



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VOLBA OPTIMÁLNÍHO NÁSTROJE PRO VYBRANOU TECHNOLOGII OBRÁBĚNÍ

SELECTION OF AN OPTIMAL TOOL FOR THE SELECTED MACHINING TECHNOLOGY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Podstata

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.

BRNO 2020

# diplomové práce Zadání

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Jan Podstata</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

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 optimálního nástroje pro vybranou technologii obrábění

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student provede rozbor výroby vybraného dílu, zaměří se na konkrétní technologii obrábění a provede výběr alternativních řezných nástrojů. Dále experimentálně stanoví, který nástroj je nejvhodnější z hlediska trvanlivosti a silového zatížení.

### Cíle diplomové práce:

1. Zhodnocení stávajícího postupu výroby.
2. Výběr alternativních řezných nástrojů.
3. Experimentální obrábění.
4. Zpracování získaných dat a porovnání jednotlivých nástrojů.
5. Doporučení pro praxi.

### Seznam doporučené literatury:

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.

PTÁČEK, L. Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-7204-283-1.

PÍŠKA, M. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235s. ISBN 978-80-254-2250-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Tato práce srovnává vlastnosti čtyř vyměnitelných břitových destiček od různých dodavatelů při frézování. Srovnávacími faktory jsou řezná síla, opotřebení destiček a drsnost výsledného povrchu. Diplomová práce je rozdělena na dvě části – rešerši a experiment. Rešerše rozebírá silové zatížení, možnost jeho měření, povrchové úpravy nástrojů, frézy a vyměnitelné břitové destičky. Experiment měl podobu měření silového zatížení při čelním frézování, změření drsnosti povrchu obrobeného materiálu a změření opotřebení destiček na optickém měřidle. Na základě měření byly vyměnitelné břitové destičky porovnány.

### Klíčová slova

frézování, silové zatížení, opotřebení, VBD, řezná síla

## ABSTRACT

This thesis compares the properties of four types of replaceable cutting tool inserts from different suppliers during milling. The comparative factors are cutting force, material loss of the insert and the roughness of the resulting surface. The thesis is divided into two parts - a comprehensive overview of the current state of knowledge and an experiment. The first part analyzes the load, the possibility of its measurement, surface treatment of tools, milling cutters and replaceable inserts. The experiment took the form of measuring the load during face milling, measuring the surface roughness of the machined material and measuring the material loss of the inserts on an optical strain gauge. The replaceable cutting tool inserts were compared based on the performed measurements.

### Key words

milling, load, material loss, replaceable cutting tool insert, cutting force

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PODSTATA, Jan. *Volba optimálního nástroje pro vybranou technologii obrábění* [online]. Brno, 2021 [cit.2020-09-06]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129640>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Zdeněk Fiala.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Volba řezného nástroje pro vybranou technologii obrábění** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

-----  
V Brně, dne 10.9.2020

Datum

-----  
Bc. Jan Podstata

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Zdeňku Fialovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotný a přátelský přístup, rady a věcné připomínky, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Zároveň bych chtěl poděkovat firmě TOS KURIM – OS, a.s. za zakoupení materiálu a vyměnitelných břitových destiček, zapůjčení obráběcího stroje na experimentální část a v první řadě za čas, který mi věnoval pan Ing. Petr Kupka. Nemůžu taky zapomenout na podporu ze strany mé rodiny, spolužáků a přátel, bez kterých by bylo nejen psaní této práce, ale i celé studium na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení Technické v Brně výrazně obtížnější.

## OBSAH

Abstrakt .....	4
Bibliografická citace.....	4
Čestné prohlášení .....	5
Poděkování .....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
<b>1 ROZBOR, CHARAKTERISTIKA A POPIS TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ.....</b>	<b>10</b>
1.1    Technologie frézování.....	10
1.1.1    Válcové frézování.....	10
1.1.2    Čelní frézování .....	11
1.1.3    Okružní frézování .....	11
1.1.4    Planetové frézování.....	12
1.2    Řezné parametry.....	12
1.3    Velikost třísky při frézování .....	13
1.4    Síly při frézování .....	14
1.4.1    Měrná řezná síla .....	14
1.4.2    Výpočet řezných sil .....	15
1.5    Používané nástroje při frézování.....	18
<b>2 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY .....</b>	<b>19</b>
2.1    Rychlořezné oceli.....	20
2.2    Slinuté karbidy.....	20
2.2.1    Stručná historie slinutých karbidů.....	20
2.2.2    Rozdělení a značení nepovlakovaných slinutých karbidů .....	21
2.2.3    Povlakované slinuté karbidy.....	22
<b>3 OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ .....</b>	<b>23</b>
3.1    Mechanismus opotřebení .....	23
3.2    Typy opotřebení .....	24
3.3    Experimentální metody ke zjištění opotřebení nástroje.....	25
3.3.1    Kritéria opotřebení.....	26
3.3.2    Měření a vyhodnocování sil.....	27
3.3.3    Měření drsnosti povrchu.....	27
<b>4 VÝKONNOSTNÍ CHARAKTERISTIKA.....</b>	<b>29</b>
<b>5 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ.....</b>	<b>32</b>
5.1    Obráběcí stroj.....	33
5.2    Obráběný materiál.....	34
5.3    Frézovací nástroj.....	34

---

5.4	Volba vyměnitelných břitových destiček.....	35
5.4.1	Dormer Pramet s.r.o.....	35
5.4.2	Seco Tools CZ s.r.o.....	35
5.4.3	Iscar Ltd. ....	36
5.4.4	Korloy Inc. ....	36
5.5	Použité přístrojové vybavení .....	37
5.5.1	Optické měřidlo Alicona InfiniteFocus .....	37
5.5.2	Dotykové měřidlo Hommel Tester T500 .....	38
5.6	Volba řezných podmínek.....	39
5.7	Teoretický výpočet řezných sil při čelním frézování .....	40
5.7.1	Teoretický výpočet řezné síly dle odborné literatury .....	40
5.7.2	Teoretický výpočet sil dle metodiky firmy Walter .....	40
5.8	Teoretický výpočet řezného momentu a výkonu .....	41
6	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....	43
6.1	Analýza řezných sil na čase a průběhu opotřebení nástroje .....	43
6.1.1	Pramet.....	44
6.1.2	Seco .....	45
6.1.3	Iscar .....	47
6.1.4	Korloy .....	48
6.2	Opotřebení testovaných řezných nástroj .....	51
6.2.1	Pramet.....	51
6.2.2	Seco .....	53
6.2.3	Iscar .....	55
6.2.4	Korloy .....	57
6.3	Vyhodnocení destiček na maximální kroutcí moment a výkon ....	60
ZÁVĚR .....		64
Seznam použitých zdrojů .....		66
Seznam použitých symbolů a zkratk .....		69
Seznam příloh .....		71

---

## ÚVOD

Frézování patří mezi základní technologie třískového obrábění. Požadována je vysoká produktivita s přesnými výsledky práce. K dosažení těchto výsledků nám pomáhá velký výběr nástrojů. V každém průmyslovém podniku, kde jsou nástroje využívány, by se mělo dbát na správnou volbu nástrojů. Důležité je také snižování nákladů. Je několik možností, jak toho docílit. Jednou z cest, jak docílit snížení nákladů, je správný výběr dodavatele. Vybrat drahého tuzemského dodavatele, nebo vybrat nástroje ze zahraničních e-shopů, které jsou často daleko levnější. Volba správného řezného nástroje v kombinaci s vhodnými řeznými podmínkami by měla mít za následek snížení nákladů a zvýšení produktivity.

Prvním rozřazovacím parametrem u nástroje je materiál. Na trhu je velký sortiment řezných nástrojů z nejrůznějších materiálů. Vyrobeny jsou z rychlořezných ocelí, slinutého karbidu, cermetů, řezné keramiky nebo super tvrdých materiálů. Přibližovat se ideálnímu řeznému nástroji je trend v oblasti vývoje nástrojů. Každý řezný materiál je určen pro jinou oblast použití. Není možné vytvořit nástroj, který by byl univerzální a vhodný pro všechny aplikace. Ideální nástroj by měl být velmi houževnatý a zároveň dostatečně tvrdý. Bohužel tyto protichůdné vlastnosti se těžce kombinují. Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu vyměnitelných břitových destiček je slinutý karbid a rychlořezná ocel.

V současnosti jsou neustále vyvíjeny nové druhy obráběných materiálů, které jsou často hůře obrobitelné. Z toho důvodu dochází ke zvyšování nároků na řezné materiály a jejich řezné vlastnosti. Zvýšení efektivity nástrojů lze docílit pomocí nanášení tvrdých otěruvzdorných vrstev neboli povlakování. Povlak dodá nástroji výborné mechanické vlastnosti a prodlouží životnost nástroje. Povlakování představuje velký technický i ekonomický přínos.

Důležité při výběru nástroje je vybrat správnou geometrii, způsob upínání nebo také tvar vyměnitelné břitové destičky. Základem je ale zvolit si vhodné řezné podmínky. Volba řezných podmínek má vliv na celkové silové zatížení obráběcí soustavy. Dochází nejen k mechanickému zatěžování soustavy, ale také tepelnému zatěžování mezi obrobkem a nástrojem. Analýzou silového zatížení získáme cenné informace o řezném procesu. Tyto informace jsou využity pro zlepšení konstrukce nástroje, utvařeče třísky nebo pro zvýšení životnosti a trvanlivosti nástroje. Analýzu silového zatížení je možné provádět pomocí simulací v příslušných softwarech, experimentálního měření nebo pomocí výpočtů. Experimentálně měřit se dá přímo za pomoci dynamometrů nebo nepřímo měřením výkonu na vřetenu stroje. Dalšími vyhodnocovanými veličinami jsou drsnost povrchu obrobku a opotřebení řezného nástroje.

Tato diplomová práce obsahuje teoretický rozbor volby frézovacího nástroje. Rozebírá a popisuje typy a mechanismy opotřebení vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů. V experimentální části se zabývá analýzou silového zatížení vyměnitelných břitových destiček při čelním frézování. Výsledné opotřebení nástroje bylo porovnáno a došlo ke zhodnocení kvality obrobeného povrchu.

# 1 ROZBOR, CHARAKTERISTIKA A POPIS TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ

Technologie obrábění je operace, při které břitem řezného nástroje dochází k oddělování částic materiálu z povrchu obrobku. Frézování je metoda technologického obrábění, kde břity rotujícího nástroje odebírají materiál obrobku. Posuv nejčastěji koná obrobek, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. Posuvové pohyby jsou u moderních frézovacích strojů plynule měnitelné a jsou realizovány ve všech směrech (víceosé CNC frézky, obráběcí centra). Proces je definován jako řezání. Částice materiálu jsou v řezném procesu odebírány ve formě třísek. Tento typ třísek je způsoben přerušovaným řezným procesem. Každý zub frézy odebírá třísku jen pro určitý čas při řezném procesu. Krátké třísky vznikající při frézování mají proměnnou tloušťku [1].

## 1.1 Technologie frézování

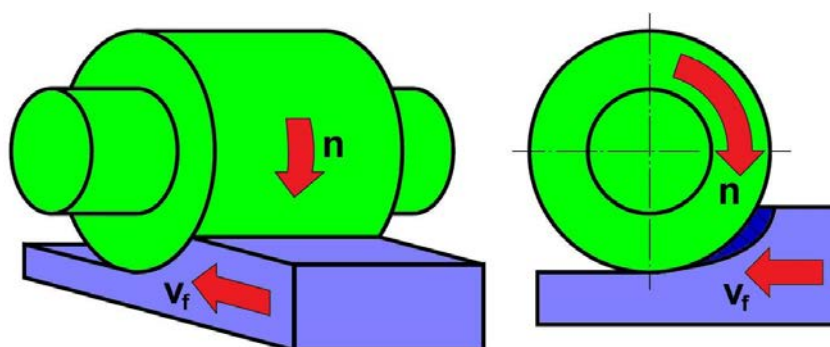
Podle polohy osy nástroje vůči obráběné ploše je určeno hlavní rozdělení technologie frézování. V závislosti na nástroji se rozlišuje frézování čelem nástroje (čelní) a frézování obvodem (válcové). Od těchto metod se odvíjejí další způsoby jako frézování planetové či okružní. Při práci s válcovými a tvarovými frézami se uplatňuje válcové frézování [1, 2].

### 1.1.1 Válcové frézování

Obráběcí proces je zajištěn břity, které jsou po obvodu nástroje. Osa otáčení frézy je rovnoběžná s obrobenou plochou. Kolmo na osu frézy a směr posuvu se nastavuje hloubka odebírané vrstvy. V závislosti na otáčení frézy a směru posuvu se frézování rozděluje na sousledné (souměrné) a nesousledné (protisměrné) [1, 3].

#### A) Sousledné frézování

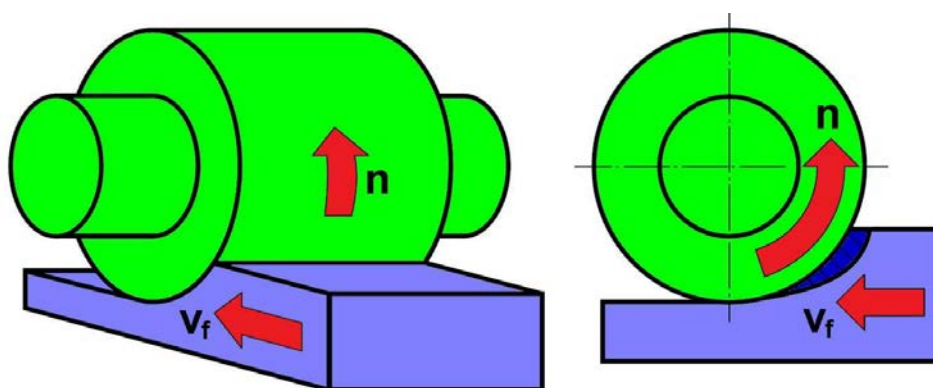
V případě sousledného frézování nástroj rotuje ve směru posuvu obrobku, (viz obr. 1.1). Obrobená plocha vzniká při výjezdu nástroje z obrobku. Při vnikání zubu frézy do obrobku je tloušťka třísky maximální, naopak při konci procesu tloušťka třísky klesá. Působením řezných sil, které směřují do stolu frézky, je obrobek přitlačován ke stolu frézky. Sousledné frézování vyžaduje tuhé obráběcí stroje s vymezenou vůlí. V případě velké vůle vzniká nestejnsměrný posuv a zvětšení tloušťky třísky. Může dojít až ke zničení stroje. Výhodami sousledného frézování jsou nižší potřebný řezný výkon, menší sklon ke kmitání a menší sklon ke tvorbě nárůstků [2, 3].



Obr. 1.1 Válcové sousledné frézování - podle [3].

## B) Nesousledné frézování

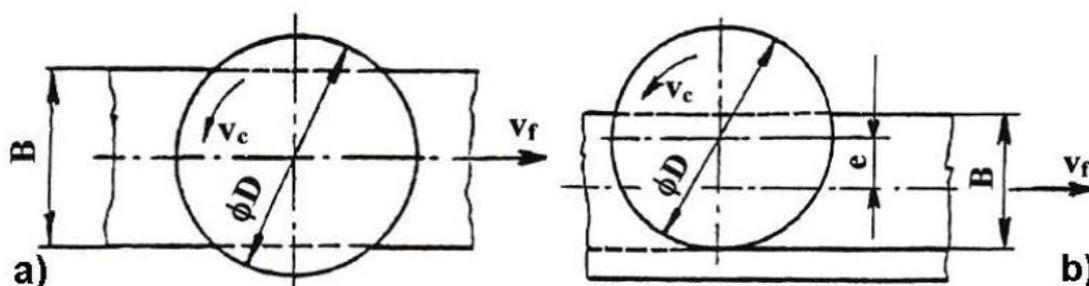
V případě nesousledného frézování nástroj rotuje proti směru posuvu obrobku (viz obr. 1.2). Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Tloušťka třísky se mění z minimální do maximální hodnoty. K oddělování třísky dochází po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem. Ke zvýšení opotřebení břitu dochází z důvodu vzniklých silových účinků a deformací. V momentě, kdy břit vchází do záběru u nesousledného frézování, vznikají velké řezné síly. Mezi obrobkem a frézou působí velký tlak a břit je odtlačován ze záběru. Řezné síly působící nahoru mají snahu vytrhávat obrobek z upnutí. Další výhodou nesousledného frézování je menší opotřebení stroje. Trvanlivost nástroje nezávisí na povrchu obrobku a počáteční záběr zubů nezávisí na hloubce řezu [2, 3].



Obr. 1.2 Válcové nesousledné frézování - podle [3].

### 1.1.2 Čelní frézování

Čelní fréza má břity vytvořeny na obvodu i čele nástroje. Osa nástroje je kolmá na obráběný povrch. Materiál je odebrán jak břity na obvodu, tak břity na čelní ploše nástroje. Jedná se o výkonnější způsob frézování, protože při něm zabírá více zubů současně a volí se rychlejší posuvy obrobku. V případě, kdy osa frézy prochází středem frézované plochy, máme tzv. symetrické frézování. Když je osa vychýlena mimo střed frézované plochy, jedná se o frézování nesymetrické. Oba způsoby jsou vyobrazeny na obr. 1.3 [2, 3].



Obr. 1.3 Čelní frézování a) symetrické, b) nesymetrické [3].

### 1.1.3 Okružní frézování

Tento způsob frézování je vhodný při výrobě závitů a obrábění dlouhých válcových tyčí. Frézovací hlava je osazena několika noži. Okružní frézování je rozděleno na vnější a vnitřní [4].

### 1.1.4 Planetové frézování

Planetové frézování je používáno u obráběcích center a číslicově řízených strojů, které umožňují dráhu nástroje po kružnici (kruhovou interpolaci) [4].

## 1.2 Řezné parametry

Volba vhodných řezných podmínek hraje důležitou roli při obrábění a je ovlivněna mnoha faktory. Druh prováděné práce (hrubování, dokončování apod.), materiál obrobku, typ a vlastnosti stroje a nástroje, ale hlavně požadavky na výslednou jakost povrchu obrobek plochy ovlivní výběr řezných podmínek. Mezi základní řezné parametry se řadí řezná rychlost  $v_c$ , posuv na zub  $f_z$ , šířka hlavního ostří  $a_p$ , nebo ne často předepsaná posuvová rychlost  $v_f$  [1, 2].

Hlavní pohyb koná při frézování nástroj (fréza) (viz obr. 1.1 a obr. 1.2). Jde o pohyb definovaný řeznou rychlostí, kterou lze vypočítat dle vztahu (1.1) [3].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \quad (1.1)$$

kde:  $v_c$  [m·min<sup>-1</sup>] - řezná rychlost  
 $D$  [mm] - průměr frézy  
 $n$  [min<sup>-1</sup>] - otáčky frézy

Vedlejší pohyb neboli posuv, který je většinou přímočarý, koná obrobek. Posuv je možné vyjádřit jako dráhu, kterou urazí obrobek za dobu jedné otáčky frézy  $f_n$ , (viz vztah 1.2). Dále je možné posuv vyjádřit také jako dráhu, kterou urazí obrobek po dobu záběru jednoho zubu  $f_z$  a následně použít ve vzorci pro posuvovou rychlost  $v_f$  dle vztahu (1.3) [1, 3].

$$f_n = f_z \cdot z \quad (1.2)$$

kde:  $f_n$  [mm] - posuv na otáčku  
 $f_z$  [mm] - posuv na zub  
 $z$  [-] - počet zubů nástroje

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad (1.3)$$

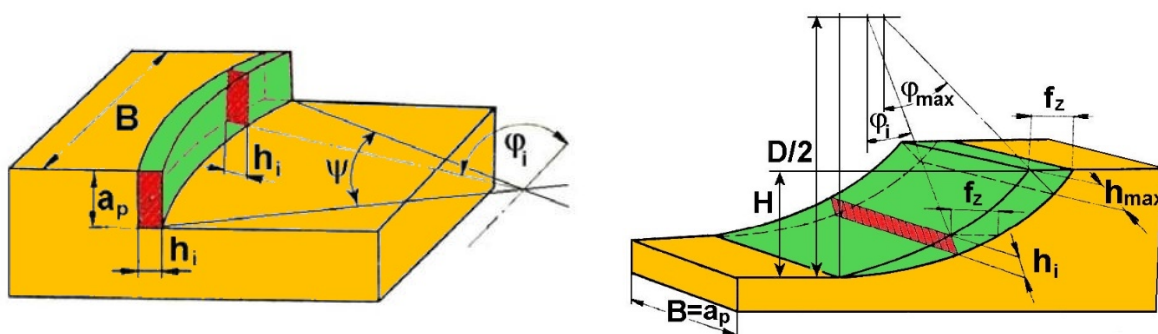
kde:  $v_f$  [mm·min<sup>-1</sup>] - posuvová rychlost  
 $n$  [min<sup>-1</sup>] - otáčky frézy

Rychlost řezného pohybu  $v_e$  [m·min<sup>-1</sup>] se vyjadřuje vztahem (1.4) [2,3].

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad (1.4)$$

### 1.3 Velikost třísky při frézování

Jednou z hodnot určující velikost průřezu třísky, a tedy i objem odebíraného materiálu, je šířka záběru hlavního ostří  $a_p$ . Radiální hodnota nastavení frézy se nachází u válcového frézování. V případě rovinného čelního frézování, je to axiální hodnota nastavení frézy. Tloušťka odřezávaného materiálu  $h_i$ , je další hodnotou definující průřez třísky. Jmenovitý průřez třísky při válcovém frézování lze vypočítat z hodnot šířky záběru hlavního ostří a tloušťky odřezávaného materiálu dle vztahu (1.5). Jmenovitý průřez třískou je naznačen na obr. 1.4 [1, 3].



Obr. 1.4 Průřez třísky při čelním frézování (vlevo) a válcovém frézování (vpravo) - podle [3].

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (1.5)$$

kde:  $A_{Di}$  [mm<sup>2</sup>] - jmenovitý průřez třísky  
 $a_p$  [mm] - šířka záběru hlavního ostří  
 $\varphi_i$  [°] - úhel záběru zubu

Další uvedené vztahy popisují vznik třísky u čelního frézování. Stejně jako u válcového frézování se tloušťka odřezávané třísky mění s úhlem posuvového pohybu. Vzorec je rozšířen o úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$ , který je použit ve vztahu (1.6) [3].

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \quad (1.6)$$

kde:  $h_i$  [mm] - tloušťka odřezávané třísky  
 $\kappa_r$  [°] - úhel nastavení hlavního ostří

Jmenovitá šířka třísky  $b_i$  [mm] je konstantní pro všechny polohy  $\varphi_i$  a spočítá se pomocí vztahu (1.7) [1, 2]

$$b_i = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (1.7)$$

Jmenovitý průřez třísky  $A_{Di}$  je pro všechny polohy  $\varphi_i$  a  $\kappa_r = 90^\circ$  definován vztahem (1.8) [1, 2].

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (1.8)$$

## 1.4 Síly při frézování

Pro oddělení vrstvy materiálu je i u moderních strojů potřeba vyvinout značnou řeznou sílu. Určování řezných sil při frézování je daleko těžší než třeba u soustružení. V případě soustružení je v záběru pouze jeden břit a průřez třísky je konstantní. Během procesu frézování se mění průřez třísky i počet zubů v záběru. Výsledný směr a velikost řezné síly ovlivňují další faktory. Například postup způsobu frézování, materiál obrobku, poloha nástroje, geometrie břitu, řezné podmínky, velikost a typ opotřebení břitu nástroje a tloušťka třísky [3, 6, 7].

Při procesu frézování vznikají řezné síly na břitu nástroje při odebírání materiálu obrobku. Největší síly vznikají na ostří břitu a postupně směrem od něj se zmenšují. Celková řezná síla se skládá z tangenciální složky řezné síly  $F_c$ , axiální složky řezné síly  $F_p$  a normálové složky řezné síly  $F_{cn}$ . Největší vliv na výpočet příkonu stroje má tangenciální složka řezné síly. Tato síla působí ve směru otáčení nástroje a vykonává práci na odřezání třísky. Na upínací prvky frézky působí axiální a normálové složky řezné síly [6,7].

### 1.4.1 Měrná řezná síla

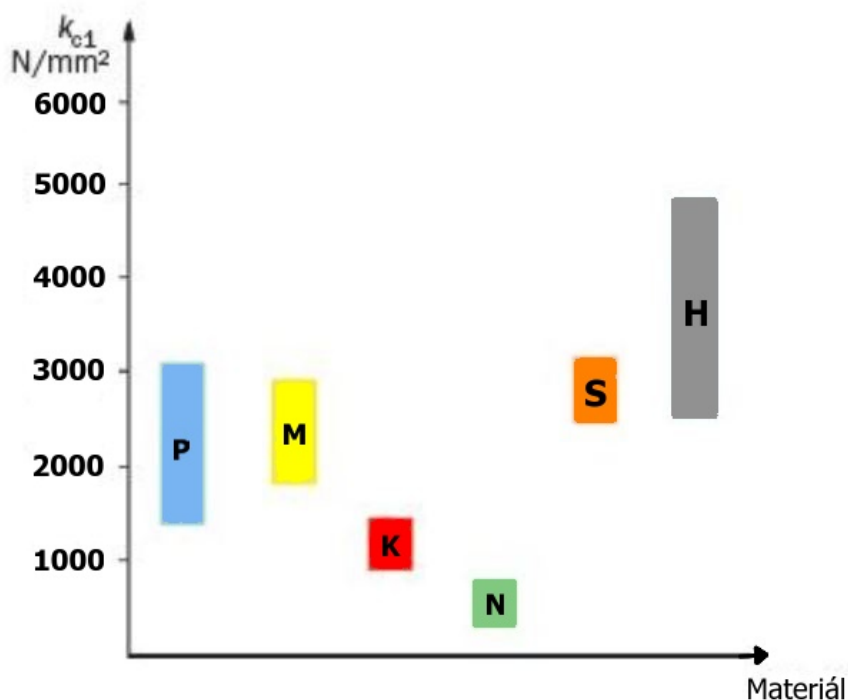
Pokud je dána konkrétní geometrie břitu nástroje a tloušťka třísky, hodnotí se obrobitelnost určitých materiálů měrnou řeznou silou označovanou jako  $k_c$ . Jedná se o složku řezné síly. Zjednodušený výpočet měrné řezné síly lze provést dle vztahu (1.9) [6, 7].

$$k_c = \frac{F_c}{A} \quad (1.9)$$

kde:  $k_c$  [MPa] - měrná řezná síla  
 $F_c$  [N] - složka řezné síly  
 $A$  [mm<sup>2</sup>] - plocha průřezu třísky

Pro určité materiály je určena hodnota měrné řezné síly v tabulkách. Tato hodnota se může měnit v závislosti na střední tloušťce třísky, úhlu čela a řezné rychlosti. Pro tyto parametry řezného procesu byly vypočteny korekční faktory. S narůstající tloušťkou třísky klesá měrná řezná síla [6, 7].

Pro hladký průběh obráběcího procesu je velmi důležitý poměr mezi řeznou silou a tloušťkou třísky. Měrná řezná síla bude dosahovat vysokých hodnot v případě odebírání velmi malé třísky z obrobku. Přibližná hodnota měrných řezných sil pro odlišné materiály je zobrazena na obr. 1.5 [6, 7].

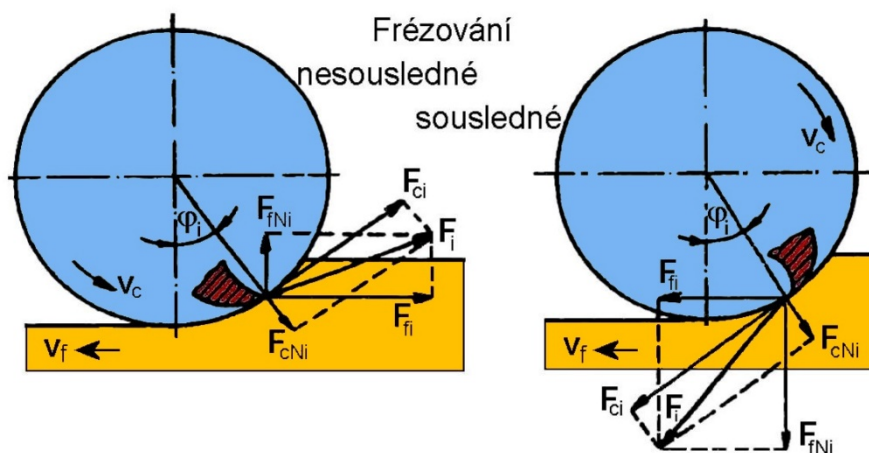


P – oceli (uhlíkové, nízkolegované, vysokolegované), M – korozivzdorné oceli  
 K – litiny, N – neželezné kovy na bázi hliníku, hořčíku nebo mědi, plasty, kompozity,  
 S – slitiny titanu, žárovevné slitiny na bázi niklu, kobaltu nebo železa, H – tvrzené oceli  
 a litiny

Obr. 1.5 Měrné řezné síly  $k_{c1}$  pro materiály obráběné VBD s úhlem čela  $0^\circ$  - podle [8].

### 1.4.2 Výpočet řezných sil

Při frézování dochází působením řezné části nástroje na obráběnou plochu ke vzniku celkové řezné síly  $F_i$ . Tato síla působící na břitu se pro frézování válcovou frézou s přímými zuby rozkládá do složek  $F_{ci}$ ,  $F_{cNi}$  a  $F_{fi}$  a  $F_{fNi}$ , lze vidět na obr. 1.6. Při určování řezných sil se uvažují silové poměry působící na jednom břitu nástroje, který je v určité poloze  $\varphi_i$  [1, 3, 6].



$F_i$  – celková řezná síla,  $F_{ci}$  – řezná síla,  $F_{cNi}$  – kolmá řezná síla,  
 $F_{fi}$  – posuvová síla,  $F_{fNi}$  – kolmá posuvová síla

Obr. 1.6 Řezné síly na zubu válcové frézy – podle [3].

Řezná síla  $F_{ci}$  se určí na základě měrné řezné síly  $k_{ci}$  a průřezu třísky  $A_{Di}$  dle vztahu (1.10), který vznikl vložení vzorce (1.8) do (1.9) [1, 2].

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [N] \quad (1.10)$$

### A) Výpočet měrné řezné síly dle odborné literatury

Měrná řezná síla  $k_{ci}$  se pro válcové frézování určí dle vztahu (1.11) [1, 2].

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad (1.11)$$

kde:  $k_{ci}$  [MPa] - měrná řezná síla  
 $C_{Fc}$  [-] - konstanta vlivu obráběného materiálu  
 $x$  [-] - exponent vlivu tloušťky třísky

Pro čelní frézování se řezná síla  $F_{ci}$  vyjádří analogickým postupem jako u válcového frézování a měrná řezná síla se určí dle vztahu (1.12) [1, 2].

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r)^{1-x}} \quad (1.12)$$

kde:  $\kappa_r$  [°] - nástrojový úhel nastavení hlavního ostří

### B) Výpočet měrné řezné síly dle metodiky firmy Walter

Pro stanovení měrné řezné síly pomocí vztahů dle metodiky firmy Walter (výpočtový list viz příloha 1), je nezbytné vypočítat střední tloušťku třísky  $h_m$  pro každý z uvedených úběrů dle vztahu (1.13) [9].

$$h_m = \frac{114,7 \cdot f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \frac{a_e}{D}}{\varphi_i} \quad [mm] \quad (1.13)$$

kde:  $h_m$  [mm] - střední tloušťka třísky  
 $a_e$  [mm] - šířka řezu  
 $D$  [-] - průměr frézy  
 $\varphi_i$  [°] - úhel záběru

Pro výpočet měrné řezné síly  $k_c$  se použije výpočet (1.14), kde koeficienty  $k_{c1.1}$  a  $m_c$  vycházejí z technické příručky Walter. Specifickou řeznou sílu ( $k_{c1.1}$ ) lze definovat jako sílu ve směru hlavního řezného pohybu vztaženou na průřez  $1 \text{ mm}^2$  [9].

$$k_c = \frac{1 - (0,01 \cdot \gamma_0)}{h_m^{m_c}} \cdot k_{c1.1} \quad [N \cdot mm^2] \quad (1.14)$$

kde:  $\gamma_0$  [°] - ortogonální úhel čela  
 $m_c$  [-] - nárůst křivky  $k_c$   
 $k_{c1.1}$  [ $N \cdot mm^{-2}$ ] - specifická řezná síla

Dosazením vztahu (1.11) do (1.10) a následnou úpravou bude vztah pro řeznou sílu  $F_{ci}$  při válcovém frézování ve tvaru (1.15) [1].

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \text{ [N]} \quad (1.15)$$

Dosazením vztahu (1.12) do (1.10) a následnou úpravou bude vztah pro řeznou sílu  $F_{ci}$  při čelním frézování ve tvaru (1.16) [2].

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sin^x \varphi_i \text{ [N]} \quad (1.16)$$

Vztahy (1.15) až (1.16) jsou platné u frézování v případě, že je v záběru pouze jeden zub. Při reálném frézování je výsledná řezná síla závislá na více parametrech, protože v záběru je více zubů frézy. Těmito parametry jsou počet zubů frézy v záběru a okamžitá poloha zubů frézy. Zub je vzhledem k obrobku pod úhlem  $\varphi_i$  [1, 3].

Pro stanovení počtu zubů, které jsou v záběru  $n_z$ , se vychází z rovnice (1.17) [1].

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{360} \cdot z \quad (1.17)$$

kde:  $n_z$  [-] - počet zubů frézy v současném záběru  
 $\varphi_{max}$  [°] - maximální úhel posuvového pohybu  
 $z$  [-] - počet zubů frézy

Celková řezná síla  $F_c$  se pro válcové frézování určí ze vztahu (1.18) [1, 3].

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \text{ [N]} \quad (1.18)$$

Celková řezná síla  $F_c$  se pro čelní frézování určí ze vztahu (1.19) [1, 2].

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \text{ [N]} \quad (1.19)$$

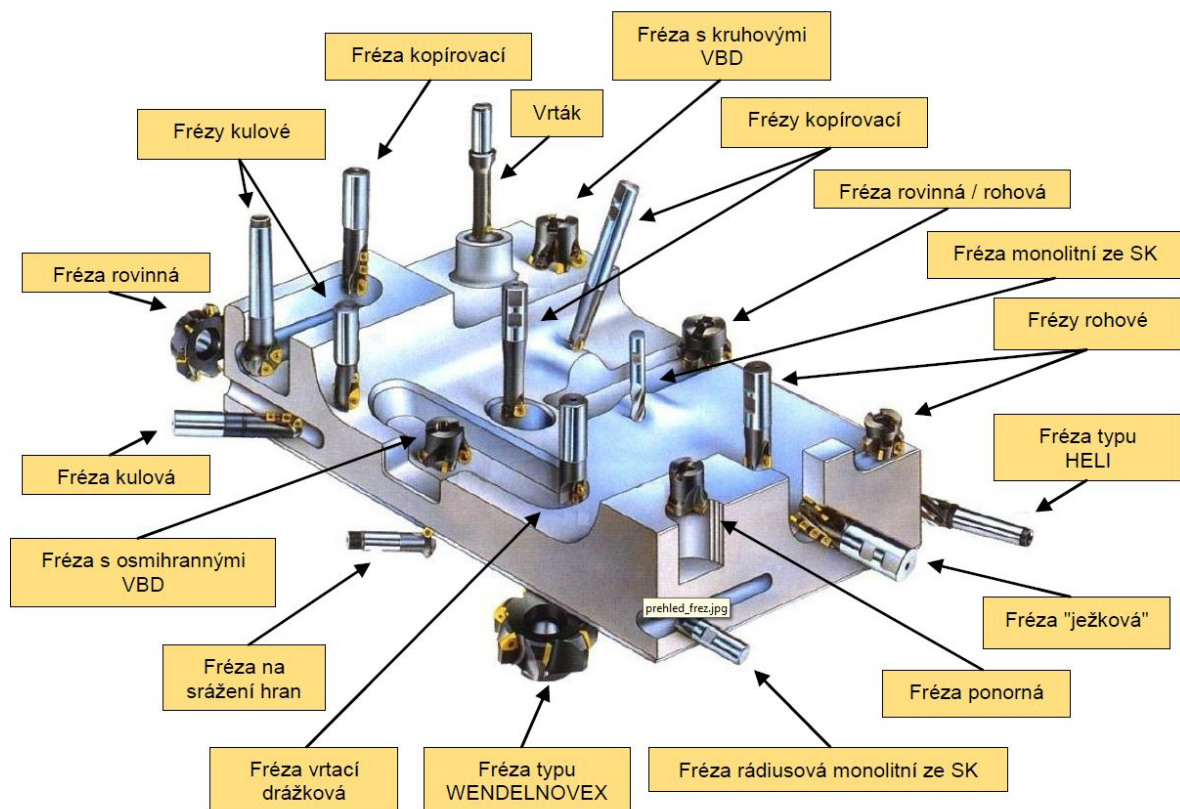
V případě že je znám úhel působení celkové řezné síly  $F_c$ , je možné dopočítat složky této síly. Častěji jsou však tyto složky určovány z empiricky získaných výrazů. Tyto výrazy jsou vztaheny k velikosti síly  $F_c$  [1, 2].

- $F_{cN} = (0,60 \div 0,80) F_c$
- $F_f = (1,00 \div 1,20) F_c$  – pro nesousledné frézování
- $F_f = (0,80 \div 0,90) F_c$  – pro sousledné frézování
- $F_{fN} = (0,75 \div 0,80) F_c$  – pro sousledné frézování
- $F_{fN} = (0,20 \div 0,30) F_c$  – pro nesousledné frézování

## 1.5 Používané nástroje při frézování

Nástroje (frézy) používané pro frézování, jsou v současné době i několikabřité a rozdělují se na mnoho druhů (obr. 1.7). Z technologického hlediska lze frézy dělit podle [3]:

- umístění zubů na tělese frézy – frézy válcové, čelní, čelní válcové,
- směru zubů vzhledem k ose rotace nástroje – frézy se zuby přímými, ve šroubovici,
- počtu zubů vzhledem k průměru frézy – jemnozubé, polohrubozubé, hrubozubé,
- provedení zubů – frézy se zuby frézovanými, podsoustruženými,
- nástrojového materiálu zubů – frézy z rychlořezné oceli, SK, cermetů, řezné keramiky, CBN, PCD,
- konstrukčního uspořádání – frézy celistvé, s vyměnitelnými břitovými destičkami, s vloženými noži,
- geometrického tvaru funkční části - např. frézy válcové, kotoučové, úhlové, drážkovací, kopírovací, rádiusové, na výrobu ozubení atd.,
- smyslu otáčení při pohledu od vřetena frézky – frézy pravořezné, levořezné,
- způsobu upnutí – frézy nástrčné, stopkové.



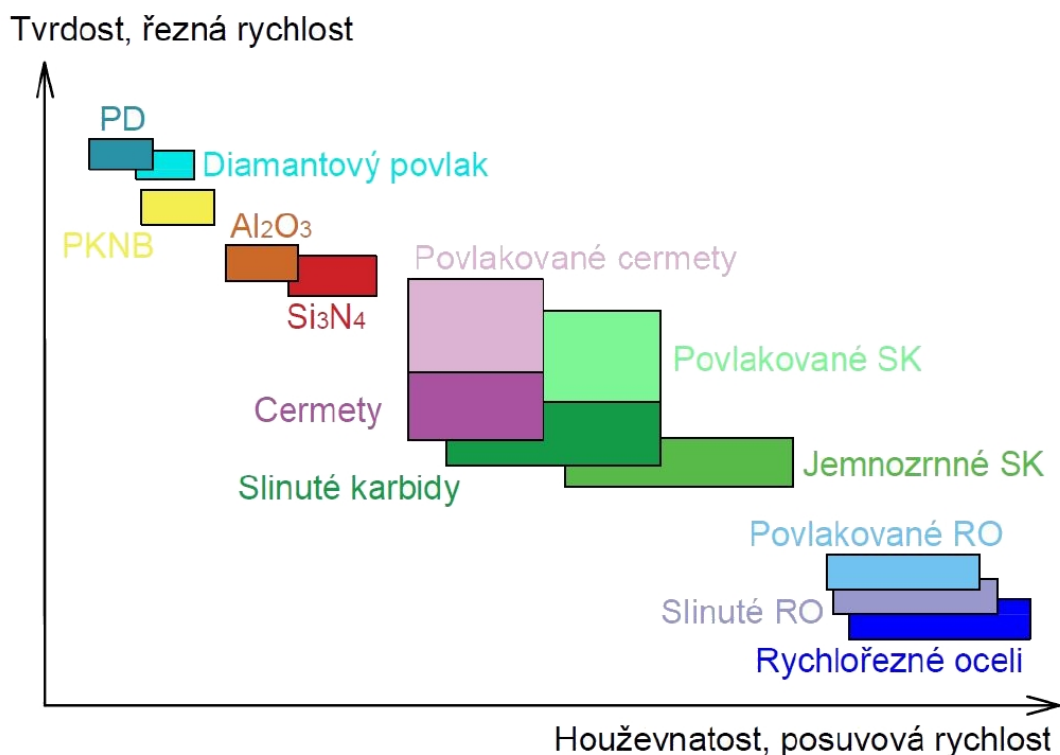
Obr. 1.7 Druhy nástrojů firmy Walter [3].

## 2 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

Důsledkem celosvětového dlouholetého a intenzivního výzkumu a vývoje v oblasti řezných materiálů je sortiment materiálů poměrně široký. Vývoj v dané oblasti úzce souvisí s rozvojem konstrukčních materiálů vhodných pro obrábění. Požadavky (viz tab. 2.1), které by měl řezný materiál splňovat, se liší s jeho použitím. Důležité je při výběru řezného materiálu zvolit vhodnou kombinaci houževnatosti (pevnosti v ohybu) a tvrdosti (odolnosti vůči opotřebení). Představitelé nástrojových materiálů pro strojní obrábění lze vidět na obr. 2.1 [3,11,12].

Tab. 2.1 Hlavní požadavky na vlastnosti řezných materiálů [13,14].

Vlastnost	Popis
<b>Tvrdost</b>	- řezný materiál musí být min. o 5 HRC tvrdší než obráběný
<b>Houževnatost</b>	- zabraňuje lámání a tvorbě trhlin, zvyšuje odolnost vůči adhezivnímu opotřebení
<b>Tepelná odolnost</b>	- schopnost zachovat fyzikální vlastnosti i za vysokých teplot, po delší časový úsek
<b>Chemická odolnost</b>	- schopnost odolat difuzním a oxidačním procesům
<b>Nepřilnavost k obrobku</b>	- odolnost proti adhezivnímu opotřebení
<b>Tepelná tvrdost</b>	- zachování tvrdosti při zvýšených teplotách
<b>Odolnost vůči opotřebení</b>	- vyšší trvanlivost nástroje
<b>Odolnost vůči deformaci</b>	- snížení rizika vzniku trhlin a lomů
<b>Vyrobitelnost</b>	- jednoduchost výroby při zachování kvality nástroje
<b>Náklady</b>	- cena nástroje posuzovaná k jeho výkonu a jakosti obrábění



Obr. 2.1 Oblast použití nástrojových materiálů [11].

## 2.1 Rychlořezné oceli

Nejvyšší houževnatost mají rychlořezné oceli (RO), ale tvrdost je ve srovnání s ostatními materiály poměrně nízká. Z tohoto důvodu jsou z nich vyráběny nástroje určené pro obrábění nízkými řeznými rychlostmi. Vysokolegované rychlořezné oceli zpravidla obsahují méně než 1 % uhlíku. Dále obsahují karbidotvorné prvky jako chrom Cr, wolfram W, molybden Mo, vanad V a nekarbidotvorný kobalt Co. Tvrdost je dána přítomností karbidů a zakalením martenzitu. Řezná rychlost použitelná pro tyto nástroje je v rozmezí 25 až 50 m·min<sup>-1</sup> a nástroje snášejí teplotu v rozmezí 500 až 700 °C. Rychlořezné oceli se běžně vyrábějí tavením. Výsledkem výroby práškovou metalurgií se získají oceli s vyšším obsahem legur, jemnější strukturou a rovnoměrným rozložením karbidů a nekovových vměstků. Vysoký obsah legujících prvků zvyšuje prokalitelnost a snižuje potřebnou ochlazovací rychlost při kalení. Dochází k menšímu riziku vzniku deformací. Ke zvýšení životnosti a produktivity obrábění se rychlořezné oceli v dnešní době opatřují ochrannými povlaky [12,15,16].

## 2.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy (SK) jsou vyráběny práškovou metalurgií z různých tvrdých částic karbidů a kovového pojiva. Ve většině případů se jako pojivo používá kobalt Co. Mezi nejpoužívanější karbidové částice patří karbid titanu TiC, karbid niobu NbC, karbid tantalu TaC, karbid chromu CrC, karbid wolframu WC atd. Slinuté karbidy jsou směsí dvou a více fází, které není možné dále tepelně zpracovávat. Na množství jednotlivých fází je závislá odolnost proti otěru, tvrdost nástroje a houževnatost. Slinuté karbidy mohou být použity pro obrábění vysokými posuvovými rychlostmi a pro těžké přerušované řezy, protože patří mezi nejpevnější tvrdé nástrojové materiály. Z důvodu své nízké termochemické stability nemohou být použity pro vysoké řezné rychlosti [7,13,17].

### 2.2.1 Stručná historie slinutých karbidů

Vývoj slinutých karbidů se datuje k roku 1897. V tomto roce byla vyvinuta elektrická oblouková pec, a tak bylo možné vyvinout dostatečně vysokou teplotu pro výrobu tvrdých materiálů. Cílem tehdejších inženýrů, bylo vyrobit umělý diamant. Bohužel jejich znalosti byli nedostačující. Výroba umělého diamantu byla neúspěšná, ale podařilo se získat karbid wolframu, který vykazoval vysokou tvrdost a měl vlastnosti podobající se kovům [17,18].

Karbidy wolframu jsou v podstatě dva typy, a to WC a W<sub>2</sub>C. Tyto karbidy spolu mohou vytvořit eutektickou slitinu a mají vysokou tvrdost. V minulosti se snažili tuto slitinu odlévat a brousit do požadovaného tvaru, ale odlitky měly hrubozrnnou strukturu s mnoha defekty. Často docházelo k porušení nástroje. Po zjištění, že výborné řezné vlastnosti rychlořezných ocelí jsou dány částicemi WC v kovové matici, byl vyroben řezný materiál z čistého karbidu wolframu. Výsledný materiál byl ale pro nástroje příliš křehký [17,18].

Začátkem roku 1900 se podařilo vyrobit žhavicí vlákno žárovky z wolframového prášku. Začal rozvoj práškové metalurgie, která vyřešila problémy výroby řezných materiálů na bázi WC. Následně se zjistilo, že je nejvýhodnější smíchat tento karbid s pojivem – kobaltem. Následující slinuté karbidy dosahovaly velmi dobrých výsledků při obrábění litin a neželezných kovů. Při obrábění oceli u nich docházelo k rychlému vzniku výmolu na čele. Výsledná trvanlivost byla velmi nízká. Výrobci se z tohoto důvodu zaměřili na karbidy TiC, TaC a NbC, které ve složení doplňoval již zmíněný WC. Postupem času se složení slinutých karbidů měnilo. Na trhu přibývaly nové materiály, a především se snižovala velikost karbidických zrn, s cílem dosáhnout jemnozrnné karbidy s vyšší pevností [13,18,19].

## 2.2.2 Rozdělení a značení nepovlakovaných slinutých karbidů

Norma ČSN ISO 513 označuje současné nepovlakované slinuté karbidy pro řezné aplikace podle jejich zrnitosti symboly HW, HT a HC. Podle užití se dále rozdělují do šesti skupin – P, M, K, N, S, H (viz tab. 2.2). Každá z těchto skupin se dále dělí na podskupiny, vyjadřující houževnatost a odolnost vůči otěru, označované (P10, P30, K11, M20). S rostoucím číslem podskupiny roste houževnatost a pevnost v ohybu, zvyšuje se obsah pojícího kovu, klesá tvrdost a na ní závislá odolnost proti opotřebení. Z hlediska řezných podmínek klesá řezná rychlost a roste rychlost posuvu a průřez třísky [18,20].

Tab. 2.2 Rozdělení slinutých karbidů [14].

Skupiny	Definice skupiny	Příklad (ČSN)
P	Oceli a ocelolitiny s dobrou obrobitelností, automatové a nízkouhlíkové oceli.	11 109
	Nelegované a nízkolegované ocelolitiny se středním obsahem uhlíku, s pevností do 900 MPa (160 až 255 HB).	12 050
	Hůře obrobitelné nelegované a nízkolegované ocelolitiny a oceli se středním obsahem uhlíku s pevností do 1000 MPa a tvrdosti do 300 HB.	15 340
	Středně až vysoce legované ocelolitiny a oceli	19 436
M	Feritické korozivzdorné oceli.	17 041
	Martenzitické korozivzdorné oceli.	17 042
	Austenitické korozivzdorné oceli.	17 247
	Feriticko-austenitické a super austenitické oceli.	17 465
K	Šedé litiny.	42 2425
	Temperované litiny.	42 2545
	Tvárné litiny feritické a feriticko-perlitické.	42 2304
	Tvárné litiny perliticko-feritické, -sorbitické a perlitické.	42 2307
N	Hliník a jeho měkké slitiny Al, zejména tvářené a lité (nevytvrzené), tvrdost do 100 HB.	42 4400
	Tvrdé slitiny Al, zejména lité vytvrzené.	42 4660
	Měkké slitiny, Cu automatová mosaz a ostatní měkké mosazi a bronzy.	42 3135
	Hůře obrobitelné a tvrdé slitiny Cu.	42 3145
S	Technicky čistý Ti, slitiny zušlechtěné a stárnuté.	TiAl6V4
	Slitiny na bázi Fe.	INCOLOY 800
	Slitiny na bázi Ni.	INCONEL 718
	Slitiny na bázi Co.	Haynes 25
H	Vysoce pevné a tvrdé nástrojové oceli, kalené a zušlechtěné oceli o tvrdosti 40 až 50 HRC.	19 854
	Tvrzená a bílá litina 350 až 600 HV.	42 2483
	Kalené a zušlechtěné oceli o tvrdosti 50 až 55 HRC.	19 552.4
	Kalené a zušlechtěné oceli, tvrdosti nad 55 HRC.	19 436.4

Skupina **P** je určena pro obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku, například uhlíkové a slitinové oceli. Řezný proces je doprovázen vysokými řeznými silami a značným opotřebením na čele. Difuze za vysokých teplot v místě styku nástroje s odcházející třískou je jednou z hlavních příčin vzniku výmolu na čele. Projevy difuzního opotřebením se zmírní přidáním velkého množství TiC. Zároveň se zvyšuje odolnost proti vymílání na čele. Ve srovnání s WC má TiC vyšší tvrdost za vysokých teplot, ale nižší odolnost proti abrazi a vyšší křehkost [17,18,21].

Skupina **M** má velké množství různých karbidů. Je určena pro obrábění materiálů tvořících dlouhou a střední třísku. Tyto materiály jsou například lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny. Slinuté karbidy z této skupiny se dají použít i pro obrábění přerušovaným řezem a těžké hrubování, protože mají vysokou houževnatost. Síly řezání dosahují středních až vysokých hodnot a dochází k vydrolování ostří [17,18,21].

Skupina **K** je určena pro obrábění materiálů, které vytváří krátkou drobivou třísku, jako je litina neželezná slitiny a nekovové materiály. Převládá abrazivní a adhezní opotřebením a řezné síly jsou obvykle relativně nízké. Karbid wolframu je jedinou tvrdou strukturální složkou této skupiny. Pro materiály tvořící dlouhou třísku, která tepelně zatěžuje čelo nástroje, nejsou tyto SK vhodné [12,17,18].

Skupina **N** je určena pro obrábění různých neželezných slitin na bázi mědi, hliníku nebo hořčíku, obrábění plastů, dřeva a kompozitních materiálů [18].

Skupina **S** se používá na obrábění tepelně odolných slitin na bázi železa, niklu a kobaltu, titanu a titanových těžce obrobitelných slitin [12,21].

Skupina **H** je vhodná na obrábění kalených a vysoce tvrdých ocelí (nad 48 HRC) a tvrzených a kalených litin [12,21].

Tyto skupiny se dále mohou dělit na podskupiny např. P10, M20, K30. Vyšší číslo vyjadřuje vyšší obsah pojícího kovu, vyšší houževnatost a pevnost v ohybu, nižší tvrdost a otěruvzdornost materiálu a vymezuje oblast jeho aplikací pro nižší řezné a vyšší posuvové rychlosti [3,12,21]

### 2.2.3 Povlakované slinuté karbidy

Povlakované slinuté karbidy se vyrábějí dvěma základními metodami. První z nich je chemické napařování CVD (Chemical Vapour Deposition). Napařuje se jedna i více vrstev. Pro zlepšení adhezní pevnosti mezi podkladem a povlakem se nanášejí mezivrstvy (např. TiC mezi vrstvy  $Al_2O_3$ ). Metoda fyzikálního napařování PVD (Physical Vapour Deposition) se objevila na počátku osmdesátých let dvacátého století. Jednovrstvý nitrid titanu (TiN) byl nejpoužívanějším povlakem. Dříve bylo zapotřebí pouze několik typů povlaků. Z důvodu navýšení požadavků na povlak došlo ke kombinování typů povlaků a nanášení různých tloušťek povlaků [7,6,16].

### 3 OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

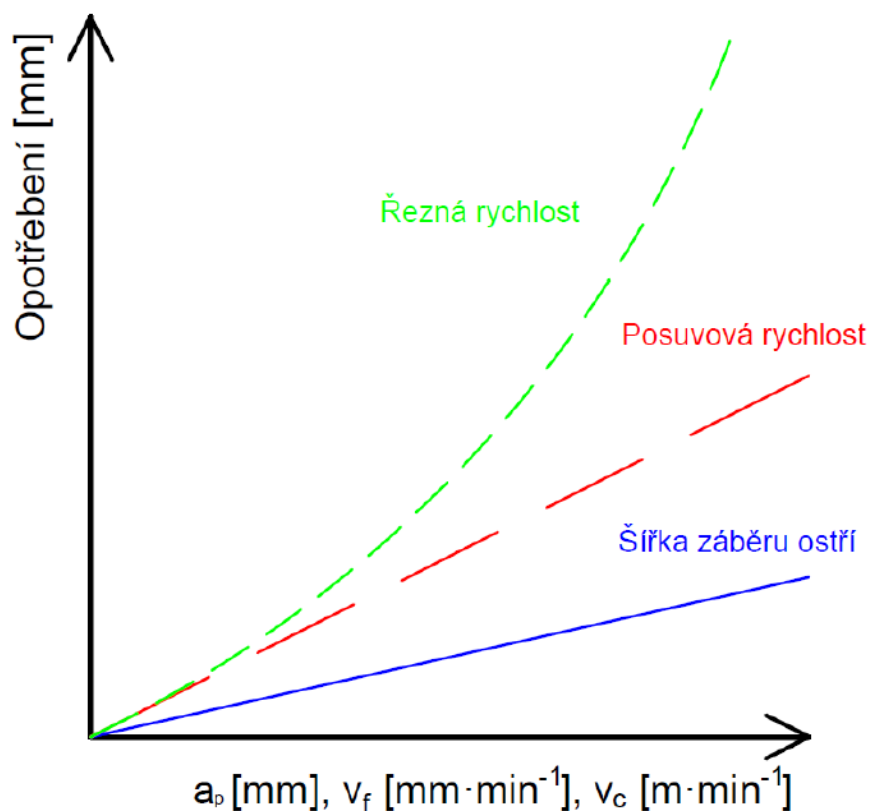
V důsledku kontaktu mezi nástrojem a obrobkem, a také mezi nástrojem a třískou dochází k opotřebení. Opotřebení nástroje je ovlivněno mnoha faktory. Mezi nejvýznamnější faktory se řadí druh operace, fyzikální a mechanické vlastnosti nástrojového a obráběného materiálu, geometrie nástroje, řezné prostředí a pracovní podmínky [3,22].

#### 3.1 Mechanismus opotřebení

Mechanismus opotřebení se rozděluje na dva typy, mechanické a chemické. Opotřebení vlivem odcházející třísky a třením po obrobku vzniká opotřebení mechanické. Chemické složení materiálu nástroje se nemění. U chemického opotřebení se změní chemické složení nástroje v místě řezu. Z důvodu této změny se mění mechanické vlastnosti povrchu nástroje. Mechanismy lze rozdělit do čtyř základních dějů [3,22].

- Adheze – plastická deformace v místě styku nástroje s obrobkem.
- Abraze – brusný otěr mikročástic uvolněných z obrobku nebo nástroje.
- Oxidace – tvorba oxidů, například  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (velmi tvrdý oxid).
- Difuze – migrace atomů z obrobku do nástroje a opačně.

Každý z dějů probíhá za odlišných podmínek a má jiný průběh. Jedním z nejpodstatnějších činitelů určující děj je teplota mezi nástrojem a obrobkem. Další stejně důležitý činitel je vliv řezných podmínek a je znázorněn na obr. 3.1 [3,22].



Obr. 3.1 Vliv řezných podmínek na opotřebení nástroje [1].

Všechny čtyři výše uvedené druhy opotřebení působí v průběhu času plynule, nemusí mít ale shodný začátek působení. Deformace a křehký lom jsou mechanismy, které nepůsobí v průběhu času, ale jsou náhlé. Jedná se například o ulomení špičky nebo náhlou změnu tvaru břitu nástroje. Po těchto nečekaných změnách dochází k ukončení činnosti nástroje [3,22].

### 3.2 Typy opotřebení

- **Opotřebení hřbetu (A):**

Působením mechanismů opotřebení na hřbetní plochu břitu a poloměr špičky při kontaktu s materiálem obrobku vzniká opotřebení hřbetu (viz obr. 3.2). Jedná se o rovnoměrné ubývání materiálu nástroje. Toto opotřebení se řadí mezi abrazivní. Toto opotřebení je jedním z hlavních kritérií, kterým se určuje trvanlivost vyměnitelných břitových destiček. Použitím/zvýšením chladicího procesu při obrábění, snížením řezné rychlosti nebo volbou vhodnějšího řezného materiálu lze snížit intenzitu tohoto opotřebení. Při velkém opotřebení hřbetu dochází k zhoršení kvality povrchu obrobku, zvýšení vibrací, řezných sil a tření [23,24,25].

- **Výmol na čele (B):**

Tento typ opotřebení se nejčastěji objevuje u břitových destiček s rovným čelem, avšak může se objevit i u jiných destiček. U měkkých materiálů je výmol širší a mělký. Při vyšší tvrdosti se výmol zužuje a prodlužuje [23,24].

- **Oxidační rýha na vedlejším břitu (C):**

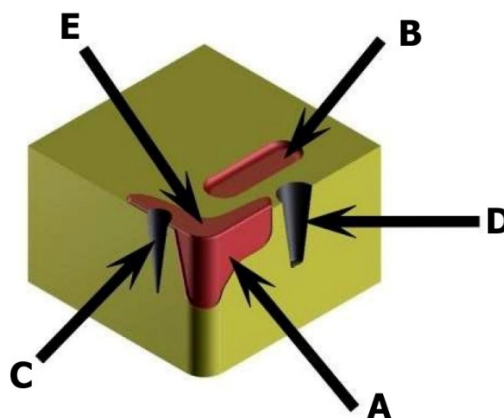
Jedno z nejvýznamnějších kritérií limitujících životnost VBD. Za zásadní zvýšení drsnosti povrchu obrobku může propojení oxidační rýhy s výmolem na čele. Tento typ opotřebení se vyskytuje u soustružení [23,25].

- **Vrubové opotřebení na hlavním břitu (D):**

Převážně zpevněním povrchových vrstev obrobku a otřepy je zapříčiněn vznik vrubového opotřebení na hlavním břitu v oblasti styku břitu nástroje s povrchem obrobku. Toto opotřebení se nejčastěji nachází u korozivzdorných a austenitických ocelí [24,25].

- **Tvorba nárůstku (E):**

Dochází k nalepování obráběného materiálu na břit nástroje. Nárůstek má charakter návaru na břit. Ke křehkému porušení břitu nástroje může dojít při odtrhávání nárůstku. Zásadně se snižuje jakost povrchu [23].



Obr. 3.2 Typy opotřebení A, B, C, D, E – podle [26].

- **Porušování řezné hrany (mimo záběr) (F):**

Tento typ opotřebení vzniká při nevhodném utváření třísky. Tříska při odchodu z řezu naráží na břit a mechanicky ho poškozuje [23,26].

- **Křehké porušení řezné hrany (mikrovyštipování) (G):**

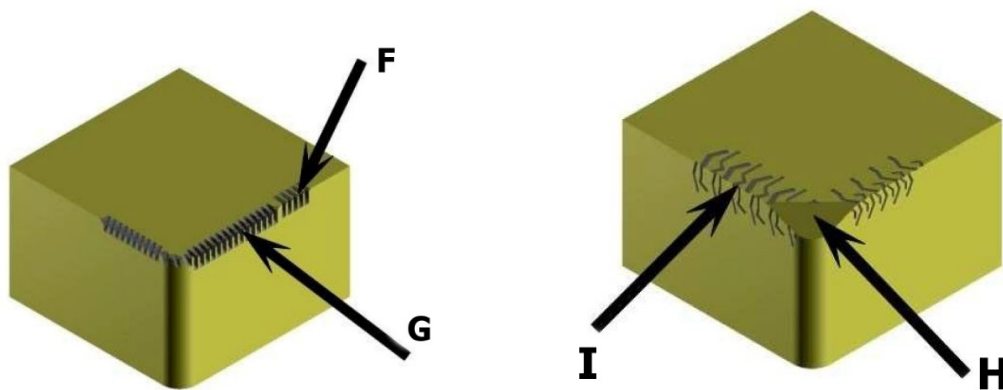
Tento typ opotřebení je samostatně obtížně identifikovatelný. Převážně se objevuje v kombinaci s jinými typy opotřebení. Opotřebení se nejčastěji objevuje u soustavy s nízkou tuhostí [24].

- **Plastická deformace špičky (H):**

V důsledku vysokých řezných teplot dochází k výraznému přetížení břitu [25].

- **Hřebenové trhliny (I):**

Vznikají důsledkem tepelného zatížení při přerušovaném řezu [23].



Obr. 3.3 Typy opotřebení F, G (vlevo) a H, I (vpravo) - podle [26].

### 3.3 Experimentální metody ke zjištění opotřebení nástroje

Experimentálních metod ke zjištění opotřebení nástroje se ve strojírenství vyskytuje široká škála. V následující kapitole jsou některé experimentální metody stručně zpracovány. Při těchto metodách dochází nejčastěji k vyhodnocování [3]:

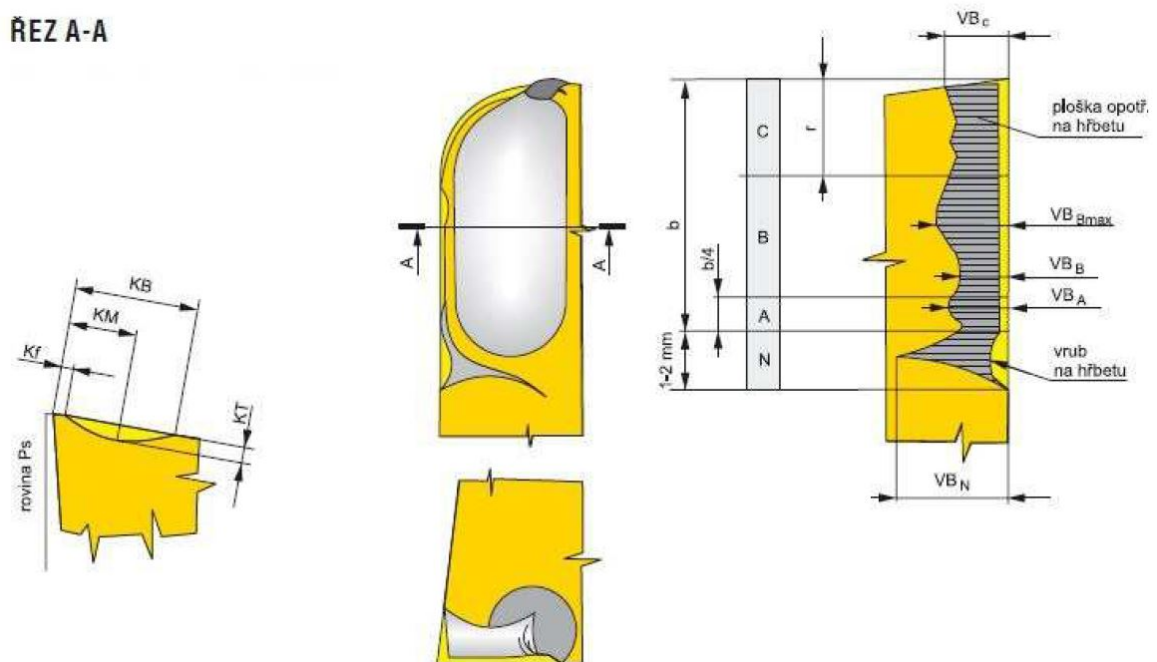
- opotřebení řezného nástroje,
- řezné síly,
- tepla a teploty.

Opotřebení lze hodnotit metodami přímými nebo nepřímými. Přímými metodami se rozumí metody, kde sledování a vyhodnocování stavu opotřebení probíhá přímo na řezném nástroji. Mezi přímé metody hodnocení opotřebení patří [12]:

- měření kritéria opotřebení VB, KT, KVy,
- měřením hmotnosti úbytku nástroje,
- optické sledování funkční plochy nástroje,
- elektrické metody,
- ultrazvukové metody,
- pneumatické metody,
- radioaktivní metody.

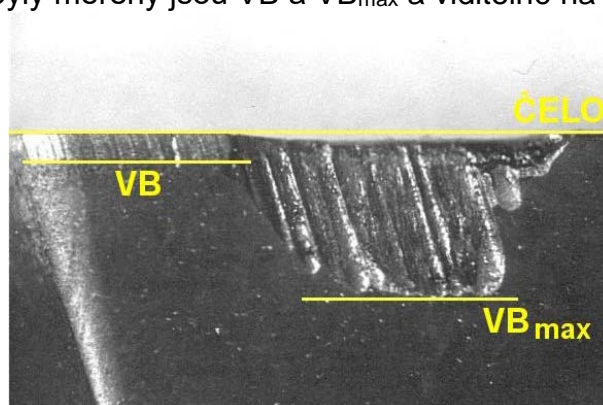
### 3.3.1 Kritéria opotřebení

Kritérium opotřebení udává moment, ve kterém je řezný nástroj nahrazen novým z důvodu rizika, že dojde k jeho selhání. Kritérium opotřebení, při němž bude obrobek vyroben v přijatelné kvalitě, je zvoleno za pomoci požadavků, které jsou kladeny v určitých operacích na řezný nástroj. Mezi tyto požadavky patří např. tolerance, jakost povrchu a jiné vlastnosti obrobku. Pro všechny druhy obrábění nejsou požadavky na kritéria opotřebení shodné. V případě operace hrubování se kritérium opotřebení blíží kritériu trvanlivosti nástroje. Toto přiblížení má za následek celkové selhání nástroje. V případě operace dokončování nelze připustit takovou hodnotu kritéria opotřebení. Mohlo by se stát, že obrobená plocha nebude splňovat požadované vlastnosti. Kritéria pro hodnocení opotřebení řezného nástroje jsou definována dle normy ČSN ISO 3685. Mezi nejrozšířenější patří kritérium  $VB_B$ ,  $KT$  a  $VB_{max}$ , která lze vidět na obr. 3.4. Hodnota  $VB_B$  je průměrné opotřebení hřbetu,  $VB_{max}$  představuje maximální opotřebení hřbetu a  $KT$  je hloubka výmolu [23,25].



Obr. 3.3 Druhy kritérií opotřebení dle normy ISO 3685 [25].

V experimentální části bylo opotřebení zaznamenáno přímou metodou pomocí optického měřidla Alicona InfiniteFocus. Parametry přístroje jsou uvedeny v kapitole 5.5. Hodnoty, které byly měřeny jsou  $VB$  a  $VB_{max}$  a viditelné na obr. 3.4.



Obr. 3.4 Nízká hodnota  $VB$  kombinovaná s vysokou hodnotou  $VB_{max}$  [5].

Všechny nepřímé metody měření se řadí mezi kontinuální. K analýze opotřebení rezného nástroje se využívá veličina, která má vztah s požadovanou veličinou, ale dle své definice s ní přímo nesouvisí. Nepřímými metodami hodnocení opotřebení jsou [12]:

- měření velikosti změny sil působících při obrábění,
- měření a vyhodnocování elektrického příkonu obráběcího stroje,
- měření změny teploty obrobku, nástroje nebo třísek,
- měření kmitání (amplituda kmitů, zrychlení, parametry akustické emise),
- měření struktury povrchu obrobené plochy (parametry Ra, Rz, apod.),
- sledování druhotných projevů opotřebení (subjektivní metody)
  - lesklé proužky na obrobené ploše,
  - charakteristický zvuk,
  - změna tvaru a barvy třísky.

### 3.3.2 Měření a vyhodnocování sil

Měření jednotlivých složek rezné síly patří k nejrozšířenějším nepřímým metodám k určení stavu opotřebení rezného nástroje. Velikost jednotlivých složek rezné síly se mění se změnou geometrie nástroje vlivem opotřebení. Ze získaných informací o silovém zatížení v časovém průběhu lze vyhodnotit i jiná kritéria. Může nás například zajímat variabilita silového působení, rostoucí či klesající tendence apod. Rozboru silového zatížení při frézování se věnuje kapitola 1.4. Měření složek rezných sil může probíhat následujícími metodami [5,27]:

- vyvážení měřené síly známou gravitační silou tělesa určité hmotnosti,
- měření zrychlení tělesa o známé hmotnosti, na které působí složky měřené síly,
- vyvážení měřené síly magnetickou silou,
- převedení síly na tlak kapaliny,
- působení síly na pružné těleso,
- působení síly na krystal, kde je využito piezoelektrického jevu.

Při měření sil se nejčastěji používají dynamometry neboli snímače sil. V experimentální části byly síly vyexportovány z CNC frézky FFQ 100 WR/A6 z řídicího systému Siemens SINUMERIK 840 [27].

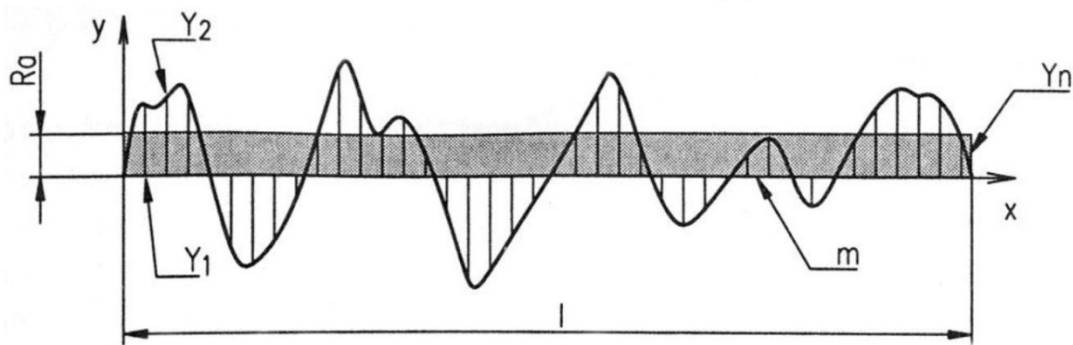
### 3.3.3 Měření drsnosti povrchu

Povrch obrobku není nikdy ideální. Skutečný povrch obsahuje velmi jemné nerovnosti rozložené s jistou pravidelností po obrobené ploše. Metoda výroby povrchu má také velký vliv na hodnotu drsnosti [28].

Kvalita obrobené plochy se zhoršuje se zvyšujícím se opotřebením rezného nástroje. Předem definovaný nárůst opotřebení může značit potřebu vyměnit rezný nástroj za nový [28].

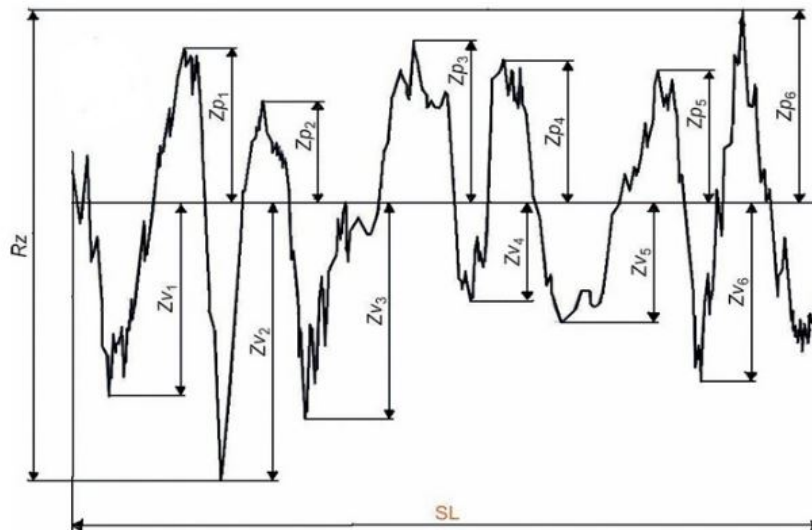
V experimentální části byla měřena drsnost povrchu ručním drsnoměrem Hommel Tester T500, který je schopen měřit aritmetickou úchylku profilu Ra a výšku nerovnosti profilu určenou z 10 bodů Rz. Parametry přístroje jsou uvedeny v kapitole 5.6. Na obr. 3.5 a obr. 3.6 jsou zobrazeny profil obrobené plochy a zakótované měřené veličiny Ra, Rz.

**R<sub>a</sub>** – aritmetický střed absolutních odchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř základní délky [29].



Obr. 3.5 Metodika měření drsnosti povrchu Ra [28].

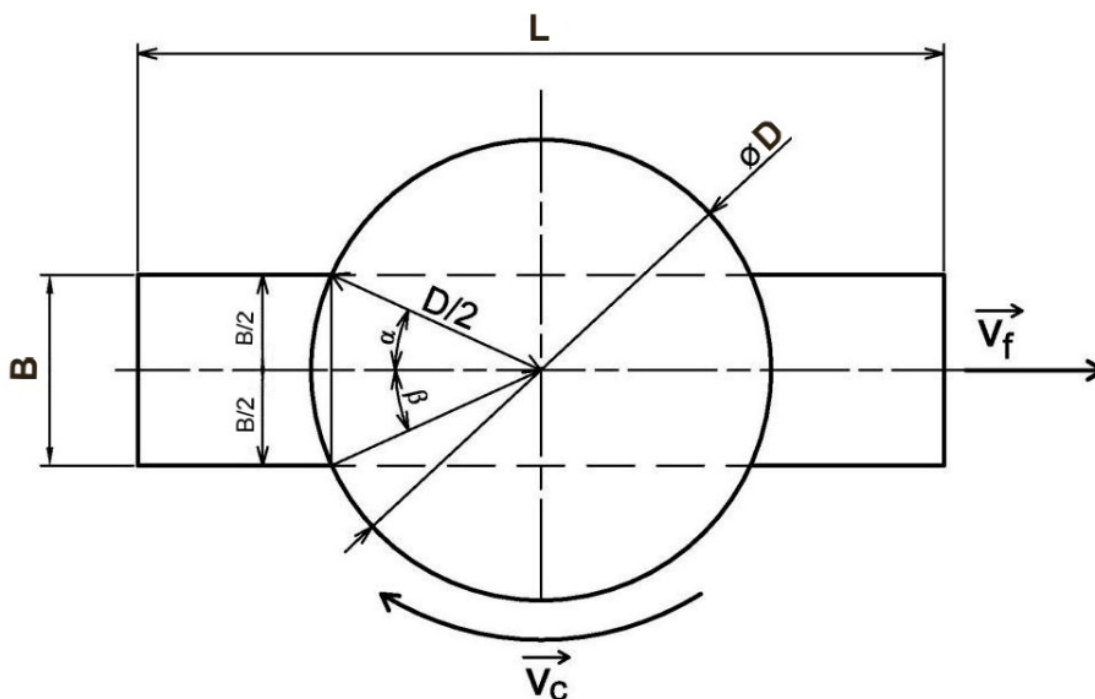
**R<sub>z</sub>** – součet hloubky nejnižší rýhy uvnitř základní délky a výšky nejvyššího výstupku. Parametr odpovídá střední hloubce drsnosti dle DIN 4762 [28].



Obr. 3.6 Metodika měření drsnosti povrchu Rz [30].

## 4 VÝKONNOSTNÍ CHARAKTERISTIKA

U čelního frézování se tloušťka třísky mění nejen v závislosti na úhlu  $\varphi_i$ , který určuje polohu zubu, ale navíc i v závislosti na úhlu nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$ . V případě frézování více destičkami je potřeba dopočítat polohu zubů. Lze předpokládat, že maximální hodnota  $M_k$  bude zaznamenána při symetrickém postavení zabírajících zubů vzhledem k podélné ose obrobku. Pro správné určení polohy zubů, je potřeba nejdříve spočítat maximální úhel záběru zubu. Na obr. 4.1 a 4.2 lze vidět schéma vzájemné polohy nástroje a obrobku. Pomocí goniometrických funkcí je možné dopočítat maximální úhel záběru zubu (opásání)  $\varphi_{max}$ , podle vzorců 4.1 a 4.2 [1, 2]

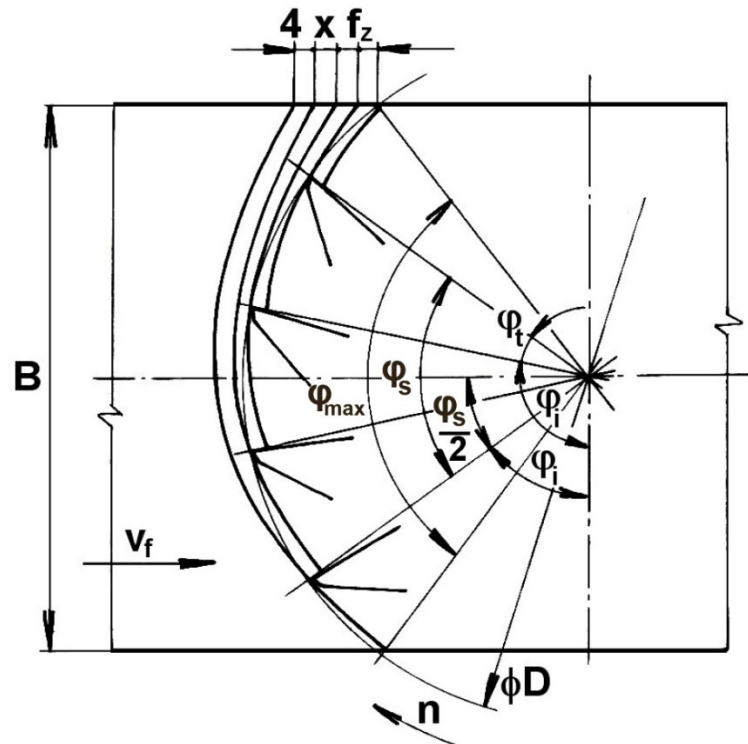


Obr. 4.1 Schéma symetrického frézování pro určení maximálního záběru zubu  $\varphi_{max}$  [3].

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{B/2}{D/2}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{B}{D}\right) [^\circ] \quad (4.1)$$

$$\varphi_{max} = \alpha + \beta [^\circ] \quad (4.2)$$

kde:	$\alpha, \beta$	[ $^\circ$ ]	- polovina úhlu záběru zubu
	$D$	[mm]	- průměr frézy
	$B$	[mm]	- šířka frézované plochy
	$\varphi_{max}$	[ $^\circ$ ]	- maximální úhel záběru zubu



Obr. 4.2 Schéma symetrického frézování pro určení úhlů záběru zubů [3].

Zubovou rozteč  $\varphi_t$  mezi jednotlivými zuby v záběru lze spočítat dle vztahu (4.3) [3].

$$\varphi_t = \frac{360}{z} = [^\circ] \quad (4.3)$$

kde:  $\varphi_t$   $[^\circ]$  - zubová rozteč  
 $z$   $[-]$  - celkový počet zubů

Následný počet zubů v záběru  $n_z$  lze zjistit ze vztahu (4.4). Výsledné číslo se zaokrouhluje na celé číslo a vždy nahoru [3].

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{\varphi_t} \quad (4.4)$$

Celkovou úhlovou rozteč  $\varphi_s$  mezi prvním a posledním zubem v záběru lze zjistit dle vztahu (4.5) [3].

$$\varphi_s = (n_z - 1) \cdot \varphi_t = [^\circ] \quad (4.5)$$

Výpočet úhlů polohy jednotlivých zubů  $\varphi_i$  lze zjistit dle vzorce (4.6) [3].

$$\varphi_i = 90 - \frac{\varphi_s}{2} + (i - 1) \cdot \varphi_t [^\circ] \quad (4.6)$$

kde:  $\varphi_t$   $[^\circ]$  - zubová rozteč  
 $\varphi_s$   $[^\circ]$  - celková úhlová rozteč mezi prvním a posledním zubem  
 $i$   $[-]$  - jednotlivé polohy zubů

Dosažením všech potřebných hodnot do patřičného vzorce (1.19) se vypočítá velikost teoretické řezné síly potřebné pro daný úběr [1].

Krouticí moment k ose frézy je tvořen jednotlivými složkami řezné síly na všech zubech, které jsou současně v záběru. Vztah pro tento krouticí moment vychází ze vzorce pro celkovou řeznou sílu při záběru více zubů frézy (1.17) [1, 2].

$$M_k = \frac{D}{2} \cdot \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = \frac{D}{2} \cdot C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad [N \cdot mm] \quad (4.7)$$

kde:	D	[mm]	- průměr frézy,
	$C_{Fc}$	[-]	- konstanta vlivu obráběného materiálu,
	$a_p$	[mm]	- šířka záběru hlavního ostří,
	$f_z$	[mm]	- posuv na zub,
	x	[-]	- exponent vlivu tloušťky třísky,
	$\kappa_r$	[°]	- nástrojový úhel nastavení hlavního ostří,
	$\varphi_i$	[°]	- úhel záběru zubu.

Nepřímá metoda měření sil při frézování spočívá v měření rozdílu příkonu a výkonu stroje. Při měření se vychází z užitečného výkonu potřebného k řezání. Jako první krok se změří výkon obráběcího stroje bez zatížení a poté výkon při obrábění [1, 2, 3].

$$P_{už} = P_c - P_o \quad [W] \quad (4.8)$$

kde:	$P_c$	[W]	- celkový výkon obráběcího stroje
	$P_o$	[W]	- výkon při chodu na prázdko.

Odečtením těchto dvou hodnot se určí užitečný výkon vyvolaný tangenciální složkou síly  $F_c$ . Pro tangenciální složku řezné síly se vychází ze vztahu (4.9) [3].

$$P_{už} = F_c \cdot v_c \quad [W] \quad (4.9)$$

Výpočet tangenciální složky síly nepřímou metodou je jednoduchý, univerzální a nevyžaduje žádnou speciální měřicí techniku. Nevýhodami jsou nepřesnost vlivem rozdílných účinností elektromotoru při chodu naprázdno a pod zátěží, a také zanedbání ostatních složek síly na výkon elektromotoru.

Užitečný výkon (řezný výkon) na vřetení frézky potřebný na vyvození krouticího momentu lze určit dle vztahu (4.10) [1, 2, 3].

$$P_{už} = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} = \frac{2 \cdot M_k}{D} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \cdot \frac{1}{6 \cdot 10^4} = \frac{\pi \cdot n \cdot M_k}{3 \cdot 10^7} \quad [kW] \quad (4.10)$$

Potřebný výkon hnacího motoru stroje, který je nutno dodat stroji, můžeme určit dle metodiky Walter podle následujícího vzorce (4.11) [9].

$$P_p = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f \cdot k_c}{6 \cdot 10^7 \cdot \eta_s} \quad [kW] \quad (4.11)$$

kde:	$\eta_s$	[%]	- účinnost stroje
------	----------	-----	-------------------

## 5 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

Jedním z cílů experimentálního měření je sledování a porovnání silových změn při čelním symetrickém frézování. Operace byly prováděny pro stejný typ destiček od čtyř různých dodavatelů za stejných řezných podmínek a bez chlazení.

Experiment probíhal na vertikální frézce FFQ 100. S ohledem na využití celé výšky obráběného materiálu byl obrobek upnut do svěráku (obr. 5.1). Podélná osa obrobku byla nastavena na střed frézy, frézování probíhalo symetricky. Obráběným materiálem byla ocel DIN C45 neboli ČSN12 050. Destičky vybrané od výrobců mají osm břitů, tudíž na testy opotřebení byla využita jedna destička, která byla vždy otočena. Při testování všech 4 výrobců byl vždy měřen 1., 18., 36., a 54. průjezd. Po každém tomto průjezdu byla na třech místech obrobené plochy změřena drsnost povrchu. Po výše zmíněných průjezdech bylo měřeno hřbetní opotřebení nástroje (kritérium VB) pomocí dílenského optického měřidla Alicona InfiniteFocus ve společnosti Intemac Solutions s.r.o.

Hlavním srovnávacím kritériem bylo zvoleno silové zatížení destičky při řezném procesu. To bylo vyhodnoceno z dat získaných při frézování. Hodnoty byly vyexportovány z CNC frézky z řídicího systému Siemens SINUMERIK 840. Nebyl použit datový kabel, ale data se přenášela na datové disketě. Vyexportovány byly hodnoty z motorů, které pohánějí vřeteno a posun v ose X, Y a Z. Takto získaná data byla převedena do tabulkového procesoru Excel. Pomocí kinematického schématu stroje (Příloha 2) byly hodnoty krouticího momentu z motoru, který poháněl vřeteno, přepočítány na krouticí moment na vřetenu. Hodnoty získané v ose X, Y a Z byly taktéž pomocí převodových poměrů a kuličkových šroubů přepočítány na vřeteno. Hodnoty byly následně pomocí vzorkovací frekvence profiltrovány (pro maximální průřez třísky). Od těchto hodnot byly odečteny hodnoty stroje v chodu bez zatížení.

Dalším z cílů diplomové práce je sledování a porovnání břitových destiček při maximálním krouticím momentu a maximálním výkonu. K testování byl použit stejný stroj, nástroj, materiál i VBD jako při testech na opotřebení. Při těchto testech byla fréza plně osazena osmi destičkami. Řezné podmínky pro tyto testy byly voleny tak, abychom stroj i destičky dostali do maximálního zatížení. Při obrábění nebyla použita procesní kapalina.

Tato kapitola obsahuje informace o obráběcím stroji, nástroji a obráběném materiálu. Seznamuje s použitými břitovými destičkami a jejich řeznými podmínkami. Jsou zde uvedena použitá přístrojová měřidla. Byly provedeny výpočty řezných sil a měrných řezných sil. Teoretické výpočty byly provedeny dle odborné literatury, viz [2] a podle metodiky firmy Walter, viz [31].



Obr. 5.1 Obrábění upnutého materiálu ve svěráku.

## 5.1 Obráběcí stroj

Testování vyměnitelných břitových destiček bylo provedeno na vertikální frézce FFQ 100 WR/A6, která je vidět na obr. 5.2. Stroj byl vyroben r. 1998 v TOS Kuřim a testy probíhaly také ve strojírenském podniku TOS Kuřim – OS, a.s. Stroj je ovládán pomocí závěsného ovladače a je vhodný pro přesné kusové i sériové obrábění. Operační systém je Siemens SINUMERIK 840. Užitečné základní technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 5.1. V příloze 2 nalezneme kinematické schéma stroje.



Obr. 5.2 Vertikální frézka FFQ 100 WR/A6.

Tab. 5.1 Základní technické parametry frézky FFQ 10 WR/A6.

Technické parametry	
Maximální podélný zdvih (X – osa)	5000 mm
Maximální příčný zdvih (Y – osa)	1400 mm
Maximální vertikální zdvih (Z – osa)	1250 mm
Rozměry stolu	1000 x 6000 mm
Elektromotor pro pohon vřetene	28 kW
Kroutící moment elektromotoru vřetene	133,7 Nm
Otáčky vřetene	2000 min <sup>-1</sup>
Kroutící moment elektromotoru rychloposuvu	38 Nm
Otáčky elektromotoru posuvu	2000 min <sup>-1</sup>
Orientační hmotnost stroje	20 000 - 40 000 kg
Maximální zatížení stolu	3 000 kg/m <sup>2</sup>

## 5.2 Obráběný materiál

K provedení experimentu byla použita normalizačně žíhaná, nelegovaná, konstrukční ocel o rozměrech 300 x 99 x 95 (d x š x v). Podle staré ČSN normy je označena jako 41 2050 (12 050). Dle EN 10083-2-91 má materiál nové označení C45. Tato ocel je vhodná k povrchovému kalení a zušlechťování pro velké výkovky. Pevnost uvedené oceli může být až 900 MPa a tvrdost se pohybuje v rozsahu 160–225 HB. V uklidněném stavu se tato ocel používá pro výrobu hřídelů těžních strojů, vybraných součástí v automobilech a různých spojovacích součástech. Dále je vhodná na větší ozubená kola, šneky, klikové hřídele, ojnice, páky řazení, závěsy pružin, čepy a jiné. Svařitelnost je obtížná. Používá se také jako etalon při stanovování obrobitelnosti materiálů, což je míra schopnosti materiálu být obráběn. V následující tab. 5.2 se nachází chemické složení oceli a v tab. 5.3 mechanické vlastnosti materiálu.

Tab. 5.2 Chemické složení oceli ČSN 12 050.

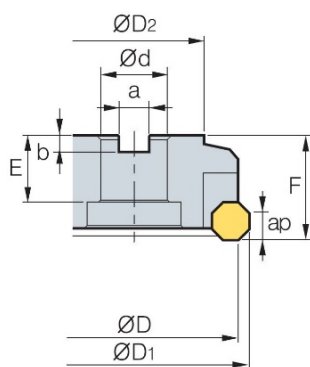
Chemické složení [hm. %]							
C	Mn	Si	Cr max,	Ni max.	Cu max.	P max.	S max.
0,42-0,5	0,5-0,8	0,17-0,37	0,25	0,30	0,30	0,04	0,04

Tab. 5.3 Mechanické vlastnosti ve stavu normalizačně žíhaném.

Tloušťka [mm]	Re min. [MPa]	Rm [MPa]	A min. [%]
t ≤ 16	340	Min. 620	14
16 < t ≤ 100	305	580	16
100 < t ≤ 250	275	560	16

## 5.3 Frézovací nástroj

Pro experiment byla zvolena nástrčná rovinná čelní fréza s označením **AFOM5125R** (viz obr. 5.3) od výrobce Korloy, která je schopná pojmout až 8 vyměnitelných břitových destiček. Výhodou této frézy je robustní systém klínového upnutí destičky. Parametry použitého nástroje jsou uvedeny v tab. 5.4.



Obr. 5.3 Nástrčná čelní fréza AFOM5125R od firmy Korloy [32].

Tab. 5.4 Technické parametry čelní frézy AFOM5125R [32].

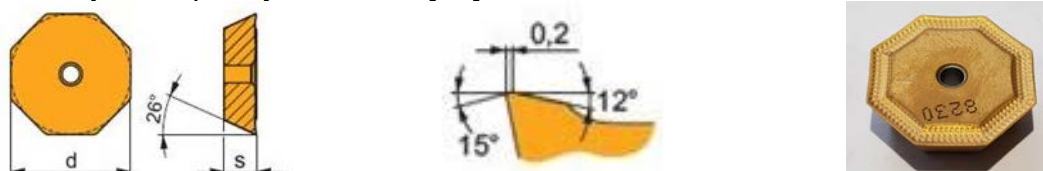
z	ØD [mm]	ØD1 [mm]	ØD2 [mm]	Ød [mm]	a [mm]	b [mm]	E [mm]	F [mm]	ap [mm]
8	125	136	100	38,1(40)	15,9(16,4)	10(9)	38(30)	63	9,5

## 5.4 Volba vyměnitelných břitových destiček

Fréza byla nejdříve osazena jednou vyměnitelnou břitovou destičkou ve tvaru osmihranu z důvodu testů opotřebení a následně pro testy na moment a výkon byla osazena osmi destičkami. Použity byly břitové destičky od společností Dormer Pramet s.r.o., Seco Tools CZ, s.r.o., ISCAR ČR s.r.o. a KORLOY Inc.

### 5.4.1 Dormer Pramet s.r.o.

Jako první byla osazena destička od strojírenské firmy Dormer Pramet s.r.o. s označením **OKFR 0704SN-M 8230**, která je vidět na obr. 5.4. Břitová destička je vyrobena ze sub-mikronového karbidu wolframu s 10% obsahem kobaltu. Je opatřena nano strukturním tenkým povlakem s vysokým obsahem hliníku naneseným metodou PVD. Jedná se o destičku s mírně pozitivním úhlem čela a je vhodná na obrábění materiálů skupin P, M a případně K. Katalogová cena jedné destičky je 385,00 Kč. Rozměry VBD a doporučené řezné podmínky udávané výrobcem jsou zapsány v tab. 5.5 [33].



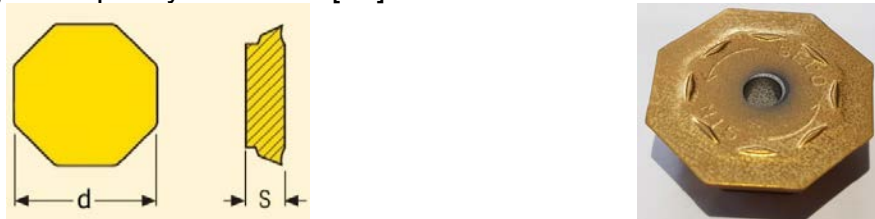
Obr. 5.4 Výměnná břitová destička Dormer Pramet s.r.o. OKFR 0704SN-M 8230 [33].

Tab. 5.5 Rozměry a doporučené hodnoty řezných podmínek pro destičky Dormer Pramet s.r.o. OKFR 0704SN-M 8230 [33].

materiál	d [mm]	Ød1 [mm]	s [mm]	$\gamma_0$ [°]	Kr [°]	$v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	$f_z$ [mm·zub <sup>-1</sup> ]	$a_p$ [mm]
8230	17,845	2,65	4,56	12	45	185–320	0,1–0,3	0,5–12

### 5.4.2 Seco Tools CZ s.r.o.

Jako druhá byla osazena destička od strojírenské firmy Seco Tools s.r.o. s označením **OFMR 070405TR-M15, F40M**, kterou lze vidět na obr. 5.5. Destička je vyrobena ze slinutého karbidu s označením F40M. Tato třída povlakovaná technikou PVD je pro jemné až středně hrubé frézování. Přednostní výběr pro frézování s malým posunem nebo nízkými řeznými rychlostmi. Doporučuje se také pro obrábění vysoce legovaných slitin. Jedná se o destičku s mírným úhlem čela a je vhodná na obrábění materiálů skupin P, M a případně S. Katalogová cena jedné destičky je 447,00 Kč. Rozměry VBD a doporučené řezné podmínky udávané výrobcem jsou zapsány v tab. 5.6 [34].



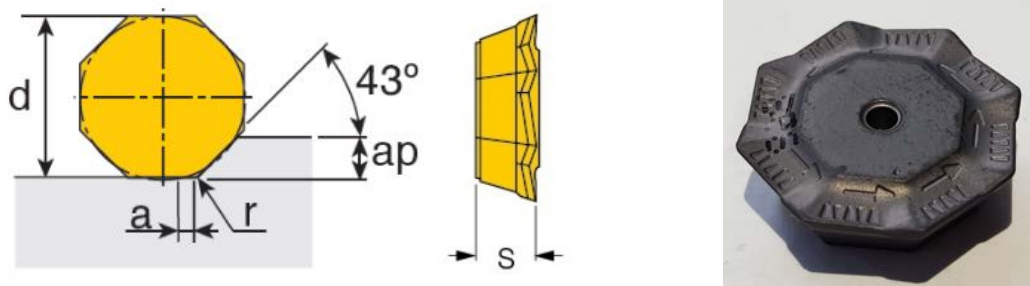
Obr. 5.5 Výměnná břitová destička Seco Tools CZ s.r.o. OFMR 070405TR-M15, F40M [34].

Tab. 5.6 Rozměry a doporučené hodnoty řezných podmínek pro břitové destičky Seco Tools CZ s.r.o. OFMR 070405TR-M15, F40M [34].

materiál	d [mm]	s [mm]	$\gamma_0$ [°]	Kr [°]	$v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	$f_z$ [mm·zub <sup>-1</sup> ]	$a_p$ [mm]
F40M	18,02	4,86	6	45	185–300	0,18–0,359	1–3

### 5.4.3 Iscar Ltd.

Jako třetí byla osazena destička od strojírenské firmy ISCAR Ltd. s označením **OFMR 0704-AER-76 IC928**, kterou lze vidět na obr. 5.6. Tuto destičku nelze přímo považovat za typický produkt firmy ISCAR. Destička byla vyvinuta pro nástrojovou řadu HELIOCTO a následně došlo ke kopírování nově vyvinutých VBD a vznikla alternativa do konkurenčních nástrojů. Destička je vyrobena z houževnatého karbidu s jakostí IC928 s PVD TiAlN povlakem. Destička je vhodná pro frézování nerezových ocelí a žárupevných slitin. Používá se na obrábění materiálů skupin P, M a případně S. Katalogová cena jedné destičky je 380,00 Kč. Rozměry VBD a doporučené řezné podmínky udávané výrobcem jsou zapsány v tab. 5.7 [35].



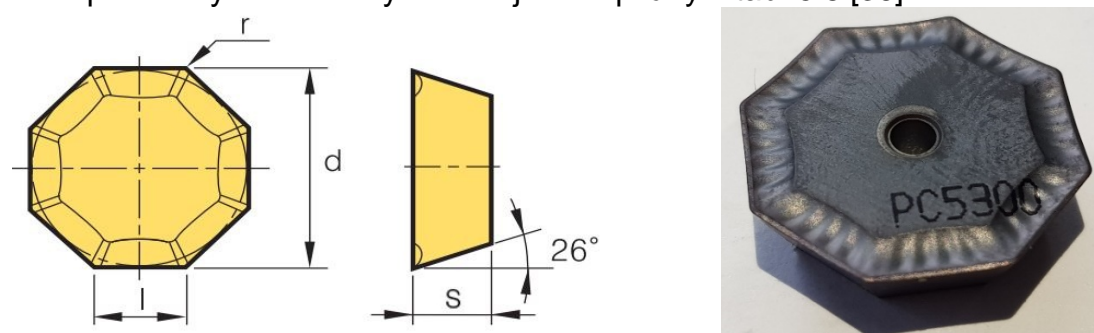
Obr. 5.6 Výměnná břitová destička ISCAR Ltd. OFMR 0704-AER-76 IC928 [35].

Tab. 5.7 Rozměry a doporučené hodnoty řezných podmínek pro břitové destičky ISCAR Ltd. OKFR 0704SN-M 8230 [35].

materiál	d [mm]	s [mm]	Kr [°]	$v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	$f_z$ [mm·zub <sup>-1</sup> ]	$a_p$ [mm]
IC928	17,8	4,55	43	80–200	0,2–0,35	1–3

### 5.4.4 Korloy Inc.

Jako čtvrtá a poslední byla osazena destička od strojírenské firmy KORLOY Inc. s označením **OFKR 0704SN-MM PC5300**, kterou lze vidět na obr. 5.7. Destička je vyrobena ze slinutého karbidu s označením PC5300 s PVD TiAlN povlakem. Destička je vhodná pro obrábění při vysokých rychlostech. Vnější vrstva TiN snižuje tření a zlepšuje hladkost povrchu. Používá se na obrábění materiálů skupin P. Katalogová cena destičky nebyla k nalezení, protože destička už není v aktuálním sortimentu společnosti KORLOY. Na zahraničních internetových obchodech se destička dá zakoupit ve výprodeji přibližně za 350 Kč. Rozměry VBD a doporučené řezné podmínky udávané výrobcem jsou zapsány v tab. 5.8 [36].



Obr. 5.7 Výměnná břitová destička KORLOY Inc. OFKR 0704SN-MM PC5300 [36].

Tab. 5.8 Rozměry a doporučené hodnoty řezných podmínek pro břitové destičky KORLOY Inc. OFKR 0704SN-MM PC5300 [36].

materiál	d [mm]	s [mm]	Kr [°]	$v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	$f_z$ [mm·zub <sup>-1</sup> ]	$a_p$ [mm]
PC5300	18	4,76	43	150–240	0,05–0,2	0,5–9,5

## 5.5 Použité přístrojové vybavení

Opotřebenění břitových destiček bylo měřeno a nafoceno na optickém měřidle Alicona InfiniteFocus ve společnosti Intemac Solutions s.r.o. Drsnost obrobeného povrchu byla měřena drsnoměrem HOMMEL TESTER T500.

### 5.5.1 Optické měřidlo Alicona InfiniteFocus

Tento typ měřidla využívá bezkontaktní optickou trojrozměrnou metodu založenou na proměnlivém zaostření světelného paprsku. Vzorek je umístěn v jednoznačně určeném souřadném systému stroje. Výhodou tohoto zařízení je možnost měření drsnosti plochy, ale v experimentu tato funkce nebyla použita. Nepřesnost měření, která může vzniknout vnějším vlivem, přístroj eliminuje anti-vibračním systémem. Z důvodu robustní konstrukce je možné měřit tvar a drsnost i u větších a těžších dílců. Precizní nastavení polohy je zajištěno vysoce přesnými snímači umístěnými ve všech osách. Nastavení polohy probíhá pomocí příslušného softwaru a 3D myši. Manuální posuv pracovního stolu je také pomocí 3D myše. Přístroj je vybaven šesti optickými objektivy s odlišnou velikostí zvětšení. Přístroj je vyobrazen na obr. 5.8. Technická specifikace jednotlivých objektivů je uvedena v tab. 5.9 [37].



Obr. 5.8 Optické měřidlo Alicona InfiniteFocus [37].

Tab. 5.9 Parametry jednotlivých objektivů měřícího přístroje InfiniteFOCUS [37].

Zvětšení objektivu	2,5x	5x	10x	20x	50x	100x	Jednotka
Pracovní vzdálenost:	8,8	23,5	17,5	19	11	4,5	mm
Boční rozsah měření (X, Y):	5,63	2,82	1,62	0,81	0,32	0,16	mm
Měřená plocha (X a Y)	31,7	7,95	2,62	0,66	0,1	0,03	mm <sup>2</sup>
Vertikální rozlišení	2300	410	100	50	20	10	nm
Přesnost kroku (1 mm)	-	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	%
Maximální měřitelná oblast	40 000	40 000	40 000	24 780	3 965	990	mm <sup>2</sup>
Minimální měřitelná oblast (Ra)	7	1,2	0,3	0,15	0,06	0,03	μm
Minimální věřitelný poloměr	20	10	5	3	2	1	μm

### 5.5.2 Dotykové měřidlo Hommel Tester T500

Měření byla provedena drsnoměrem HOMMEL TESTER T500. Měření je rychlé a přesné. Měření parametrů, které drsnoměr umožňuje, odpovídá normám DIN/ISO/JIS. Příklad je také možné připojit k počítači s pomocí softwaru TURBO RATAWIN Expert. Příklad je vidět na obr. 5.9 [38].



Obr. 5.9 Drsnoměr HOMMEL TESTER T500.

Tab. 5.10 Technická data drsnoměru HOMMEL TESTER T500 [38].

<b>Měřitelné parametry drsnosti</b>	Ra, RzDIN, Rmax DIN 4768 a ISO 4287/1 Ra, RzISO, Rt dle ISO 4287/1	
	Ra, RzJIS, Rmax JIS B601 Pc dle Euronorm 49 ANSI/ASME B 46.1	
	pro Ra, Rz, Rmax, (Rt)	
<b>Zobrazení tolerancí</b>	pro Ra, Rz, Rmax, (Rt)	
<b>Normované délky</b>	0,25/0,8/2,5 mm	
<b>Délky měřeného úseku</b>	1,5/4,8/15,0 mm	
<b>Jednotlivé měřené dráhy</b>	volitelné 1 - 5	
<b>Rychlosti posuvu</b>	0,15/0,5/1,0 mm/s	
<b>Digitální filtr</b>	fázově korektní profilový filtr M1	
<b>Měřicí rozsah</b>	měření zdvih	rozlišení
	±20 μm	20 nm
	±20/-60 μm	40 nm
	±40/-120 μm	20 nm
	±40 μm	10 nm
<b>Třída přesnosti</b>	1 dle DIN 4772(±5%)	
<b>Rozlišení</b>	0,01 μm	
<b>Volba Jednotky</b>	μm/inch	

## 5.6 Volba řezných podmínek

Testování na opotřebení bylo provedeno pro čelní frézování, kdy v nástrčné fréze byla vždy upnuta pouze jedna břitová destička. Při obrábění nebyla použita procesní kapalina. Při volbě řezných podmínek byla snaha dodržet doporučené hodnoty udávané výrobcem. Nakonec byly zvoleny řezné podmínky tak, aby přibližně odpovídaly všem čtyřem výrobcům. Doporučené hodnoty jsou uvedeny výše v tab. 5.5–5.8. V tab. 5.11 jsou sepsány řezné podmínky, které byly zvoleny pro testování VBD na opotřebení.

Tab. 5.11 Řezné podmínky pro čelní frézování.

Řezné podmínky	Označení	Rozsah hodnot	Jednotka
Řezná rychlost	$v_c$	275	m/min
Otáčky vřetene	$n$	700	1/min
Posuvová rychlost	$v_f$	250	mm/min
Posuv na zub	$f_z$	0,36	mm
Šířka záběru ostří	$a_p$	0,5	mm

U testování břitových destiček na maximální kroutící moment a výkon, byla snaha dodržet doporučené hodnoty udávané výrobcem. Nakonec byly zvoleny řezné podmínky tak, aby přibližně odpovídaly všem čtyřem výrobcům a zároveň se docílilo co největšího zatížení stroje. Doporučené hodnoty destiček jsou uvedeny výše v tab. 5.5–5.8. Při obrábění destičkami od firmy ISCAR docházelo k natavování materiálu a řezné podmínky musely být pro tohoto výrobce sníženy. Nastavené řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 5.12 – 5.15.

Tab. 5.12 Řezné podmínky pro maximální kroutící moment destiček od výrobců PRAMET, SECO, KORLOY.

Řezné podmínky	Označení	Rozsah hodnot	Jednotka
Řezná rychlost	$v_c$	102,1	m/min
Otáčky vřetene	$n$	260	1/min
Posuvová rychlost	$v_f$	1000	mm/min
Posuv na zub	$f_z$	0,48	mm
Šířka záběru ostří	$a_p$	4	mm

Tab. 5.13 Řezné podmínky pro maximální kroutící moment destiček od výrobce ISCAR.

Řezné podmínky	Označení	Rozsah hodnot	Jednotka
Řezná rychlost	$v_c$	137,5	m/min
Otáčky vřetene	$n$	350	1/min
Posuvová rychlost	$v_f$	550	mm/min
Posuv na zub	$f_z$	0,2	mm
Šířka záběru ostří	$a_p$	2	mm

Tab. 5.14 Řezné podmínky pro maximální výkon destiček od výrobců PRAMET, SECO, KORLOY.

Řezné podmínky	Označení	Rozsah hodnot	Jednotka
Řezná rychlost	$v_c$	196,35	m/min
Otáčky vřetene	$n$	500	1/min
Posuvová rychlost	$v_f$	2000	mm/min
Posuv na zub	$f_z$	0,5	mm
Šířka záběru ostří	$a_p$	4	mm

Tab. 5.15 Řezné podmínky pro maximální výkon destiček od výrobce ISCAR.

Řezné podmínky	Označení	Rozsah hodnot	Jednotka
Řezná rychlost	$v_c$	196,35	m/min
Otáčky vřetene	$n$	500	1/min
Posuvová rychlost	$v_f$	800	mm/min
Posuv na zub	$f_z$	0,2	mm
Šířka záběru ostří	$a_p$	3	mm

## 5.7 Teoretický výpočet řezných sil při čelním frézování

Pro výpočet řezné síly potřebné k obrobení materiálu za daných podmínek je potřeba dopočítat maximální záběr úhlu zubu. Na obr. 4.1 a 4.2 lze vidět schéma vzájemné polohy nástroje a obrobku. Protože byla fréza nastavena na střed obráběného polotovaru, bylo obrábění symetrické. Při frézování lichým počtem zubů, v našem případě jednou destičkou, je maximální úhel záběru  $\varphi_i = 90^\circ$ .

### 5.7.1 Teoretický výpočet řezné síly dle odborné literatury

Pro stanovení síly pomocí vztahu (1.16) bylo nejprve nutné určit hodnotu materiálové konstanty  $C_{Fc}$  a exponentu  $x$ . Tyto hodnoty byly získány z technické příručky firmy Sandvik Coromant a jsou uvedeny v tab. 5.16.

Tab. 5.16 Hodnoty materiálové konstanty  $C_{Fc}$  a exponentu  $x$  [7].

$C_{Fc}$	1600
$x$	0,75

Dosazením všech potřebných hodnot do patřičného vzorce (1.16) lze vypočítat velikost teoretické řezné síly pro daný úběr.

$$\begin{aligned}
 F_{ci} &= C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sin^x \varphi_i = \\
 &= 1600 \cdot 0,5 \cdot 0,36^{0,75} \cdot \sin 45^{(0,75-1)} \cdot \sin 90^{0,75} = \\
 &= 402,9 \text{ [N]}
 \end{aligned}$$

### 5.7.2 Teoretický výpočet sil dle metodiky firmy Walter

Pro stanovení síly pomocí vztahu dle metodiky firmy Walter (výpočtový list viz Příloha 1), bylo zapotřebí vypočítat střední tloušťku třísky  $h_m$  [mm] pro každý z provedených úběrů. K výpočtu byl použit vztah (1.13).

$$h_m = \frac{114,7 \cdot f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \frac{a_e}{d}}{\varphi_i} = \frac{114,7 \cdot 0,36 \cdot \sin 45 \cdot \frac{100}{125}}{90} = 0,26 \text{ [mm]}$$

Jmenovitý průřez třísky  $A_{Di}$  [mm<sup>2</sup>] byl získán dosazením do vztahu (1.5), odvozeného výše.

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i = 0,5 \cdot 0,36 \cdot \sin 90 = 0,18 \text{ [mm]}$$

Dosažením do vzorce (1.14) lze vypočítat hodnoty měrné řezné síly pro jeden záběr. Velikost měrné řezné síly  $k_{c1}$  a exponent  $m_c$  uvedené v tab. 5.17 byly získány z technické příručky Walter.

$$k_c = \frac{1 - (0,01 \cdot \gamma_0)}{h_m^{m_c}} \cdot k_{c1.1} = \frac{1 - (0,01 \cdot 12)}{0,26^{0,25}} \cdot 1700 = 2095,02 \text{ [N} \cdot \text{mm}^2\text{]}$$

Tab. 5.17 Hodnoty měrné řezné síly  $k_{c1}$  a exponent  $m_c$  z katalogu Walter [34].

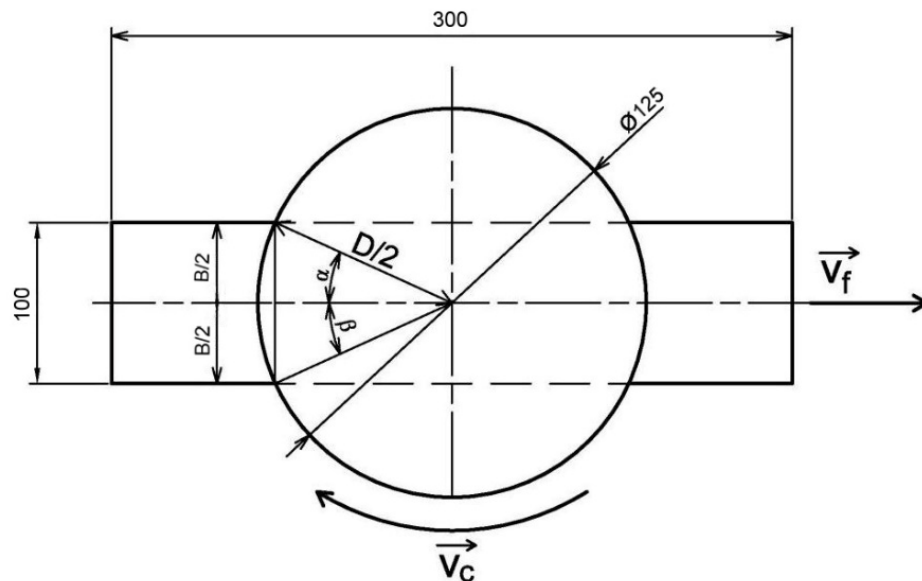
$k_{c1}$ [N·mm <sup>-2</sup> ]	1700
$m_c$ [-m]	0,25

Řeznou sílu  $F$  [N] pak vypočteme podle už uvedeného vzorce (1.10).

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = 2095,02 \cdot 0,18 = 377,1 \text{ [N]}$$

## 5.8 Teoretický výpočet řezného momentu a výkonu

Při testech na maximální krouticí moment a výkon byl frézovací nástroj plně osazen osmi destičkami. U lichého počtu zubů jsou zuby rozmístěny tak, že prostřední z nich je v poloze  $\varphi = 90^\circ$ . Je potřeba ale dopočítat polohu ostatních zubů. Podle obrázku 5.10 a vztahu (4.1 a 4.2) byl dopočítán maximální úhel záběru zubů  $\varphi_{max}$ .



Obr. 5.10 Schéma symetrického frézování pro určení maximálního úhlu záběru zubu  $\varphi_{max}$ .

$$\varphi_{max} = 2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{B/2}{D/2} \right) = 2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{B}{D} \right) = 2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{100}{125} \right) = 106,26 \text{ [}^\circ\text{]}$$

Fréza je osázena osmi destičkami. Zubovou rozteč  $\varphi_t$  lze vypočítat dle vztahu (4.3).

$$\varphi_t = \frac{360}{z} = \frac{360}{8} = 45 \text{ [}^\circ\text{]}$$

Následný počet zubů v záběru lze zjistit ze vztahu (4.4). Výsledné číslo se zaokrouhluje na celé číslo a vždy nahoru.

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{\varphi_t} = \frac{106,26}{45} = 2,3613 \doteq 3$$

Celkovou úhlovou rozteč mezi prvním a posledním zubem  $\varphi_s$  v záběru lze zjistit dle vztahu (4.5).

$$\varphi_s = (n_z - 1) \cdot \varphi_t = (3 - 1) \cdot 45 = 90 [^\circ]$$

Výpočet úhlů polohy jednotlivých zubů lze zjistit dle vzorce (4.6).

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= 90 - \frac{90}{2} + (1 - 1) \cdot 45 = 45 [^\circ] \\ \varphi_2 &= 90 - \frac{90}{2} + (2 - 1) \cdot 45 = 90 [^\circ] \\ \varphi_3 &= 90 - \frac{90}{2} + (3 - 1) \cdot 45 = 135 [^\circ]\end{aligned}$$

Dosazením všech potřebných hodnot do patřičného vzorce (1.19) se vypočítá velikost teoretické řezné síly potřebné pro daný úběr.

$$\begin{aligned}F_c &= \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i = \\ &= 1600 \cdot 4 \cdot 0,48^{0,75} \cdot \sin 45^{(0,75-1)} \cdot (\sin 45^{0,75} + \sin 90^{0,75} \\ &\quad + \sin 135^{0,75}) = 10244,08 [N]\end{aligned}$$

Potřebný krouticí moment lze spočítat dle vztahu (4.7).

$$M_k = \frac{D}{2} \cdot F_c = \frac{0,125}{2} \cdot 10\,244,08 = 640,25 [N \cdot m]$$

Teoretický řezný výkon na vřetení frézky potřebný na vyvození tohoto krouticího momentu lze spočítat dle vztahu (4.10).

$$P_{už} = \frac{\pi \cdot n \cdot M_k}{3 \cdot 10^7} = \frac{\pi \cdot 260 \cdot 640,25}{3 \cdot 10^7} = 17,43 [kW]$$

## 6 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Získané hodnoty složek síly  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  vykazovaly po přepočítání a přefiltrování chyby a špatné hodnoty a nebyly využity pro silové porovnání VBD. V těchto silových porovnáních měly být do grafu zaneseny i teoreticky vypočítané hodnoty celkové řezné síly.

Záznam hodnot z motoru pohánějícího vřeteno byl s pomocí převodového poměru převeden na vřeteno. S pomocí vzorkovací frekvence byly hodnoty přefiltrovány. Před použitím byly od hodnot odečteny hodnoty stroje bez zatížení. Z hodnot krouticího momentu na vřetenu byla dopočítána řezná síla a použita pro následné silové porovnání VBD. Do grafů byla zanesena teoreticky vypočtená řezná síla počítající s 85 % účinností. Došlo také na porovnání drsnosti obrobeného povrchu v závislosti na opotřebením destičky.

Záznam hodnot na maximální výkon a krouticí moment byl vyhodnocován podobným způsobem. Hodnoty byly přefiltrovány, aby nedocházelo ke zkreslení řezného výkonu a krouticího momentu. Do grafů byla opět zanesen teoreticky vypočítaný výkon a krouticí moment počítající s 85 % účinností.

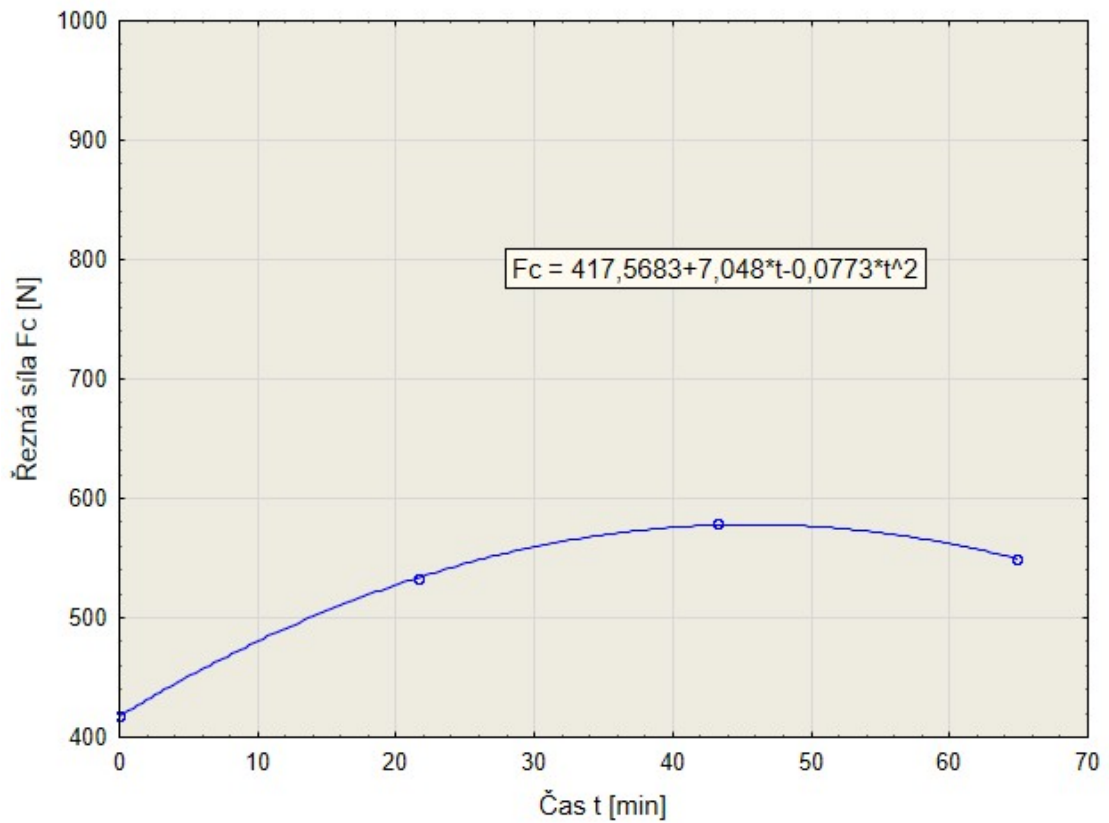
### 6.1 Analýza řezných sil na čase a průběhu opotřebením nástroje

Pro analýzu naměřených řezných sil  $F_c$  a vytvoření časových závislostí při sousledném frézování oceli ČSN 41 2050 byly sestaveny následující grafické závislosti. Byly použity přefiltrované naměřené hodnoty. Z použitých hodnot byly vynechány hodnoty získané při najetí nástroje do obrobku a hodnoty při vyjetí nástroje z obrobku. Kdyby nebyly vynechány, docházelo by ke zkreslení hodnoty řezné síly  $F_c$ . Zároveň by docházelo k velkému výskytu odlehých hodnot, potažmo extrémů (viz obr. 6.2, 6.4, 6.6, 6.8). Krabicové grafy byly doplněny o tabulku hodnot pro ilustrování rozdílů.

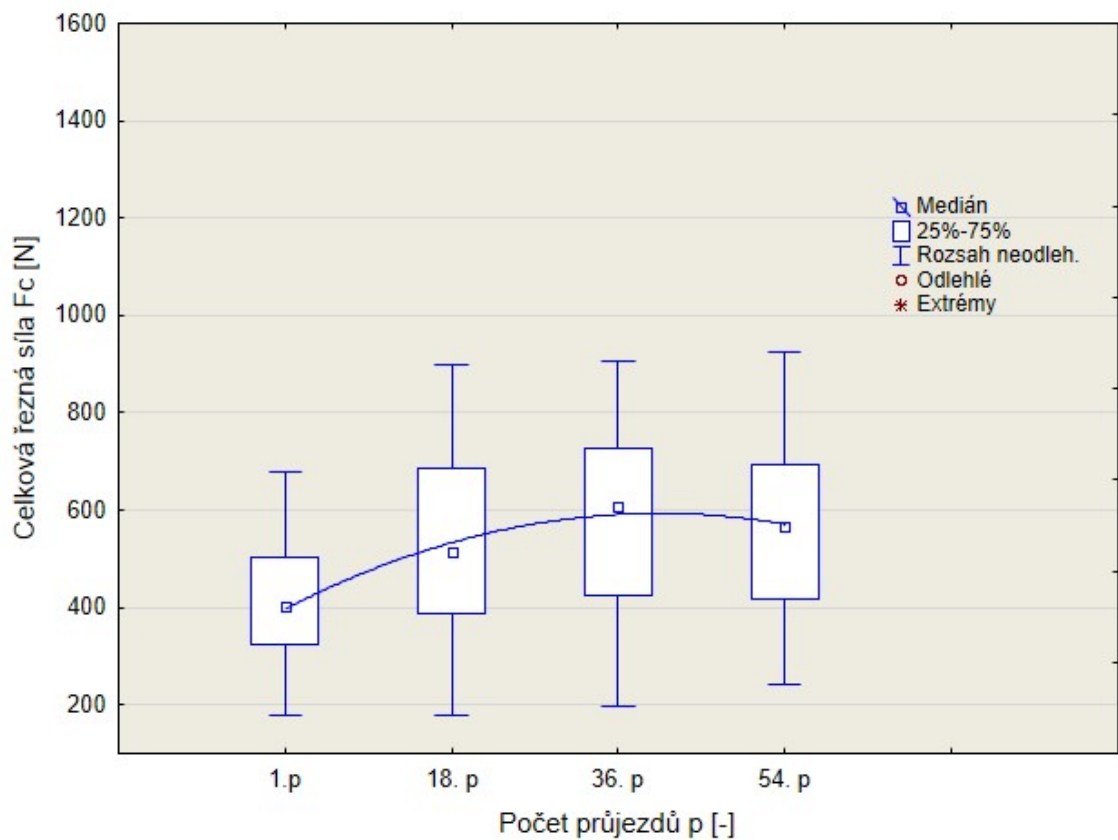
Pro všechny testované nástroje nastal předpokládaný trend, že řezná síla  $F_c$  v průběhu opotřebením má rostoucí charakter. Celkový čas obrábění byl  $t = 64,8$  min, který se rovná 54 průjezdům obráběným materiálem.

Aby bylo možné zjistit velikost působící řezné síly  $F_c$  v závislosti na daném časovém okamžiku, jsou na následujících obrázcích (obr. 6.1, 6.3, 6.5 a 6.7) zobrazeny průměrné hodnoty řezných sil testovaných destiček pro 1., 18., 36., a 54. průjezd.

6.1.1 Pramet



Obr. 6.1 Průměrné hodnoty řezné síly  $F_c$  v závislosti na čase při frézování destičkami od výrobce PRAMET.



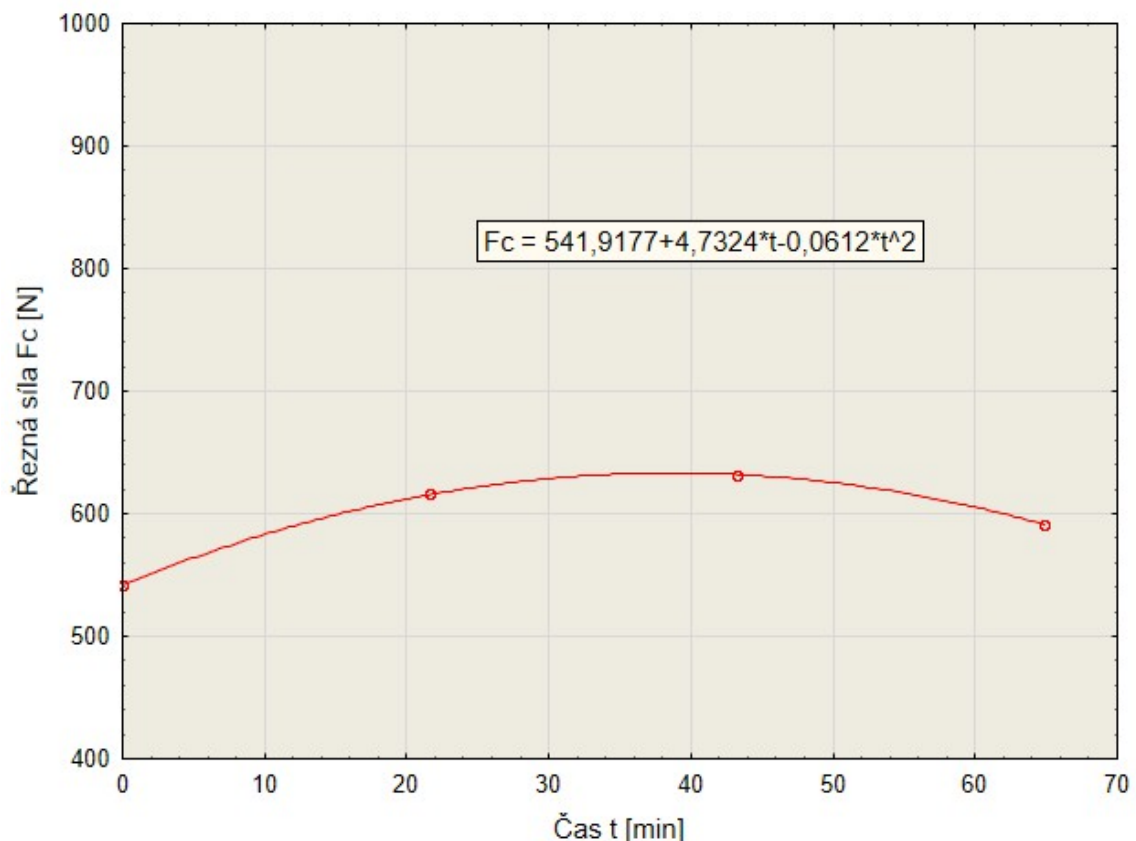
Obr. 6.2 Vývoj řezné síly  $F_c$  s rostoucím opotřebením pro destičky od výrobce PRAMET.

Tab. 6.1 Základní číselné charakteristiky destiček PRAMET.

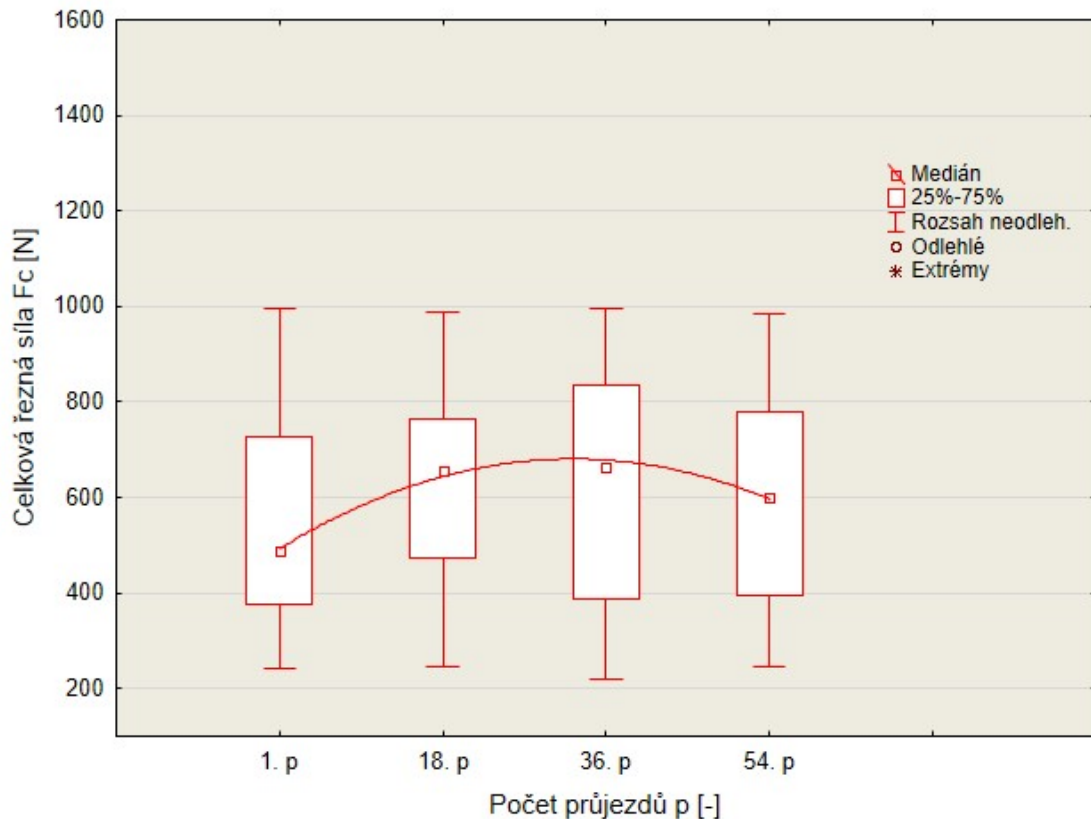
Průjezd	Medián	Průměr	Minimum	Maximum	Směr. Odch.
1	403,03	417,78	176,77	678,80	128,82
18	516,11	533,12	176,77	897,92	178,21
36	608,07	578,43	198,00	904,96	177,08
54	565,61	549,53	240,35	926,19	160,22

U břitové destičky od výrobce PRAMET (obr. 6.1 a 6.2) došlo k předpokládanému stavu, že s rostoucím opotřebením nástroje (zvyšující se počet průjezdů) dochází k nárůstu řezné síly  $F_c$ . Výrazná změna rozsahu neodlehých hodnot nastala v intervalu mezi 1. a 18. průjezdem. Hodnota řezné síly rostla až do 36. průjezdu materiálem, kdy pravděpodobně došlo k vylomení části břitu nebo zbroušení destičky při malém úběru materiálu. Mezi 36. a 54. průjezdem došlo k poklesu mediánových hodnot řezné síly o 7 %. Nárůst mediánní hodnoty řezné síly  $F_c$  mezi 1. a 36. průjezdem je 205,04 N, tj. nárůst o 33,7 %. Odlehle hodnoty se zde nevyskytují.

### 6.1.2 Seco



Obr. 6.3 Průměrné hodnoty řezné síly  $F_c$  v závislosti na čase při frézování destičkami od výrobce SECO.

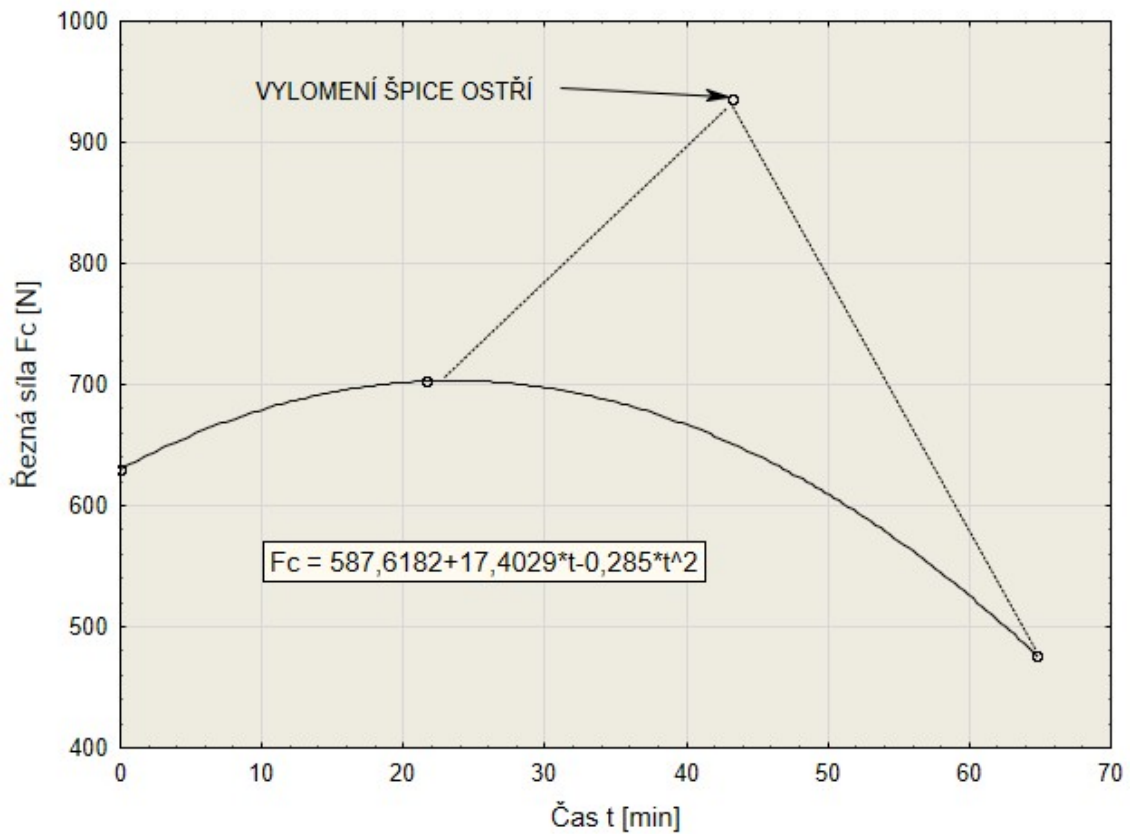

 Obr. 6.4 Vývoj řezné síly  $F_c$  s rostoucím opotřebením pro destičky od výrobce SECO.

Tab. 6.2 Základní číselné charakteristiky destiček SECO.

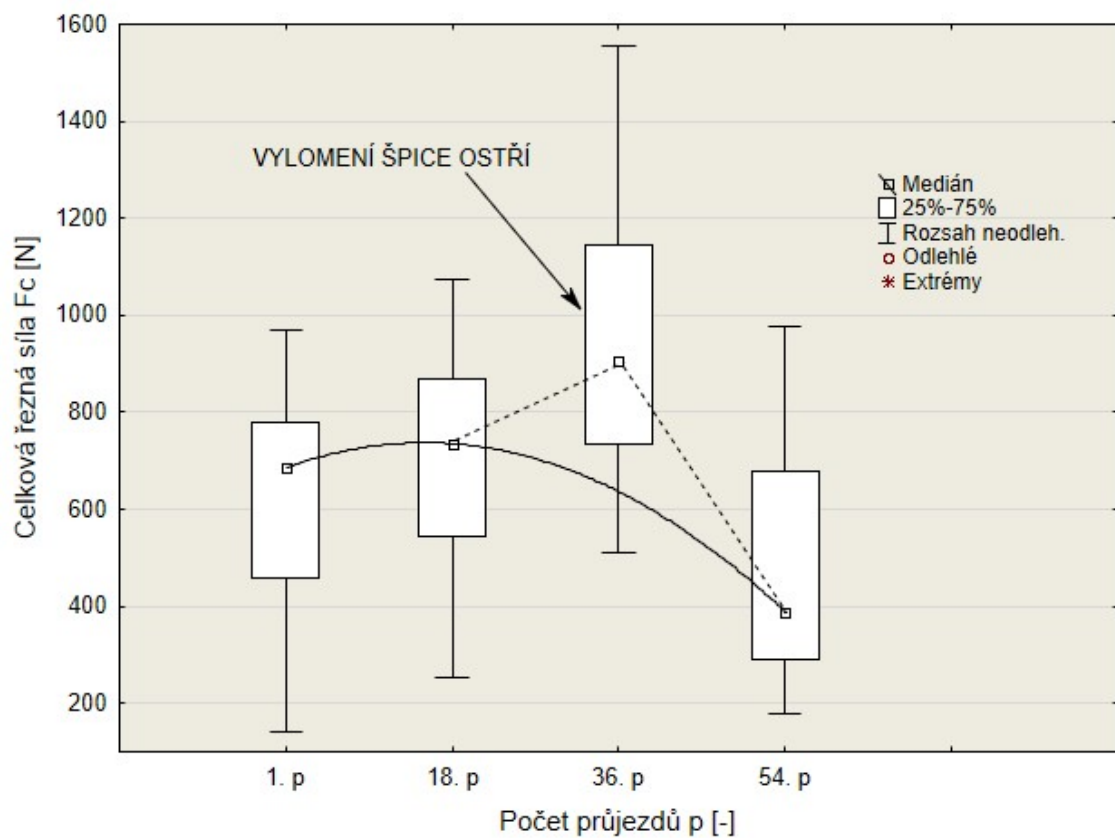
Průjezd	Medián	Průměr	Minimum	Maximum	Směr. Odch
1	487,95	541,61	240,35	996,92	198,57
18	657,57	616,49	247,39	989,87	181,67
36	664,61	631,12	219,23	996,92	220,78
54	601,03	591,71	247,50	982,83	204,21

Na obr. 6.3 a 6.4 je možné pozorovat průběh řezné síly břitové destičky od výrobce SECO. Opět došlo k předpokládanému stavu, že s rostoucím opotřebením nástroje dochází k nárůstu řezné síly  $F_c$ . Rozsah neodlehých hodnot byl u všech záznamů průjezdů skoro stejný. Hodnota řezné síly po 36. průjezdu klesá. Je možné předpokládat, že došlo k vylomení části břitu nebo zbroušení destičky při malém úběru materiálu. Pokles mediánových hodnot řezné síly mezi 36. a 54. průjezdem je 9,6 %. Nárůst mediánní hodnoty řezné síly  $F_c$  mezi 1. a 36. průjezdem je 176,66 N, tj. nárůst o 26,6 %. Odlehle hodnoty se zde nevyskytují.

6.1.3 Iscar



Obr. 6.5 Průměrné hodnoty řezné síly  $F_c$  v závislosti na čase při frézování destičkami od výrobce ISCAR.



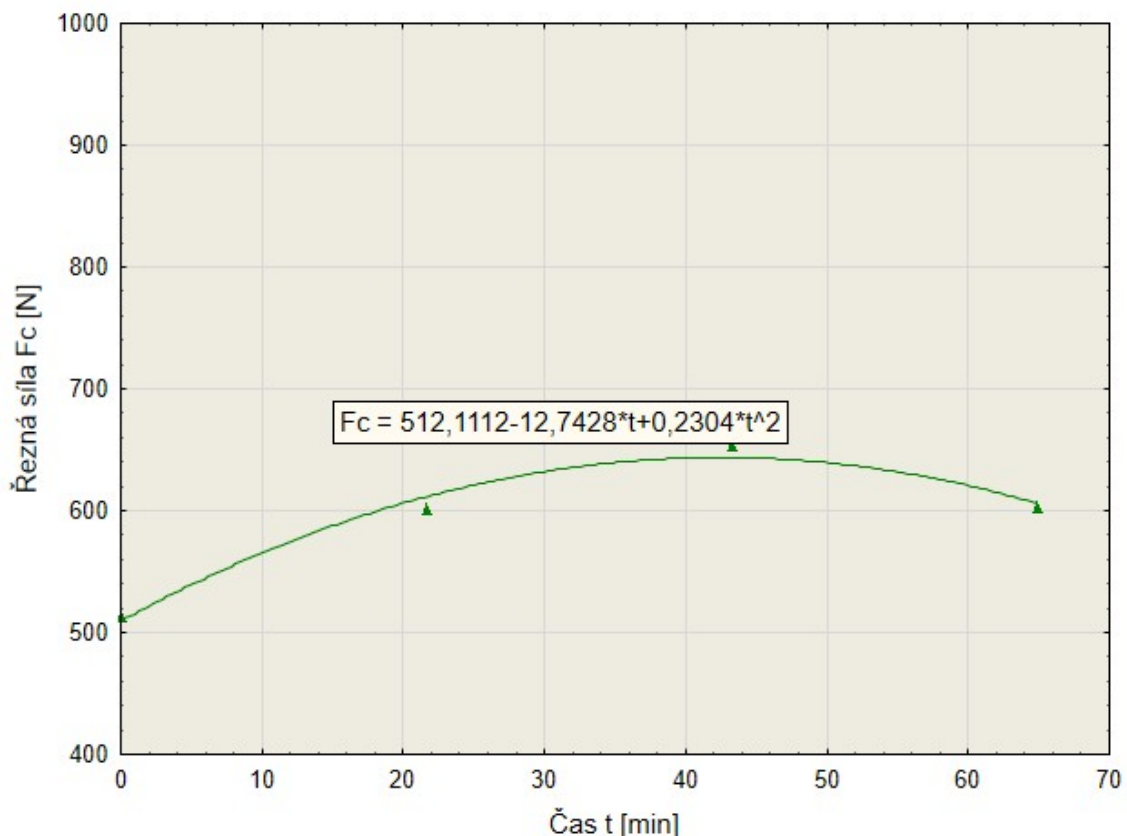
Obr. 6.6 Vývoj řezné síly  $F_c$  s rostoucím opotřebením pro destičky od výrobce ISCAR.

Tab. 6.3 Základní číselné charakteristiky destiček ISCAR.

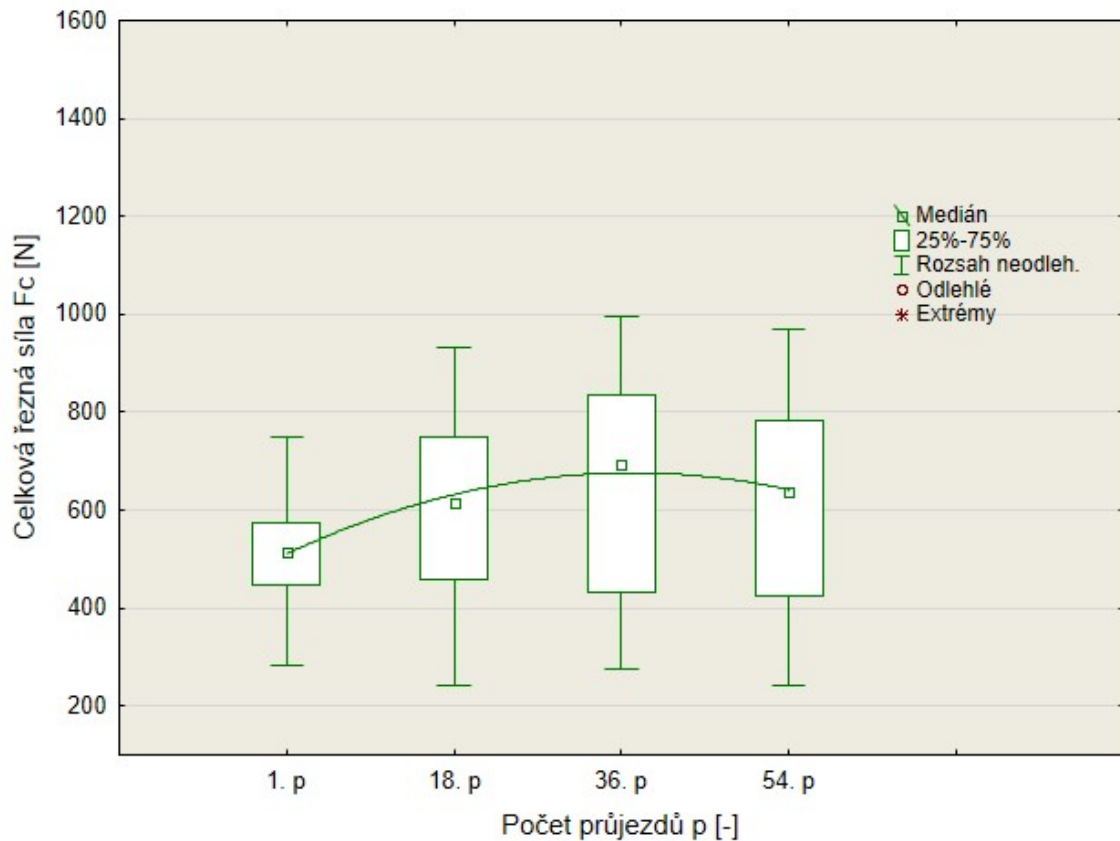
Průjezd	Medián	Průměr	Minimum	Maximum	Směr. Odch
1	685,84	630,20	141,46	968,65	176,72
18	735,34	702,81	42,46	1074,68	209,32
36	905,07	935,28	509,07	1555,49	247,06
54	388,84	476,00	176,77	975,79	235,55

Na obr. 6.5 a 6.6 je možné pozorovat průběh řezné síly břitové destičky od výrobce ISCAR. Opět došlo k předpokládanému stavu, že s rostoucím opotřebením nástroje dochází k nárůstu řezné síly  $F_c$ . Při 18. průjezdu byl změřen silový záznam, opotřebenění a drsnost. Následně byla destička otočena a pokračovalo se v intervalu (1. - 36. průjezd). Při 16. průjezdu došlo k jiskření mezi destičkou a obrobkem. Následné vylomení špičky a části břitu nástroje lze vidět na obr. 6.19. Z tohoto důvodu je záznam hodnot řezné síly při 36. průjezdu znatelně vyšší než při ostatních průjezdech. Do grafu byl zanesen a spojen s ostatními hodnotami čárkovanou čarou. Průměrné hodnoty řezné síly  $F_c$  ostatních průjezdů byly proloženy polynomem druhého stupně. Z měření při 54. průjezdu je možné pozorovat razantní pokles řezné síly. Nárůst mediánní hodnoty řezné síly  $F_c$  mezi 1. a 36. průjezdem je 219,23 N, tj. nárůst o 24,2 %.

#### 6.1.4 Korloy



Obr. 6.7 Průměrné hodnoty řezné síly  $F_c$  v závislosti na čase při frézování destičkami od výrobce KORLOY.


 Obr. 6.8 Vývoj řezné síly  $F_c$  s rostoucím opotřebením pro destičky od výrobce KORLOY.

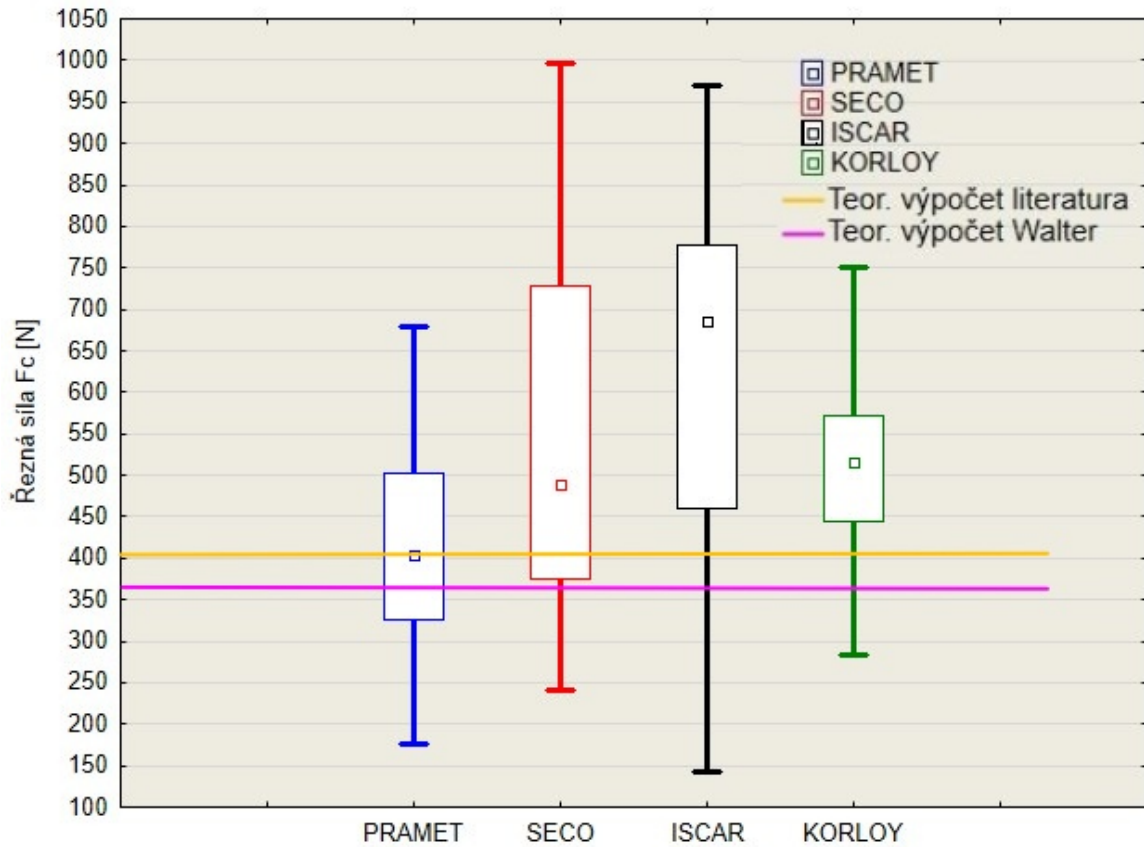
Tab. 6.4 Základní číselné charakteristiky destiček KORLOY.

Průjezd	Medián	Průměr	Minimum	Maximum	Směr. Odch.
1	516,11	512,77	282,81	749,53	98,92
18	615,11	601,55	240,46	933,34	182,72
36	692,99	653,38	275,66	996,92	207,45
54	636,34	603,21	240,35	968,65	195,23

Na obr. 6.7 a 6.8 je možné pozorovat průběh řezné síly břitové destičky od výrobce KORLOY. Opět došlo k předpokládanému stavu, že s rostoucím opotřebením nástroje dochází k nárůstu řezné síly  $F_c$ . Výrazná změna rozsahu neodlehlých hodnot nastala v intervalu mezi 1. a 18. průjezdem. Hodnota řezné síly po 36. průjezdu klesá. Je možné předpokládat, že došlo k vylomení části břitu nebo zbroušení destičky při malém úběru materiálu. Pokles mediánových hodnot řezné síly mezi 36. a 54. průjezdem je 8,2 %. Nárůst mediánní hodnoty řezné síly  $F_c$  mezi 1. a 36. průjezdem je 176,88 N, tj. nárůst o 25,5 %. Odlehlé hodnoty se zde nevyskytují.

Na (obr. 6.1, 6.3, 6.5 a 6.7) jsou zobrazeny regresivní rovnice, které ve všech případech představují polynom druhého stupně. Pomocí regresivních rovnic lze při daném časovém okamžiku zjistit průměrnou hodnotu řezné síly  $F_c$  se spolehlivostí  $R^2$ .

Na obr. 6.9 jsou zaneseny do grafu hodnoty řezných sil  $F_c$  při 1. průjezdu. Zároveň je do grafu zanesena teoreticky vypočítaná hodnota řezné síly  $F_c$  potřebná pro obrobení materiálu za daných podmínek. Teoreticky spočítaná řezná síla podle odborné literatury  $F_c = 402,9$  N. Teoreticky spočítaná řezná síla podle metodiky firmy Walter  $F_c = 377,1$  N.



Obr. 6.9 Porovnání řezné síly  $F_c$ .

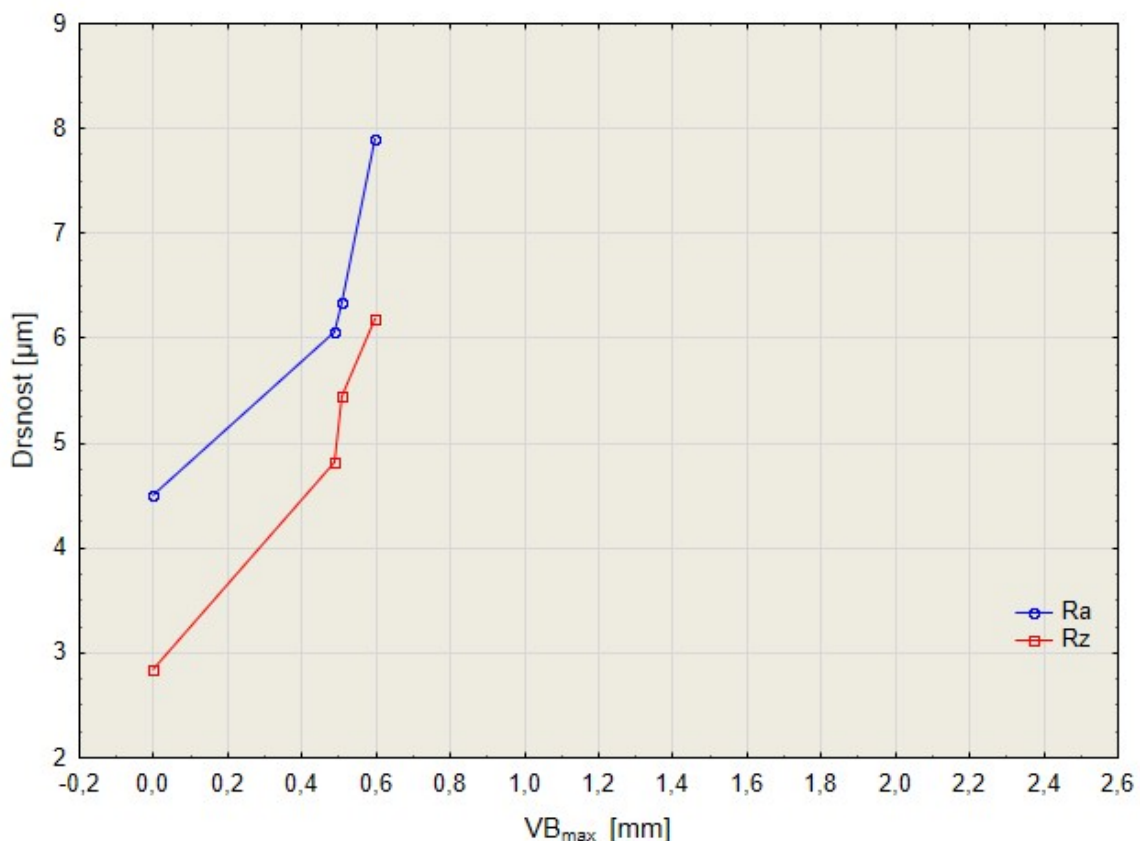
## 6.2 Opotřebení testovaných řezných nástrojů

Mimo měření silového zatížení bylo měřeno také opotřebení na hřbetě tzv. kritérium VB. Měření probíhalo na optickém měřidle Alicona InfiniteFocus ve společnosti Intemac Solutions s.r.o., po 18., 36., a 54. průjezdu. Ze získaných hodnot byly sestaveny grafické závislosti opotřebení VB.

Standartním postupem je určení hodnoty kritéria opotřebení na hřbetě VB a ve chvíli, kdy je této hodnoty dosaženo, je řezný nástroj vyhodnocen jako opotřebený. V případě provedených řezných zkoušek byl postup opačný vzhledem k nedostatku materiálu a času určeného pro testování. První byl určen počet průjezdů, které je možné s daným množstvím materiálu a VBD vykonat. Po provedení všech průjezdů pro každou VBD bylo změřeno a nafoceno opotřebení na hřbetě. Pro všechny VBD je tedy čas, který byla VBD v záběru stejný a liší se jen opotřebení na konci řezných zkoušek.

Po 1., 18., 36., a 54. průjezdu byla na třech místech obrobku změřena drsnost.

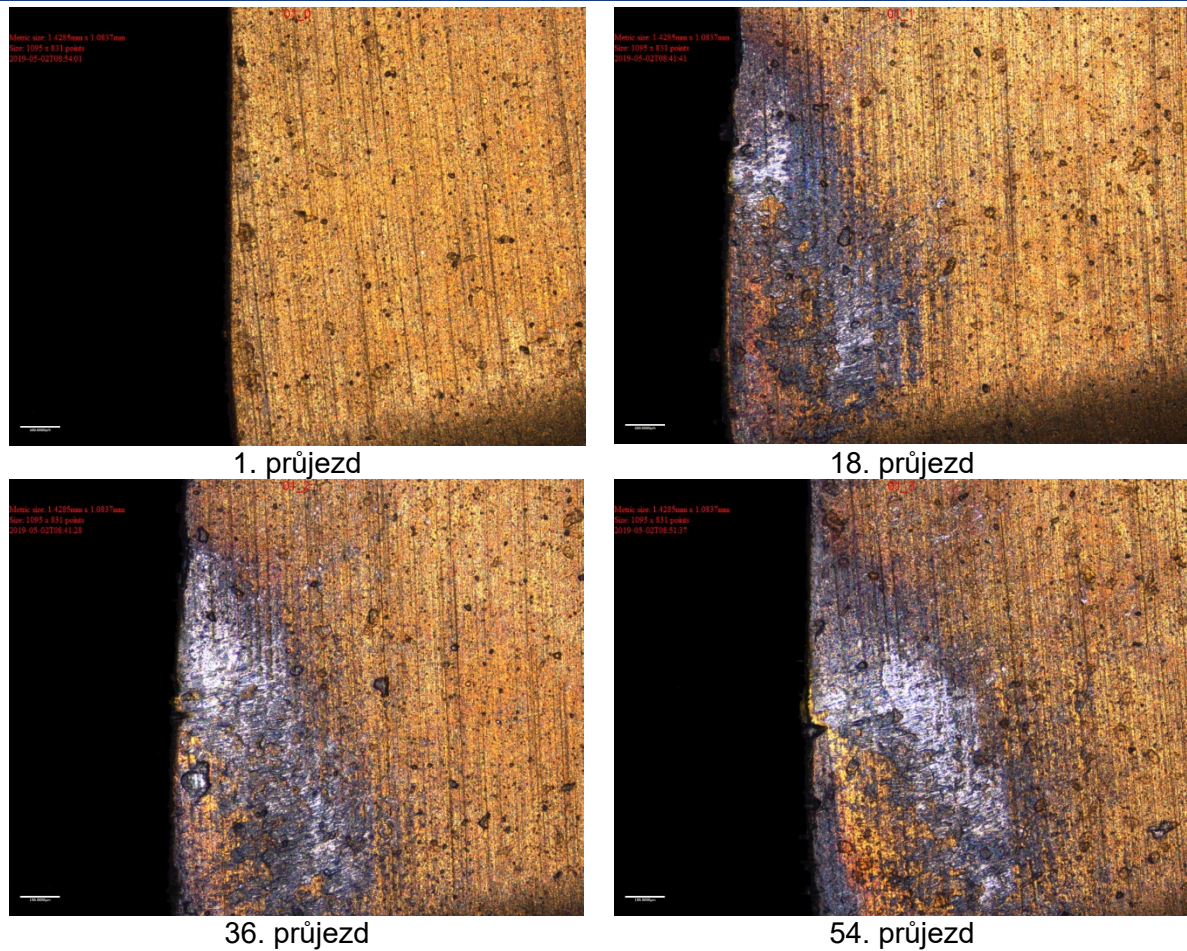
### 6.2.1 Pramet



Obr. 6.10 Průběhy jednotlivých parametrů drsnosti pro VBD od výrobce PRAMET.

Tab. 6.5 Hodnoty drsnosti a opotřebení VBD od výrobce PRAMET.

Průjezd	Ra [μm]	Ra <sub>max</sub> [μm]	Rz [μm]	VB [mm]	VB <sub>max</sub> [mm]
1	0,450	4,507	2,847	0,000	0,000
18	0,940	6,057	4,823	0,259	0,487
36	1,067	6,333	5,443	0,269	0,508
54	0,887	7,893	6,190	0,303	0,597



Obr. 6.11 Opotřebení destičky PRAMET po 1., 18., 36., 54. průjezdu.

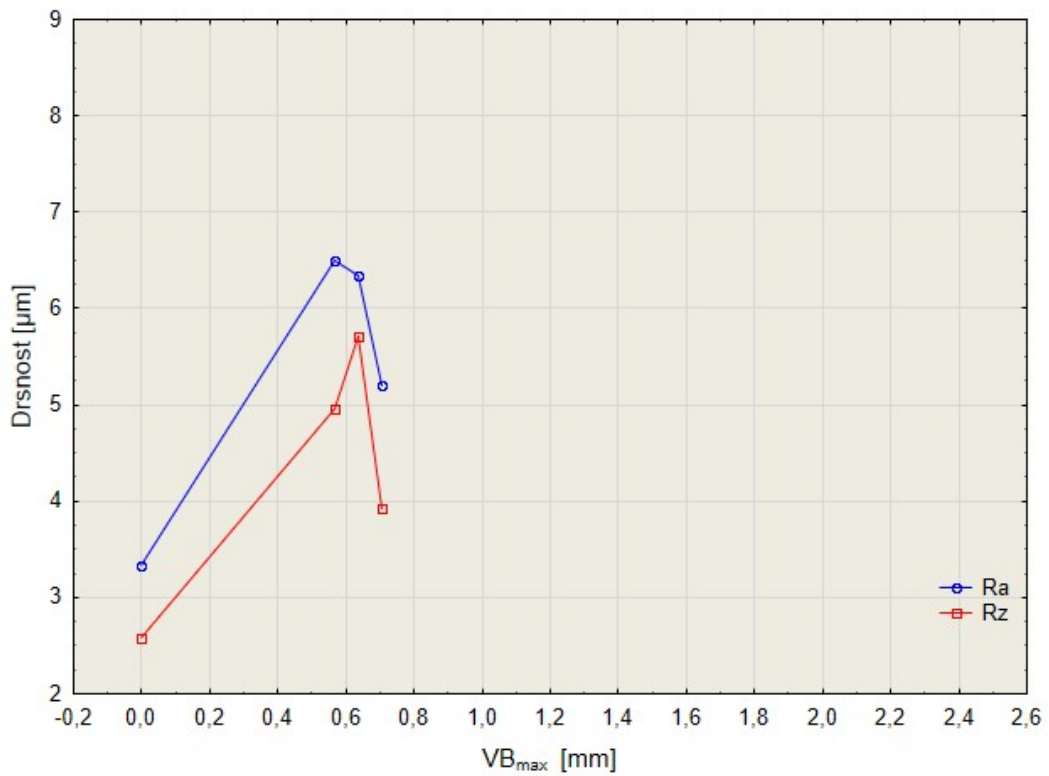
Na obr. 6.10 je možné sledovat rostoucí drsnost v závislosti na rostoucím opotřebení. V tab. 6.5 jsou uvedené základní charakteristiky drsnosti, které jsou vždy průměrnými hodnotami ze tří provedených měření obrobené plochy. V tabulce je také možné najít hřbetní opotřebení  $VB$  a  $VB_{max}$ . Na obr. 6.11 je možné pozorovat narůstající opotřebení hřbetu destiček. Vznikající křehké porušení řezné hrany lze pozorovat na snímku po 54. průjezdu, kdy dochází k postupnému vylamování břitu. Ze snímků lze vidět, že hlavním mechanismem opotřebení byla abraze a adheze. Dále lze sledovat, že docházelo k odstraňování naneseného povlaku.

Na obr. 6.12 je možné vidět smotanou třísku vzniklou frézováním.



Obr. 6.12 Tříška vzniklá frézováním destičkami PRAMET.

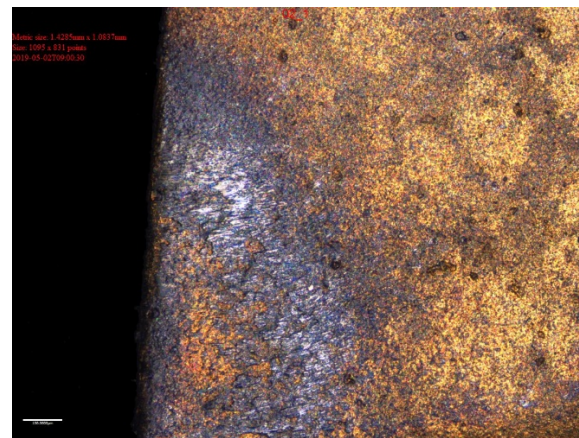
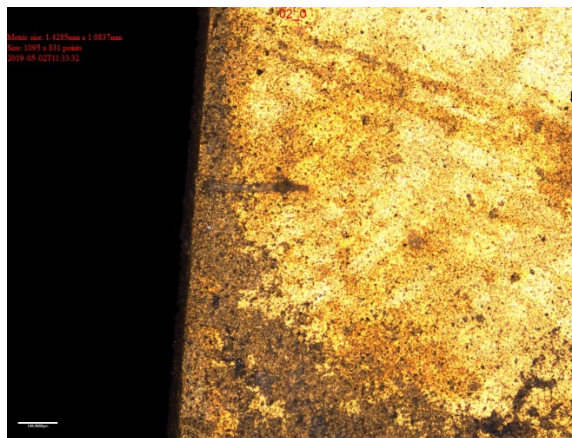
6.2.2 Seco



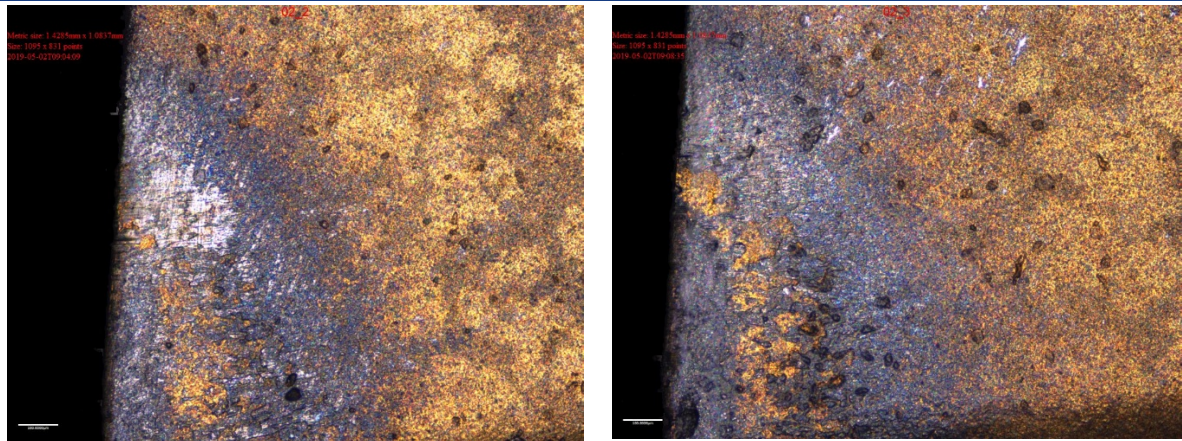
Obr. 6.13 Průběhy jednotlivých parametrů drsnosti pro VBD od výrobce SECO.

Tab. 6.6 Hodnoty drsnosti a opotřebení VBD od výrobce SECO.

Průjezd	Ra [µm]	Ra <sub>max</sub> [µm]	Rz [µm]	VB [mm]	VB <sub>max</sub> [mm]
1	0,397	3,337	2,583	0,000	0,000
18	0,833	6,500	4,960	0,295	0,567
36	1,160	6,343	5,707	0,319	0,637
54	0,560	5,207	3,923	0,355	0,703



1. průjezd  
18. průjezd  
Obr. 6.14 Opatření destičky SECO po 1., 18. průjezdu.



36. průjezd

54. průjezd

Obr. 6.15 Opotřebení destičky SECO po 36., 54. průjezdu.

Na obr. 6.13 je možné sledovat rostoucí drsnost v závislosti na rostoucím opotřebení. Drsnost povrchu materiálu po 54. průjezdu je lepší než drsnost po 36. průjezdu při narůstajícím opotřebení destiček. Tento jev nejspíše nastal vylomením části břitu (špičky) nebo zbrúšením destičky. Zbrúšená destička materiál leštíla.

V tab. 6.6 jsou uvedené základní charakteristiky drsnosti, které jsou vždy průměrnými hodnotami ze tří provedených měření obrobené plochy. V tabulce je také možné najít hřbetní opotřebení  $VB$  a  $VB_{max}$ .

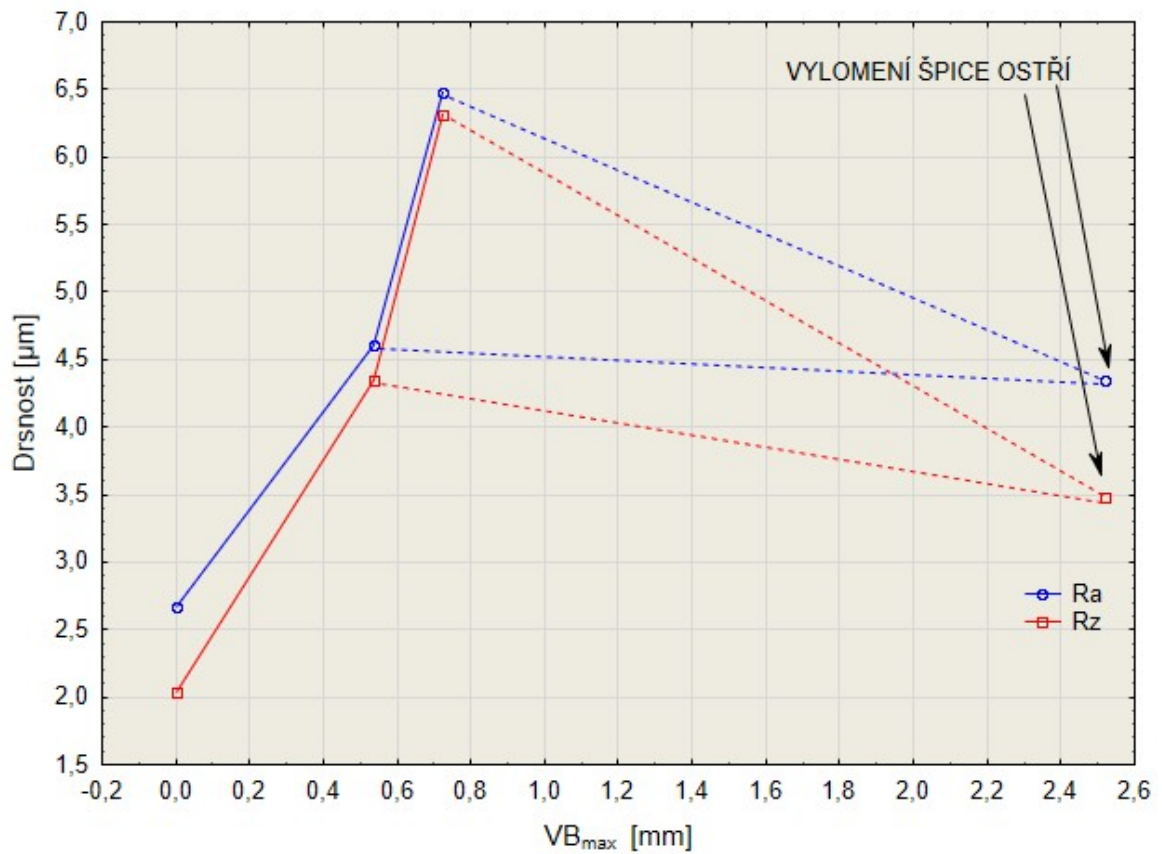
Na obr. 6.14 a 6.15 je možné pozorovat narůstající opotřebení hřbetu destiček. Částečnou plastickou deformaci lze pozorovat na snímku po 54. průjezdu. Ze snímků lze vidět, že hlavním mechanismem opotřebení byla abraze a adheze. Dále lze sledovat, že docházelo k odstraňování naneseného povlaku.

Na obr. 6.12 je možné vidět smotanou třísku vzniklou frézováním.



Obr. 6.16 Tříška vzniklá frézováním destičkami SECO.

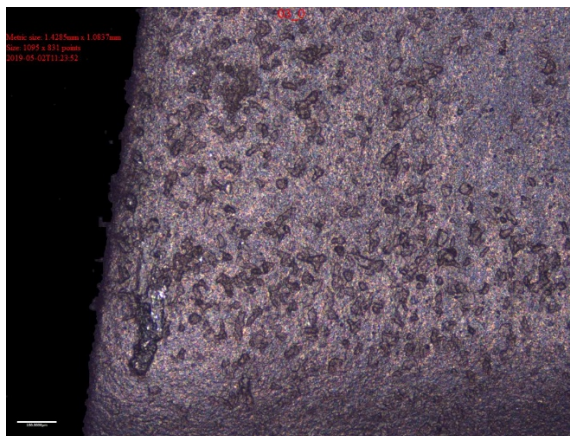
6.2.3 Iscar



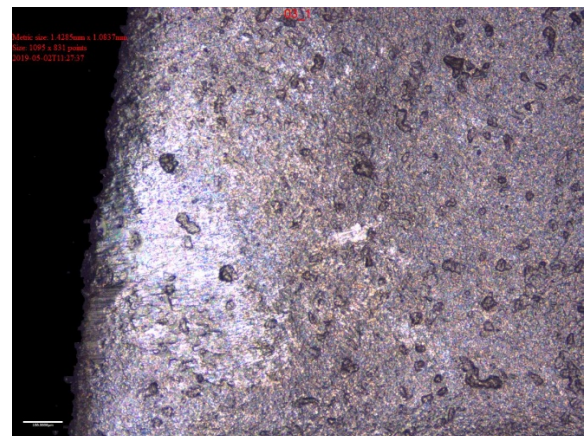
Obr. 6.17 Průběhy jednotlivých parametrů drsnosti pro VBD od výrobce ISCAR.

Tab. 6.7 Hodnoty drsnosti a opotřebení VBD od výrobce ISCAR.

Průjezd	Ra [ $\mu m$ ]	Ra <sub>max</sub> [ $\mu m$ ]	Rz [ $\mu m$ ]	VB [mm]	VB <sub>max</sub> [mm]
1	0,347	2,663	2,030	0,000	0,000
18	1,010	4,603	4,343	0,297	0,537
36	0,540	4,343	3,483	1,757	2,519
54	1,587	6,473	6,317	0,339	0,725

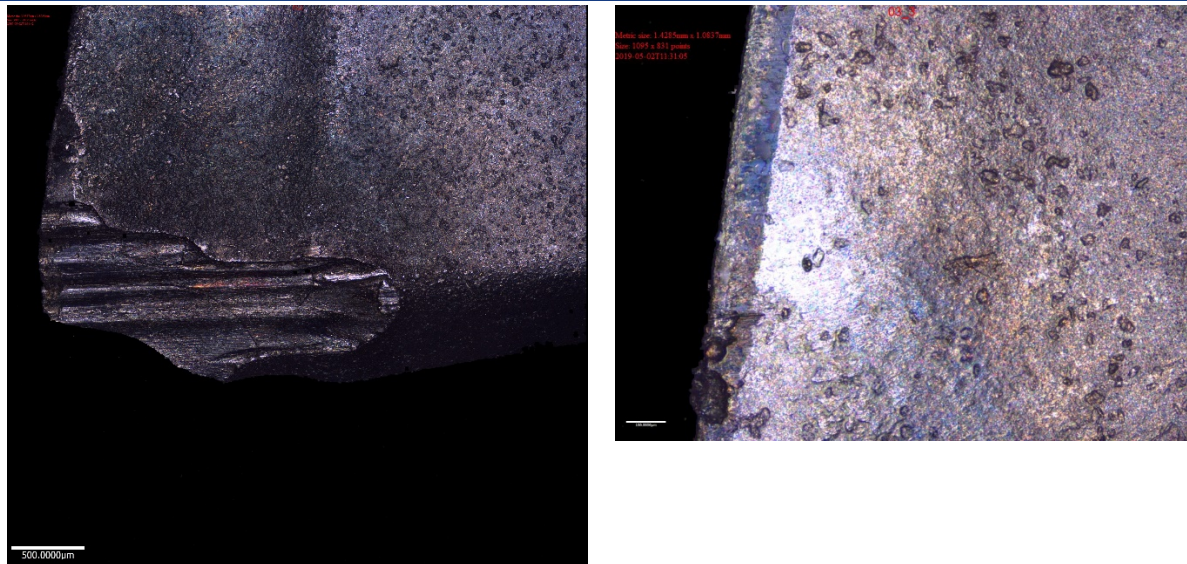


1. průjezd



18. průjezd

Obr. 6.18 Opotřebení destičky ISCAR po 1., 18. průjezdu.



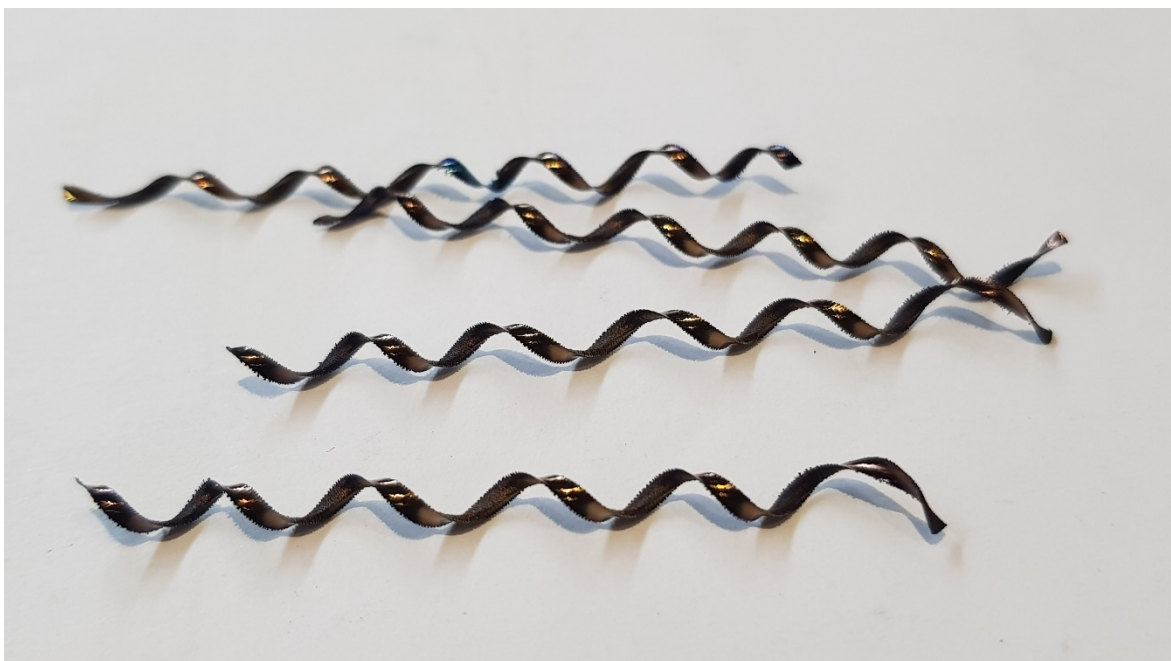
36. průjezd  
54. průjezd  
Obr. 6.19 Opotřebení destičky ISCAR po 36., 54. průjezdu.

Na obr. 6.17 je možné sledovat prudce rostoucí drsnost v závislosti na rostoucím opotřebení. Při 16. průjezdu v intervalu (1. – 36. průjezd) došlo k plastické deformaci špičky rezného nástroje a vylomení části břitu nástroje. Z tohoto důvodu je drsnost povrchu po 36. průjezdu lepší nežli po 18. průjezdu. Hodnota drsnosti po 36. průjezdu byla do grafu zanesena a spojnice naznačena čárkovanou čarou.

V tab. 6.7 jsou uvedené základní charakteristiky drsnosti, které jsou vždy průměrnými hodnotami ze tří provedených měření obrobenej plochy. V tabulce je také možné najít hřbetní opotřebení  $VB$  a  $VB_{max}$ .

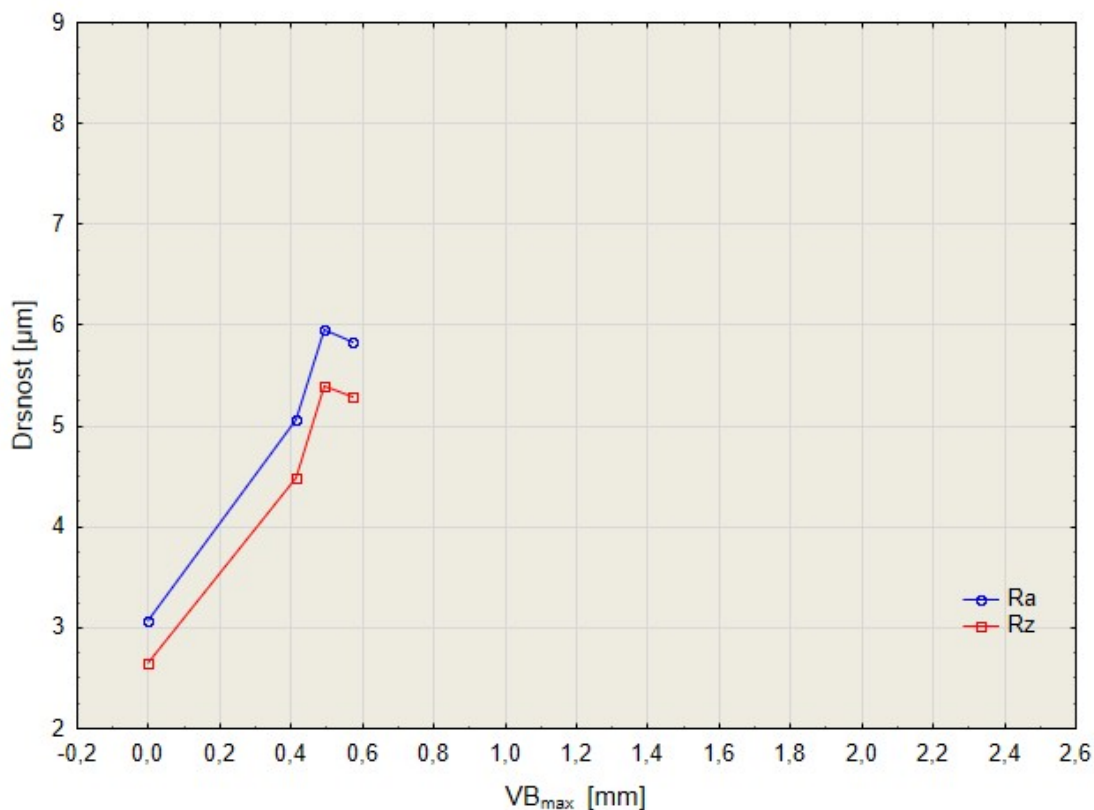
Na obr. 6.18 a 6.19 je možné pozorovat narůstající opotřebení hřbetu destiček. Plastickou deformaci špičky rezného nástroje lze pozorovat na snímku po 36. průjezdu. Na snímku po 54. průjezdu lze vidět křehké porušení rezné hrany. Hlavním mechanismem opotřebení byla abraze.

Na obr. 6.20 je možné vidět šroubovou třísku vzniklou frézováním.



Obr. 6.20 Tříska vzniklá frézováním destičkami ISCAR.

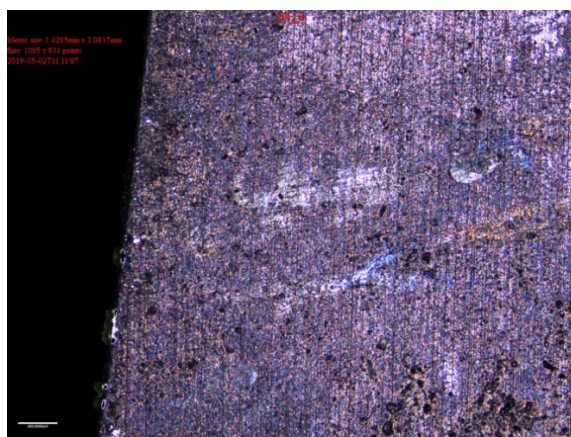
## 6.2.4 Korloj



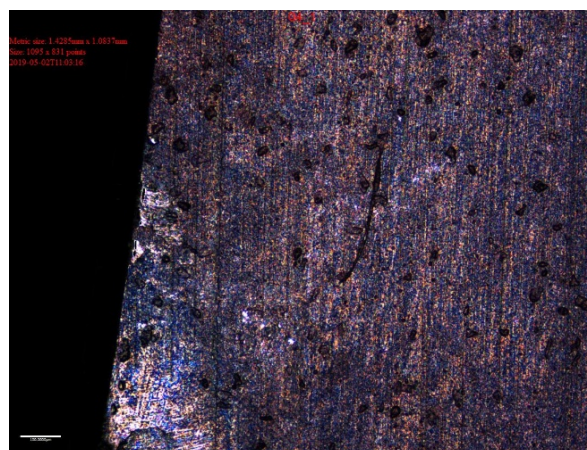
Obr. 6.21 Průběhy jednotlivých parametrů drsnosti pro VBD od výrobce KORLOY.

Tab. 6.8 Hodnoty drsnosti a opotřebení VBD od výrobce KORLOY.

Průjezd	Ra [μm]	Ra <sub>max</sub> [μm]	Rz [μm]	VB [mm]	VB <sub>max</sub> [mm]
1	0,510	3,067	2,650	0,000	0,000
18	0,817	5,067	4,483	0,236	0,415
36	0,883	5,960	5,397	0,298	0,491
54	0,883	5,830	5,293	0,327	0,573

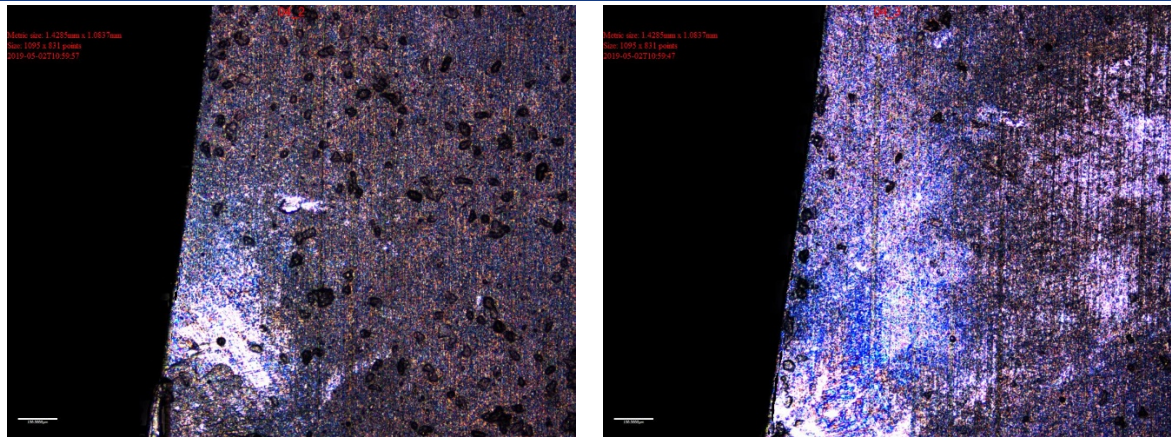


1. průjezd



18. průjezd

Obr. 6.22 Opotřebení destičky KORLOY po 1., 18. průjezdu.



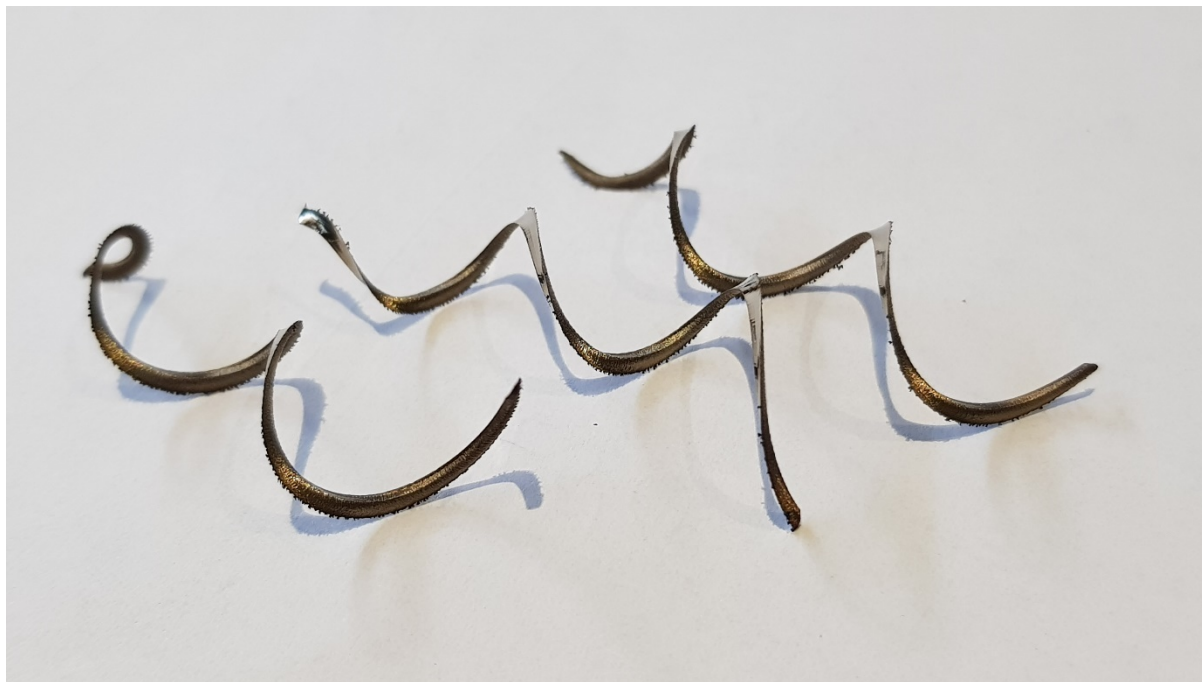
36. průjezd  
54. průjezd  
Obr. 6.23 Opotřebenění destičky KORLOY po 36., 54. průjezdu.

Na obr. 6.21 je možné sledovat rostoucí drsnost v závislosti na rostoucím opotřebením. Drsnost povrchu materiálu po 54. průjezdu je lepší než drsnost po 36. průjezdu při narůstajícím opotřebením destiček. Tento jev nejspíše nastal vylomením části břitu (špičky) nebo zbrúšením destičky. Z grafu je možné usuzovat, že k vylomení části břitu (špičky) nebo zbrúšením destičky došlo těsně před 54. průjezdem, protože hodnoty klesly o malou hodnotu.

V tab. 6.8 jsou uvedené základní charakteristiky drsnosti, které jsou vždy průměrnými hodnotami ze tří provedených měření obrobené plochy. V tabulce je také možné najít hřbetní opotřebenění  $VB$  a  $VB_{max}$ .

Na obr. 6.22 a 6.23 je možné pozorovat křehké porušení řezné hrany po 18. a 54. průjezdu. Ze snímků lze vidět, že hlavním mechanismem opotřebením byla abraze a adheze.

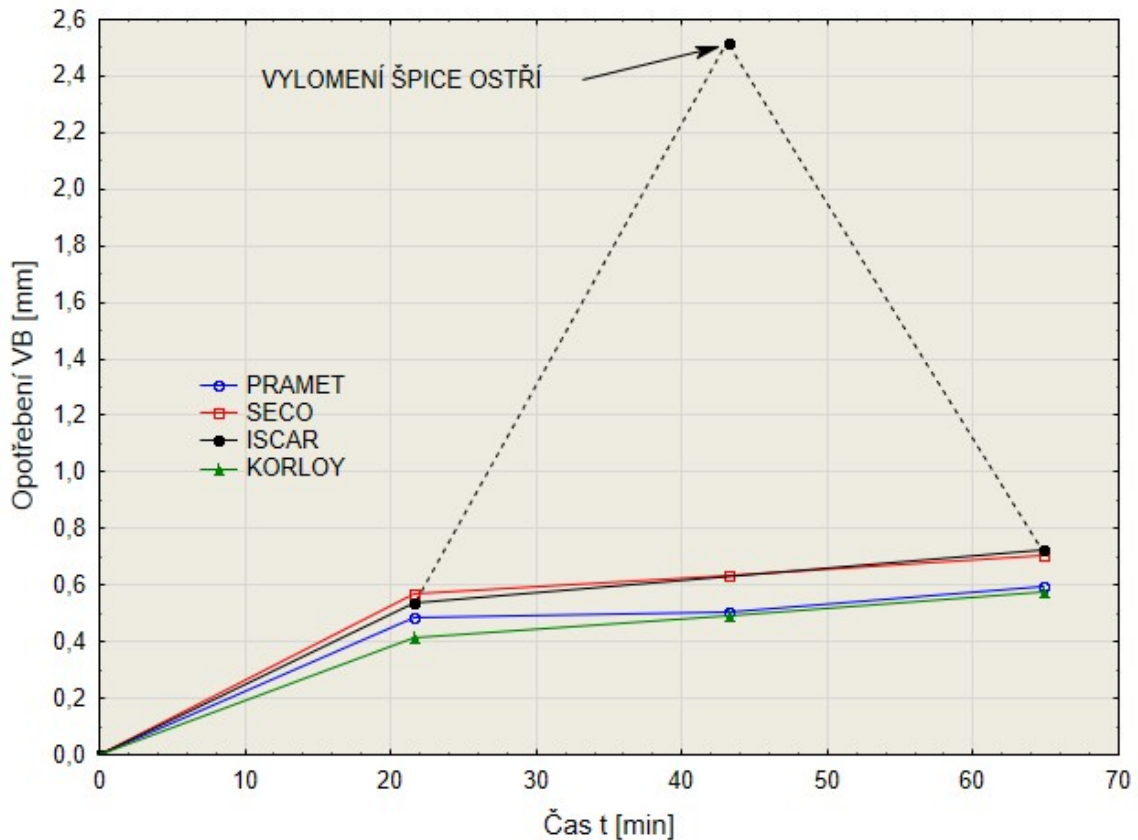
Na obr. 6.24 je možné vidět smotanou třísku vzniklou frézováním.



Obr. 6.24 Tříska vzniklá frézováním destičkami ISCAR.

Na obr. 6.25 jsou znázorněny hodnoty opotřebení podle kritéria VB pro všechny testované nástroje. Nejnižší hodnoty VB po skončení testování dosáhl nástroj od výrobce KORLOY s povlakem TiAlN následovaný nástrojem od výrobce PRAMET s povlakem TiN. Naopak nejvyšší hodnoty dosáhl nástroj od výrobce ISCAR s povlakem TiAlN následovaný nástrojem od výrobce SECO s TiN povlakem.

Nejlepší průměrné hodnoty drsnosti povrchu dosáhl nástroj od výrobce KORLOY následovaný nástrojem od výrobce ISCAR. Nejhorší průměrné hodnoty drsnosti povrchu dosáhl nástroj od výrobce PRAMET následovaný nástrojem od výrobce SECO.



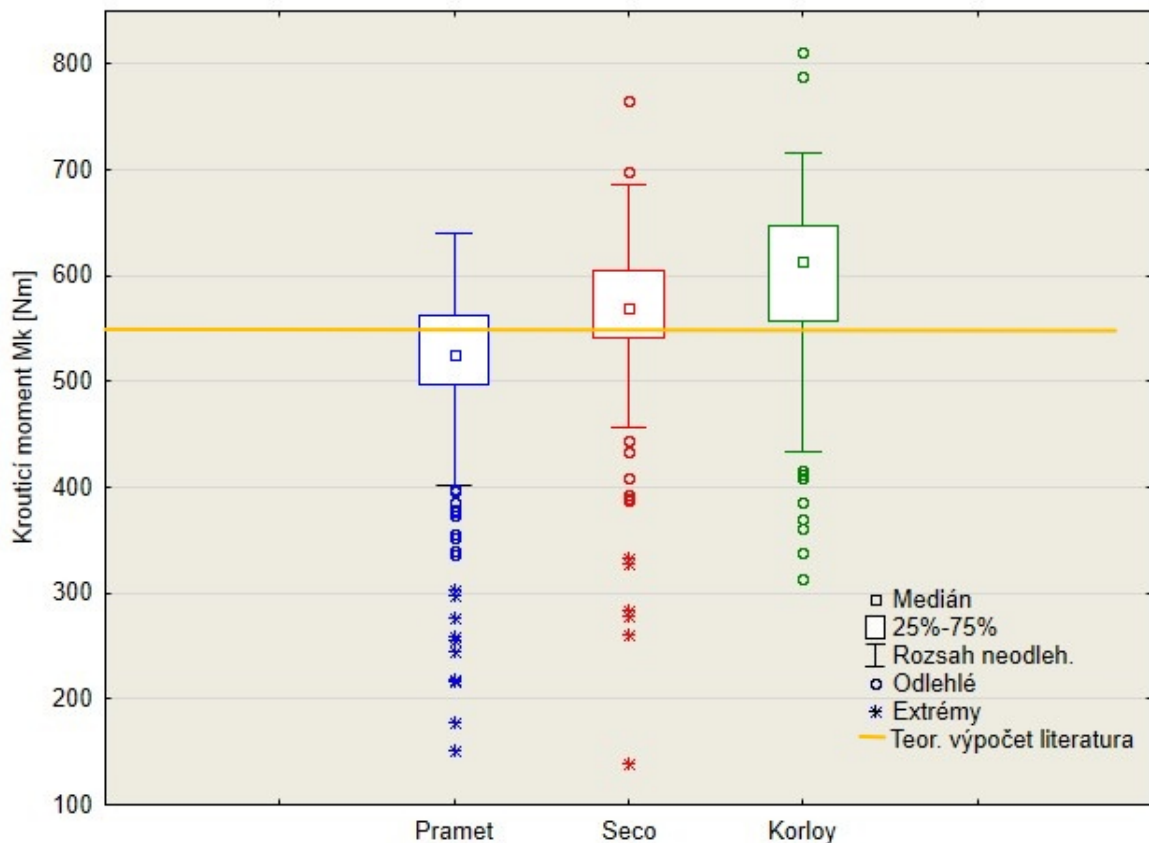
Obr. 6.25 Průběhy opotřebení VB pro všechny testované nástroje.

### 6.3 Vyhodnocení destiček na maximální kroucí moment a výkon

Posledním testem vyměnitelných břitových destiček byl test na maximální kroucí moment a maximální výkon. Zvolené řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 5.12 až 5.15 v kapitole 5.6. Řezné podmínky byly zvoleny na samotné hranici předepsaných řezných podmínek od výrobců.

Výpočet kroucího momentu a potřebného řezného výkonu byl proveden pro polohu nástroje kdy je silové zatížení největší.

Při testech s destičkami od výrobce Iscar docházelo k natavování materiálu na destičky. Řezné podmínky byly z tohoto důvodu upraveny. Záznam hodnot byl následně vyhodnocován samostatně.

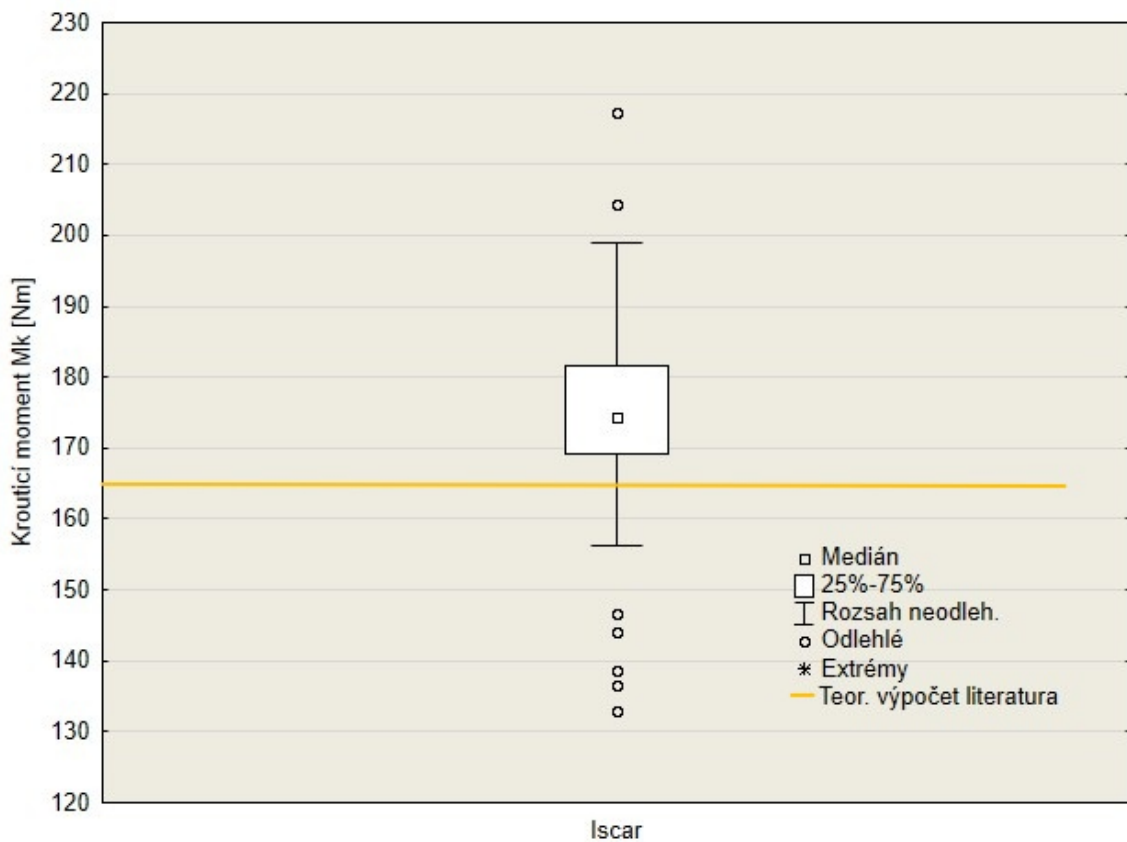


Obr. 6.26 Záznam kroucího momentu od destiček Pramet, Seco, Korloy.

Tab. 6.9 Základní charakteristiky hodnot kroucího momentu destiček.

Výrobce	Medián	Průměr	Minimum	Maximum	Směr. Odch
Pramet	525,77	505,84	215,93	616,15	74,37
Seco	568,70	579,72	457,48	685,97	46,23
Korloy	614,15	603,57	408,77	706,05	60,38

Na obr. 6.26 lze vidět porovnání krouticího momentu při obrábění s destičkami od výrobce Pramet, Seco a Korloy. Nejmenší krouticí moment vykazuje břitová destička od výrobce Pramet. Nejmenší krouticí moment znamená nejmenší příkon z elektrické sítě. Je tedy možné stanovit, že pro zvolené řezné podmínky je nejekonomičtější varianta vyměnitelná břitová destička od výrobce Pramet. Důležitým parametrem na posouzení vhodného nástroje je také opotřebení destiček. Vyměnitelná břitová destička od výrobce Pramet obráběla s nejmenším krouticím momentem, ale mohla mít větší opotřebení. Bohužel z důvodu omezeného prostoru nebylo opotřebení změřeno. Teoreticky spočítaný potřebný krouticí moment s tabulkovou účinností 85 % je  $M_k = 544 \text{ Nm}$ . Naměřené hodnoty břitové destičky od firmy Korloy nevykazují extrémní hodnoty. Mediánní hodnota VBD od výrobce Pramet je o 14 % nižší než mediánní hodnota VBD od výrobce Korloy, která v tomto testu vyšla nejhůř.

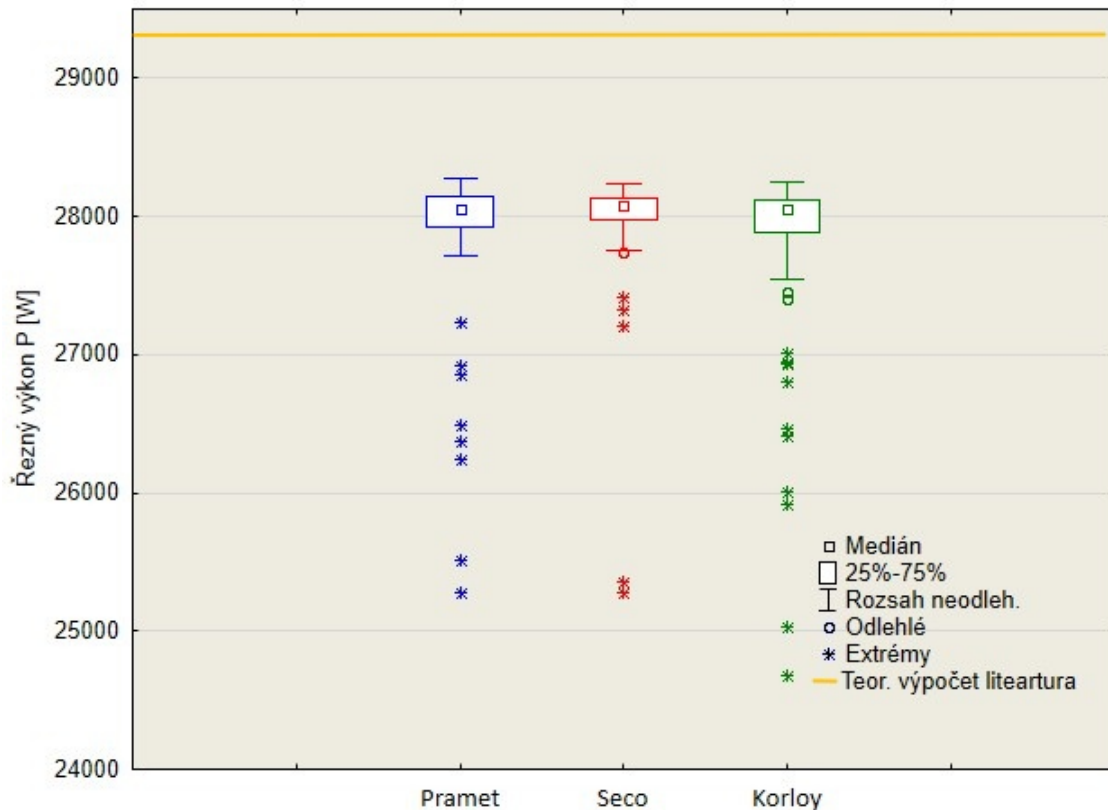


Obr. 6.27 Záznam krouticího momentu od destičky Iscar.

Tab. 6.10 Základní charakteristiky hodnot krouticího momentu destičky.

Výrobce	Medián	Průměr	Minimum	Maximum	Směr. Odch
Iscar	174,25	175,77	156,18	204,38	9,39

Na obr. 6.27 je možné vidět krabicový graf hodnot krouticího momentu při obrábění břitovými destičkami od výrobce Iscar. Řezné podmínky byly odlišné vůči ostatním dodavatelům. Snížila se hodnota šířky záběru ostří, zvýšily se otáčky vřetena a byla snížena posuvová rychlost. Teoreticky spočítaný potřebný krouticí moment s tabulkovou účinností 85 % je  $M_k = 165,3 \text{ Nm}$ . Medián naměřených hodnot je od teoretické hodnoty odlišný o 4 %. Extrémní hodnoty se zde nevyskytují.

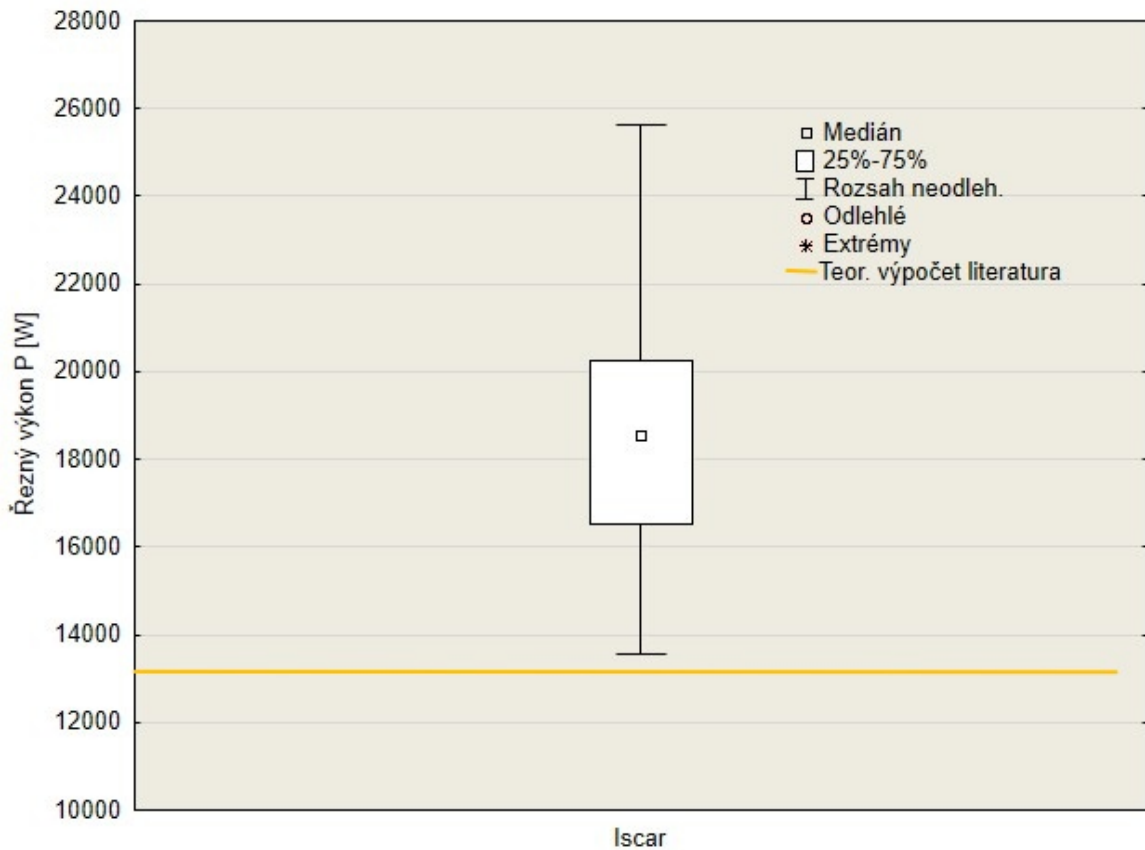


Obr. 6.28 Záznam řezného výkonu od destiček Pramet, Seco, Korloy.

Tab. 6.11 Základní charakteristiky hodnot krouticího momentu destiček.

Výrobce	Medián	Průměr	Minimum	Maximum	Směr. Odch.
Pramet	28050,00	27307,63	12840,00	28270,00	2512,03
Seco	28080,00	27388,43	11200,00	28240,00	2488,54
Korloy	28060,00	27412,05	7950,00	28250,00	2419,17

Na obr. 6.28 jsou do grafu zaneseny hodnoty řezných výkonů jednotlivých výrobců břitových destiček. Medián hodnot se pohybuje okolo 28 000 W. Rozsah neodlehých hodnot je spíše menších hodnot než medián. Teoreticky spočítaný řezný výkon s tabulkovou účinností 85 % je  $P = 29\,345$  W. Tato hodnota je také zanesena do grafu. Extrémy, které je možné vidět v grafu, jsou hodnoty při otočení nástroje do polohy, kdy odebírá nejmenší průřez třísky. Udávaný největší možný výkon na výrobním štítku motoru je 28 000 W. Podle výsledného grafu a hodnot se dá usoudit, že motor se dostal na hranici výkonu. V případě velkého přetížení motoru by měla bezpečnostní brzda zastavit motor. V tomto případě byl bezpečnostní jistič odpojen.



Obr. 6.29 Záznam řezného výkonu od destičky Iscar.

Tab. 6.12 Základní charakteristiky hodnot krouticího momentu destičky.

Výrobce	Medián	Průměr	Minimum	Maximum	Směr. Odch.
Iscar	18560,00	18633,74	13760,00	25640,00	2612,70

Řezné podmínky pro břitové destičky od výrobce Iscar musely být změněny. Po prvotních testech se stejnými podmínkami docházelo k natavování materiálu na destičky. Byla snížena šířka záběru ostří a snížena posuvová rychlost. Medián naměřených hodnot je 18 560 W. Teoreticky spočítaný řezný výkon s tabulkovou účinností 85 % je  $P = 13\,142\text{ W}$ . Medián naměřených hodnot je od teoretické hodnoty odlišný o 29,2 %. Extrémní a odlehlé hodnoty se zde nevyskytují.

## ZÁVĚR

Testy v experimentální části byly provedeny na vertikální frézce ve firmě TOS Kuřim – OS, a.s. Při testech se zaznamenával průběh silového zatížení řezných nástrojů, jakost obrobenej plochy a sledovalo se opotřebenj VBD. Hodnoty silového zatíženj byly získány odečtením hodnot krouticích momentů z motorů. Vhodnou úpravou a profiltrováním hodnot byly sestaveny grafické závislosti. Opotřebenj nástroje bylo měřeno optickým měřidlem.

Pro experiment byly vybrány čtyři VBD od různých dodavatelů. Destičky se liší ve složenj substrátu slinutého karbidu, povlakem a tvarem utvařeče třísek. Jedná se o destičky stejného tvaru s osmi břity od společnosti Dormer Pramet s.r.o. a Seco Tools CZ s.r.o. s povlakem TiN a od Iscar Ltd. a Korloy Inc. s povlakem TiAlN. Měření bylo provedeno při stejných řezných podmínkách.

Celkové závěry z provedeného experimentu a analýzy jsou následující:

- matematické modely pro výpočet řezných sil neuvažují opotřebenj břitů nástroje,
- teoretické hodnoty vypočtené dle odborné literatury a metodiky firmy Walter se liší o 25,8 N (6,4 %),
- hodnoty teoretických řezných sil jsou rozdílné od experimentálně zjištěných hodnot při testech, například v případě 1. průjezdu, kdy bylo opotřebenj nástroje nejmenší, je rozdíl mediánní hodnoty od teoretické Pramet 13,03 N (3,2 %), Seco 97,95 N (20,1 %), Iscar 295,84 N (43,1 %) a Korloy 126,11 N (24,4 %),
- všechny testované nástroje vydržely všech 54. průjezdů materiálem, to odpovídá strojnímu času  $t = 64,8$  min,
- s rostoucím počtem průjezdů bylo pozorováno nelineární zvyšování řezné síly,
- průběh narůstání řezné síly je u všech destiček velice podobný,
- nejnižší mediánní nárůst řezné síly  $F_c$  mezi 1. a 36. průjezdem dosáhl nástroj Iscar (24,2 %), ale má největší nárůst hodnoty řezné síly (o 219,23 N),
- nejmenší mediánní nárůst řezné síly mezi 1. a 36. průjezdem (176,88 N), má destička od společnosti Korloy,
- nejnižší mediánní hodnoty řezné síly na počátku testování dosáhl nástroj od společnosti Pramet ( $F_c = 403,03$  N), ale v průběhu testování a růstu opotřebenj nástroje byl zaznamenán nejvyšší relativní nárůst  $F_c$  (33,7 %),
- mediánní hodnotou řezné síly při 1. průjezdu se hodnotě teoreticky spočítané podle odborné literatury a metodiky firmy Walter nejbliže přiblížila destička od společnosti Pramet,
- nejvyšších hodnot opotřebenj pomocí kritéria VB dosáhl nástroj od společnosti Iscar ( $VB_{max} = 0,725$  mm), naopak nejnižší hodnota byla zaznamenána pro nástroj od společnosti Korloy ( $VB_{max} = 0,573$  mm),
- obrobenu plochu s nejlepší drsností povrchu obrobku po 1. průjezdu udělal nástroj od společnosti Iscar ( $Ra_{max} = 2,663$   $\mu$ m), naopak plochu s nejhorší drsností po 1. průjezdu nástroj od společnosti Pramet ( $Ra_{max} = 4,507$   $\mu$ m),

- 
- nejhorší drsnost povrchu obrobku po 54 průjezdech udělal nástroj od společnosti Pramet ( $R_{a_{max}} = 7,893 \mu\text{m}$ ), naopak nejlepší drsnost povrchu obrobku po 54 průjezdech udělal nástroj od společnosti Seco ( $R_{a_{max}} = 5,207 \mu\text{m}$ ) ačkoliv už nejspíše došlo k vylomení špičky a následnému leštění materiálu,
  - nejnižších mediánních hodnot při testech na maximální krouticí moment dosáhl nástroj od společnosti Pramet (525,77 Nm), naopak nejvyšších mediánních hodnot nástroj od společnosti Korloy (614,15 Nm),
  - při testech na maximální řezný výkon byl rozdíl mediánních hodnot do 1 %.

Z výše uvedených závěrů lze konstatovat:

- za daných řezných podmínek z pohledu silového zatížení byl nejlepší nástroj od společnosti Pramet, poté následovalo Seco, Korloy a nakonec Iscar,
- za daných řezných podmínek z pohledu drsnosti výsledného povrchu byl nejlepší nástroj Seco, poté následoval Korloy, Iscar a nakonec Pramet,
- za daných řezných podmínek z pohledu energetické náročnosti byl nejlepší nástroj Pramet, poté následovalo Seco a nakonec Korloy.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
2. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
3. HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění - 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2003, 138 s. [online]. [cit. 2019-05-15]. 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)
4. DVOŘÁK, Antonín. *Technologie frézování: pracovní listy* [online]. Šumperk, 2007 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [http://www.sszts.cz/stary\\_web/stary\\_web/esf/TEC\\_fr.pdf](http://www.sszts.cz/stary_web/stary_web/esf/TEC_fr.pdf)
5. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Základní metody obrábění - 1. část* [online]. Interaktivní multimediální text pro magisterskou formu studia. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/zakl\\_met\\_obr/zakl\\_met\\_obr\\_1.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/zakl_met_obr/zakl_met_obr_1.pdf)
6. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
7. AB SANDVIK COROMANT – SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – Kniha pro praxi*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o. 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cuttig – A Practical Handbook*. ISBN 91-97 22 99-4-6.
8. *Měrná řezná síla*. SANDVIK COROMANT [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece\\_materials/the\\_specific\\_cutting\\_force/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/the_specific_cutting_force/pages/default.aspx)
9. *Walter catalog general 2012*. [online]. Walter tools. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/ro-ro/general-catalogue-2012-ro.pdf>.
10. BRYCHTA, J., ČEP, R., SADÍLEK, M., NOVÁKOVÁ, J., PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. [online]. [cit. 2019-05-15]. 1. vyd. Ostrava:Ediční středisko VŠB-TUO, 2007. 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>.
11. PRAMET TOOLS, s.r.o., ČR. *Katalog – Frézování 2010*. [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/Milling%202010%20CZ%20prog.pdf>.

- 
12. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
  13. DE VOS, Patrick a Jan-Eric STÅHL. *Obrábění kovů: teorie v praxi*. Lund: Fagersta: Division of Production and Materials Engineering, Lund University; Seco Tools AB, 2014, 184 s.
  14. NOVOTNÝ, Karel a Oskar ZEMČÍK. *Přípravky a nástroje* [online]. Učební texty kombinovaného bakalářského studia. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/PripravkyNastroje.pdf>
  15. FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky, 1994. 229 s.
  16. *Rychlořezné nástrojové oceli* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [http://www.bolzano.cz/assets/files/NO/Nove\\_NO/Informace\\_k\\_rychlomeznyh\\_NO\\_upr.pdf](http://www.bolzano.cz/assets/files/NO/Nove_NO/Informace_k_rychlomeznyh_NO_upr.pdf)
  17. HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno: CCB, 1995. ISBN 80-85825-10-4.
  18. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
  19. SKOTNICOVÁ, Kateřina a Miroslav KURSA. *Prášková metalurgie* [online]. Učební text. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/03\\_Materialov%C3%A9\\_inzenyrstvi/06\\_Praskova\\_metalurgie/Skotnicova\\_Praskova\\_metalurgie.pdf](http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/03_Materialov%C3%A9_inzenyrstvi/06_Praskova_metalurgie/Skotnicova_Praskova_metalurgie.pdf)
  20. HLUCHÝ, Miroslav a Václav HANĚK. *Strojírenská technologie 2*. 2., upr. vyd. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-245-6.
  21. ČEP, R. *Přednáška 4 – řezné materiály*. [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné na Word Wide Web: <[http://www.homel.vsb.cz/~cep77/.../Strojirenske\\_technologie\\_prednaska\\_4.pps](http://www.homel.vsb.cz/~cep77/.../Strojirenske_technologie_prednaska_4.pps)>.
  22. ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *ÚVOD DO TEORIE OBRÁBĚNÍ* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2019-05-15]. ISBN 978-80-248-3013-1. Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_002/%C3%A9vod%20do%20teorie%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20elearning/%C3%A9vod%20do%20teorie%20obrabeni%2004%20Opot%C5%99eben%C3%AD%20%C5%99ezn%C3%BDch%20n%C3%A1stroj%C5%AF.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_002/%C3%A9vod%20do%20teorie%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20elearning/%C3%A9vod%20do%20teorie%20obrabeni%2004%20Opot%C5%99eben%C3%AD%20%C5%99ezn%C3%BDch%20n%C3%A1stroj%C5%AF.pdf)
  23. FOREJT, Miloslav. *Morfologie vad a opořebených povlakovaných řezných nástrojů: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.
  24. PRAMET TOOLS, s.r.o., *Katalog Soustružení*. 2010 [cit. 2019-05-15]
-

- 
25. Pramet tools, s.r.o. *Příručka obrábění CZ 2004*, 101 s. [cit. 2019-05-15].
  26. NOVOTNÝ, Vojtěch. *Ověření drsnosti povrchu po frézování s VDB doporučenými řeznými podmínkami*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 33 s. 4 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D...
  27. HUMÁR, Anton. *Přednášky z předmětu Experimentální metody*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013.
  28. FIALA, Zdeněk. *Prezentace Experimentální metody: Drsnost povrchu*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014.
  29. Piezoelektrický jev: mechanismus vzniku elektrické polarizace při deformaci. Wikipedie, otevřená encyklopedie [online]. c 2017 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrick%C3%BD\\_jev#Reference](https://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrick%C3%BD_jev#Reference)
  30. *Měření drsnosti*. M & B Calibr [online]. M & B Calibr, spol. s r.o., ©2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.mbcaltbr.cz/mereni-drsnosti.html>
  31. *Walter catalog general 2012*. Walter tools [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.waltertools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/en-gb/general-catalogue-2012-en.pdf>
  32. KORLOY CUTTING TOOLS. *Global Korloy* [online]. Korea [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [http://global.korloy.com/newkorloy/eng/file/2014/KORLOY%20CUTTING%20TOOLS%202014\(English\).pdf](http://global.korloy.com/newkorloy/eng/file/2014/KORLOY%20CUTTING%20TOOLS%202014(English).pdf)
  33. *Katalog pramet frézování 2017* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://www.dormerpramet.com/downloads/pramet%20catalogue%202017\\_updated\\_set%204\\_cz-ru-pl-sk.pdf](https://www.dormerpramet.com/downloads/pramet%20catalogue%202017_updated_set%204_cz-ru-pl-sk.pdf)
  34. Katalog a technický průvodce frézování 2018.2. *Seco Tools* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://usercontent.azureedge.net/Content/UserContent/Documents/022783.pdf>
  35. eKatalog ISCAR [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5697558&fnum=870&mapp=ML&app=61&GFSTYP=M&isoD=1>
  36. *Korloy cutting tools 2017*. Korloy Tools [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.korloy.com/en/ebook/2017%20Digest/assets/contents/download.pdf>
  37. InfiniteFocus: Highly accurate, fast and flexible optical 3Dmeasurements. *Alicona* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.alicon.com/en/products/infinitefocus/>
-

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CNC	[-]	programování pomocí počítače
CVD	[-]	chemické napařování
ČSN	[-]	české technické normy
DIN	[-]	německý ústav pro normalizaci
HB	[-]	tvrdost materiálu podle Brinellových zkoušek
HRC	[-]	tvrdost materiálu dle Rockwellových zkoušek
HV	[-]	tvrdost materiálu podle Vickersových zkoušek
PCD	[-]	polykrystalický diamant
PVD	[-]	fyzikální napařování
RO	[-]	rychlořezné oceli
SK	[-]	slinuté karbidy
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
A	[mm <sup>2</sup> ]	plocha průřezu třísky
A <sub>Di</sub>	[mm <sup>2</sup> ]	jmenovitý průřez třísky
B	[mm]	šířka frézované plochy
C <sub>Fc</sub>	[-]	konstanta vlivu obráběného materiálu
D	[mm]	průměr frézy
F <sub>c</sub> , F <sub>ci</sub>	[N]	složka řezné síly
F, F <sub>i</sub>	[N]	celková řezná síla
F <sub>f</sub>	[N]	posuvová síla
F <sub>fN</sub>	[N]	kolmá posuvová síla
F <sub>x</sub>	[N]	síla působící v ose x
F <sub>y</sub>	[N]	síla působící v ose y
F <sub>z</sub>	[N]	síla působící v ose z
P <sub>c</sub>	[W]	celkový výkon obráběcího stroje
P <sub>o</sub>	[W]	výkon při chodu na prázdko
P <sub>p</sub>	[W]	potřebný výkon hnacího motoru stroje
P <sub>už</sub>	[W]	užitečný výkon stroje
R <sub>a</sub>	[μm]	střední aritmetická úchylka drsnosti profilu
R <sub>a max</sub>	[μm]	maximální aritmetická úchylka drsnosti profilu
VB	[mm]	průměrné opotřebení hřbetu
VB <sub>max</sub>	[mm]	maximální opotřebení hřbetu
a <sub>e</sub>	[mm]	šířka řezu
a <sub>p</sub>	[mm]	šířka záběru hlavního ostří
b <sub>i</sub>	[mm]	jmenovitá šířka třísky
d	[mm]	velikost břitové destičky
f <sub>n</sub>	[mm]	posuv na otáčku
f <sub>z</sub>	[mm]	posuv na zub
h <sub>i</sub>	[mm]	tloušťka odřezávané třísky

---

$h_m$	[mm]	střední tloušťka třísky
$k_c$	[MPa]	měrná řezná síla
$k_{ci}$	[MPa]	měrná řezná síla
$k_{c1.1}$	[N·mm <sup>-2</sup> ]	specifická řezná síla
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky frézy
$n_z$	[-]	počet zubů frézy v současném záběru
$m_c$	[-]	nárůst křivky $k_c$
$s$	[mm]	tloušťka břitové destičky
$v_c$	[m·min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
$v_e$	[m·min <sup>-1</sup> ]	rychlost řezného pohybu
$v_f$	[m·min <sup>-1</sup> ]	posuvová rychlost
$x$	[-]	exponent vlivu tloušťky třísky
$z$	[-]	počet zubů nástroje
$\alpha, \beta$	[°]	polovina úhlu záběru zubu
$\gamma_0$	[°]	ortogonální úhel čela
$\eta_n$	[%]	účinnost nástroje
$\eta_s$	[%]	účinnost stroje
$K_r$	[°]	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
$\varphi_i$	[°]	úhel záběru zubu
$\varphi_{max}$	[°]	maximální úhel posuvového pohybu
$\varphi_s$	[°]	celková úhlová rozteč mezi prvním a posledním zubem v záběru
$\varphi_t$	[°]	zubová rozteč

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Kinematické schéma stroje
- Příloha 2 Výpočtové vzorce dle metodiky Walter

## Vzorce pro výpočty: frézování

### Otáčky

$$n = \frac{v_c \times 1000}{D_c \times \pi} \quad [\text{min}^{-1}]$$

### Řezná rychlost

$$v_c = \frac{D_c \times \pi \times n}{1000} \quad [\text{m/min}]$$

### Rychlost posuvu

$$v_f = f_z \times z \times n \quad [\text{mm/min}]$$

### Posuv na zub

$$f_z = \frac{v_f}{z \times n} \quad [\text{mm/z}]$$

### Objem materiálu za jednotku času

$$Q = \frac{a_e \times a_p \times v_f}{1000} \quad [\text{cm}^3/\text{min}]$$

### Příkon

$$P_{\text{mot}} = \frac{a_p \times a_e \times v_f \times k_c}{6 \times 10^7 \times \eta} \quad [\text{kW}]$$

### Střední tloušťka třísky

$$h_m = \frac{\{114,7 \times f_z \times \sin \kappa \times (a_e / D_c)\}}{\varphi_s} \quad [\text{mm}]$$

$$f_z = \frac{h_m \times \varphi_s}{114,7 \times \sin \kappa \times (a_e / D_c)} \quad [\text{mm}]$$

nebo 
$$h_m \cong f_z \times \sqrt{\frac{a_e}{D_c}} \quad [\text{mm}]$$

$$f_z = \frac{h_m}{\sqrt{\frac{a_e}{D_c}}} \quad [\text{mm}]$$

jako přibližný vzorec pro  $a_e / D_c < 30 \%$

### Úhel záběru

při centrálním postavení frézy

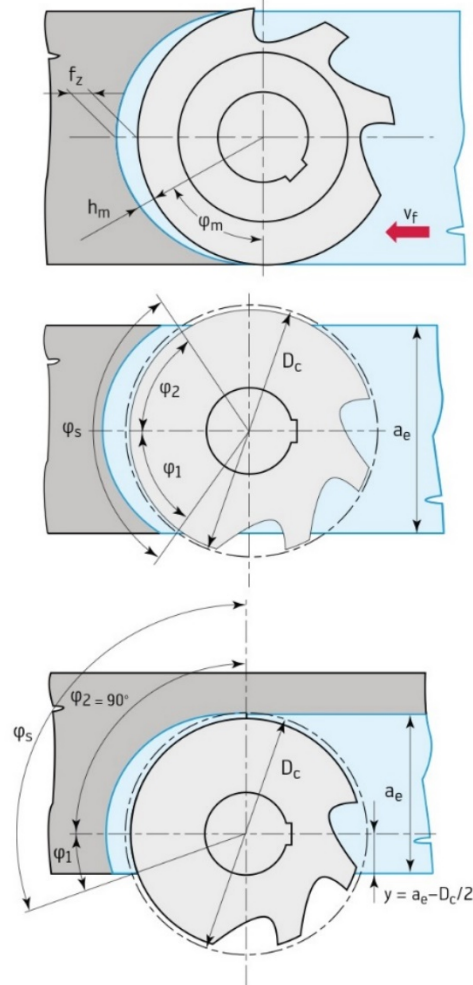
$$\varphi_s = 2 \times \arcsin \left( \frac{a_e}{D_c} \right) \quad [^\circ]$$

při mimostředním postavení frézy

$$\varphi_s = 90^\circ + \arcsin \frac{a_e - (D_c/2)}{(D_c/2)} \quad [^\circ]$$

### Specifická řezná síla

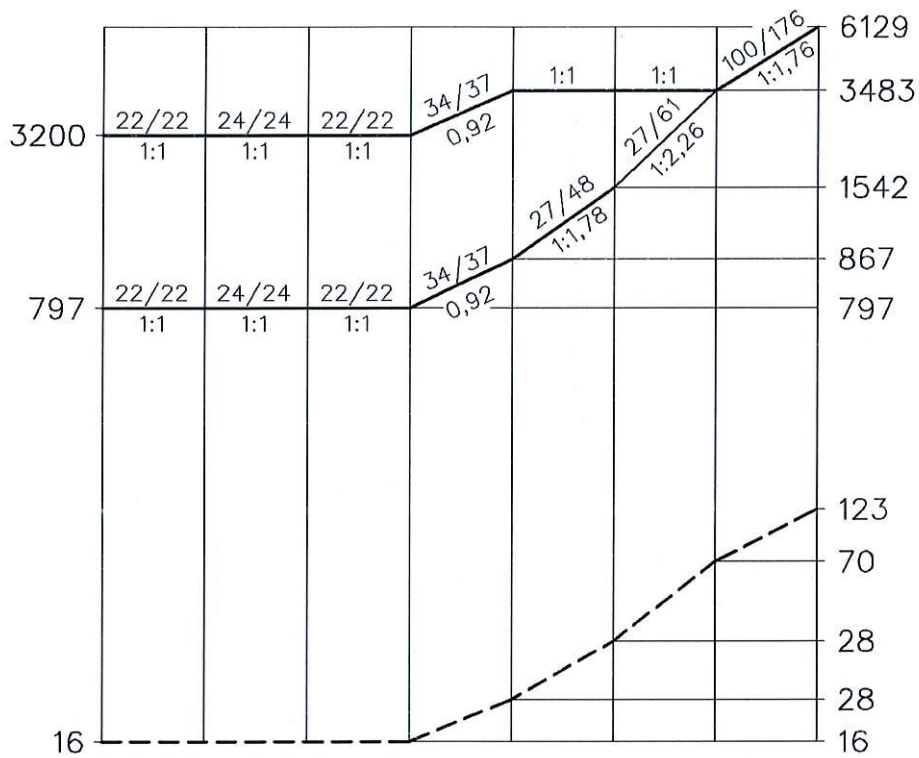
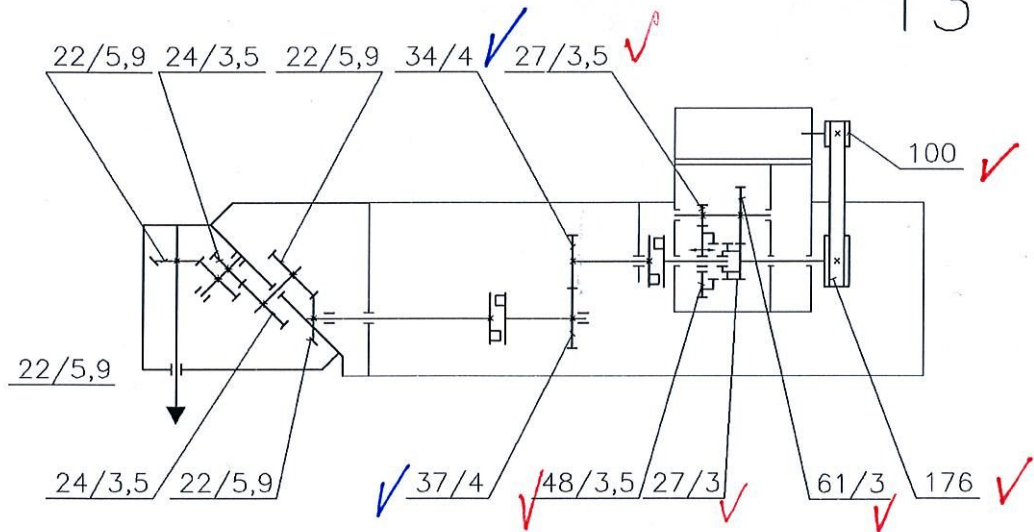
$$k_c = \frac{1 - 0,01 \times \gamma_0}{h_{m_c}} \times k_{c1.1} \quad [\text{N/mm}^2]$$



n	otáčky	min <sup>-1</sup>
D <sub>c</sub>	průměr	řezání mm
a <sub>p</sub>	hloubka řezu	mm
a <sub>e</sub>	šířka řezu	mm
z	počet zubů	
v <sub>c</sub>	řezná rychlost	m/min
v <sub>f</sub>	rychlost posuvu	mm/min
f <sub>z</sub>	posuv na zub	mm
Q	objem materiálu za jednotku času	cm <sup>3</sup> /min
P <sub>mot</sub>	příkon	kW
h <sub>m</sub>	střední tloušťka třísky	mm
k <sub>c</sub>	specifická řezná síla	N/mm <sup>2</sup>
η	účinnost stroje (0,7-0,95)	
κ	úhel nastavení	°
φ <sub>s</sub>	úhel záběru	°
φ <sub>1</sub>	rozsah nesousledného frézování	°
φ <sub>2</sub>	rozsah sousledného frézování	°
k <sub>c</sub>	specifická řezná síla	N/mm <sup>2</sup>
k <sub>c1.1</sub> *	specifická řezná síla pro 1 mm <sup>2</sup> průřezu třísky	N/mm <sup>2</sup>
m <sub>c</sub> *	nárůst křivky k <sub>c</sub>	
y	nesousledný záběr	mm

\*m<sub>c</sub> a k<sub>c1.1</sub> viz tabulka na straně H 7

13



FF/FS-W	52160	4
---------	-------	---

27.6.2007 08:22

0 91 100 174 Převodovka

0 91 100 170 Sng knadlo