

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## ANALÝZA ŘEZNÝCH SIL PŘI VRTÁNÍ ŠROUBOVITÝM VRTÁKEM

CUTTING FORCE ANALYSIS WHEN DRILLING WITH TWIST DRILL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Mgr. PAVEL HON

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2008/2009

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Mgr. Pavel Hon

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Analýza řezných sil při vrtání šroubovým vrtákem**

v anglickém jazyce:

### **Cutting force analysis when drilling with twist drill**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na porovnání stávající geometrie spirálových vrtáků dle normy DIN 1414-1, provedení analýzy silového zatížení nástrojů při vrtání a vyhodnocení silové a energetické náročnosti vybraných nástrojů

Cíle bakalářské práce:

1. Úvod
2. Rozbor technologie vrtání, druhy nástrojů
3. Fyzikální popis namáhání vrtáků při obrábění
4. Experimentální část, její vyhodnocení
5. Závěry

Seznam odborné literatury:

HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály. MM Průmyslové spektrum. Speciální vydání včetně CD. 110 s. Praha, 2004, ISSN 1212-2572.

Normy DIN 1414-1,2, 6581, 6582,338, 17 350,DIN ISO 54 19,ISO 10 899

SPITLER, D. Fundamentals of Tool Design. SME, Dearborn, Michigan, 2003, 5th ed., pp.404, ISBN 1-800-733-4763.

REID, D.T. Fundamentals of Tool Design. 3rd ed., 7th printing, 1991, SME, Dearborn, pp.755, ISBN 0-87263-412-4.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 2.12.2008

L.S.

---

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Teoretická část této práce předkládá základní charakteristiky technologie vrtání, přehled technologií a nástrojů pro vrtání, detailnější popis šroubovitého vrtáku, rozbor sil při vrtání a způsoby namáhání a výpočtu šroubovitých vrtáků. V experimentální části je detailněji zkoumán šroubovitý vrták s geometrií CZ001 firmy NÁSTROJE CZ,s.r.o. Pomocí řezů na 3D skenu je měřena tloušťka jádra a geometrie hlavního ostří a jsou srovnány s konvenčními nástroji. Průběh rezného momentu a posuvové síly podél hlavního a příčného ostří je zjišťován experimentem, při kterém bylo vrtáno do několikrát osazené díry. Průběhy obou zatížení jsou porovnány s dlouhodobými výsledky na konvenčních nástrojích. Jako aplikace znalostí průběhů rezné a posuvové síly podél hlavního a příčného ostří je proveden výpočet vzdálenosti působíště rezné síly od osy vrtáku a napěťová a deformační analýza vrtáku.

### Klíčová slova

Vrtání, šroubovitý vrták, rezný moment, rezná síla, posuvová síla, geometrie bříty.

## ABSTRACT

Theoretical part of this project contains basic characteristics of drilling technology, shows summary of drilling technologies and tools used for drilling, detailed description of twist drill, forces and loads analysis when drill, twist drill stress analysis. In experimental part of this project there are some investigations on twist drill geometry CZ001 made by company NASTROJE CZ, s.r.o. Cutting edge geometry and web thickness is measured on 3D scan of this drill and the results are compared to conventional products. Course of moment of cutting and course of thrust force is done by experiment where the recessed hole was drilled. Course of both loads is compared to long-term results on conventional drills. As application of the achieved results the cutting force position is calculated and stress and deformation analysis is performed.

### Key words

Drilling, twist drill, moment of cutting, cutting force, thrust force, cutting edge geometry.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HON, P. *Analýza rezných sil při vrtání šroubovitým vrtákem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 49 s, 4 přílohy. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Analýza řezných sil při vrtání šroubovým vrtákem“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 28.5.2009

.....  
Mgr. Pavel Hon

## **Poděkování**

Děkuji tímto svému školiteli doc. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za odborné vedení, množství cenných rad a připomínek při vypracování bakalářské práce. Dále také děkuji firmě MCAE Systems, s.r.o. za umožnění naskenování geometrie šroubovitého vrtáku a poskytnutí propagačních materiálů.

**OBSAH**

Abstrakt .....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah .....	6
Úvod .....	7
1 TECHNOLOGIE VRTÁNÍ .....	8
1.1 Charakteristika technologie vrtání .....	8
1.2 Druhy technologií a nástrojů .....	10
2 ŠROUBOVITÝ VRTÁK .....	13
2.1 Popis částí šroubovitého vrtáku.....	13
2.2 Geometrie šroubovitého vrtáku.....	14
2.3 Materiály šroubovitých vrtáků .....	16
3 FYZIKÁLNÍ POPIS NAMÁHÁNÍ VRTÁKŮ PŘI OBRÁBĚNÍ .....	17
3.1 Síly při vrtání .....	17
3.1.1 Rozklad sil v bodech ostří šroubovitého vrtáku .....	18
3.1.2 Celková řezná síla.....	18
3.1.3 Celková posuvová síla .....	19
3.1.4 Řezný moment.....	20
3.2 Způsoby namáhání a výpočtu vrtáků.....	20
3.2.1 Namáhání krutem.....	20
3.2.2 Namáhání na vzpěr.....	21
4 ANALÝZA VRTÁKU CZ001 .....	23
4.1 Geometrie vrtáku CZ001 .....	23
4.2 Analýza průběhu sil podél hlavního a příčného ostří .....	27
4.3 Stanovení působiště celkové řezné síly .....	40
4.4 Analýza napětí a deformace .....	41
4.5 Výsledky a diskuze .....	44
Závěr .....	46
Seznam použitých zdrojů.....	47
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	48
Seznam příloh.....	49

## ÚVOD

Vrtání je jedna z nejstarších technologií sloužících k obrábění rotačních otvorů v různých materiálech. Původně ve dřevu a nerostech, později i v kovech. Neustálé zdokonalování celé technologie vrtání vedlo až k současným strojům a nástrojům. Vývoj nástrojů pak neoddělitelně spojoval vývoj geometrie a tvaru nástrojů a vývoj nástrojových materiálů.

Ačkoliv bylo vyvinuto mnoho nových nástrojů a systémů na vrtání a vyvrtávání, zůstává šroubovitý vrták z rychlořezné oceli stále nejpoužívanějším z nich. Svou jednoduchou výrobou, přeostřováním a použitelností je prakticky i ekonomicky stále nezastupitelný.

Na druhou stranu, jakkoliv se zdá být šroubovitý vrták nástrojem jednoduchým a v praxi často používaným, exaktnější popis jeho chování během řezného procesu je velmi složitý. Složité řezné podmínky a složitá geometrie bříty způsobují výrobcům vrtáků nemalé obtíže při jejich vývoji. Postupem času byly vyvinuty způsoby, jak některé negativní vlivy eliminovat, například redukcí příčného ostří, nikdy ovšem nelze postihnout všechny. Téměř vždy je to tedy kompromis mezi trvanlivostí, vhodnou geometrií bříty či tuhostí nástroje.

Nicméně silné konkurenční prostředí na trhu s nástroji nutí výrobce vyvíjet stále nové produkty, a proto je nutná dobrá znalost řezného procesu podél hlavního, vedlejšího i příčného ostří šroubovitého vrtáku.



## 1 TECHNOLOGIE VRTÁNÍ

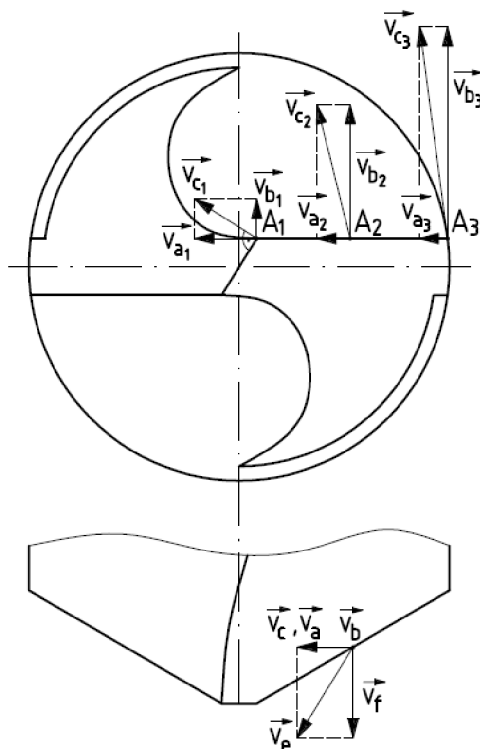
Vrtání je vysoce efektivní a účinný proces pro obrábění válcových děl. Je charakterizováno tvarovým nástrojem – vrtákem – s jedním nebo více břity, který svým tvarem a dalšími technologickými vlastnostmi ovlivňuje parametry obrobenej plochy. Vrtáním se zhotovují díry v plném materiálu nebo se zvětšují díry předvrtané, předlité, předlisované, předkované atd.

### 1.1 Charakteristika technologie vrtání

Hlavní řezný pohyb je rotační a vykonává ho obvykle nástroj (vrtání na vrtačkách, vyvrtávačkách, obráběcích centrech) nebo méně často obrobek (např. vrtání na soustruhu). Vedlejší pohyb je posuvný a je konán ve směru osy vrtáku. Obvykle vedlejší pohyb koná nástroj.

Řezná rychlost při vrtání se podél hlavního ostří směrem od obvodu k ose vrtáku zmenšuje, v ose nástroje je řezná rychlost nulová (obr.1.1). Řezná rychlost  $v_{ci}$  v každém bodě hlavního ostří  $A_i$  tedy závisí na jeho vzdálenosti od středu  $D_i$  [mm] a otáčkách vrtáku  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] a je dána vztahem [2]:

$$v_{ci} = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]. \quad (1.1)$$



Obr. 1.1 Směry vektorů hlavního a vedlejšího pohybu při vrtání dvoubřítým šroubovým vrtákem - podle [2]

V technické praxi se obvykle pro výpočty stanovuje jen jedna řezná rychlost a to na obvodu nástroje:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}], \quad (1.2)$$

kde  $D$  [mm] je průměr nástroje.

Posuvová rychlost závisí na posuvu na otáčku  $f$  [mm] a otáčkách vrtáku  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] a je dána vztahem [2]:

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]. \quad (1.3)$$

Jelikož jsou vrtáky mnohobřité nástroje, definuje se pro ně i posuv na zub (resp. břit)  $f_z$  [3]:

$$f_z = \frac{f}{z} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]. \quad (1.4)$$

kde  $z$  [-] je počet zubů (břitů) nástroje.

Průřez třísky odebíraný jedním břitem při vrtání je dán obecným vztahem:

$$A_D = h_D \cdot b_D = a_p \cdot f_z \quad [\text{mm}^2], \quad (1.5)$$

kde  $h_D$  [mm] je jmenovitá tloušťka třísky,  
 $b_D$  [mm] je jmenovitá šířka třísky,  
 $a_p$  [mm] je šířka záběru ostří,  
 $f_z$  [mm] je posuv na břit.

Protože se dále tato práce zaměřuje jen na dvoubřítým šroubovým vrták, následují vztahy platné pro tento nástroj [2, 3]:

- průřez třísky odebíraný jedním břitem při vrtání do plného materiálu (obr.1.2a):

$$A_D = h_D \cdot b_D = \frac{D \cdot f}{4} \quad [\text{mm}^2], \quad (1.6)$$

- průřez třísky odebíraný jedním břitem při předvrtané díře (obr.1.2b):

$$A_D = \frac{(D-d) \cdot f}{4} \quad [\text{mm}^2], \quad (1.7)$$

- jmenovitá tloušťka třísky a jeden břit:

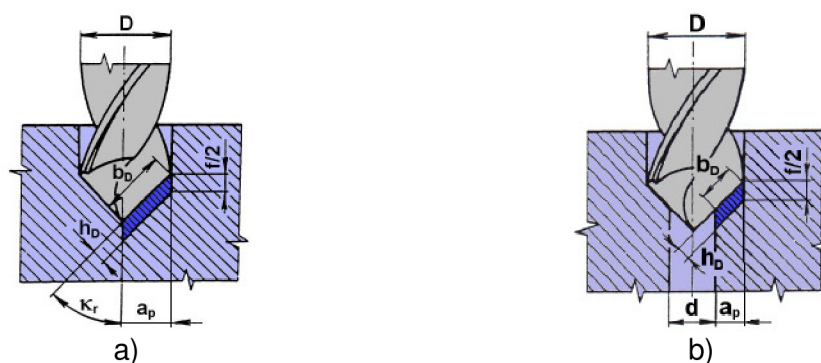
$$h_D = \frac{f}{2} \cdot \sin \kappa_r \quad [\text{mm}], \quad (1.8)$$

- jmenovitá šířka třísky a jeden břit při vrtání do plného materiálu:

$$b_D = \frac{D}{2 \cdot \sin \kappa_r} \quad [\text{mm}], \quad (1.9)$$

- jmenovitá šířka třísky a jeden břit při předvrtané díře:

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



Obr. 1.2 Průřez třísky při vrtání a vyvrtávání dvoubřítým šroubovým vrtákem [3]

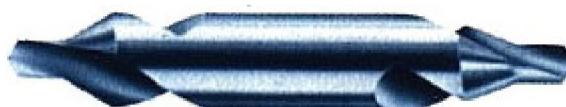
Dosahovaná přesnost a kvalita povrchu při vrtání je kvůli technologickým podmínkám a složitému reznému procesu omezená. Při běžných technologiích se dosahuje Ra12,5 až 6,3, při speciálních technologických opatřeních až Ra3,2 [7].

## 1.2 Druhy technologií a nástrojů

Podle druhu technologie, konstrukce a geometrie použitého vrtáku lze vrtání rozdělit na:

### a) navrtávání začátku díry středícím vrtákem do plného materiálu (obr.1.3)

Pevné tělo středícího vrtáku zaručuje přesné vedení vrtáku v jeho ose a tím minimalizuje odchylky od požadovaného umístění osy díry. Navrtávání se používá pro přesné vedení vrtáků na začátku díry nebo pro výrobu středících důlků hřídelí.



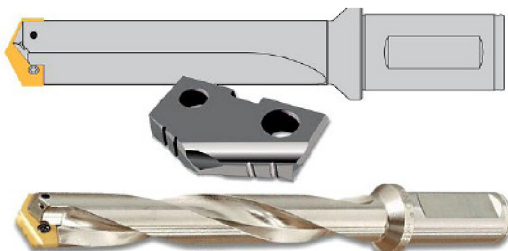
Obr. 1.3 Středící vrták [3]

### b) vrtání krátkých děr

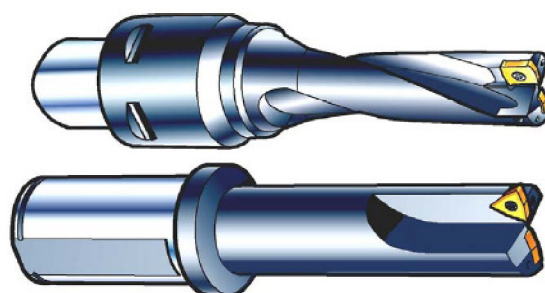
Krátkými dírami se rozumí díry s poměrem  $L:D=5\div 10:1$ , kde  $L$  je délka díry a  $D$  je průměr díry [3]. Krátké díry lze také charakterizovat v závislosti na průměru vrtané díry na  $L:D=5\div 6:1$  pro  $D\leq 30$  mm a  $L:D=2,5:1$  pro  $D>30$  mm [6]. Pro výrobu krátkých děr se převážně používají šroubovitě vrtáky (jsou popsány v kapitole 2), kopinaté vrtáky a frézovací vrtáky.

*Kopinaté vrtáky* (obr.1.4) se vyznačují vysokou tuhostí a umožňují vrtat díry o průměru 10 až 128 mm do poměru  $L:D=3:1$  [3]. Základem je břitová destička z RO nebo SK, která zapadá do vybrání tělesa vrtáku. Parametry drsnosti obrobenej plochy jsou horší než při vrtání šroubovitým vrtákem.

*Frézovací vrtáky (vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami)* (obr.1.5) mají 2 až 3 vyměnitelné břitové destičky (s pozitivní geometrií čela) ze SK, upnuté šrouby na tělese vrtáku. Vzhledem k proměnlivým rezným podmínkám podél hlavního ostří při vrtání bývají obvodové destičky z materiálu odolnějšího proti opotřebení (povlakované SK) na rozdíl od středových (nepovlakované SK). Frézovací vrtáky se používají pro  $L:D=2:1$ ,  $D=16$  až 60 mm [6]. Tříska je odváděna přímými drážkami, rezná kapalina je přiváděna tělesem vrtáku.



Obr. 1.4 Kopinaté vrtáky [3]

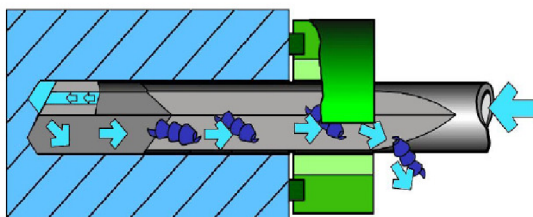


Obr. 1.5 Frézovací vrtáky [3]

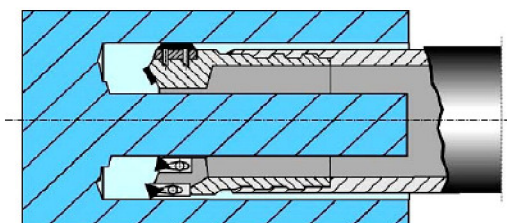
### c) vrtání hlubokých děr

Nástroje pro vrtání hlubokých děr ( $L:D > 10:1$  [3]) musí zaručit plynulý vrtací proces bez zpětného vyjíždění a vyprazdňování třísek. Vyprazdňování třísek a zároveň chlazení a mazání řezného procesu je vesměs zajišťováno přívodem tlakové řezné kapaliny až k ostří nástroje. Pro vrtání hlubokých děr se především používají hlavňové vrtáky, korunkové trepanační hlavy, ejektorové vrtáky a nástroje BTA. U malých průměrů se občas používají i šroubovitě vrtáky.

*Hlavňové vrtáky* (obr.1.6) se skládají z řezné části (z RO nebo SK), která je připájena na trubku či tyč potřebné délky. Řezná část má řezný plátek a dva plátky vodící. Řezná kapalina je přiváděna otvorem v tělese vrtáku a vyplavuje třísky.



Obr. 1.6 Odvod třísky při vrtání hlavňovým vrtákem [3]

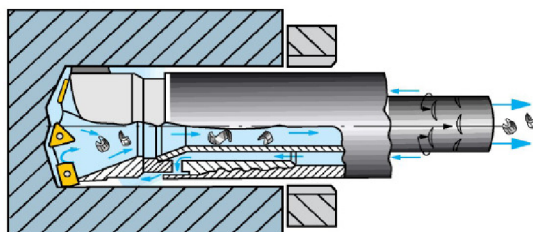


Obr. 1.7 Korunkový vrták [3]

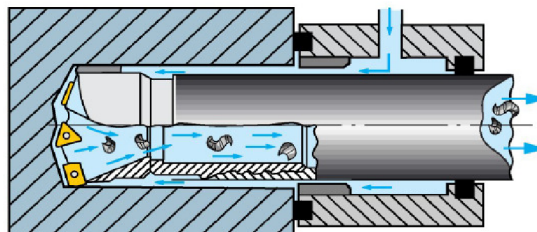
*Korunkové trepanační hlavy* (obr.1.7) jsou mnohabřitě nástroje používané pro vrtání na jádro. Mají široké rozmezí použití - 30 až 500 mm [6]. Vzhledem k omezenému prostoru pro odvod třísek je nutno věnovat velkou pozornost jejich rozdělení a tvarování.

*Ejektorové vrtáky* (obr.1.8) se skládají z vrtací hlavice, která je našroubovaná do vnější vrtací trubky. Řezná kapalina je přiváděna k břitům nástroje mezikružím mezi vnější a vnitřní trubkou, přičemž její malé množství, odcházející štěrbinami v zadní části vnitřní trubky, způsobuje ejektorový efekt. Těmito vrtáky lze vrtat díry o průměru 20 až 60 mm, v délce až  $100 \times D$  (horizontálně) nebo  $50 \times D$  (vertikálně) [3].

*Nástroje BTA* (*Bohring and Trepanning Association* - obr.1.9) umožňují vrtat do plného materiálu, na jádro, nebo zvětšování předvrtaných otvorů. Vrtací hlavice do plného materiálu jsou vyráběny až do průměru 180 mm, vrtací hlavice pro vrtání na jádro v rozsahu průměrů 120 až 300 mm [3]. Řezná kapalina je přiváděna mezi stěnou vrtané díry a trubkou vrtáku a spolu s třískami je odváděna středem trubky.



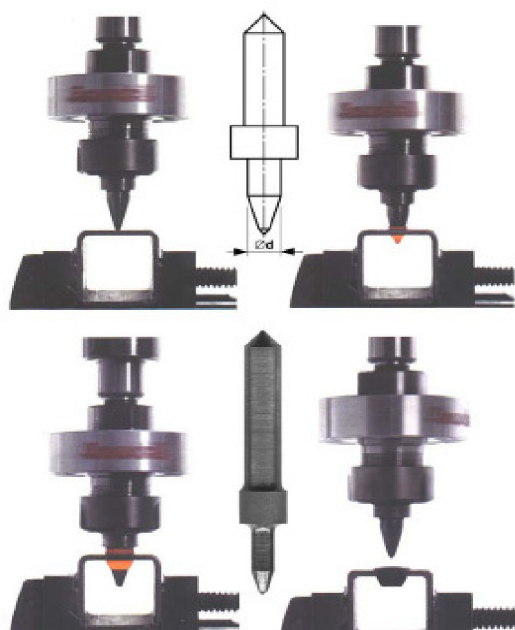
Obr. 1.8 Princip ejektorového vrtání [3]



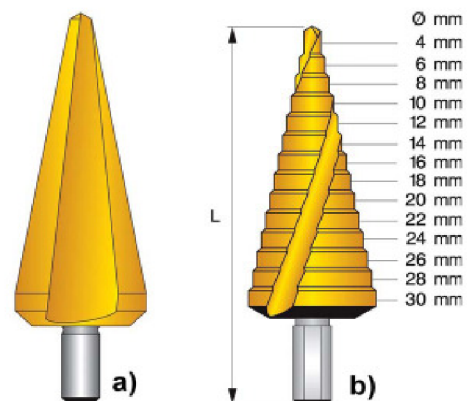
Obr. 1.9 Princip funkce BTA vrtáku [3]

d) speciální případy vrtání

Do speciálních případů vrtání patří například vrtání děr v tenkostěnných profilech nebo v plechu termálním tvářecím vrtákem (obr.1.10), vrtání děr v plechu širokorozsahovým či odstupňovaným vrtákem (obr.1.11), vrtání odstupňovaným vrtákem či vrtání různými sdruženými nástroji - současné vrtání a vystružování, závitování, zahlubování atd. (obr.1.12).



Obr. 1.10 Termální vrtání díry v tenkostěnném ocelovém profilu [3]



Obr. 1.11 Vrtáky do plechu  
a) širokorozsahový, b) odstupňovaný [3]



Obr. 1.12 Sdružený nástroj pro vrtání a dvojité zahlubování [3]

## 2 ŠROUBOVITÝ VRTÁK

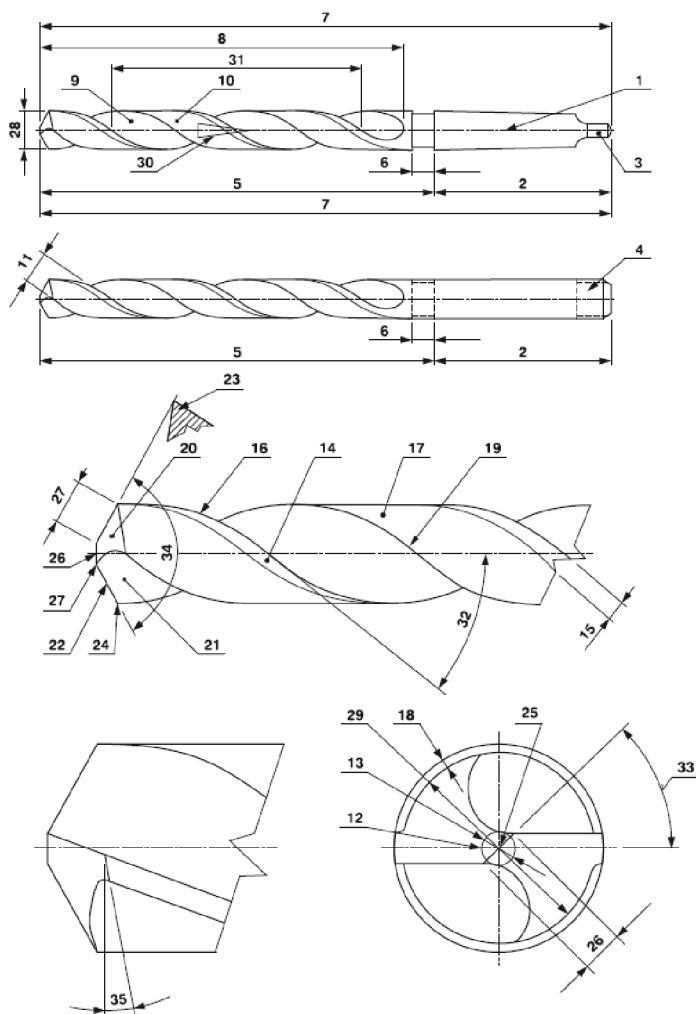
Šroubovitý vrták je tvarový nástroj nejčastěji používaný pro vrtání krátkých děr (při malých průměrech i pro vrtání děr hlubokých). Nejčastěji jsou šroubovitě vrtáky dvoubřité se dvěma protilehlými šroubovitými drážkami pro odvod třísky.

### 2.1 Popis částí šroubovitého vrtáku

Hlavní části šroubovitého vrtáku a termíny pro něj používané jsou uvedeny na obrázku 2.1. Šroubovitá část vrtáku je tvořena dvěma žebry uprostřed spojenými jádrem. Tloušťka jádra určuje tuhost nástroje a ve špičce ovlivňuje velikost řezné a posuvové síly.

Termíny pro šroubové vrtáky:

1. osa
2. stopka - kuželová, hladká válcová, hladká válcová s unašečem
3. vyražeč
4. unašeč
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. fazetka
15. šířka fazetky
16. vedlejší ostří
17. odlehčení
18. hloubka odlehčení
19. pata
20. hřbet
21. čelo
22. hlavní ostří
23. břít
24. vnější špička
25. příčné ostří
26. délka příčného ostří
27. délka hlavního ostří
28. průměr vrtáku ( $h_8$ )
29. průměr odlehčení
30. zpětná kuželovitost
31. stoupání šroubovice
32. úhel šroubovice  $\lambda$
33. úhel příčného ostří
34. úhel špičky  $\epsilon$
35. úhel hřbetu



Obr. 2.1 Základní části a termíny pro šroubovitě vrtáky [12]

## 2.2 Geometrie šroubovitého vrtáku

Úhel stoupání šroubovice drážek závisí na obráběném materiálu (tab.2.1). Udává se na obvodu nástroje, jako odchylka tečny šroubovice vedlejšího ostří a osy nástroje. Tento úhel ovlivňuje úhel čela hlavního ostří a odvod třísek – pro houževnaté materiály s dlouhou třískou se obecně používají úhly větší, pro tvrdé materiály s drobnou třískou úhly menší.

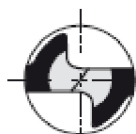
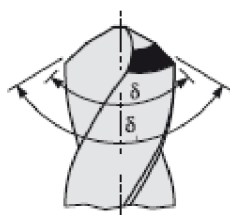
Tab. 2.1 Úhel stoupání šroubovice drážek [9]

Obráběný materiál	Úhel stoupání [°]
Konstrukční oceli, šedá a temperovaná litina	25±2
Slitiny hliníku, bronz cínový	25±2
Bronz hliníkový, niklový a manganový, mosaz	12±1
Hliník, měď, slitiny hořčíku	40±5
Plasty	12±1
Mramor	12±1

Úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  u šroubovitých vrtáků z rychlořezné oceli taktéž závisí na materiálu obrobku (tab.2.2). Pro hůř obrobitelné materiály se někdy špička vybrušuje pod dvěma úhly (obr.2.2), což snižuje opotřebení nástroje v důsledku nižšího tepelného namáhání. Pro nižší opotřebení a dlouhou životnost nástroje se taktéž špička zaobluje (obr.2.3). Takto broušený nástroj má sice větší trvanlivost břitu, ale má horší samostředění a navíc vyžaduje speciální stroje pro broušení.

Tab. 2.2 Úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  u šroubovitých vrtáků z RO [9]

Obráběný materiál	$\kappa_r$ [°]
Uhlíkové oceli, šedá a temperovaná litina, mosaz, zinkové slitiny	59
Legované oceli	65
Austenitické oceli, nerezavějící oceli, měď, slitiny hliníku	70
Plasty, tvrzená pryž, mramor	40



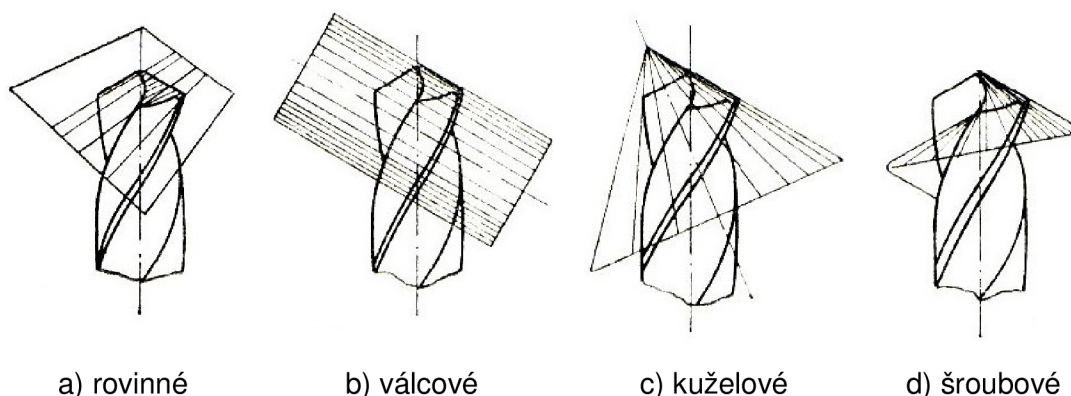
Obr. 2.2 Broušení pod dvěma úhly [12]

Obr. 2.3 Broušení zaobleného břitu [1]

Nástrojový ortogonální úhel hřbetu hlavního ostří  $\alpha_o$  je v malém rozsahu  $8 - 15^\circ$  a opět závisí na obráběném materiálu (tab.2.3). Úhel se udává na obvodu nástroje, ale jeho hodnota podél hlavního ostří je proměnná a to hlavně v závislosti na způsobu broušení (obr.2.4). Pro vrtáky menších průměrů se používá broušení rovinné (obr.2.4a) a válcové (obr.2.4b). Jsou to nejjednodušší způsoby broušení, avšak jejich nevýhodou je zmenšující se úhel hřbetu směrem k příčnému ostří. Nejčastěji se používá broušení kuželové (obr.2.4c). Osa a vrchol kužele jsou postaveny tak, aby směrem k příčnému ostří vznikl menší poloměr zakřivení hřbetní plochy a tím i větší úhel  $\alpha$ . Šroubové broušení (obr.2.4d) se provádí kombinací rotačního pohybu vrtáku a axiálního pohybu brousícího kotouče, což vytvoří na hřbetu nástroje šroubovou plochu s výhodnými úhly hřbetu u příčného ostří. Vrták ostřený tímto způsobem má velmi dobré středící vlastnosti a menší posunové řezné síly.

Tab. 2.3 Nástrojový ortogonální úhel hřbetu hlavního ostří  $\alpha_o$  [9]

Obráběný materiál	$\alpha_o$ [°]
Oceli do $R_m=900$ MPa	10 až 12
Slitinové oceli $R_m=900$ až 1200 MPa	8 až 10
Šedá litina	8 až 10
Měď, hliník, plasty, mosaz, bronz	12 až 15
Slitiny hliníku	10 až 12

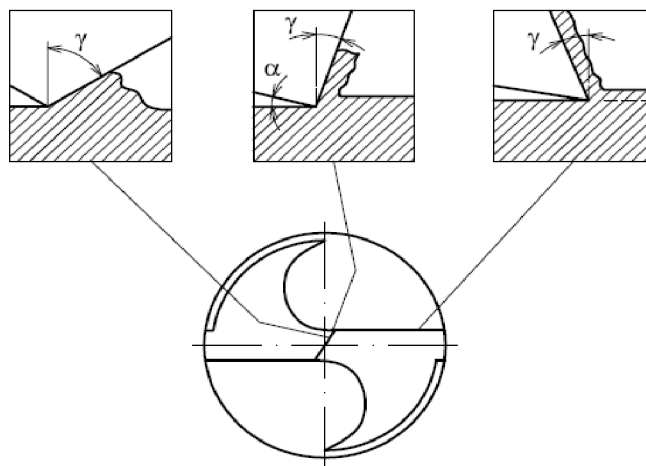


Obr. 2.4 Způsoby broušení hřbetních ploch šroubovitých vrtáků [3]

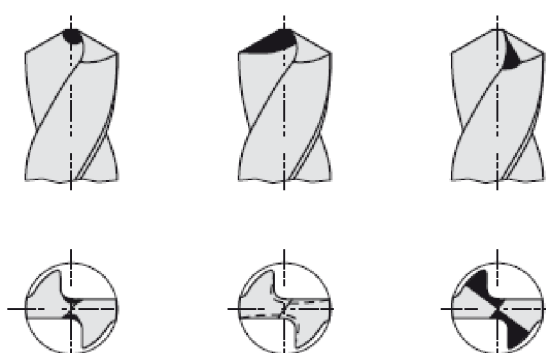
Úhel čela hlavního ostří je podél celého ostří proměnný a závisí na úhlu stoupání šroubovitě drážky a jejím tvaru. Obecně se však směrem k ose nástroje zmenšuje, až v blízkosti jádra vrtáku může dosahovat i záporných hodnot (obr.2.5). Navíc jádro šroubovitěho vrtáku materiál neřeže, ale tváří. Vzhledem k velmi nízkým rychlostem v blízkosti osy nástroje (kap.1.1) jsou tyto úhly z hlediska řezného procesu značně nevýhodné, proto se občas broušením provádí korekce hlavního či příčného ostří (obr.2.6).

U nástrojů, pracujících s velkými posuvy je nutno provádět kinematickou korekci úhlů čela a hřbetu (obr.2.7). Její princip spočívá v korekci úhlu čela, resp. hřbetu o úhel stoupání šroubovice třísky, neboli úhel vytvořený posuvem nástroje.

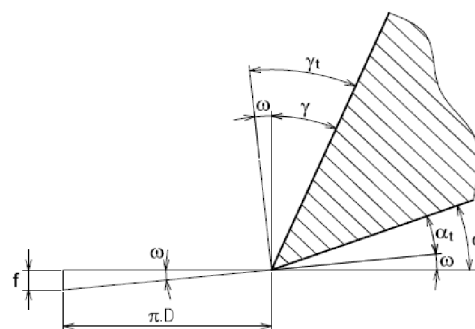




Obr. 2.5 Tvorba třísky a uhel čela v různých bodech hlavního ostří šroubovitého vrtáku - podle [11]



Obr. 2.6 Redukce čela a příčného ostří [12]



Obr. 2.7 Korekce úhlu čela a hřbetu podle posuvu - podle [8]

## 2.3 Materiály šroubovitých vrtáků

Šroubovitě vrtáky jsou nejčastěji vyráběny z rychlořezných ocelí (tab.2.4). Pro lepší odolnost proti opotřebení se vrtáky z RO povlakuji. Pro náročnější podmínky obrábění se používají vrtáky s pájenými SK břitovými destičkami a vrtáky z monolitních SK bez povlaků i s povlakem.

Tab. 2.4 Doporučené typy RO pro nástroje na otvory [9]

	Obráběný materiál						
	ocel			slitiny Ni,Co,Ti	litina	Neželezné kovy	plasty, dřevo
	žíhaná	zušlech- těná	austeni- tická				
Materiál nástroje	19 802 19 830	19 850 19 851 19 852 19 856 19 857	19 852 19 856	19 850 19 851 19 856	19 802 19 830 19 851 19 861	19 802 19 830	19 802 19 820 19 830

### 3 FYZIKÁLNÍ POPIS NAMÁHÁNÍ VRTÁKŮ PŘI OBRÁBĚNÍ

Vzhledem ke složitým řezným podmínkám při vrtání (kap.1.1) a složité geometrii šroubovitého vrtáku (kap.2.2) není možné naprosto exaktně popsat způsob namáhání a výpočtu šroubovitého vrtáku při obrábění. Nejčastěji se vychází z empirických vztahů, odvozených pro tento způsob obrábění, nebo obecně z měrného řezného odporu obráběného materiálu.

#### 3.1 Síly při vrtání

Výslednou sílu  $F$  při obrábění jedním břitem lze obecně rozložit do složky řezné  $F_c$ , posuvové  $F_f$  a pasivní  $F_p$  (obr.3.1). V případě šroubovitého vrtáku, který má dva břity symetricky postavené vůči své ose, jsou výsledné síly tvořeny součtem nebo rozdílem hodnot složek na obou břitech nástroje (obr.3.2) [2, 3]:

$$\text{řezná síla} \quad F_c = F_{c1} + F_{c2} \quad [\text{N}], \quad (3.1)$$

$$\text{posuvová síla} \quad F_f = F_{f1} + F_{f2} \quad [\text{N}], \quad (3.2)$$

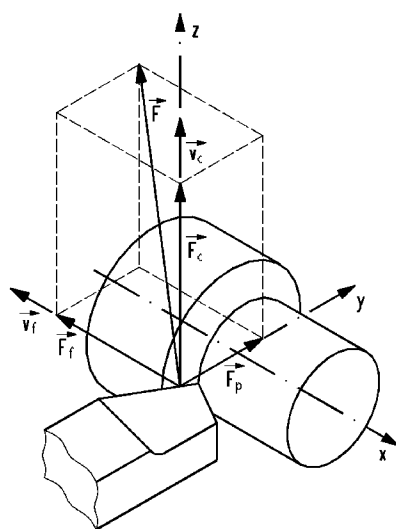
$$\text{pasivní síla} \quad F_p = F_{p1} - F_{p2} \quad [\text{N}]. \quad (3.3)$$

Je-li vrták správně a přesně naostřen, jsou síly na obou břitech shodné:

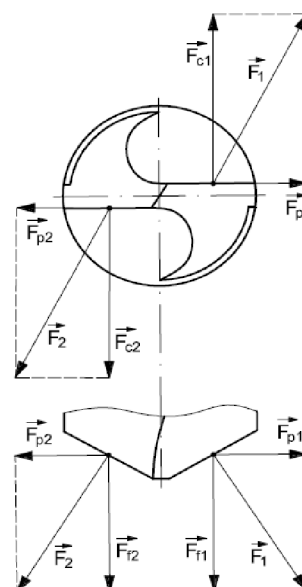
$$F_{c1} = F_{c2} = F_c / 2 \quad [\text{N}], \quad (3.4)$$

$$F_{f1} = F_{f2} = F_f / 2 \quad [\text{N}], \quad (3.5)$$

$$F_{p1} = F_{p2} = F_p / 2 \quad \Rightarrow \quad F_p = 0 \quad [\text{N}]. \quad (3.6)$$



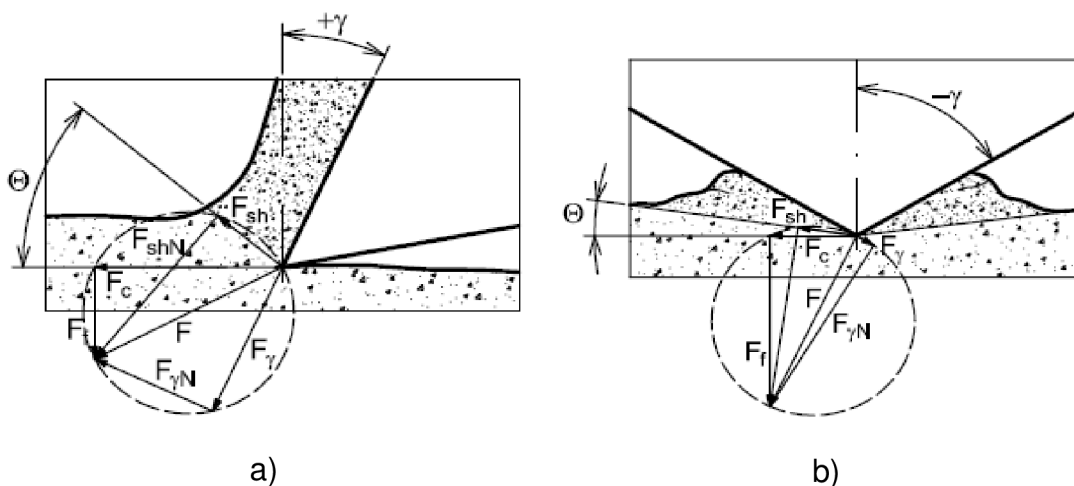
Obr. 3.1 Složky výsledné síly při obrábění - podle [2]



Obr. 3.2 Složky sil na šroubovitém vrtáku - podle [2]

### 3.1.1 Rozklad sil v bodech ostří šroubovitého vrtáku

Od obvodu vrtáku po jeho příčné ostří je úhel čela pozitivní, a tedy rozklad sil v bodě této části ostří je obdobný jako při ortogonálním obrábění (obr.3.3a). Na příčném ostří je úhel čela značně negativní. Úhel  $\phi$  střížné roviny je velmi malý, materiál je doslova vytlačován příčným ostřím mimo jádro do šroubovitě drážky a posuvová síla  $F_f$  je tedy v bodech příčného výrazně větší než v bodech hlavního ostří (obr.3.3b).



Legenda:  $\Theta$  - úhel roviny maximálních smykových napětí [°]     $F_{sh}$  - tangenciální síla v rovině stříhu [N]  
 $\gamma$  - úhel čela [°]     $F_{shN}$  - normálová síla v rovině stříhu [N]  
 $F_c$  - řezná síla [N]     $F_\gamma$  - tangenciální síla čela nástroje [N]  
 $F_f$  - posuvová síla [N]     $F_{\gamma N}$  - normálová síla čela nástroje [N]  
 $F$  - výslednice sil [N]

Obr. 3.3 Rozklad sil a) na obvodu vrtáku, b) na příčném ostří - podle [10]

### 3.1.2 Celková řezná síla

Nejčastěji se řezná síla určuje z následujícího empirického vztahu [2, 3, 6]:

$$F_c = C_{F_c} \cdot D^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \quad [\text{N}], \quad (3.7)$$

kde  $C_{F_c}$  [-] je konstanta, vyjadřující zejména vliv obráběného materiálu,  
 $x_{F_c}$  [-] je exponent, vyjadřující vliv průměru vrtáku,  
 $y_{F_c}$  [-] je exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku.

Hodnoty  $C_{F_c}$ ,  $x_{F_c}$ ,  $y_{F_c}$  ze vztahu (3.7) jsou určovány empiricky a lze je nalézt v odborné literatuře, popřípadě v katalogích a příručkách výrobců nástrojů. Je ovšem potřeba brát v úvahu nejen vliv obráběného materiálu, ale i geometrii nástroje a řezné podmínky, které nejsou těmito koeficienty většinou podchyceny.

Dalším způsobem, jak určit řeznou sílu, je z měrného řezného odporu obráběného materiálu. Měrný řezný odpor, nebo také měrná řezná síla, je

definována jako síla ve směru hlavního řezného pohybu vztažená na jednotku průřezu třísky. Celková řezná síla je pak dána vztahem [2, 3, 6]:

$$F_c = k_c \cdot A_D \quad [\text{N}], \quad (3.8)$$

kde  $k_c$  [MPa] je měrný řezný odpor obráběného materiálu.

Obdobně jako v předchozím vztahu lze i  $k_c$  nalézt v odborné literatuře, popřípadě v katalogích a příručkách výrobců nástrojů, avšak opět často nepodchycuje vliv geometrie nástroje a řezných podmínek. Při výpočtu řezné síly u šroubovitých vrtáků je nutno zohlednit výsledky dlouhodobých studií, které ukazují, že jádro konvenčních šroubovitých vrtáků zahrnuje asi 20-30% celkového řezného momentu [2, 4].

### 3.1.3 Celková posuvová síla

Obdobně jako řezná síla se nejčastěji posuvová síla určuje z následujícího empirického vztahu [2, 3, 6]:

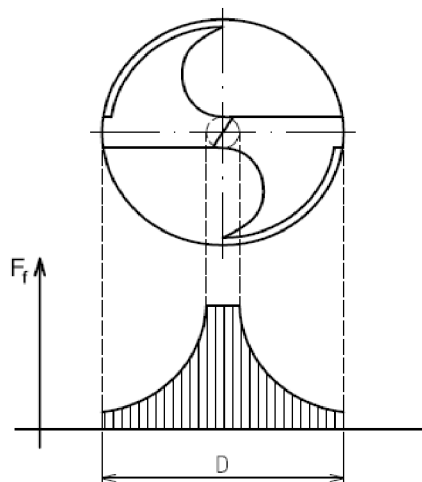
$$F_f = C_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [\text{N}], \quad (3.9)$$

kde  $C_{Ff}$  [-] je konstanta, vyjadřující zejména vliv obráběného materiálu,

$x_{Ff}$  [-] je exponent, vyjadřující vliv průměru vrtáku,

$y_{Ff}$  [-] je exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku.

Značný vliv na velikost posuvové síly má jádro, popřípadě příčné ostří šroubovitého vrtáku. Dlouhodobé studie ukazují, že jádro zahrnuje asi 50-60% celkové posuvové síly [5, 11], některá literatura uvádí dokonce 70-80% [2, 4]. Rozložení posuvové síly v celém průměru vrtáku je schématicky znázorněno na obr.3.4.



Obr. 3.4 Rozložení posuvové síly na průměru vrtáku – podle [11]

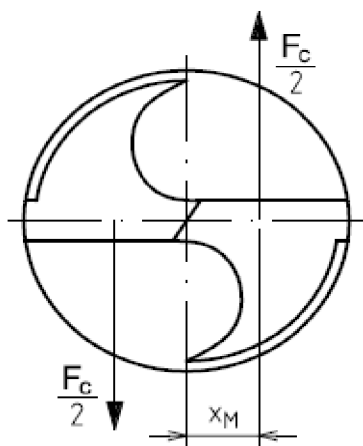
Poměr jádra ku průměru vrtáku je u větších vrtáků zhruba 15-20%, u velmi malých vrtáků (mikrovrtáků) může dosahovat až 50%. Jestliže se zvětší tento poměr z 20% na 30%, posuvová síla v jádře stoupne dvojnásobně. Jestliže se zvětší tento poměr z 20% na 40%, posuvová síla v jádře vzroste dokonce čtyřnásobně [11]. Proto je nutné provádět korekce příčné ostří (viz kap.2.2).

### 3.1.4 Řezný moment

Za předpokladu znalosti celkové řezné síly  $F_c$ , lze odvodit vztah pro řezný moment k ose vrtáku:

$$M_c = 2 \cdot \frac{F_c}{2} \cdot x_M = F_c \cdot x_M \quad [\text{Nm}], \quad (3.10)$$

kde  $x_M$  [mm] je vzdálenost působíště síly  $F_c$  od osy vrtáku (obr.3.5).



Obr. 3.5 Působíště řezné síly.

V literatuře se vzdálenost  $x_M$  nejčastěji udává jako polovina poloměru vrtáku [2, 3, 6] a tedy:

$$M_c = F_c \cdot \frac{D}{4} \quad [\text{Nm}]. \quad (3.11)$$

Tuto hodnotu je nutno brát jako orientační a jen pro některé technické výpočty, neboť obě veličiny, které v ní vystupují jsou empirické. Bližší určení vzdálenosti působíště řezné síly pro konkrétní typ šroubovitého vrtáku je provedeno v kapitole 4.3.

## 3.2 Způsoby namáhání a výpočtu vrtáků

Šroubovitý vrták je svým způsobem práce namáhán převážně kombinací krutu a vzpěru. Oba tyto způsoby namáhání jsou podrobněji rozebrány v následujících podkapitolách. Při nesymetrickém nabroušení vrtáku nebo při šikmém vedení vrtáku v díře je vrták namáhán také ohybem. To často vede v kombinaci s krutem a vzpěrem k destrukci nástroje. Vlivy, způsobující ohybové napětí, jsou ovšem velmi obtížně popsitelné a nebude jim zde věnována pozornost.

### 3.2.1 Namáhání krutem

Vlivem řezného momentu  $M_c$  vzniká ve šroubovitém vrtáku smykové napětí  $\tau_k$  o velikosti [9]:

$$\tau_k = \frac{M_c}{W_k} \quad [\text{MPa}], \quad (3.12)$$

kde  $W_k$  [mm<sup>3</sup>] je modul průřezu v krutu v nejslabším (kritickém) místě.

Napětí  $\tau_k$  nesmí překročit dovolené napětí ve smyku  $\tau_{Dk}$  materiálu nástroje.

Vzorec (3.12) je pouze zjednodušenou variantou výpočtu smykového napětí a je platný pouze při splnění prutových předpokladů. Ty jsou ale na šroubovitém vrtáku v mnoha směrech porušeny: Nemá konstantní průřez

(zčásti válcová stopka, zčásti šroubovitě drážky, které mění tvar se zvětšujícím se jádrem) a podél šroubovitých drážek jsou průřezy natočené. Proto pro exaktnější výpočet by bylo nutno brát integrální formu tohoto vztahu v závislosti na délce vrtáku a průřezových modulech v jednotlivých bodech.

Určení jednotlivých modulů průřezu šroubovitěho vrtáku stejně jako určení kritického místa je vzhledem ke geometrii vrtáku taktéž velice obtížné. Obrobené plochy šroubovitých drážek jsou obálkou pohybu nástroje a tedy empirické. Z nich vycházející křivky řezu jsou pak také empirické a tudíž integrovatelné pouze některou z numerických metod. Pro přesnější výsledky je vhodné využít výpočetní software pracující metodou konečných prvků (MKP).

Studie pomocí výpočetních softwaru pracujících metodou konečných prvků ukazují, že na torzní tuhost ( $\text{Nmm}^2\text{rad}^{-1}$ ) má vliv úhel sklonu šroubovitě drážky a také poměr tloušťky jádra k průměru vrtáku. Zvětšíme-li například tento poměr z 0,15 na 0,36, zvětší se torzní tuhost o 150% [5]. Větší poměr tloušťky jádra ovšem znamená větší posuvovou sílu (viz kap.3.1.3), která namáhá vrták na vzpěr.

### 3.2.2 Namáhání na vzpěr

U dlouhých štíhlých nástrojů, u kterých je nebezpečí ztráty stability, se provádí také kontrola na vzpěr. Následující postup ukazuje kontrolu vzpěrné stability prutů namáhaných tlakem. Šroubovitý vrták nesplňuje některé prutové předpoklady a tudíž je pro něj následující postup použitelný jen omezeně. Pro přesnější výsledky se opět doporučuje využít výpočtový software s MKP analýzou.

Nejprve se stanoví štíhlostní poměr [9]:

$$\lambda_p = \frac{L_0}{\sqrt{\frac{J_{\min}}{S}}} \quad [-], \quad (3.13)$$

kde  $L_0$  [mm] je tzv. vzpěrná délka nástroje, která se pro vrták bere jako délku vyložení volného konce nástroje od sklíčidla po špičku,

$J_{\min}$  [mm<sup>4</sup>] je minimální kvadratický moment průřezu,

$S$  [mm<sup>2</sup>] je plocha v nebezpečném průřezu.

Dále se určí mezní štíhlostní poměr:

$$\lambda_m = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_u}} \quad [-], \quad (3.14)$$

kde  $E$  [MPa] je modul pružnosti materiálu nástroje v tahu,

$\sigma_u$  [MPa] je napětí na mezi úměrnosti materiálu nástroje.

Je-li:

- $\lambda_p < 0,6\lambda_m$ , jde o případ namáhání prostým tlakem a vzpěrnou stabilitu není potřeba kontrolovat,

- $0,6\lambda_m < \lambda_p < \lambda_m$ , je dovolená osová síla dána vztahem [9]:

$$F_D = \frac{S}{k_k} (3,1 - 0,0114\lambda_p) \quad [\text{N}], \quad (3.15)$$

kde  $k_k [-]$  je koeficient bezpečnosti (volí se 2,5 až 3,5).

Posuvová síla  $F_f$  pak nesmí překročit dovolenou osovou sílu  $F_D$ .

- $\lambda_p \geq \lambda_m$ , dojde pro  $F_f \geq F_{kr}$  ke ztrátě vzpěrné stability.  $F_{kr}$  je kritická síla dána Eulerovým vztahem [9]:

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{L_0^2} \quad [\text{N}]. \quad (3.16)$$

Hodnota dovolené síly je [9]:

$$F_D = \frac{F_{kr}}{k_k} \quad [\text{N}], \quad (3.17)$$

kde součinitel bezpečnosti se volí  $k_k \geq 3,5$ .

## 4 ANALÝZA VRTÁKU CZ001

Pro experimentální zjištění průběhu řezného momentu a posuvové síly podél hlavního a příčného ostří, působíště řezné síly a pro napěťovou analýzu byl použit vrták Ø6 mm s geometrií CZ001 české firmy NÁSTROJE CZ, s.r.o. Tento vrták vynikl svými kvalitami již v předchozích testech, prováděných na Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojního inženýrství, VUT v Brně. Základní charakteristiky a rozměry této vývojové řady jsou uvedeny v přílohách 1 a 2.

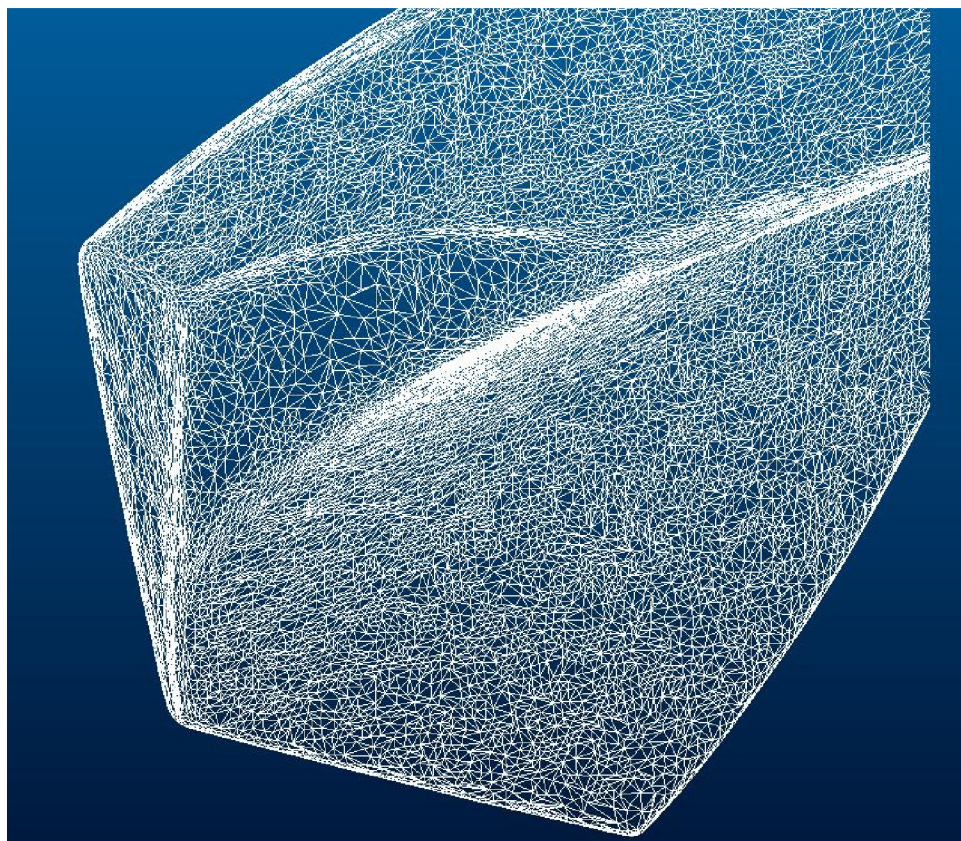
CAD software použitý pro analýzu byl Pro/ENGINEER verze Wildfire 4.0 a jeho výpočtová nadstavba Pro/MECHANICA. Statistické hodnoty, grafy a tabulky byly zpracovány programem EXCEL.

### 4.1 Geometrie vrtáku CZ001

#### EXPERIMENT Č.1 :

##### Popis experimentu:

Vrták byl naskenován specializovanou firmou do formátu STL - stereolitography (snímky z průběhu skenování viz příloha 3). Tento formát je tvořen pouze obalovou plochou tělesa vytvořenou pomocí triangulace (obr.4.1). Použitá přesnost skenování byla 0,007mm. Formát STL dovoluje vytvářet řezy a odměřovat v nich, což umožnilo získat následující hodnoty.



Obr. 4.1 Ukázka povrchu naskenovaného vrtáku

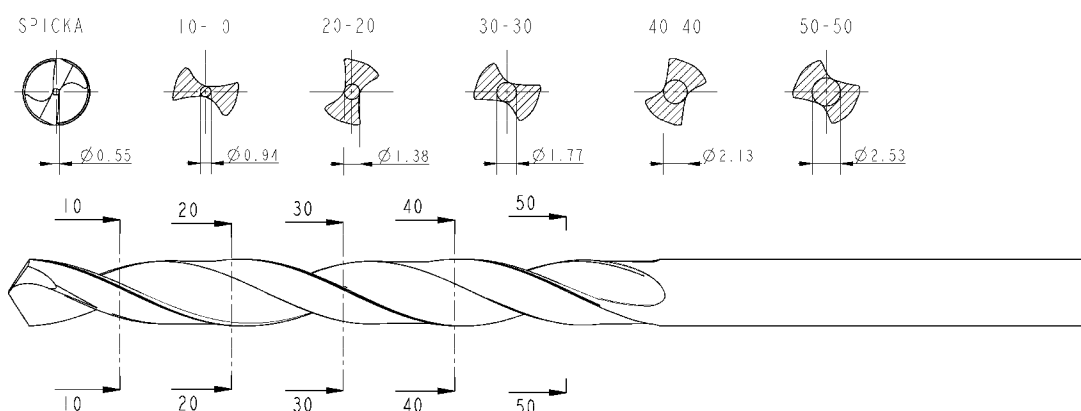


**Výsledky:****1. Hlavní rozměry:**

Průměr:	6 mm
Celková délka:	93 mm
Délka šroubovitých drážek:	57 mm
Úhel špičky:	118°
Úhel stoupání šroubovic:	25,6°

**2. Tloušťka jádra:**

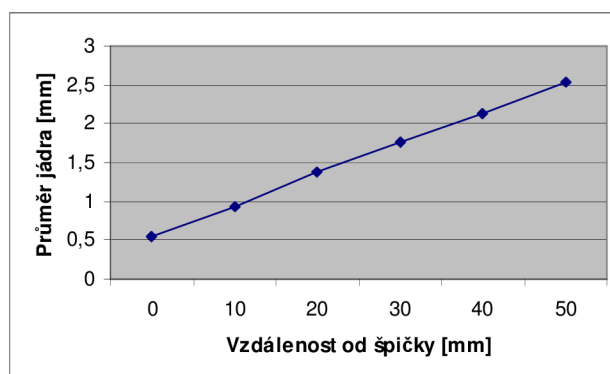
Tloušťka jádra byla měřena v intervalech po 10 mm do vzdálenosti 50 mm od špičky vrtáku (obr.4.2). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.1. a jejich průběh je na obrázku 4.3. Kuželovitost jádra je 1:25.



Obr. 4.2 Měření tloušťky jádra vrtáku

Tab.4.1. Průměr jádra

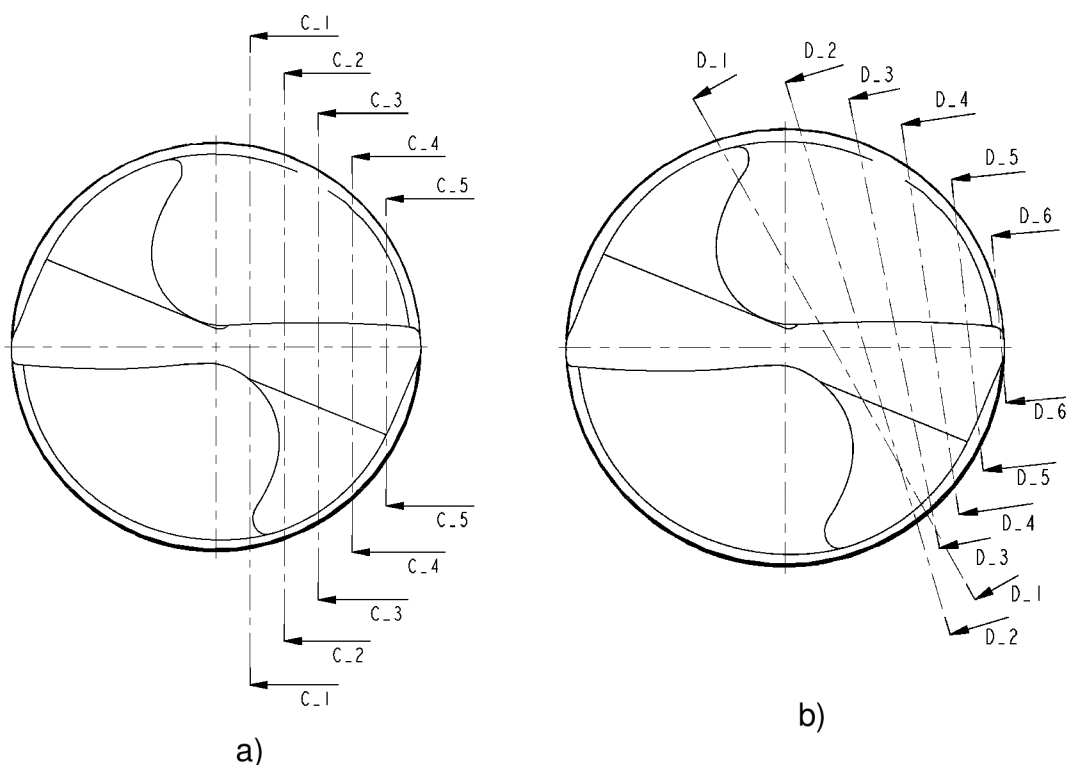
Vzdálenost od špičky [mm]	Průměr [mm]
0	0,55
10	0,94
20	1,38
30	1,77
40	2,13
50	2,53



Obr. 4.3 Průměr jádra v závislosti na vzdálenosti od špičky vrtáku

### 3. Geometrie hlavního ostří:

Úhly hřbetu, břitu a čela byly měřeny dvojím způsobem. V rovinách navzájem rovnoběžných (obr.4.4a) a v rovinách obsahujících vektor řezné rychlosti (obr.4.4b).

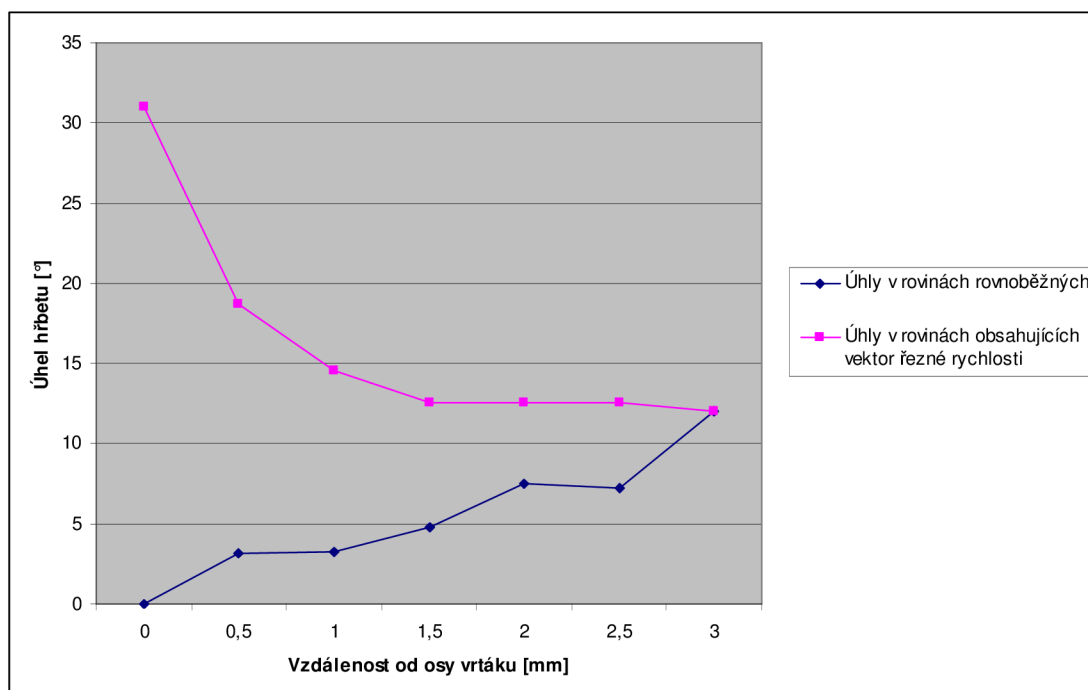


Obr. 4.4 Řezy při měření úhlu čela, hřbetu a břitu

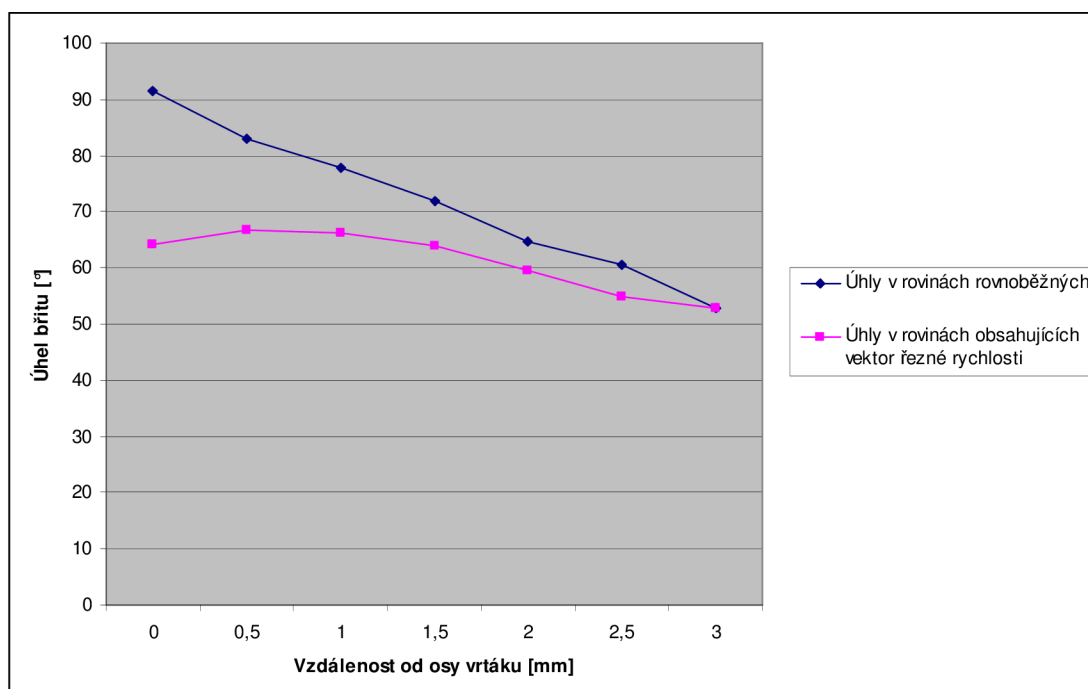
Roviny řezu byly vedeny v bodech hlavního ostří vrtáku vždy po 0,5mm od osy vrtáku až po jeho obvod. Hodnoty všech měřených úhlů jsou uvedeny v tabulce 4.2. Srovnání obou měřených hodnot jsou uvedena v grafech na obrázcích 4.5 až 4.7. Z průběhu hodnot je vidět, že je nutné pro geometrii vrtáku uvažovat uhly v rovinách, jež obsahují vektor řezné rychlosti. Tyto uhly nejen že ovlivňují řezný proces, ale je patrné, že úhel břitu se příliš nemění a úhel hřbetu směrem k jádru neklesá.

Tab. 4.2 Naměřené hodnoty úhlů hřbetu, břitu a čela

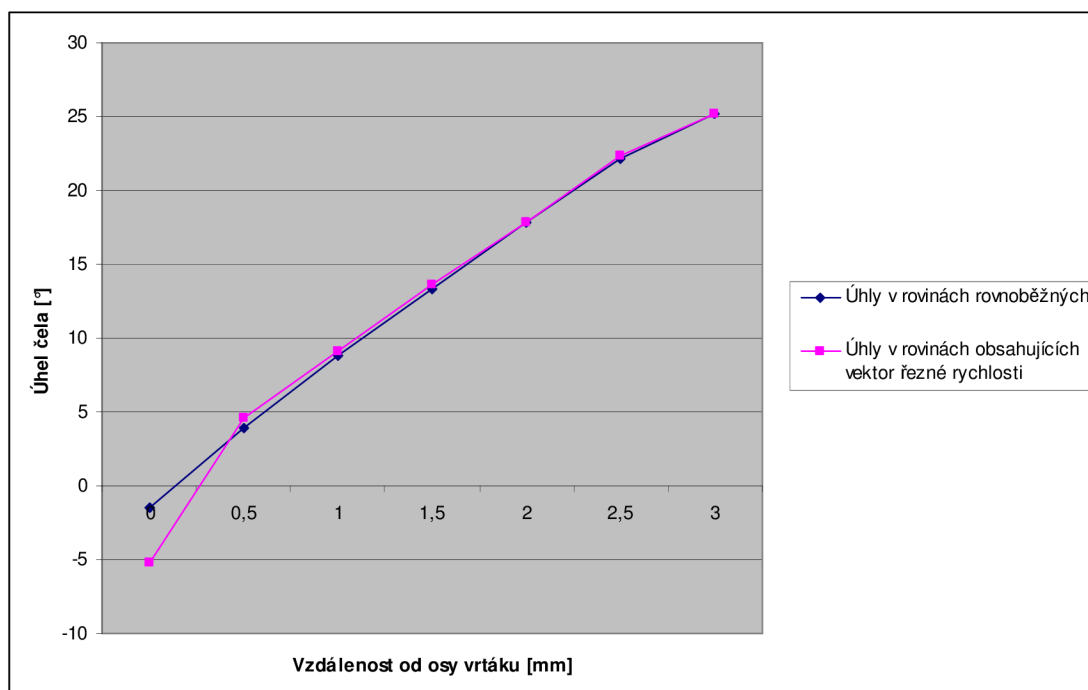
VZDÁLENOST OD OSY	ÚHLY MĚŘENÉ V ROVINÁCH NAVZÁJEM ROVNOBĚŽNÝCH			ÚHLY MĚŘENÉ V ROVINÁCH OBSAHUJÍCÍCH VEKTOR ŘEZNÉ RYCHLOSTI		
	HŘBETU	BŘITU	ČELA	HŘBETU	BŘITU	ČELA
	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]
0	0	91,5	-1,5	31	64,2	-5,2
0,5	3,2	82,9	3,9	18,7	66,7	4,6
1	3,3	77,9	8,8	14,6	66,3	9,1
1,5	4,8	71,9	13,3	12,6	63,8	13,6
2	7,5	64,7	17,8	12,6	59,6	17,8
2,5	7,2	60,6	22,2	12,6	55	22,4
3	12	52,8	25,2	12	52,8	25,2



Obr. 4.5 Úhel hřbetu podél hlavního ostří



Obr. 4.6 Úhel břitu podél hlavního ostří



Obr. 4.7 Úhel čela podél hlavního ostří

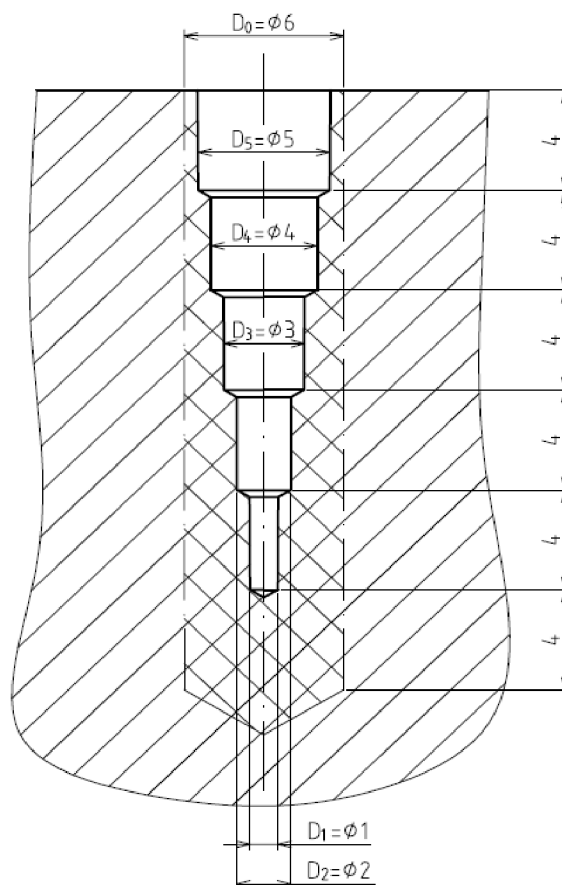
## 4.2 Analýza průběhu sil podél hlavního a příčného ostří

### EXPERIMENT Č.2 :

#### Popis experimentu:

Vrtákem Ø6 mm geometrie CZ001 bylo vrtáno do osazené díry s odstupňovanými průměry po jednom milimetru s hloubkou každého osazení 4 mm (obr.4.8). V průběhu vrtání byla zaznamenávána hodnota řezného momentu a posuvové síly. Řezné podmínky a použité stroje a přístroje při experimentu byly:

- řezná rychlost:  $v_c = 30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
- posuv:  $f = 0,12 \text{ mm}$
- materiál: 12050.3
- stroj: konzolová vertikální frézka FV 25 CNC, s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530, výrobce O.S.O., spol. s r.o., Olomouc
- měřidlo: piezoelektrický křemíkový dynamometr KISTLER 9272, vybavený dvěma nábojovými zesilovači KISTLER 9011A, plně řízenými PC
- chlazení: ECOCOOL 68 CF-2 - pro výkonné vrtání, o koncentraci 5%, výrobce FUCHS, Brno



Obr. 4.8 Odstupňování děr při testu

**Výsledky:****1. Rozbor měření:**

Způsob měření řezného momentu a posuvové síly byl zvolen tak, aby ukázal vliv proměnlivé geometrie břitu a jádra vrtáku na velikost obou veličin.

Předpokládá se, že obráběný materiál je homogenní a tudíž je jeho řezný odpor v celém jeho průřezu stejný. Řezný odpor materiálu vytváří spojitě zatížení břitu vrtáku celým průřezem třísky, avšak toto zatížení není konstantní vzhledem k proměnné geometrii břitu a proměnným řezným podmínkám.

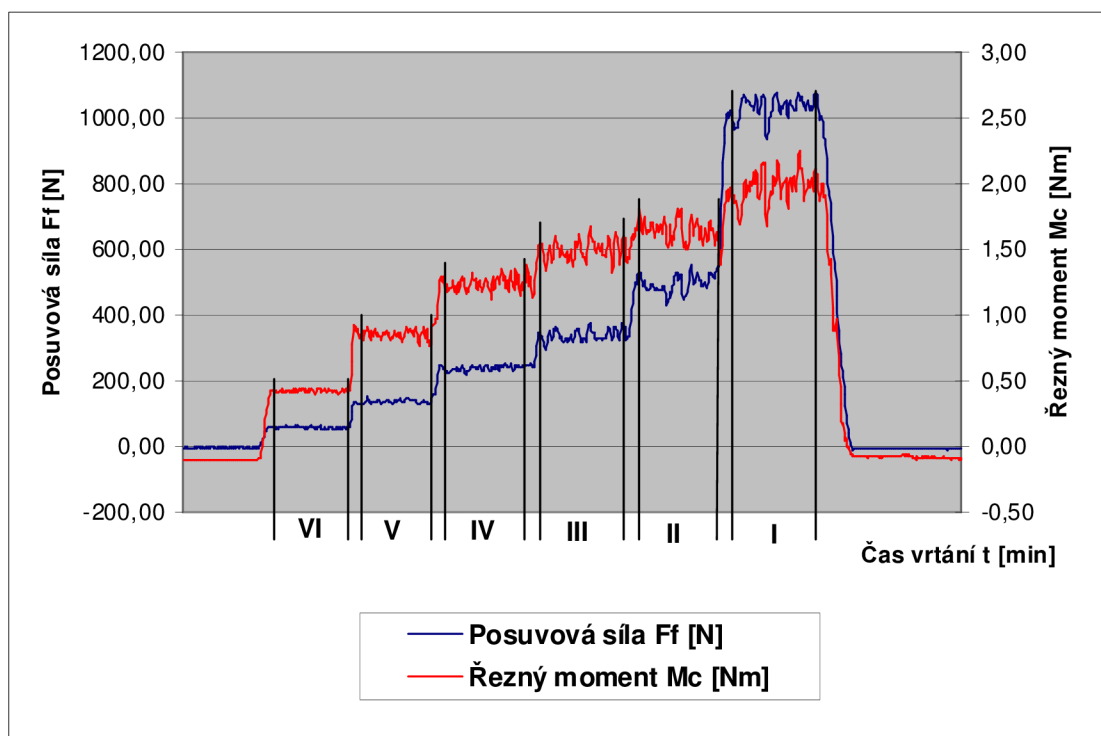
Odstupňování děr umožňuje získat pouze diskrétní hodnoty obou měřených veličin, avšak trend změny hodnot těchto veličin v závislosti na velikosti a poloze odebírané třísky by měl být patrný.

*Poznámka 1:* Při vyhodnocování jsou z důvodu názornosti a přehlednosti použity spojnicové grafy, ačkoliv naměřené hodnoty jsou diskrétní.

*Poznámka 2:* Každý z grafů výsledných hodnot je pro názornost doplněn hodnotou 0 (N, Nm) na konci ostří vrtáku, ačkoliv tato hodnota není v následujících tabulkách uváděna.

## 2. Naměřené hodnoty:

Experiment byl prováděn 5-krát a při každém pokusu byla zaznamenávána posuvová síla a řezný moment v závislosti na čase (obr.4.9). Z výsledných hodnot, popřípadě grafů je patrný začátek a konec záběru vrtáku v každém osazení, popřípadě náběh do plného materiálu. Tím bylo možno stanovit začátky a konce intervalů I až VI pro danou část hodnot (obr.4.9).



Obr. 4.9 Příklad záznamu hodnot měření

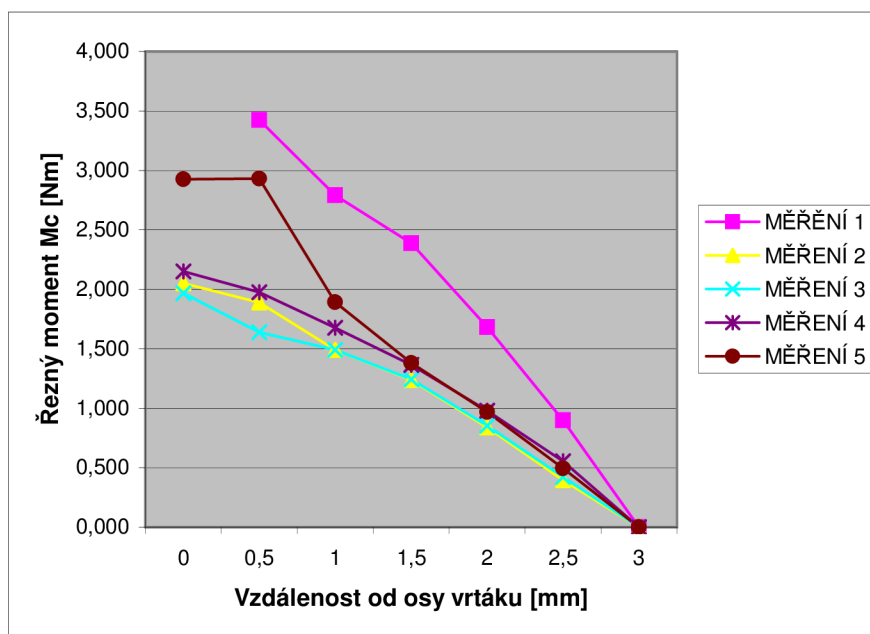
Grafy všech měření jsou uvedeny v příloze 4. Průměrné hodnoty  $\mu_{M_i}$  řezného momentu  $M_c$  a směrodatné odchylky  $\sigma_{SM_i}$  jednotlivých měření jsou uvedeny v tabulce 4.3. Průměrné hodnoty  $\mu_{F_i}$  posuvové síly  $F_f$  a směrodatné odchylky  $\sigma_{SF_i}$  jednotlivých měření jsou uvedeny v tabulce 4.4. Hodnoty jsou seřazeny dle intervalů I až VI (viz obr.4.9). Průběhy průměrných hodnot všech měření jsou uvedeny na obrázku 4.10, resp. 4.11.

Tab. 4.3 Naměřené hodnoty řezného momentu  $M_c$

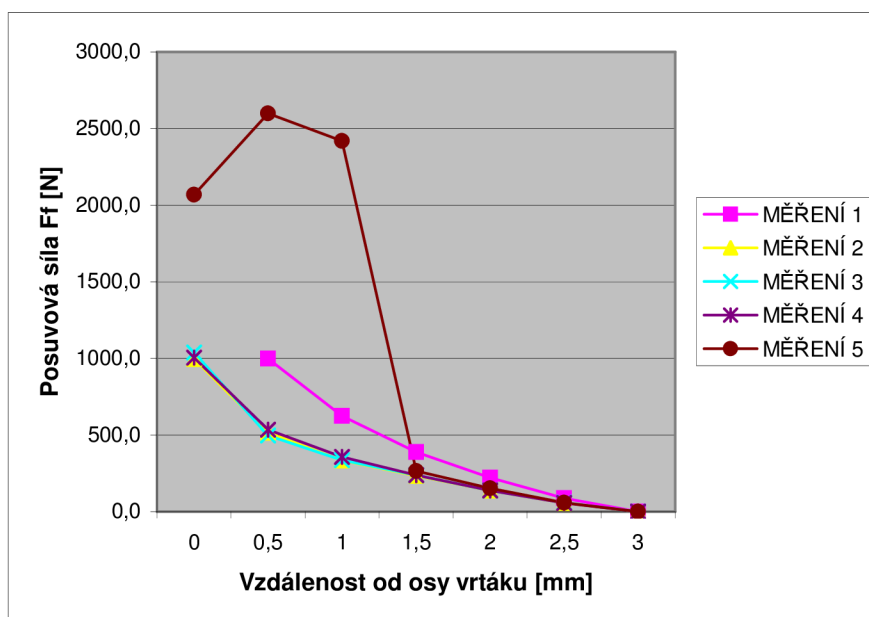
INTERVAL	MĚŘENÍ 1		MĚŘENÍ 2		MĚŘENÍ 3		MĚŘENÍ 4		MĚŘENÍ 5	
	$\mu_{M1}$	$\sigma_{SM1}$	$\mu_{M2}$	$\sigma_{SM2}$	$\mu_{M3}$	$\sigma_{SM3}$	$\mu_{M4}$	$\sigma_{SM4}$	$\mu_{M5}$	$\sigma_{SM5}$
	[Nm]	± [Nm]	[Nm]	± [Nm]	[Nm]	± [Nm]	[Nm]	± [Nm]	[Nm]	± [Nm]
I			2,052	0,094	1,967	0,122	2,150	0,067	2,927	0,099
II	3,423	0,358	1,889	0,117	1,640	0,075	1,976	0,078	2,931	0,272
III	2,790	0,108	1,492	0,064	1,492	0,073	1,678	0,098	1,892	0,254
IV	2,388	0,044	1,238	0,046	1,243	0,050	1,364	0,042	1,380	0,051
V	1,683	0,035	0,839	0,024	0,855	0,033	0,979	0,028	0,968	0,044
VI	0,899	0,013	0,397	0,011	0,422	0,011	0,555	0,010	0,497	0,014

Tab. 4.4 Naměřené hodnoty posuvové síly  $F_f$ 

INTERVAL	MĚŘENÍ 1		MĚŘENÍ 2		MĚŘENÍ 3		MĚŘENÍ 4		MĚŘENÍ 5	
	$\mu_{F1}$	$\sigma_{SF1}$	$\mu_{F2}$	$\sigma_{SF2}$	$\mu_{F3}$	$\sigma_{SF3}$	$\mu_{F4}$	$\sigma_{SF4}$	$\mu_{F5}$	$\sigma_{SF5}$
	[N]	± [N]	[N]	± [N]	[N]	± [N]	[N]	± [N]	[N]	± [N]
I			995,8	9,4	1039,3	20,4	1005,5	20,5	2068,6	75,7
II	999,5	0,0	515,9	31,3	498,0	18,8	534,5	21,2	2599,9	454,3
III	624,7	14,4	334,3	15,4	336,8	15,7	356,8	25,8	2418,7	1701,6
IV	389,6	13,5	233,9	8,4	238,0	6,8	237,4	9,8	265,7	25,7
V	221,7	8,6	138,1	4,1	137,3	5,2	137,9	7,8	153,0	13,6
VI	87,1	3,0	57,0	1,7	57,6	2,5	56,5	2,6	58,0	3,6



Obr. 4.10 Průběhy řezných momentů pro jednotlivá měření



Obr. 4.11 Průběhy posuvových sil pro jednotlivá měření

### 3. Průměrné hodnoty a jejich průběhy:

Hodnoty v intervalu I při prvním měření nejsou uvedeny, neboť byl během měření zlomen vrták. Výsledky měření 5 značně neodpovídají výsledkům měření 2 až 4 (viz grafy v příloze 4). Mohlo dojít :

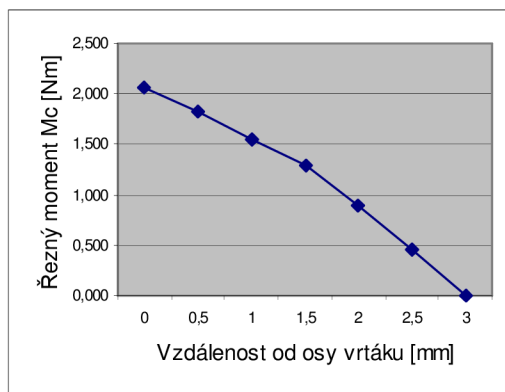
- k ucpání drážek vrtáku třískami,
- k nevhodnému záběru vrtáku do třísek spadlých na dno předvrtané díry během vrtání prvních osazení.

Proto jsou pro vyhodnocení a následné výpočty brány pouze výsledky měření 2 až 4.

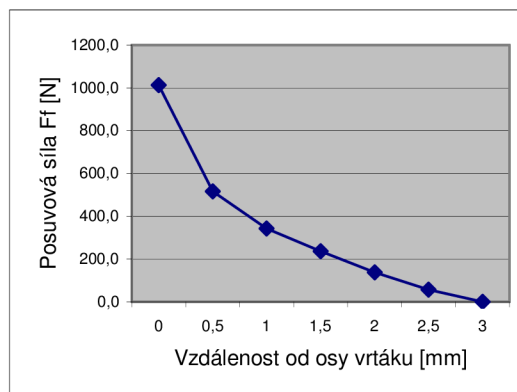
Celkové průměrné hodnoty  $\mu_M$  rezného momentu  $M_c$  a  $\mu_F$  posuvové síly  $F_f$  a jejich směrodatných odchylek  $\sigma_{SM}$  a  $\sigma_{SF}$  jsou dány výsledky měření 2 až 4 a jsou uvedeny v tabulce 4.5. Průběhy hodnot  $\mu_M$  a  $\mu_F$  v závislosti na vzdálenosti od osy vrtáku znázorňují obrázky 4.12 a 4.13.

Tab. 4.5 Celkové průměrné hodnoty měření

INTERVAL	Řezný moment $M_c$		Posuvová síla $F_f$	
	$\mu_M$	$\sigma_{SM}$	$\mu_F$	$\sigma_{SF}$
	[Nm]	± [Nm]	[Nm]	± [Nm]
I	2,057	0,122	1013,5	25,6
II	1,835	0,169	516,2	28,5
III	1,554	0,118	342,6	22,0
IV	1,281	0,074	236,4	8,6
V	0,891	0,069	137,8	5,9
VI	0,458	0,070	57,0	2,3



Obr. 4.12 Průběh rezného momentu



Obr. 4.13 Průběh posuvové síly

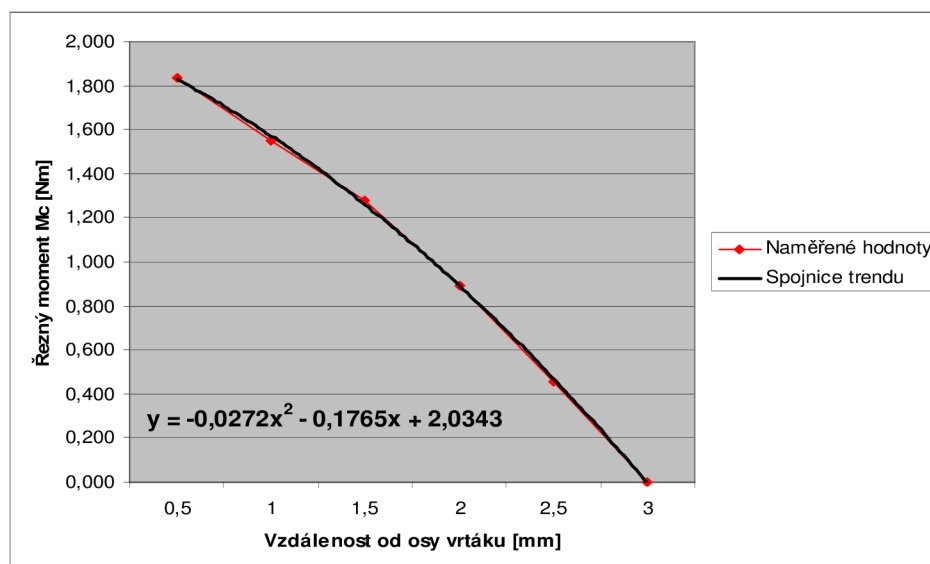
### 4. Hodnocení průběhu rezného momentu a vlivu jádra vrtáku:

Z grafu na obrázku 4.12. je patrný lineární nárůst rezného momentu mezi body 3 a 1,5 a dále zpomalení jeho nárůstu směrem k ose vrtáku. Přírůstek mezi hodnotami na intervalech I a II je

$$\Delta M_c = 2,057 - 1,083 = 0,222 \text{ Nm, což je } \frac{0,222}{2,057} \cdot 100 = 10,8 \%$$



Vliv jádra vrtáku lze také ukázat pomocí extrapolace spojnice trendu. Hodnoty intervalů II až VI jsou velmi dobře proloženy polynomickou spojnici trendu stupně dva, jak ukazuje obrázek 4.14 i s rovnicí regrese.



Obr. 4.14 Spojnice trendu hodnot  $M_c$  intervalů II až VI

Z rovnice regrese vyplývá, že hodnota spojnice trendu v bodě 0 je 2,0343Nm. Rozdíl mezi touto extrapolovanou hodnotou a naměřenou hodnotou je

$$2,057 - 2,0343 = 0,022 \text{ Nm},$$

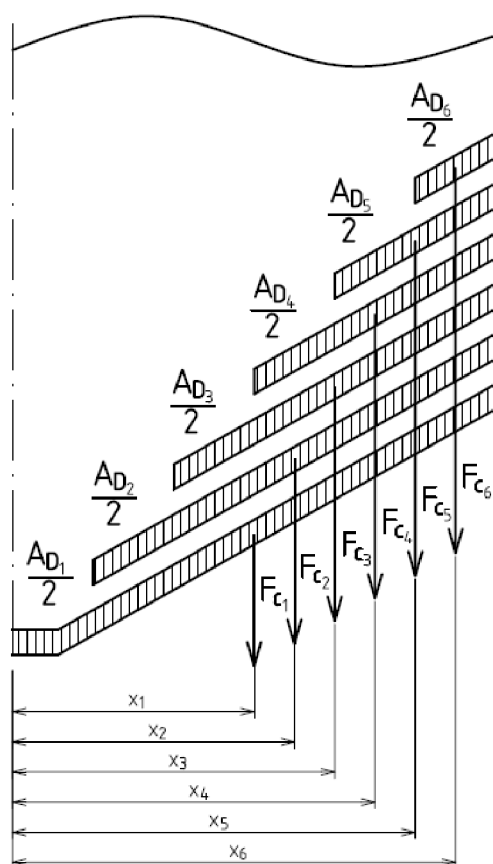
což je plně v intervalu rozptylu měřené hodnoty (tab.4.4). Záběrem do jádra tedy nedojde u tohoto vrtáku k prudké změně řezného momentu.

Průběh řezného momentu lze také srovnat s teoretickým zatížením břitu vrtáku měrným řezným odporem. Hodnota měrného řezného odporu  $k_{c1}$  pro testovaný materiál 12050.3 je 1800MPa [2]. Vzhledem k velmi malé tloušťce třísky, je nutné přepočíst tuto hodnotu dle vztahu [2]:

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_D^{mc}} = \frac{k_{c1}}{\left(\frac{f}{2} \cdot \sin \kappa_r\right)^{mc}} \quad [\text{MPa}], \quad (4.1)$$

kde  $mc$  [-] je exponent závislý na fyzikálních vlastnostech materiálu obrobku a řezných podmínkách. Pro testovaný materiál je  $mc = 0,25$  [2]. Hodnota měrného řezného odporu tedy je

$$k_c = \frac{k_{c1}}{\left(\frac{f}{2} \cdot \sin \kappa_r\right)^{mc}} = \frac{1800}{\left(\frac{0,12}{2} \cdot \sin 59^\circ\right)^{0,25}} = 3779,8 \text{ MPa}.$$

Obr. 4.15 Působíště jednotlivých sil  $F_{ci}$ 

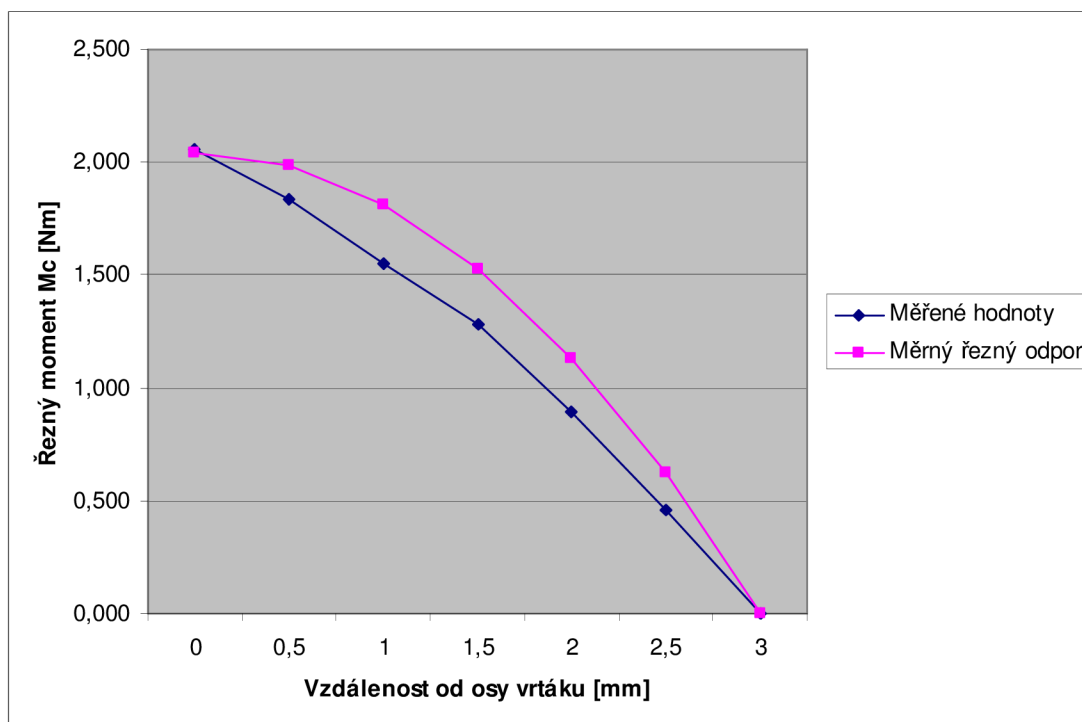
Průřezy třísek  $A_{D_i}$  jednotlivých záběrů jsou dány vztahem (1.7). Hodnoty řezných sil  $F_{c_i}$  pro jednotlivé záběry jsou dány vztahem (3.8). Vzdálenost  $x_i$  těžiště jednotlivých průřezů třísek od osy vrtáku (obr.4.15) je dána vztahem

$$x_i = \frac{D_0 + D_i}{4} \quad [\text{mm}]. \quad (4.2)$$

Momenty  $M_{c_i}$  se stanoví dle vztahu (3.10). Hodnoty řezných sil jednotlivých záběrů a jejich momenty vzhledem k ose vrtáku jsou uvedeny v tabulce 4.6. Průběh řezných momentů společně s průběhem naměřených hodnot je na obrázku 4.16.

Tab. 4.6 Hodnoty vypočtené z měrného řezného odporu

INTERVAL	Průměr $D_i$ [mm]	Působíště síly $x_i$ [mm]	Průřez třísky $A_{D_i}$ [mm <sup>2</sup> ]	Síla $F_{c_i}$ [N]	Moment $M_{c_i}$ [Nm]
I	0	1,5	0,36	1360,7	2,041
II	1	1,75	0,30	1133,9	1,984
III	2	2	0,24	907,2	1,814
IV	3	2,25	0,18	680,4	1,531
V	4	2,5	0,12	453,6	1,134
VI	5	2,75	0,06	226,8	0,624



Obr. 4.16 Porovnání měřených hodnot se zatížením měrným řezným odporem

Z přírůstku hodnot směrem k ose vrtáku je z obou grafů na obrázku 4.16 patrný vliv jádra a proměnlivé geometrie břitu a řezných podmínek. Při teoretickém konstantním zatížení vrtáku měrným řezným odporem jsou přírůstky řezného momentu směrem k jádru stále menší, až u osy téměř nulové. Nárůst měřených hodnot je na vnější polovině vrtáku srovnatelný se zatížením měrným řezným odporem, avšak od poloviny průměru směrem k ose vrtáku je nárůst mnohem větší.

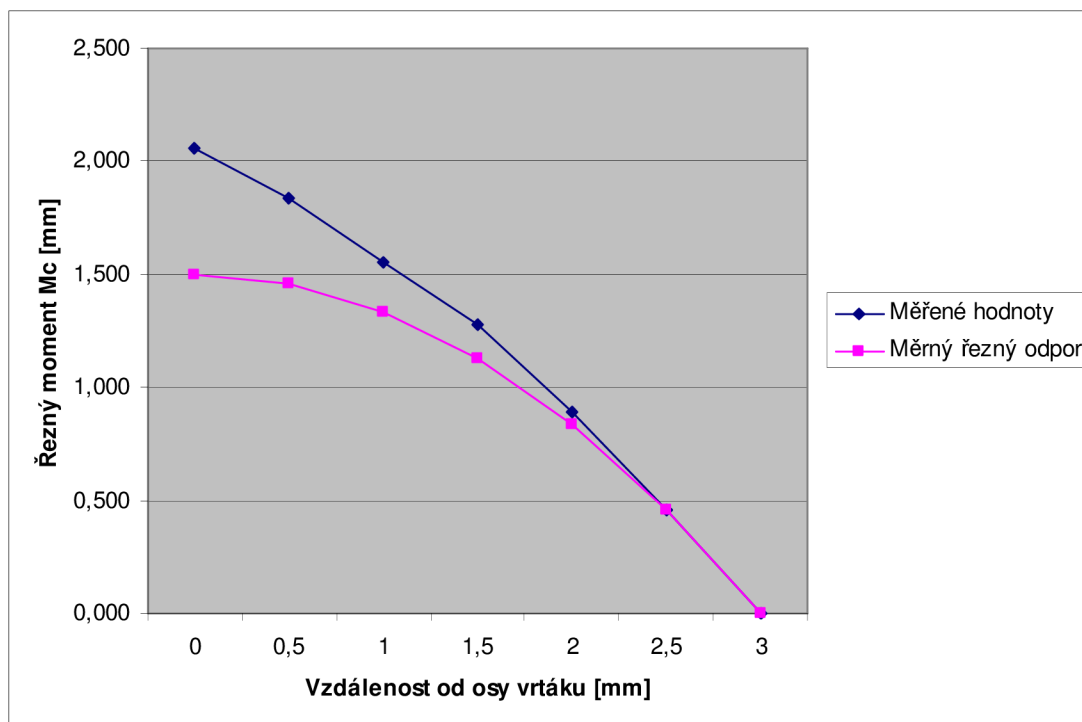
Použitá hodnota měrného řezného odporu je empirická a nezohledňuje proměnlivé řezné podmínky a geometrii břitu podél hlavního a příčného ostří vrtáku. Za předpokladu, že na obvodu vrtáku jsou řezné podmínky a geometrie břitu srovnatelné například se soustružením, lze z naměřené hodnoty při prvním záběru dopočítat přibližnou hodnotu měrného řezného odporu:

$$F_{c6} = \frac{M_6}{x_6} = \frac{0,458}{2,75} = 166,5 \quad \Rightarrow \quad k_c = \frac{F_{c6}}{A_D} = \frac{166,5}{0,06} = 2775 \text{ MPa.}$$

Hodnoty řezných momentů, dopočtené z tohoto korigovaného řezného odporu jsou uvedeny v tabulce 4.7 a grafy na obrázku 4.17.

Tab. 4.7 Hodnoty vypočtené z korigovaného měrného řezného odporu

INTERVAL	Průměr	Působíště síly	Průřez třísky	Síla	Moment
	$D_j$ [mm]	$x_r$ [mm]	$A_{Dj}$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_{ci}$ [N]	$M_{ci}$ [Nm]
I	0	1,5	0,36	999,0	1,498
II	1	1,75	0,30	832,5	1,457
III	2	2	0,24	666,0	1,332
IV	3	2,25	0,18	499,5	1,124
V	4	2,5	0,12	333,0	0,832
VI	5	2,75	0,06	166,5	0,458



Obr. 4.17 Porovnání měřených hodnot se zatížením korigovaným měrným řezným odporem

Rozdíl obou momentů v ose vrtáku je

$$\Delta M_c = 2,057 - 1,498 = 0,559 \text{ Nm, což je } \frac{0,559}{2,057} \cdot 100 = 27,2\%.$$

Dlouhodobé testy ukazují, že na jádro vrtáku připadá asi 20 až 30% řezného momentu. Zobecní-li se tyto výsledky na střední část vrtáku, tj. jádro a okolí jádra s nevhodnou geometrií břitu a řeznými podmínkami, pak je vypočtená hodnota 27,2% plně v tomto rozsahu.

### 5. Hodnocení průběhu řezné síly a vlivu jádra vrtáku:

Protože řezné podmínky ani geometrie břitu nejsou podél každého záběru konstantní, nebude ani působíště celkové řezné síly v těžišti průřezu třísky. Proto bude vhodné vypočítat řeznou sílu z přírůstku řezného momentu pro jednotlivé záběry

$$\Delta M_{ci} = M_{ci} - M_{c(i-1)} \text{ [Nm]}. \quad (4.3)$$

Působíště řezné síly každého přírůstku třísky pak bude v jeho těžišti

$$y_i = \frac{D_i + D_{i-1}}{4} \text{ [mm]}. \quad (4.4)$$

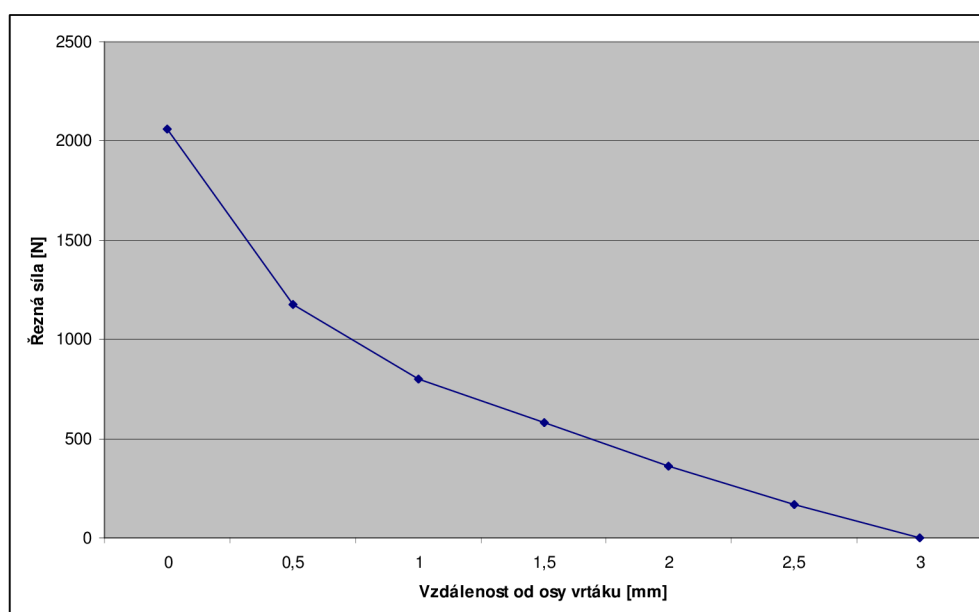
Řezná síla pro každý přírůstek se vypočte dle vzorce (3.10) a řezná síla pro každý záběr bude součtem předchozích přírůstků

$$F_{ci} = \sum_{k=i}^1 \Delta F_{ck} \text{ [N]}. \quad (4.5)$$

Hodnoty řezných sil vypočtené užitím vzorců (4.3) až (4.5) jsou uvedeny v tabulce 4.8.

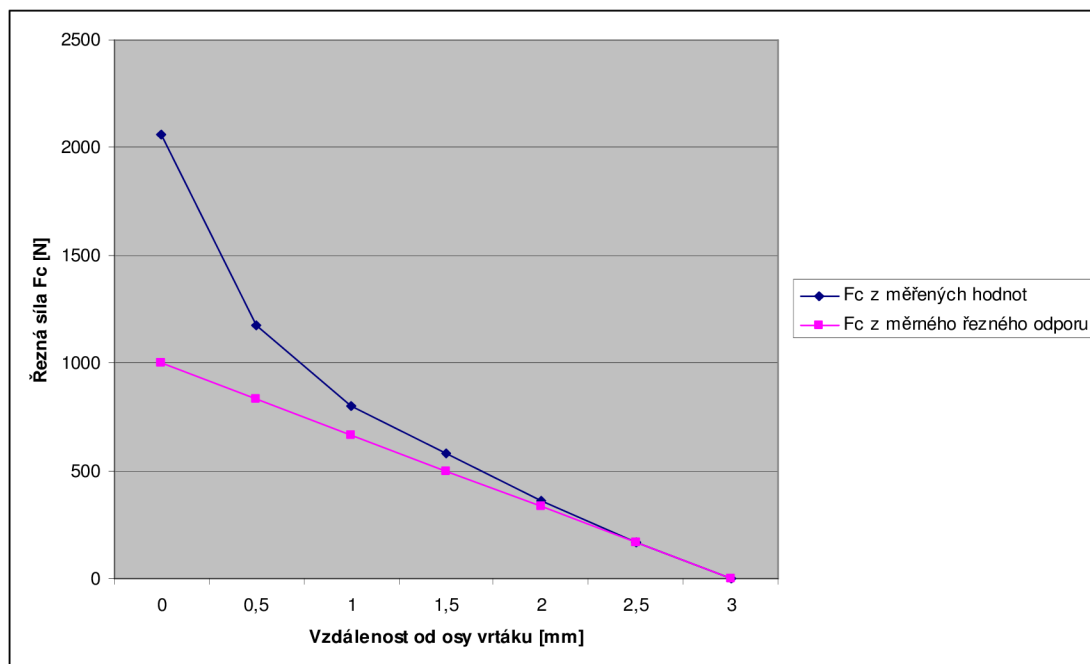
Tab. 4.8 Hodnoty řezných sil z měřených hodnot  $M_c$

INTERVAL	Působíště	Moment	Přírůstek momentu	Přírůstek síly	Síla
	$y_i$ [mm]	$M_{ci}$ [Nm]	$\Delta M_{ci}$ [Nm]	$\Delta F_{ci}$ [N]	$F_{ci}$ [N]
I	0,25	2,057	0,221	885,6	2060,8
II	0,75	1,835	0,281	375,3	1175,2
III	1,25	1,554	0,272	217,8	799,9
IV	1,75	1,281	0,390	223,1	582,1
V	2,25	0,891	0,433	192,5	359,0
VI	2,75	0,458	0,458	166,5	166,5

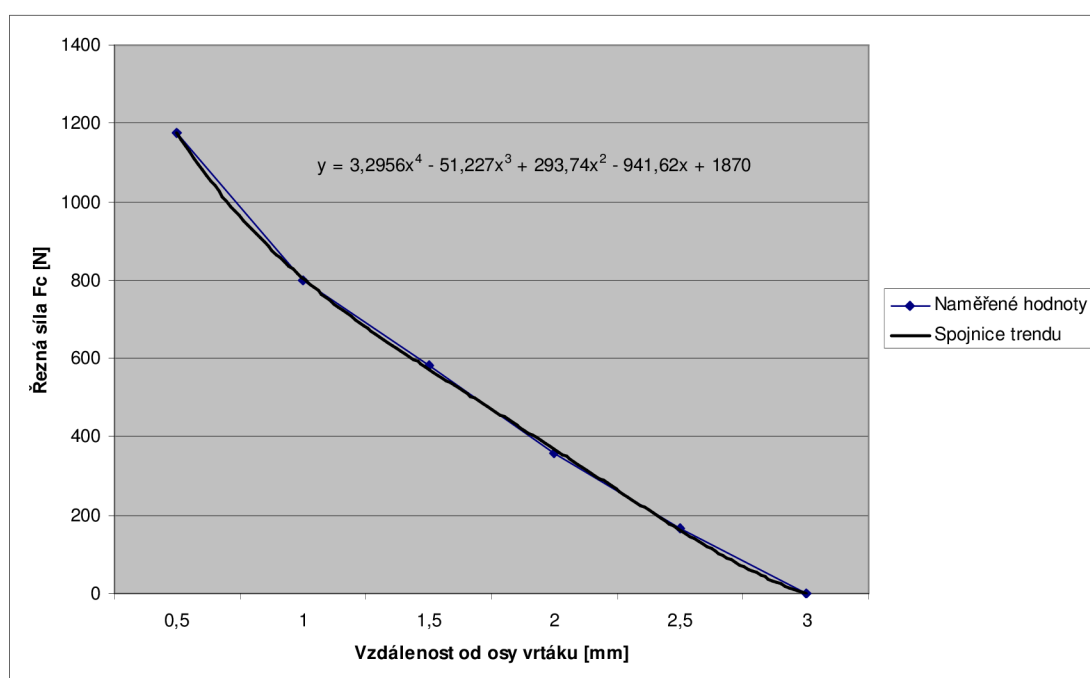


Obr. 4.18 Průběh řezné síly

Z průběhu řezné síly je patrný negativní vliv střední části vrtáku. Od obvodu do poloviny průměru vrtáku je nárůst lineární a zhruba odpovídá zatížení měrným řezným odporem (obr.4.19). Od poloviny k ose vrtáku se začíná projevovat nevhodná geometrie břitu a nevhodné řezné podmínky. V jádře řezná síla vzroste ještě rychleji, jak ukazuje spojnice trendu všech hodnot kromě jádra (obr.4.20).



Obr. 4.19 Porovnání průběhu řezné síly se zatížením měrným řezným odporem



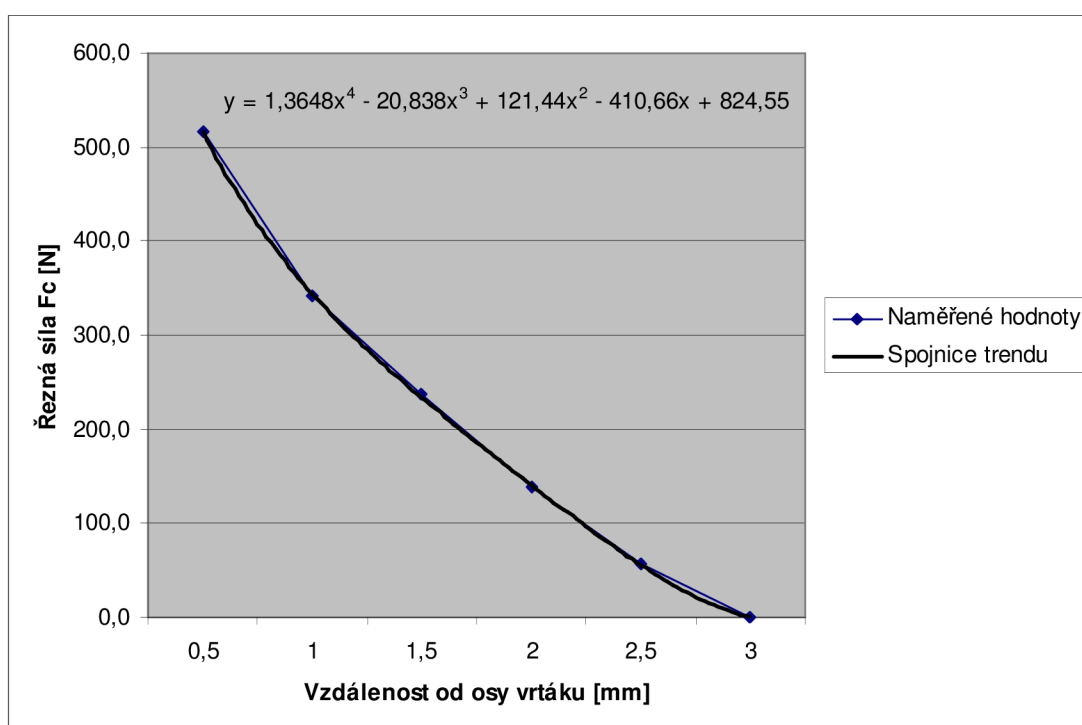
Obr. 4.20 Spojnice trendu hodnot  $F_c$  intervalů II až VI

### 6. Hodnocení průběhu posuvové síly a vlivu jádra vrtáku:

Průběh posuvové síly (obr.4.13, oddíl 3 této kapitoly) odpovídá předpokládanému průběhu (obr.3.4, kapitola 3.1.3). Vliv jádra na velikost posuvové síly je značný. Přírůstek mezi hodnotami na intervalech I a II je

$$\Delta F_f = 1013,5 - 516,2 = 497,3 \text{ N, což je } \frac{497,3}{1013,5} \cdot 100 = 49,1\%.$$

Vliv jádra lze taktéž ukázat pomocí spojnice trendu ostatních hodnot (obr.4.21). Rovnice regrese ukazuje, že bez vlivu jádra by byla celková hodnota posuvové síly 825N.



Obr. 4.21 Spojnice trendu hodnot  $F_f$  intervalů II až VI

### 7. Stanovení průběhu velikosti měrné energie při vrtání:

Měrná energie při vrtání, určená vzorcem (4.6), slučuje vliv řezného momentu i posuvové síly.

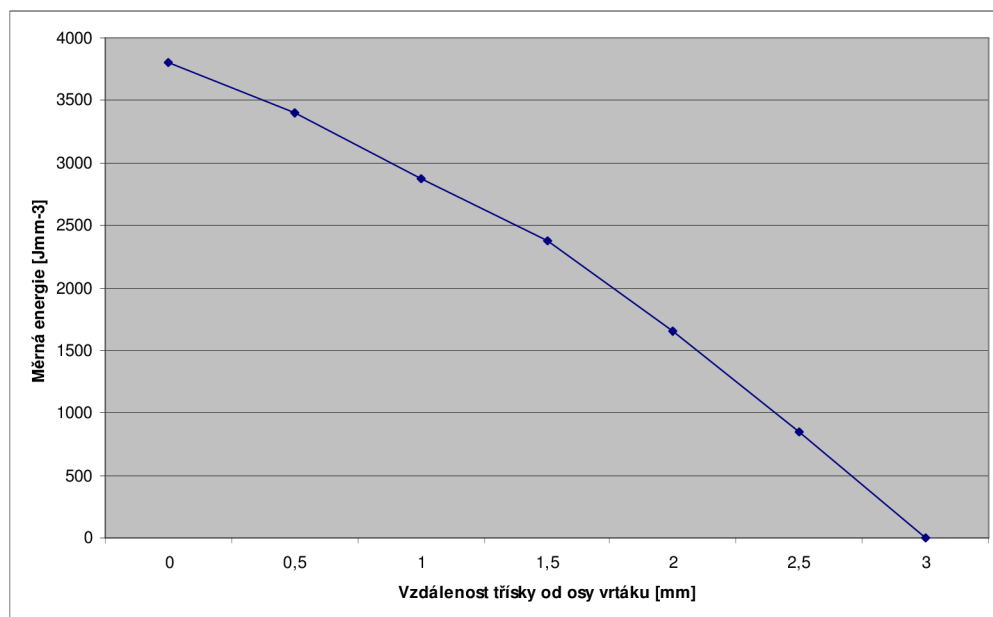
$$e_{c(i)} = \frac{1}{D^2} \cdot \left( 8 \cdot \frac{M_{c(i)}}{f} + 0,0012732 \cdot F_{f(i)} \right) [\text{Jmm}^{-3}]. \quad (4.6)$$

Vypočtené hodnoty měrných řezných energií pro jednotlivé záběry jsou v tabulce 4.9. Průběh těchto hodnot je na obrázku 4.22. Proložení spojnice trendu (obr.4.23) všech hodnot kromě jádra ukazuje, že rozdíl je

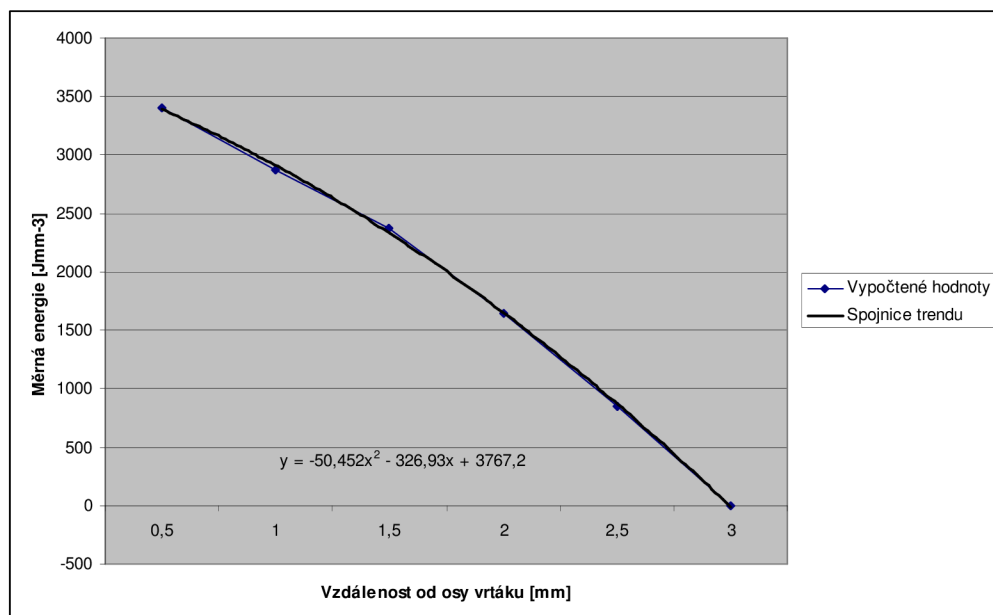
$$\Delta e_{c(i)} = 3808 - 3767 = 41 \text{ Jmm}^{-3}, \text{ což je } \frac{3767}{3808} \cdot 100 = 1\%.$$

Tab. 4.9 Hodnoty měrné energie při vrtání

INTERVAL	Měrná energie
	$e_{c(i)}$ [ $\text{Jmm}^{-3}$ ]
I	3808
II	3398
III	2877
IV	2373
V	1650
VI	848



Obr. 4.22 Průběh hodnot měrné energie při vrtání

Obr. 4.23 Spojnice trendu hodnot  $e_{c(i)}$  intervalů II až VI



### 4.3 Stanovení působíště celkové řezné síly

#### **EXPERIMENT Č.3 :**

##### **Popis experimentu:**

Stanovení působíště celkové řezné síly ze znalosti velikosti řezného momentu  $M_c$  a řezné síly  $F_c$ .

##### **Výsledky:**

Dle výsledků experimentu č.2 v kapitole 4.2 lze dopočítat působíště řezné síly, respektive jeho vzdálenost od osy vrtáku. Vzdálenost od osy se vypočte dle vztahu (3.10):

$$M_c = F_c \cdot x_M \quad \Rightarrow \quad x_M = \frac{M_c}{F_c} = \frac{2,057 \cdot 1000}{2060,8} = \underline{\underline{0,998\text{mm}}},$$

což odpovídá poměru

$$\frac{x_M}{R} = 0,333 \quad \Rightarrow \quad x_M \cong \frac{1}{3}R = \frac{D}{6}.$$

Z experimentu č.2 vyplývá, že klasický řezný proces se odehrává pouze na vnější polovině vrtáku, kde je působíště výslednice řezné síly velmi blízko těžišti průřezu třísky. Vzdálenost působíště řezných sil jednotlivých záběrů a jejich porovnání s těžišti průřezu třísek jsou uvedeny v následující tabulce 4.10.

Tab. 4.10 Rozdíl působíšť řezných sil a těžišť třísek

INTERVAL	Těžiště třísky	Působíště řezné síly	Rozdíl
	$x_i$ [mm]	$x_{Mi}$ [mm]	$\Delta x_{Mi}$ [mm]
I	1,5	0,998	0,502
II	1,75	1,562	0,188
III	2	1,942	0,058
IV	2,25	2,201	0,049
V	2,5	2,482	0,018
VI	2,75	2,750	0

#### **EXPERIMENT Č.4 :**

##### **Popis experimentu:**

Na základně známých hodnot z dlouhodobých testů, které ukazují, že na jádro vrtáku připadá 20 až 30% kroučícího momentu [2, 4], lze provést následující zjednodušený výpočet:

- rozdělit kroučící moment v poměru  $0,2M_c$  na jádro,  $0,8M_c$  na zbytek hlavního ostří,
- z těchto poměrů vypočítat síly v jádře a ve zbytku hlavního ostří,
- stanovit působíště výslednice obou sil.

**Výsledky:**

Výpočet lze zúžit pouze na jeden břít. Jelikož jádro tvoří zhruba 20% průměru vrtáku, jsou vzdálenosti jednotlivých sil od osy vrtáku následující (obr.4.24):

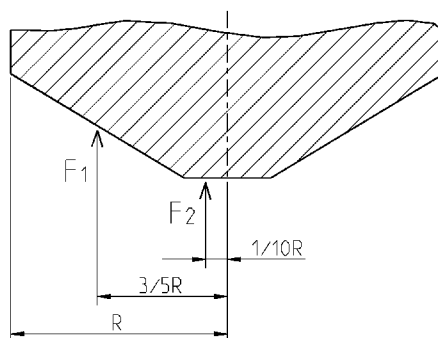
$$F_1 \rightarrow x_1 = \frac{3}{5}R, \quad F_2 \rightarrow x_2 = \frac{1}{10}R,$$

pak

$$0,8M_c = F_1 \cdot \frac{3}{5}R \Rightarrow F_1 = \frac{4}{3} \frac{M_c}{R},$$

$$0,2M_c = F_2 \cdot \frac{1}{10}R \Rightarrow F_2 = 2 \frac{M_c}{R},$$

$$F_c = F_1 + F_2 = \frac{4}{3} \frac{M_c}{R} + 2 \frac{M_c}{R} = \frac{10}{3} \frac{M_c}{R}.$$



Obr. 4.24 Vzdálenosti sil  $F_1$  a  $F_2$  od osy vrtáku

Působíště celkové řezné síly pak je

$$M_c = F_c \cdot x_M \Rightarrow x_M = \frac{M_c}{F_c} = \frac{M_c}{\frac{10}{3} \frac{M_c}{R}} = \frac{3}{10}R = \underline{\underline{0,3R}}.$$

## 4.4 Analýza napětí a deformace

### **EXPERIMENT Č.5 :**

#### **Popis experimentu:**

Aplikace znalostí průběhů řezné a posuvové síly podél hlavního a příčného ostří pro provedení napěťové a deformační analýzy vrtáku. Analýza je provedena programem ProEngineer a jeho výpočtovou nadstavbou ProMECHANICA, která pracuje metodou geometrických prvků.

#### **Výsledky:**

3D model byl sestaven na základě naskenované plochy z experimentu č.1. Odchytky hladkého sestaveného modelu od původního skenu jsou řádově v setinách milimetru (obr.4.25, kde jsou vidět i stopy po obrábění).



Obr. 4.25 Proložení skenu hladkým modelem

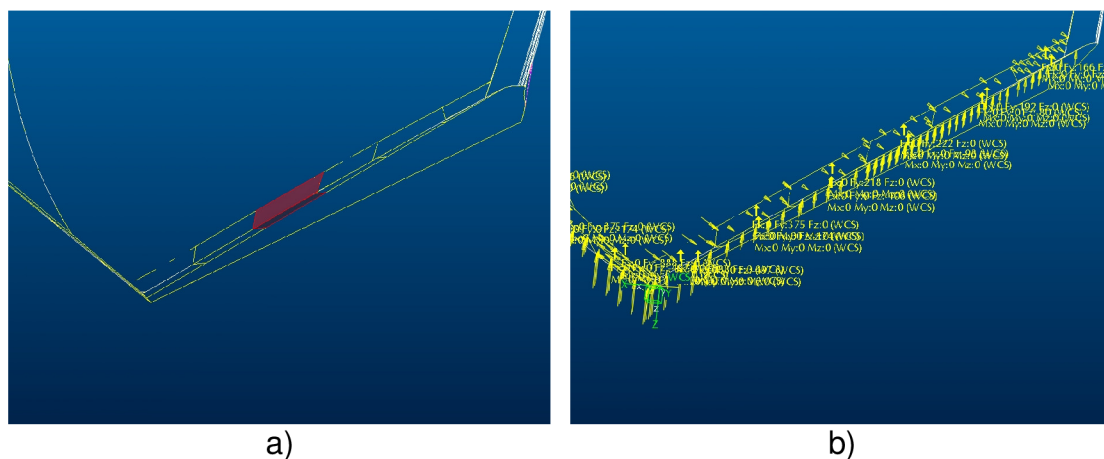
Kontaktní plocha třísky houževnatých materiálů s čelem nástroje je přibližně dvojnásobek tloušťky třísky [11]. Kontaktní plocha třísky a nástroje se skládá ze dvou oblastí – oblast, která způsobuje řez a formování třísky, a oblast po které tříska pouze tře a odchází. Oblast, která způsobuje řez a formování třísky, je u houževnatých materiálů rovna přibližně tloušťce třísky [11].

Na modelu tedy byla vytvořena kontaktní plocha nástroje s třískou, jejíž velikost byla tloušťka třísky, a ta byla navíc rozdělena na jednotlivé záběry dle experimentu č.2 (obr.4.26a). Na tyto připravené plochy pak byly podle výsledků z experimentu č.2 aplikovány síly jednotlivých záběrů (obr.4.26b).

Pro zadávání sil byl použit zjednodušený model, kdy řezné síly jednotlivých záběrů byly zadány kolmo k ose vrtáku. Materiálové konstanty materiálu vrtáku byly použity:

$$E = 240 \text{ GPa,}$$

$$\mu = 0,3.$$

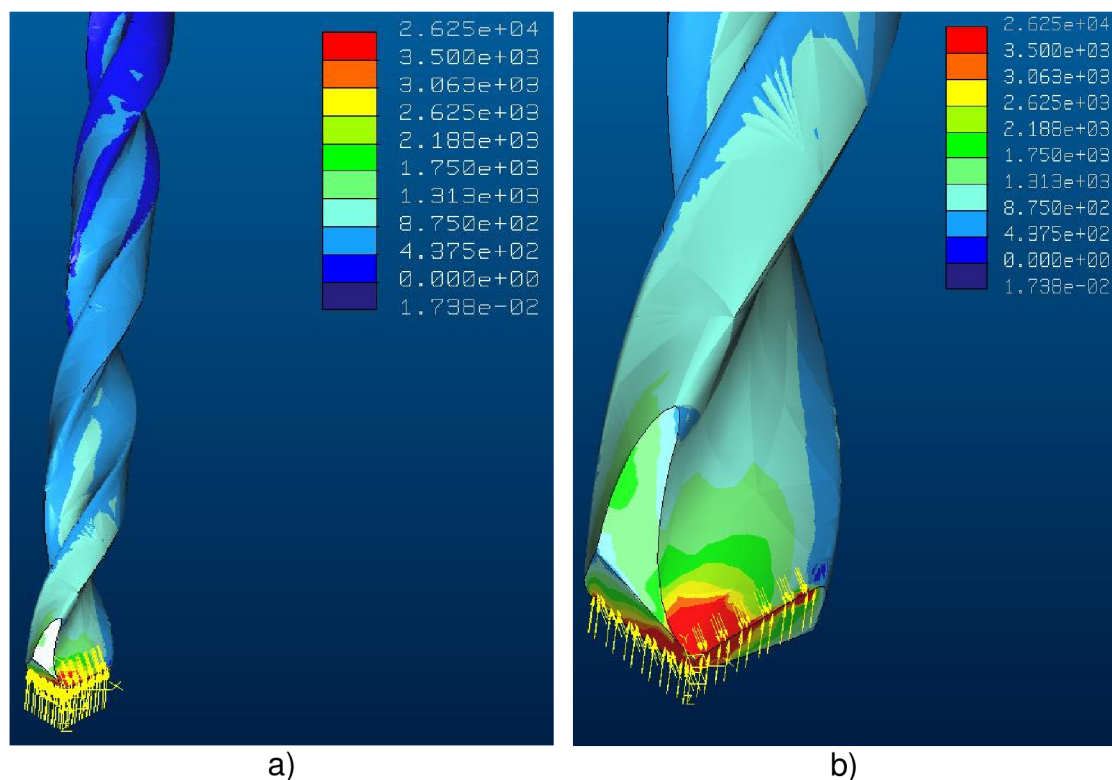


a)

b)

Obr. 4.26 Aplikace naměřených sil na model

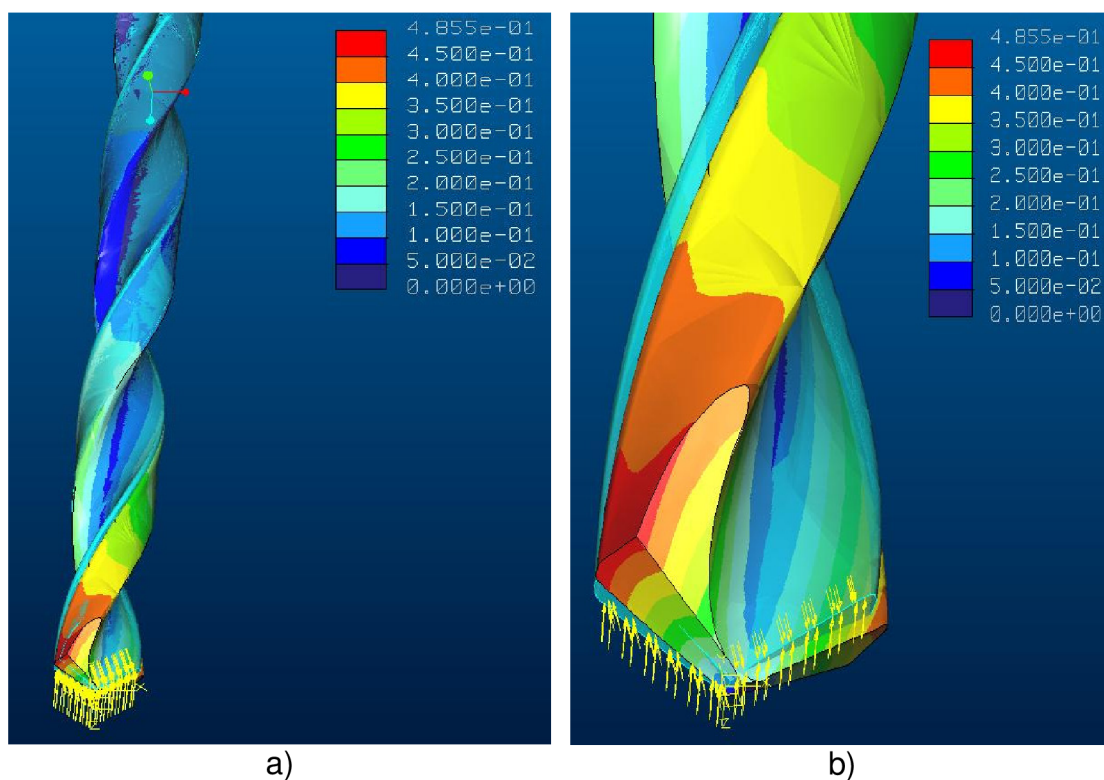
Z výsledků analýzy je patrné, že nejvíce je zatěžována špička vrtáku. Od špičky napětí klesá radiálně směrem k obvodu i axiálně směrem ke stopce (obr.4.27). Taktéž z průběhu deformace je zřejmé, že nejvíce se vrták zdeformuje, zkroučí u špičky (obr.4.28).



a)

b)

Obr. 4.27 Výsledky napěťové analýzy



Obr. 4.28 Výsledky deformační analýzy

## 4.5 Výsledky a diskuze

Základní rozměry vrtáku jako jsou celková délka, délka šroubovitých drážek, úhel špičky a úhel stoupání šroubovic jsou dle normy DIN338.

Tloušťka jádra u špičky je 0,55 mm, což vede k velmi vhodnému poměru tloušťky jádra ku průměru vrtáku, a to 0,09. Z kapitol 2 a 3 plyne, že tento poměr má příznivý vliv na řezné vlastnosti a posuvovou sílu, avšak negativní vliv na tuhost nástroje v krutu a ve vzpěru. Tuhost nástroje je pak zajištěna větší kuželovitostí jádra, která je 1:25 (kuželovitost jádra u konvenčních vrtáků je 1:130 [8]). Větší kuželovitost jádra ovšem vede k tomu, že při broušení nástroje se průměr jádra zvětšuje rychleji a brzy přesáhne průměr u konvenčních vrtáků.

Úhly hřbetu, břitu a čela měřené v rovinách obsahujících vektor řezné rychlosti odpovídají přibližně úhlům konvenčních nástrojů [11].

Vliv jádra na velikost řezného momentu a posuvové síly je u tohoto vrtáku daleko menší, než ukazují dlouhodobé studie konvenčních nástrojů (20-30% řezný moment, 70-80% posuvová síla, [2, 4]). To je nejspíše způsobeno malým průměrem jádra u špičky a jeho poměrem k průměru vrtáku (viz experiment č.1).

Působíště celkové řezné síly u testovaného vrtáku je přibližně v  $1/3$  poloměru vrtáku, což neodpovídá nejčastěji používané hodnotě v literatuře, a to  $1/2R = D/4$  [2, 3, 6]. Hodnota  $D/4$  odpovídá těžišti třísky a je možno ji brát jako orientační, neboť tuto hodnotu nepřekročí žádný vrták. Vlivem jádra a geometrie břítu na velikost řezné síly v jádře a okolí jádra bude vždy působíště celkové řezné síly ležet blíže k ose vrtáku.

Napětíová analýza ukazuje nevhodnost malého průměru jádra u špičky vrtáku.

## ZÁVĚR

Na základě teoretické studie bylo zjištěno, že řezné podmínky i geometrie břitu vrtáku jsou podél hlavního i příčného ostří proměnlivé. Směrem k jádru klesá řezná rychlost a roste úhel čela hlavního ostří. Velmi negativní úhel čela příčného ostří způsobuje tváření materiálu, což značně ovlivňuje velikost řezného momentu a posuvové síly.

Na základě měření nástroje s geometrií CZ001 bylo zjištěno, že:

- hlavní rozměry jako jsou celková délka, délka šroubových drážek, úhel špičky a úhel stoupání šroubovic jsou dle normy DIN338,
- od konvenčních nástrojů se liší poměrem jádra ku průměru vrtáku, a to 0,09, a kuželovitostí jádra směrem ke stopce vrtáku 1:25.

Na základě experimentu, při němž bylo vrtáno s tímto vrtákem do několikrát osazené díry, bylo zjištěno, že:

- přírůstek řezného momentu připadající na jádro je přibližně 10%, což je poloviční hodnota oproti konvenčním nástrojům,
- přírůstek posuvové síly připadající na jádro je přibližně 50%, což je o 20% nižší hodnota oproti konvenčním nástrojům.

Na základě aplikací výsledků měření bylo zjištěno:

- výslednice řezných sil je vzdálena od osy vrtáku přibližně 1/3 poloměru,
- největší napětí je ve špičce vrtáku, poté napětí klesá radiálním směrem k obvodu a axiálním směrem ke stopce vrtáku.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] - DROZDA, T., et al. *Tool and Manufacturing Engineers Handbook : Machining*. 4th edition. [s.l.] : Society of Manufacturing Engineers, 1983. 1494 s. ISBN 0872630854.
- [2] - FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [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] - HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály. In *MM Průmyslové spektrum*. Speciální vydání včetně CD. Praha, 2004. s. 110. ISSN 1212-2572.
- [5] - CHEN, Wen-Chou. Applying the finite element method to drill design based on drill deformation. *Finite Elements in Analysis and Design*. 1997, vol. 26, is. 1, s. 57-81.
- [6] - KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno : CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [7] - LIENVEBER, J., VÁVRA, P., *Strojnické tabulky*. 2. dopl. vyd. Úvaly : ALBRA, 2005. 907 s. ISBN 80-7361-011-6.
- [8] - PAPEŽ, K. *Konstrukce nářadí I*. 2. přeprac. vyd. Brno : SNTL, 1980. 376 s.
- [9] - ŘASA, J. *Výpočetní metody v konstrukci řezných nástrojů*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1986. 464 s.
- [10] - SPITLER, D., et al. *Fundamentals of Tool Design*. 5th edition. Dearborn : Society of Manufacturing Engineers, 2003. 404 s. ISBN 0-87263-650-X.
- [11] - STEPHENSON, D.A., AGAPIOU, J.S. *Metal cutting theory and practice*. 2nd edition. [s.l.] : CRC Press, 2006. 846 s. ISBN 0824758889.
- [12] - Katalog výrobků STIM ZET a.s. [online]. [2009] [cit. 2009-05-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.stimzet.cz>>.
- [13] - Výrobní sortiment NÁSTROJE CZ, s.r.o. [online]. [2009] [cit. 2009-05-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.nastrojecz.cz>>.



**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
$A_D$	[mm <sup>2</sup> ]	- průřez třísky
$a_p$	[mm]	- je šířka záběru ostří
$b_D$	[mm]	- je jmenovitá šířka třísky
$D$	[mm]	- průměr díry (vrtáku)
$F$	[N]	- výsledný síla při řezání
$F_c$	[N]	- řezná síla
$F_f$	[N]	- posuvová síla
$F_p$	[N]	- pasivní síla
$f$	[mm]	- posuv na otáčku
$f_z$	[mm]	- posuv na zub (břit)
$E$	[MPa]	- Youngův modul pružnosti
$h_D$	[mm]	- je jmenovitá tloušťka třísky
$k_c$	[MPa]	- měrný řezný odpor
$L$	[mm]	- délka díry
$M_c$	[Nm]	- řezný moment
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	- otáčky nástroje
$v_{ci}$	[m·min <sup>-1</sup> ]	- řezná rychlost v i-tém bodě hlavního ostří
$v_c$	[m·min <sup>-1</sup> ]	- řezná rychlost
$v_e$	[m·min <sup>-1</sup> ]	- rychlost řezného pohybu
$v_f$	[m·min <sup>-1</sup> ]	- posuvová rychlost
$x_i$	[mm]	- vzdálenost působíště síly od osy vrtáku
$y_i$	[mm]	- vzdálenost působíště síly od osy vrtáku
$\alpha$	[°]	- úhel hřbetu
$\beta$	[°]	- úhel břitu
$\gamma$	[°]	- úhel čela
$\varepsilon$	[°]	- úhel špičky
$\kappa_r$	[°]	- úhel nastavení hlavního ostří
$\mu$	[-]	- Poissonovo číslo
$\mu_i$		- střední hodnota naměřených hodnot
$\sigma_i$		- směrodatná odchylka naměřených hodnot

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1    Základní popis geometrie CZ001  
Příloha 2    Základní rozměry vrtáku CZ001  
Příloha 3    Fotodokumentace ze skenování vrtáku  
Příloha 4    Výsledky jednotlivých měření

# Příloha 1: Základní popis geometrie CZ001 [13]



Vrtáky s válcovou stopkou - vývojová řada CZ  
 Jobber drills - progress line CZ  
 Spiralbohrer mit Zylinderschaft - Entwicklung Reihe CZ



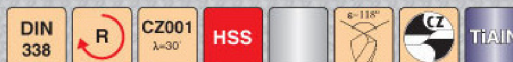
Kód / Code  
**S338RCZ001HSSAX**



Kód / Code  
**S338RCZ001HSSAXTiN**



Kód / Code  
**S338RCZ001HSSAXTiAIN**



## VYBRUŠOVANÝ VRTÁK S VÁLCOVOU STOPKOU CZ001 JOBBER DRILL CZ001 SPIRALBOHRER MIT ZYLINDERSCHAFT CZ001

Značka CZ001 - Pro rychlou identifikaci vrtáku.  
 Symbol CZ001 - For quick drill identification.  
 Marke CZ001 - Für schnelle Bohreridentifikation.

Úhel stoupání a geometrie spirály vrtáku CZ001 vytváří optimální podmínky pro tvorbu a odvod třísky včetně přívodu chladicí kapaliny.  
 Helix angle and geometry of CZ001 drill helix create optimal conditions for chip formation and chip disposal including coolant inlet.  
 Steigungswinkel und Geometrie der Spirale des CZ001 Bohrers bildet optimale Bedingungen für Spanbildung und Spanabfuhr einschließlich des Kühlmittelzufuhrs.

Malá šířka fazetky u vrtáku CZ001 zaručuje při jeho dobrém vedení minimální tření fazetky o stěny vrtaného otvoru.  
 Small margin width at the CZ001 drill guarantees minimum friction on the side of drilled opening during good guide.  
 Kleine Fasenbreite beim CZ001 Bohrer gewährleistet minimales Fasenreiben um die Wände gebohrter Bohrung während seiner guten Führung.

Nízká drsnost broušených ploch vrtáku CZ001 snižuje velikost třecích sil při vrtání a odvodu třísky.  
 Low roughness of ground CZ001 drill surface reduces the area of frictional forces at drilling and chip disposal.  
 Niedrige Rauheit geschliffener Oberfläche des CZ001 Bohrers vermindert die Größe der Reibungskräfte bei Bohrung und Spanabfuhr.

Povlakování nejvíce namáhané přední části vrtáku CZ001 povlakem TiN a TiAIN umožňuje vrtání vyššími řeznými rychlostmi a zvyšuje odolnost vrtáku proti opotřebení.  
 The coating of the most stressed front section of CZ001 drill with TiN and TiAIN coating enables the drilling with higher cutting speeds and increases drill wear resistance.  
 Beschichtung des am meisten beanspruchten Vorderteils des CZ001 Bohrers durch TiN- und TiAIN-Überzug ermöglicht die Bohrung mit höheren Schnittgeschwindigkeiten und erhöht die Abnutzungsbständigkeit des Bohrers.

Špiče vrtáku CZ001 díky svému speciálnímu podbrusu typu „AC“ s upravenou geometrií pod značkou CZ001, výrazně přispívá k vysoké stabilitě vrtáku i při velkém posuvu a současně zaručuje vrtání otvorů s vysokou rozměrovou a geometrickou přesností.  
 CZ001 drill point significantly benefits to high drill stability even during high feed and ensures hole drilling with high dimensional and geometric accuracy at the same time due to its special "AC" relief with modified geometry under the mark CZ001.  
 Die Spitze des CZ001 Bohrers wesentlich beiträgt zur hohen Bohrerqualität auch bei hohem Vorschub dank ihrem speziellen Hinterschliff Typ „AC“ mit modifizierter Geometrie unter der Marke CZ001 und gleichzeitig gewährleistet Bohren der Löcher mit Maß- und geometrischer Genauigkeit.

Tenké jádro v přední části vrtáku CZ001 zaručuje vznik pouze malé osové síly při zachování jeho velké tuhosti díky plynulému nárůstu tloušťky jádra směrem ke stopce vrtáku.  
 Thin core in the front section of the CZ001 drill ensures creation of only small axial force with preservation of its high rigidity due to continuous increase of core thickness toward drill shank.  
 Dünner Kern beim Vorderteil des CZ001 Bohrers garantiert Entstehung nur kleinen Axialkrafts beim Erhaltung hoher Festigkeit dank kontinuierlicher Steigerung der Kerndicke zum Bohrschaft.



## Příloha 2: Základní rozměry vrtáků CZ001 [13]



Vrtáky s válcovou stopkou - vývojová řada CZ  
 Jobber drills - progress line CZ  
 Spiralbohrer mit Zylinderschaft - Entwicklung Reihe CZ



Kód / Code  
**S338RCZ001HSSAX**



Kód / Code  
**S338RCZ001HSSAXTiN**



Kód / Code  
**S338RCZ001HSSAXTiAIN**



**POUŽITÍ**

Velmi výkonný vrták jehož dalkové rozměry sice odpovídají normě DIN 338, ale jeho ostatní parametry byly optimalizovány na základě dlouholetých zkušeností v oboru vrtání do materiálů s pevností do 900 N/mm<sup>2</sup> a to zejména oceli, ale také barevných kovů, plastů a tvrdého dřeva. Provedení s povlakem TiN a TiAIN zvyšuje odolnost vrtáku proti opotřebení.

**USABILITY**

Very efficient drill which linear dimensions comply with the standard DIN 338 but its other parameters were optimized on the basis of long-time experience in the field of drilling of materials with strength to 900 N/mm<sup>2</sup> namely especially steel but also non-ferrous metal, plastic materials and hard wood. The design with TiN and TiAIN coating increases the drill wear resistance.

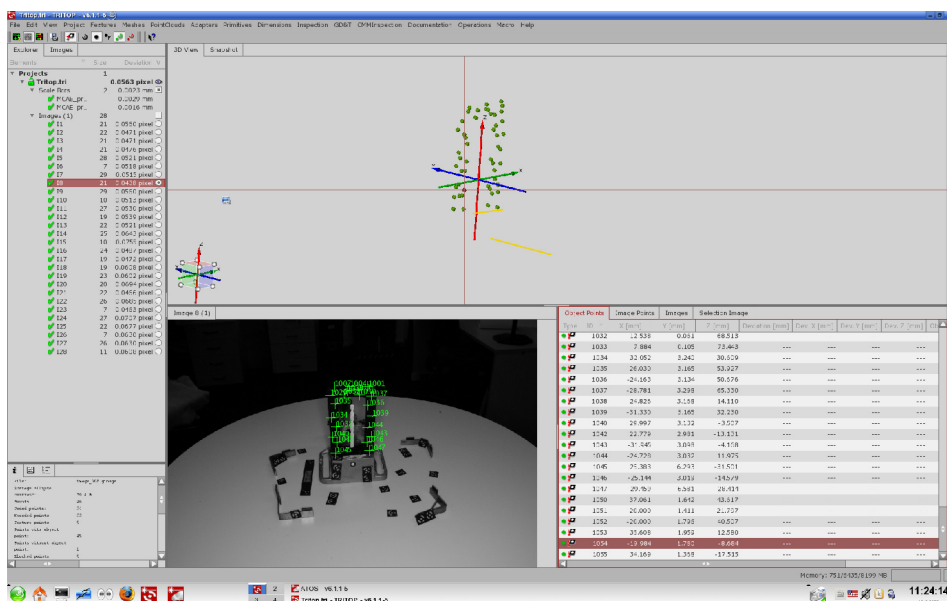
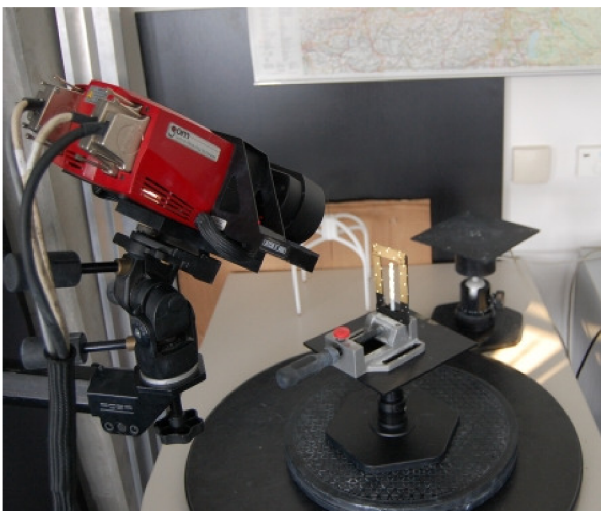
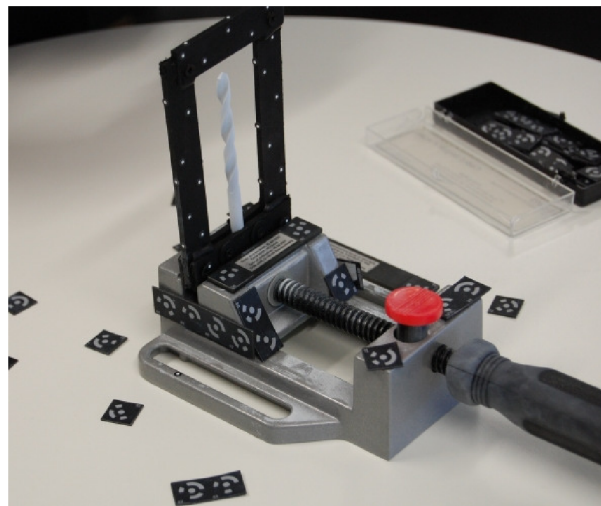
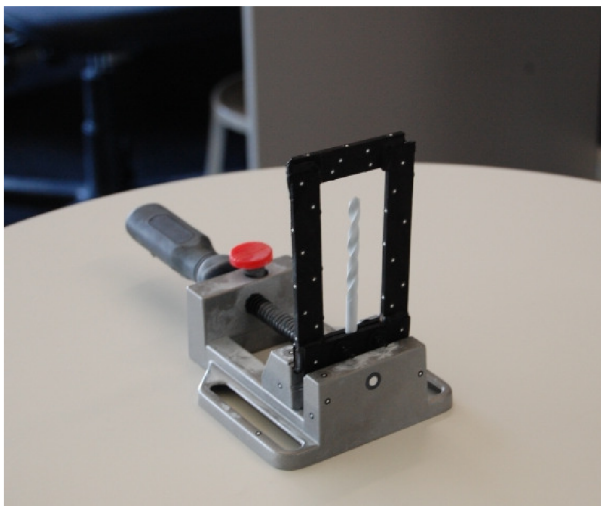
**VERWENDUNG**

Sehr leistungsfähiger Bohrer, dessen Längenmasse der Norm DIN 338 entsprechen, aber seine übrige Parameter wurden auf Grund der langjähriger Erfahrungen im Bereich der Bohrung des Material mit Festigkeit bis 900 N/mm<sup>2</sup> und zwar besonders Stahl, sondern auch Buntmetalle, Plaste und Hartholz optimalsiert. Die Ausführung mit TiN und TiAIN-Beschichtung erhöht Abnutzungsbeständigkeit des Bohrers.

Ø Dh8 (mm)	S338RCZ001HSSAX		S338RCZ001HSSAXTiN		S338RCZ001HSSAXTiAIN	
	L (mm)	l (mm)	L (mm)	l (mm)	L (mm)	l (mm)
2,00 - 2,10	49	24	49	24	49	24
2,11 - 2,35	53	27	53	27	53	27
2,36 - 2,65	57	30	57	30	57	30
2,66 - 3,00	61	33	61	33	61	33
3,01 - 3,30	65	36	65	36	65	36
3,31 - 3,70	70	39	70	39	70	39
3,71 - 4,20	75	43	75	43	75	43
4,21 - 4,70	80	47	80	47	80	47
4,71 - 5,30	86	52	86	52	86	52
5,31 - 6,00	93	57	93	57	93	57
6,01 - 6,70	101	63	101	63	101	63
6,71 - 7,50	109	69	109	69	109	69
7,51 - 8,50	117	75	117	75	117	75
8,51 - 9,50	125	81	125	81	125	81
9,51 - 10,60	133	87	133	87	133	87
10,61 - 11,80	142	94	142	94	142	94
11,81 - 13,20	151	101	151	101	151	101
13,21 - 14,00	160	108	160	108	160	108
14,01 - 15,00	169	114	169	114	169	114
15,01 - 16,00	178	120	178	120	178	120

PŘÍKLAD OBJEDNÁVKY:  
 EXAMPLE OF ORDER:  
 BEISPIEL DER BESTELLUNG:  
 CODE: **S338RCZ001HSSAX0600**  
 Ø 6,00 mm, DIN338RCZ001HSS  
 CODE: **S338RCZ001HSSAXTiN0600**  
 Ø 6,00 mm, DIN338RCZ001HSS + TiN  
 CODE: **S338RCZ001HSSAXTiAIN0600**  
 Ø 6,00 mm, DIN338RCZ001HSS + TiAIN

# Příloha 3: Fotodokumentace ze skenování vrtáku



## Příloha 4: Výsledky jednotlivých měření

