapalinou. Řezné podmínky jako je obvodová rychlost a posuv jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.1), kde jsou jednotlivé experimenty označeny jako D183, W183, W91, W61, písmeno v názvu označuje, jestli je proces vrtání s řeznou kapalinou nebo bez (z anglického názvu Dry (D) – suchý a Wet (W) – mokrý) a číslice za písmenem označuje použitou obvodovou rychlost. Velikost materiálového úběru 384 [mm³/s], rychlost posuvu 4,97 [mm/s], hloubka vrtání 10,2 [mm] a čas vrtání je 2,0 [s], jsou ve všech čtyřech experimentech stejné.

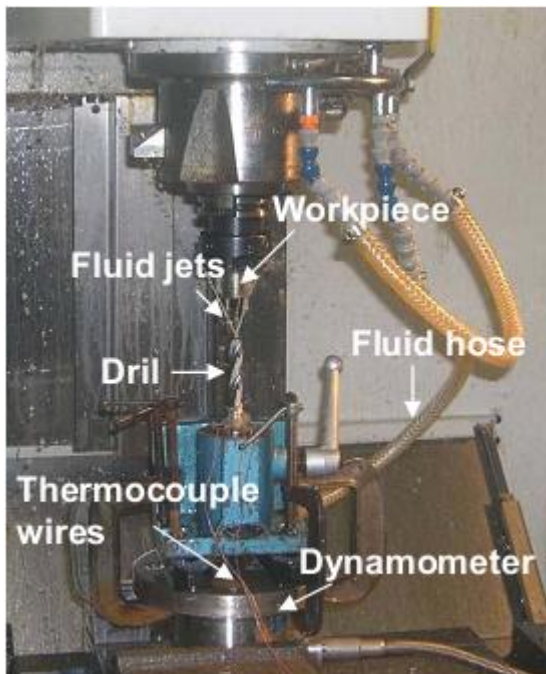
Tab. 4.2.1 Parametry vysokovýkonného vrtání slitiny Ti-6Al-4V [22]

Experiment	D183	W183	W91	W61
Dodávka řezné kapaliny	Ne	Ano	Ano	Ano
Obvodová řezná rychlost [m/mm]	183	183	91	61
Posuv [mm/ot]	0.051	0.051	0.102	0.152

4.2.2. Experimentální nastavení

Experiment byl proveden při vysokovýkonném vrtání titanové slitiny Ti-6Al-4V, při průměru obrobku 25 mm. Průměr šroubovitého vrtáku je 9,92 mm a byl použit z katalogu vrtacích nástrojů od firmy Kennametal (K285A03906). Pro přívod kapaliny jsou použity dvě trysky, které přivádějí kapalinu pod tlakem 0,2 MPa. Ve šroubovitém vrtáku jsou zavedeny dva termočlánky (TC) o průměru jejich špiček 0,127 mm (Omega 5TC-TT-E-36-72), tyto termočlánky slouží pro měření teploty při vrtání na břítu nástroje.

Experimentální nastavení je uspořádáno tak, že obrobek je upnut do vřetená a otáčí se, nástroj je upevněn na pevně v upínacím zařízení a to z důvodu, že ve šroubovitém vrtáku jsou umístěny termočlánky a bylo by složité vyřešit takové nastavení, aby se mohl vrták otáčet a obrobek stát. Vše je vidět na obrázku (obr. 4.6a) a na obrázku (obr.4.6b) je vidět umístění termočlánků v nástroji. Jednotlivé termočlánky jsou označeny jako TC1 a TC2 a jsou umístěny v broušených drážkách blízko ostří a na boční stěně vrtáku. Je zde také vidět umístění souřadného systému a to tak, že osa Y_T je rovnoběžná s ostřím a osa X_T je na ní kolmá.



Obr. 4.6a Experimentální nastavení [22]

Na obrázku je vidět:

Workpiece – obrobek

Drill – vrták

Thermocouple wires – dráty termočlánků

Fluid hose - hadice pro vedení chladicí kapaliny

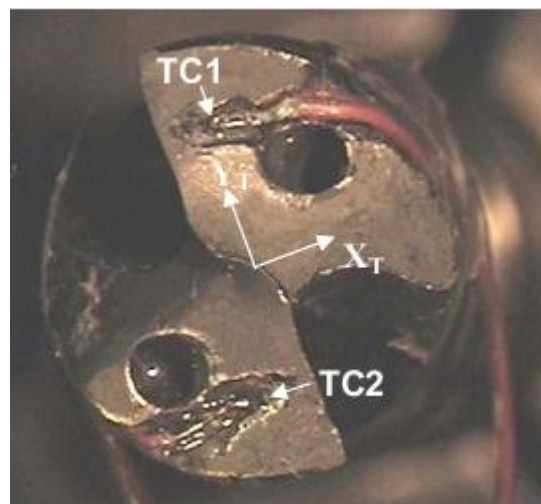
Fluid jets – chladicí trysky

Dynamometr- dynamometr

Souřadnice termočlánků v [mm]:

TC1 (0.39, 3.10)

TC2 (-1.04, -2.91)



Obr. 4.6b Nastavení termočlánků [22]

4.2.3. Model šroubovitého vrtáku

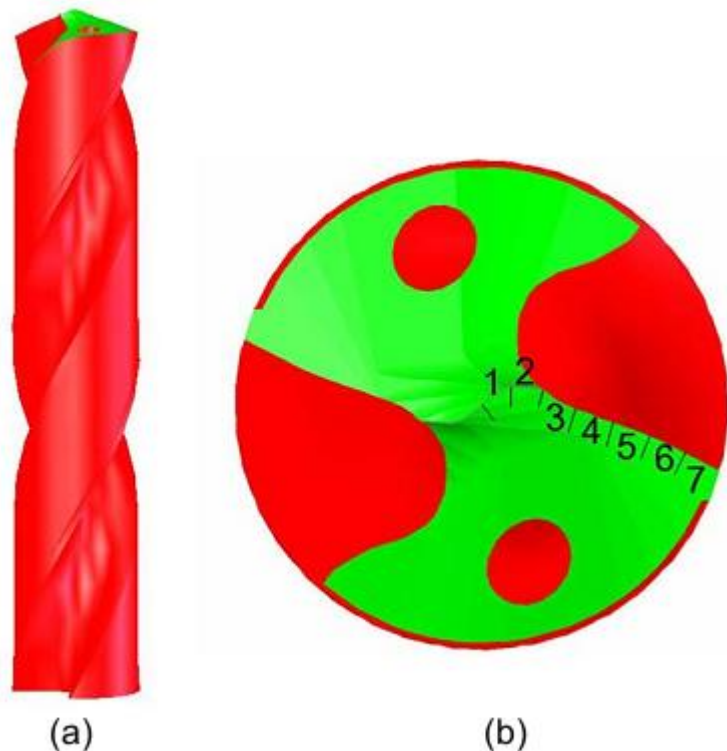
Model nástroje byl vytvořen pomocí CAD Softwaru, SolidWorks™. Parametry šroubovitého vrtáku byly vzaty z katalogu firmy Kennametal. Na obrázku (obr. 4.8a) je vidět boční pohled nástroje a na obrázku (obr. 4.8b) je vidět pohled shora na řeznou část a ještě je zde vidět rozdělení příčného ostří a řezné hrany na jednotlivé základní řezné nástroje. Příčné ostří je rozděleno na 2 ECT a řezná hrana na 5 ECT, dohromady tedy máme 7 ECT na jednom břitu a půlce příčného ostří. Z důvodu, že máme dvou-břitý nástroj, musíme počítat celkový počet ECT na 14.



Obr. 4.7 Průřez profilu šroubovitého vrtáku (K285A03906) [22]

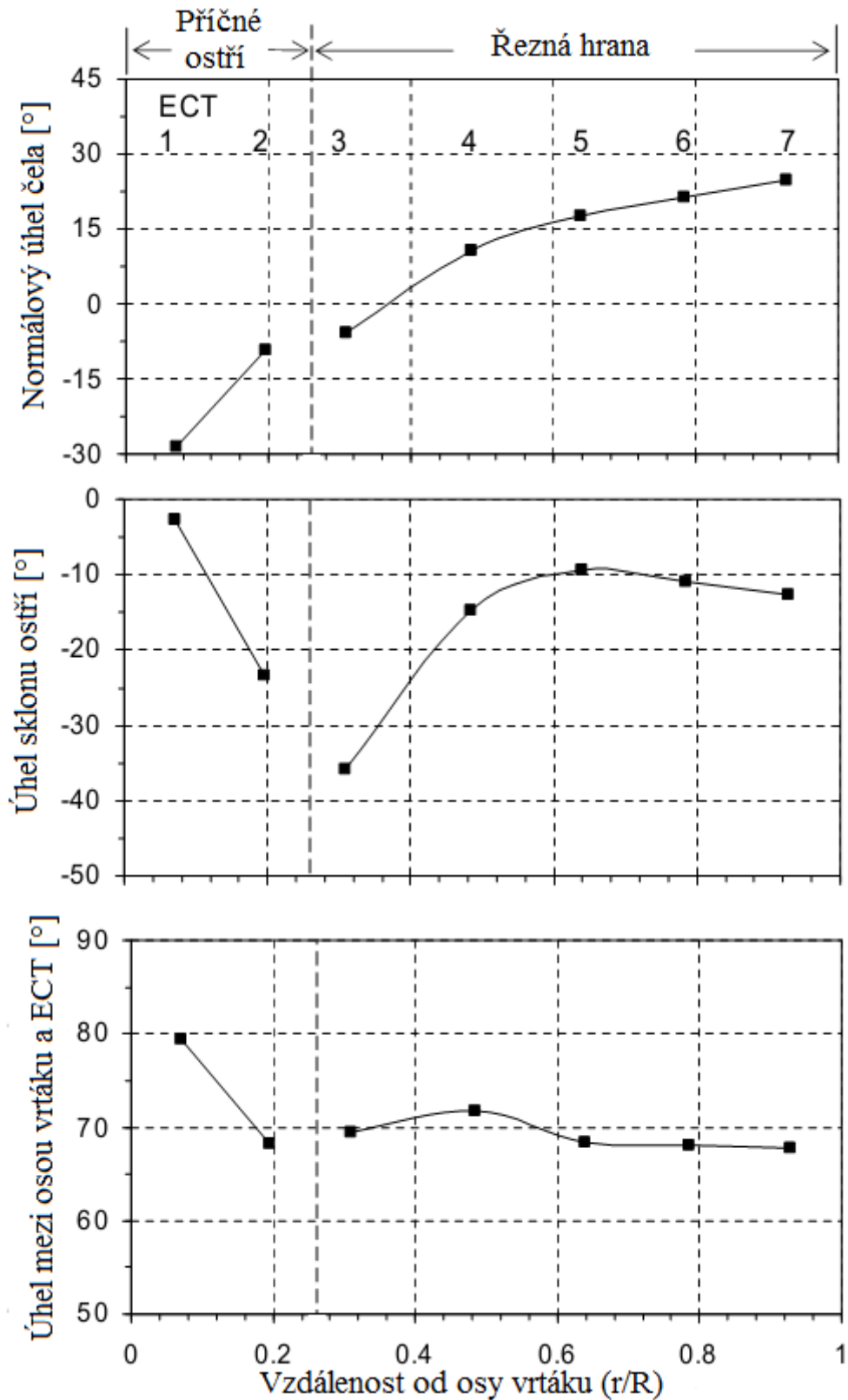
Parametry nástroje:

Úhel sklonu šroubovice 30 [°],
Vrcholový úhel 135 [°],
Délka špičky 1,9 [mm],
Průměr díry pro řeznou kapacitu 1,4 [mm],
Úhel příčného ostří 52 [°],
Úhel hřbetu 7 [°],
Rádus příčného ostří 1,4[mm],
Délka příčného ostří 1,8 [mm].

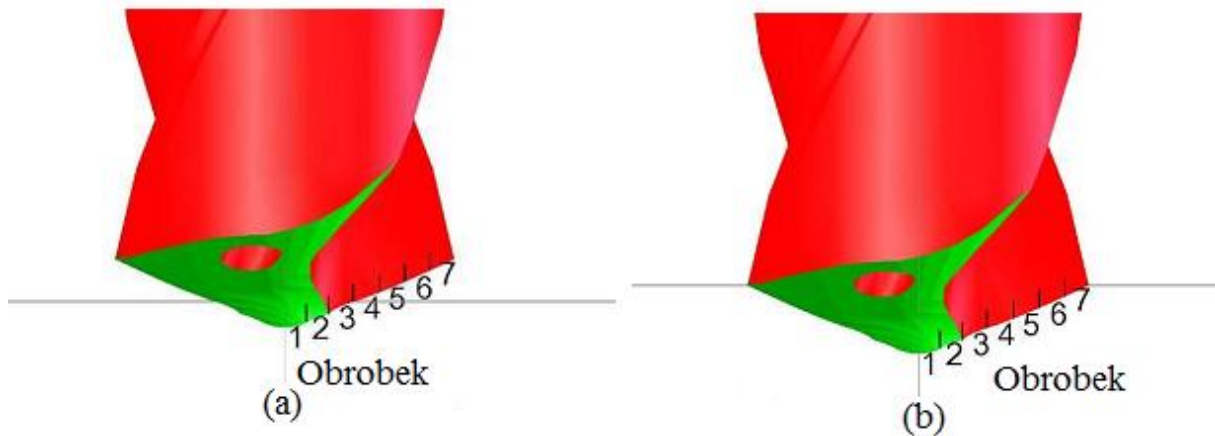


Obr. 4.8 (a) Model šroubovitého vrtáku boční pohled, (b) horní pohled s jednotlivými ECT [22]

Každý základní řezný nástroj (ECT) má přímkovou řeznou hranu. Délka ECT na řezné hraně je 0,71 mm a na příčném ostří má každý ECT délku 0,85 mm. Obr. 4.9 ukazuje průběh úhlu čela, úhel sklonu ostří a úhlu mezi osou vrtáku a ECT. Tyto úhly byly zjištěny z pevného modelu, protože zatím neexistuje žádný vzorec pro výpočet těchto úhlů na tomto typu šroubovitého nástroje. Úhel čela v prvním ECT na příčném ostří je -29° a ve druhém ECT na příčném ostří je úhel čela -9° . Jestliže srovnáme konvekční šroubovitý vrták s vrcholovým úhlem 118° je úhel čela -59° , z tohoto je vidět že šroubovitý vrták použitý pro tento experiment má mnohokrát menší úhel čela.



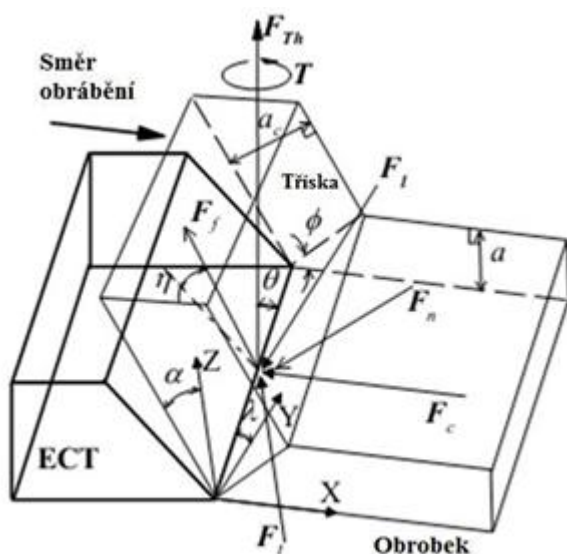
Obr. 4.9 Úhel čela, úhel sklonu ostří, úhel mezi osou vrtáku a ECT [22]



Obr. 4.10 Zobrazení postupného zajíždění nástroje do obrobku [22]

Za předpokladu, že se točivý moment a posuvová síla nemění v jednotlivých ECT a obrobek není deformován během vrtání, může být nalezena charakteristika postupného zvyšování posuvové síly a točivého momentu v čase, za předpokladu, že je každý ECT v záběru. Po proniknutí špičky vrtáku do obrobku (obr. 4.10) jsou posuvová síla a točivý moment ovlivněny kontaktem mezi třískami, tělem šroubovitého vrtáku a dírou a kontaktem mezi třískou a stěnou díry. Velikost posuvové síly a točivého momentu může také ovlivnit morfologie třísky a opotřebení vrtáku.

4.2.4. Mechanika šikmého řezání v ECT



Obr. 4.11 Model šikmého řezání v ECT [22]

λ – Úhel sklonu ostří [°].

α – Normálový úhel čela [°].

θ – Úhel mezi osou vrtáku a ECT [°].

η – Úhel odvodu třísky [°].

ϕ – Úhel střižné roviny [°].

a – Tloušťka odřezávané vrstvy [mm].

a_c - Tloušťka třísky [mm].

F_{TH} – Posuvová síla [N].

T – Točivý moment [N/m].

F_c – Složka výsledné síly v ose X [N].

F_t – Složka výsledné síly v ose Y [N].

F_r – Složka výsledné síly v ose Z [N].

F_n – Normálová složka výsledné síly [N].

F_f – Paralelní složka výsledné síly [N].

Na obrázku (obr. 4.11) máme ortogonální souřadnicový systém, který je tvořen osami X, Y a Z. Osa X je ve směru obrábění, osa Z je kolmá na rovinu určenou osou X a řeznou hranou ECT. Osa Y je kolmá na osy X a Z a tvoří tím pravoúhlý souřadnicový systém. Písmenem T je označen točivý moment, který generuje složku výsledné síly F_c , tato složka je v ose

X. Složka výsledné síly v ose Y je označena jako F_l a složka v ose Z se označuje jako F_t . Posuvová síla je označena jako F_{TH} a je rovnoběžná s osou vrtáku a může být rozložena na složky F_l a F_t .

Výsledná síla může být ještě rozložena na další složky a to paralelní F_n a normálovou složku F_f . F_f je třecí síla ve směru odchodu třísky. Protože výsledná síla leží v rovině definované složkami sil F_n a F_l , F_l je závislá na složkách sil F_c a F_t .

$$F_{TH} = -F_l \frac{\cos \theta}{\cos \lambda} + F_t \frac{\sqrt{\cos^2 \lambda + \cos^2 \theta}}{\cos \lambda} \quad [N] \quad (4.2.1)$$

$$F_l = \frac{F_c (\sin \lambda - \cos \lambda \sin \alpha \tan \eta) - F_t \cos \alpha \tan \eta}{\sin \lambda \sin \alpha \tan \eta + \cos \lambda} \quad [N] \quad (4.2.2)$$

$$\begin{Bmatrix} F_l \\ F_c \\ F_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \sin \eta \\ 0 & \cos \eta \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_n \\ F_f \end{Bmatrix} \quad (4.2.3)$$

$$F_f = \frac{(\cos \alpha \cos \lambda) F_l + \sin \alpha F_c}{\cos \lambda \cos \eta + \sin \alpha \sin \lambda \sin \eta} \quad [N] \quad (4.2.4)$$

$$F_t = \frac{F_{TH} (\sin \lambda \sin \alpha \tan \eta + \cos \lambda) \cos \lambda + F_c (\sin \lambda - \cos \lambda \sin \alpha \tan \eta) \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \lambda - \cos^2 \theta} (\sin \lambda \sin \alpha \tan \eta + \cos \lambda) + \cos \alpha \tan \eta \cos \theta} \quad [N] \quad (4.2.5)$$

Pomocí výše uvedených vztahů se vypočítají jednotlivé složky sil. Podle vztahu (4.2.1) se vypočítá posuvová síla F_{TH} . Pomocí vztahu (4.2.2) se vypočítá složka výsledné síly F_l v ose Y. V matici (4.2.3) je vidět závislost složek výsledné síly (F_l , F_c a F_t) na složkách výsledné síly (F_n a F_f). Třecí síla F_f je vyjádřena pomocí vztahu (4.2.4). Složku výsledné síly v ose Z vyjádříme tak, že dosadíme vztah (4.2.2) do vztahu (4.2.1) a jednotlivými úpravami dostaneme konečný vztah (4.2.4) pro složku síly v ose Z. Složka výsledné síly F_c v ose X se pomocí vztahu (4.2.6), kde T je točivý moment [N/m] a r je vzdálenost od osy vrtáku do středu ECT [mm].

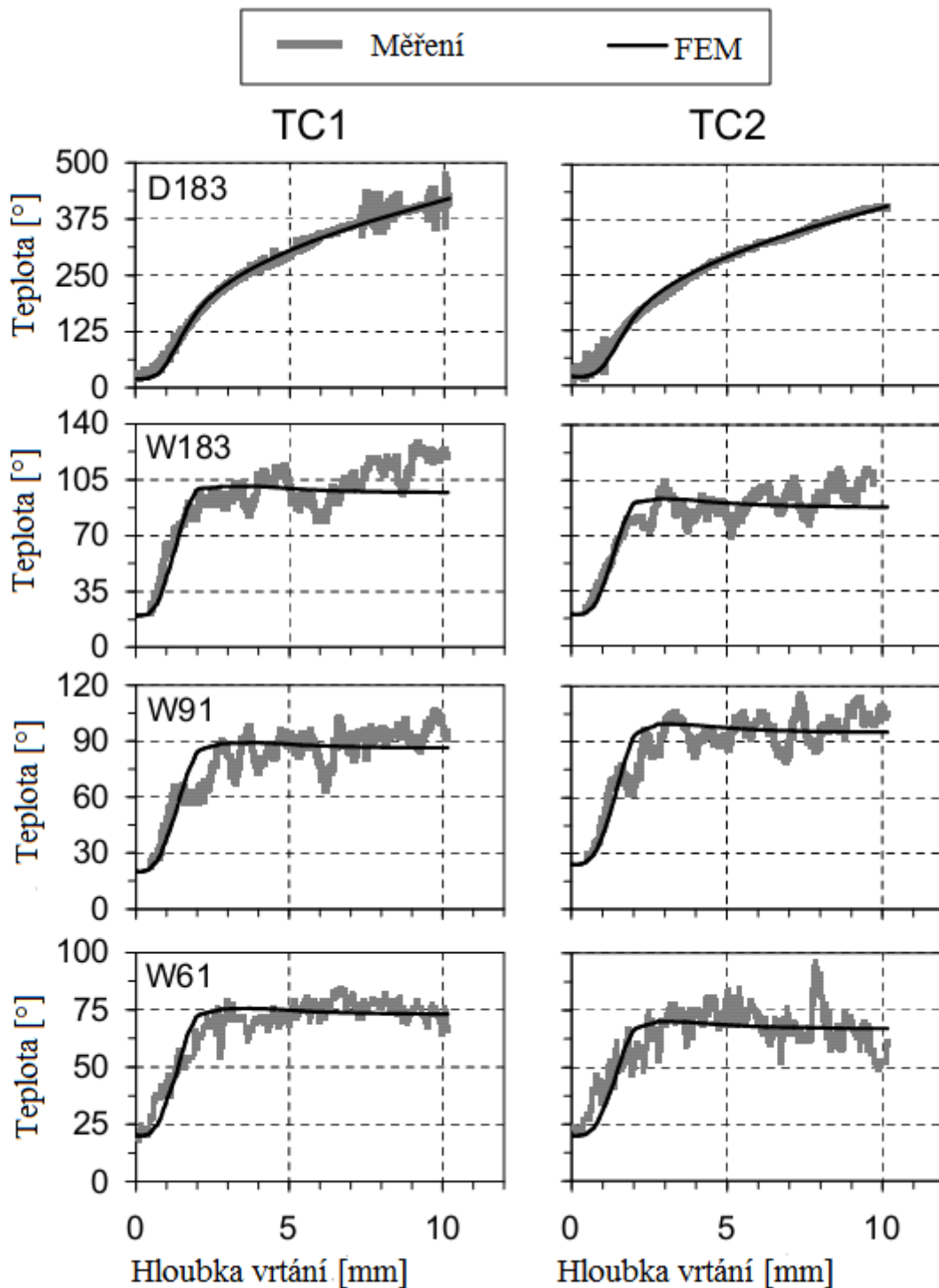
$$F_c = \frac{T}{r} \quad [N] \quad (4.2.6)$$

Rychlost odchodu třísky je řešena pomocí vztahu (4.2.7), kde V je řezná rychlost.

$$V_c = V \frac{\cos \lambda \sin \phi}{\cos \eta \cos(\phi - \alpha)} \quad [m/min] \quad (4.2.7)$$

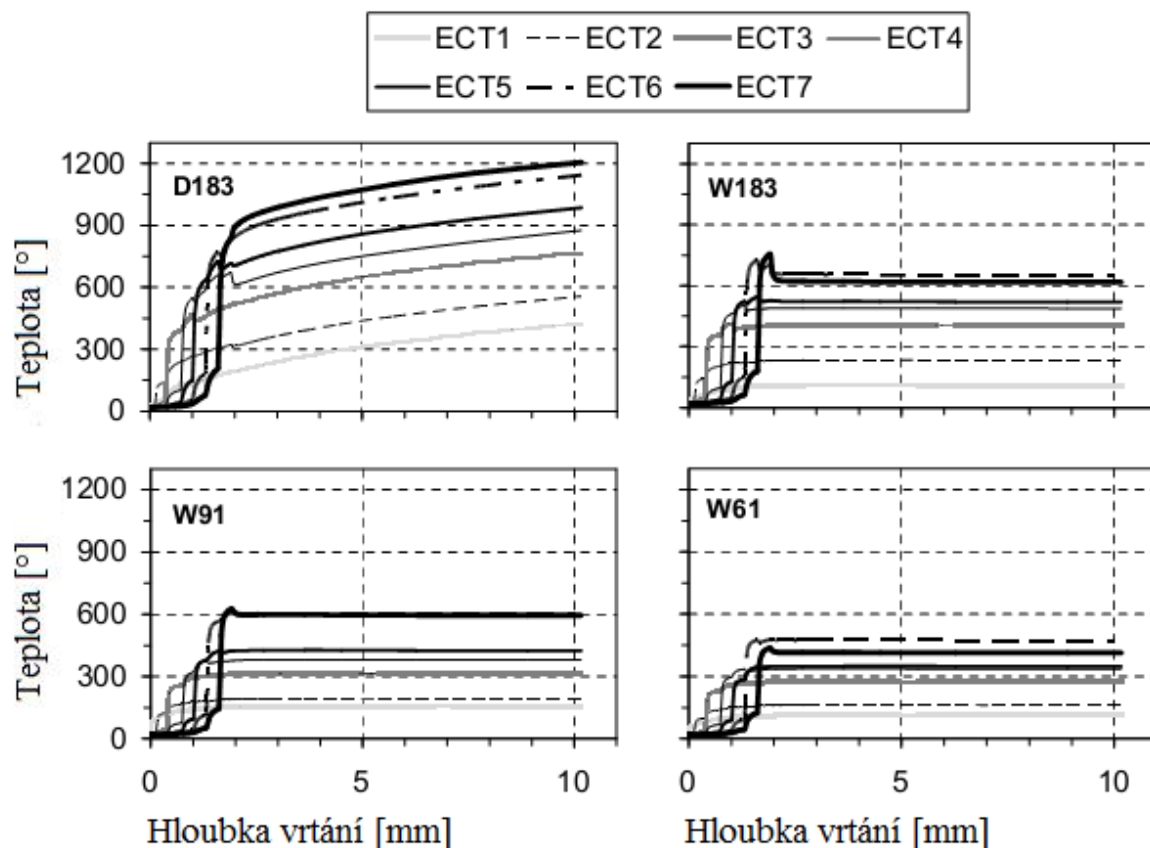
4.2.5. Výsledky jednotlivých měření

Jak již bylo uvedeno na začátku této kapitoly (4.2.1) na univerzitě v Michiganu byly provedeny 4 na sobě nezávislé experimenty při různých parametrech viz kapitola (4.2.1).



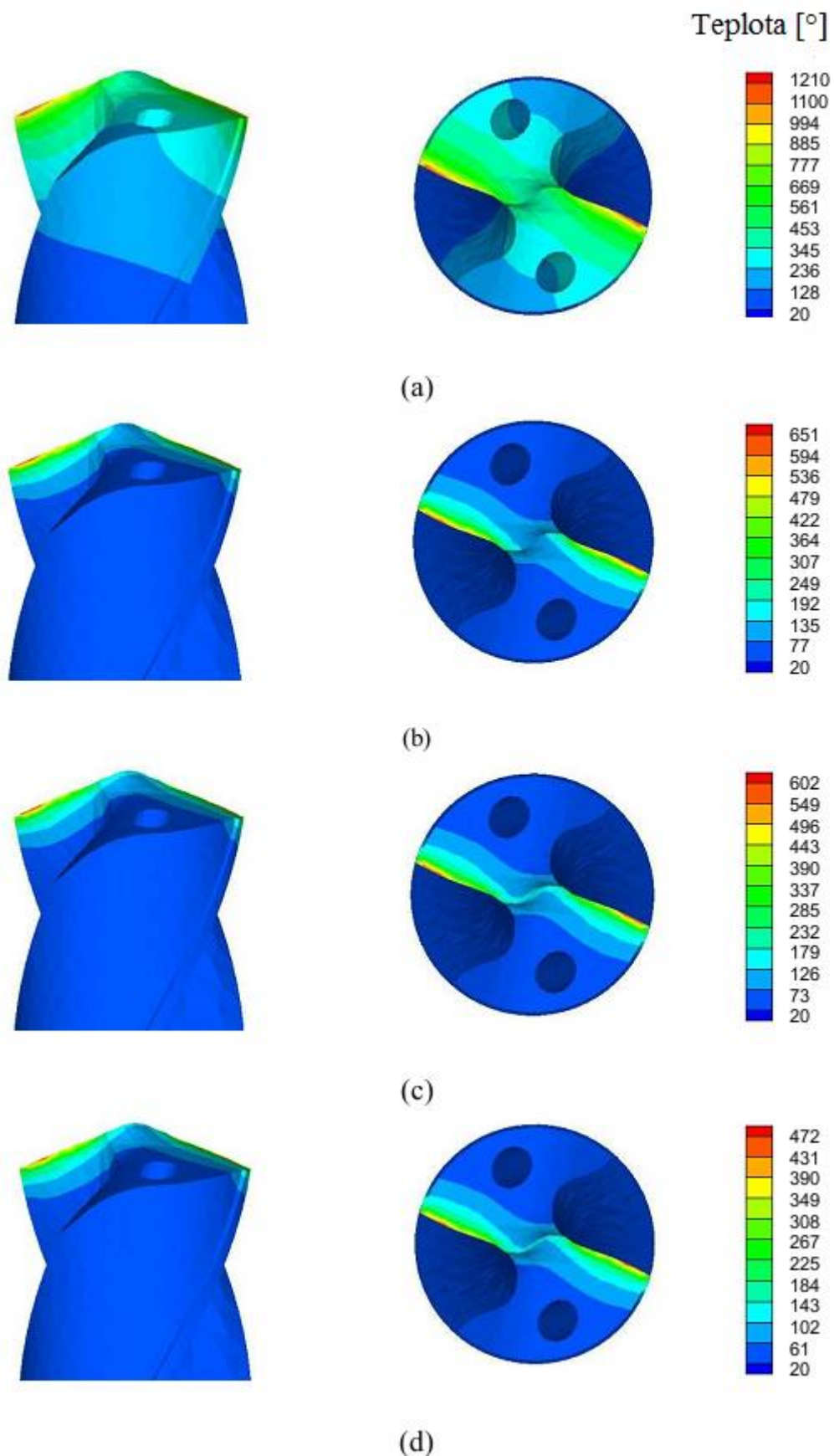
Obr. 4.12 Srovnání naměřených a vypočtených teplot na TC1 a TC2 [22]

Na výše uvedeném obrázku (Obr.4.12), je vidět srovnání naměřených a vypočtených hodnot teplot jednotlivých termočlánků při různých měření. Černá křivka zobrazuje vypočtené hodnoty pomocí modelu tepelných konečných prvků, z anglického názvosloví vyplývá zkratka FEM. Šedá křivka ukazuje naměřené hodnoty. Průběh teploty je závislý na hloubce vrtání. Nejvyšší hodnoty jsou u experimentu D183, který je prováděn při vrtání bez řezné kapaliny. U dalších tří experimentů W183, W91 a W61 které byly provedeny při vrtání s dodávkou řezné kapaliny, vycházejí výsledky měření podobně v závislosti na obvodové rychlosti. Z toho měření vyplývá, že při vrtání bez přívodu řezné kapaliny je nejvyšší teplota a s ubíráním řezné rychlosti a dodávkou řezné kapaliny se teplota snižuje. Na obr. 4.13 je vidět rozložení teploty v jednotlivých ECT na příčném ostří a řezné hraně.

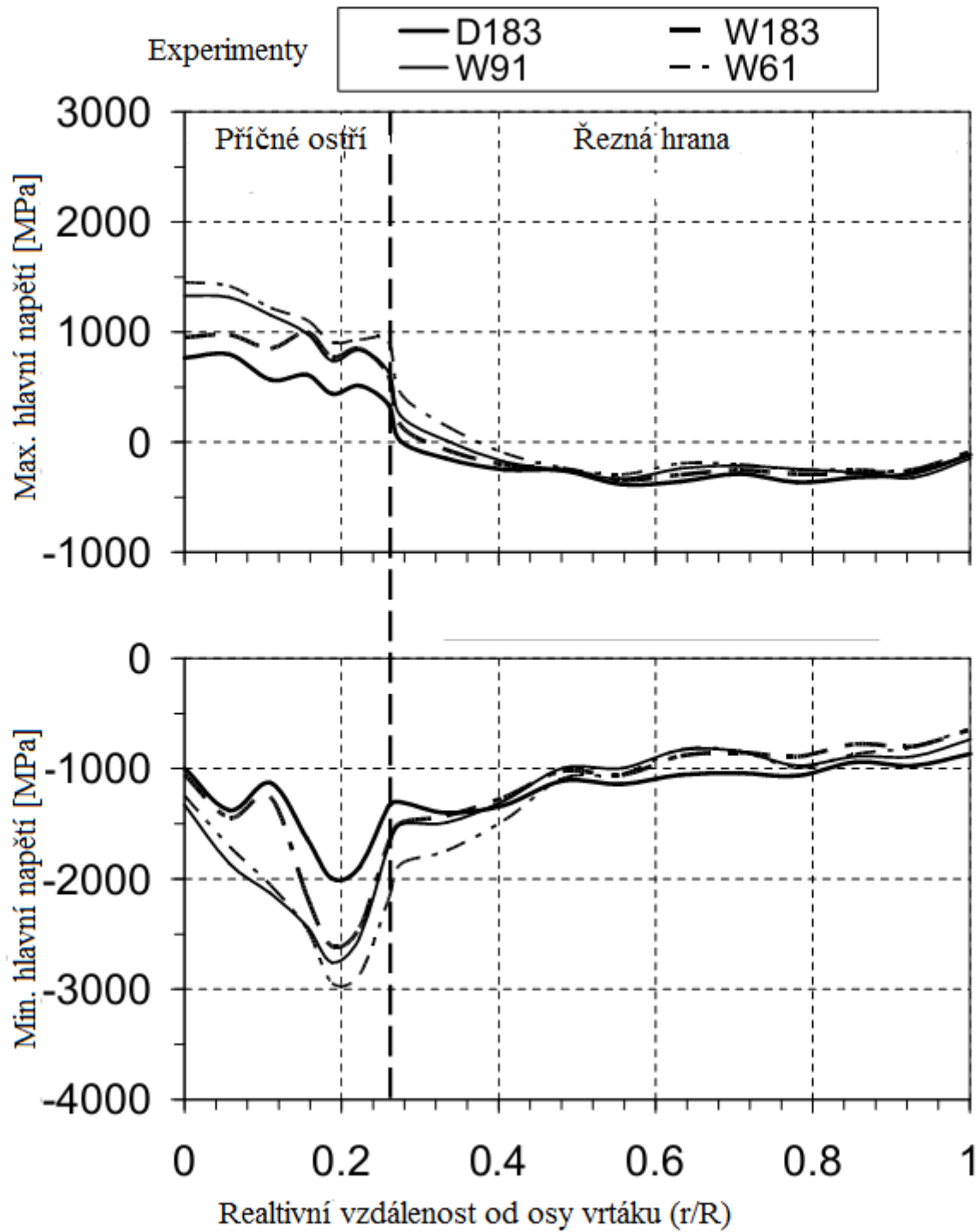


Obr. 4.13 Rozložení teploty na jednotlivých ECT [22]

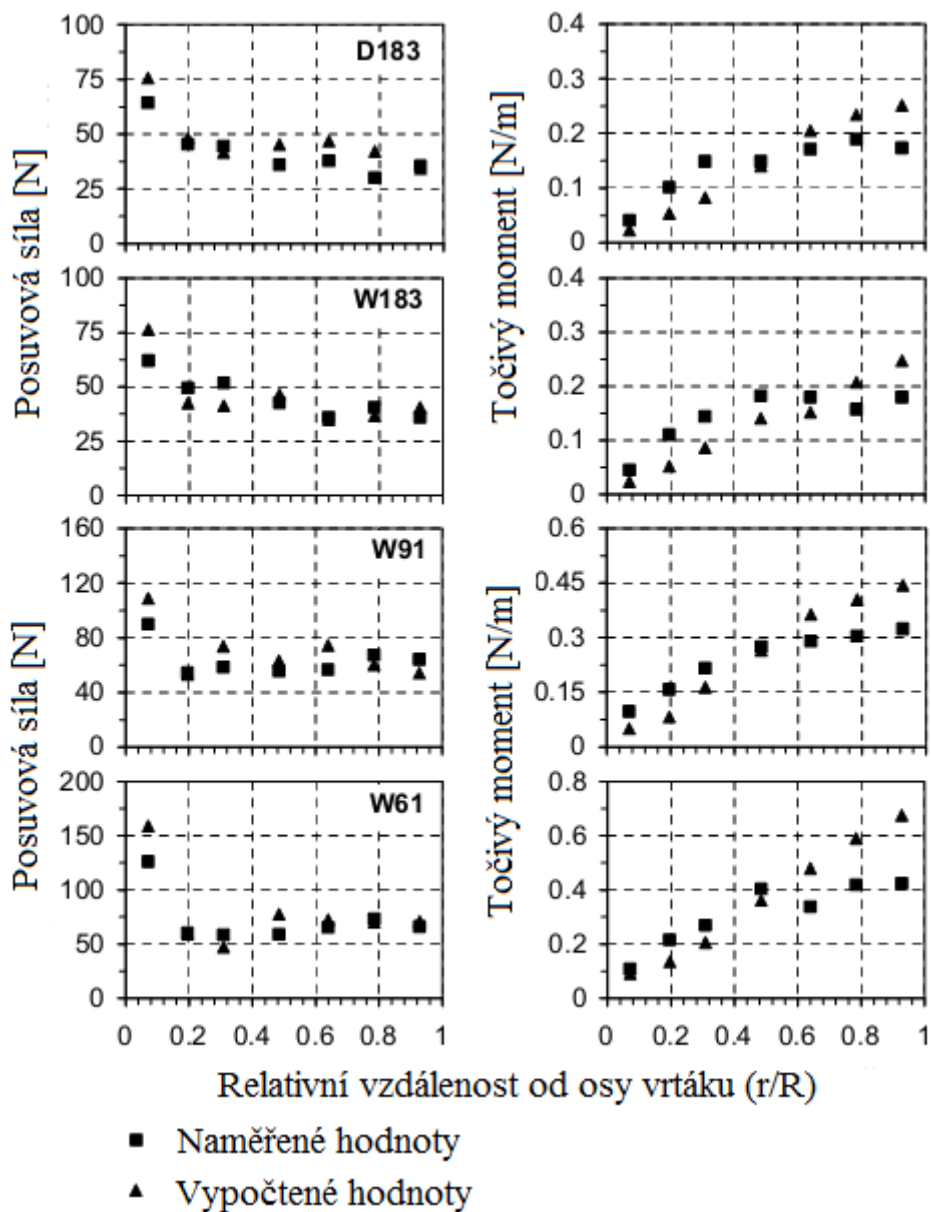
Na následujícím obrázku (obr. 4.14) je znázorněn počítačový model s průběhem teploty na šroubovitém vrtáku. Jsou zde znázorněny všechny provedené experimenty posoupně seřazené od D183, W183, W91 a W61. Na obrázku (obr 4.15) je znázorněn průběh maximálního a minimálního hlavního napětí napříč příčného ostří a řezné hrany.



Obr. 4.14 Počítačový model znázorňující průběh teplot v jednotlivých experimentech (a) D183, (b) W183, (c) W91 a (d) W61 [22]



Obr. 4.15 Znáornění průběhu maximálního a minimálního hlavního napětí podél příčného ostří a řezné hrany [22]

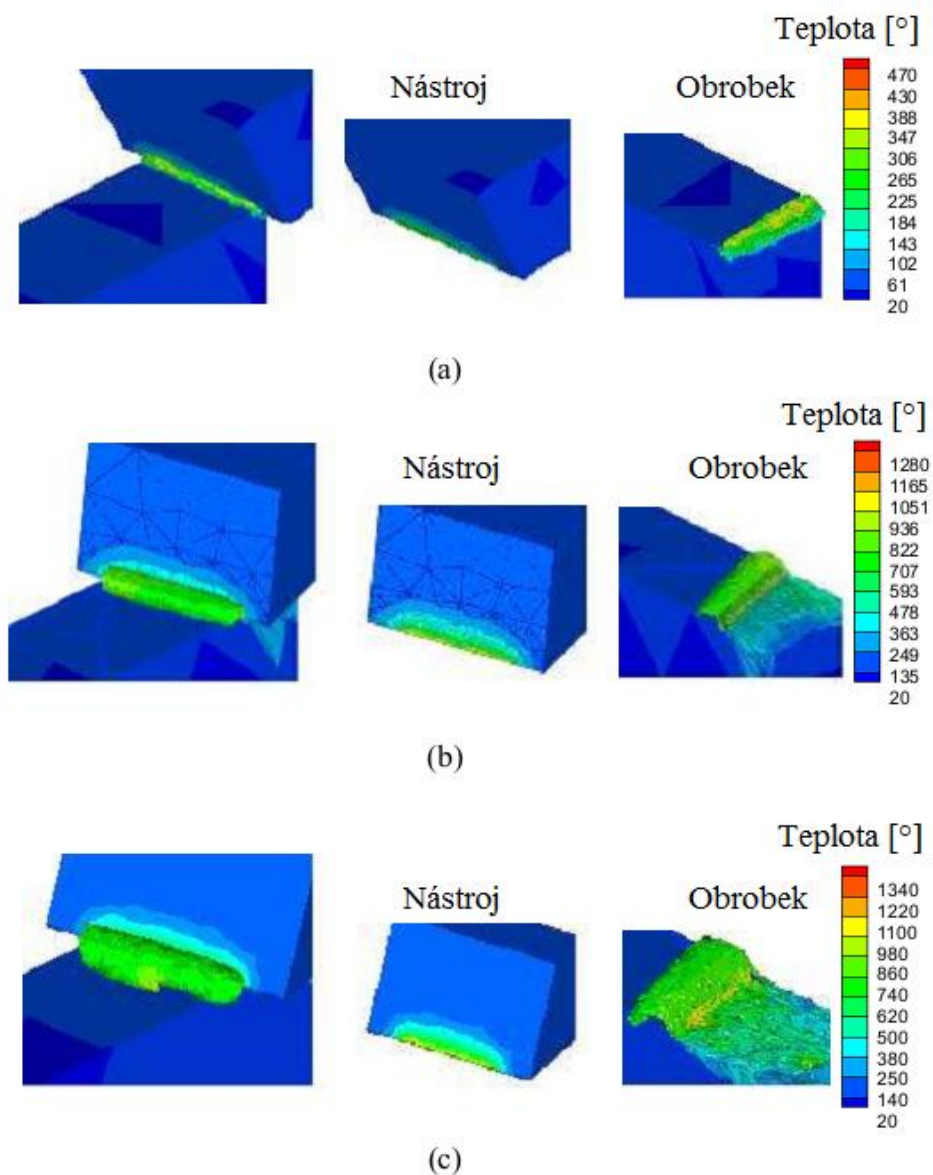


Obr. 4.16 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot posuvové síly a točivého momentu [22]

Ve výše uvedeném obrázku (Obr. 4.16) je naznačena v grafech posuvová síla a točivý moment na relativní vzdálenosti od osy vrtáku (r/R). V každém z těchto grafů jsou vyobrazeny hodnoty naměřených a vypočtených jednotlivých veličin, a to posuvová síla a točivý moment. V následující tabulce (Tab. 4.2) je vyobrazeno srovnání vypočtených a naměřených hodnot, a to: posuvová síla, točivý moment a výkon. Na dalším obrázku (Obr. 4.17) je znázorněn počítačový model vybraných ECT (ECT1, ECT4 a ECT7) s průběhem teplot během obrábění jednotlivých ECT.

Tab. 4.2.2 Srovnání posuvové síly, točivého momentu a výkonu [22]

Experiment		D183	W183	W91	W61
Posuvová síla [N]	Exp.	576	621	871	938
	FEM	669	638	977	1114
Točivý moment [N/m]	Exp.	1,94	2,21	2,64	3,10
	FEM	1,98	1,18	3,55	5,08
Výkon [W]	Exp.	1189	1355	1620	1902
	FEM	1218	1118	2179	3121

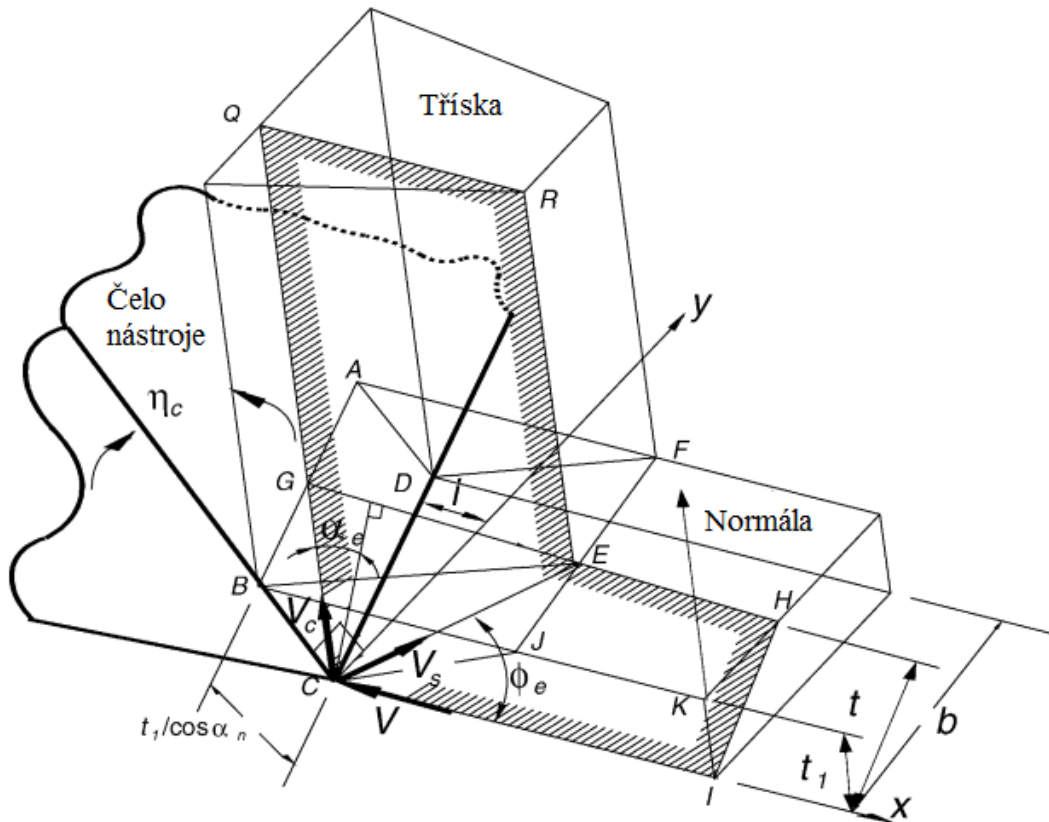


Obr. 4.17 Rozložení teploty v experimentu D183 na vybraných ECT: (a) ECT1, (b) ECT4 a (c) ECT7 [22]

4.3. Třetí metoda určení řezných sil [24]

Tato metoda vychází z analytické metody konečných prvků pro předpovídání posuvové síly a točivého momentu. Tento postup je založen na principu ortogonálního obrábění.

4.3.1. Ortogonální obrábění



Obr. 4.18 Model šikmého řezání [24]

Na výše uvedeném obrázku je vidět model šikmého řezání. Úhel sklonu hlavního ostří je označen jako i , hloubka řezu je označena jako t_1 a šířka řezu je označena jako b . Důležitým předpokladem je, že tříška je vytvářena střížnou silou, která působí v rovině CJFD, kde hlavní řezná hrana je CD. Tří dimenzionální obrábění může být interpretováno jako rovinná deformace ortogonální řezané vrstvy. Typická rovina je IHERQGC, která je v (obr. 4.18) vyšrafovaná. Tato rovina je definována řeznou rychlostí V a rychlostí odvodu třísky V_c . přímka CE je považována za shodnou se střížnou rovinou a přímka HI může být považována za nedeformovatelnou tloušťku třísky v ortogonálním obrábění. Jiné roviny, které jsou rovnoběžné s rovinou IHERQGC musí mít shodný efektivní střížný úhel ϕ_e a efektivní úhel čela α_e ale zároveň mají jinou tloušťku řezu t . Efektivní úhel α_e je měřen v rovině dané rychlostí odvodu třísky V_c a řezné rychlosti V , to je definováno úhlem mezi směrem odchodu třísky a normálou řezné rychlosti. Tento úhel závisí na úhlu odvodu třísky η_c , úhlu sklonu ostří i a na úhlu čela α_n . Efektivní úhel α_e se určí ze vztahu (4.3.1).

$$\alpha_e = \sin^{-1}(\sin\alpha_n \cos i \cos\eta_c + \sin\eta_c \sin i) [C^\circ] \quad (4.3.1)$$

Úhel odvodu třísky η_c se může odvodit použitím přístupu minimální energie. Totální řezná energie skládá z míry střížné energie U_s na střížné rovině a z míry třecí energie na čele nástroje U_f . U_s se vypočítá ze vztahu (4.3.2).

$$U_s = \tau_s V_s A \quad [J] \quad (4.3.2)$$

Kde:

τ_s – Napětí ve střížné rovině [MPa].

V_s – Střížná rychlost ve střížné rovině [m/s].

A – Je plocha určená rovinou CJFD a je určena vektorovým součinem CE a CD [m²].

Souřadnice vektorů CE a CD jsou popsány ve vztazích (4.3.3) a (4.3.4).

$$CE = \left[\frac{t_1 \cos \alpha_e}{\cos \alpha_n \cos \eta_c \operatorname{tg} \phi_e}, \sqrt{\left(\frac{t_1 \cos \alpha_e}{\cos \alpha_n \cos \eta_c} \right)^2 - t_1^2}, t_1 \right] \quad (4.3.3)$$

$$CD = [-btgi, b, 0] \quad (4.3.4)$$

Plocha A se určí ze vztahu (4.3.5).

$$A = b \sqrt{t_1^2 (1 + tg^2 i) + z^2} \quad (4.3.5)$$

Kde konstanty z se určí z následujícího vztahu (4.3.6).

$$z = \frac{p}{\operatorname{tg} \phi_c} + \sqrt{(p^2 - t_1^2) \operatorname{tg} i} \quad (4.3.6)$$

$$p = \frac{t_1 \cos \alpha_e}{\cos \alpha_n \cos \eta_c} \quad (4.3.7)$$

Rychlost ve střížné rovině V_s určí ze vztahu (4.3.8) Pak dosadíme do vztahu (4.3.2) vztah (4.3.8) a dostaneme vztah pro míru energie U_s .

$$U_s = \frac{\tau_s A \cos \alpha_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} V \quad (4.3.8)$$

Míra třecí energie se určí ze vztahu (4.3.9).

$$U_f = F_t \frac{\sin \phi_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} V \quad (4.3.9)$$

Kde F_t je třecí síla která působí na čelní ploše. Celková míra energie se vypočte sečtením U_s a U_f . F_t se vypočítá pomocí vztahu (4.3.10). Kde β je třecí úhel.

$$F_t = \frac{\tau_s \sin \beta \cos \alpha_e}{\cos(\phi_e + \beta - \alpha_e) \sin \phi_e} Q \quad (4.3.10)$$

$$Q = \frac{bt_1}{\cos i \cos \alpha_n} \quad (4.3.11)$$

Míra energie závisí na úhlu odvodu třísky η_c , který není známý. Avšak, úhel může být nalezen z podmínky, že tříska odchází ve směru minimální řezné energie U . Ze závislosti na minimální řezné energie mohou být odvozeny složky sil z geometrických podmínek.

$$F_H = N_t \cos \alpha_n \cos i + F_t \sin \alpha_n \quad (4.3.12)$$

$$F_V = -N_t \cos \alpha_n + F_t \cos \eta_c \cos \alpha_n \quad (4.3.13)$$

$$F_T = -N_t \cos \alpha_n \sin i + F_t \sin \eta_c \cos i - F_t \cos \eta_c \sin i \sin \alpha_n \quad (4.3.14)$$

Kde:

F_H – Řezná síla [N]

F_V – Posuvová síla [N]

F_T – Příčná síla [N]

N_t – Normálová síla [N]

F_t – Třecí síla [N]

Složky sil jsou funkcemi α_n , i , b , t_1 a η_c , všechny tyto funkce jsou známé, kromě η_c , ale ten se může vyřešit pomocí minimální řezné energie.

4.3.2. Vrtací model

Pomocí analytické metody konečných prvků šikmé obráběcí technologie byly zjištěny v každé sekci vrtací síly na řezné hraně. V každé šikmé řezné části jsou počítány řezné síly, ze kterých se odvozuje posuvová síla a točivý moment. Pro šroubovitý vrták jsou definovány tři důležité parametry: Úhel stoupání šroubovice, vrcholový úhel (2ρ) a šířka mřížky ($2w$). Oba úhly šroubovice a vrcholový úhel ovlivňují úhel čela podél řezné hrany. Větší úhel stoupání šroubovice má za následek pozitivnější úhel čela, který zlepšuje řezný výkon, ale zároveň oslabuje vrták.

4.3.2.1. Silové účinky na řezné hraně

Ve vrtacím modelu je každá řezná hrana rozdělena na šikmé řezací části, ve kterých jsou odvozeny vrtací síly. Pro každou část musejí být známi úhly čela a sklonu hlavního ostří. Pro přímou řeznou hranu je úhel sklonu ostří označen jako i a normálový úhel čela jako α_n . Oba tyto úhly se zjistí pomocí následujících vztahů.

$$\sin i = \frac{w \sin \rho}{r} \quad (4.3.15)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \cos i (\operatorname{tg} \alpha_s \cos C_s + \operatorname{tg} \alpha_b \sin C_s) \quad (4.3.16)$$

Kde:

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} C_s} - \frac{\operatorname{tg} i}{\sin C_s} \quad (4.3.17)$$

$$\cos C_s = \frac{\cos \rho}{\cos i} \quad (4.3.18)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_b = 2\pi \frac{r}{L} \quad (4.3.19)$$

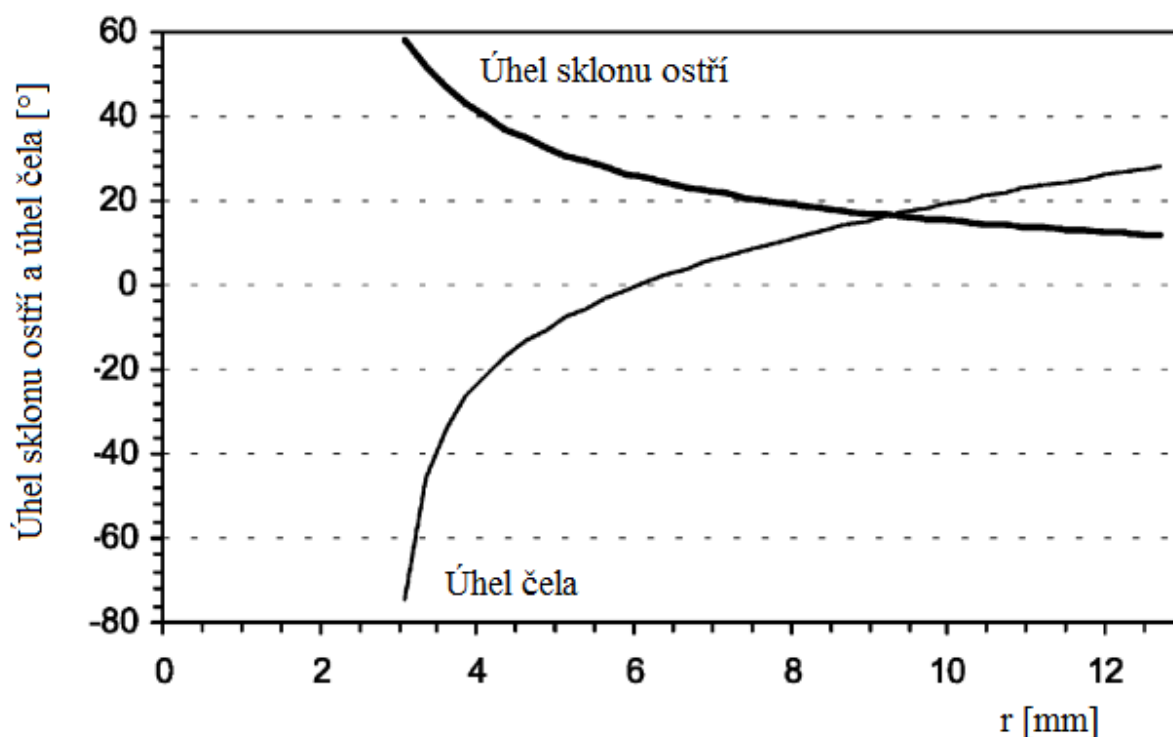
$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{2\pi r}{L} \right) \quad (4.3.20)$$

w – Je polovina tloušťky sítě [mm]

r – Poloměr vrtáku [mm]

L – Délka sklonu šroubovice [mm]

Závislost normálového úhlu čela a úhlu sklonu ostří na poloměru vrtáku, pro šroubovitý vrták o průměru 25.4 mm, úhlu stoupání šroubovice 30°, vrcholovém úhlu 118° a polovinou tloušťky sítě 3,07 mm (w) je vidět na níže uvedeném obrázku (obr. 4.19).



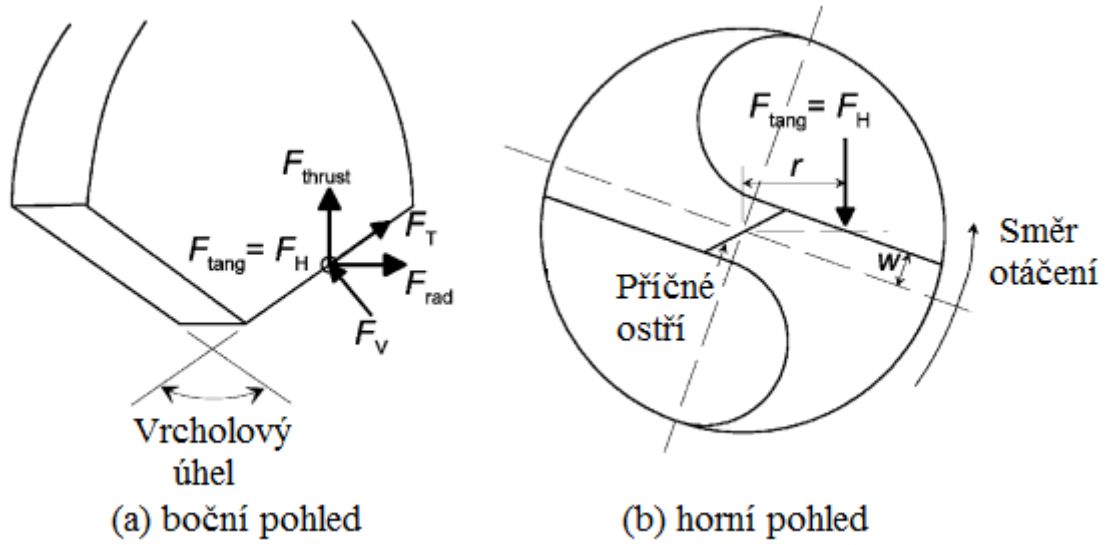
Obr. 4.19 Závislost úhlu sklonu ostří a úhlu čela na poloměru [24]

Na dalším obrázku (obr. 4.20) jsou znázorněny směry lokálních sil (F_H , F_V , F_T) a globální složky sil (F_{tang} , F_{thrust} , F_{rad}) pro typické místo podél řezné hrany vrtáku. Globální složky sil se vypočítají z následujících vztahů. V těchto vztazích figurují již známé vztahy a to (4.3.12, 4.3.13 a 4.3.14).

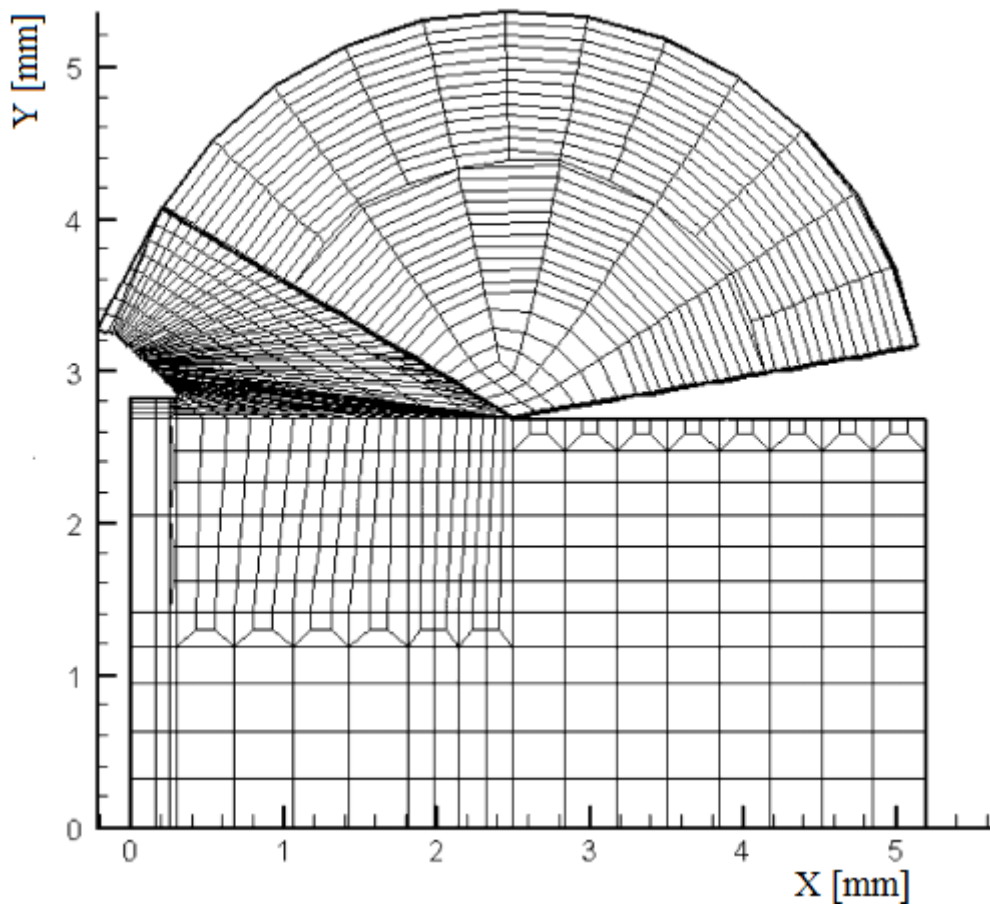
$$F_{\text{tang}} = F_H \quad (4.3.21)$$

$$F_{\text{rad}} = F_T \frac{\sqrt{(r^2 - w^2)}}{r} \sin \rho - F_V \cos \rho \quad (4.3.22)$$

$$F_{thrust} = F_T \cos \rho + F_V \frac{\sqrt{(r^2 - w^2)}}{r} \sin \rho \quad (4.3.23)$$



Obr. 4.20 Uspořádání působících sil na řezné hraně vrtáku [24]



Obr. 4.21 Eulerův model konečných prvků [24]

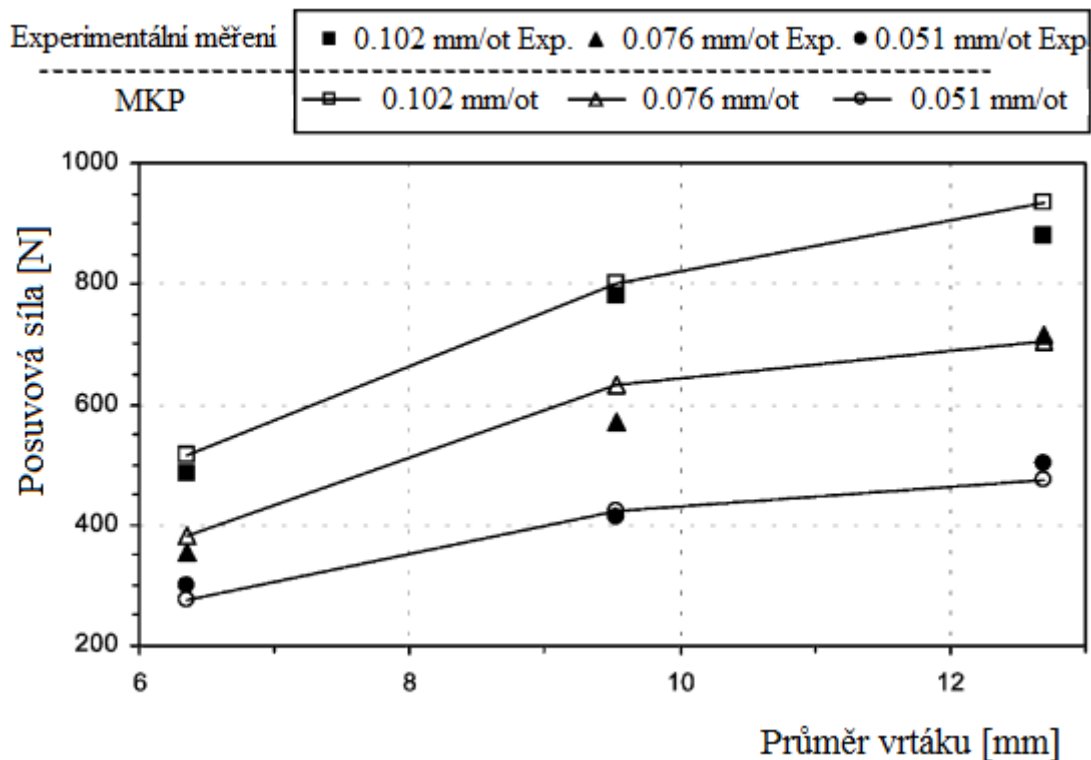
4.3.2.2. Silové účinky na příčném ostří

Hlavní odebrání materiálu je řeznou hranou, příčné ostří také přispívá k ubírání materiálu, ale není to efektivní. To je z důvodu velké negace úhlu čela a malé řezné rychlosti blízko osy vrtáku. Řezné síly, které působí na příčném ostří, přispívají více jak polovinou celkové posuvové síly, zatímco točivému momentu přispívají minimálně. Avšak, příčné ostří odstraňuje málo materiálu, hraje důležitou roli v poskytování vrtáku vzdorovat ohybovému momentu, který má za následek vibrace a nevyvážené síly při vrtání.

Pro vrták s vrcholovým úhlem čela 118° , je úhel čela v ortogonální části roven -59° . Vrtání pod tak značně negativním úhlem čela je velmi rozdílné na vylepšeném modelu Lagrangeově konečných prvků. Avšak, Eulerův přístup může být úspěšně aplikován na ortogonální řezání s velkým negativním úhlem, jestliže je bezpečně navržen. Eulerův model je znázorněn na výše uvedeném obrázku (obr. 4.21).

4.3.3. Experimentální ověření

Experiment byl proveden stroji Bridgeport s použitím šroubovitého vrtáku z rychlořezné oceli s tloušťkou sítě 3.2 mm, úhel stoupání šroubovice 30° a s vrcholovým úhlem 118° . Obrobek byl z oceli typu AISI 1020. Rychlost otáčení vřetena 302 ot/min. Byly použity tři průměry vrtáků a to 6.35, 9.53 a 12.7 mm a tři posuvy 0.051, 0.076 a 0.102 mm/ot



Obr. 4.22 Srovnání naměřených a vypočtených posuvových sil [24]

V tabulce (tab. 4.3.1) jsou uvedeny hodnoty vyčteného a naměřeného točivého momentu a posuvové síly.

Tab. 4.3.1 Srovnání vypočtených a naměřených hodnot posuvové síly a toč. Momentu[24]

Průměr vrtáku [mm]	Točivý moment [Nm]		Posuvová síla [N]	
	MKP model	Experiment	MKP model	Experiment
6.35	1.61	1.81	735	775
9.53	3.47	3.51	1040	1070
12.7	6.17	5.88	1380	1440

Tab. 4.3.2 Sekce při šikmém řezání pro vrták s průměrem 12.7 mm, úhel sklonu šroubovice 30°, vrcholový úhel 118°, šířka sítě je 1.70 mm, otáčky vřetena jsou 302 ot/min. [24]

r [mm]	Řezná rychlost V [mm/s]	Hloubka řezu t ₁ [mm]	Šířka řezu [mm]	Úhel sklonu ostří i [°]	Úhel čela α _n [°]	Úhel odvodu třísky η _e [°]	F _{tang} [N]	F _{rad} [N]	F _{thrust} [N]	Točivý moment [Nmm]
5.82	183.9	0.051	1.04	7.7	28.3	1	95.1	30.2	39.6	554
4.78	151.1	0.051	1.04	8.8	22.3	4	100	32.9	40.4	476
3.73	118.1	0.051	1.04	11.3	15.1	6	107	36.1	43.9	398
2.69	85.1	0.051	1.04	15.7	6.0	11	118	42.0	49.3	318
1.63	51.3	0.051	1.04	26.6	-8.6	21	143	57.3	57.0	233
0.97	30.5	0.051	0.28	0	-59.0	0	35.9	0	64.5	34.8
0.69	21.6	0.051	0.28	0	-59.0	0	35.9	0	64.5	24.8
0.41	13.0	0.051	0.28	0	-59.0	0	35.9	0	64.5	14.7
0.14	4.3	0.051	0.28	0	-59.0		35.9	0	64.5	5.03

5. Závěr

V bakalářské práci jsou popsány tři metody určování řezných sil na břitu šroubovitého vrtáku. Všechny tyto metody vycházejí z experimentů, které byly v minulosti provedeny na různých univerzitách nebo institutech ve světě. V této bakalářské práci jsou uvedeny tři metody určování řezných sil při vrtání, každá z těchto metod má své specifikace.

První metoda je založena principu, že výslednou sílu rozložíme na tři složky a to: řeznou složku, posuvovou složku a pasivní složku a určuje se řezný moment. Tyto síly se určují z empirických vztahů. Tato metoda není moc přesná a je spíše orientační.

Druhá metoda je založena na principu, že se řezná část šroubovitého vrtáku rozloží na jednotlivé základní řezné nástroje (ECT), ve kterých se určuje posuvová síla za pomoci točivého momentu a pěti složek sil. A pomocí metody konečných prvků se vypočítá výsledná síla, která působí na nástroj. Tato metoda je přesnější než předchozí a má velkou oblast použitelnosti a je asi zatím tou nejlepší metodou, která byla vyvinuta.

Třetí metoda je založena na principu ortogonálního obrábění a míry celkové energie. Jako v předchozím případě je šroubovitý vrták rozložen na jednotlivé elementy, výsledná síla je řešena pomocí točivého momentu a složek sil pomocí Eulerova modelu konečných prvků.

Seznam použité literatury

- [1] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [2] AB Sandvik Coromant, S-8811 81 Sandviken, Švédsko. *Příručka obrábění: Kniha pro praktiky*. 1. vyd. Praha: Scientia s.r.o., 1997. 900 s. ISBN 91-972299-4-6.
- [3] HUMÁR, A. *Technologie obrábění-2.část: Studijní opory pro magisterskou formu studia*. 2004. 95 s. Dostupný z www: < <http://ust.fme.vutbr.cz/> >.
- [4] HON, Pavel. *Analýza řezných sil při vrtání šroubovým vrtákem*. Brno, 2009. *Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.* Dostupné z www: < <http://ust.fme.vutbr.cz/> >
- [5] Dostupné z www < <http://www.mmspektrum.com/multimedia/image/21/2190.jpg> >
- [6] SKLENÍČKA, Josef. *Vliv geometrie břitu produktivních vrtacích nástrojů na velikost řezných sil*. Plzeň, 2009. *Diplomová práce. ZČU Plzeň. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Škarda, CSc.* Dostupné z www: < <http://portal.zcu.cz/wps/portal/> >
- [7] ŠKARDA, J. *Šroubovým vrták: Podklad pro cvičení*. 2003. vyd. Plzeň, 16 s. Dostupné z www: < <http://www.ateam.ic.cz/vrtak.pdf> >
- [8] Dostupné z www < <http://www.tumlikovo.cz/wp-content/uploads/2010/11/Geometrie-b%C5%99it%C5%AF-vrt%C3%A1ku.jpg> >
- [9] ŘASA, Jaroslav a Kolektiv. *Výpočetní metody v konstrukci řezných nástrojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986, 464 s. DT 621.9.02.002.2.
- [10] SCHMIDT, Eduard a Kolektiv. *Příručka řezných nástrojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1967, 484 s. DT 621.9.02.
- [11] SPITLER, D. et al *Fundamentals of Tool Design*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2003, 404 s. 5th edition. ISBN 0-87263-650-X.
- [12] STEPHENSON, D.A., AGAPIOU, J.S. *Metal cutting theory and practice*. 2nd edition. [s.l.]: CRC Press, 2006. 846 s. ISBN 0824758889
- [13] SOVA, František. *Technologie obrábění a montáže*. 1. vyd. Plzeň: VŠSE v Plzni - Editacní středisko, 1989, 273 s. ISBN 80-7082-006-3.
- [14] ZETEK, Miroslav. *Přednášky z PNO*. Plzeň, ZČU, akademický rok 2011/2012.
- [15] MESQUITA, Rafael A. a Celso A. BARBOSA. *Spray forming high speed steel - properties and processing*. *Materials Science and Engineering A* 383. 2004, s. 89. DOI: 10.1016/j.msea.2004.02.035. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [16] Dostupné z www < <http://www.techtydenik.cz/reznenastroje.php?part=2> >
- [17] Dostupné z www < <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-obrabeci-nastroje.html> >
- [18] Dostupné z www < <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-rezne-nastroje-dovyroby.html> >
- [19] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje: Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI*. Brno, 2006, 192 s. Dostupné z: < <http://ust.fme.vutbr.cz> >
- [20] PTÁČEK, Luděk a Kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. ISBN 80-7204-248-3.

- [21] BATYSTOVÁ, Irena. *Nože: Podklady pro cvičení z PNO. Plzeň, ZČU, 1992.*
- [22] RUI, Li. *Experimental and numerical analysis of high-throughput drilling of titanium alloys. Michigan. 2007. Dissertation submitted. University of Michigan.*
- [23] DRIML, Bohuslav. *Vrtání, vyhrubování, vystružování a zahlubování. Dostupné z www: <<http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep22.pdf>>*
- [24] STRENKOWAKI, J.S., Hsieh C.C. a A.J. *An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.01.005. Dostupné z: www.sciencedirect.com*
- [25] KRÁE, J., Řehoř J., Spišák E a Král' J. ml. *Technologické a informačné činitele obrábění. 1. vyd. Košice: Centrum informatiky strojníckej fakulty TU Košice, 2009. ISBN 978-80-553-0381-9.*