



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VOLBA A OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK PRO PROGRESIVNÍ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE VRTÁNÍ SDRUŽENÝM NÁSTROJEM

DATA SELECTION AND OPTIMISATION OF CUTTING CONDITIONS FOR PROGRESSIVE  
PRODUCTION TECHNOLOGIES OF DRILLING WITH A STEP DRILL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VÍT BARÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Vít Barák

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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 diplomové práce:

### **Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie vrtání sdruženým nástrojem**

v anglickém jazyce:

### **Data selection and optimisation of cutting conditions for progressive production technologies of drilling with a step drill**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Volba a optimalizace tvaru řezného nástroje a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie vrtání, zvláště pro CNC stroje a obráběcí centra.

Cíle diplomové práce:

Úvod

Teoretický rozbor tvaru nástroje, analýza řezných podmínek

Optimalizace řezných podmínek vrtání sdruženým nástrojem pro vybrané progresivní výrobní technologie - CNC stroje a obráběcí centra

Experimentální verifikace

Závěry

Seznam odborné literatury:

RAMU, Ch. Experimental investigations to optimise step drill geometry for burr minimisation in drilling using regression model. In: Int. J. Manufacturing Technology and Management, Vol. 21, Nos. 1/2, 2010

SIVAKUMAR, K. SARAVANAN, R. NOORUL HAQ, A. Cost-tolerance modelling and optimisation of machining tolerance design through intelligent techniques In: International Journal of Machining and Machinability of Materials Volume 3, Number 1-2 / 2008, pp. 162 – 189.

William J. Zdeblick, R.E. De Vor a John F. Kahles A Comprehensive Machining Cost Model and Optimization Technique. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 30, Issue 1, 1981, Pages 405-408

TLUSTY, J. Manufacturing Process and Equipment. 1st edition. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 19.11.2014

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Práce obsahuje teoretický rozbor vrtání šroubovým vrtákem se zaměřením na sdužený nástroj. Součástí řešení je popis geometrie vrtáku, výpočet základních parametrů vrtání, včetně sil a optimalizace procesu. Dále je uveden postup výroby a analýza navrženého sduženého monolitního nástroje pro požadované parametry otvoru. Pro správnou funkci nástroje je nutné nalézt optimální řezné podmínky. Hodnoty zatížení nástroje jsou přesně vyhodnoceny pomocí piezoelektrického dynamometru, a tím se získá celkový průběh jednotlivých zatížení. Struktura povrchu obrobku je vyhodnocena optickým měřicím přístrojem.

### Klíčová slova

Sdužený nástroj, geometrie vrtáku, řezné podmínky, analýza zatížení, struktura povrchu

## ABSTRACT

The thesis contains theoretical analysis of drilling by twist drill focused on the step drill. The review includes description of the drill geometry, calculation of the basic parameters of drilling, including forces and process optimization. Following is manufacturing process and analysis of the monolithic step drill designed for the required hole parameters. The optimal cutting conditions are necessary to find for the correct function of the tool. The load values of the tool are accurately assessed using a piezoelectric dynamometer, thereby obtaining the overall progress of individual loads. The roughness of the workpiece is evaluated by the optical measuring device.

### Key words

Step drill, drill geometry, cutting conditions, force analysis, surface roughness

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARÁK, V. *Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie vrtání sduženým nástrojem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 88 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

### PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie vrtání sdruženým nástrojem** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

29.5.2015

-----  
Datum

-----  
Bc. Vít Barák

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu prof. Ing. Miroslavu Piškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Děkuji také panu Jiřímu Čechovi za pomoc při provádění experimentů a společnosti Intemac Solutions s.r.o., Kuřim za technickou podporu při poskytnutí měřicího přístroje. V neposlední řadě děkuji společnosti Rotana a.s., jmenovitě především panu Ing. Jaroslavu Vejrostovi a Jaromíru Březnovi, za veškerou spolupráci při poskytnutí informací, materiálů a nástrojů pro zpracování této diplomové práce.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 CHARAKTERISTIKA PROCESU VRTÁNÍ.....	10
1.1 Geometrie a části vrtáku .....	10
1.2 Způsoby broušení šroubovitých vrtáků.....	13
1.3 Kinematika vrtání .....	14
1.4 Analýza průřezu třísky .....	15
1.5 Síly při vrtání .....	16
1.6 Řezný výkon .....	18
1.7 Měrná řezná energie.....	19
1.8 Tvar třísky.....	20
1.9 Otřepy po procesu vrtání.....	21
1.9.1 Tvar otřepů.....	21
1.9.2 Vliv řezných podmínek na výšku otřepů .....	23
1.10 Opatření nástroje.....	23
1.11 Trvanlivost a životnost nástroje.....	24
1.12 Chlazení a mazání .....	25
1.12.1 Druhy řezných kapalin.....	27
2 OPTIMALIZACE OBRÁBĚCÍHO PROCESU .....	28
2.1 Konvenční optimalizace řezných podmínek.....	29
2.1.1 Omezení dané řezivostí vrtáku .....	29
2.1.2 Omezení dané užitečným výkonem a krouticím momentem.....	30
2.1.3 Omezení dané dovoleným namáháním vrtáku na krut a vzpěr.....	31
2.1.4 Omezení dané z hlediska minimálně přípustného počtu děr za hodinu.....	32
2.2 Optimalizace výrobních nákladů .....	33
2.3 Optimalizace výrobního času.....	35
3 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY .....	37
3.1 Nástrojové oceli .....	38
3.2 Slinuté karbidy .....	39
3.2.1 Povlakované slinuté karbidy .....	41
3.3 Cermety.....	43

3.4	Řezná keramika.....	43
3.5	Supertvrde nástrojové materiály .....	44
4	NÁVRH A ANALÝZA SDRUŽENÉHO NÁSTROJE .....	45
4.1	O společnosti Rotana a.s. ....	45
4.2	Vyráběná součást .....	46
4.2.1	Obráběcí stroj.....	47
4.2.2	Původní technologie .....	48
4.2.3	Nová technologie .....	49
4.3	Výroba nástroje.....	49
4.3.1	Geometrie nástroje.....	51
4.4	Experimentální verifikace.....	57
4.4.1	Použité stroje a zařízení .....	57
4.4.2	Analýza sil .....	61
4.4.3	Struktura povrchu obrobené plochy.....	73
5	TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	76
6	DISKUZE .....	78
6.1	Průběh sil a momentů .....	78
6.2	Struktura povrchu obrobené plochy.....	78
	ZÁVĚR .....	79
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	80
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	83
	SEZNAM PŘÍLOH.....	88



## ÚVOD

Technologie vrtání je jednou z nejstarších a nejpoužívanějších metod výroby rotačních hladkých či tvarových otvorů. Během své historie prošla metoda potřebným vývojem a to z hlediska jak tvaru nástroje, tak především materiálu nástroje i obrobku. V dnešní době lze obrábět prakticky jakýkoliv materiál.

Důležitým faktorem vrtání je nástroj, který svým tvarem a geometrií výrazně ovlivňuje parametry vyráběného otvoru. Tvary vrtáků se liší na základě požadovaného tvaru a materiálu vrtaného obrobku, s ohledem na zachování požadované přesnosti otvoru, drsnosti povrchu obrobku a životnosti nástroje. Lze se tedy setkat s vrtáky s různými počty břitů a s různými nástrojovými úhly. I když se dnes stále častěji objevují vysoce produktivní vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami, tak klasické monolitní šroubovitě vrtáky mají stále často velké uplatnění, a to především při vrtání otvorů velmi malých rozměrů.

Trendem dnešní doby, nejen v oblasti vrtání, je zvyšování produktivity obrábění při snižování nákladů. Toho lze výrazně docílit sloučením několika různých nástrojů do jednoho sdruženého nástroje, který zachová stejný výsledný tvar, přesnost rozměrů a drsnost povrchu vrtaného otvoru. Na rozdíl od dob minulých, dnes existují stroje, které jsou schopny vybrousit potřebné tvary a geometrii sdruženého nástroje s dostatečnou přesností. Toto nahrazení ovšem není vždy možné. Především u sdružených nástrojů s velmi rozdílnými hodnotami průměrů, které jsou společně v záběru. Důvodem je rozdílná řezná rychlost podél břitu. Je tedy nutné nalézt kompromis v nastavení řezných podmínek, aby přesnost a kvalita povrchu obrobku byla v rámci možností zachována.

Optimalizace řezného procesu sdruženým nástrojem vede k úspoře času a nákladů na obrábění. Nalezením optimálních řezných podmínek se výrazně zvýší efektivnost obrábění daným nástrojem. To má za následek vyšší produktivitu obrábění a menší požadavky na vybavení stroje například z hlediska automatické výměny nástrojů.

## 1 CHARAKTERISTIKA PROCESU VRTÁNÍ

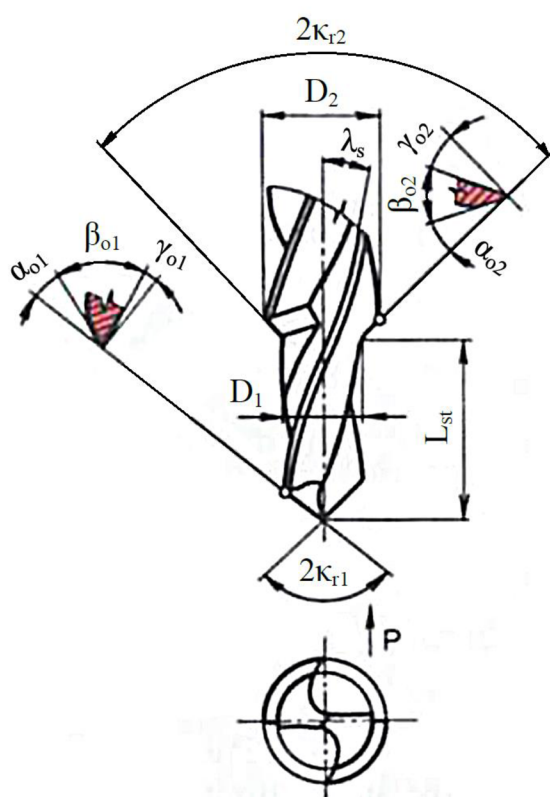
Vrtání sruženým nástrojem je založeno na podobném principu, jako vrtání klasickým šroubovitým vrtákem. Liší se proměnnou velikostí průměru, a tím i řeznou rychlostí, průřezem a tvarem třísky od daného místa odstupňování. Díry se zhotovují do plného nebo předvrtaného materiálu. Hlavní pohyb rotační (řezný) koná nástroj, kdy osa vrtáku je většinou kolmá k obráběné ploše. Vedlejší pohyb posuvový vykonává také nástroj, ve směru své osy.

Existují čtyři faktory, které je při vrtání vždy nutno brát v úvahu pro efektivní dosažení potřebných výsledků [1]:

- poměr průměru díry a její hloubky,
- požadovaná přesnost a jakost povrchu vrtané díry,
- typ materiálu obrobku, kvalita a tvrdost,
- speciální vlastnosti obráběcího stroje a otáčky vřeten.

Podle těchto faktorů je nutno určit příslušný typ vrtáku. Pro výrobu děr o větších průměrech (min. 12,7 mm) je možné použít moderní vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami. Důležité je zachování stability obrobku, obráběcího nástroje a obráběcí soustavy [1].

### 1.1 Geometrie a části vrtáku

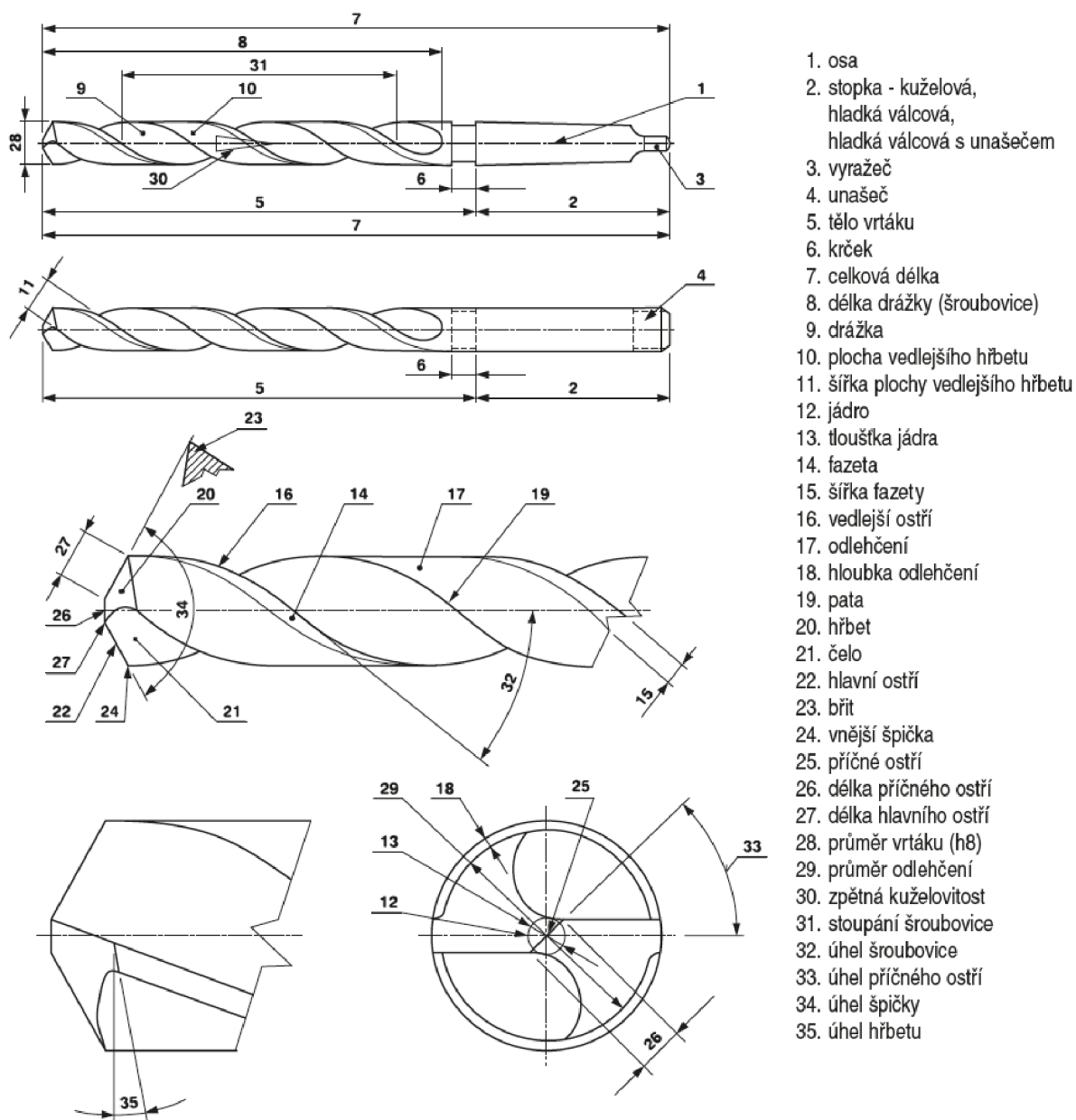


$D_1, D_2$  – průměr vrtáku,  
 $\kappa_{r1}, \kappa_{r2}$  – úhel nastavení ostří,  
 $\alpha_{o1}, \alpha_{o2}$  – ortogonální úhel hřbetu,  
 $\beta_{o1}, \beta_{o2}$  – ortogonální úhel břitu,  
 $\gamma_{o1}, \gamma_{o2}$  – ortogonální úhel čela,  
 $\lambda_s$  – úhel sklonu šroubovice,  
 $L_{st}$  – délka odstupňování.

Obr. 1.1 Geometrie stupňovitého vrtáku [4].

Geometrii sruženého (stupňovitého) vrtáku lze popsat jako kombinaci šroubovitých vrtáků s více průměry a délkami. Nástrojové úhly vrtáku se tedy určí obdobně. Základní nástrojové úhly sruženého nástroje jsou znázorněny na obr. 1.1.

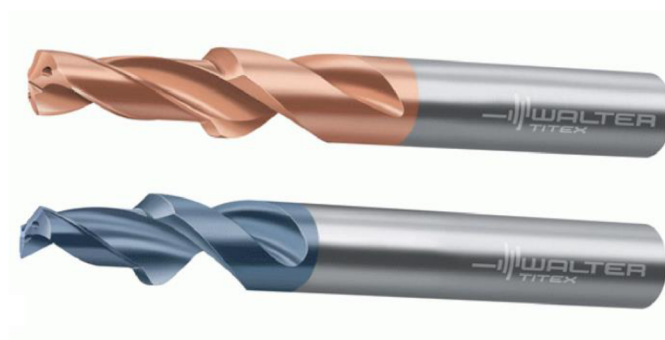
Pro určení jednotlivých částí nástroje poslouží detailní popis šroubovitého vrtáku dle obr. 1.2. Šroubovitý vrták je nejčastěji používaný nástroj pro vrtání krátkých děr.



Obr. 1.2 Názvoslovní jednotlivých částí šroubovitého vrtáku [3].

Na těle šroubovitého vrtáku jsou vytvořeny obvykle dvě protilehlé šroubovitě drážky pro odvod třísky. V ose vrtáku je nutné zachovat jádro o průměru  $0,25$  až  $0,5 \times D$ , které zajišťuje jeho pevnost v křutu a odolnost na vzpěr. Jmenovitý průměr vrtáku je zachován podél hrany drážky, kdy se ostatní materiál odbrousí, z důvodu snížení tření nástroje ve vyvrtané díře. Tento zbylý materiál se nazývá fazeta. Nejdůležitější částí vrtáku je špička,

kteřá obsahuje dvojici hlavního ostří. Hlavní ostří jsou spojena příčným ostřím v oblasti osy nástroje. Ukázka monolitních stupňovitých vrtáků je uvedena na obr. 1.3 [2].



Obr. 1.3 Ukázka monolitních nástrojů firmy Walter [6].

Úhel sklonu hlavního ostří a úhel sklonu šroubovice vrtáku jsou funkčně závislí na okamžité radiální vzdálenosti od osy nástroje (obr. 1.4). Vztah pro výpočet sklonu hlavního ostří v závislosti na vzdálenosti od osy  $\lambda(r)$ , vypadá následovně:

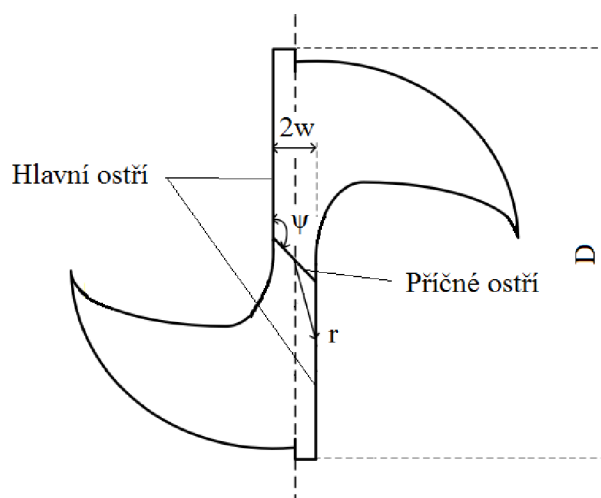
$$\lambda(r) = \sin^{-1} \left( \frac{w \cdot \sin \kappa_r}{r} \right) \quad (1.1)$$

kde:  $r$  [mm] - radiální vzdálenost od osy vrtáku,  
 $w$  [mm] - poloměr jádra vrtáku,  
 $\kappa_r$  [°] - úhel nastavení ostří,

a úhel sklonu šroubovice v závislosti na vzdálenosti od osy  $\lambda_s(r)$ , se určí:

$$\lambda_s(r) = \text{tg}^{-1} \left( \frac{D \cdot \text{tg} \lambda_s}{2r} \right) \quad (1.2)$$

kde:  $D$  [mm] - průměr vrtáku,  
 $\lambda_s$  [°] - úhel sklonu šroubovice na jmenovitém průměru.

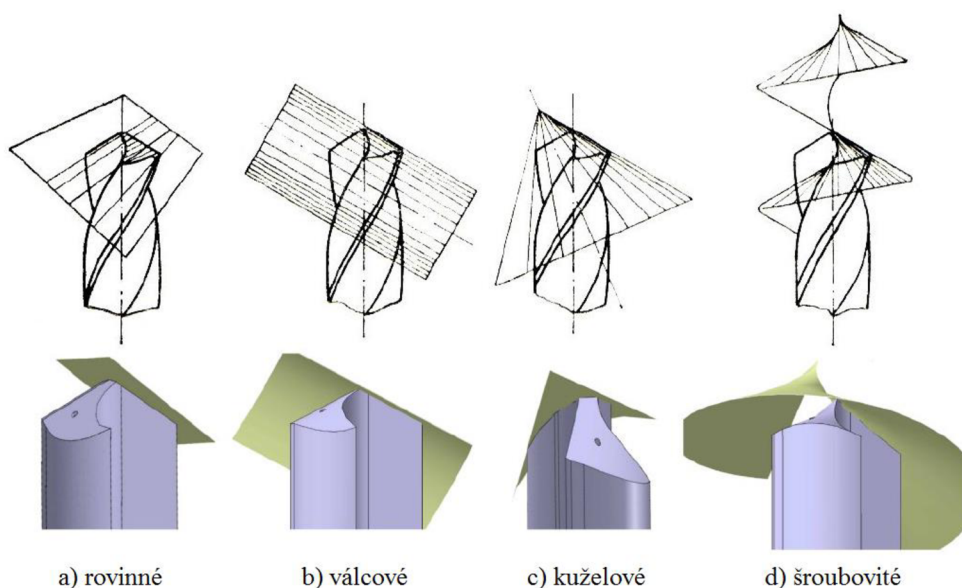


Obr. 1.4 Geometrie špičky vrtáku [5].

V oblasti příčného ostří (dle obr. 1.4) se předpokládá, že úhel nastavení ostří je roven  $0^\circ$ . Protože příčné ostří protíná osu nástroje, uvažujeme, že zde probíhá ortogonální řezání, kdy je úhel sklonu ostří také roven  $0^\circ$  [5].

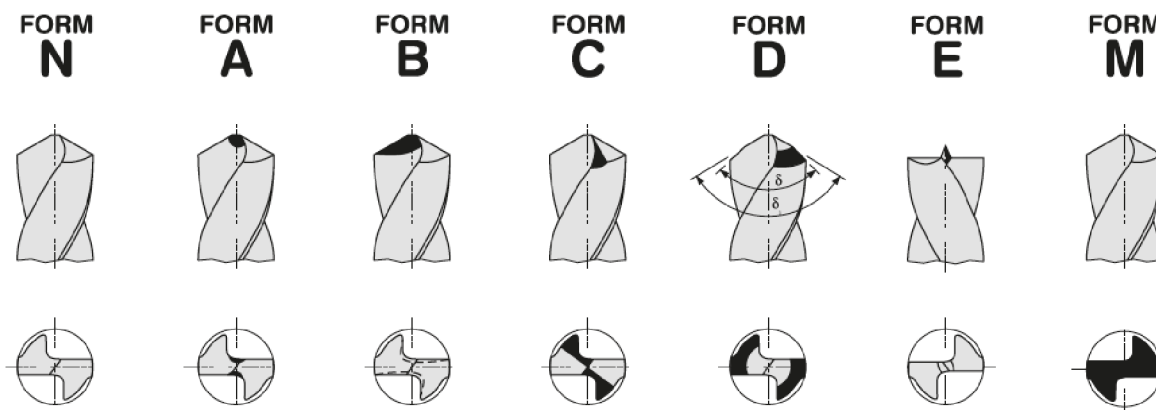
## 1.2 Způsoby broušení šroubovitých vrtáků

Nástrojové úhly hřbetu a čela jsou podél ostří proměnné. Úhel čela se směrem k ose nástroje zmenšuje. Vzhledem ke klesající rezné rychlosti při konstantní posuvové rychlosti je nutné, aby úhel hřbetu narůstal směrem k ose nástroje. Průběh úhlů hřbetu a čela je ovlivněn způsobem podbroušení hlavních hřbetů. Tyto způsoby jsou dané tvarem plochy hřbetu podle obr. 1.5 [2].



Obr. 1.5 Způsoby podbroušení hřbetních ploch šroubovitých vrtáků [2].

Příčné ostří výrazně zvyšuje zejména posuvovou sílu a nepatrně také rezný moment. V dnešní době se aplikují různé úpravy příčného ostří, které zahrnuje jeho zmenšení nebo dokonce odstranění. Ukázka způsobu ostření vrtáku je na obr. 1.6 [2].



Obr. 1.6 Způsob ostření vrtáku (dle DIN 1412) [3].

N – podbroušená kuželová plocha,

A – podbroušená kuželová plocha se zkrácením příčného břítu (typ A),

B – podbroušená kuželová plocha se zkrácením příčného břítu s korekcí úhlu čela (typ B),

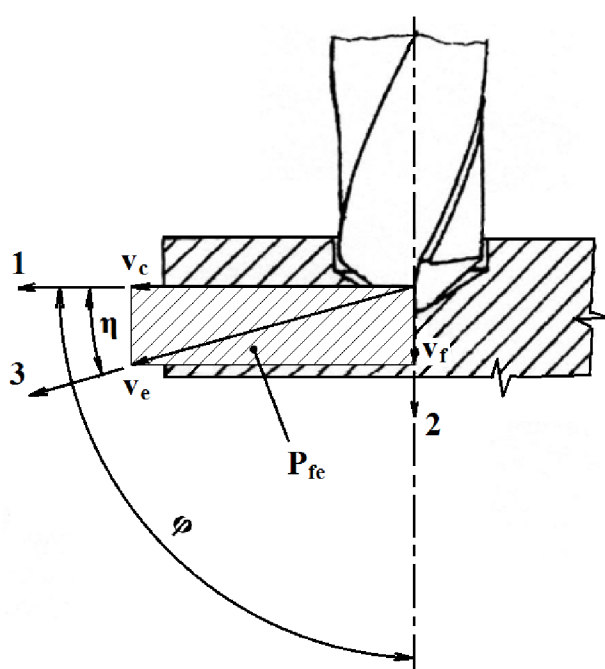
C – podbroušená kuželová plocha se zkrácením příčného břítu (typ C),

D – podbroušená kuželová plocha, lomený břit (typ D),

E – ostření s vrcholovým úhlem  $180^\circ$  a středícím hrotem (typ E),

M – podbroušená rovinná plocha.

### 1.3 Kinematika vrtání



1 – směr hlavního pohybu,

2 – směr posuvového pohybu,

3 – směr řezného pohybu,

$v_c$  – řezná rychlost,

$v_f$  – posuvová rychlost,

$v_e$  – rychlost řezného pohybu,

$\varphi$  – úhel posuvového pohybu,

$\eta$  – úhel řezného pohybu,

$P_{fe}$  – pracovní boční rovina.

Obr. 1.7 Kinematika vrtání šroubovým vrtákem [7].

Celková rychlost řezného pohybu se skládá ze dvou složek (obr. 1.7). Jelikož se řezná rychlost podél hlavního ostří nástroje směrem do středu zmenšuje, uvažuje se obvodová rychlost na jmenovitém (největším) průměru nástroje. Řezná rychlost  $v_c$ , posuvová rychlost  $v_f$  a rychlost řezného pohybu  $v_e$ , se vypočítá [2,13]:

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3} \quad (1.3)$$

$$v_f = f \cdot n \quad (1.4)$$

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = 10^{-3} \cdot n \cdot \sqrt{(\pi \cdot D)^2 + f^2} \quad (1.5)$$

kde:  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] - otáčky nástroje,

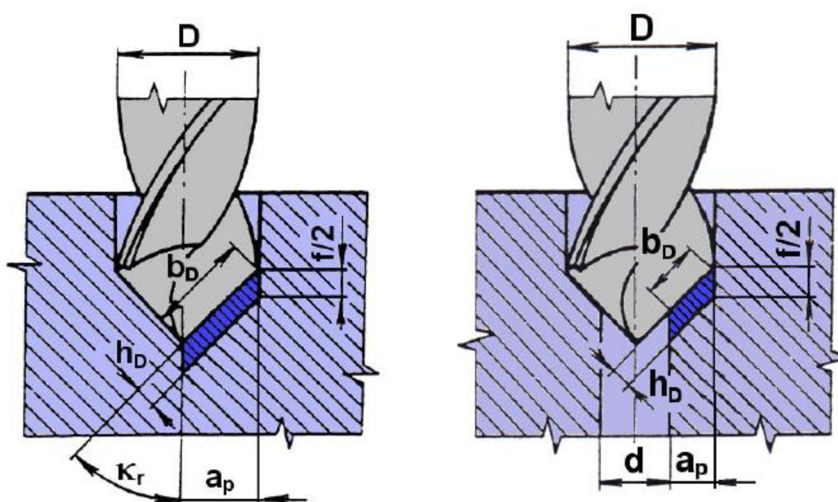
$f$  [mm] - posuv nástroje na jednu otáčku.

### 1.4 Analýza průřezu třísky

Jmenovitý průřez třísky  $A_D$  odebíraný jedním břitem šroubovitého vrtáku (obr. 1.8) se vyjádří podle [2]:

$$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot \frac{f}{2} \quad (1.6)$$

kde:  $b_D$  [mm] - jmenovitá šířka třísky,  
 $h_D$  [mm] - jmenovitá tloušťka třísky,  
 $a_p$  [mm] - šířka záběru ostří.



Obr. 1.8 Průřez třísky při vrtání dvoubřítým šroubovitým vrtákem [2].

Po úpravě lze určit konečný tvar vzorce pro vrtání do plného materiálu jedním břitem následovně [2]:

$$A_D = \frac{D \cdot f}{4} \quad (1.7)$$

a pro vrtání do předpracované díry nebo větším průměrem stupňovitým vrtákem [2]:

$$A_D = \frac{(D - d) \cdot f}{4} \quad (1.8)$$

Pro získání celkové hodnoty průřezu třísky je nutné tyto rovnice vynásobit počtem břítů (2 břity pro šroubovitý vrták).

Tloušťka třísky  $h_D$  se určí [13]:

$$h_D = \frac{f}{2} \cdot \sin \kappa_r \quad (1.9)$$

Šířka třísky  $b_D$  při vrtání do plného materiálu je [13]:

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

a při vrtání do předvrtaného materiálu platí vztah [13]:

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

### 1.5 Síly při vrtání

Výsledné síly pro nástroje se zuby symetricky postavenými vůči jeho ose jsou tvořeny součtem nebo rozdílem hodnot na obou břitech nástroje (obr. 1.9) [2].

$$\text{posuvová síla: } F_f = F_{f1} + F_{f2} \quad (1.12)$$

$$\text{pasivní síla: } F_p = F_{p1} - F_{p2} \quad (1.13)$$

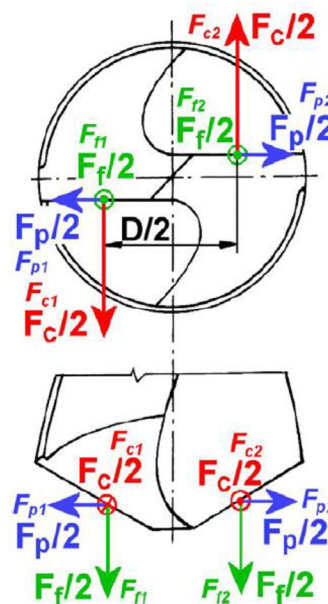
$$\text{řezná síla: } F_c = F_{c1} + F_{c2} \quad (1.14)$$

Pokud je vrták správně a přesně naostřen, jsou síly na obou břitech shodné ( $F_p=0$ ), pak [2]:

$$F_{f1} = F_{f2} = F_f/2 \quad (1.15)$$

$$F_{p1} = F_{p2} = F_p/2 \quad (1.16)$$

$$F_{c1} = F_{c2} = F_c/2 \quad (1.17)$$



Obr. 1.9 Řezné síly při vrtání [2].

V minulosti vzniklo několik přístupů pro stanovení sil působících v procesu vrtání. Jako první byl použit empirický přístup k určení vztahů mezi posuvovou silou, řezným momentem a ostatních parametrů v procesu vrtání. Následoval mechanický přístup, který se opírá o přesnější popis kinematiky procesu. Třetí metodou je metoda konečných prvků, která je nejpodrobnější a využívá složitých matematických modelů. Její výhodou je, že nevyžaduje provádět mnoho experimentů [5,15,17].

Empirické vztahy pro určení jednotlivých sil při vrtání lze stanovit dle následujících rovnic, kde hodnoty známých empirických konstant a exponentů jsou uvedeny v tabulce 1.1 [13].

$$F_f = C_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad (1.18)$$

$$F_c = C_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (1.19)$$

kde:  $C_{Ff}, C_{Fc}$  [-] - konstanty, vyjadřující zejména vliv obráběného materiálu,  
 $x_{Ff}, x_{Fc}$  [-] - exponenty, vyjadřující vliv průměru vrtáku,  
 $y_{Ff}, y_{Fc}$  [-] - exponenty, vyjadřující vliv posuvu na otáčku.



Tab. 1.1 Hodnoty konstant a exponentů pro výpočet řezné síly  $F_c$  a posuvové síly  $F_f$  [14].

Obráběný materiál	$C_{Fc}$	$x_{Fc}$	$y_{Fc}$	$C_{Ff}$	$x_{Ff}$	$y_{Ff}$
Ocel $R_m = 750$ MPa	3 650	0,90	0,78	865	1	0,72
Litina 200 HB	2 450	0,85	0,80	630	1	0,78

Řezný moment  $M_c$  k ose vrtáku lze pak odvodit pomocí empirického vztahu [13]:

$$M_c = 2 \cdot \frac{F_c}{2} \cdot \frac{D}{4} = \frac{1}{4} \cdot C_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \cdot D = \frac{1}{4} \cdot C_{Fc} \cdot D^{(x_{Fc}+1)} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (1.20)$$

pro zjednodušení:

$$C_M = \frac{1}{4} \cdot C_{Fc} \quad (1.21)$$

$$x_M = x_{Fc} + 1 \quad (1.22)$$

a po úpravě se získá vztah pro řezný moment [13]:

$$M_c = C_M \cdot D^{x_M} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (1.23)$$

Síly v procesu vrtání lze také získat pomocí měrného řezného odporu, který je potřeba k překonání soudržnosti materiálu účinkem řezného procesu. Měrný řezný odpor neboli měrná řezná síla  $k_c$  je v základním vztahu definována jako [13]:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (1.24)$$

Velikost měrné řezné síly určuje především [13]:

- fyzikální vlastnosti materiálu obrobku (zejména tvrdost nebo pevnost),
- velikost průřezu třísky (zejména tloušťka třísky),
- geometrie nástroje, případně další deformační podmínky,
- řezné prostředí.

Měrná řezná síla při vrtání pro posuv na břit  $k_{cfz}$  se pro daný úhel nastavení břitu  $\kappa_r$  a pro normální úhel čela  $\gamma_n = 6^\circ$ , určí následovně [16]:

$$k_{cfz} = k_{c0,4} \cdot \left( \frac{0,4}{f_z \cdot \sin \kappa_r} \right)^{0,29} \quad (1.25)$$

kde:  $k_{c0,4}$  [MPa] - hodnota měrné řezné síly pro  $h_D = 0,4$  mm (tab. 1.2),  
 $f_z$  [mm] - posuv na jeden břit nástroje ( $f_z = f / 2$  pro dvoubřítý vrták).

Posuvová síla bude [16]:

$$F_f = 0,5 \cdot a_p \cdot f \cdot k_{cfz} \cdot \sin \kappa_r \quad (1.26)$$

Řezný moment se určí [16]:

$$M_c = \frac{D \cdot f \cdot k_{cfz} \cdot a_p}{2} \cdot \left( 1 - \frac{a_p}{D} \right) \quad (1.27)$$

Tab. 1.2 Hodnoty měrné řezné síly pro různé vrtané materiály a tloušťku třísky 0,4 mm [13].

Materiál	Stav	Tvrдость [HB]	$k_{c,0,4}$ [MPa]
Nelegované oceli	0,15 % C	125	1900
	0,30-0,40 % C	150	2100
	0,40-0,80 % C	200	2250
Nízkolegované oceli	přírodní stav	180	2100
	zušlechtěné	275-300-350	2600-2700-2850
Vysocolegované oceli	přírodní stav	200	2600
	zušlechtěné	325	3900
Korozivzdorné oceli	martenzitická/feritická	200	2300
	austenitická	175	2450
Šedá litina	nízká $R_m$	180	1100
	vysoká $R_m$	260	1500
Tvárné litiny	feritická	160	1100
	perlitická	250	1800
Al – slitiny	k tváření	60	500
	k tváření – TZ	100	800
	k lití	75	750
	k lití – TZ	90	900
Cu – slitiny	dle chemického složení	90-100	700-1750

## 1.6 Řezný výkon

Řezný výkon při vrtání  $P_c$  se obecně určí podle vztahu [13]:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{2 \cdot 60 \cdot 10^3} = \frac{F_c \cdot v_c}{1,2 \cdot 10^5} \quad (1.28)$$

Jestliže známe měrný řezný odpor, pak lze řezný výkon určit podle vztahu [16]:

$$P_c = \frac{D \cdot f \cdot k_c \cdot a_p \cdot v_c}{6 \cdot 10^7} \cdot \left(1 - \frac{a_p}{D}\right) \quad (1.29)$$

Řeznou sílu  $F_c$  je poměrně obtížné lokalizovat i přesně vyjádřit vzhledem k proměnné geometrii nástroje a proměnné řezné rychlosti. Dále je složité určit vliv jádra vrtáku a pasivních odporů. Z toho důvodu se často používá zjednodušený vztah pro výpočet řezného výkonu [13]:

$$P_c = \frac{M_c \cdot n}{9,55} \quad (1.30)$$

kde:  $M_c$  - řezný moment v [Nm]

Posuvový výkon při vrtání  $P_f$  se vypočítá podle vzorce [13]:

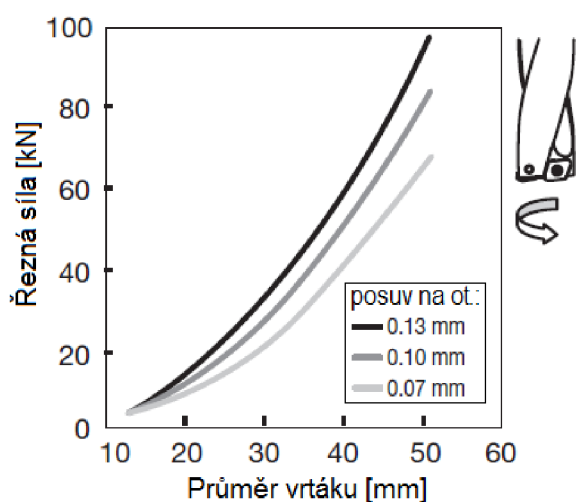
$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{6 \cdot 10^7} \quad (1.31)$$

### 1.7 Měrná řezná energie

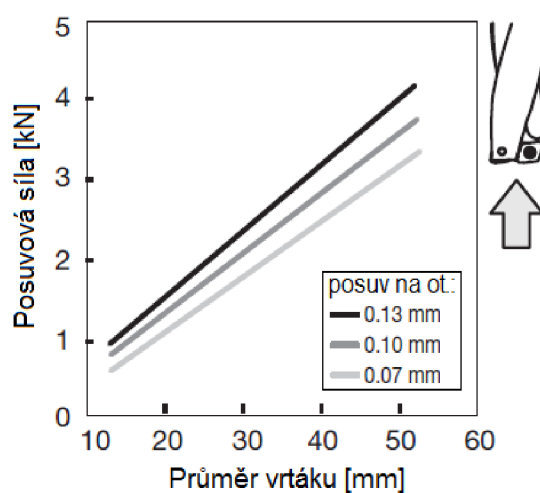
Měrná řezná energie slouží pro sjednocení obou charakteristických veličin (kroučícího momentu a posuvové síly). Řezný moment spotřebuje až 90 % celkové energie při vrtání. Na jádro konvenčního šroubovitého vrtáku připadá 70 až 80 % celkové posuvové síly a 20 až 30 % celkového řezného momentu. Měrná řezná energie  $e_{c(i)}$  vrtání pro okamžitou hodnotu posuvové síly a řezného momentu se určí pomocí tvaru [13]:

$$e_{c(i)} = \left(\frac{1}{D^2}\right) \cdot \left(8 \cdot \frac{M_{c(i)}}{f} + 0,0012732 \cdot F_{f(i)}\right) \quad (1.32)$$

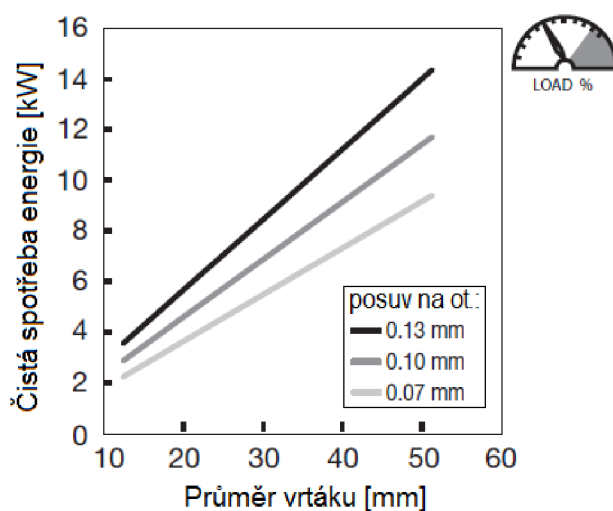
Na následujících obrázcích 1.10 až 1.12, jsou znázorněny ukázky závislosti spotřeby energie a řezných odporů na velikosti průměru vrtáku, pro řeznou rychlost  $v_c = 100$  m/min [9].



Obr. 1.10 Závislost řezné síly na průměru vrtáku [9].



Obr. 1.11 Závislost posuvové síly na průměru vrtáku [9].



Obr. 1.12 Závislost spotřeby energie na průměru vrtáku [9].

### 1.8 Tvar třísky

Třísky představují vedlejší produkt řezného procesu, jejich technologické charakteristiky však významně vypovídají o průběhu procesu řezání. Z hlediska jejich manipulovatelnosti při odstraňování z prostoru obráběcího stroje a další dopravy a zpracování by měly mít takový tvar, při kterém zaujímají co nejmenší objem [8].

Tvar třísky je důležitým faktorem efektivního využití nástroje a dosažení předepsané kvality obrobku. Nejméně žádoucí je plynulý tvar třísky, kdy se snažíme docílit jejího rozdělení na jednotlivé elementy. Nejdůležitější faktory tvaru třísky při obrábění jsou [8]:

- vlastnosti obráběného materiálu,
- geometrie nástroje a tvar břitu nástroje,
- pracovní (řezné) podmínky, zejména řezná a posuvová rychlost,
- nástrojový materiál.

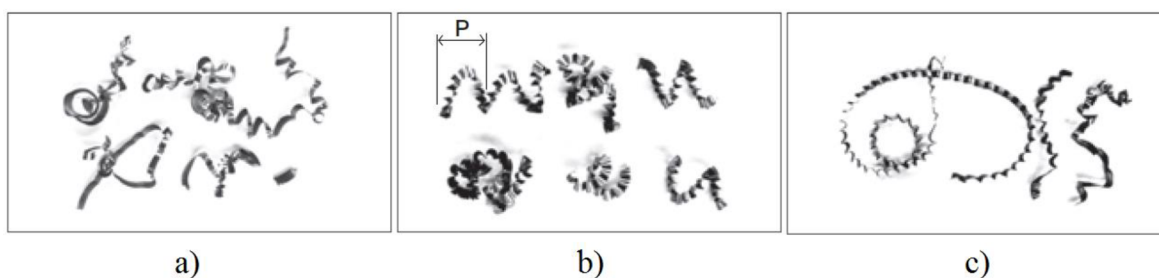
Objemový součinitel třísek  $W$  umožňuje kvantifikovat stupeň plnění obecných požadavků na rozměr a tvar třísek a určí se vztahem [8]:

$$W = \frac{V_t}{V_m} \quad (1.33)$$

kde:  $V_t$  [dm<sup>3</sup>] - objem volně ložených třísek,

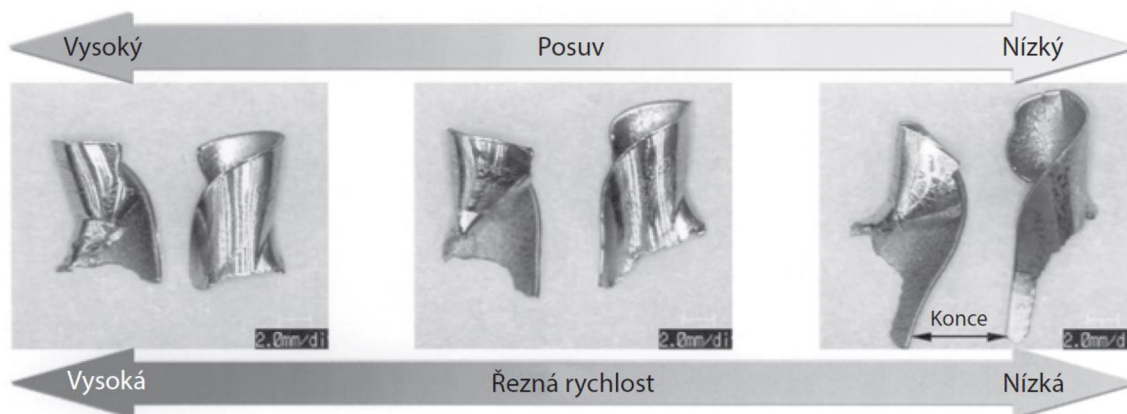
$V_m$  [dm<sup>3</sup>] - objem odebraného materiálu korespondující s  $V_t$ .

Na obr. 1.14 jsou uvedeny ukázky tvaru třísky při vrtání v závislosti na řezných podmínkách. Při nízké řezné rychlosti a posuvu má tříska bělejší barvu a její konce se prodlužují, naopak při vysoké řezné rychlosti je tříska lesklejší a kompaktnější. Na tyto tvary má vliv řezná teplota, která zvyšuje lámavost třísky. Nežádoucí tvary třísek při vrtání s tendencí k zaplétání jsou zobrazeny na obr. 1.13 [9].



Obr. 1.13 Tvary třísek s tendencí k zaplétání [9].

- slupkovité třísky – obrábění měkkých ocelí nebo nízko-uhlíkových ocelí při nízkých rychlostech a malém posuvu,
- krátké třísky – obrábění nerezových ocelí při malém posuvu s tendencí zaplétání do nástroje,
- velmi dlouhé třísky – obrábění měkkých ocelí a nízkouhlíkových ocelí při nesprávném nastavení řezných parametrů.



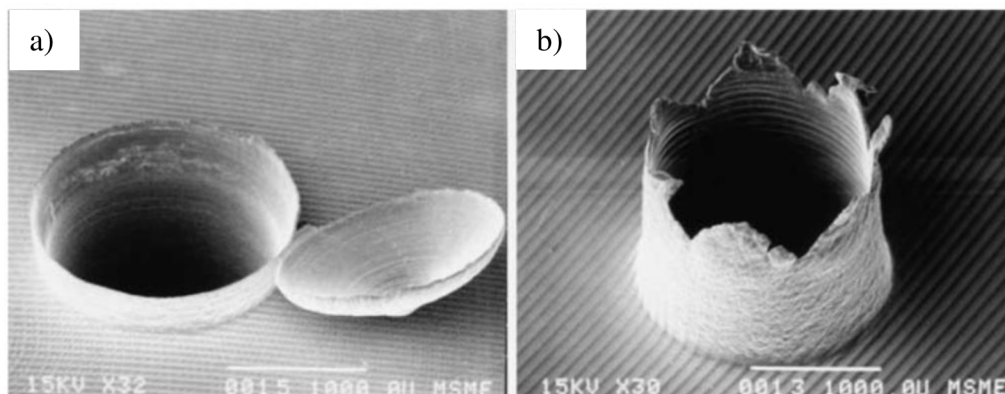
Obr. 1.14 Změna tvaru třísky v závislosti na řezných parametrech [9].

### 1.9 Otřepy po procesu vrtání

Jednou z chyb, které se vyskytují v procesu vrtání, je vznik otřepů na okraji děr. Otřepy vznikají plastickou deformací materiálu obrobku, který nebyl ustřižen. Tento jev závisí na mnoha faktorech, jako jsou řezné podmínky (řezná rychlost a posuv), geometrie nástroje (úhel špičky, úhel šroubovice, úhel hřbetu, tloušťka jádra, atd.), struktura a vlastnosti obráběného materiálu. Otřepy vyčnívají z povrchu obrobku, a proto negativně ovlivňují jeho kvalitu a funkčnost. Jejich odstraňování vyžaduje speciální nástroje. Náklady na odstraňování otřepů mohou představovat až 30% z celkových nákladů na konečný výrobek. V případě děr, které ústí do dutiny v obrobku, je v mnoha případech prakticky nemožné jejich odstranění [10,11].

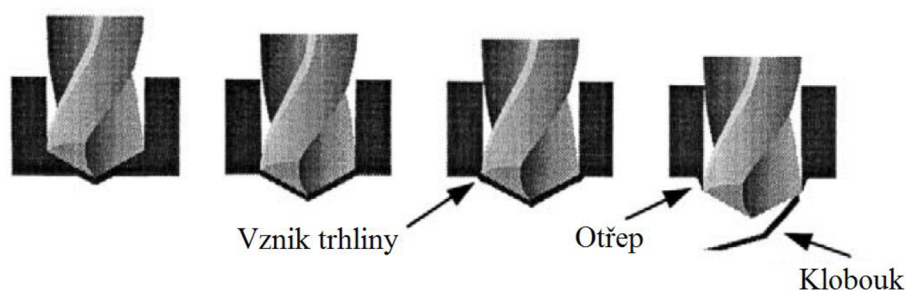
#### 1.9.1 Tvar otřepů

Otřepy mají dvě základní podoby, jak je znázorněno na obr. 1.15. Na levém obrázku je vidět tvar klobouku, který vzniká v poslední fázi vrtání. Může zůstat připojený k obrobku nebo odpadnout. Na pravém obrázku je vidět otřep připojený k hraně díry ve tvaru koruny [10].

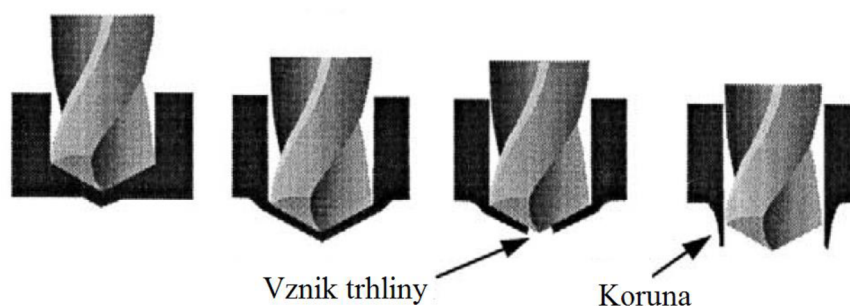


Obr. 1.15 Základní tvary otřepů. a) klobouk, b) koruna [10].

Proces vzniku otřepů probíhá v místě, kdy se špička vrtáku blíží výstupu z materiálu obrobku. Vzdálenost místa vzniku plastické deformace pod příčným ostřím od výstupního povrchu obrobku závisí především na velikosti posuvové síly při vrtání. Jakmile proces vrtání pokračuje, plastická deformace se rozšiřuje od středu po okraj díry. Nakonec nastane lom na konci hrany a vznikne klobouk (obr. 1.16). Zbývající materiál vytlačený z obrobku vytvoří malý pravidelný otřep [10].



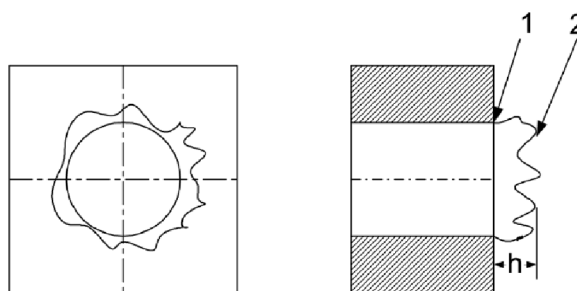
Obr. 1.16 Průběh vzniku otřepu ve formě kloboučku [10].



Obr. 1.17 Průběh vzniku otřepu ve formě korunky [10].

Vznik koruny je zapříčiněn větší axiální silou, kvůli které nastává plastická deformace dříve. Pod vrtákem zůstane tlustší vrstva materiálu, která se začne plasticky deformovat a maximální hodnota napětí je uprostřed díry. To má za následek vznik lomu v oblasti středu. Poté je zbytek materiálu vytlačen kolem okraje díry a vznikne tak vysoká koruna (obr. 1.17). Koruna má nepravidelné rozložení výšky kolem otvoru [10].

Výška otřepů (obr. 1.18) se měří optickou metodou s použitím mikroskopu. Výška  $h$  se měří od kořene otřepu (bod 1) po jeho vrchol (bod 2).

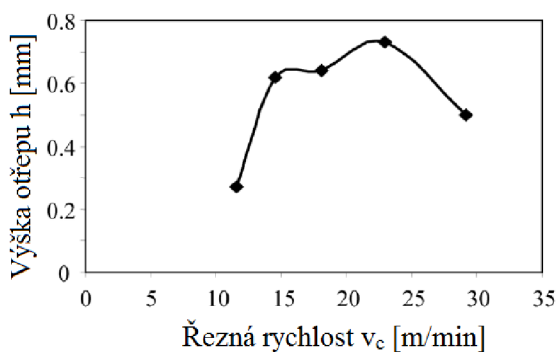


$h$  = výška otřepu

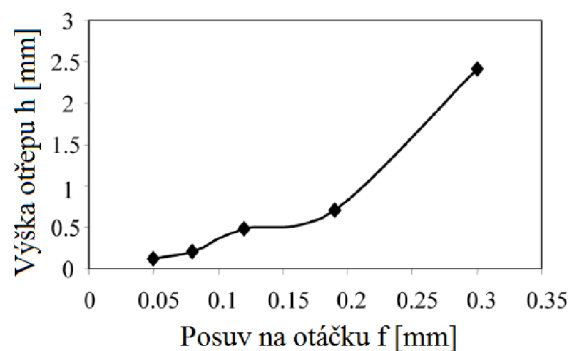
Obr. 1.18 Měřená výška otřepu [11].

### 1.9.2 Vliv řezných podmínek na výšku otřepů

Na výšku otřepů má vliv kromě řezné rychlosti a posuvu také opotřebení břitu nástroje. Na obrázcích 1.19 a 1.20 jsou ukázky závislosti řezné rychlosti a posuvu nástroje na výšce otřepu pro šroubovitý vrták  $\varnothing 10,32$  mm podle literatury [11]. Při analýze závislosti řezné rychlosti na výšce otřepu, byl nastaven konstantní posuv na otáčku 0,12 mm a při analýze závislosti posuvu na výšce otřepu, byla nastavena konstantní řezná rychlost 18,128 m/min.



Obr. 1.19 Závislost výšky otřepu na řezné rychlosti [11].

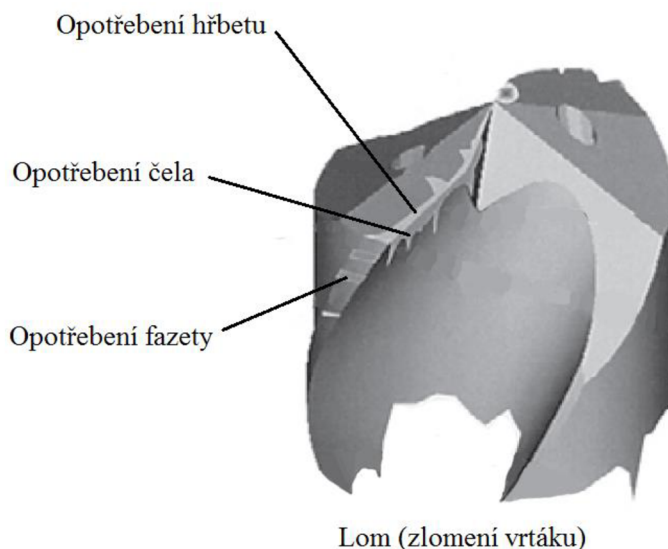


Obr. 1.20 Závislost výšky otřepu na posuvu na otáčku [11].

Z těchto diagramů je patrné, že větší vliv na výšku otřepů má posuv na otáčku nástroje, na druhém místě je řezná rychlost. Opotřebení nástroje má minimální vliv.

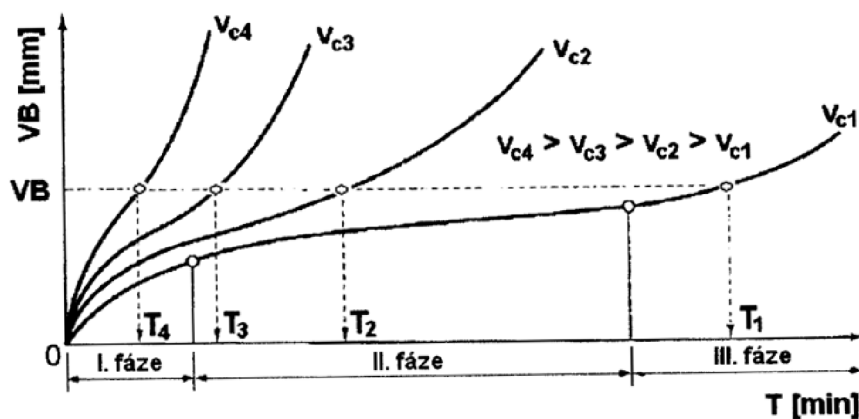
### 1.10 Opotřebení nástroje

V důsledku kontaktu nástroje s obrobkem (na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje) a odcházející třískou (na čele nástroje), dochází vždy k opotřebení břitu nástroje. Vzhled špičky vrtáku, včetně jeho typických forem opotřebení je znázorněn na obr. 1.21. Pokud nejsou tato poškození ve velkém rozsahu, pak lze nástroj dále používat [9].



Obr. 1.21 Opotřebení nástroje při vrtání [9].

Jako kritérium opotřebení břitu nástroje se nejčastěji uvažuje šířka fazety na hřbetě nástroje (VB), která se analyzuje pomocí křivek opotřebení pro danou řeznou rychlost (obr. 1.22).



Obr. 1.22 Časová závislost opotřebení pro různé řezné rychlosti [13].

Časový průběh opotřebení je rozdělen na následující 3 fáze [8,13]:

I. fáze: pásmo záběru – rychlý nárůst opotřebení je způsoben velkým měrným tlakem mezi hlavním hřbetem nástroje a přechodovou plochou obrobku, vlivem velmi malé stykové plochy,

II. fáze: pásmo normálního opotřebení – opotřebení rovnoměrně narůstá v důsledku působení základních mechanismů opotřebení,

III. fáze: pásmo zrychleného opotřebení – výrazné zvýšení intenzity opotřebení vlivem nakumulovaného tepelného zatížení nástroje.

### 1.11 Trvanlivost a životnost nástroje

Trvanlivost řezného nástroje lze definovat jako součet všech čistých časů řezání, od začátku obrábění, až po opotřebení břitu na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria [13].

Životnost nástroje je definována jako součet všech jeho trvanlivostí, nebo též jako celková doba funkce nástroje od prvního uvedení do činnosti až do jeho vyřazení. Životnost se tedy prodlužuje počtem břitů a počtem jeho ostření [13].

F.W. Taylor zjistil v roce 1905, že z řezných podmínek má na trvanlivost nástroje největší vliv řezná rychlost. Po odečtení trvanlivostí nástroje pro konstantní opotřebení a různé řezné rychlosti z časových křivek, se získá závislost dle obr. 1.23. Po zlogaritmování vznikne lineární závislost trvanlivosti na řezné rychlosti dle obr. 1.24, ze které lze odvodit následující Taylorův vztah pro trvanlivost nástroje T [8]:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad (1.34)$$

kde:  $C_T$  [-] - materiálová konstanta,

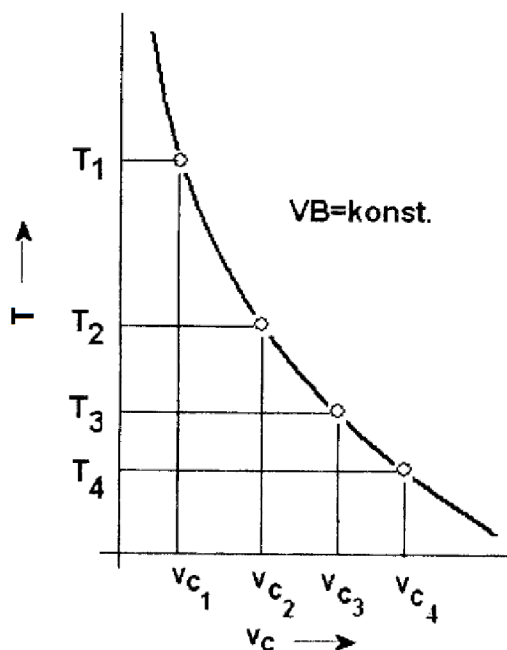
$m$  [-] - materiálový exponent.



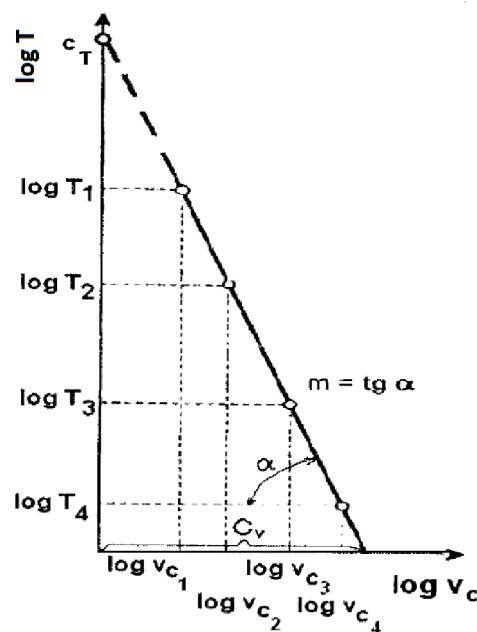
Vzhledem k velmi vysoké a nepraktické konstantě  $C_T$  se častěji užívá vztah [8]:

$$v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} \quad (1.35)$$

kde:  $C_v [-]$  - materiálová konstanta (řádově mnohem menší než  $C_T$ ).



Obr. 1.23 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti [13].



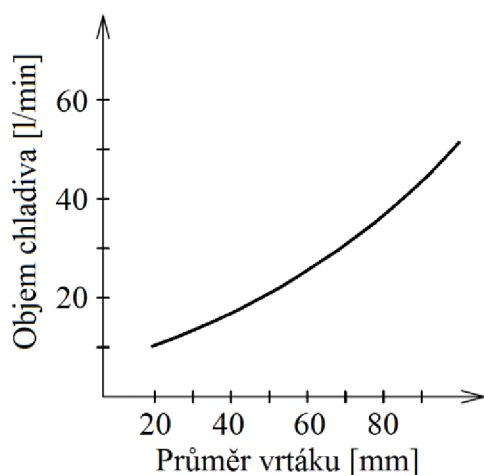
Obr. 1.24 Lineární závislost  $T-v_c$  v logaritmickém tvaru [13].

Z obr. 1.24 je patrné, že hodnoty konstant  $C_T$  a  $C_v$  leží na průsečících přímky s osami. Exponent  $m$  vyjadřuje směrnici vytvořené přímky. Podmínkou platnosti těchto vztahů závislosti  $T-v_c$  jsou následující omezení [8]:

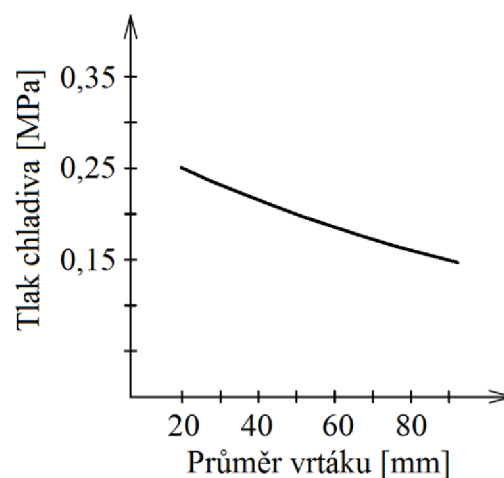
- šířka záběru ostří  $a_p = \text{konst}$ ,
- posuv na otáčku  $f = \text{konst}$ ,
- opotřebení  $VB = \text{konst}$ ,
- chlazení, mazání, stav polotovaru, stroje, atd. = konst.

### 1.12 Chlazení a mazání

Množství a tlak přiváděné řezné kapaliny je důležitým aspektem pro práci moderních, vysoce produktivních vrtáků. Při vrtání se vytváří velké množství třísek, které je nutno rychle odstraňovat z obráběné díry. Je potřeba zajistit konstantně silný proud na čele vrtáku v celé hloubce vrtu a zajistit tak odvod třísky pomocí kanálů podél vrtáku. Další funkcí řezné kapaliny je chlazení. Vzniklé třísky by v případě vrtání neměly být tepelně zbarvené. Závislosti objemu a tlaku chladiva v závislosti na průměru vrtáku firmy Sandvik-Coromant jsou uvedeny na obrázcích 1.25 a 1.26 [1].



Obr. 1.25 Závislost objemu chladiva na průměru vrtáku [1].



Obr. 1.26 Závislost tlaku chladiva na průměru vrtáku [1].

Přívod chladiva se provádí kanály uvnitř vrtáku, zakončenými na jeho čele, jak je vidět na obrázku 1.27. Do vrtáku se řezná kapalina přivádí stacionárním nebo rotačním držákem, v závislosti na použití nástroje na soustruhu nebo obráběcím centru [8].

Vhodným řezným prostředím lze obvykle zvýšit hospodárny úběr o 50 až 200% v porovnání s prací za sucha, prodloužit trvanlivost a životnost řezných nástrojů a zvýšit kvalitu obrobenej plochy. Výběr řezné kapaliny a její aplikace ovlivňuje [13]:

- mechanismus utváření třísky,
- produktivitu obrábění,
- náklady na obrábění.



Obr. 1.27 Vrták firmy Sandvik-Coromant s vnitřním chlazením [8].

Z hlediska technologického a provozního jsou základní funkce řezných kapalin [13]:

- chladicí – odvod tepla z místa řezu, stabilizace nízkých teplot řezání,
- mazací – ovlivňuje třecí poměry na rozhraní nástroj-obrobek, materiál-tříška a velikost stykových ploch,
- čistící – výplach třísek u hlubokého vrtání,
- potlačení tvorby nárůstků na nástroji,
- ochrana obrobků před korozí,
- snížení vibrací stroje.

### 1.12.1 Druhy řezných kapalin

Řezné kapaliny se dělí do dvou skupin [14]:

- chladicí kapaliny – s převažujícím chladicím účinkem,
- řezné oleje – s převažujícím mazacím účinkem.

Do skupiny řezných kapalin s převažujícím chladicím účinkem patří kapaliny na vodní bázi a do skupiny řezných kapalin s převažujícím mazacím účinkem patří kapaliny na bázi oleje. Řezné kapaliny se obecně dělí na [14]:

- a) vodní roztoky – musí být vždy alkalické,
- b) emulzní kapaliny – disperzní soustava dvou vzájemně nerozpustných kapalin, z nichž jedna tvoří mikroskopické kapky rozptýlené ve druhé kapalině,
- c) mastné oleje a tuky – látky živočišného a rostlinného původu,
- d) minerální oleje – výrobky z ropy, s dobrými mazacími vlastnostmi, ale horším chladicím účinkem,
- e) řezné oleje – zušlechtěné minerální oleje,
- f) syntetické kapaliny – rozpustné ve vodě, dobrý chladicí i mazací účinek.

Pro vrtání a vystružování nízkouhlíkových ocelí se používají minerální oleje s přísadami nebo emulze s 10% koncentrací. U ocelí s vyšším obsahem uhlíku se použijí lehké minerální oleje s přísadami. U nerezových ocelí se jako řezná kapalina používá maštěný olej s přísadami [14].

## 2 OPTIMALIZACE OBRÁBĚCÍHO PROCESU

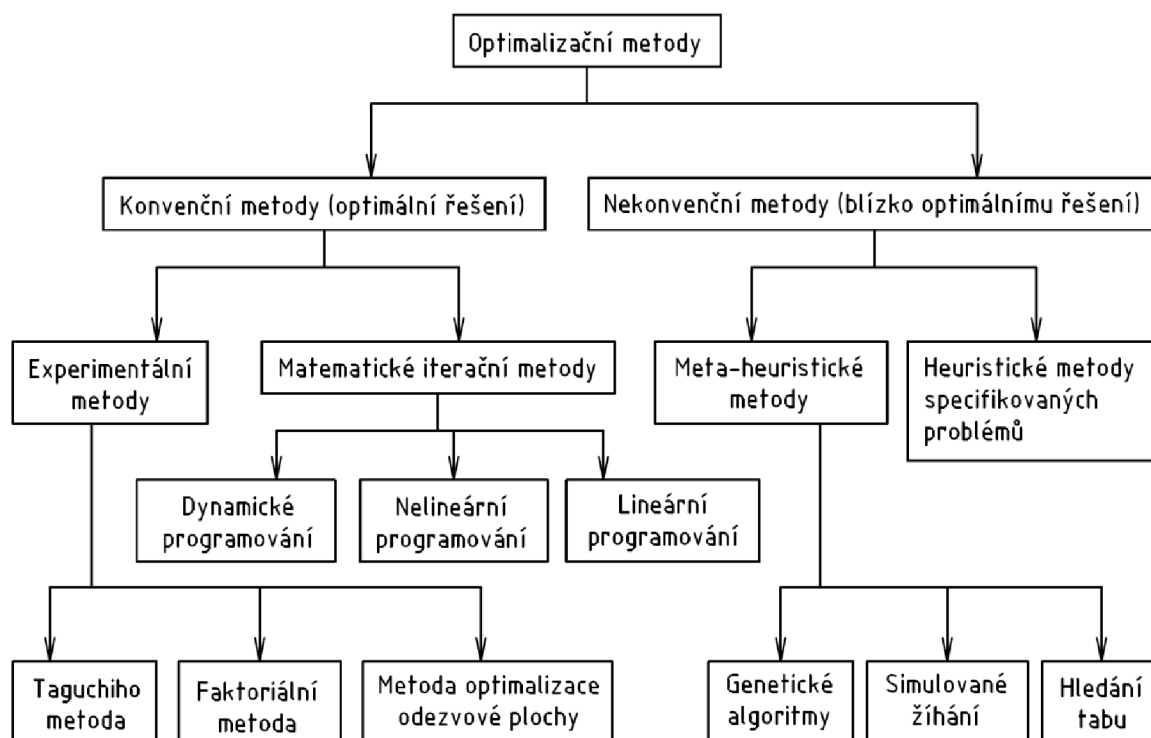
Ke zlepšení efektivity procesu obrábění je nutné optimalizovat kritické oblasti vstupních faktorů, vedoucích k požadovanému výstupu. Firmy se proto snaží nastavovat vhodné proměnné tak, aby získali optimální provozní podmínky s minimálními negativními dopady. Jde tedy o úsilí najít rovnováhu mezi kvalitou a cenou v každé fázi obrábění. Výsledkem je větší optávka a nízké náklady na reklamace [18].

Ve většině typů obráběcích procesů včetně vrtání, jsou klíčové řezné parametry procesu. Optimalizace by měla probíhat ve dvou fázích [18]:

- 1) analýza vstupů a výstupů a jejich vzájemná závislost během procesu obrábění,
- 2) stanovení optimálních řezných podmínek.

Kvůli rostoucí složitosti obráběcích procesů se vědci a odborníci zaměřili na tvorbu matematických modelů, s cílem stanovit co nejpřesněji optimální řezné podmínky, s ohledem na jejich dopady. I přes mnohé studie tohoto problému neexistují univerzální parametry vstupů a výstupů použitelné pro všechny procesy obrábění [18].

Metody stanovení se potýkají s různě složitými problémy spojenými s určením optimálního nebo řešení blízkému optimálnímu. Funkce, které jsou řešeny, mohou mít diskrétní nebo spojitě parametry s diferenciálními nebo nediferenciálními závislostmi. Proto byla vyvinuta spousta optimalizačních technik, jak je znázorněno na obr. 2.1 [18].



Obr. 2.1 Obecné rozdělení optimalizačních metod [18].

## 2.1 Konvenční optimalizace řezných podmínek

Při volbě řezných podmínek vycházíme zejména z nutnosti dodržení následujících zásad [14]:

- řezné podmínky musí zajistit splnění kvalitativních a kvantitativních požadavků na obráběný dílec,
- velikost průřezu třísky musí být v souladu s tuhostí soustavy,
- složky řezného odporu nesmějí překročit maximálně přípustné síly v jednotlivých směrech,
- výkon řezání musí být menší než užitečný výkon elektromotoru stroje,
- nesmí být překročena řezivost nástroje,
- musí být dodržena minimálně přípustná výrobnost stroje za časovou jednotku,
- řezné parametry musí být v mezích přípustných intervalů,
- při obrábění na čisto nesmí být překročena limitní hodnota posuvu, daná požadovanou drsností povrchu.

Při výpočtu optimálních řezných podmínek pro vrtání je požadováno [14]:

- a) maximální využití řezivosti nástroje,
- b) maximální využití efektivního příkonu.

Přitom se nesmí překročit omezení, daná kritériem pro maximálně přípustný posuv [14]:

- c) dovoleným namáháním vrtáku v krutu,
- d) dovoleným namáháním vrtáku na vzpěr,
- e) požadovaným počtem děr za časovou jednotku (hodinu),
- f) použitelným řeznými parametry,
- g) empirickým vztahem.

### 2.1.1 Omezení dané řezivostí vrtáku

Řezivost nástroje úzce souvisí s fyzikálními a mechanickými vlastnostmi nástroje, metodou obrábění, geometrií nástroje, řeznými podmínkami a s řezným prostředím. Kromě toho je velmi závislá na typu obráběném materiálu a na jeho obrobiteľnosti [8].

Kritériem hodnocení řezivosti je základní Taylorův vztah. Obecně má lepší řezivost ten nástrojový materiál, který vykazuje v  $T-v_c$  závislosti vyšší hodnotu konstanty  $C_v$  a nižší hodnotu exponentu  $m$ . V tabulce 2.1 jsou pro některé nástrojové materiály určené exponenty  $m$  a úhel směrnice přímky  $\alpha$  v  $T-v_c$  závislosti [8].

Tab. 2.1 Hodnoty exponentu  $m$  pro různé nástrojové materiály [8].

Materiál	Nástrojové oceli	Rychlořezné oceli	Slinuté karbidy	Řezná keramika
$m [-]$	10 ÷ 8 (až 6)	8 ÷ 5 (až 3)	5,0 ÷ 2,5 (až 2)	2,5 ÷ 1,5 (až 1,2)
$\alpha [^\circ]$	84 ÷ 83	83 ÷ 79	79 ÷ 68	68 ÷ 56

Řezivost vrtáku  $v_{cT}$  je dána vztahem [19]:

$$v_{cT} = \frac{C_{vc} \cdot D^{x_{vc}}}{T_{opt}^{1/m} \cdot f^{y_{vc}}} \quad (2.1)$$

kde:  $C_{vc}$ ,  $x_{vc}$ ,  $y_{vc} [-]$  - materiálóvé konstanty.

Řezná rychlost vrtáku na maximálním průměru nesmí překročit danou hodnotu řezivosti [19]:

$$\frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \leq \frac{c_{vc} \cdot D^{x_{vc}}}{T_{opt}^{1/m} \cdot f_{y_{vc}}} \quad (2.2)$$

a po úpravě:

$$n \cdot f_{y_{vc}} \leq \frac{10^3 \cdot c_{vc}}{T_{opt}^{1/m} \cdot \pi \cdot D^{(1-x_{vc})}} \quad (2.3)$$

### 2.1.2 Omezení dané užitečným výkonem a krouticím momentem

Toto omezení je jedním z rozhodujících faktorů při hrubování. Průběh výkonu strojů bývá popisován v závislosti na otáčkách vřetena. Omezující podmínka je pak dána vztahem [20]:

$$P_{ef} \leq P_e \eta_m \quad (2.4)$$

kde:  $P_{ef}$  [W] - užitečný výkon,  
 $P_e$  [W] - výkon elektromotoru stroje,  
 $\eta_m$  [-] - mechanická účinnost stroje.

Efektivní výkon je funkcí řezné síly:

$$P_{ef} = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^3} \quad (2.5)$$

V případě konstantního průběhu výkonu stroje je funkce výkonu elektromotoru rovna konstantě, když je průběh lineární nebo nelineární, je funkce výkonu elektromotoru stroje popsána danými lineárními nebo nelineárními vztahy [20].

Maximální krouticí moment při daných otáčkách při využití výkonu elektromotoru na vřetení je [19]:

$$M_k = \frac{9,55 \cdot 10^6 \cdot P_{ef}}{n} \quad (2.6)$$

Podmínka, která musí být splněna je, že krouticí moment potřebný k řezání nesmí být větší než krouticí moment daný efektivním řezným výkonem na vřetení [19]:

$$M_{řez} \leq M_k \quad (2.7)$$

kde krouticí moment potřebný k řezání  $M_{řez}$  je:

$$M_{řez} = c_M \cdot D^{x_M} \cdot f_{y_{Fc}} \quad (2.8)$$

a po dosazení a úpravě:

$$n \cdot f^{y_{Fc}} \leq \frac{9,55 \cdot 10^3 \cdot P_c}{c_M \cdot D^{x_M}} \quad (2.9)$$

### 2.1.3 Omezení dané dovoleným namáháním vrtáku na krut a vzpěr

Při vrtání je také důležitá omezující podmínka z hlediska kombinovaného namáhání na krut a vzpěr. Doporučená hodnota poměru vysunuté části vrtáku  $l_o$  a jeho průměru  $D$  je  $l_o/D = 7,5$ . Při menší hodnotě se obvykle kontroluje vrták na krut, při větší na vzpěr. Pro kritickou velikost krouticího momentu  $M_{krit}$  platí [19]:

$$M_{krit} = W_k \cdot \tau_{mez} \quad (2.10)$$

$$\tau_{mez} = \frac{R_m}{\alpha} = 0,577 \cdot R_m \quad (2.11)$$

kde:  $W_k$  [mm<sup>3</sup>] - modul průřezu v krutu,  
 $\tau_{mez}$  [MPa] - dovolené napětí v krutu,  
 $R_m$  [MPa] - mez pevnosti materiálu,  
 $\alpha$  [-] - konstanta ( $\alpha = \sqrt{3}$ ).

Musí být splněna následující podmínka [19]:

$$M_{řez} \leq M_{krit} \quad (2.12)$$

Po úpravě a dosazení potřebných součinitelů:

$$c_M \cdot D^{x_M} \cdot f^{y_{Fc}} \leq \frac{0,01108 \cdot D^3 \cdot R_m \cdot \varepsilon}{K} \quad (2.13)$$

kde:  $\varepsilon$  [-] - opravný součinitel zahrnující vliv úhlu sklonu šroubovice a redukci skutečného průřezu vrtáku (hodnoty pro některé úhly stoupání šroubovice  $\lambda_s$  jsou uvedeny v tab. 2.2),  
 $K$  [-] - součinitel bezpečnosti zahrnující vliv dynamického namáhání (volí se mezi 3 ÷ 4),

a po úpravě:

$$f \leq \left[ \frac{0,01108 \cdot D^{(3-x_M)} \cdot R_m \cdot \varepsilon}{c_M \cdot K} \right]^{1/y_{Fc}} \quad (2.14)$$

Tab. 2.2 Hodnoty součinitele  $\varepsilon$  [12].

$\lambda_s$ [°]	12	27	40
$\varepsilon$ [-]	1,47	1,83	1,67

Kritériem namáhání na vzpěr je kritická axiální posuvová síla  $F_{f,krit}$ , která se určí pomocí aplikace Eulerova vzpěru [19]:

$$F_{f,krit} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{red}}{4 \cdot l_o^2} = \frac{4468 \cdot D^4}{l_o^2} \quad (2.15)$$

kde:  $E$  [MPa] - modul pružnosti v tahu,  
 $I_{red}$  [mm<sup>4</sup>] - redukovaný moment setrvačnosti průřezu  
 ( $I_{red} = 0,008626 \cdot D^4$ ),  
 $l_o$  [mm] - vysunutá délka vrtáku.

Omezující podmínka je potom [19]:

$$F_f \leq \frac{F_{f,krit} \cdot \xi}{K} \quad (2.16)$$

$$c_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \leq \frac{4468 \cdot D^4 \cdot \xi}{K \cdot l_o^2} \quad (2.17)$$

kde:  $\xi$  [-] - opravný součinitel (hodnoty pro některé úhly stoupání šroubovice  $\lambda_s$  jsou uvedeny v tab. 2.3),

a po úpravě:

$$f \leq \left[ \frac{4468 \cdot D^{(4-x_{Ff})} \cdot \xi}{K \cdot l_o^2 \cdot c_{Ff}} \right]^{1/y_{Ff}} \quad (2.18)$$

Tab. 2.3 Hodnoty součinitele  $\xi$  [12].

$\lambda_s$ [°]	12	27	40
$\xi$ [-]	1,89	2,07	1,50

#### 2.1.4 Omezení dané z hlediska minimálně přípustného počtu děr za hodinu

Podmínka pro dodržení požadovaného množství děr za hodinu je dána následujícím vztahem [19]:

$$n \cdot f \geq \frac{L}{\frac{60 \cdot \eta_s}{N_m} - t_{A11}} \quad (2.19)$$

kde:  $N_m$  [1/hod] - norma množství (počet požadovaných děr za hodinu),  
 $t_{A11}$  [min] - čas jednotkové práce za klidu,  
 $\eta_s$  [-] - využití stroje za směnu.



## 2.2 Optimalizace výrobních nákladů

Optimalizace výrobních nákladů je provedena z užšího pohledu s ohledem na výpočet optimální řezné rychlosti nebo optimální trvanlivosti nástroje. Celkové operační náklady  $N_C$  na obrobení jednoho kusu konkrétní součásti pro daný obráběcí stroj a řezný nástroj se za předpokladu, kdy se obrábí jedna plocha obrobku jedním nástrojem, vyjádří vztahem [13]:

$$N_C = N_S + N_N + N_V \quad (2.20)$$

kde:  $N_S$  [Kč] - náklady na strojní práci,  
 $N_N$  [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu,  
 $N_V$  [Kč] - náklady na vedlejší práci.

Náklady na strojní práci  $N_S$  lze určit následovně [13]:

$$N_S = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = t_{AS} \cdot N_{sm} \quad (2.21)$$

kde:  $t_{AS}$  [min] - jednotkový strojní čas,  
 $N_{sn}$  [Kč] - hodinová sazba stroje,  
 $N_{sm}$  [Kč] - minutová sazba stroje.

Musí se uvažovat, že nástroj pracuje také chvíli před a po vlastním obrábění (viz. obr. 2.2). Jednotkový strojní čas neboli čas automatického chodu obráběcího stroje  $t_{AS}$  je dán vztahem [2]:

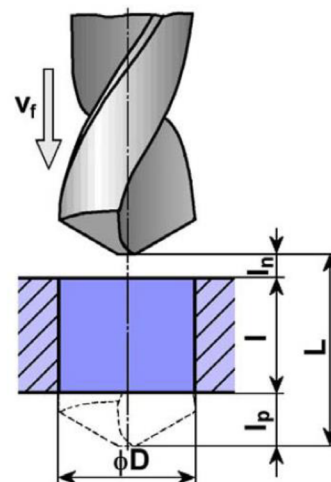
$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \frac{l_n + l + l_p}{n \cdot f} \quad (2.22)$$

kde:  $L$  [mm] - dráha nástroje ve směru posuvu,  
 $l_n$  [mm] - délka náběhu,  
 $l$  [mm] - délka obráběné plochy,  
 $l_p$  [mm] - délka přeběhu.

Náklady na nástroj a jeho výměnu  $N_N$  se určí [13]:

$$N_N = \frac{N_T}{Q_T} \quad (2.23)$$

kde:  $N_T$  [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu vztahené na jednu trvanlivost břitu,  
 $Q_T$  [ks] - počet obrobků tímto břitem.



Obr. 2.2 Dráha vrtáku [2].

Počet obrobených kusů během trvanlivosti břitu lze vyjádřit podle [13]:

$$Q_T = \frac{T}{\tau \cdot t_{AS}} \quad (2.24)$$

kde:  $\tau [-]$  - podíl čistého času řezání, kdy nůž v záběru a strojního času  $t_{AS}$   
 $\left(\tau = \frac{1}{L}\right)$ .

Náklady na vedlejší práci  $N_V$  lze vyjádřit obdobně [13]:

$$N_V = t_{AV} \cdot \frac{D_V}{60} = t_{AV} \cdot N_{Vm} \quad (2.25)$$

kde:  $t_{AV}$  [min] - jednotkový vedlejší čas (např. čas manipulace s materiálem),  
 $D_V$  [Kč] - hodinová sazba na vedlejší práce,  
 $N_{Vm}$  [Kč] - minutová sazba na vedlejší práce.

Po dosazení dílčích vztahu do rovnice 2.20 vznikne vztah [13]:

$$N_c = \frac{L}{n \cdot f} \cdot N_{sm} + \frac{L}{T \cdot n \cdot f} \cdot N_T \cdot \tau + t_{AV} \cdot N_{Vm} \quad (2.26)$$

Pro otáčky nástroje nebo obrobku  $n$  platí vztah:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad (2.27)$$

a) hledání optimální rezné rychlosti  $v_{c \text{ opt}}$  pro kritérium minimálních výrobních nákladů

Vychází se ze základního Taylorova vztahu, ze kterého se vyjádří trvanlivost nástroje [13]:

$$T \cdot v_c^m = c_T \Rightarrow T = \frac{c_T}{v_c^m} \quad (2.28)$$

Po dosazení do 3.26, úpravě a analytickém vyšetření extrému se získá optimální rezná rychlost  $v_{c \text{ opt}}$  podle kritéria minimálních výrobních nákladů [13]:

$$v_{c \text{ opt}} = \left( \frac{c_T}{\tau} \cdot \frac{N_{sm}}{N_T \cdot (m-1)} \right)^{1/m} \quad (2.29)$$

Grafické vyjádření optimální rezné rychlosti při minimálních nákladech je znázorněno na obr. 2.3.

b) hledání optimální trvanlivosti  $T_{opt}$  pro kritérium minimálních výrobních nákladů

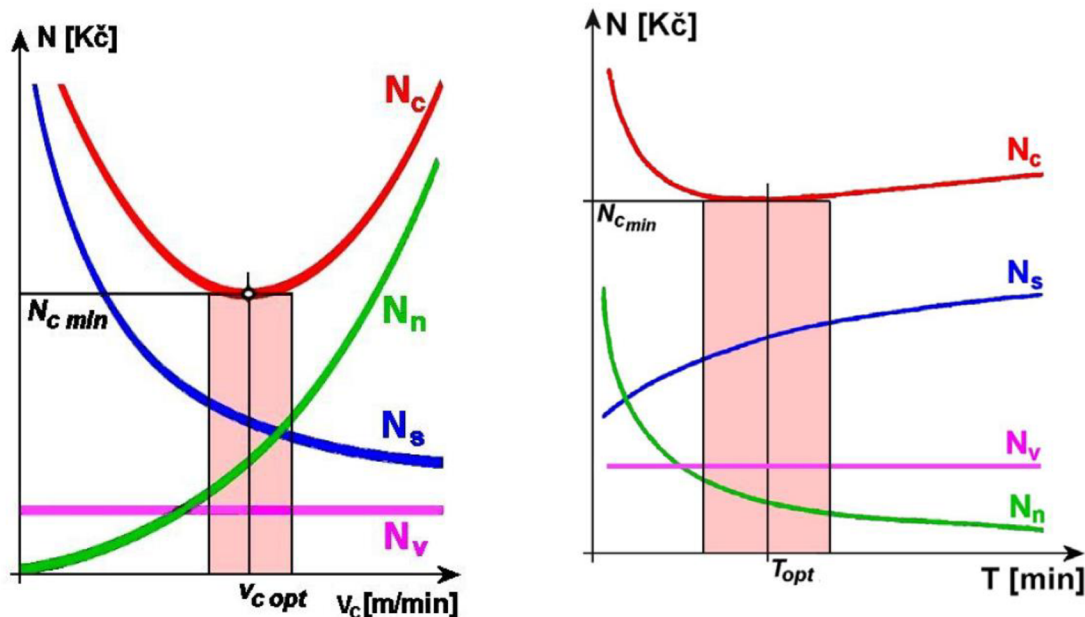
Opět se vyjde ze základního Taylorova vztahu, ovšem tentokrát se vyjádří otáčky [13]:

$$T \cdot v_c^m = c_T \Rightarrow v_c = \left( \frac{c_T}{T} \right)^{\frac{1}{m}} = \frac{c_v}{T^{\frac{1}{m}}} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \Rightarrow n = \frac{1000}{T^{\frac{1}{m}} \cdot \pi \cdot D} \quad (2.30)$$

Po dosažení do 2.26, úpravě a analytickém vyšetření extrému se získá optimální trvanlivost nástroje  $T_{opt}$  podle kritéria minimálních výrobních nákladů [13]:

$$T_{opt} = (m - 1) \cdot \tau \cdot \frac{N_T}{N_{sm}} \quad (2.31)$$

Grafické vyjádření optimální trvanlivosti nástroje při minimálních nákladech je znázorněno na obr. 2.4.



Obr. 2.3 Závislost nákladů na řezné rychlosti [8]. Obr. 2.4 Závislost nákladů na trvanlivosti [8].

### 2.3 Optimalizace výrobního času

U této optimalizace hledáme opět optimální řeznou rychlost nebo optimální trvanlivost nástroje, ale tentokrát pro minimální výrobní čas. Ve výpočtu operačního času jednotkové práce  $t_A$  opět vycházíme z předpokladu obrobení jedné plochy jedním nástrojem [13]:

$$t_A = t_{AS} + t_N + t_{AV} \quad (2.32)$$

kde:  $t_N$  [min] - čas na výměnu nástroje (podílový, na všechny kusy obrobené během jedné trvanlivosti).

Jednotkový strojní čas  $t_{AS}$  se vypočítá podle rovnice 2.22, čas na výměnu nástroje  $t_N$  se určí následovně [13]:

$$t_N = \frac{t_{AX}}{Q_T} \quad (2.33)$$

kde:  $t_{AX}$  [min] - čas výměny nástroje.

Počet obrobených kusů během trvanlivosti břítu  $Q_T$  se vypočítá podle vztahu 3.24. Dosazením těchto vztahů do rovnice 2.32, bude operační jednotkový čas vypadat následovně [13]:

$$t_A = \frac{L}{n \cdot f} + \frac{t_{Ax} \cdot \tau \cdot L}{T \cdot n \cdot f} + t_{AV} \quad (2.34)$$

Tento vztah lze opět upravit pomocí základního Taylorova vztahu a vyšetřením extrému funkce získat:

- a) optimální řeznou rychlost pro minimální výrobní čas,
- b) optimální trvanlivost pro minimální výrobní čas.

Často je třeba proces optimalizovat ze širšího pohledu, kde existuje celá řada dalších fyzikálních, technologických a ekonomických omezení. Mezi tato omezení patří například [13]:

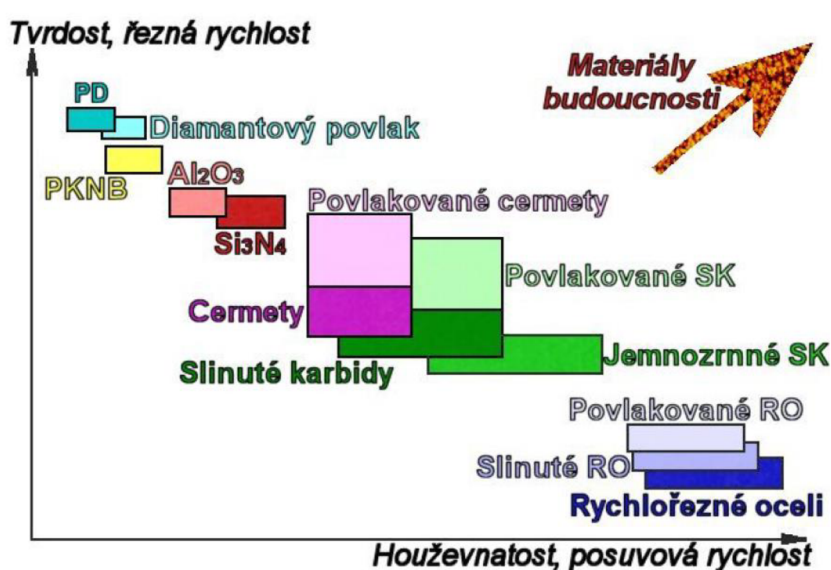
- a) řezivost nástroje a způsob její kvantifikace,
- b) vliv řezných podmínek na silovou a energetickou náročnost obrábění,
- c) tuhost a únosnost nástroje, odolnost proti kombinovanému namáhání,
- d) rozsah použitelných řezných rychlostí, posuvů,
- e) druh utvařeče třísek,
- f) příkon a tuhost stroje, jeho rozsahy otáček, posuvů,
- g) požadavky na kvalitu povrchu (drsnost povrchu, zbytková napjatost).

Obvykle nelze splnit všechny podmínky současně, a proto se hledá kompromisní řešení, závislé na reálných výrobních podmínkách.

### 3 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

Nástrojové materiály významně ovlivňují průběh a výstupy řezného procesu. K odebrání třísky a vytváření nových povrchů požadovaného tvaru, rozměrů a jakosti musí být k dispozici řezný nástroj, jehož břit splňuje odpovídající požadavky. K základním požadavkům na nástrojový materiál patří jeho tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu a houževnatost. Všechny uvedené vlastnosti by měl nástrojový materiál i při vysokých teplotách po dostatečně dlouhou dobu [8,21].

Důsledkem dlouholetého a intenzivního výzkumu a vývoje existuje celá řada nástrojových materiálů. Prakticky každý nový druh nástrojového materiálu znamenal posunutí použitelných řezných podmínek k vyšším hodnotám. Na obr. 3.1 jsou uvedeny oblasti aplikace všech současných materiálů pro řezné nástroje [8,21].



Obr. 3.1 Oblasti použití řezných materiálů [8].

Výběr nástrojového materiálu závisí především na [13]:

- rozměrech obrobku, jeho tvaru, druhu obráběného materiálu, sériovosti výroby,
- technologii výroby polotovaru, stavu povrchové kůry, druhu vměstků, jejich distribuci,
- tvaru a druhu řezu – řez plynulý nebo přerušovaný, podmínky chlazení a mazání,
- obráběcím stroji – druhu, fyzickém stavu, jeho ekonomické provozní náročnosti,
- finanční náročnosti řezného materiálu, nákladů na jeho provoz a údržbu,
- odolnosti proti opotřebení – fyzikálnímu i chemickému, zvláště zatížení za tepla,
- požadavcích na kvalitu obrobeneho povrchu,
- požadavcích na spolehlivost, bezpečnost a ekologii obráběcího provozu,
- možnosti recyklace nebo bezpečné likvidace opotřebeného nástroje.

Aplikace jednotlivých materiálů závisí na jeho fyzikálních (měrná hmotnost, velikost zrna, součinitel tření), chemických (inertnost, stálost), tepelných (teplota tavení, pracovní teplota, tepelná vodivost, délková roztažnost) a mechanických (tvrdost, modul pružnosti,

pevnost v tlaku a ohybu, lomová houževnatost) vlastnostech. Některé tyto vlastnosti vybraných nástrojových materiálů jsou uvedeny v tabulce 3.1 [21].

Tab. 3.1 Vlastnosti vybraných nástrojových materiálů [21].

Vlastnost	Nástrojový materiál			
	Slinutý karbid WC+Co	Cermet Mo <sub>2</sub> C+TiCN+Ni	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC
Měrná hmotnost [g cm <sup>-3</sup> ]	12,0 ÷ 15,1	5,6 ÷ 7,0	3,8 ÷ 4,0	4,2 ÷ 4,3
Pevnost v ohybu [MPa]	1000 ÷ 2400	1150 ÷ 1800	600 ÷ 800	600 ÷ 900
Tvrдость	[HV]	1900	2000	1600 ÷ 2200
	[HRA]	90 ÷ 92	91 ÷ 93	91 ÷ 94
Modul pružnosti v tahu [GPa]	520 ÷ 660	500	340 ÷ 400	370 ÷ 420
Souč. délkové roztažnosti [10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	4,5 ÷ 7,0	7,0 ÷ 7,5	7,0 ÷ 8,5	1,5 ÷ 3,5
Měrná tepelná vodivost [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	80	30	20 ÷ 30	30 ÷ 50
Lomová houževnatost [MPa m <sup>1/2</sup> ]	10 ÷ 17	10	4 ÷ 6	5 ÷ 7

V aplikaci na automatizované výrobní linky a obráběcí centra se zpravidla používají nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu, včetně povlakovaných destiček a to v rozsahu cca 80 % [14].

Požadovaných parametrů kvality a stability nástroje je dosaženo [14]:

- volbou vhodného druhu materiálu řezné části nástroje,
- volbou optimálních řezných parametrů (optimální geometrie, optimální řezné podmínky),
- výrobou a údržbou těchto nástrojů ve speciálních provozech.

### 3.1 Nástrojové oceli

Nástrojové oceli musí stejně jako ostatní řezné materiály splňovat požadovanou tvrdost, pevnost, ale také houževnatost. Musí mít také vysokou čistotu (nižší obsah vměstků a rovnoměrně rozložené karbidy v matici), aby se snížilo riziko praskání nástrojů při kalení a vyštípnutí břitu za provozu. U ocelí na nástroje s většími průřezy nebo složitějšími tvary je třeba zaručit dostatečně velkou prokalitelnost. Nástrojové oceli se rozdělují podle řady metodik (dle použití, způsobu výroby, atd.). Nejčastěji se ovšem rozdělují podle chemického složení na [8]:

- nelegované (uhlíkové) oceli,
- legované oceli (nízkolegované, střednělegované),
- vysokolegované (rychlořezné) oceli.

V dnešní době mají velký význam zejména rychlořezné oceli (RO). Tyto oceli snášejí při obrábění teplotu přibližně až 600 °C, což oproti ostatním materiálům není mnoho. Proto je jejich použití spíše vhodné pro výkonné řezné nástroje vystavené nárazům při

přerušovaném řezu, jako jsou nože, tvarové nástroje, frézy, vrtáky, závitorezné nástroje, výstružníky a další. Předpokladem optimálního využití nástrojů z RO je použití vhodného řezného prostředí [14].

Řezné podmínky, které se nastavují při použití šroubovitého vrtáku vyrobeného z rychlořezné oceli, jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Tab. 3.2 Řezné podmínky pro šroubovitě vrtáky z RO [14].

Obráběný materiál	$v_c$ [m min <sup>-1</sup> ]	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 Slinuté karbidy

Výroba těchto nástrojů se provádí práškovou metalurgií. Princip spočívá ve spékání karbidů wolframu (WC), titanu (TiC), Ta, Cr a dalších kovů. Jako pojivo karbidů se používá kobalt (Co). Slinuté karbidy (SK) snášejí při obrábění teplotu až asi  $900$  °C. Oproti rychlořezné oceli mají SK lepší oteruvzdornost, jsou však křehké, mají sklon k vydrolování břitů a jsou obtížně obrobitelné [8,21].

Mezinárodní rozdělení nepovlakovaných SK podle normy ISO specifikuje použití jeho použití ve třech základních skupinách [21]:

- P (modrá barva značení) – SK pro obrábění materiálů, dávající plynulou třísku,
- M (žlutá barva značení) – SK pro obrábění materiálů, dávající plynulou i krátkou třísku,
- K (červená barva značení) – SK pro obrábění materiálů, dávající krátkou třísku.

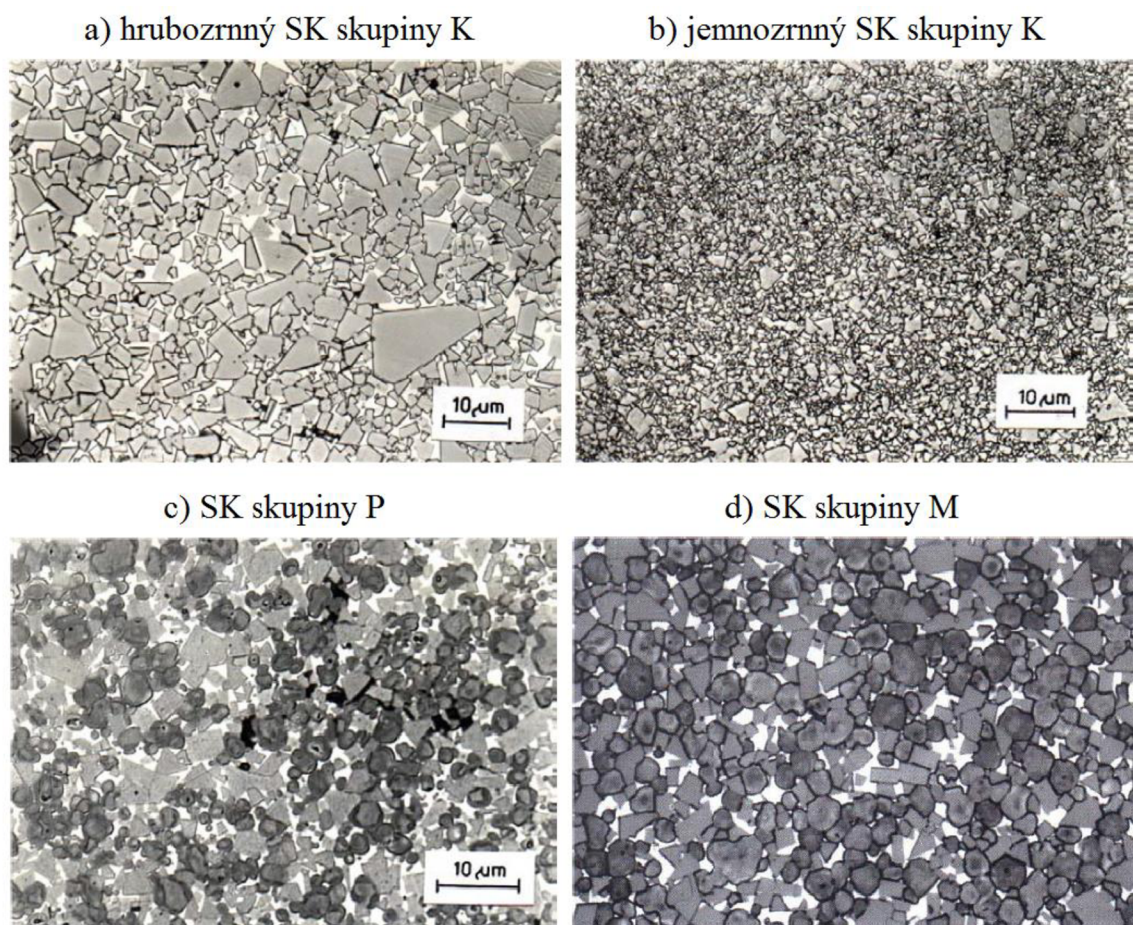
Vzhledem ke svému složení jsou nepovlakované SK často označovány jako [21]:

- jednokarbidové (skupina K): WC + Co (+ TaC/NbC),
- dvojkarbidové (skupina P): WC + TiC + Co (+ TaC/NbC),
- vícekarbidové (skupina M): WC + TiC + TaC/NbC + Co.

Vlastnosti některých karbidů jsou uvedeny v následující tabulce 3.3. Struktury jednotlivých skupin SK jsou zobrazeny na obr. 3.2.

Tab. 3.3 Vlastnosti některých karbidů [13].

Druh karbidu	Teplota tavení [°C]	Tvrdost [HV]
TiC	3200	3000
$V_4C_3$	2800	2500
TbC	3500	2400
TaC	3900	1800
WC	2750	2100



Obr. 3.2 Struktura slinutých karbidů [8].

Obecný postup výrob slinutých karbidů lze pospat v těchto krocích [8]:

- výroba práškového wolframu,
- výroba práškových karbidů (WC, TiC, TaC/NbC) a kobaltu,
- příprava směsí uvedených prášků,
- formování směsí,
- předslinování zformovaných směsí (kolem 1000 °C) – tato operace je většinou spojena s operací slinování,
- úprava tvaru předslinutého tělesa (v případě potřeby),
- slinování (1350 – 1650 °C),
- vysokoteplotní izostatické lisování (HIP), kdy probíhá slinování za vysokých teplot a působení tlakového plyn, který zajistí rovnoměrný tlak na slinovaný výrobek ze všech směrů => vysoká hustota s minimálním objemem pórů a jiných vad => nejvyšší hodnoty trvanlivosti rezných nástrojů,
- dodatečné úpravy povrchu (broušení, povlakování).

Řezné podmínky, které se volí pro šroubovitě vrtáky vyrobené ze slinutých karbidů, jsou uvedeny v tabulce 3.4.



Tab. 3.4 Řezné podmínky pro šroubovitě vrtáky ze slinutých karbidů (SK) [14].

Obráběný materiál	$v_c$ [m/min]	Posuv na otáčku $f$ [mm]		
		Průměr vrtáku $D$ [mm]		
		15	12	20
Austenitická ocel	30 až 40	0,01	0,02	0,03
Nástrojová ocel	10	0,02	0,04	0,06
Litina > 200 HB	30 až 40	0,03	0,04	0,07
Vrstvené plasty	50 až 80	0,04	0,06	0,12

### 3.2.1 Povlakované slinuté karbidy


Slinuté karbidy jsou obecně kombinované materiály na bázi práškových kovů. Skládají se z tvrdých karbidů uložených v relativně měkké kovové pojivové fázi, která má za úkol spojit křehké karbidy do pevného tělesa. Cílem vývoje povlaků pro SK bylo odstranění nejméně tvrdé fáze (pojiva) zejména v povrchové vrstvě a zvýšit odolnost proti opotřebení. Výhodou je získaná vysoká tvrdost při vysokých teplotách a odolnost proti opotřebení. Nevýhodou je křehkost a sklon k hydrolování [13,14].

Každoročně je vyvíjeno a zdokonalováno mnoho nových druhů povlakovaných SK. Jednotlivé materiály se navzájem liší druhem povlaku, kombinací vrstev, tloušťkou povlaku, metodou povlakování, substrátem, atd. Pro efektivní využití je velmi důležitá správná kombinace všech uvedených faktorů k dané aplikaci obrábění [21].

Vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů probíhaly následovně [21]:

- 1. generace – jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC), tloušťka asi 6  $\mu\text{m}$  a špatná soudržnost podkladu a povlaku,
- 2. generace – jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN), tloušťka 7 až 10  $\mu\text{m}$ , bez nebezpečí odlupování,
- 3. generace – vícevrstvý povlak (dvě až tři, případně více vrstev), vrstvy řazeny podle vlastností,
- 4. generace – speciální vícevrstvý (často i více než 10 vrstev a mezivrstev), patří sem také diamantové, nanokompozitní, gradientní, supermřížkové a inteligentní povlaky.

Tab. 3.5 Obecné porovnání vlastností základních povlakových materiálů [21].

Hodnocení	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
Nejlepší  Špatná	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	TiC	$\text{Al}_2\text{O}_3$
	TiAlN	TiAlN	TiCN	TiAlN
	TiN	TiN	$\text{Al}_2\text{O}_3$	TiN
	TiCN	TiCN	TiAlN	TiCN
	TiC	TiC	TiN	TiC

V dnešní době se aplikují jak jednovrstvé, tak i vícevrstvé povlaky, podle různých způsobů a podmínek obrábění. U vícevrstevných povlaků mohou být nanášené vrstvy v závislosti na povlakovacím režimu i několik nanometrů. Celková tloušťka povlaku bývá obvykle v rozsahu 2 až 5  $\mu\text{m}$  a musí být optimalizována na danou technologii obrábění podle předpokládaného zatížení v průběhu obrábění. Různé materiály povlaků mají různé

fyzikální i mechanické vlastnosti, které významně ovlivňují jejich odolnost proti opotřebení při aplikacích pro řezné nástroje. V tabulce 3.5 jsou porovnány některé vlastnosti vybraných povlakových materiálů [13].

#### Metody povlakování

Princip výroby povlaků spočívá v nanášení tenké vrstvy materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolnosti proti opotřebení na podklad z běžného slinutého karbidu typu K, P nebo M. Powlakový materiál neobsahuje žádné pojivo a má o jeden i více řádů jemnější zrnitost a méně strukturních defektů a tvoří bariéru proti difúznímu mechanismu opotřebení nástroje. V tabulce 3.6 jsou uvedeny základní rozdíly obou metod [8,21].

Metody povlakování lze rozdělit do dvou základních skupin:

- a) metoda PVD (fyzikální napařování),
- b) metoda CVD (chemické napařování z plynné fáze).

Tab. 3.6 Porovnání metod PVD a CVD [21].

Charakteristika	PVD		CVD
	Napařování	Napařování	
Mechanismus tvorby materiálu povlaku	Tepelná energie	Přenos pohybové energie	Chemická reakce
Rychlost povlakování [ $\text{Å min}^{-1}$ ]	Může být velmi vysoká, až 750000	Nízká, s výjimkou povlaků z čistých kovů (např. 10000 u Cu)	Střední 200 ÷ 2500
Rovnoměrnost pokrytí	Špatná v přímočarém směru (ne při rozptylu plynu)	Dobrá, s nerovnoměrným rozložením tloušťky	Dobrá
Deponované částice	Atomy a ionty		Atomy
Energie deponovaných částic [eV]	Nízká, 0,1 ÷ 0,5	Vysoká, 1 ÷ 100	Může být vysoká u metody PACVD
Bombardování substrátu nebo povlaku	Běžně ne	Ano	Možné
Narušování povrchu rostoucího povlaku			Ano (otěrem)
Nanášení kovů	Ano		
Nanášení kovových slitin			
Nanášení těžkovatelných sloučenin			
Ohřev substrátu (externími prostředky)	Ano, běžně	Zpravidla ne	Ano

Metoda PVD je charakteristická nízkými pracovními teplotami (pod 500 °C). Povlak je nejčastěji vytvářen [21]:

- napařováním – přímé, reaktivní, aktivované reaktivní, s asistencí iontového paprsku,
- napařováním – doutnavý výboj, iontový paprsek,
- iontovou implantací – doutnavý výboj, iontový paprsek.

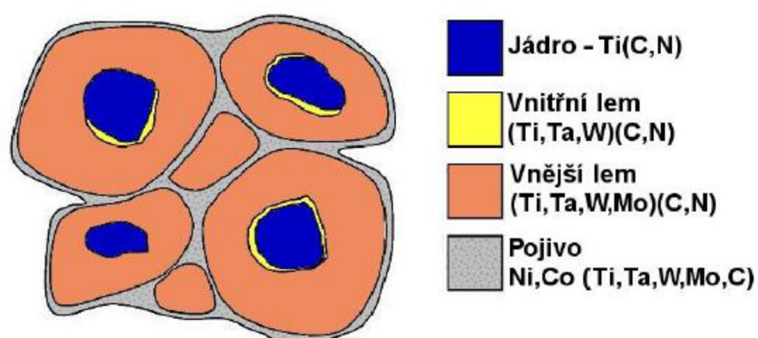
Metoda CVD probíhá za vysokých teplot (700 ÷ 1500 °C). Jedná se o hlavní metodu povlakování slinitých karbidů a může být realizována v těchto variantách [21]:

- tepelně indukovaná,
- plazmaticky aktivovaná,
- elektronově indukovaná (paprsek elektronů),
- fotonově indukovaná (např. laserem).

### 3.3 Cermety

Jedná se o řezný materiál, který je složen prakticky ze stejných výchozích materiálů, jaké jsou používány pro výrobu slinitých karbidů. V cernetech je WC nahrazen převážně TiC, TiN nebo Ti(C,N) s niklovým nebo Ni/Co pojivem. Tvrdé částice cermetu vytvářejí zrna, která obsahují jádra Ti(C,N), obalená lemy z komplexních karbonitridů (obr. 3.3) [8,13].

Účelem vyvíjení tohoto materiálu bylo zkombinovat mechanické vlastnosti keramiky (vysoká tvrdost) a kovů (vysoká houževnatost). Charakteristickou vlastností cermetů je nízká měrná hmotnost. Vynikají vysokou odolností proti difúznímu oxidačnímu opotřebení, vysokou chemickou stabilitou, tvrdostí za tepla a odolností vytvářet nárůstek. Hlavní výhodou je vysoká tvrdost, která je zachována i při vysokých teplotách a také jsou levnější než SK [8,21].



Obr. 3.3 Struktura cernetu [8].

### 3.4 Řezná keramika

Keramika je materiál charakterizovaný jako převážně krystalický, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Tento polykrystalický materiál se zrna malých rozměrů (často pod 1 μm) obsahuje náhodné technologické defekty a mikrostrukturní nehomogenity. Vyznačuje se zejména vysokou tvrdostí, nízkou houževnatostí a nízkou měrnou hmotností [8].

Jednotlivé vlastnosti keramik lze různě kombinovat a měnit podle požadavků konkrétní aplikace. Dělení řezné keramiky podle chemického složení je následující [8]:

- oxidická keramika
  - čistá (čistý  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),
  - polosměsná ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CoO}$ ),
  - směsná ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC} + \text{TiN}$ ),
- nitridová keramika ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiN}$ , sialony,
- vyztužená keramika (oxidická nebo nitridová keramika vyztužená pomocí whiskerů  $\text{SiC}$  nebo  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

### 3.5 Supertvrde nástrojové materiály

K výrobě řezných nástrojů lze s výhodou použít také dva synteticky vyrobené supertvrde materiály - polykrystalický diamant a polykrystalický kubický nitrid boru.

Diamant má poměrně nízkou teplotní stálost (při překročení  $700^\circ\text{C}$  se mění na grafit), proto nesmí být používán pro obrábění materiálu na bázi železa, kde by vlivem teploty mohlo docházet k silné difúzi mezi nástrojem a obrobkem, a tím k rychlému opotřebení nástroje. Široké uplatnění má zejména při obrábění hliníkových slitin, slitin mědi, kompozitů vyztužených různými druhy vláken, titanu a jeho slitin, keramiky, grafitu a tvrdých přírodních materiálů (žula, mramor) [21].

Pro zvýšení pevnosti vazby a potlačení degradace diamantu bývají zrna přírodního i syntetického diamantu opatřena speciálními kovovými povlaky chromu a titanu. Podobným způsobem jsou upravována i zrna kubického nitridu boru [21].

## 4 NÁVRH A ANALÝZA SDRUŽENÉHO NÁSTROJE

Sdružené nástroje bývají navrhovány většinou na zakázku pro danou potřebu zákazníka. Je potřeba dodržet požadované parametry obrobku v rámci mezních hodnot, jako jsou přesnosti rozměrů, drsnosti povrchů, atd.

Tato práce je zaměřena na analýzu sdruženého nástroje ve tvaru stupňovitého vrtáku, který byl navržen pro obrábění součástek firmy Continental Automotive Czech Republic s.r.o. Výrobu takových nástrojů se zabývá společnost Rotana a.s.

### 4.1 O společnosti Rotana a.s.

Společnost Rotana a.s. se zabývá návrhem, vývojem, výrobou a následným servisem monolitních rotačních nástrojů. Kromě speciálních stupňovitých vrtáků ze slinutých karbidů se firma zabývá také výrobou tvarových fréz, mikronástrojů a vyměnitelných břitových destiček atypických tvarů. Vývojové a inovační aktivity firmy jsou zaměřeny zejména na specifické potřeby zákazníků, vývoj nových nástrojů a inovace stávajících nástrojů. Návrhy řezných nástrojů probíhají za pomoci CAD softwarů, především PTC Creo Parametric, na základě dodané specifikace obrobku. Ukázka monolitních povlakovaných nástrojů ze slinutých karbidů pro výrobu složitých otvorů je uvedena na obr. 4.1 [22].

Technické zázemí firmy představuje soubor moderních pětiosých CNC brusek Saacke s veškerým dostupným softwarem. Společnost Rotana a.s. disponuje také bruskou TTB Evolution pro výrobu mikronástrojů a celou řadou nejnovějších metrologických zařízení. Do výrobních procesů je zaveden systém managementu jakosti s certifikací dle normy ČSN ISO 9001:2009 [22].



Obr. 4.1 Monolitní nástroje ze slinutých karbidů [22].

## 4.2 Vyráběná součást

Navržený nástroj má sloužit k výrobě součástky pro automobilový průmysl. Řez součástí, pro jejíž výrobu byl daný stupňovitý vrták navržen, je znázorněn na obr. 4.2 a 4.3.

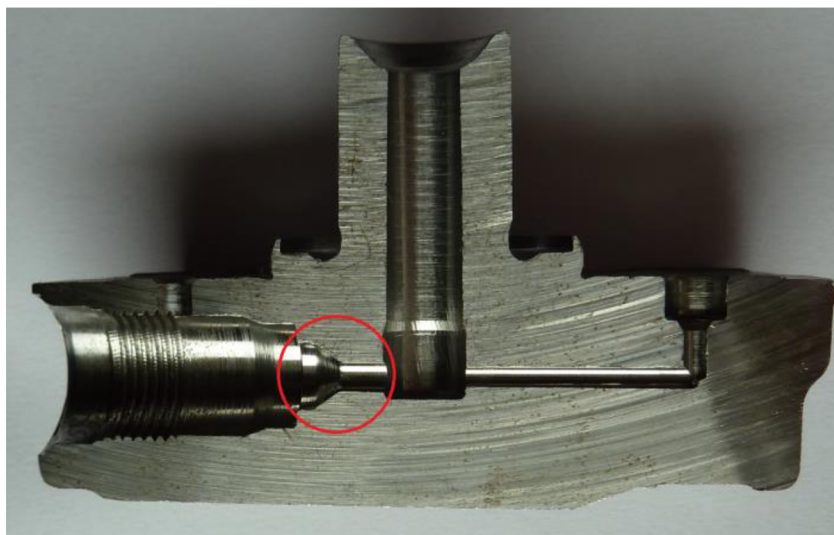


Obr. 4.2 Vzhled obráběné součásti zevnitř.



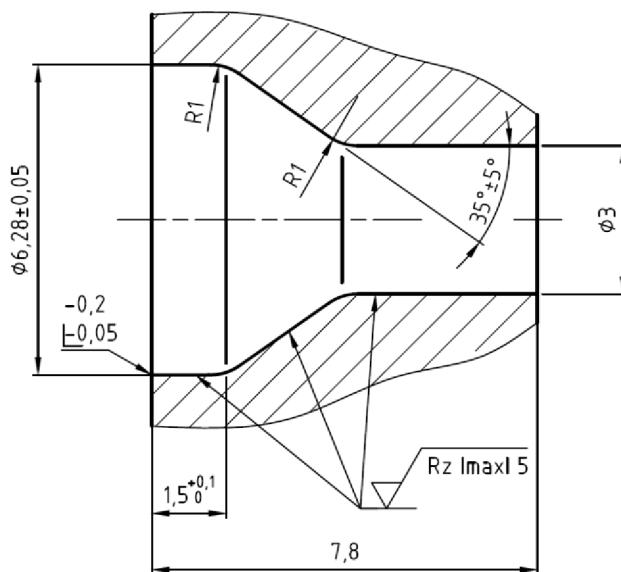
Obr. 4.3 Vzhled obráběné součásti z vnějšku.

Výroba probíhá pomocí několika operací na jedné CNC soustavě. Sdružený nástroj ve tvaru stupňovitého vrtáku je navržen ke zhotovení dvou průměrů současně, včetně kuželového přechodu mezi nimi (obr. 4.4), kdy musí být v rámci tolerance dodrženy rozměry a profil povrchu stejné jako u původní technologie. Je patrné, že díra ústí do vnitřní dutiny obrobku, a proto je nežádoucí vznik otřepů podél její hrany. Na obr. 4.5 jsou zakótované požadované rozměry otvoru.



Obr. 4.4 Řešená část součásti.

Součástka je vyrobena z materiálu 16MnCrS5 dle EN 10084 (ČSN 41 4220, 1.7139 dle DIN). Jedná se o konstrukční nízkolegovanou ušlechtilou mangan-chromovou ocel k cementování. Nejčastější využití má pro středně namáhané díly strojů a motorových vozidel. Pevnost v tahu této oceli se pohybuje okolo 900 MPa, tvrdost po žihání se pohybuje do max. 207 HB [23].



Obr. 4.5 Rozměry řešeného otvoru.

#### 4.2.1 Obráběcí stroj

##### CNC CHIRON DZ 15K W

Jedná se o pětiosé CNC obráběcí centrum (obr. 4.6) firmy Continental Automotive Czech Republic, s.r.o., na kterém probíhá přímo výroba součástí. CNC je vybaveno dvěma vřeteny a dvouosým otočným stolem s automatickým měničem polotovarů. Díky tomu je zajištěna vysoká produktivita obrábění, kdy jsou obráběny čtyři součástky na jedno upnutí. Na stroji se také provádí testy způsobilosti procesu. Parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 4.1.



Obr. 4.6 Obráběcí centrum CHIRON [24].

Tab. 4.1 Technické parametry CHIRON DZ 15K W [24].

Velikost zásobníku nástrojů	2 x 24
Maximální průměr nástroje	ø80 mm
Maximální délka nástroje	300 mm
Maximální hmotnost nástroje	5 kg
Doba výměny nástroje	0,9 s
Doba výměny nástroje a zpětného najetí	2,4 s
Plynule nastavitelné otáčky max. do	12 000 min <sup>-1</sup>
Výkon vřetene	2 x 14 kW
Maximální řezný moment	2 x 90 Nm
Upínací kužel	HSK-A 63
Upínací síla	18 000 N
Rozteč vřeten v ose X	250 mm
Rozsah X / Y / Z	550 / 400 / 360 mm
Posuvová síla X / Y / Z	5 000 / 5 000 / 10 000 N
Posuvová rychlost X / Y / Z	65 / 65 / 65 m/min
Zrychlení X / Y / Z	7 / 10 / 12 m/s <sup>2</sup>
Upínací plocha	2 x 660 mm x 400 mm
Přibližná doba výměny obrobků	1,9 s
Maximální zatížení stolu	400 kg
Celkový příkon	29 kVA

#### 4.2.2 Původní technologie

Původní řešení výroby daného otvoru bylo prováděno pomocí následujících třech kroků:

- 1) hrubování - ø6,28 mm s přídavkem + kuželový přechod s přídavkem,
- 2) vrtání - ø3 mm na čisto,
- 3) dokončování - ø6,28 mm na čisto + kuželový přechod na čisto.

V každém z těchto kroků bylo nutné použít samostatný speciální nástroj - pro hrubování, pro vrtání ø3 a pro dokončování (obr 4.7). To vedlo k vyšším nákladům na výrobu této součástky a nižší produktivitě obrábění.



Obr. 4.7 Původní nástroj pro výrobu kuželového osazení.



### 4.2.3 Nová technologie

Podstatou nového řešení výroby je sloučit předchozí tři kroky do jednoho, kdy obrábění daného otvoru obstará jediný nástroj ve tvaru speciálního stupňovitěho vrtáku. Navržený nástroj musí splňovat potřebnou geometrii, která závisí mnoha faktorech. Mezi tyto faktory patří například rozměry součásti, materiál součásti, zvolené řezné podmínky, drsnost povrchu, životnost nástroje, technologie výroby a předchozí zkušenosti z výroby podobných nástrojů.

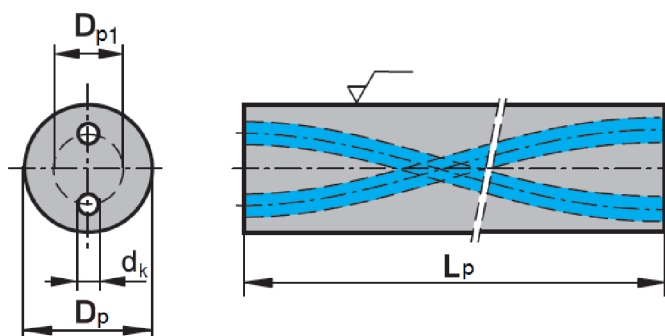
### 4.3 Výroba nástroje

Výroba stupňovitěho vrtáku je složitý proces, který se skládá z několika kroků. Jednotlivé kroky jsou popsány v průvodce, která je uvedena v příloze 1.

Navržený nástroj je vyroben z polotovaru ze slinutého karbidu (obr. 4.8 a 4.9), kde jsou hlavními složkami karbid wolframu a kobalt. Uvnitř polotovaru jsou vyvedeny dva chladicí kanály ve tvaru šroubovice. Rozměry polotovaru jsou uvedeny v tabulce 4.2.



Obr. 4.8 Vzhled polotovaru nástroje [25].



Obr. 4.9 Geometrie polotovaru nástroje [25].

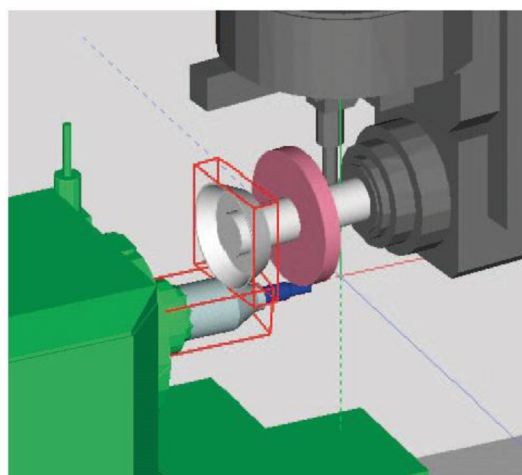
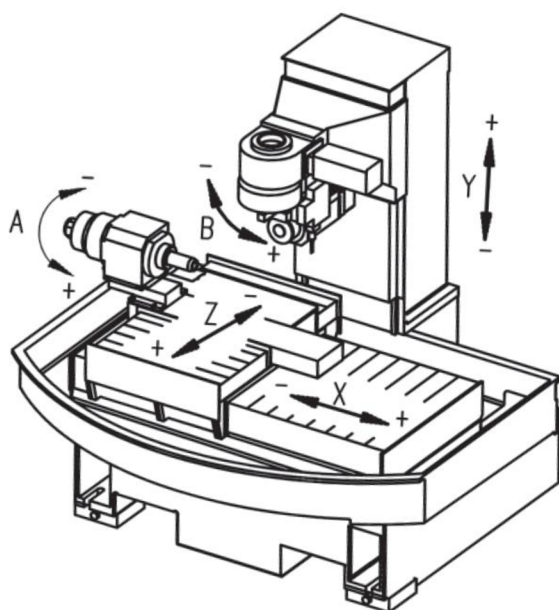
Tab. 4.2 Rozměry polotovaru stupňovitěho vrtáku [25].

$D_p$ [mm]	$L_p$ [mm]	$D_{p1}$ [mm]	$d_k$ [mm]	Rozteč kanálů [mm]	Úhel stoupání [°]
8 h6	330	3,4	1	43,5	30

Broušení řezné části je provedeno na pětiosé CNC brusce SAACKE UW I D dle technické dokumentace, která je uvedena v příloze 2. Vybrané technické parametry CNC brusky jsou uvedeny v tabulce 4.3.

Tab. 4.3 Technické parametry SAACKE UW I D [26].

Maximální průměr obrobku	250 mm
Rozsah osy X/Y/Z	625/305/305 mm
Rychlost posuvů os X, Y a Z	0 – 15 m/min
Otáčky brusného kotouče (osa B)	2 000 – 12 000 min <sup>-1</sup>
Maximální otáčky obrobku (osa A)	600 min <sup>-1</sup>
Citlivost os X, Y a Z	0,0001 mm
Citlivost os A a B	0,0001°
Kapacita měniče brusných kotoučů	6 (volitelně až 12)
Hmotnost	5 200 kg



Obr. 4.10 Souřadnicový systém SAACKE [26]. Obr. 4.11 Kolizní systém NUMROTOplus [26].

Na obr. 4.10 jsou znázorněny možnosti pohybu jednotlivých os dané CNC brusky. Součástí výbavy stroje je flexibilní a multifunkční software NUMROTOplus. Tento programovací systém pro broušení nástrojů na CNC strojích je určený jak pro výrobu nových nástrojů, tak i pro jejich přestřeni. Program je navržen tak, že je možné ho využít k výrobě a broušení prakticky jakéhokoliv tvaru nástroje. Model nástroje zhotovený pomocí programu přesně odpovídá vlastnímu procesu broušení, protože přesně respektuje geometrii brusného kotouče, včetně rádiusů a úhlů. Součástí softwaru je simulace broušení a 3D kolizní simulace, jak je vidět na ukázce dle obr. 4.11 [27].

Při ostření nástrojů je důležité, aby bylo pomocí dotykového snímače či jiného měřicího zařízení automaticky proměřeno co nejvíce rozměrů. NUMROTOplus obsahuje měřicí postupy, které umožňují pořídit velké množství naměřených hodnot použitím jednoho dotykového snímače. Software je rovněž vybaven systémem správy dat, který umožňuje ukládání všech naprogramovaných nástrojů do paměti pro další využití [27].

Pro opracování špiček vrtáků je k dispozici dlouhá řada předem naprogramovaných typů špiček, které lze dále upravovat [27].

Systém disponuje celou řadou speciálních funkcí a způsobů opracování, které výrobcům nástrojů poskytují mnoho možností pro vlastní optimalizaci geometrie nástroje. Mezi tyto funkce patří [27]:

- drážka s volitelným tvarem jádra,
- vícenásobné drážky i u jednofazetových stupňovitých vrtáků,
- drážka s proměnným tvarem šroubovice,
- optimalizovaný zaoblený výběh drážky,
- použití tvarových kotoučů pro broušení drážky,
- volitelná korekce břitu u každého přechodu stupně,
- dvojité vodící fazety u přímých vrtáků,
- broušení válcových ploch s různými cykly hrubování a hlazení,

- manuální brousicí dráha, tj. volné programování nástroje včetně simulace,
- broušení přechodových úhlů odstupňování větších než 180°.

Software je kompatibilní s běžně dostupnými operačními systémy.

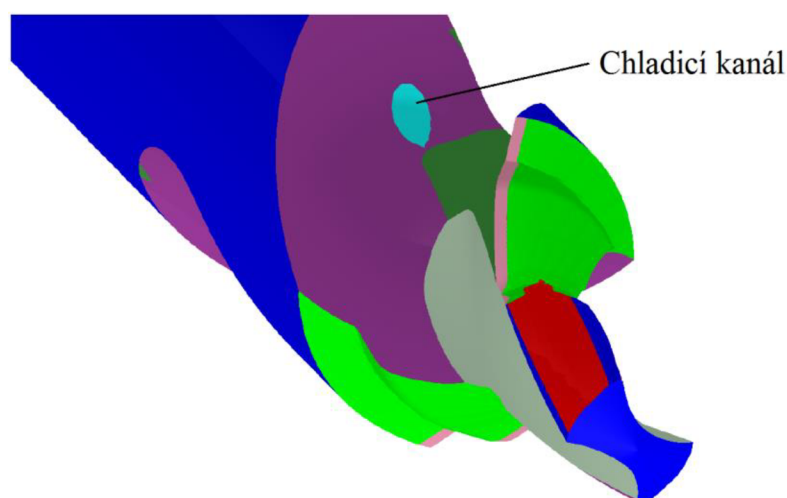
Po kontrole a omílání hran se nanese vrstva PVD povlaku. Povlakování provádí firma CemeCon s.r.o v Ivančicích. Parametry naneseného povlaku jsou uvedeny v tabulce 4.4.

Tab. 4.4 Fyzikální vlastnosti povlaku CemeCon [28].

Název	Skupina	Složení	Tvrдость HV 0,05	Max. teplota použití [°C]	Koef. tření s ocelí [-]	Tloušťka povlaku [μm]
TINALOX SN <sup>2</sup>	Supernitrid	TiAlN	3500	1000	0,3	3±1

### 4.3.1 Geometrie nástroje

Aby byla zajištěna správná funkce stupňovitého vrtáku, musí být vybroušeny potřebné řezné plochy tak, aby společně tvořily vhodnou geometrii s vhodnými nástrojovými úhly. Vzhled vybroušených ploch navrženého nástroje je znázorněn na obr. 4.12.



Obr. 4.12 Simulace navrženého stupňovitého vrtáku.

Drážka navrženého nástroje je zhotovena pomocí třech výbrusů v následujícím pořadí:

- velký výbrus čela (fialová barva)
  - úhel stoupání šroubovice 30° na  $\varnothing 8$  mm,
- střední výbrus čela (tmavě zelená barva)
  - zajistí kladný úhel čela podél břitu,
- malý výbrus čela (šedá barva)
  - definuje úhel čela na  $\varnothing 3$  mm.

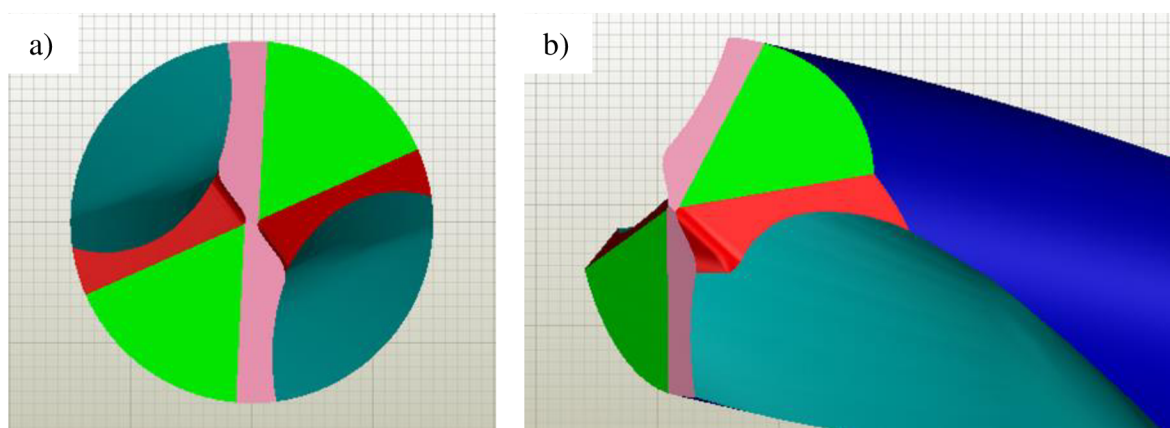
Přechody mezi jednotlivými plochami v drážce musí navzájem plynule navazovat s odpovídajícím úhlem sklonu šroubovice (na menším průměru je úhel sklonu šroubovice větší).

Další plochy důležité pro správnou funkci nástroje jsou:

- první hlavní hřbet odstupňování (růžová barva)  
– boční úhel hřbetu je roven  $5^\circ$ ,
- druhý hlavní hřbet odstupňování (světle zelená barva)  
– boční úhel hřbetu je roven  $20^\circ$ ,
- první vedlejší hřbet (tmavě modrá barva)  
– fazeta 0,4 mm podél vedlejšího ostří z obou stran,
- druhý vedlejší hřbet (červená barva)  
– odlehčení válcové plochy vrtáku.

Chladicí kanály (světle modrá barva) jsou vyvedeny po obou stranách do drážky vrtáku. Ideální vyústění kanálů by bylo do špičky nástroje, to ale v tomto případě není možné vzhledem k velmi malému průměru nástroje.

Špička vrtáku má na svědomí největší podíl posuvové síly, proto je důležité její správné vybroušení. Vzhledem k nízkým řezným rychlostem je zde velké riziko přechování materiálu obrobku. Tvar špičky navrženého nástroje je znázorněna na obr. 4.13.



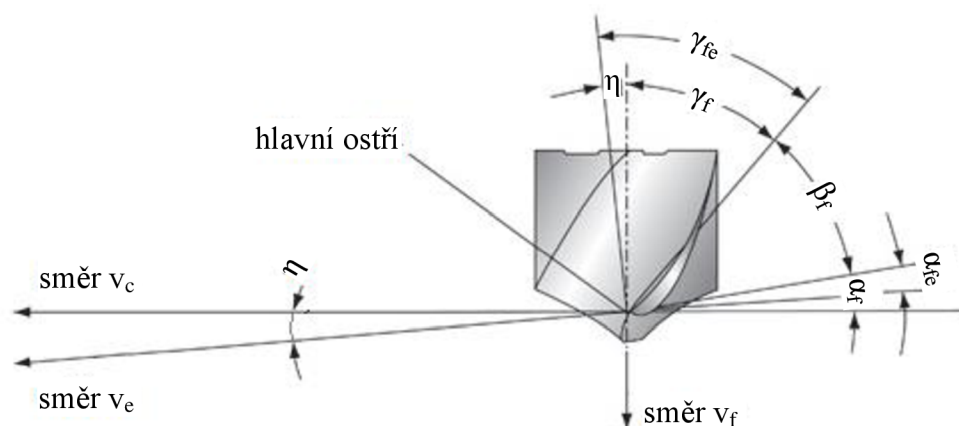
Obr. 4.13 Simulace špičky vrtáku. a) pohled shora, b) pohled zešikma.

Z těchto obrázků je patrné, že je špička nástroje provedena pomocí výbrusu třech typů ploch. Důležité úhly těchto ploch jsou následující:

- první hřbetní plocha špičky (růžová barva)  
– boční úhel hřbetu je roven  $13^\circ$ ,
- druhá hřbetní plocha špičky (světle zelená barva)  
– boční úhel hřbetu je roven  $25^\circ$ ,
- třetí hřbetní plocha špičky (červená barva)  
– boční úhel čela je roven  $0^\circ$ .

Pro správnou funkci vrtání musí špička vrtáku splňovat tzv. efektivní geometrii při daném posuvu na otáčku dle obr. 4.14. Mezi důležité parametry patří efektivní úhel hřbetu  $\alpha_{fe}$  v boční rovině (rovina daná směry působení posuvové a řezné síly) a efektivní úhel čela  $\gamma_{fe}$  v boční rovině.

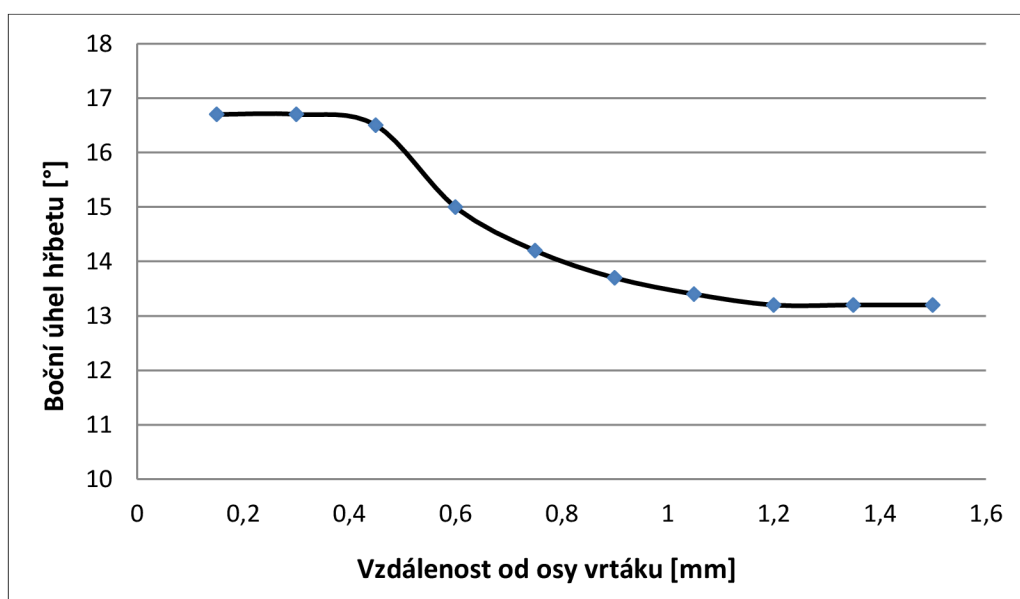
Naměřené hodnoty bočních úhlů v různých vzdálenostech od středu vrtáku jsou uvedeny v tabulce 4.5. Měření bylo prováděno pomocí řezů přímo v NUMROTOplus. Efektivní boční úhel hřbetu nesmí být větší než nástrojový boční úhel hřbetu, jinak by docházelo k přechování povrchu materiálu obrobku.



Obr. 4.14 Efektivní boční nástrojové úhly v procesu vrtání [29].

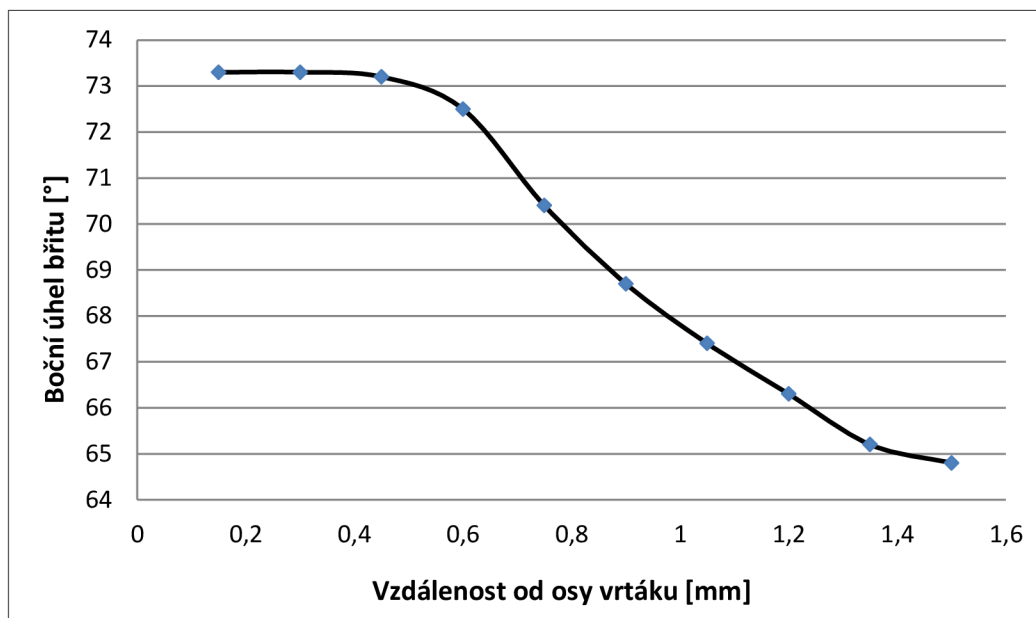
Tab. 4.5 Naměřené úhly na špičce vrtáku.

vzdálenost od středu $r$ [mm]	boční úhel hřbetu $\alpha_f$ [°]	boční úhel břitu $\beta_f$ [°]	boční úhel čela $\gamma_f$ [°]
0,15	16,7	73,3	0
0,3	16,7	73,3	0
0,45	16,5	73,2	0,3
0,6	15,0	72,7	2,5
0,75	14,2	70,4	5,4
0,9	13,7	68,7	7,6
1,05	13,4	67,4	9,2
1,2	13,2	66,3	10,5
1,35	13,2	65,2	11,6
1,5	13,2	64,8	12

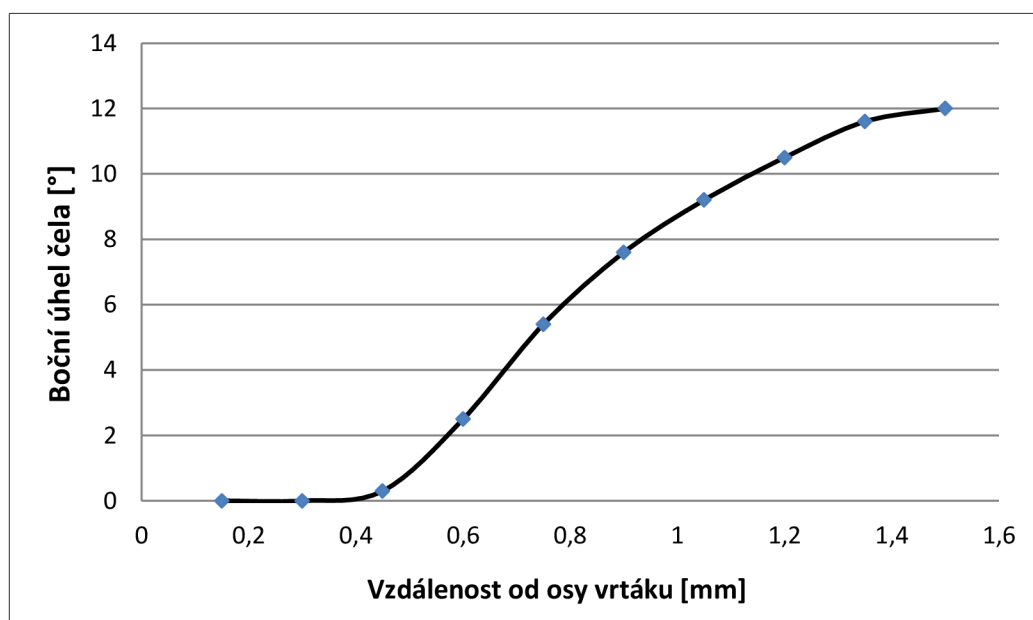


Obr. 4.15 Průběh bočního úhlu hřbetu podél břitu vrtáku.

Z obr. 4.15 je patrné, že boční úhel hřbetu se zvětšuje směrem ke středu nástroje. Tento průběh je žádoucí z důvodu klesající rezné rychlosti  $v_c$  a narůstajícímu úhlu směru řezání  $\eta$  směrem k ose nástroje, který má za následek rostoucí efektivní úhel hřbetu.



Obr. 4.16 Průběh bočního úhlu břitu podél břitu vrtáku.



Obr. 4.17 Průběh bočního úhlu čela podél břitu vrtáku.

Na obr. 4.16 je zobrazen boční úhel břitu, který postupně klesá směrem od osy vrtáku. Boční úhel čela (obr. 4.17) je vhodné udržovat podél hlavního ostří vrtáku kladný, v krajním případě nulový či mírně záporný. V případě, že by byl záporný, docházelo by k pěchování třísky obrobku.

Podle vztahu kinematiky vrtání je vztah mezi řeznou rychlostí a posuvovou rychlostí:

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{v_f}{10^3 \cdot v_c} \Rightarrow v_f = 10^3 \cdot \operatorname{tg} \eta \cdot v_c \quad (4.1)$$

Kritický okamžik nastane v případě, kdy se úhel směru řezání rovná nástrojovému bočnímu úhlu hřbetu ( $\eta = \alpha_f$ ). Kritickou posuvovou rychlost  $v_{f, \text{krit}}$  v tomto případě vyjádříme následovně:

$$v_{f, \text{krit}} = 10^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha_f \cdot v_c \quad (4.2)$$

Dle rovnice 1.4 lze kritickou posuvovou rychlost vyjádřit také v závislosti na kritickém posuvu na otáčku  $f_{\text{krit}}$  takto:

$$v_{f, \text{krit}} = f_{\text{krit}} \cdot n \quad (4.3)$$

Dosazením rovnic 1.3 a 4.3 do rovnice 4.2 a nahrazením jmenovitého průměru vrtáku vzdáleností od osy, se získá vztah pro kritický posuv na otáčku podle vztahu:

$$f_{\text{krit}} = \operatorname{tg} \alpha_f \cdot \pi \cdot 2r \quad (4.4)$$

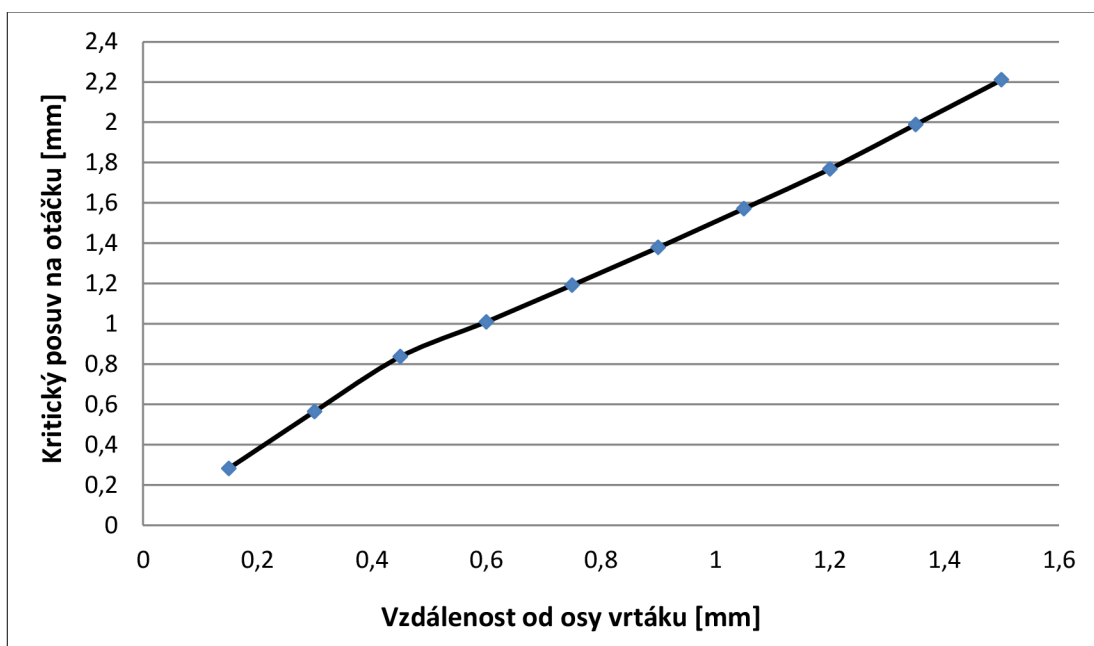
V tabulce 4.6 jsou uvedeny kritické hodnoty posuvu na otáčku pro danou vzdálenost od osy vrtáku a daný boční úhel hřbetu. Výsledné hodnoty kritického posuvu na otáčku podél hrany hlavního ostří vrtáku jsou znázorněny na obr. 4.18.

Tab. 4.6 Kritické hodnoty posuvu podél břitu špičky.

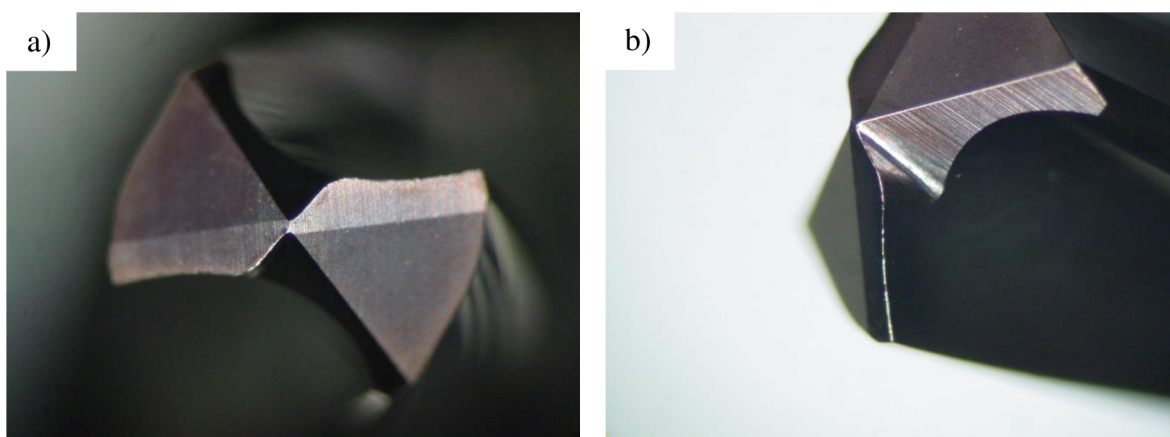
vzdálenost od osy $r$ [mm]	boční úhel hřbetu $\alpha_f$ [°]	kritický posuv na otáčku $f_{\text{krit}}$ [mm]
0,15	16,7	0,283
0,3	16,7	0,566
0,45	16,5	0,838
0,6	15,0	1,010
0,75	14,2	1,192
0,9	13,7	1,379
1,05	13,4	1,572
1,2	13,2	1,768
1,35	13,2	1,990
1,5	13,2	2,211

Je zřejmé, že kritický posuv na otáčku je nejnižší blízko středu vrtáku, kde je také velmi malá řezná rychlost. Aby nedocházelo k přechování materiálu obrobku, je nutné nepřekročit maximální posuv na otáčku, který je v tomto případě přibližně 0,2 mm.

Výsledný nástroj určený k otestování, včetně naneseného povlaku, je detailně zobrazen na obr. 4.19 až 4.21.



Obr. 4.18 Průběh maximálního posuvu na otáčku podél břitu vrtáku.

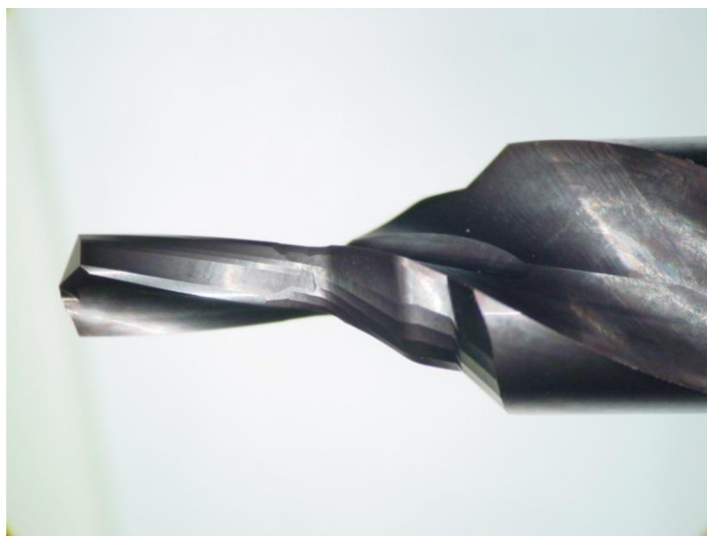


Obr. 4.19 Špička navrženého nástroje. a) pohled shora, b) pohled ze šikma.



Obr. 4.20 Celkový vzhled navrženého vrtáku.





Obr. 4.21 Řezná část navrženého nástroje.

#### 4.4 Experimentální verifikace

Zjišťování optimálních řezných podmínek navrženého stupňovitého vrtáku bylo provedeno experimentálně pomocí potřebných strojů a zařízení. Zjištěním průběhu řezných sil a drsností povrchu obrobku pro různé řezné podmínky se vyloučily nežádoucí jevy během procesu vrtání.

##### 4.4.1 Použité stroje a zařízení

CNC TAJMAC-ZPS MCV 1210



Obr. 4.22 Ukázka obráběcího centra TAJMAC-ZPS MCV 1210 [30].

Vysoce produktivní pětiosé portálové obráběcí centrum (obr. 4.22) se širokým uplatněním při obrábění složitých prostorových tvarů. Umožňuje také využití HSC technologie vzhledem k vysoké dynamice, vysoké tuhosti a tlumícím vlastnostem konstrukce stroje. Parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 4.7.

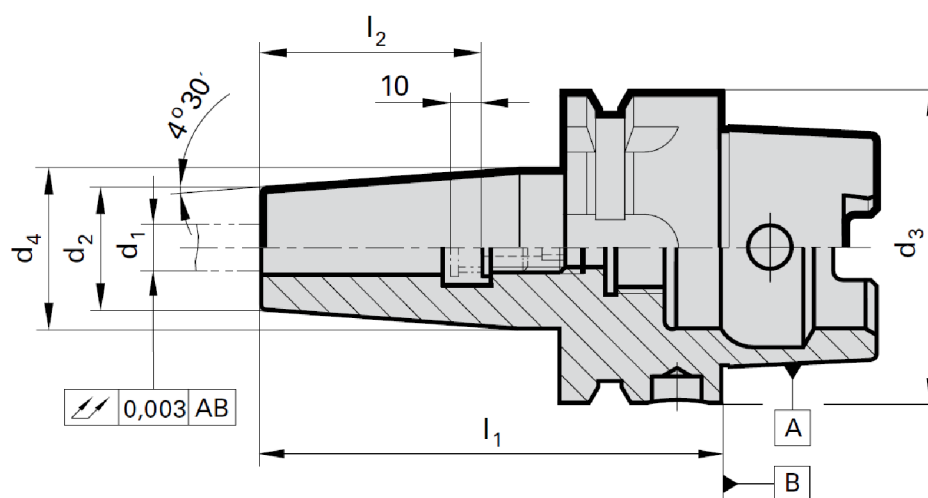
Tento stroj byl v kombinaci s dynamometrem firmy KISTLER, zesilovačem a výstupem do PC použit pro analýzu složek sil působících při obrábění za zvolených rezných podmínek.

Tab. 4.7 Technické parametry TAJMAC-ZPS MCV 1210 [30].

Pracovní rozsah osy X – křížový suport	1 000 mm
Pracovní rozsah osy Y – příčník	800 mm
Pracovní rozsah osy Z – smykadlo	600 mm
Upínací plocha stolu	ø600 mm
Max. pracovní posuv	20 m/min
Rychloposuv	40 m/min
Maximální zrychlení os	5 m/s <sup>2</sup>
Max. otáčky vřetena	18 000 min <sup>-1</sup>
Upínací kužel	HSK-A63
Počet nástrojů v zásobníku	30
Čas výměny nástroje	3,5 s
Příkon provozní	45 kVA
Hmotnost	11 500 kg

#### Tepelný upínač Gühring GM300

Ve výrobě i při experimentu je použit stejný tepelný upínač HSK-A (obr. 4.24). Pevné a přesné upnutí zajistí odolnost vůči obvodovému házení ve vyšších rychlostech než u hydraulických upínačů. Parametry použitého upínače jsou uvedeny na obr. 4.23 a v tabulce 4.8.



Obr. 4.23 Geometrie upínače HSK-A [31].

Tab. 4.8 Technické parametry upínače Gühring GM300 4736 [31].

HSK-A $d_3$ [mm]	Pro $\varnothing$ držáku $d_1$ $h_6$ [mm]	$d_2$ [mm]	$d_4$ [mm]	$l_1$ [mm]	$l_2$ [mm]	Hmotnost [kg]
63	8	21	27,0	120	36	0,95



Obr. 4.24 Ukázka tepelného upínače Gühring GM300 [31].

#### Dynamometr KISTLER 9272

Piezeelektrický 4-složkový dynamometr pro měření krouticího momentu a tří složek ortogonálních sil dle obr. 4.25. Jeho vysoká citlivost umožňuje zachytit i nejmenší dynamické změny sil a momentu. Technické parametry dynamometru jsou uvedeny v tabulce 4.9.



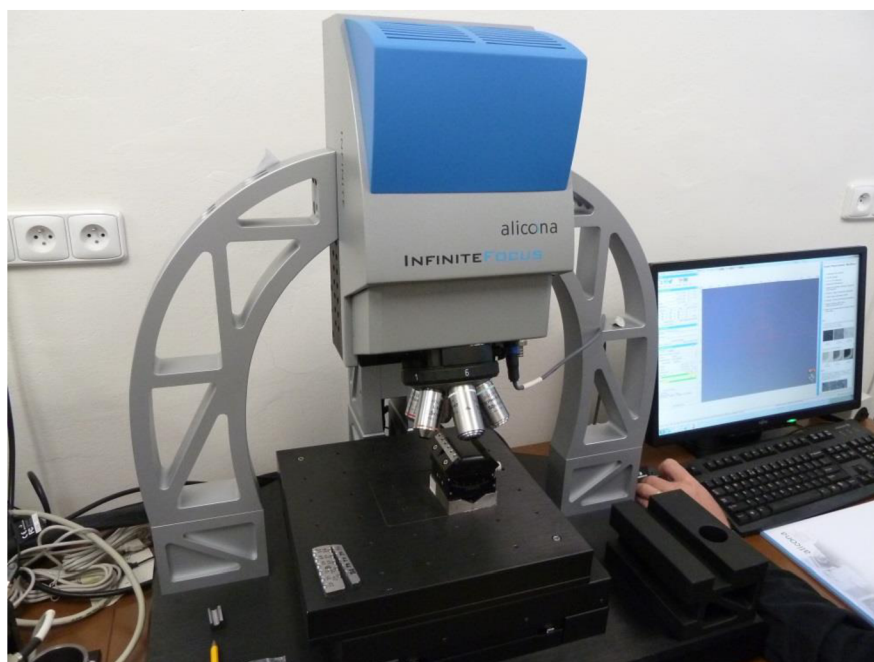
Obr. 4.25 Ukázka dynamometru KISTLER 9272 [32].

Tab. 4.9 Technické parametry KISTLER 9272 [32].

Měřicí rozsah $F_x, F_y$	-5 – 5 kN
Měřicí rozsah $F_z$	-5 – 20 kN
Měřicí rozsah $M_z$	-200 – 200 N·m
Přetížení $F_x, F_y$	-6/6 kN
Přetížení $F_z$	-6/24 kN
Přetížení $M_z$	-240/240 Nm
Prahová hodnota $F_x, F_y$	<0,01 N
Prahová hodnota $F_z$	<0,02 N
Prahová hodnota $M_z$	<0,2 mN·m
Citlivost $F_x, F_y$	-7,8 pC/N
Citlivost $F_z$	-3,5 pC/N
Citlivost $M_z$	-160 pC/N·m

#### Měřicí přístroj Alicona Infinite Focus G4

Optický 3D měřicí přístroj s vysokým rozlišením (obr. 4.26). Jedná se o velice přesný přístroj určený k snímání povrchů materiálů různých tvarů, který slouží především pro přesnou analýzu drsnosti povrchu. Velkou výhodou přístroje je možnost snímání ploch pod velkými úhly a rozpoznání malých poloměrů hran. Použitá technologie poskytuje hustotu snímání povrchu přesahující 100 miliónů bodů. Technické parametry přístroje jsou uvedeny v tabulce 4.10.



Obr. 4.26 Měřicí přístroj Alicona Infinite Focus G4.

Princip je založen na optickém snímání povrchu obrobku pomocí jednoho ze šesti dostupných objektivů, díky LED nasvícení a následnému vyhodnocení pomocí PC.

Tab. 4.10 Technické parametry Alicona Infinite Focus G4 [33].

Měřicí princip	bezkontaktní, optický, 3D,
Rozlišení	2-100 mil. 3D bodů (závisí na použitém modulu)
Údržba	bezúdržbové
Osvětlení	bílé LED nasvícení
Hlavice	6 objektivů
Rozsah posuvů	X: 100 mm, Y: 100 mm, Z: 100 mm
Hmotnost	95-100 kg (závisí na výbavě)
Rozměry přístroje (š x h x v)	710 mm x 540 mm x 628 mm
Teplotní rozsah	5-40°C (kalibrováno pro 18-22°C)
Teplotní gradient	menší než 1°C za hodinu
Napájení	900 W, 110-230 V, 50-60 Hz
Rozměr řídicí jednotky (š x h x v)	540 mm x 682 mm x 360 mm

#### 4.4.2 Analýza sil

Analýza sil při vrtání byla provedena experimentálně kombinací různých řezných podmínek a porovnáním daných výstupů z dynamometru.

Jako obrobek se použil polotovár vyráběné součásti obroběný frézováním na dvě rovnoběžné plochy o požadované tloušťce (obr. 4.27) z důvodu úspory materiálu. Aby se zachovaly stejné podmínky jako ve výrobě, byl pro navrtání děr použit vrták shodný s předchozí operací výroby součásti (obr. 4.28), který má vrcholový úhel 140°. Výkres předcházejícího vrtáku je uveden v příloze 3. Takto se získal přesnější průběh sil při náběhu do obrobku.

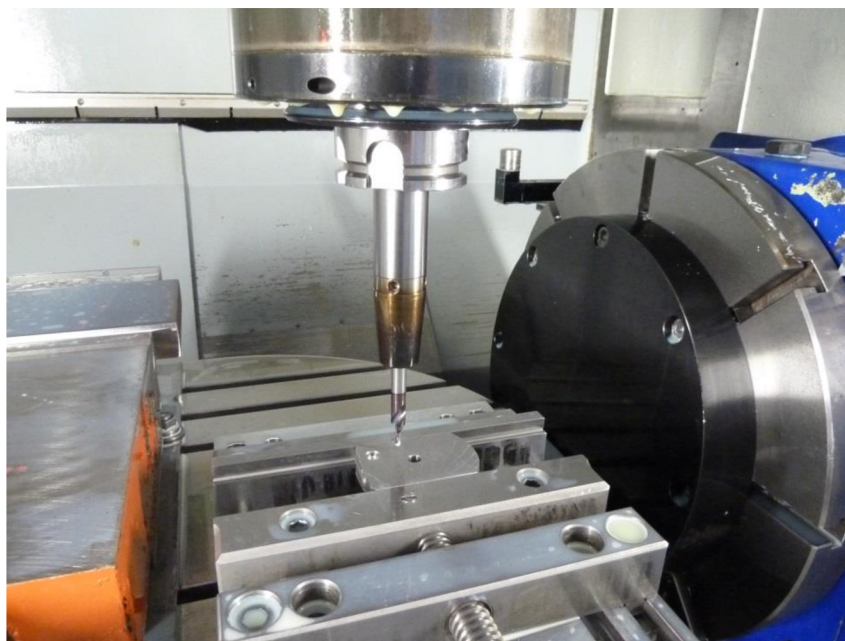


Obr. 4.27 Vrtaný materiál.



Obr. 4.28 Vrták pro předchozí operaci.

Konfigurace nastavení je uvedena na obr. 4.29, kde sružený nástroj je upnutý v tepelném upínači HSK-A a obráběný materiál je pevně upnutý ve svěráku, pod kterým se nachází dynamometr. Výstupy z dynamometru (obr. 4.30) jsou pomocí zesilovačů převedeny do PC (obr. 4.31). Vnitřní chlazení nástroje bylo zajištěno pomocí kapaliny CIMSTAR 597.



Obr. 4.29 Nastavení experimentálního obrábění.



Obr. 4.30 Pozice dynamometru.

Obr. 4.31 Výstup do PC.

Výstupem měření jsou tři soubory. První soubor má příponu .DAT a obsahuje nastavené hodnoty dynamometru, jako například dobu a počet měření. Další dva soubory s příponou .RE1 a .RE2 obsahují všechny naměřené hodnoty posuvové síly a řezného momentu v celém průběhu měření. Dané soubory jsou následně zpracovány v programu Microsoft Excel, a tím se získají potřebné výstupní grafy. Tyto grafy se liší podle nastavení řezných podmínek vrtání. Všechny výstupní diagramy jsou uvedeny v příloze 4.

Řezné podmínky pro měření byly z počátku odhadnuty podle doporučených řezných podmínek pro šroubovitě vrtáky z SK (tabulka 3.4), které byly postupně upravovány v závislosti na vizuálním zhodnocení kvality povrchu obrobeků. Přehled nastavovaných otáček nástroje a posuvů na otáčku je uveden v tabulce 4.11.

Tab. 4.11 Hodnoty nastavených řezných parametrů.

n [min <sup>-1</sup> ]	2 500	3 000	3 500	4 000	4 500	5 000	5 500
v <sub>c1</sub> [m/min]	23,6	28,3	33	37,7	42,4	47,1	51,8
v <sub>c2</sub> [m/min]	49,3	59,2	69,1	78,9	88,8	98,6	108,5
f [mm]	0,05	0,10	0,15	0,20			

Měrná řezná síla nízkolegované oceli pro tloušťku třísky 0,4 mm, je dle tabulky 2.2 přibližně  $k_{c0,4} = 2100$  MPa. Úhel nastavení ostří na špičce vrtáku je  $\kappa_{r1} = 67,5^\circ$  a na odstupňování je  $\kappa_{r2} = 35^\circ$ . Šířka záběru ostří špičky vrtáku je  $a_{p1}$  a na odstupňování je  $a_{p2}$ , se určí:

$$a_{p1} = \frac{D_1}{2} = \frac{3}{2} = 1,5 \text{ mm}$$

$$a_{p2} = \frac{(D_2 - D_1)}{2} = \frac{(6,28 - 3)}{2} = 1,64 \text{ mm}$$

Z rovnic 1.25, 1.26 a 1.27 vyplývá, že síly při řezání nezávisí na řezné rychlosti, ale na posuvu ano. Měrné řezné síly  $k_{cfz1}$  a  $k_{cfz2}$  po dosazení do 1.25 budou v tomto případě:

$$k_{cfz1} = 2100 \cdot \left( \frac{0,4}{f_z \cdot \sin 67,5^\circ} \right)^{0,29} = \frac{1647,359}{f_z^{0,29}} = \frac{2014,127}{f^{0,29}} \quad (4.5)$$

$$k_{cfz2} = 2100 \cdot \left( \frac{0,4}{f_z \cdot \sin 35^\circ} \right)^{0,29} = \frac{1891,582}{f_z^{0,29}} = \frac{2312,724}{f^{0,29}} \quad (4.6)$$

$$f_z = \frac{f}{2} \quad (4.7)$$

Dosazením do 1.26 budou posuvové síly  $F_{f1}$  a  $F_{f2}$  vypadat následovně:

$$F_{f1} = 0,5 \cdot 1,5 \cdot f \cdot \frac{2014,127}{f^{0,29}} \cdot \sin 67,5^\circ = 1395,608 \cdot f^{0,71} \quad (4.8)$$

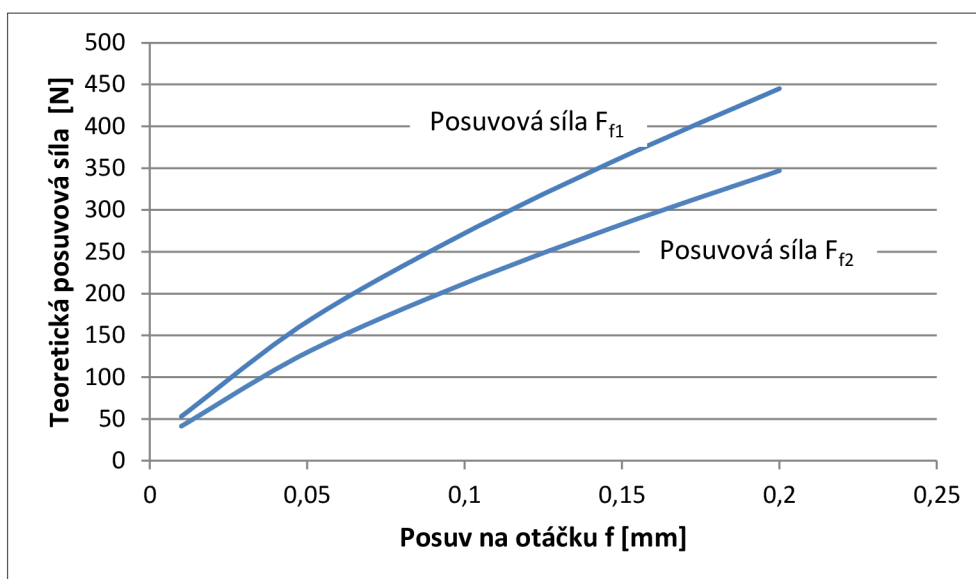
$$F_{f2} = 0,5 \cdot 1,64 \cdot f \cdot \frac{2312,724}{f^{0,29}} \cdot \sin 35^\circ = 1087,75 \cdot f^{0,71} \quad (4.9)$$

a řezné momenty  $M_{c1}$  a  $M_{c2}$  budou podle vztahu 1.27:

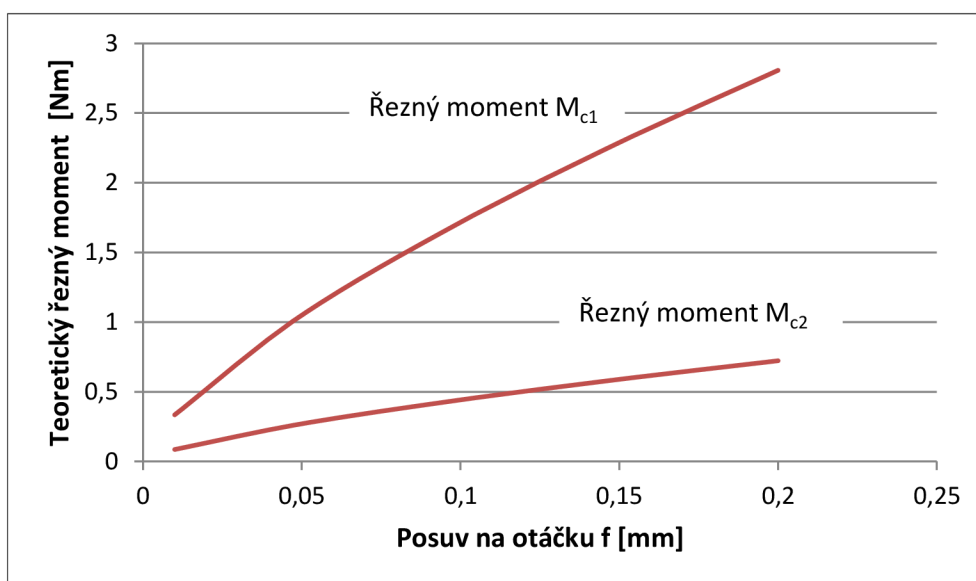
$$M_{c1} = \frac{3 \cdot f \cdot 2014,127 \cdot 1,5}{2 \cdot f^{0,29}} \cdot \left( 1 - \frac{1,5}{3} \right) = 2265,893 \cdot f^{0,71} \quad (4.10)$$

$$M_{c2} = \frac{6,28 \cdot f \cdot 2312,724 \cdot 1,64}{2 \cdot f^{0,29}} \cdot \left( 1 - \frac{1,64}{6,28} \right) = 8799,452 \cdot f^{0,71} \quad (4.11)$$

Teoretický průběh posuvových sil a řezných momentů v závislosti na posuvu, který vyplývá z rovnic 4.8 až 4.11, je znázorněn v diagramech dle obr. 4.32 a 4.33.



Obr. 4.32 Teoretický průběh posuvové síly daného vrtáku.

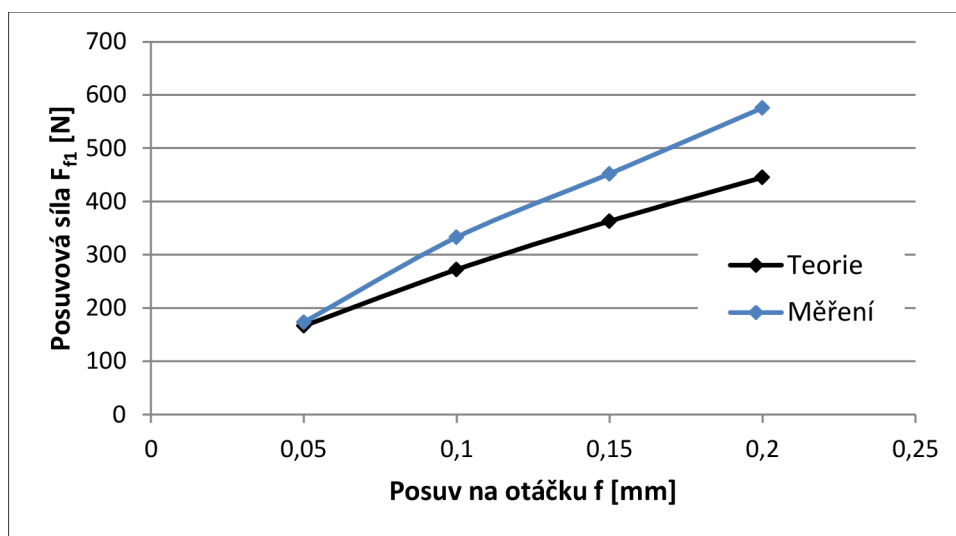


Obr. 4.33 Teoretický průběh řezného momentu daného vrtáku.

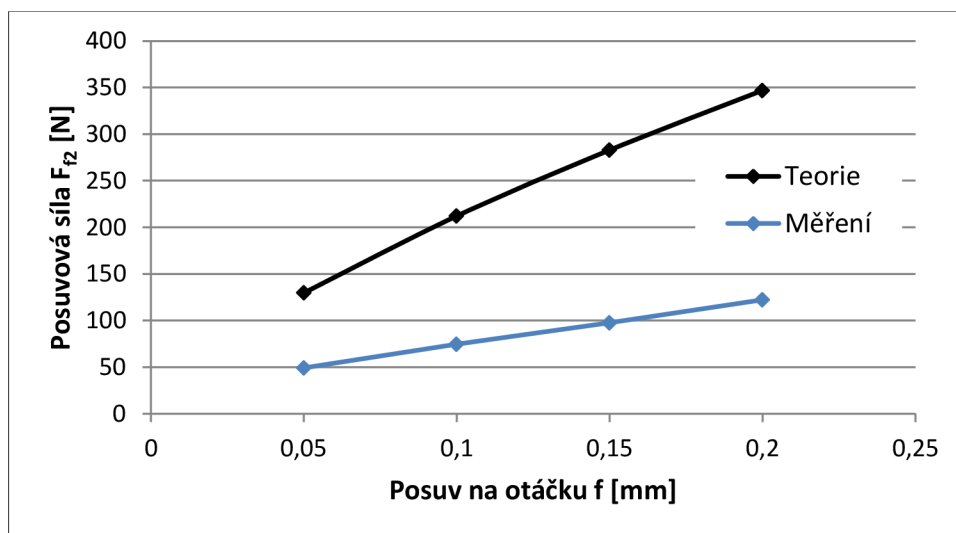
Porovnání teoretických parametrů posuvové síly a řezného momentu s naměřenými hodnotami v závislosti na posuvu jsou uvedeny v diagramech na obr. 4.34 až 4.37. Naměřené hodnoty jsou uvedeny pro konstantní otáčky vřetene  $2500 \text{ min}^{-1}$ .

Z těchto diagramů je zřejmá velká nepřesnost teoretického výpočtu zejména při vrtání odstupňovaného průměru. Tato nepřesnost může být způsobena tím, že empirický vzorec nebere v úvahu spoustu parametrů, jako je například geometrie nástroje a vliv příčného ostří.

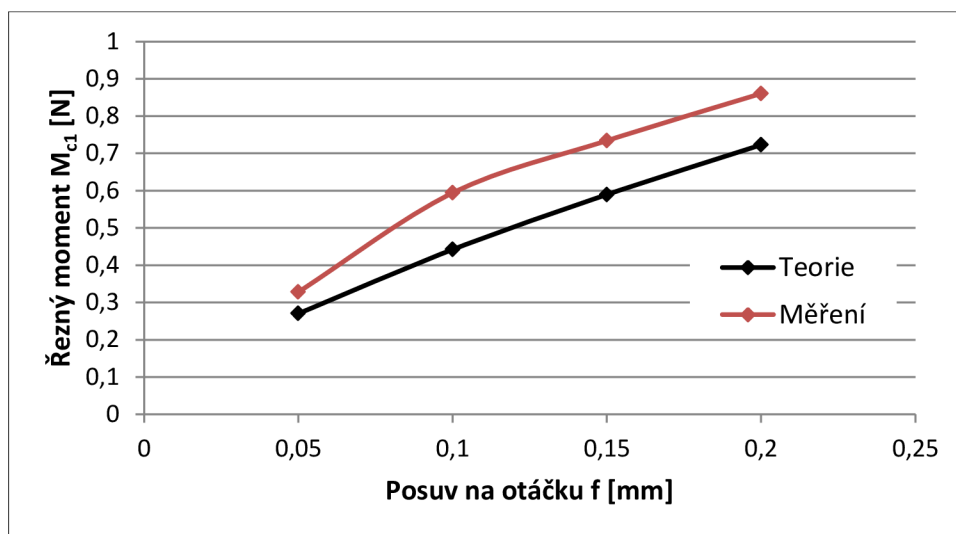




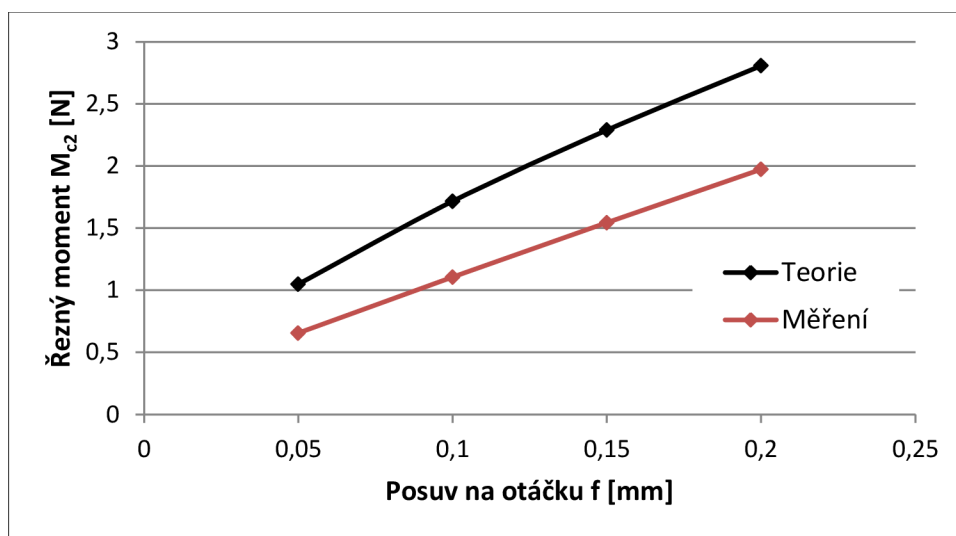
Obr. 4.34 Teoretický průběh posuvové síly daného vrtáku.



Obr. 4.35 Teoretický průběh řezného momentu daného vrtáku.

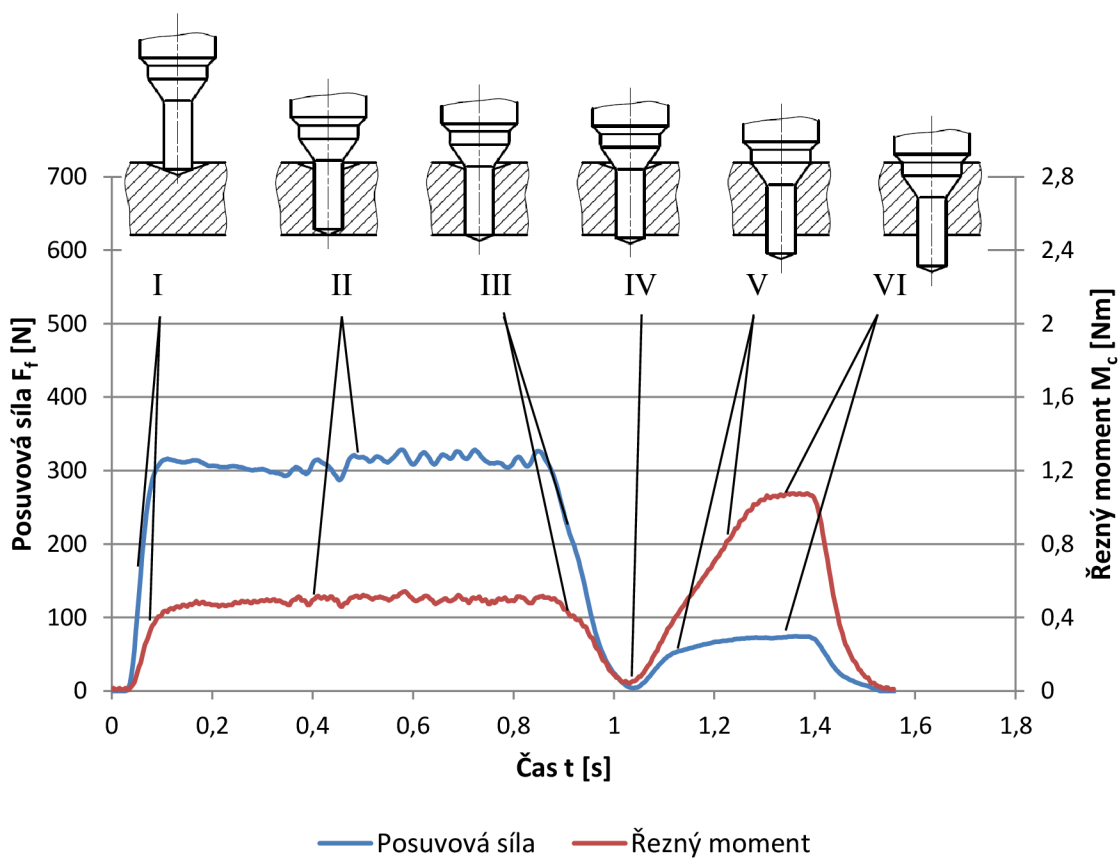


Obr. 4.36 Teoretický průběh posuvové síly daného vrtáku.



Obr. 4.37 Teoretický průběh řezného momentu daného vrtáku.

Na obr. 4.38 je ukázán průběh posuvové síly a řezného momentu při  $n = 4500 \text{ min}^{-1}$  a  $f = 0,10 \text{ mm}$ , včetně popisu jednotlivých křivek v závislosti na poloze nástroje.



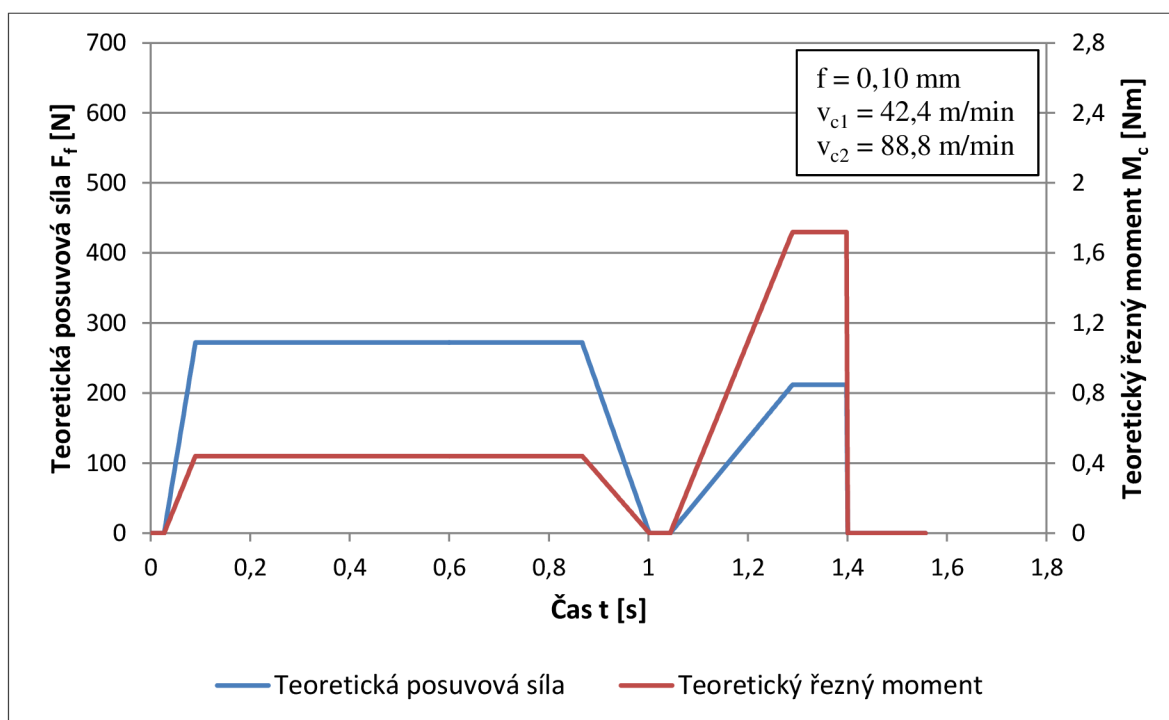
Obr. 4.38 Ukázka průběhu naměřené síly a momentu.

Popis jednotlivých poloh vrtáku:

- I – špička vrtáku vniká do materiálu,
- II – vrtání  $\varnothing 3$  mm do plného materiálu,
- III – špička vrtáku vychází z materiálu,
- IV – vrtání na prázdno,
- V – odstupňování vrtáku vniká do materiálu,
- VI – vrtání  $\varnothing 6,28$  mm do předvrtaného materiálu (včetně jemného sražení horní hrany otvoru).

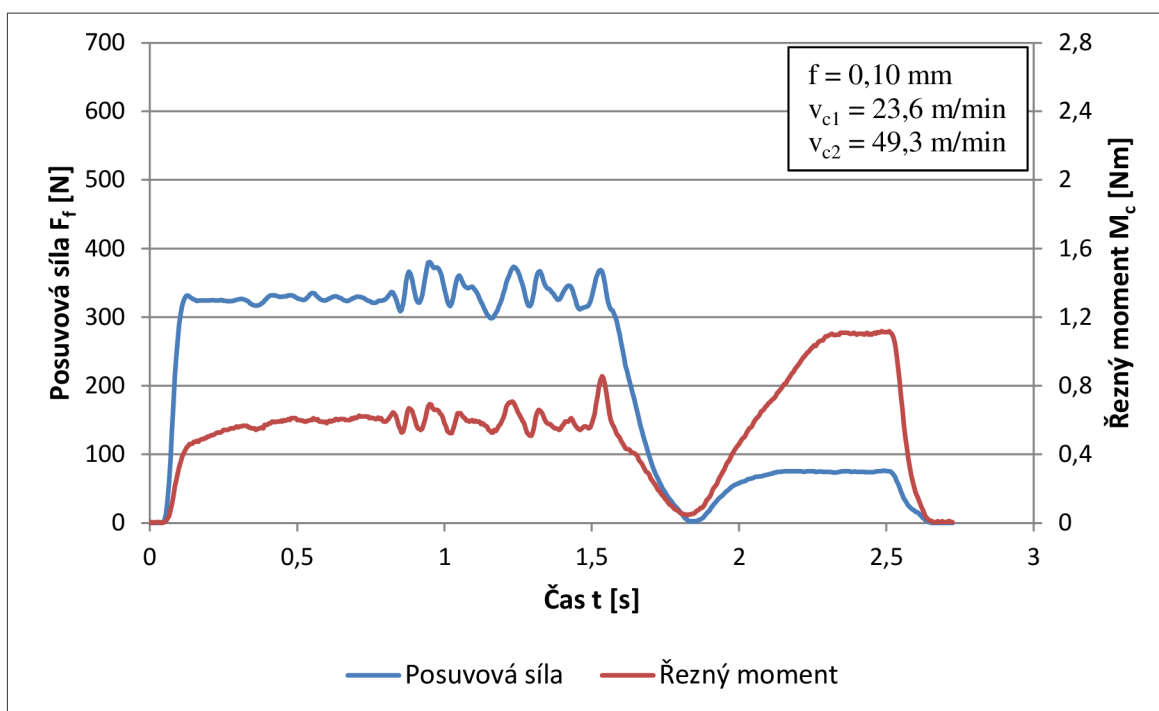
Z obr. 4.38 je patrné, že posuvová síla má nejvyšší hodnotu při vrtání špičky nástroje do plného materiálu. Hlavní příčinou je větší úhel nastavení ostří než u odstupňování a také vliv příčného ostří. Při vrtání většího průměru do předvrtaného materiálu je složka posuvové síly výrazně menší. Naopak řezný moment je při vrtání malého průměru výrazně menší než při vrtání velkého průměru. Zde má velký vliv opět velikost úhlu nastavení ostří a také vzdálenost působíště řezné síly od osy vrtáku.

Nerovnosti v diagramu naměřených sil mohou být způsobeny nepatrným chvěním nástroje a nerovnoměrnou strukturou obráběného materiálu. Na konci průběhu se někdy objevuje mírný nárůst posuvové síly a řezného momentu, který je zřejmě způsoben nežádoucím zadrhnutím třísky při návratu nástroje do výchozí polohy. Ideální teoretický průběh by potom vypadal dle obr. 4.39.

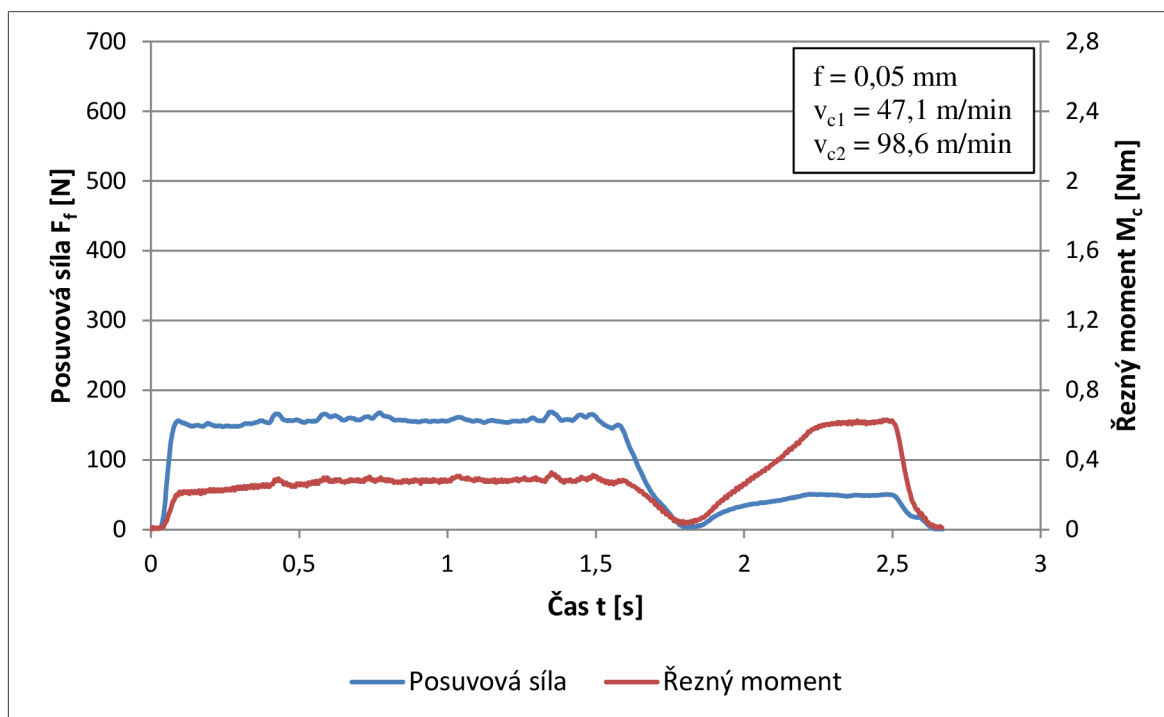


Obr. 4.39 Ukázka teoretického průběhu sil.

Nežádoucí průběh řezných sil, kdy dochází k velkým výkyvům způsobeným pasivními silami a nevhodnou tvorbou třísky, je znázorněn v diagramu dle obr. 4.40. Plynulý průběh je naopak ukázán na obr. 4.41.



Obr. 4.40 Nežádoucí průběh posuvové síly a řezného momentu.



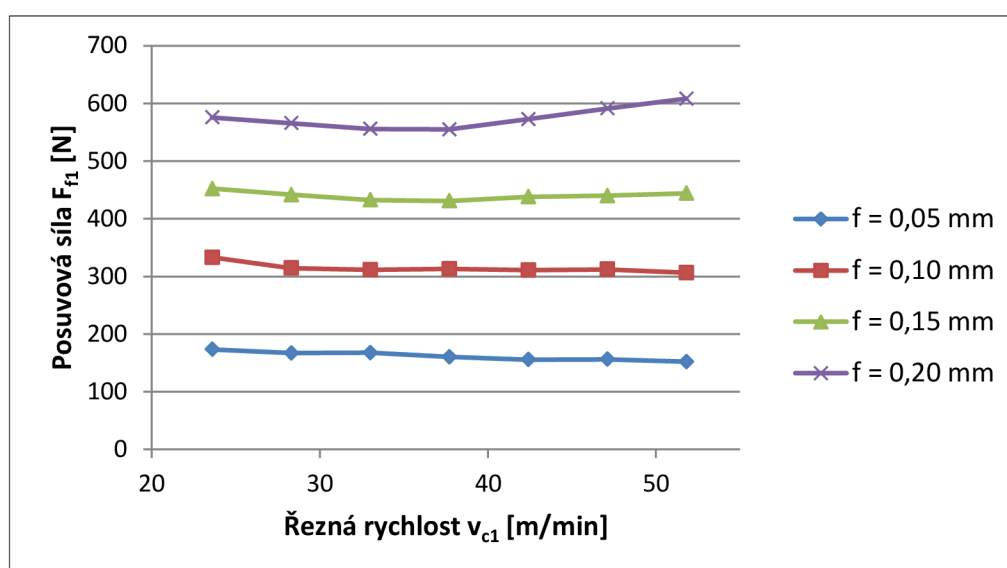
Obr. 4.41 Plynulý průběh posuvové síly a řezného momentu.

Průběhy posuvových sil a řezných momentů pro všechny měřené řezné podmínky, jsou uvedeny v příloze 4.

Průměrné hodnoty naměřených posuvových sil ( $F_{f1}$  na průměru 3 mm a  $F_{f2}$  na průměru 6,28 mm) a řezných momentů ( $M_{c1}$  a  $M_{c2}$ ) pro jednotlivé řezné rychlosti odpovídající daným otáčkám a jednotlivé posuvy na otáčku jsou uvedeny v tabulce 4.12 až 4.15. Závislosti posuvové síly a řezného momentu na řezné rychlosti pro daný posuv jsou uvedeny v diagramech dle obr. 4.42 až 4.45.

Tab. 4.12 Hodnoty průměrné posuvové síly na  $\varnothing 3$  mm.

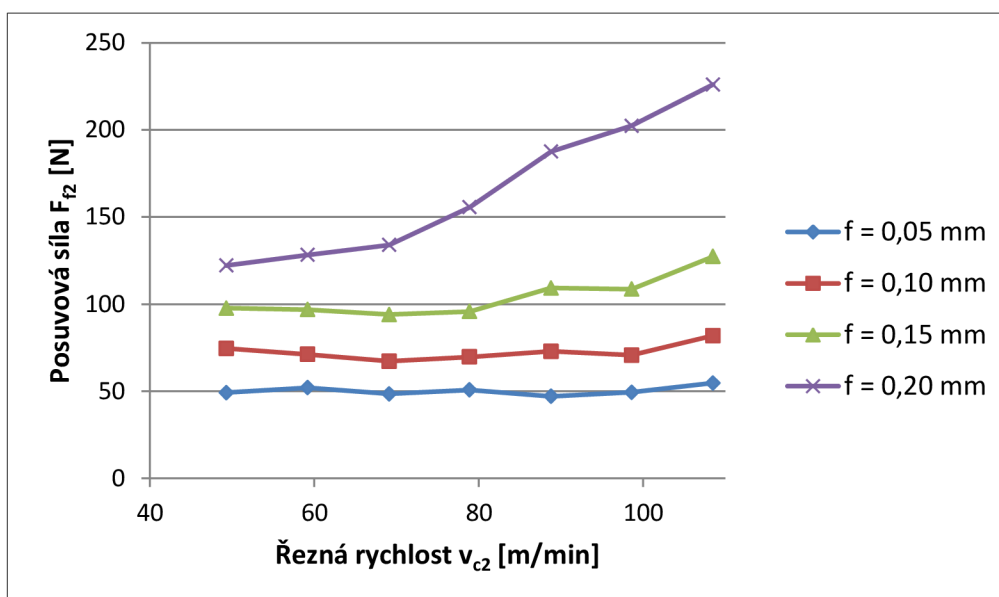
Posuv na otáčku $f$ [mm]	Posuvová síla $F_{f1}$ [N]						
	Řezná rychlost $v_{c1}$ [m/min]						
	23,6	28,3	33	37,7	42,4	47,1	51,8
0,05	173,3915	166,9185	167,5957	160,4111	155,5952	156,3109	152,056
0,1	332,8178	314,2811	311,2444	312,9957	310,7146	312,1782	306,226
0,15	452,1288	441,721	432,4543	430,9299	438,1293	439,8762	444,1949
0,2	575,6726	565,583	555,5516	554,9293	572,502	591,1666	607,979



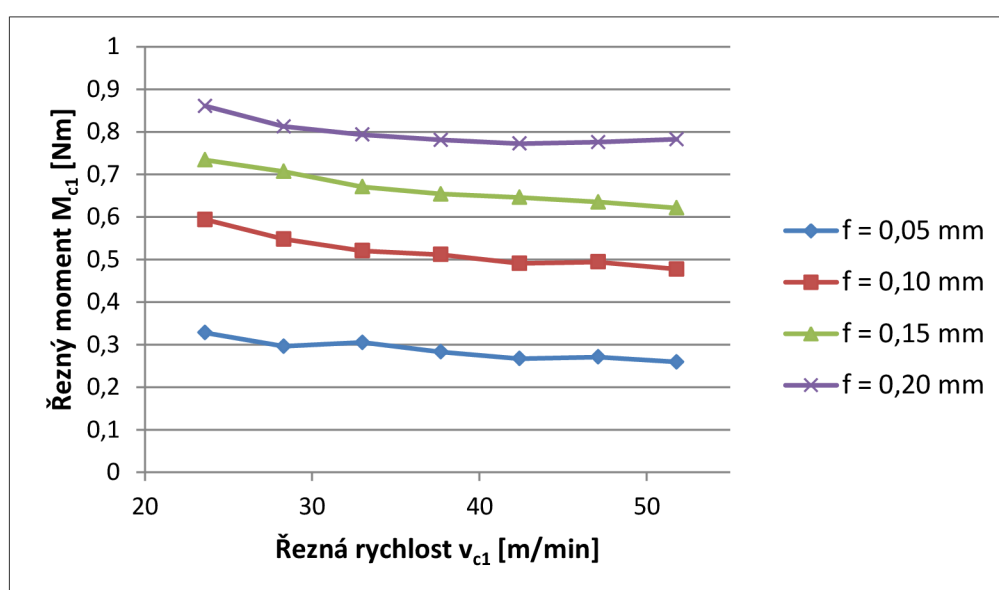
Obr. 4.42 Závislost posuvové síly  $F_{f1}$  na řezné rychlosti  $v_{c1}$ .

Tab. 4.13 Hodnoty průměrné posuvové síly na  $\varnothing 6,28$  mm.

Posuv na otáčku $f$ [mm]	Posuvová síla $F_{f2}$ [N]						
	Řezná rychlost $v_{c2}$ [m/min]						
	49,3	59,2	69,1	78,9	88,8	98,6	108,5
0,05	49,17435	52,0183	48,50459	50,81305	47,13339	49,37141	54,74425
0,1	74,51396	71,15868	67,17858	69,64316	72,874	70,70698	81,932
0,15	97,65611	96,86698	94,00348	95,7806	109,233	108,6046	127,345
0,2	122,2204	128,27	133,9105	155,5766	187,5338	202,348	225,9766

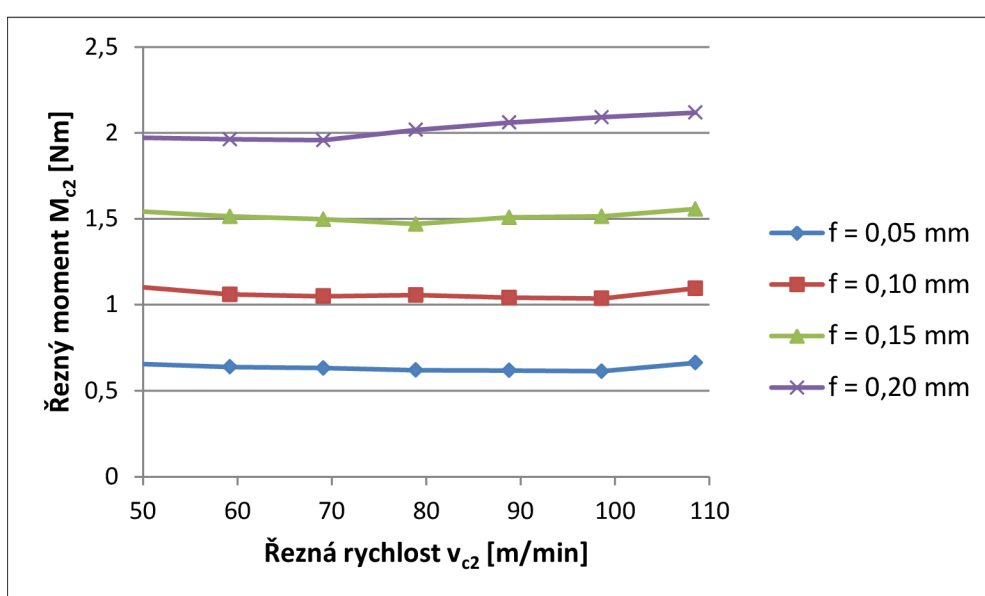
Obr. 4.43 Závislost posuvové síly  $F_{12}$  na řezné rychlosti  $v_{c2}$ .Tab. 4.14 Hodnoty průměrného řezného momentu na  $\varnothing 3$  mm.

Posuv na otáčku $f$ [mm]	Řezný moment $M_{c1}$ [Nm]						
	Řezná rychlost $v_{c1}$ [m/min]						
	23,6	28,3	33	37,7	42,4	47,1	51,8
0,05	0,327941	0,296078	0,305004	0,282717	0,266885	0,270866	0,259208
0,1	0,593752	0,54761	0,520384	0,511131	0,49077	0,494048	0,47726
0,15	0,73387	0,706555	0,670614	0,653668	0,645891	0,6349	0,621196
0,2	0,860374	0,812486	0,793195	0,780705	0,771951	0,775328	0,782398

Obr. 4.44 Závislost řezného momentu  $M_{c1}$  na řezné rychlosti  $v_{c1}$ .

Tab. 4.15 Hodnoty průměrného řezného momentu na  $\varnothing 3$  mm.

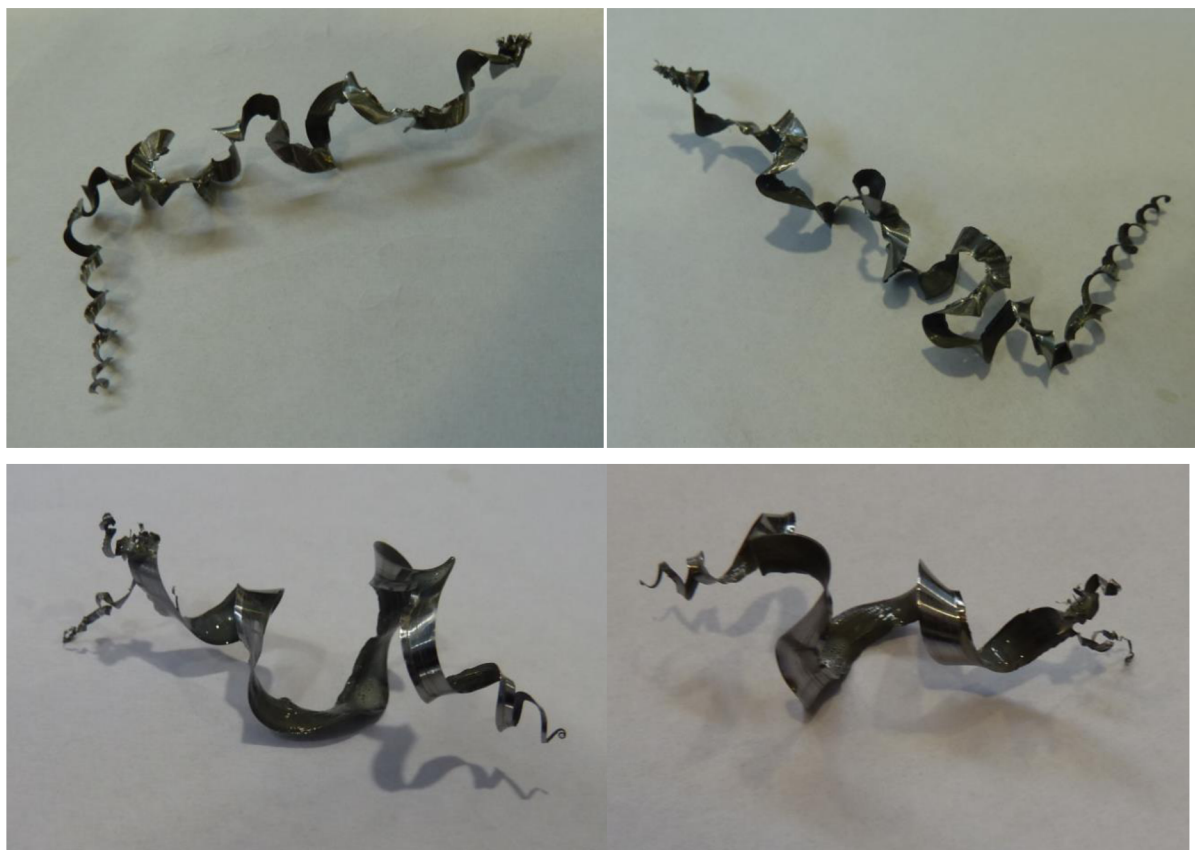
Posuv na otáčku $f$ [mm]	Řezný moment $M_{c2}$ [Nm]						
	Řezná rychlost $v_{c2}$ [m/min]						
	49,3	59,2	69,1	78,9	88,8	98,6	108,5
0,05	0,65564	0,637991	0,631668	0,619929	0,617674	0,612833	0,662691
0,1	1,105436	1,059489	1,049698	1,056023	1,040916	1,036446	1,095312
0,15	1,543483	1,51353	1,496769	1,469356	1,508679	1,514266	1,556863
0,2	1,972766	1,963	1,957403	2,017483	2,059837	2,09085	2,117784

Obr. 4.45 Závislost řezného momentu  $M_{c2}$  na řezné rychlosti  $v_{c2}$ .

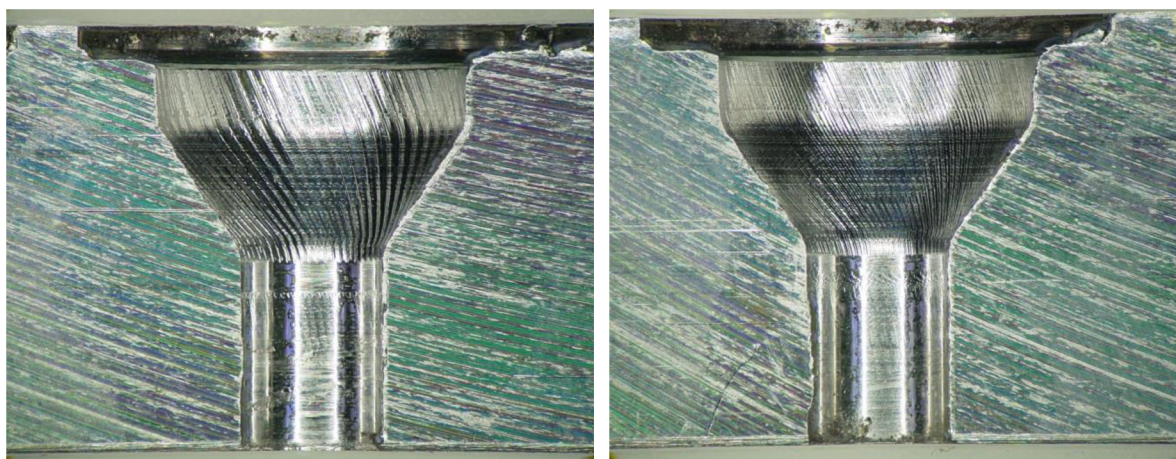
Z jednotlivých diagramů (obr. 4.42 až 4.45) je zřejmé, že řezná rychlost opravdu nemá téměř vliv na posuvovou sílu a řezný moment. Jediný výraznější sklon křivky se nachází u posuvové síly na odstupňování vrtáku (obr. 4.34), při vyšších hodnotách řezných parametrů. To může být způsobeno vlivem vibrací, které v této oblasti znehodnocují jakost povrchu otvoru.

Další snižování řezných parametrů má za následek tvorbu dlouhých plynulých třísek, které mají tendenci k zaplétání se kolem nástroje. Ukázka třísky při nastavených otáčkách kolem  $2500 \text{ min}^{-1}$  a posuvu na otáčku  $0,05$  mm je znázorněna na obr. 4.46.

Zvyšování řezných parametrů je omezeno maximálním kritickým posuvem na otáčku (obr. 4.18), který je dán geometrií hřbetu nástroje. U daného nástroje není vhodné používat posuv větší než  $0,20$  mm. Při otáčkách vyšších než  $4000 \text{ min}^{-1}$  docházelo k znehodnocení povrchu kuželového přechodu v otvoru vlivem vibrací (obr. 4.47).



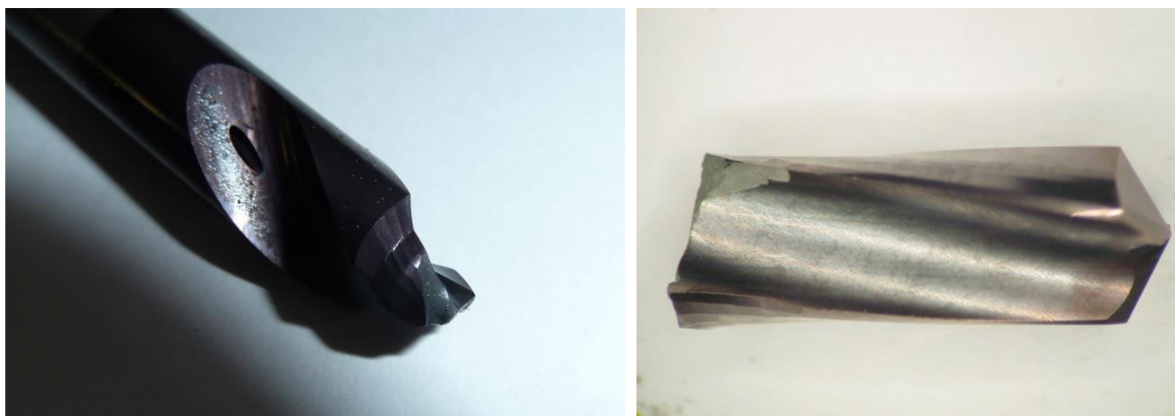
Obr. 4.46 Ukázka dlouhých třísek.



Obr. 4.47 Znehodnocený povrch otvoru.

Po překročení otáček  $9000 \text{ min}^{-1}$  docházelo k lámání nástroje v místě přechodu z průměru 3 mm na odstupňovanou část (obr. 4.48).





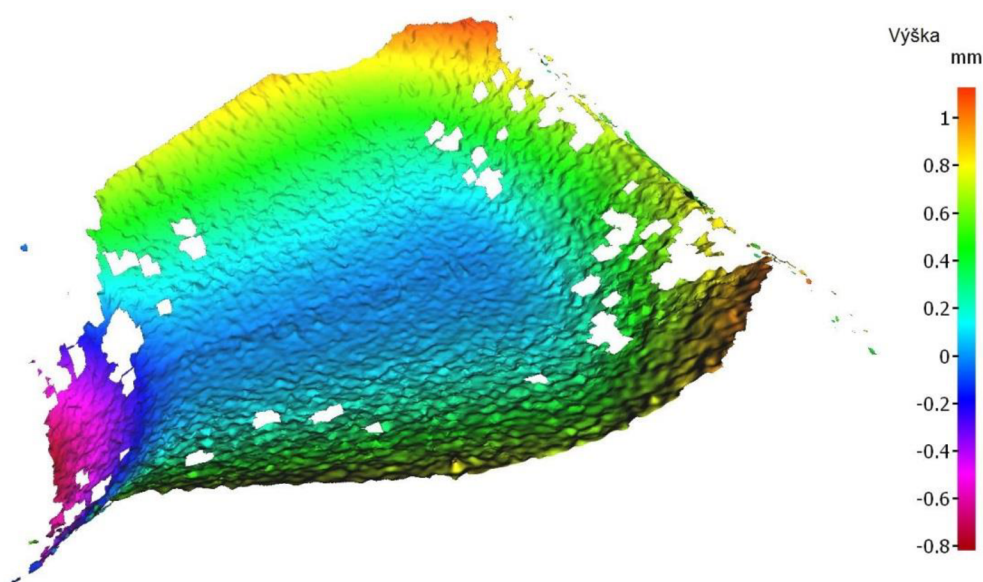
Obr. 4.48 Zlomený vrták.

Volba optimálních řezných podmínek z hlediska průběhu řezných sil musí tedy vyhovovat požadavku nízkých posuvových sil a řezných momentů, které odpovídají nízkému posuvu. Zároveň je vyžadován jejich plynulý průběh. Nízké posuvy ovšem způsobují tvorbu dlouhých třísek a snižují produktivitu obrábění.

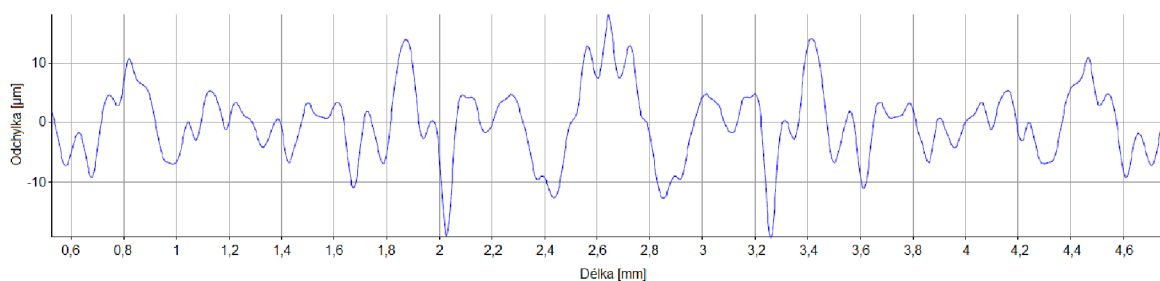
#### 4.4.3 Struktura povrchu obrobené plochy

Drsnost povrchu obrobené plochy byla velkým problémem zejména v oblasti kuželového přechodu mezi oběma průměry. Kvalitně se jevily, podle předpokladů, povrchy obráběné za nízkých posuvů na otáčku.

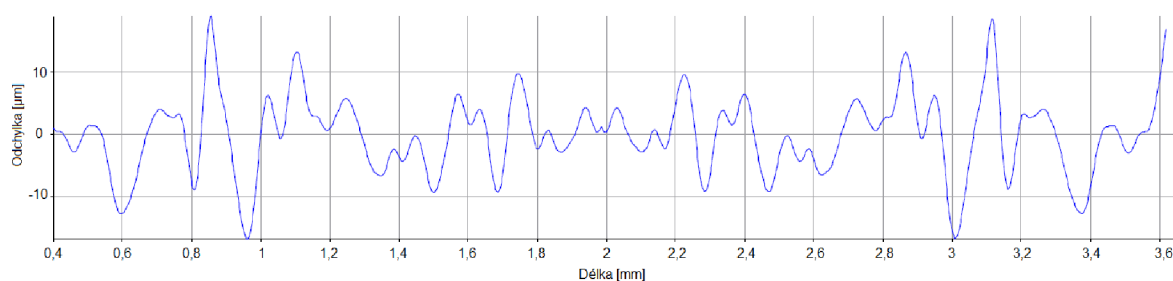
Získaný povrch kuželovité části otvoru, nasnímaný přístrojem Alicona je znázorněny na obr. 4.49.

Obr. 4.49 Povrch kuželového přechodu při  $n = 3500 \text{ min}^{-1}$  a  $f = 0,05 \text{ mm}$ .

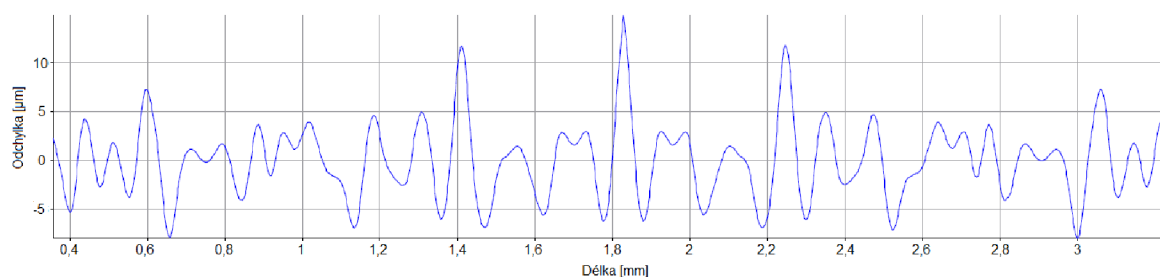
Na obr. 4.50 až 4.52 jsou pro porovnání uvedeny tři nejlepší naměřené drsnosti povrchu. Jelikož je dráha měřeného povrchu příliš krátká, a tím není splněna norma pro měření drsnosti povrchu dle ČSN EN ISO 4288, získané hodnoty jsou pouze orientační. Histogramy četnosti naměřených hodnot jsou uvedeny na obr. 4.53 až 4.55.



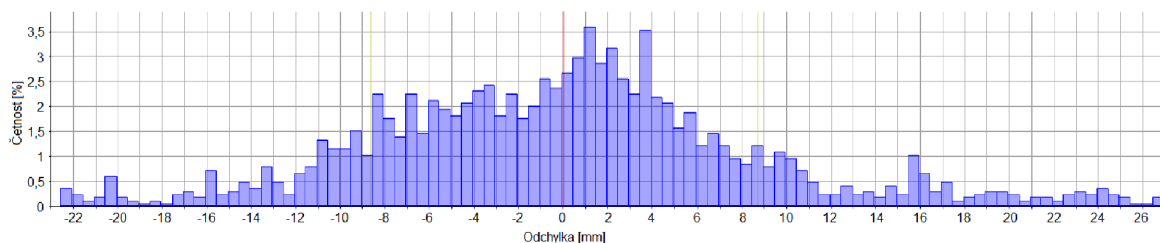
Obr. 4.50 Vyhodnocená drsnost při  $n = 3000 \text{ min}^{-1}$  a  $f = 0,05 \text{ mm}$ .



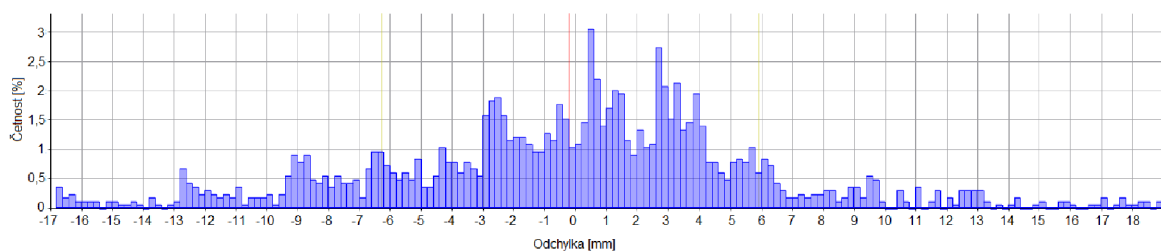
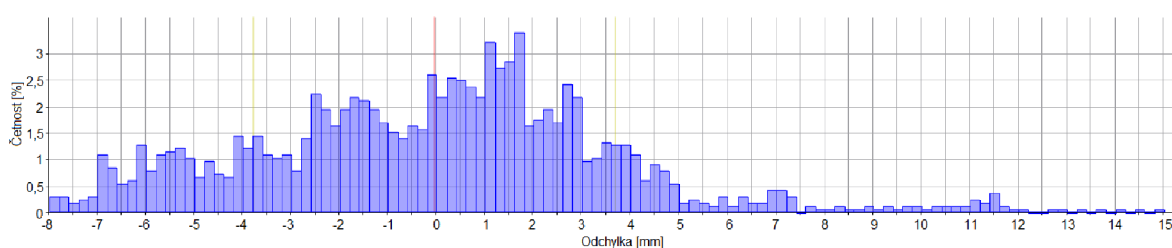
Obr. 4.51 Vyhodnocená drsnost při  $n = 3500 \text{ min}^{-1}$  a  $f = 0,05 \text{ mm}$ .



Obr. 4.52 Vyhodnocená drsnost při  $n = 4000 \text{ min}^{-1}$  a  $f = 0,05 \text{ mm}$ .



Obr. 4.53 Histogram četnosti při  $n = 3000 \text{ min}^{-1}$  a  $f = 0,05 \text{ mm}$ .

Obr. 4.54 Histogram četnosti při  $n = 3500 \text{ min}^{-1}$  a  $f = 0,05 \text{ mm}$ .Obr. 4.55 Histogram četnosti při  $n = 4000 \text{ min}^{-1}$  a  $f = 0,05 \text{ mm}$ .

Tab. 4.16 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu.

Otáčky $n \text{ [min}^{-1}]$ při $f = 0,05 \text{ mm}$	Drsnost povrchu $[\mu\text{m}]$		
	Ra	Rz	Rmax
3000	6,6222	32,4438	40,5431
3500	4,6204	26,9530	35,7825
4000	2,8957	17,7965	21,0667

Výsledky měření (tabulka 4.16) vykazují velké nerovnosti struktury povrchu, které jsou ve výrobním procesu nepřijatelné. Měření pro otáčky vyšší než  $4000 \text{ min}^{-1}$  (resp. vyšší proměnnou řeznou rychlost) bylo vyloučeno z důvodu nestability obrábění na daném stroji.

## 5 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Nasazení sruženého nástroje do výroby by mělo mít pozitivní dopad na výrobní náklady a produktivitu obrábění. V této kapitole je popsáno technicko-ekonomické zhodnocení, které slouží pouze orientačně k určení nákladů a jednotkového času pro zvolené řezné podmínky. Použité vzorce vychází z kapitoly 2.

### Náklady na strojní práci

Spousta parametrů, jako například předpokládaná trvanlivost, hodinová režie strojů apod., byly určeny odhadem. Výpočet se provede pro maximální řezné podmínky, kdy dochází ještě ke stabilnímu obrábění. Tato situace platila pro otáčky  $n = 4000 \text{ min}^{-1}$  a posuv na otáčku 0,05 mm. Parametry pro výpočet jsou tedy následující:

Otáčky:	$n = 4000 \text{ min}^{-1}$
Posuv na otáčku:	$f = 0,05 \text{ mm}$
Délka nájezdu:	$l_n = 1 \text{ mm}$
Délka vrtání:	$l = 11 \text{ mm}$
Délka přejezdu:	$l_p = 0 \text{ mm}$
Hodinová sazba stroje:	$N_{sn} = 1000 \text{ Kč}$

Jednotkový strojní čas:

$$t_{AS} = \frac{l_n + l + l_p}{n \cdot f} = \frac{1 + 11 + 0}{4000 \cdot 0,05} = 0,06 \text{ min}$$

Náklady na strojní práci:

$$N_s = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = 0,06 \cdot \frac{1000}{60} = 1 \text{ Kč}$$

### Náklady na vedlejší práci

Na obráběcím stroji CHIRON DZ 15K W se uvažuje nepřetržitý provoz s automatickou výměnou obrobků. Otočný pracovní stůl disponuje čtyřmi obrobky, kdy po vykonání i ostatních obráběcích operací dojde k jejich výměně. Interval automatické výměny čtyř obrobků je přibližně 1,9 s. Vedlejší čas zahrnuje čas výměny obrobků. Parametry vztažené na jeden obrobek a danou operací vrtání sruženým nástrojem jsou odhadnuty následovně:

Jednotkový vedlejší čas:	$t_{AV} = 1,9 / 4 = 0,475 \text{ s} \doteq 0,008 \text{ min}$
Hodinová sazba na vedlejší práci:	$D_v = 1000 \text{ Kč}$

Náklady na vedlejší práci:

$$N_v = t_{AV} \cdot \frac{D_v}{60} = 0,008 \cdot \frac{1000}{60} \doteq 0,13 \text{ Kč}$$

### Náklady na nástroj a jeho výměnu

Pro určení těchto nákladů je nutno určit cenu nástroje a jeho předpokládanou trvanlivost. Stroj disponuje dvěma vřeteny, díky kterým obrobí dvě součásti současně. Doba výměny nástroje je stanovena podle parametrů stroje na 2,4 s. Vstupní parametry pro výpočet:

Cena nástroje:	$C_n = 1708 \text{ Kč}$
----------------	-------------------------

Doba výměny nástroje:  $t_{Ax} = 2,4 \text{ s} = 0,04 \text{ min}$

Odhadovaná trvanlivost:  $T \text{ (ks)} = 2000 \text{ ks}$

Náklady na výměnu nástroje vztažené na jednu trvanlivost:

$$N_{Tv} = t_{Ax} \cdot \frac{D_v}{60} = 0,04 \cdot \frac{1000}{60} = 0,67 \text{ Kč}$$

Náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost:

$$N_T = C_n + N_{Tv} = 1708 + 0,67 \doteq 1708,7 \text{ Kč}$$

Podíl čistého času řezání:

$$\tau = \frac{l}{L} = \frac{l}{l_n + l + l_p} = \frac{11}{1 + 11 + 0} = 0,917$$

Trvanlivost v minutách:

$$T(\text{min}) = T(\text{ks}) \cdot t_{AS} = 2000 \cdot 0,06 = 120 \text{ min}$$

Počet obrobeneých kusů během jedné trvanlivosti nástroje:

$$Q_T = \frac{T(\text{min})}{\tau \cdot t_{AS}} = \frac{120}{0,917 \cdot 0,06} = 2181 \text{ ks}$$

Náklady na nástroj:

$$N_N = \frac{N_T}{Q_T} = \frac{1708,7}{2181} = 0,78 \text{ Kč}$$

#### Celkové náklady

Celkové operační náklady na jeden kus jsou stanoveny následovně:

$$N_C = N_S + N_V + N_N = 1 + 0,13 + 0,78 = 1,91 \text{ Kč}$$

Náklady příslušné operace vrtání sduženým nástrojem jsou za zvolených podmínek vyčísleny přibližně na 1,91 Kč za jeden kus.

#### Operační jednotkový čas

Celkový čas dané operace pro jednu součást se určí součtem jednotkového strojního času, jednotkového času na výměnu nástroje a jednotkového vedlejšího času.

$$t_A = t_{AS} + \frac{t_{Ax}}{Q_T} + t_{AV} = 0,06 + \frac{0,04}{2181} + 0,008 = 0,068 \text{ min} = 4,08 \text{ s}$$

Bylo naměřeno, že cyklus kompletní výroby čtyř kusů součástek trvá asi 4 minuty. Oproti původní technologii se jedná o úsporu přibližně 16 sekund. Úspora času na jeden kus je tedy 4 sekundy.

## 6 DISKUZE

Nahrazením původních konvenčních nástrojů jedním sdruženým nástrojem lze dosáhnout jak úspor výrobních nákladů, tak především zvýšení produktivity obrábění. Přestože má nástroj vybroušenou potřebnou geometrii, je poměrně obtížné nalézt optimální řezné podmínky z hlediska drsnosti povrchu, pro výrobu požadovaného otvoru s obdobnými parametry, jako při použití konvenčních nástrojů. Rozsah nastavení řezných podmínek je omezen stabilitou obrábění, kdy dochází k vibracím a znehodnocení povrchu obrobku.

### 6.1 Průběh sil a momentů

Ze srovnání experimentálně naměřených průběhů posuvové síly a řezného momentu s empirickým výpočtem, jsou patrné poměrně velké odchylky. Tyto odchylky jsou způsobeny nejrůznějšími vlivy, které nejsou v empirickém vztahu zahrnuty. Svůj podíl na těchto odchylkách nese bezesporu také velikost nástroje, který má v malý průměr pouhé 3 mm a je tedy náchylnější na strukturu obráběného materiálu a další mechanické a chemické vlivy. Z hlediska nastavení řezných podmínek má na velikost posuvové síly a řezného momentu vliv především velikost posuvu na otáčku a úhel nastavení hlavního ostří. V některých případech docházelo k nestabilnímu průběhu posuvové síly a řezného momentu, který byl zřejmě zapříčiněn nedostatečně plynulým odchodem třísky.

### 6.2 Struktura povrchu obrobené plochy

Ze získaných výstupů měření drsnosti je patrný zásadní problém navrženého nástroje s kvalitou plochy v místě kuželového přechodu mezi malým a velkým průměrem. Za přijatelných řezných podmínek na daném stroji tak není nemožné dosáhnout požadované maximální drsnosti povrchu. Na povrchu za těchto podmínek vznikají nerovnosti, včetně zvlnění povrchu.

Zpřesňování těchto nerovností by mohlo pomoci zvýšení řezné rychlosti při zachování nízkých posuvů na otáčku. To je ovšem možné jen při eliminaci vibrací nástroje. Zvyšování řezné rychlosti se sice drsnost povrchu zlepšovala, ale jen do chvíle po překročení otáček  $4000 \text{ min}^{-1}$ , kdy došlo k nestabilnímu obrábění a kvalita povrchu se začala výrazně zhoršovat.

## ZÁVĚR

Monolitní sdužené nástroje jsou v mnoha ohledech vítaným řešením při výrobě rotačních tvarových otvorů. Výhodou je nahrazení více nástrojů pouze jedním, který zvládne stejné operace s mnohem vyšší produktivitou a často i nižšími náklady. Vzhledem k principu obrábění je obtížné zhotovit nástroj s ideální geometrií tak, aby bylo dosaženo stejných výsledků, jako u konvenčních nástrojů. Dalším problémem je nalézt takové řezné podmínky, které by společně vyhovovaly ve všech místech nástroje. To je dáno především řeznou rychlostí, která je závislá na vzdálenosti břitu od osy nástroje.

Cílem této práce bylo analyzovat navržený sdužený nástroj ze slinutého karbidu opatřený PVD povlakem pro výrobu požadované součástky z materiálu ČSN 41 4220. Hledání optimálních řezných parametrů, závisí především na průběhu působení sil, momentů a získané struktury povrchu obrobku.

Experimentálním měřením sil a momentů pomocí dynamometru a porovnáním s teoretickými empirickými vztahy bylo dosaženo následujících poznatků:

- hodnoty posuvových sil a řezných momentů jsou závislé především na posuvu na otáčku a úhlu nastavení hlavního ostří,
- empirický výpočet nezahrnuje vliv příčného ostří na špičce nástroje,
- s rostoucím posuvem roste také odchylka naměřených hodnot sil a momentů od hodnot teoretických,
- pro vhodný proces vrtání je potřeba nalézt řezné podmínky s plynulým průběhem posuvové síly a řezného momentu,
- při nízkých řezných parametrech hrozí tvorba dlouhých třísek, které mají tendenci k namotávání se na nástroj,
- při vysokých řezných rychlostech dochází ke zlepšování drsnosti povrchu, ale jen do chvíle, kdy dojde ke značným vibracím, které vedou ke znehodnocení povrchu obrobku, nebo dokonce ke zlomení nástroje.

Tvorbě třísky nežádoucího tvaru je možné zamezit přerušovaným vrtáním nebo změnou řezných podmínek během procesu vrtání. Zásadním problémem uvažovaných řezných podmínek je struktura povrchu kuželového přechodu mezi oběma průměry otvoru. Řešením je vyšší řezná rychlost, která ovšem vyžaduje zamezení vibrací pomocí dostatečné tuhosti vřetene s minimálním obvodovým házením. Dalším řešením by mohlo být použití kvalitnějšího mazání, nebo kvalitnější úprava povrchu břitu nástroje použitím jemnějšího písku pro omílání nástroje.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. *Produktivní obrábění kovů*. AB SANDVIK COROMANT. Švédsko: Sandvik Coromant. 1997. C-2920:11 CZE.
2. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 2. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2004 [cit. 2015-05-08].  
Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-2cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf).
3. STIM ZET a.s. *Katalog výrobků* [online]. [cit. 2015-05-08].  
Dostupné z: [http://www.stimzet.cz/data/ke\\_stazeni\\_cz.html](http://www.stimzet.cz/data/ke_stazeni_cz.html).
4. Vrtání a vyvrtávání. *Technologie, stroje a zařízení* [online]. [cit. 2015-05-08].  
Dostupné z: <http://techstroj.g6.cz/T/T15.pdf>.
5. FLACHS, Jennifer Rose. *Force modeling in drilling with application to burr minimization*. Georgia Institute of Technology. December 2011.
6. Solid-Carbide Chamfering Tools for Multi-Material Drilling. American Machinist [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://americanmachinist.com/cutting-tools/solid-carbide-chamfering-tools-multi-material-drilling>.
7. KOČMAN, K. a PROKOP J. *Technologie výroby II: Řešené příklady* [online]. Studijní opory pro bakalářský a magisterský studijní program. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2002 [cit. 2015-05-08].  
Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby\\_II.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby_II.pdf).
8. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2003 [cit. 2015-05-08].  
Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf).
9. Tungaloy Czech s.r.o. *2014 Nástroje pro obrábění* [online]. [cit. 2015-05-08].  
Dostupné z: [http://www.tungaloy.co.jp/cz/products/cutting/cutting\\_11.php](http://www.tungaloy.co.jp/cz/products/cutting/cutting_11.php).
10. KIM, J., MIN, S., DORNFELD, D. A. Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41. 2001. 923-936 s. PII: S0890-6955(00)00131-0.
11. RAMU, CH., MEHTA, N. K., KUMAR, P., SHANKARA MURTHY, A. G. Experimental investigations to optimise step drill geometry for burr minimisation in drilling using regression model. *Int. J. Manufacturing Technology and Management*. 2010. 122-134 s. DOI: 10.1504/IJMTM.2010.034291.
12. SHANMUGHASUNDARAM, P., SUBRAMANIAN, R. Study of parametric optimization of burr formation in step drilling of eutectic Al-Si alloy-Gr composites. *Journal of Materials Research and Technology*. 2014. 150-157 s. ISSN 2238-7854.
13. FOREJT, M. a PÍŠKA M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
14. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2011. 332 s. ISBN 978-80-7204-722-2.



15. FLACHS, J. R., SALAHSHOOR, M., MELKOTE, S. N. Mechanistic models of thrust force and torque in step-drilling of Al7075-T651. *German Academic Society for Production Engineering*. 2014. 319-333 s. DOI 10.1007/s11740-014-0531-5.
16. PÍŠKA, Miroslav. Konzultace. Brno, 23.2.2015.
17. STRENKOWSKI, J. S., HSIEH, C. C., SHIH, A. J. An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44. 2004. 1413-1421 s. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.01.005.
18. MUKHERJEE, I., RAY, P. K. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers & Industrial Engineering* 50. 2006. 15-24 s. DOI: 10.1016/j.cie.2005.10.001.
19. KOČMAN, K. a PROKOP J. *Speciální technologie obrábění: Řešené příklady*. Studijní opory pro bakalářský a magisterský studijní program. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2003.
20. MÁDL, J a KVASNIČKA, I. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: Vydavatelství ČVUT. 1998. 170 s. ISBN 80-01-01864-6.
21. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Studijní opory pro bakalářský a magisterský studijní program. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2005 [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat\\_pro\\_rez\\_nastroje/materialy\\_pro\\_rezne\\_nastroje\\_v2.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf).
22. ROTANA a.s. *O společnosti* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://www.rotana.cz/11-predstaveni-spolecnosti.html>.
23. Bohdan Bolzano, s.r.o. *Přehled vlastností oceli 16MnCr5 (16MnCrS5)* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: [http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP\\_%20Tycova\\_ocel/EN\\_10084/MOP\\_16MnCr5.pdf](http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10084/MOP_16MnCr5.pdf).
24. CHIRON-WERKE GmbH & Co. KG. *15 Series* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: [http://www.duroc.com/media/493475/br15\\_incl\\_dbl\\_12-09\\_en\\_01.pdf](http://www.duroc.com/media/493475/br15_incl_dbl_12-09_en_01.pdf).
25. CERATIZIT S.A. *Hard metals for precision tools* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://www.ceratizit.com/services/downloads/>.
26. Gebr. SAACKE GmbH & Co. KG. *UWID - Catalogue* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: [http://www.saacke-group.com/scom\\_data/machines\\_model\\_uwid\\_media/13\\_e\\_2014\\_facelift.pdf](http://www.saacke-group.com/scom_data/machines_model_uwid_media/13_e_2014_facelift.pdf).
27. Software pro výrobu a broušení nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/software-pro-vyrobu-a-brouseni-nastroju.html>.
28. *PVD povlaky*. CemeCon s.r.o. Česká republika, pro období 2007/2008.
29. Changzhou city Wansui tools works. *Main technical conditions of twist drill* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://www.wstools.com/en/cpzs.asp>.
30. TAJMAC-ZPS, a.s. *Portálové obráběcí centrum MCV 1210* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://www.tajmac-zps.cz/cs/MCV-1210>.

31. GÜHRING s.r.o. *GM 300 – Nástrojové držáky HSK/SK, upínače HSK a příslušenství* [online]. [cit. 2015-05-08].  
Dostupné z: [http://www.guehring.cz/data/produkty/GM300\\_cs.pdf](http://www.guehring.cz/data/produkty/GM300_cs.pdf)
32. Kistler Holding AG. *4-Component Dynamometer for drilling* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://www.kistler.com/la/en/applications/sensor-technology/cutting-force-measurement/drilling/products/#4-component-dynamometer-for-drilling-9272>.
33. Alicona Imaging GmbH. *Alicona FOCUSvariation* [online]. [cit. 2015-05-08].  
Dostupné z: [http://issuu.com/alicona/docs/alicona\\_focusvariation\\_edition\\_4](http://issuu.com/alicona/docs/alicona_focusvariation_edition_4).

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CAD	[-]	Computer Aided Design
CNC	[-]	Computer Numeric Control
CVD	[-]	Chemical Vapor Deposition
ČSN	[-]	Česká technická norma
DIN	[-]	Deutsche Industrie-Norm
HB	[-]	Tvrдость podle Brinella
HRA	[-]	Tvrдость podle Rockwella
HV	[-]	Tvrдость podle Vickerse
ISO	[-]	International Organization for Standardization
PVD	[-]	Physical Vapor Deposition
RO	[-]	Rychlořezná ocel
SK	[-]	Slinutý karbid
TZ	[-]	Tepelné zpracování

Symbol	Jednotka	Popis
$A_D$	[mm <sup>2</sup> ]	jmenovitý průřez třísky
$C_{Fc}$	[-]	materiálová konstanta
$C_{Ff}$	[-]	materiálová konstanta
$C_M$	[-]	materiálová konstanta
$C_T$	[-]	materiálová konstanta
$C_n$	[Kč]	cena nástroje
$C_v$	[-]	materiálová konstanta
$C_{vc}$	[-]	materiálová konstanta
$D_1$	[mm]	malý průměr vrtáku
$D_2$	[mm]	velký průměr vrtáku
$D_p$	[mm]	průměr polotovaru vrtáku
$D_{p1}$	[mm]	průměr roztečné kružnice chladicích kanálů
$D_v$	[Kč]	hodinová sazba na vedlejší práce

<b>E</b>	[MPa]	modul pružnosti v tahu
<b>F<sub>c</sub></b>	[N]	řezná síla
<b>F<sub>f</sub></b>	[N]	posuvová síla
<b>F<sub>f1</sub></b>	[N]	posuvová síla špičky vrtáku
<b>F<sub>f2</sub></b>	[N]	posuvová síla odstupňování vrtáku
<b>F<sub>f,krit</sub></b>	[N]	kritická posuvová síla
<b>F<sub>p</sub></b>	[N]	pasivní síla
<b>F<sub>x</sub></b>	[N]	síla působící v ose X
<b>F<sub>y</sub></b>	[N]	síla působící v ose Y
<b>F<sub>z</sub></b>	[N]	síla působící v ose Z
<b>I<sub>red</sub></b>	[mm <sup>4</sup> ]	redukováný moment setrvačnosti
<b>K</b>	[-]	součinitel bezpečnosti
<b>L</b>	[mm]	dráha nástroje
<b>L<sub>p</sub></b>	[mm]	délka polotovaru nástroje
<b>L<sub>st</sub></b>	[mm]	délka odstupňování
<b>M<sub>c</sub></b>	[Nmm]	řezný moment
<b>M<sub>c1</sub></b>	[Nmm]	řezný moment špičky vrtáku
<b>M<sub>c2</sub></b>	[Nmm]	řezný moment odstupňování vrtáku
<b>M<sub>k</sub></b>	[Nmm]	maximální krouticí moment na vřetení
<b>M<sub>krit</sub></b>	[Nmm]	kritická velikost krouticího momentu
<b>M<sub>řez</sub></b>	[Nmm]	krouticí moment potřebný k řezání
<b>M<sub>z</sub></b>	[Nmm]	moment působící v ose Z
<b>N<sub>C</sub></b>	[Kč]	celkové operační náklady
<b>N<sub>N</sub></b>	[Kč]	náklady na nástroj a jeho výměnu
<b>N<sub>S</sub></b>	[Kč]	náklady na strojní práci
<b>N<sub>T</sub></b>	[Kč]	náklady na nástroj a jeho výměnu za jednu trvanlivost
<b>N<sub>V</sub></b>	[Kč]	náklady na vedlejší práci
<b>N<sub>vm</sub></b>	[Kč]	minutová sazba na vedlejší práce
<b>N<sub>m</sub></b>	[1/hod]	norma množství
<b>N<sub>sm</sub></b>	[Kč]	minutová sazba stroje

$N_{sn}$	[Kč]	hodinová sazba stroje
$P_c$	[kW]	řezný výkon
$P_e$	[kW]	výkon elektromotoru stroje
$P_{ef}$	[kW]	užitečný výkon
$P_f$	[kW]	posuvový výkon
$P_{fe}$	[-]	pracovní boční rovina
$Q_T$	[ks]	počet obrobených kusů za jednu trvanlivost břitu
$R_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	střední aritmetická úchylka profilu
$R_m$	[MPa]	mez pevnosti materiálu
$R_{max}$	[ $\mu\text{m}$ ]	maximální výška nerovnosti profilu
$R_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	výška nerovnosti profilu
$T$	[min]	trvanlivost nástroje
$T_{opt}$	[min]	optimální trvanlivost nástroje
$VB$	[mm]	opotřebení hřbetu nástroje
$V_m$	[ $\text{dm}^3$ ]	objem odebraného materiálu
$V_t$	[ $\text{dm}^3$ ]	objem volně ložených třísek
$W$	[-]	objemový součinitel třísek
$W_k$	[ $\text{mm}^3$ ]	modul průřezu v krutu
$a_p$	[mm]	šířka záběru ostří
$a_{p1}$	[mm]	šířka záběru ostří špičky vrtáku
$a_{p2}$	[mm]	šířka záběru ostří odstupňování vrtáku
$b_D$	[mm]	jmenovitá šířka třísky
$d_1$	[mm]	průměr držáku upínače
$d_2$	[mm]	malý průměr kužele upínače
$d_3$	[mm]	celkový průměr upínače
$d_4$	[mm]	velký průměr kužele upínače
$d_k$	[mm]	průměr chladicích kanálů
$e_c$	[ $\text{J}\cdot\text{mm}^3$ ]	měrná řezná energie
$f$	[mm]	posuv na otáčku
$f_{krit}$	[mm]	kritická velikost posuvu vzhledem k pěchování mat.

$f_z$	[mm]	posuv na zub za otáčku
$h$	[mm]	výška otřepu
$h_D$	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
$k_c$	[MPa]	měrná řezná síla
$k_{c0,4}$	[MPa]	měrná řezná síla pro tloušťku třísky 0,4 mm
$k_{cfz1}$	[MPa]	měrná řezná síla pro posuv na břit špičky vrtáku
$k_{cfz1}$	[MPa]	měrná řezná síla pro posuv na břit odstupňování vrtáku
$l$	[mm]	délka obráběné plochy
$l_1$	[mm]	rozměr upínače
$l_2$	[mm]	rozměr upínače
$l_n$	[mm]	délka náběhu
$l_o$	[mm]	vysunutá délka vrtáku
$l_p$	[mm]	délka přeběhu
$m$	[-]	materiálový exponent
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky
$r$	[mm]	radiální vzdálenost od osy vrtáku
$v_c$	[m/min]	řezná rychlost
$v_{cT}$	[m/min]	řezivost nástroje
$v_{c\ opt}$	[m/min]	optimální řezná rychlost
$v_e$	[m/min]	rychlost řezného pohybu
$v_f$	[mm/min]	posuvová rychlost
$v_{f\ krit}$	[mm/min]	kritická posuvová rychlost vzhledem k pěchování mat.
$w$	[mm]	poloměr jádra vrtáku
$t_A$	[min]	operační čas jednotkové práce
$t_{A11}$	[min]	čas jednotkové práce za klidu
$t_{AS}$	[min]	jednotkový strojní čas
$t_{AV}$	[min]	jednotkový vedlejší čas
$t_{Ax}$	[min]	čas výměny nástroje
$t_N$	[min]	podílový čas na výměnu nástroje
$x_{Fc}$	[-]	exponent, vyjadřující vliv průměru vrtáku

$x_{FF}$	[-]	exponent, vyjadřující vliv průměru vrtáku
$x_M$	[-]	exponent, vyjadřující vliv průměru vrtáku
$x_{vc}$	[-]	exponent, vyjadřující vliv průměru vrtáku
$y_{Fc}$	[-]	exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku
$y_{FF}$	[-]	exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku
$y_{vc}$	[-]	exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku
$\alpha_f$	[°]	boční úhel hřbetu
$\alpha_{fe}$	[°]	efektivní úhel hřbetu
$\alpha_o$	[°]	ortogonální úhel hřbetu
$\beta_f$	[°]	boční úhel břitu
$\beta_o$	[°]	ortogonální úhel břitu
$\gamma_f$	[°]	boční úhel čela
$\gamma_{fe}$	[°]	efektivní úhel čela
$\gamma_o$	[°]	ortogonální úhel čela
$\varepsilon$	[-]	opravný součinitel
$\eta$	[°]	úhel řezného pohybu
$\eta_m$	[-]	mechanická účinnost stroje
$\eta_s$	[-]	využití stroje za směnu
$\kappa_r$	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
$\kappa_{r1}$	[°]	úhel nastavení hlavního ostří špičky vrtáku
$\kappa_{r2}$	[°]	úhel nastavení hlavního ostří odstupňování vrtáku
$\lambda(r)$	[°]	okamžitý úhel sklonu ostří
$\lambda_s$	[°]	úhel sklonu šroubovice na jmenovitém průměru
$\lambda_s(r)$	[°]	okamžitý úhel sklonu šroubovice
$\xi$	[-]	opravný součinitel
$\tau$	[-]	podíl čistého času řezání
$\tau_{mez}$	[MPa]	dovolené napětí v krutu
$\varphi$	[°]	úhel posuvového pohybu
$\psi$	[°]	úhel příčného ostří

**SEZNAM PŘÍLOH**

- |           |  |
|-----------|--|
| Příloha 1 | Výrobní průvodka sdruženého nástroje           |
| Příloha 2 | Výkres sdruženého nástroje                     |
| Příloha 3 | Výkres sdruženého nástroje z předchozí operace |
| Příloha 4 | Výsledky měření jednotlivých zatížení          |



# PŘÍLOHA 1: Výrobní průvodka sdruženého nástroje



Rotana a.s.  
Průmyslová 2085  
CZ-594 01 Velké Meziříčí  
Tel.: +420 568 521 948, Fax: +420 568 522 057  
E-mail: rotana@rotana.cz

IF 50.01

## PRŮVODKA

Výroba a ostření rotačních nástrojů ze slinitých karbidů

Uložení:

PŘÍJEMCE

ODBĚRATEL:

Číslo zakázky: Z3/14-2829  
Termín: 27.11.2014  
Vystavení: 20.11.2014  
Číslo př. obj.: OP3/14-3486  
Pozice: 002  
Množství: 5 ks

ROTANA a.s.  
Průmyslová 2085  
594 01 Velké Meziříčí  
Česká republika

ROTANA a.s.  
p. Viktor Štěpánek  
Průmyslová 2085  
594 01 Velké Meziříčí  
Česká republika

Změna:

Strana výrobku 1 z 2

Název:

R-7163-0  
SK Stupňový vrták D3/D6,28/D8h6HA; Lc= 80; a= 20; Z= 2; šroubovice= 30°; s vnitřním chlazením; obráběný materiál= Ocel; povlak= Rotal+; označení= D3/70°/D6,28

002 - 001	M	11238071		Počet kusů materiálu:	5 ks
002 - 002	O	20.11.2014	Řezání materiálu Wimmer TM374	celkem odvedeno:	Pracovník:
				z toho zmetky:	Datum:
					Kontrola:
002 - 003	O	24.11.2014	Broušení na kulato GRINDOR	celkem odvedeno:	Pracovník:
			Brousit řezné plochy s přídavkem 0,2/plochu	z toho zmetky:	Datum:
					Kontrola:
002 - 004	T		Na čele stopky kanály NEPROPOJOVAT !!!!		
002 - 005	O	24.11.2014	Broušení Saacke	celkem odvedeno:	Pracovník:
			Brousit dle tech.dokumentace. Podobná jako R-5808-2. Jiný průběh a zabezpečení drážky.	z toho zmetky:	Datum:
					Kontrola:
002 - 006	O	24.11.2014	Kontrola Zoller	celkem odvedeno:	Pracovník:
			Protokol	z toho zmetky:	Datum:
					Kontrola:
002 - 007	O	24.11.2014	Omláčení OTEC DF35	celkem odvedeno:	Pracovník:
			35 ot. 5 min granulát 2	z toho zmetky:	Datum:
					Kontrola:
002 - 008	O	24.11.2014	Popis nástrojů a krabiček, balení	celkem odvedeno:	Pracovník:
			Logo; R...; Označení	z toho zmetky:	Datum:
					Kontrola:
002 - 009	K	26.11.2014	Povlakování Cemecon	celkem odvedeno:	Pracovník:
			TINAbox	z toho zmetky:	Datum:
					Kontrola:

IČO: 26237369  
DIČ: CZ26237369

Registrace v OR: spisová značka odd. B, voška 3520 vedená u KOS  
Brno

Komerční banka, č.úctu: 86-4722540277/0100



Strana 1 z 2

# PŘÍLOHA 2: Výkres sduženého nástroje

Dusevní majetek  
Rotana a.s.  
Roamnocování nebo zrušení tohoto dokumentu  
je podle zákona trestné.  
Příjemce výkresu nuz za stodu  
varníou znečatím.

**Platí pro všechny rezné části**

Obrabeny material	Ocel
Pocet britu	2
Sroubovice	prava 30°
Otacky nástroje	prave
Povlak	Rotal+

**A 0,01**

Měří užitky (radrečných  
skemých třmí v vepřích měření)

mm	0	0
mm	±0,2	+0,5
mm	±0,2	+1

Měří užitky (radrečných  
skemých třmí v vepřích měření)

mm	0	0
mm	±0,2	+0,5
mm	±0,2	+1

Měří užitky (radrečných  
skemých třmí v vepřích měření)

mm	0	0
mm	±0,2	+0,5
mm	±0,2	+1

Znacení ploch	
Válcové bez fazet	VP
Válcové fazety	VF
Rezné plochy	RP
Nerezné plochy	NP

		Rotana a.s. Prumyslova 2085 CZ- 594 01 Velke Mezirici tel.: +420 566 521 948 fax: +420 566 522 057 e-mail: rotana@rotana.cz	
		Zmena Datum Index Podpis	
1	2	a)	
3	4	b)	
5	6	c)	
7	8	d)	
Měřtko		2:1	Datum
Kresil	Stepanek		13.08.2014
Schválil	Svihalek		13.08.2014

PROMĚTÁNÍ		Material	
		Položka: Ø 8x 80	
		Čistá hmotnost: 0.0567 kg	
Název: <b>SK vrtak</b>			
Oznacení: <b>Ø 3/70°/Ø 6,28</b>			
Čís. výkresu: <b>R-7163-0</b>			

Ust 1/2

**PŘÍLOHA 3: Výkres sduženého nástroje z předchozí operace**

**Důležitý majátek**  
Rotana a.s.  
Rozměrovaní nebo znáz. tohoto dokumentu  
je podle zákona třetina.  
Přijímá výresu ruč. za sebou  
vzniklou zneužitím.

1	6
2	±0.5
3	±0.2
4	±0.1
5	±0.05

1	6
2	±0.5
3	±0.2
4	±0.1
5	±0.05

Obráběný materiál: Ocel  
Počet bitů: 2  
Sroubovice: prava 40°  
Otáčky nástroje: prave  
Povlak: Rotal

Válcové bez fazet	VP
Válcové fazety	VF
Rezné plochy	RP
Nerezné plochy	NP

**Platí pro všechny rezné části**

**Celo nezapevňovat**  
a) Celo stupně zapevňit 6°  
Celo stupně zapevňit 3°  
Zapevňit vypicováním

4:5

4:5

0.3x45°

140°

Ø 6±0.05

1.092

4.03±0.05

(13.276)

18.06±0.05

22.42±0.05

28.91±0.05

40

102

Ø 16 h6

30° VP

90° RP

90° RP

Ø 14.95±0.02 VF

Ø 12.58±0.02 VF

Ø 10.8±0.02 4xVF

Ø 9.28±0.02 VF

A

A

55.5° RP

A(5:1)

4:5

1	6
2	±0.5
3	±0.2
4	±0.1
5	±0.05

**Rotana a.s.**  
Prumyslova 2085  
CZ-594 01 Velké Meziříčí  
tel: +420 566 521 948  
fax: +420 566 522 057  
e-mail: rotana@rotana.cz

PROMĚNĚNÍ	
Materiál	--
Polotovar	Ø 16x102
Čistá hmotnost	0.2373 kg

Název			
<b>SK stupňový vrták</b>			
Označení			
—			
Měřítko		Datum	
Kresil		19.03.2014	
Schválil		19.03.2014	

1	6
2	±0.5
3	±0.2
4	±0.1
5	±0.05

Čís. výkresu	
<b>R-5241-4</b>	

List 1/3

## PŘÍLOHA 4: Výsledky měření jednotlivých zatížení

