



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ANALÝZA OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ PŘI
SOUSTRUŽENÍ KONSTRUKČNÍ OCELI**

ANALYSIS OF CUTTING TOOL WEAR WHILE TURNING CONSTRUCTION STEEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Kudela

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Jan Kudela
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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:

Analýza opotřebení řezných nástrojů při soustružení konstrukční oceli

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce bude provedení analýzy opotřebení řezných nástrojů při soustružení konstrukční oceli. Součástí práce bude návrh metodiky řezných zkoušek, analýza procesu obrábění spojená s provedenými řeznými zkouškami, které budou zaměřeny na opotřebení břitů řezných nástrojů a analýzu jakosti povrchu. V práci bude proveden rovněž rozbor opotřebení břitů řezných nástrojů s využitím dostupných měřicích zařízení. Práce bude ukončena zpracováním naměřených dat a celkovým zhodnocením dosažených výsledků.

Cíle diplomové práce:

- Teoretický a technický rozbor řešené problematiky.
- Provedení řezných zkoušek (návrh metodiky, analýza opotřebení břitů a jakosti povrchu).
- Rozbor opotřebení břitů.
- Zpracování naměřených dat (vyhodnocení experimentů).

Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. Vyd. 1. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

KOČMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá analýzou opotřebení vyměnitelných břitových destiček při soustružení konstrukční oceli 42CrMo4. Teoretická část práce obsahuje porovnání technologií soustružení a frézování, způsoby výroby kuličkových šroubů, pro které se daná ocel využívá, a popis experimentálních metod analýzy opotřebení nástroje. Experimentální část práce zahrnuje návrh metodiky měření a analýzu procesu obrábění zvoleného pro řezné zkoušky. Následují samotné řezné zkoušky, zaměřené na určení opotřebení břitových destiček a analýzu jakosti povrchu obrobku. Práce je ukončena zpracováním naměřených dat a celkovým zhodnocením dosažených výsledků.

Klíčová slova

experimentální metody, konstrukční ocel, 42CrMo4, měření sil, kuličkový šroub, okružovací frézování, soustružení

ABSTRACT

The goal of the thesis is wear analysis of cutting inserts used for machining 42CrMo4 steel. Theoretical part of the thesis contains comparison of turning and milling machining processes, machining methods for ball screws made of 42CrMo4 and description of experimental methods of tool wear analysis. Experimental part of thesis contains methodology of cutting inserts wear measurement for chosen machining method. The following testing is focused on cutting insert wear as well as workpiece surface analysis. Thesis is finished with processing of measured data and overall evaluation of achieved results.

Key words

experimental methods, construction steel, 42CrMo4, load measurement, ball screw, whirling, turning

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUDELA, Jan. Analýza opotřebení řezných nástrojů při soustružení konstrukční oceli [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117236>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Analýza opotřebení řezných nástrojů při soustružení konstrukční oceli** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jan Kudela

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat zejména vedoucímu práce doc. Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracovávání diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat také Ing. Karlu Kouřilovi, Ph.D. za jeho odborné připomínky a pánům Jiřímu Čechovi a Janu Pokornému za asistenci při praktické části práce. Díky patří také mým rodičům za umožnění studia na vysoké škole a mým přátelům za podporu při studiu.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 CHARAKTERISTIKA, POPIS A ROZBOR TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ A FRÉZOVÁNÍ	10
1.1 Technologie soustružení	12
1.1.1 Kinematika soustružení	12
1.1.2 Silové zatížení při soustružení	13
1.1.3 Průřez třísky při soustružení	15
1.1.4 Nástroje pro soustružení	16
1.2 Technologie frézování	18
1.2.1 Kinematika technologie frézování	19
1.2.2 Průřez třísky při frézování	21
1.2.3 Síly při frézování	22
1.2.4 Nástroje pro frézování	24
2 TECHNOLOGIE VÝROBY KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ	25
2.1 Profil kuličkového šroubu	25
2.2 Válcování kuličkového šroubu	26
2.2.1 Radiální válcovací kotouče	27
2.2.2 Axiální válcovací kotouče	27
2.3 Rotační okružování	28
2.4 Broušení kuličkového šroubu	31
3 EXPERIMENTÁLNÍ METODY KE ZJIŠTĚNÍ OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE	34
3.1 Přímé metody měření opotřebení řezného nástroje	34
3.1.1 Kritéria opotřebení	34
3.1.2 Vážení břitové destičky	34
3.1.3 Optické sledování funkční plochy nástroje	35
3.1.4 Elektrické metody	35
3.1.5 Ultrazvukové metody	35
3.1.6 Radioaktivní metody	35
3.2 Nepřímé metody měření	36
3.2.1 Měření a vyhodnocování sil	36

3.2.2 Měření drsnosti povrchu	39
3.2.3 Měření teploty řezného nástroje	40
4 PRŮBĚH ŘEZNÝCH ZKOUŠEK	41
4.1 Materiál obrobku	41
4.2 Obráběcí stroj	44
4.3 Použitá aparatura	46
4.4 Řezné podmínky při zkoušce řezivosti	48
4.5 Řezné nástroje pro zkoušku řezivosti	51
4.6 Silové působení	54
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	55
5.1 První série testování	55
5.1.1 Silové zatížení pro vyměnitelnou břitovou destičku 1	55
5.1.2 Drsnost povrchu pro vyměnitelnou břitovou destičku 1	58
5.1.3 Opatření vyměnitelné břitové destičky 1	61
5.1.4 Silové zatížení pro vyměnitelnou břitovou destičku 2	62
5.1.5 Drsnost povrchu pro vyměnitelnou břitovou destičku 2	65
5.1.6 Opatření vyměnitelné břitové destičky 2	68
5.1.7 Dílčí zhodnocení první série	69
5.2 Druhá série testování	69
5.2.1 Silové zatížení pro vyměnitelnou břitovou destičku 3	69
5.2.2 Drsnost povrchu pro vyměnitelnou břitovou destičku 3	72
5.2.3 Opatření vyměnitelné břitové destičky 3	75
5.2.4 Silové zatížení pro vyměnitelnou břitovou destičku 4	76
5.2.5 Drsnost povrchu pro vyměnitelnou břitovou destičku 4	79
5.2.6 Opatření vyměnitelné břitové destičky 4	82
5.2.7 Dílčí zhodnocení druhé série	83
6 TVAR OBROBENÉ TŘÍSKY	84
7 DISKUSE	88
ZÁVĚR	89
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	91
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	95

ÚVOD

Neustálé zdokonalování stávajících a vývoj nových technologií vyvolává zvětšující se konkurenční boj na trhu mezi jednotlivými strojírenskými podniky. Výroba nových produktů je neustále doprovázena snahou o snížení výrobních nákladů na minimum. Pokud chce podnik obstát v dnešním globalizovaném světě, nesmí se uspokojit se stávajícím zavedeným výrobním postupem, ale musí investovat do zmíněného zdokonalování a vývoje nových technologií výroby. To zahrnuje také proces testování řezných nástrojů na materiálu obrobku s cílem zjištění míry opotřebení řezného nástroje a jeho trvanlivosti.

Teoretická část je zaměřena na charakteristiku technologie soustružení a frézování, způsoby výroby kuličkových šroubů a experimentální metody zjištění opotřebení řezného nástroje.

V praktické části byly provedeny řezné zkoušky pro konstrukční ocel označovanou jako 42CrMo4. Materiál, na kterém proběhly řezné zkoušky, byl dodán v tyčové podobě o rozměrech Ø50 mm a délce 1000 mm. Materiál byl následně podélně soustružen při stanovených řezných podmínkách s cílem sledování silového zatížení a opotřebení břitů na dodaných vyměnitelných břitových destičkách (VBD) CBN WP4291 BN 350. Tyto VBD se využívají pro výrobu kuličkových šroubů rotačním okružováním. Testování VBD bylo provedeno na soustruhu, konkrétně při technologické operaci podélné soustružení. Řezná rychlost, šířka záběru ostří a posuv, byly voleny tak, aby odpovídaly podmínkám při okružním frézování. Vzhledem k dostupnosti vhodných obráběcích strojů, na které je možné umístit dynamometr KISTLER typu 9257B, byl pro testování vybrán univerzální hrotový soustruh SU 50 A/1500 s přídatným snímačem otáček. Z důvodu využití technologie soustružení byl vyroben speciální držák pro danou VBD.

Cílem řezných zkoušek bylo zpracování a vyhodnocení naměřených dat z průběhu silového zatížení, drsnosti povrchu a analýzy opotřebení vyměnitelných břitových destiček.

1 CHARAKTERISTIKA, POPIS A ROZBOR TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ A FRÉZOVÁNÍ

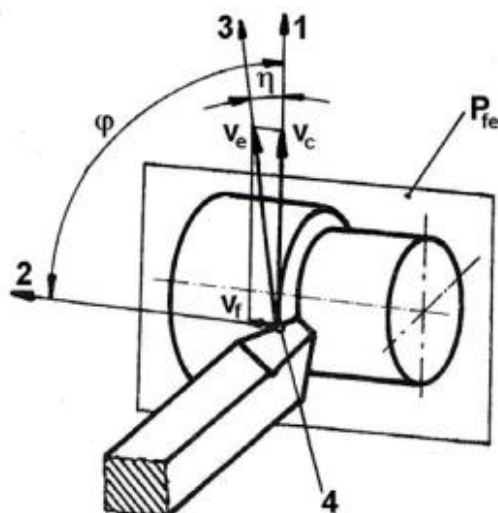
Podstatou technologie obrábění je oddělování částic z povrchu obráběného materiálu břitem řezného nástroje. Tento proces je definovaný z fyzikálně – mechanického hlediska jako řezání. Při řezném procesu se odebírají přebytečné částice materiálu ve formě třísek. Vlastní proces obrábění probíhá za určitých řezných podmínek. Tyto podmínky mají přímý vliv na kvalitu obrobenej plochy, která je prioritním výstupem procesu obrábění. Mezi další činitele ovlivňující parametry obrobenej plochy patří vlastnosti obráběcího stroje, obrobku, nástroje, upínače aj. [1].

Kinematika řezného procesu je určena pohyby nástroje a obrobku. Pohyby mezi nástrojem a obrobkem popisující daný obráběcí proces jsou vyjádřeny vhodnými veličinami. Základní pojmy kinematiky řezného procesu pro technologii soustružení a frézování [1]:

- **hlavní pohyb** – je definovaný jako vzájemný pohyb mezi nástrojem a obrobkem, který vykonává obráběcí stroj,
- **směr hlavního pohybu** – jedná se o směr okamžitého hlavního pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obráběné součásti,
- **řezná rychlost v_c** – určuje ji okamžitá rychlost hlavního pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obráběné součásti,
- **posuvový pohyb** – jedná se o relativní pohyb mezi nástrojem a obráběným materiálem, který společně s hlavním pohybem zabezpečuje plynulé nebo přerušované vytváření třísky z povrchu obrobku,
- **směr posuvového pohybu** – je definovaný směrem okamžitého posuvového pohybu uvažovaného bodu ostří vztaženému k obráběné součásti,
- **posuvová rychlost v_f** – jedná se o okamžitou rychlost posuvového pohybu uvažovaného bodu ostří vztaženou k obráběnému materiálu,
- **řezný pohyb** – je dán hlavním a posuvovým pohybem,
- **směr řezného pohybu** – je určen směrem okamžitého řezného pohybu uvažovaného bodu ostří vztaženému k obráběnému materiálu,
- **rychlost řezného pohybu v_e** – jedná se o okamžitou rychlost řezného pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obráběnému materiálu,
- **úhel posuvového pohybu φ** – je definován jako úhel měřený v pracovní boční rovině P_{fe} mezi směry hlavního a současného posuvového pohybu,
- **úhel řezného pohybu μ** – vyjádřen jako úhel měřený v pracovní boční rovině P_{fe} mezi směrem hlavního a řezného pohybu.

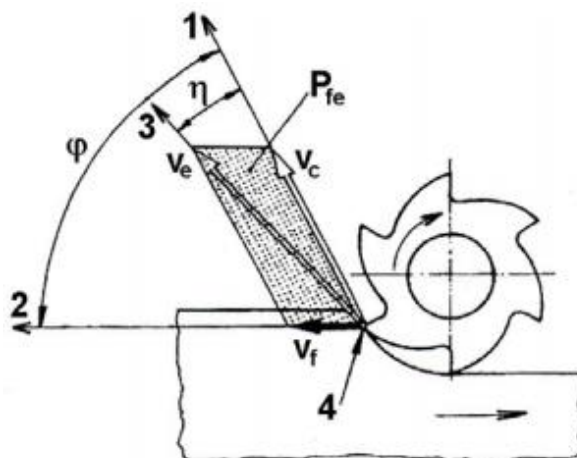
Proces podélného soustružení válcové plochy je zobrazen na obr. 1.1, kde následující číselné označení určují [2]:

- 1 – směr hlavního pohybu,
- 2 – směr posuvového pohybu,
- 3 – směr řezného pohybu,
- 4 – uvažovaný bod ostří.



Obr. 1.1 Schématické znázornění pohybů nástroje a obrobku při podélném soustružení
 μ – úhel řezného pohybu, P_{fe} – pracovní boční rovina, φ – úhel posuvového pohybu,
 v_c – řezná rychlost, v_e – rychlost řezného pohybu, v_f – posuvová rychlost, [1].

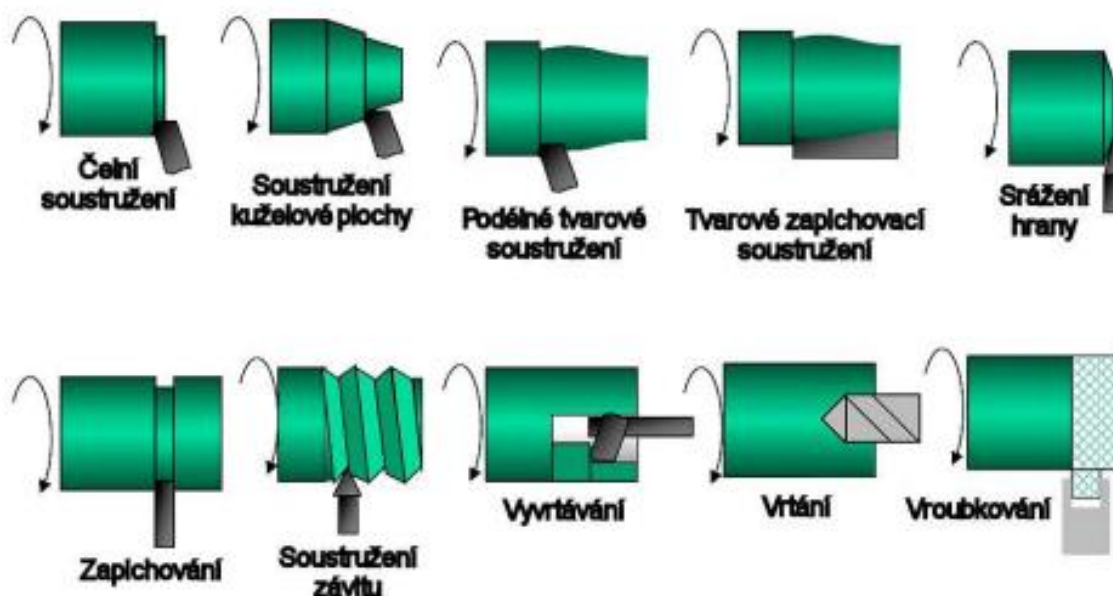
Proces nesousledného rovinného frézování válcovou frézou s přímými zuby je zobrazen na obr. 1.2.



Obr. 1.2 Schématické znázornění nesousledného rovinného frézování válcovou frézou s přímými zuby
 μ – úhel řezného pohybu, P_{fe} – pracovní boční rovina, φ – úhel posuvového pohybu,
 v_c – řezná rychlost, v_e – rychlost řezného pohybu, v_f – posuvová rychlost, [1].

1.1 Technologie soustružení

Technologie soustružení je z mnoha hledisek nejjednodušší obráběcí metoda, která se používá pro zhotovení součástí rotačních těles pomocí jednobřítých nástrojů – soustružnických nožů. Z těchto důvodů se tudíž jedná o nejrozšířenější metodu obrábění. Soustruhy se využívají nejen pro obrábění vnějších a vnitřních válcových, kuželových i tvarových ploch, vytváření zápichů a řezání závitů, ale umožňují také vrtání, vyvrtávání, vystružování atd. Základní přehled zmíněných technologií dokumentuje obr. 1.3 [1, 2].



Obr. 1.3 Základní přehled operací praktikovaných na soustruhu [2].

1.1.1 Kinematika soustružení

Hlavní pohyb soustružení je rotace vykonávaná obrobkem, posuvový pohyb je přímočarý a koná ho nástroj viz obr. 1.4. Lze jej charakterizovat řeznou rychlostí, která se vypočte na základě vztahu (1.1) [1, 2]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.1)$$

Kde: D [mm] – průměr obráběné plochy,
 n [min⁻¹] – otáčky obrobku.

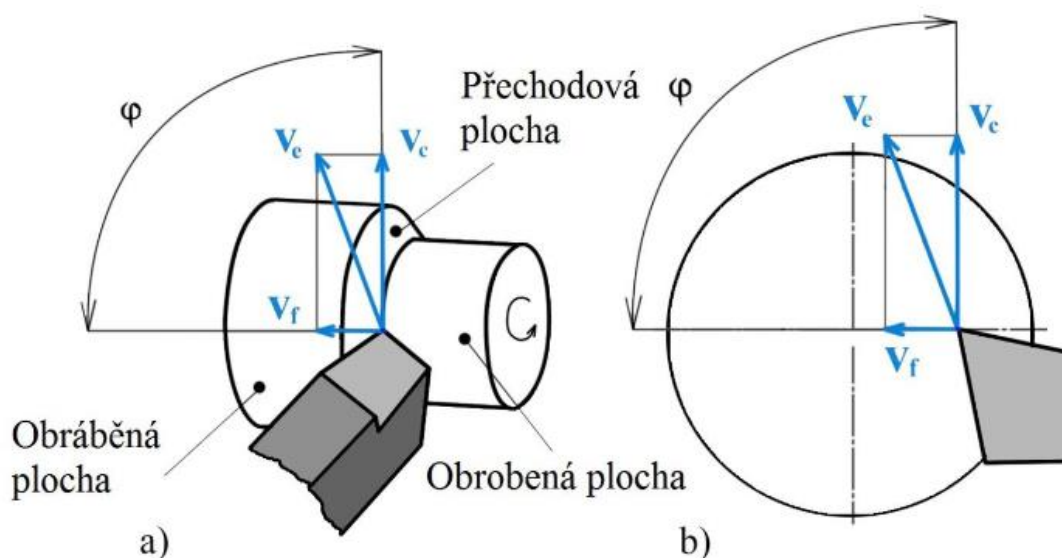
Vedlejší pohyb, tedy pohyb nástroje je charakterizován posuvovou rychlostí, která je definována vztahem (1.2) [1, 2]:

$$v_f = f \cdot n \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.2)$$

Kde: f [mm] – posuv na otáčku obrobku.
 n [min⁻¹] – otáčky obrobku.

Řezný pohyb se při soustružení válcové plochy (podélné soustružení) realizuje po šroubovici, při soustružení čelní plochy po Archimedově spirále a při soustružení čelního obecného tvaru se pohyb realizuje po obecné prostorové křivce. Vypočte se dle vztahu (1.3) [1, 2]:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.3)$$

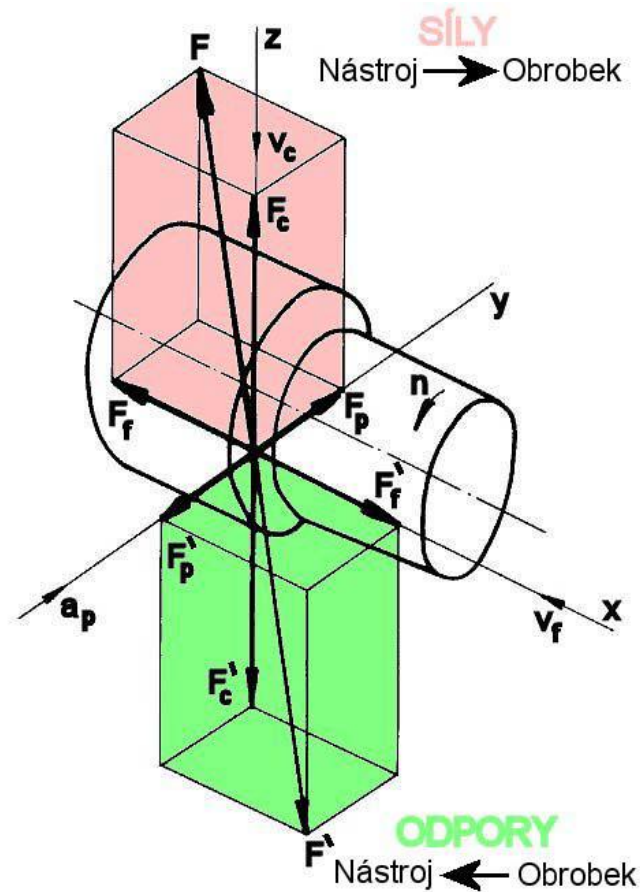


Obr. 1.4 Kinematika soustružení: a) podélné soustružení; b) čelní soustružení – podle [1].

1.1.2 Silové zatížení při soustružení

Rozložení silového zatížení je zobrazeno na obr. 1.5, kde celková působící síla je složena ze složek [2]:

- F_c [N] – řezná síla,
- F_f [N] – posuvová síla,
- F_p [N] – pasivní síla.



Obr. 1.5 Rozložení silového zatížení při podélném soustružení [2].

Hodnoty silových složek působících dle obr. 1.5 je možné zjistit použitím vhodného dynamometru nebo je lze spočítat pomocí tzv. empirických vztahů. Vztahy jsou závislé mimo jiné na materiálové konstantě C_{Fc} a na exponentech “x” a “y”. Hodnoty těchto konstant a exponentů se zjišťují experimentálně z materiálové charakteristiky obráběného materiálu. Pro výpočet jednotlivých silových složek jsou odvozeny následující vztahy (1.4) až (1.6) [2]:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [\text{N}] \quad (1.4)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [\text{N}] \quad (1.5)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad [\text{N}] \quad (1.6)$$

Kde: C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp} [-] – materiálové konstanty,
 x_{Fc}, x_{Ff}, x_{Fp} [-] – exponenty vlivu a_p ,
 y_{Fc}, y_{Ff}, y_{Fp} [-] – exponenty vlivu f ,
 a_p [mm] – šířka záběru ostří,
 f [mm] – posuv na otáčku.

Celková působící síla F (viz obr. 1.5) se spočítá z jednotlivých silových složek dle vztahu (1.7) [2]:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad [\text{N}] \quad (1.7)$$

Řeznou sílu F_c je možné také spočítat na základě velikosti měrné řezné síly k_c , kde hodnota měrné řezné síly je dána řeznou silou F_c , která je vztažena na jednotku plochy průřezu třísky A_D . Výpočet řezné síly F_c byl proveden jednoduchou úpravou vztahu pro výpočet měrné řezné síly dle vztahu (1.8) [2]:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad [\text{MPa}] \quad (1.8)$$

1.1.3 Průřez třísky při soustružení

Pro zjednodušený případ podélného soustružení válcové plochy viz obr. 1.6 za předpokladu $r_\varepsilon \rightarrow 0$ se při výpočtu jmenovitý průřez třísky A_D stanoví za pomoci obecného vztahu (1.9) [1, 2]:

$$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot f \quad [\text{mm}^2] \quad (1.9)$$

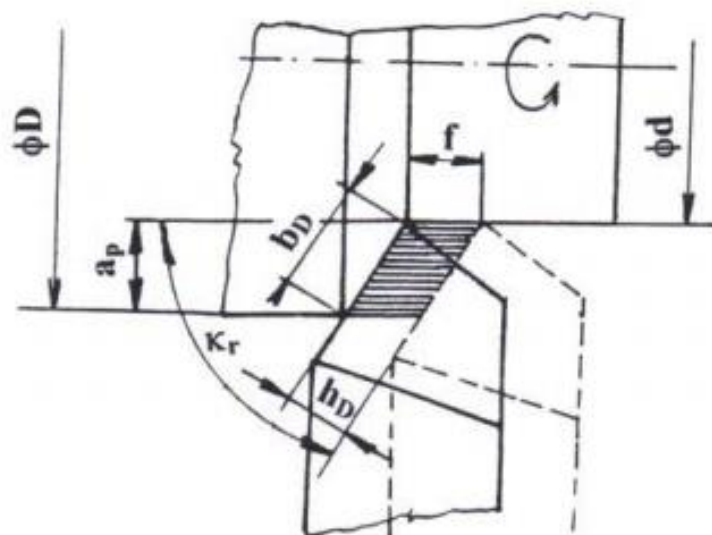
Kde: b_D [mm] – jmenovitá šířka třísky,
 h_D [mm] – jmenovitá tloušťka třísky.

Jmenovitou šířku třísky lze vypočítat dle vztahu (1.10) a jmenovitá tloušťka třísky je získána rovnicí (1.11) [2]:

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

$$h_D = f \cdot \sin \kappa_r \quad [\text{mm}] \quad (1.11)$$

Kde: κ_r [°] – nástrojový úhel nastavení hlavního ostří.

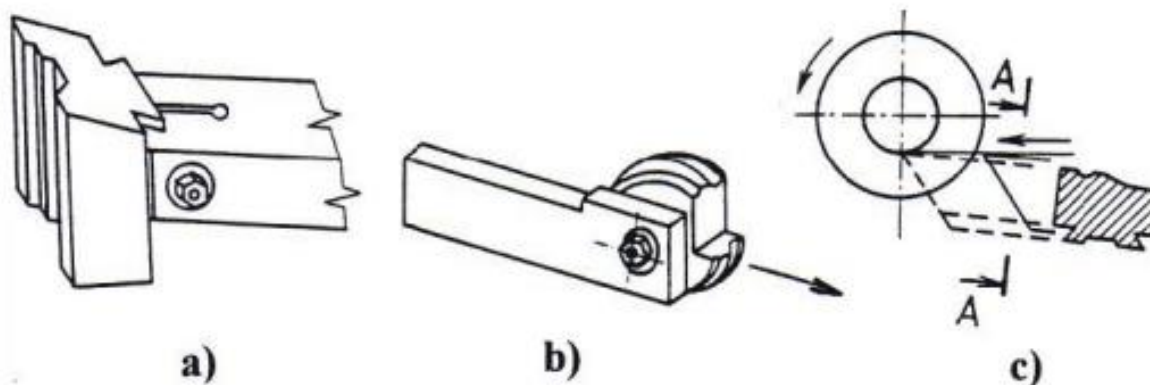


Obr. 1.6 Parametry rozměru třísky při podélném soustružení [4].

1.1.4 Nástroje pro soustružení

Soustružnické nástroje se používají pro obrábění rotačních součástí a je možné je dělit dle různých hledisek. Z technologického hlediska, jak je patrné na obr. 1.7, se rozlišují nože [1, 2, 4]:

- **prizmatické,**
- **kotoučové,**
- **tangenciální,**
- **radiální.**

Obr. 1.7 Tvarové soustružnické nože,
a) prizmatické, b) kotoučové, c) tangenciální [4].

Radiální nože mají nejširší uplatnění a dále se rozdělují podle směru posuvového pohybu, tvaru tělesa nože, nástrojového materiálu a konstrukce. Příklady vnitřních a vnějších soustružnických nožů zobrazují obr. 1.8 a obr. 1.9. Z konstrukčního hlediska se rozlišují [2, 4]:

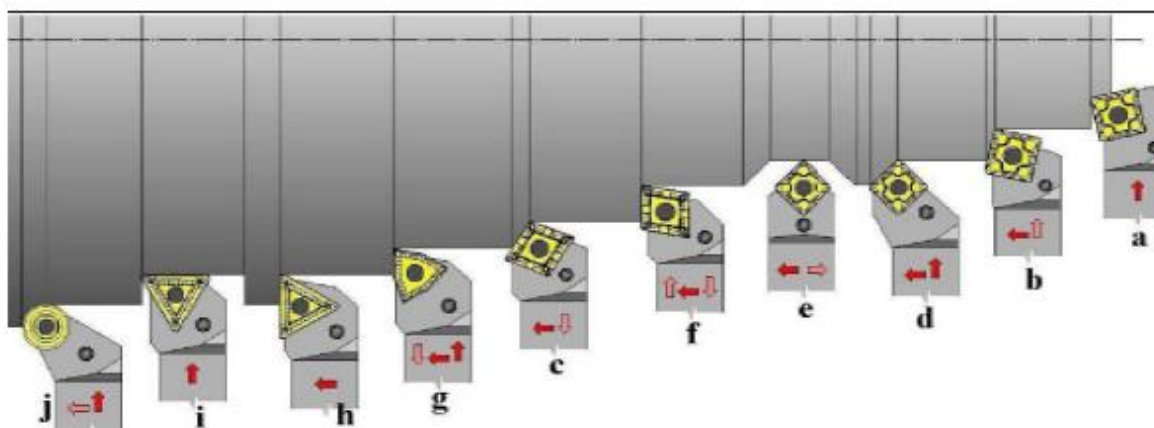
- **celistvé** – z nástrojového materiálu je vyrobeno tělo i řezná část nože,
- **s pájenými břitovými destičkami** – na tělo nože z konstrukční oceli je tvrdou pájkou připájena břitová destička z řezného materiálu,
- **s vyměnitelnými břitovými destičkami** – pomocí systému upínání ISO je vyměnitelná břitová destička mechanicky upnuta v nožovém držáku z konstrukční oceli. Je vyvinuto množství upínacích systémů s cílem dosažení pevnosti, která je dosažena u pájených břitových destiček.

Podle dalšího kritéria se radiální soustružnické nože člení [2, 4]:

- **pravé** – pracovní směr nože směřuje od koníku k vřetenu,
- **levé** – pracovní směr nože směřuje opačně od vřetene ke koníku.

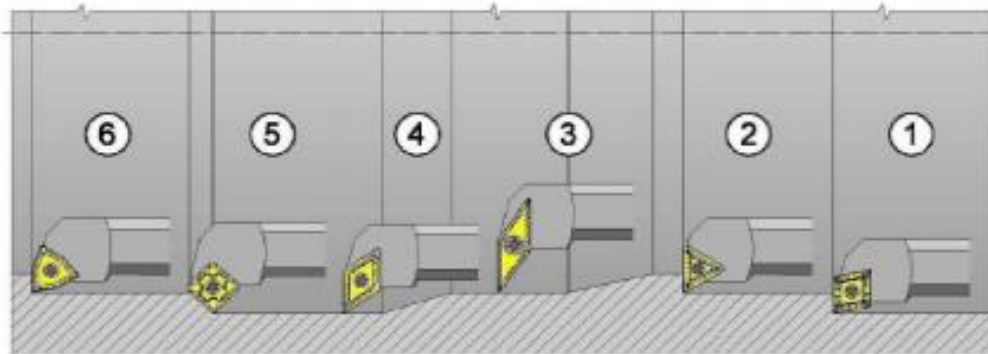
Dle druhu obrábění se rozlišují radiální nože [2, 4]:

- **radiální nože pro obrábění vnějších ploch,**
- **radiální nože pro obrábění vnitřních ploch.**



Obr. 1.8 Vnější soustružnické nože,

a – ubírací nůž čelní, b, c – ubírací nůž přímý, d – ubírací nůž ohnutý, e – ubírací nůž oboustranný,
f g – rohový nůž, h – ubírací nůž stranový, i – hladicí nůž, j – rádiusový nůž [4].



Obr. 1.9 Vnitřní soustružnické nože,

1, 4, 5 – vnitřní ubírací, 2, 6 – vnitřní rohový, 3 – vnitřní kopírovací [4].

Dále je možné radiální nože členit dle tvaru na [2, 4]:

- **přímé,**
- **ohnuté.**

Výše uvedené skupiny soustružnických nožů je možné dále dělit na [2, 4]:

- **ubírací,**
- **upichovací,**
- **zapichovací,**
- **tvarové,**
- **závitové,**
- **kopírovací.**

1.2 Technologie frézování

Frézování se řadí k nejrozšířenějším metodám obrábění. Velkou předností frézování je relativně velká výkonnost při dodržení vysoké kvality obrábění. Různé druhy frézek se využívají pro obrábění rovinných, rotačních i tvarových ploch. Uplatňují se také při výrobě drážek různých profilů, závitů i ozubení. U technologie frézování je přebytečný materiál obrobku odebírán břity rotujícího nástroje – frézou. Z principu technologie je řezný proces přerušovaný, každý zub nástroje odděluje krátké třísky proměnné tloušťky. Kinematika pohybů úhlové čelní frézy a obrobku ve třech bodech nástroje je zobrazena na obr. 1.10 [2, 4].

Z technologického hlediska se frézování člení podle osy nástroje vzhledem k obrobku na dva základní způsoby [1, 2, 4]:

- **frézování válcové** – úběr materiálu probíhá obvodem nástroje,
- **frézování čelní** – úběr materiálu probíhá čelem nástroje.

Ze zmíněných základních způsobů se odvozují následující způsoby frézování [1, 2, 4]:

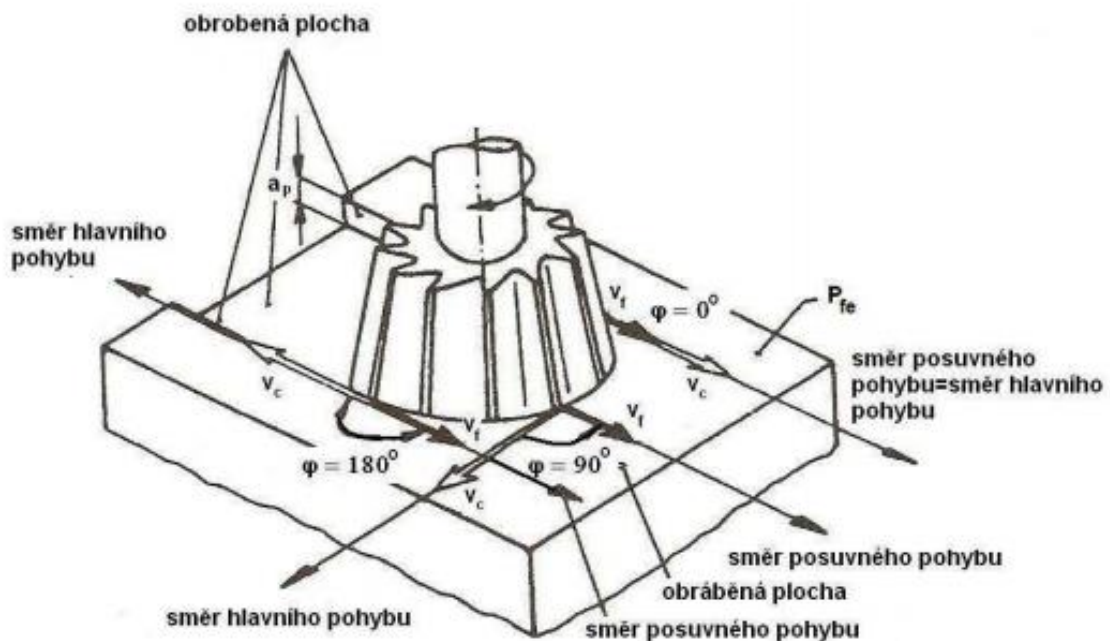
- frézování okružní,
- frézování planetové.

1.2.1 Kinematika technologie frézování

Hlavní pohyb je rotační, je vykonáván nástrojem a definuje ho řezná rychlost v_c vyjádřená vztahem (1.12) [1, 2, 4].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.12)$$

Kde: D [mm] – průměr nástroje,
 n [min^{-1}] – otáčky nástroje.



Obr. 1.10 Kinematika pohybů úhlové čelní frézy a obrobku ve třech bodech nástroje [1].

Vedlejší pohyb je přímočarý, je vykonáván převážně ve směru kolmém k ose nástroje, a je vykonáván zpravidla obrobkem. Při použití moderních frézovacích strojů, jako jsou např. víceosé CNC frézky, se posuvové pohyby mění plynule a realizují se zároveň ve více osách. Posuvový pohyb lze vyjádřit pomocí základní jednotky posuvu na zub f_z . Jedná se o délku dráhy uraženou obrobkem po dobu záběru daného zubu. Délka dráhy ujetá obrobkem během jedné otáčky nástroje určuje posuv na otáčku f_n určenou vztahem (1.13) [1, 2, 4].

$$f_n = f_z \cdot z \quad [\text{mm}] \quad (1.13)$$

Kde: f_z [mm] – posuv na zub,
 z [-] – počet zubů frézy.

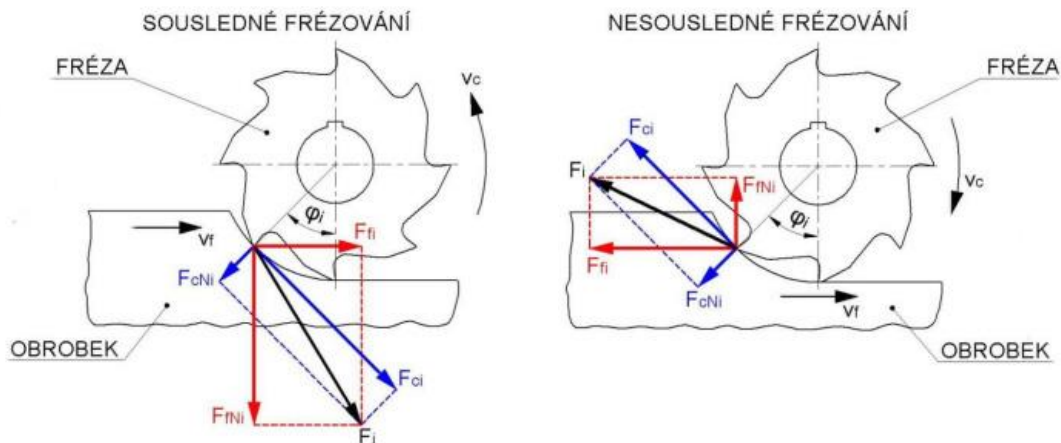
Výpočet posuvové rychlosti v_f vychází ze vztahu (1.14) [2, 4].

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.14)$$

Efektivní výsledný pohyb v_e je dán jako při soustružení vztahem (1.15) [3, 4].

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.15)$$

Při práci s válcovými a tvarovými frézami se převážně využívá válcové frézování, kdy má fréza vyrobené zuby pouze po obvodu nástroje. Kinematika obráběcího procesu rozděluje válcové frézování na sousledné a nesousledné. Rozdíl mezi nimi je patrný na obr. 1.11 [1, 2, 4].



Obr. 1.11 Vektory pohybů a řezné síly na zubu při válcovém sousledném a nesousledném frézování v pracovní rovině P_{fe}

F_i – celková řezná síla, F_{ci} – řezná síla, F_{cNi} – kolmá řezná síla,
 F_{fi} – posuvová síla, F_{fNi} – kolmá posuvová síla – podle [1].

Sousledné frézování

Smysl rotace nástroje je ve stejném směru jako posuv obrobku. Při vnikání nástroje do obrobku vzniká tříska o největší tloušťce, která se postupně mění na nulovou hodnotu. Obrobená plocha vzniká při vycházení zubu ze záběru. Typickým jevem pro daný typ frézování je působení řezných sil směrem dolů. Pro sousledné frézování je nutné zajistit u obráběcího

stroje vymezenou vůlí a předpětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu stroje. Při nedodržení zmíněných bodů dochází k nestejnomyšernému posuvu, který může způsobit poškození frézky [1, 2].

Nesousledné frézování

Smysl rotace nástroje má opačný směr jako posuv obrobku. Řezná síla obsahuje složku, která směřuje nahoru a odtahuje tak obrobek od stolu. Při vnikání frézky do materiálu vzniká tříška nulové hodnoty, která se postupně zvětšuje až na maximální hodnotu při výstupu z materiálu. Tříška se neodděluje při teoretické nulové hodnotě, ale po určitém skluzu břitu po ploše již obrobenej předchozím břitem nástroje. Při tomto procesu dochází ke vzniku silových účinků a deformací, což způsobuje zvýšené opotřebenj břitu [1, 2].

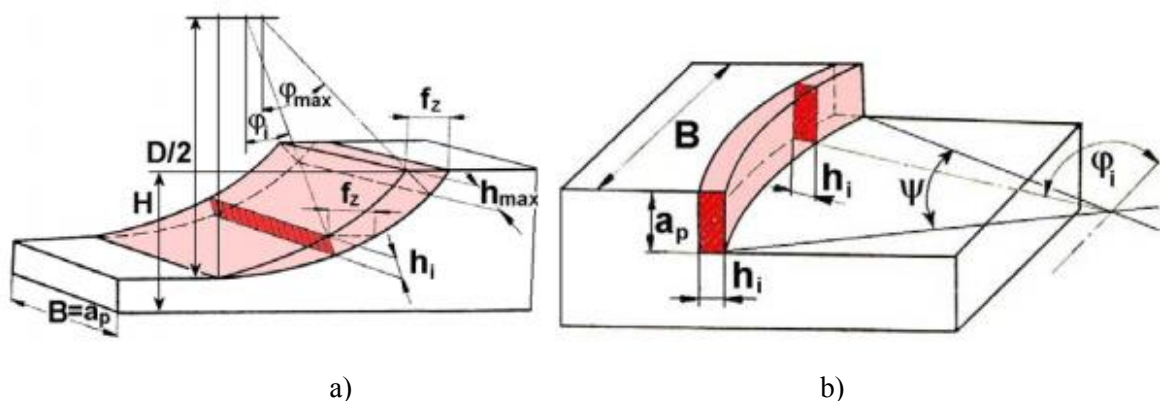
1.2.2 Průřez třísky při frézování

Jednotlivé vztahy jsou nejprve uvedeny pro válcovou frézu s přímými zuby. Jak již bylo řečeno, při válcovém nesousledném frézování se měnj tloušťka třísky od nulové po maximální hodnotu a při sousledném frézování je tomu přesně naopak [1, 2, 4].

Jmenovitou tloušťku odebírané třísky h_i po celou dobu jejího odřezávání lze vyjádřit vztahem (1.16) viz obr. 1.12 [1, 2, 4].

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin\varphi_i \quad [\text{mm}] \quad (1.16)$$

Kde: f_z [mm] – posuv na zub,
 φ_i [°] – úhel posuvového pohybu.



Obr. 1.12 Průřezy třísky při
 a) válcové frézování, b) čelní frézování [2].

Úhel posuvového pohybu φ_i se měnj nejen s polohou řešeného zubu, ale také podél příslušného ostří. Jedná se zejména o frézy se šikmými zuby nebo se zuby ve šroubovici.

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} lze vyjádřit vztahem (1.17) [1, 2].

$$A_{Di} = h_i \cdot a_p = f_z \cdot a_p \cdot \sin\varphi_i \quad [\text{mm}^2] \quad (1.17)$$

Další uvedené vztahy popisují vznik třísky u čelního frézování. Tloušťka odřezávané třísky se stejně jako u válcového frézování mění s úhlem posuvového pohybu. Výpočet je rozšířen o úhel nastavení hlavního ostří κ_r , který je použit ve vztahu (1.18) [1, 2, 3].

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin\varphi_i \cdot \sin\kappa_r \quad [\text{mm}] \quad (1.18)$$

Jmenovitá šířka třísky b_i je konstantní pro všechny polohy φ_i a spočítá se pomocí vztahu (1.19) [1, 2, 3].

$$b_i = \frac{a_p}{\sin\kappa_r} \quad [\text{mm}] \quad (1.19)$$

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} je pro všechny polohy φ_i a $\kappa_r = 90^\circ$ definován vztahem (1.20) [1, 2, 3].

$$A_{Di} = h_i \cdot b = f_z \cdot a_p \cdot \sin\varphi_i \quad [\text{mm}^2] \quad (1.20)$$

1.2.3 Síly při frézování

Při řešení dané problematiky se vychází ze silových poměrů pro jeden břit, jehož poloha je určena úhlem φ_i . Celková řezná síla působící na břitu F_i pro frézování válcovou frézou s přímými zuby se rozkládá na složky F_{ci} , F_{cNi} a na složky F_{fi} a F_{fNi} viz obr. 1.11 [1, 2].

Na základě měrné řezné síly k_{ci} a průřezu třísky A_{Di} je definována řezná síla F_{ci} vztahem (1.21) [1, 2].

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi_i \quad [\text{N}] \quad (1.21)$$

Kde: k_{ci} [MPa] – měrná řezná síla.

Pro určení měrné řezné síly se vychází ze vztahu (1.22) [1, 2].

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin\varphi_i)^{1-x}} \quad [\text{MPa}] \quad (1.22)$$

Kde: C_{Fc} [–] – konstanta vlivu tloušťky třísky,
 x [–] – exponent vlivu tloušťky třísky.

Řezná síla F_{ci} se po dosazení rovnice (1.22) do rovnice (1.21) a úpravě vypočítá dle vztahu (1.23) [1, 2].

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \quad [\text{N}] \quad (1.23)$$

Obdobným postupem by se vyjádřila řezná síla F_{ci} při čelním frézování. Vycházelo by se opět z rovnice (1.20). Pro měrnou řeznou sílu platí vztah (1.24) [1, 2].

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad [\text{MPa}] \quad (1.24)$$

Po dosazení rovnice (1.24) do rovnice (1.21) a úpravě se vypočítá řezná síla F_{ci} při čelním frézování vztahem (1.25) [2].

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sin^x \varphi_i \quad [\text{N}] \quad (1.25)$$

Ve většině případů jsou frézy vícebřité nástroje, u kterých je zpravidla v záběru více zubů najednou. Výslednou sílu určuje počet zubů v záběru a na okamžité poloze zubů frézy vzhledem k obrobku. Celková řezná síla F_c hraje důležitou roli při určení potřebného krouticího momentu či výkonu na vřetene.

Pro frézování válcovou frézou se stanoví celková řezná síla F_c ze vztahu (1.26) [2].

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad [\text{N}] \quad (1.26)$$

Počet zubů v záběru se určí pro válcové frézování dle následujícího vztahu (1.27) [2].

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{360} \cdot z \quad [-] \quad (1.27)$$

Kde: φ_{max} [°] – maximální úhel posuvového pohybu.

Pro frézování čelní frézou se stanoví celková řezná síla F_c ze vztahu (1.28) [2].

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad [\text{N}] \quad (1.28)$$

Počet zubů v záběru se určí pro čelní frézování dle následujícího vztahu (1.29) [2].

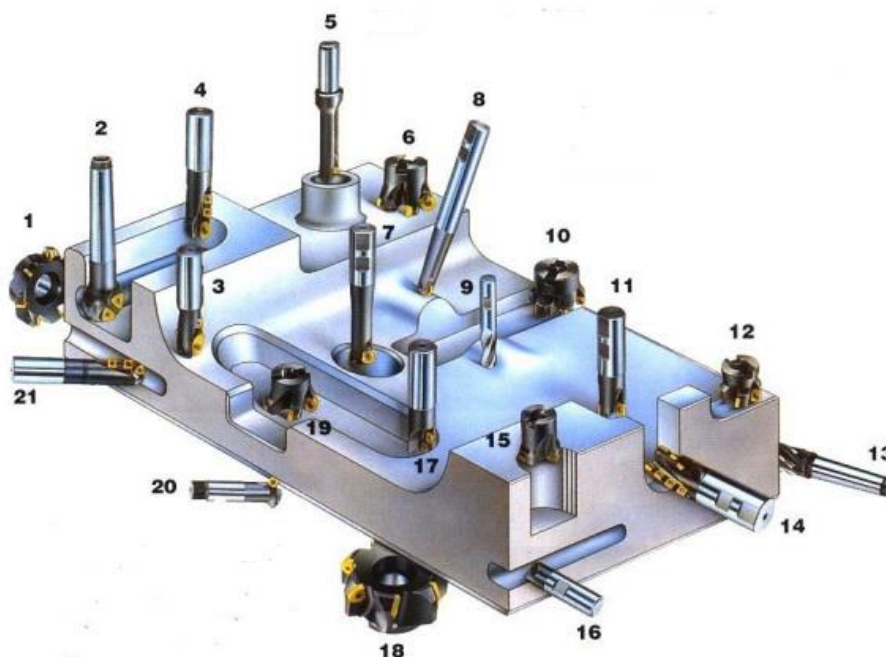
$$n_z = \frac{\Psi}{360} \cdot z \quad [-] \quad (1.29)$$

Kde: Ψ [°] – úhel záběru frézy.

1.2.4 Nástroje pro frézování

Frézovací nástroje (frézy), stejně jako soustružnické nástroje, jsou ve strojírenství velmi rozšířené díky svému mnohostrannému uplatnění. Jedná se zejména o vícebřité nástroje, které mohou nabývat různých tvarů viz obr. 1.13. V závislosti na technologickém uplatnění se frézy rozdělují z různých hledisek podle následujících kritérií [2]:

- rozmístění zubů na nástroji – frézovací nástroje válcové, čelní, čelní válcové,
- nástrojový materiál zubů – rychlořezná ocel, cermety, slinutý karbid (dále SK), řezné keramiky, kubický nitrid boru (CNB), polykrystalický diamant (PCD),
- provedení zubů – výroba zubů frézováním nebo podsoustružením,
- směr zubů vzhledem k ose rotace nástroje – fréza s přímými zuby, zuby ve šroubovici,
- počet zubů vzhledem k průměru nástroje – frézy jemnozubé, polohrubozubé a hrubozubé,
- konstrukční uspořádání fréz – nástroje celistvé, s vloženými noži nebo s VBD,
- geometrický tvar funkční části nástroje – frézy válcové, kopírovací, drážkovací, kotoučové, na výrobu ozubení, úhlové atd.,
- smysl otáčení při pohledu od vřetena – pravořezné, levořezné,
- způsob upnutí nástroje – frézy stopkové, nástrčné.



Obr. 1.13 Frézovací nástroje firmy Walter

1 – rovinná, 2, 3, 21 – kulová, 4, 7, 8 – kopírovací, 6 – s kruhovými VBD, 9 – z monolitního SK, 10 – rovinná/rohová, 11, 12 – rohová, 13 – typ HELI, 14 – “ježková“, 15 – ponorná, 16 – rádiusová, 17 – vrtací drážková, 18 – typ WENDELNOVEX, 19 – s osmihrannými VBD, 20 – na srážení hran [4].

2 TECHNOLOGIE VÝROBY KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ

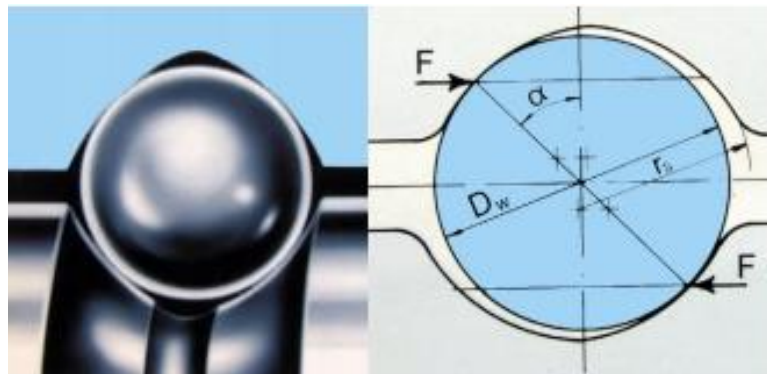
Kuličkové šrouby (dále jen KŠ) patří mezi konstrukční prvky pohybových ústrojí, které zajišťují s vysokou účinností převod rotačního pohybu na přímočarý. Vyznačují se zejména svou trvanlivostí, vysokou přesností a tuhostí. Pro svou vysokou účinnost zajištěnou nízkým valivým odporem převodu se uplatňují kuličkové šrouby v nejrůznějších odvětvích strojírenství. Mezi hlavní odvětví patří výroba obráběcích strojů, automobilový, jaderný, hutní, letecký a zdravotnický průmysl [5].

Kuličkový šroub se skládá z následujících částí [5]:

- hřídel kuličkového šroubu,
- matice (dvojice matic) obsahující převáděcí, předepínací, těsnící a mazací elementy,
- kuličky.

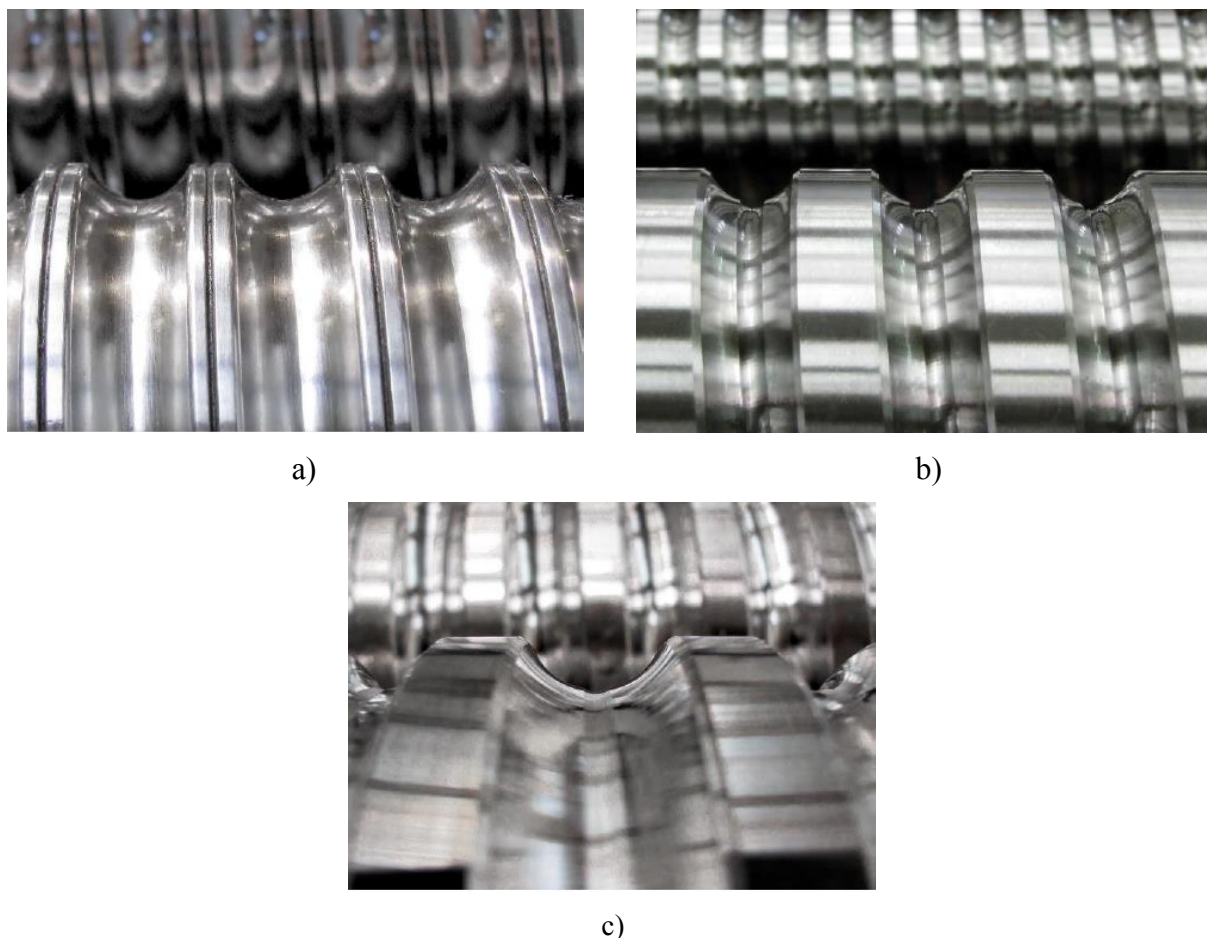
2.1 Profil kuličkového šroubu

Pro dosažení co nejvyšší účinnosti převodu je třeba zajistit ideální tvar profilu KŠ. Ten je výjimečně tvořen kruhovým profilem. Většinou je ale tvořen ze dvou rádiusů navzájem vyosených (tzv. gotický profil, viz obr. 2.1), kterým se zabezpečí ideální poměr účinnosti a únosnosti KŠ. Technologie výroby profilu KŠ je obdobná jako při výrobě závitů, proto budou v následujících kapitolách popsány technologie výroby závitů s využitím pro výrobu KŠ [5, 6].



Obr. 2.1 Gotický profil KŠ [5].

Profil dráhy kuličkového šroubu je zpravidla vyroben válcováním, broušením nebo okružováním. Každá technologie dosahuje jiných výsledků týkajících se převážně kvality povrchu a ekonomické náročnosti výroby. Dle požadovaných parametrů je zvolena vhodná technologie výroby. Na obr. 2.2 jsou zobrazeny detaily tvaru profilu závitu při použití zmíněných technologií [5, 7].



Obr. 2.2 Tvary profilu závitů KŠ – a) válcovaný profil, b) broušený profil, c) okružovaný profil [5, 7].

2.2 Válcování kuličkového šroubu

Válcování je nejproduktivnější způsob výroby KŠ, při kterém neprobíhá úběr materiálu ve formě třísky, ale dochází pouze k jeho plastické deformaci. Hlavní příčinou vzniklé plastické deformace je zpevňování materiálu. Na rozdíl od výroby závitů obráběním se neporuší vnitřní struktura materiálu, jak je patrné na obr. 2.3. Tvářené závity umožňují díky této skutečnosti přenášet větší silová zatížení. Na druhou stranu při plastické deformaci vzniká zhoršení tvarové přesnosti v nefunkční části profilu hřbetu závitu [7, 8, 9].

Principem válcování je vytlačování závitu na hřídeli kotoučovými čelistmi, které mají po obvodu požadovaný profil závitu. Samotná výroba je uskutečňována za studena působením vysokého tlaku čelistí na hřídel. Vnikáním válcovacího nástroje do hřídele je materiál radiálně vytlačován od kořene závitu až po jeho hřeben, a tím je zvětšován počáteční průměr polotovaru. Ten musí být zákonitě menší než jmenovitý vnější průměr vyrobeného závitu. Největší vliv na výslednou přesnost zaujímá kvalita hutního polotovaru a podmínky řízeného válcování. Vlivem zvolené technologie se vyskytuje v KŠ značné vnitřní pnutí, které se projevuje zpravidla geometrickou nepřesností spojenou s deformací osy hřídele a nárůstem hlučnosti při odvalování kuliček v drážce závitu. Nárůst hlučnosti je patrný zejména u vysokých rychlostí [7, 8, 9].

Válcováním je získán polotovar s mírně odlišným stoupáním, což je zapříčiněno korekcí pro následné tepelné zpracování. Polotovar po válcování je připraven pro další zpracování, jímž je povrchové kalení a leštění závitové části KŠ [7].

Hlavními výhodami válcovaných závitů je zvýšení pevnostních vlastností, neporušená vlákna materiálu a snížení vrubové houževnatosti [7, 9].



Obr. 2.3 Proces válcování [10].

2.2.1 Radiální válcovací kotouče

Při radiálním válcování se používají dva kotouče, jejichž šířka omezuje délku závitu. Oba poháněné kotouče se otáčejí ve stejném smyslu, závit je vytvořen během několika otáček. Povrch kotoučů tvoří negativ profilu válcovaného závitu. Využívají se speciální stroje umožňující vytvářet šrouby s normálním závitem, plochým závitem i jiné profily [8].

2.2.2 Axiální válcovací kotouče

Axiální válcovací hlavy jsou nástroje s vysokou produktivitou výroby vnějších závitů, které mohou teoreticky dosahovat nekonečné délky. Při axiálním válcování se používají tři kotouče uložené na excentrických čepech, jejichž otevření je zajištěno pružinou. Válcovací hlavy jsou konstruovány jako stojící, mechanicky natahovací s využitím principu samočinného otevření hlavy po dokončení válcování. Rozlišujeme dvě provedení axiálních válcovacích hlav [11]:

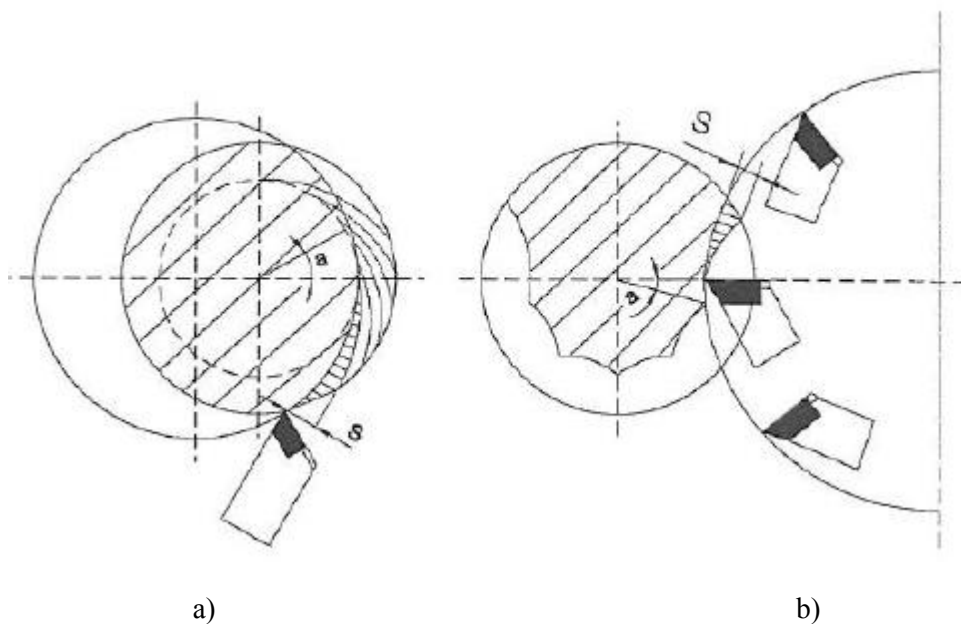
- pevné nastavení sklonu závitových kotoučů – pro válcování ostrých pravochoďých závitů, např. metrický, palcový nebo whitworthův,
- univerzální – umožňuje měnit souvisle sklon závitových kotoučů v rozsahu +5 až -5° v závislosti na úhlu stoupání šroubovice, pro válcování špičatých, trapézových a oblých závitů.

2.3 Rotační okružování

Rotační okružování je označováno z hlediska přerušovaného řezu a použitého typu nástroje jako speciální typ frézování. Na rozdíl od soustružení nebo konvenčního frézování, kde jsou VBD rozmístěny na vnější straně nástroje, u okružního frézování jsou umístěny na vnitřní straně nástroje. Technologii rotačního okružování lze tedy považovat za frézování s vnitřním ozubením [12].

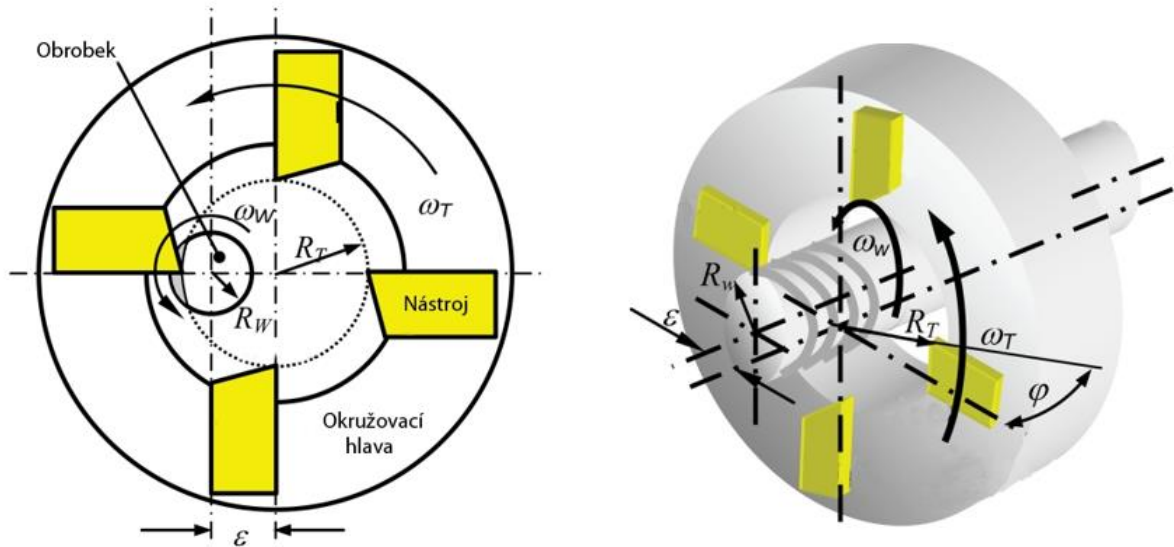
Metoda okružování umožňuje obrábět s vyšší řeznou a posuvovou rychlostí, než je tomu u frézování. Důvodem jsou výhodnější průběhy řezné síly u stejného úhlu posuvu (a) a parametry řezného procesu. Ze srovnání třísky vzniklé frézováním a okružováním na obr. 2.4 je patrné, že u okružování vzniká tříska delší, ovšem s menší tloušťkou (s). Pokud by byla maximální tloušťka třísky stejná, odstraní se okružováním více materiálu a tím dojde ke zkrácení doby obrábění. Za stejných řezných podmínek a stejného průměru obrobku obě metody vytvoří třísku se stejnou plochou. Ve styku VBD s obrobkem ale vznikají podstatně menší síly a elastické deformace, než je tomu u frézování [12].

Při okružování vznikají za konstantního posuvu podstatně menší úchytky od ideálního tvaru než u konvenčního frézování. Je zde také možnost většího úhlu posuvu bez výrazného zhoršení kvality obrobenej plochy [12].



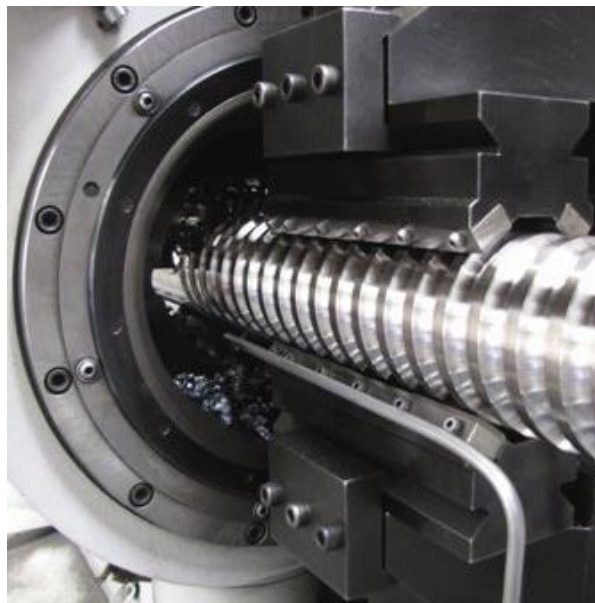
Obr. 2.4 Princip vzniku třísky – a) rotační okružování, b) frézování [13].

Na okružovací hlavu je v držáku připevněno několik vložek, které umožňují nastavení požadovaného úhlu nožů. Tyto vložky musí být schopné odolat vysokorychlostnímu soustřednému otáčení kolem obrobku. Okružovací hlava svírá s osou obrobku úhel stoupání šroubovice, jak je patrné na obr. 2.5. Kombinované otáčení obrobku a okružovací hlavy vytváří stoupání závitu. Vzhledem k tomu, že okružovací hlava obsahuje více vložek s VBD (obr. 2.6), je požadovaný závitový profil vytvořen na jediný průchod. Dle požadavků na pravotočivý nebo levotočivý závit okružovací hlava rotuje doprava nebo doleva [14].



Obr. 2.5 Princip rotačního okružování [15].

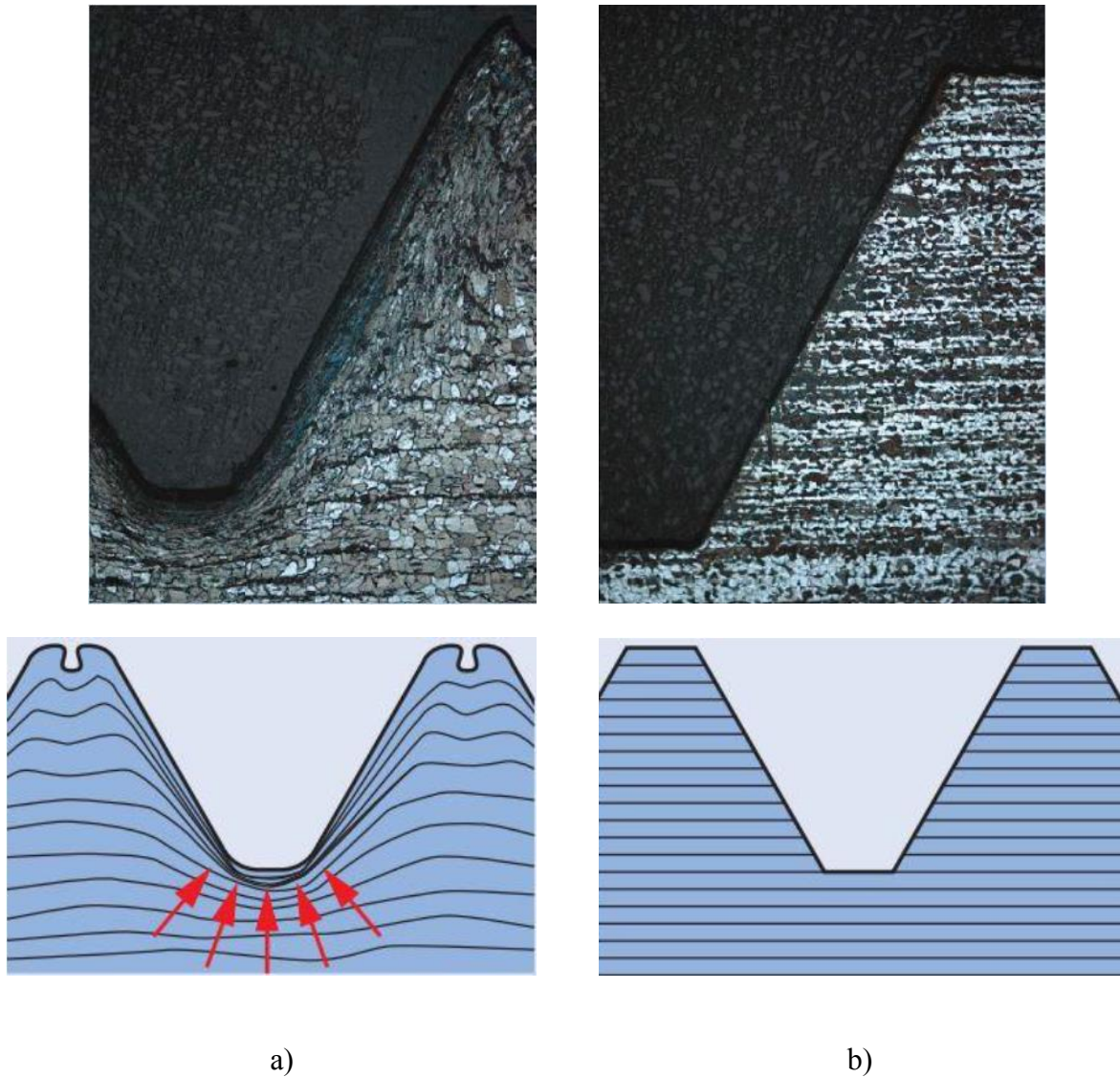
Při okružním frézování není potřeba podpurných zařízení obrobku a většinou se nevyužívá chladicí kapaliny nebo maziv. Maziva se můžou v malém množství využít při obrábění extrémně tvrdých materiálů, kde je aplikována na řeznou hranu směs vzduchu a oleje pro zvýšení životnosti nástroje. Z důvodu vysokých hodnot řezné síly se proces vyznačuje nízkým ohřevem obrobku. Díky nízké rozměrové odchylce způsobené tepelnou roztažností vznikají přesnější obrobky, než je tomu například u soustružení. Se vzrůstající rychlostí řezu klesá teplota obrobku, což má za následek přesné rozměry obráběného profilu a jeho roztečí. Při okružování vzniká krátká tříska, která odvádí většinu tepla vzniklého při obráběcím procesu. Z principu technologie vznikají přerušované krátké třísky, nehrozí tedy namotávání třísky kolem nástroje nebo obrobku, a tím poškození obrobeného povrchu [16].



Obr. 2.6 Rotační okružování [17].

Hlavními výhodami rotačního okružování jsou zvýšení produktivity a s tím spojené snížení nákladů, živostnost nástroje a kvalita povrchu [12, 14, 16].

Struktura tvářeného a řezaného závitu je zobrazena na obr. 2.7.



Obr. 2.7 Znáznornění struktury – a) tvářený závit, b) řezaný závit [18].

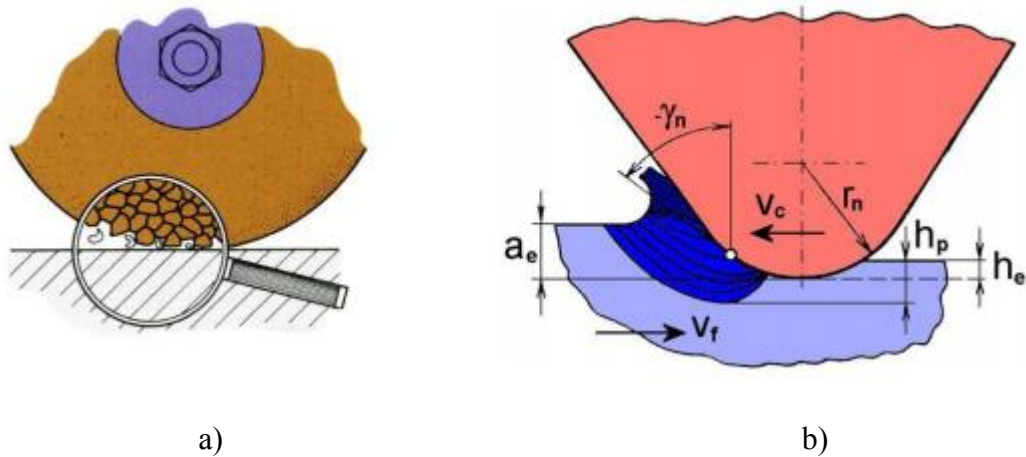
Porovnání vybraných parametrů výroby závitů tvářením a řezáním popisuje tab. 2.1.

Tab. 2.1 Porovnání vybraných parametrů tvářeného a řezaného závitu [8, 19].

Parametry	Tvářený závit	Řezaný závit
Příprava polotovaru	Průměr polotovaru je menší než jmenovitý vnější průměr závitu z důvodu zvětšení průměru polotovaru tvářením.	Průměr polotovaru odpovídá výslednému jmenovitému vnějšímu průměru vytvořeného závitu.
Výrobní čas	30 až 100 m · min ⁻¹ Tvářením probíhá v jednom kroku, časově náročnější přípravný čas, méně náročný výrobní čas.	3 až 40 m · min ⁻¹ Časově náročnější výrobní čas, méně náročný přípravný čas.
Náklady na nástroje	Velmi vysoké, vysoká životnost nástroje.	Velmi nízké, nástroje mohou být následně přebroušeny.
Pevnost	Vyšší, v důsledku deformací dochází k jejich zpevnění a nejsou přerušena tvářením.	Nižší z důvodu přerušování vláken materiálu.

2.4 Broušení kuličkového šroubu

Broušení se řadí mezi abrazivní metody obrábění, pro které je typické použití nástroje s nedefinovanou geometrií břitu. Samotný proces broušení vykazuje základní charakteristiky podobné jiným obráběcí procesům, zejména frézování. Při procesu broušení nastávají kvalitativní a kvantitativní odlišnosti související s řeznými podmínkami a s vlastnostmi broušícího kotouče. Hlavním rozdílem vzhledem k frézování je zejména široká škála geometrických tvarů broušících zrn, které jsou nepravidelně rozmístěny na ploše broušícího nástroje, jak je patrné na obr. 2.8. Pro takto rozmístěná zrna je charakteristický proměnný úhel čela zrn, který většinou nabývá záporných hodnot. Broušení se na rozdíl od ostatních metod obrábění vyznačuje tzv. samoostřením. Hlavním důvodem tohoto jevu je poměrně slabé zakotvení broušících zrn v tělese broušícího kotouče, které se při nárůstu řezných sil vylomí a nahradí je zrna nová. Typické jsou také vysoké hodnoty řezné rychlosti, které se mohou pohybovat většinou v rozmezí 30 m · s⁻¹ až 100 m · s⁻¹. Při procesu broušení vznikají třísky s proměnným průřezem, které dosahují hodnot řádově 10⁻³ mm² až 10⁻⁵ mm². Malé průřezy třísek souvisí s vysokými hodnotami měrné řezné síly, které se pohybují v řádech až několika desítek tisíc MPa. Velké plastické deformace zapříčiňují ohřev třísek na vysokou teplotu a ty pak mohou shořet nebo vytvořit kapky kovu. Kvůli vzniklému teplu je potřeba vydatného chlazení obrobku, čímž vznikají nepříznivá tahová napětí [1, 20].



Obr. 2.8 Brusná zrna – a) detail uchycení brusných zrn v kotouči,
b) obecné úhly jednotlivých zrn [4].

Proces broušení může probíhat různě definovanými metodami. Podle vybraných kritérií se broušení dělí [1, 20]:

Tvar obrobeneho povrchu [1, 20]:

- rovinné broušení – broušení rovinné plochy,
- broušení do kulata – broušení rotačních součástí,
- broušení na otáčivém stole – broušení s rotačním posuvem stolu,
- tvarovací broušení – broušení závitových profilů,
- kopírovací broušení – použití řízené změny posuvu, NC stroje,
- tvarové brousící kotouče – specifický profil kotouče stanovuje výsledný profil obrobku.

Aktivní část nástroje [1, 20]:

- obvodové broušení – úběr materiálu probíhá obvodem kotouče,
- čelní broušení – úběr materiálu probíhá čelem kotouče.

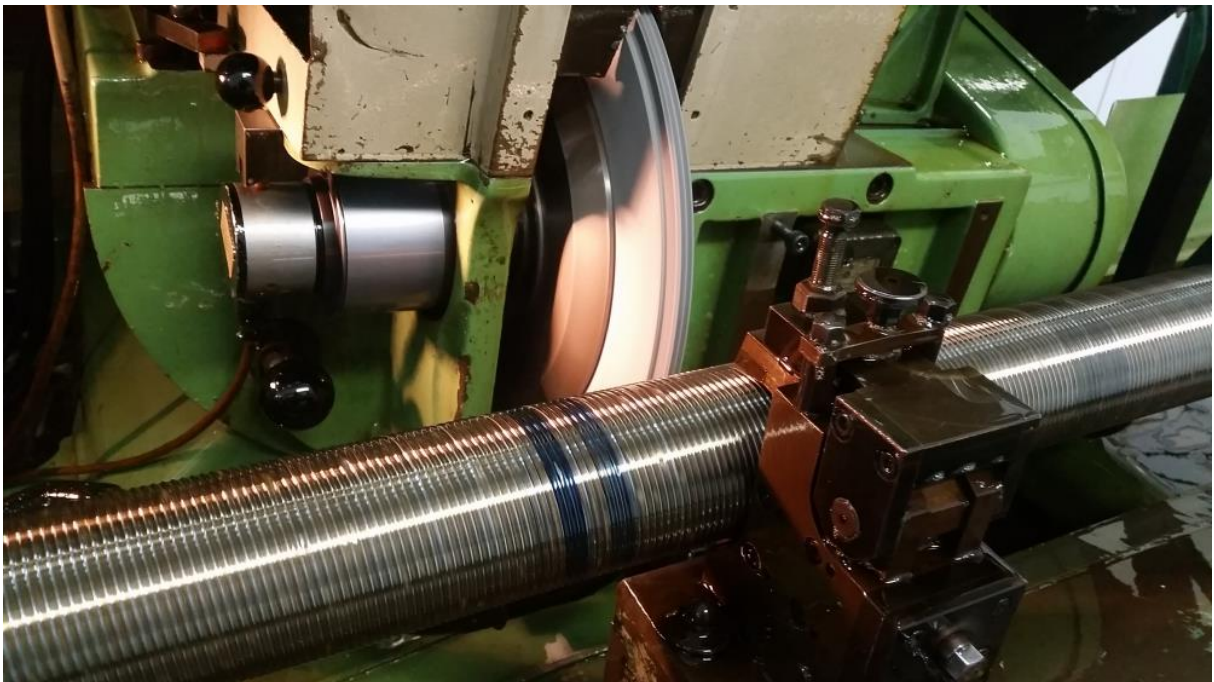
Vzájemná poloha nástroje a obrobku [1, 20]:

- vnější broušení – broušení vnějšího povrchu obrobku,
- vnitřní broušení – broušení vnitřního povrchu obrobku.

Hlavní pohyb posuvu stolu vzhledem k nástroji [1, 20]:

- axiální broušení – hlavní posuv stolu a osa kotouče jsou rovnoběžné,
- tangenciální broušení – hlavní posuv stolu a vektor obvodové rychlosti v určeném bodě jsou rovnoběžné,
- radiální broušení – hlavní posuv stolu v určeném bodě je radiální vzhledem k brusnému kotouči,
- obvodové zápichové broušení – posuv stolu probíhá plynule radiálně,
- čelní zápichové broušení – posuv stolu probíhá plynule axiálně.

Broušení probíhá na již obrobeném polotovaru KŠ (obr. 2.9). Pro toto obrábění se nejčastěji využívá technologie okružování. Následně se využívá laserového nebo indukčního povrchového kalení. Na výslednou přesnost po broušení má vliv zejména přesnost brusky, vhodně zvolený brusný nástroj a jeho tvarování. Předností broušených KŠ je přesné rozložení tvaru zakalené vrstvy kolem profilu závitu, vysoká živostnost a také geometrická přesnost závitu na hřídeli. Nevýhodou je, jak již bylo zmíněno, časová náročnost a velké množství použité chladicí kapaliny [7].



Obr. 2.9 Broušení KŠ [21].

3 EXPERIMENTÁLNÍ METODY KE ZJIŠTĚNÍ OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE

Při vzájemném pohybu a kontaktu nastává opotřebení u všech strojních zařízeních. Při obrábění nastává relativní pohyb a také kontakt mezi nástrojem a obrobkem, a také mezi nástrojem a třískou. Opotřebení nástroje je proces velmi komplikovaný a ovlivňuje ho mnoho faktorů. Mezi nejvýznamnější faktory se řadí geometrie nástroje, druh obráběcí operace, fyzikální a mechanické vlastnosti nástrojového a obráběného materiálu, pracovní podmínky a řezné prostředí [23].

Ve strojírenství se vyskytuje široká škála experimentálních metod ke zjištění opotřebení nástroje. Tato práce se svou problematikou pohybuje v technologii obrábění. V následujících kapitolách jsou tedy stručně zpracovány některé experimentální metody, u kterých dochází nejčastěji k vyhodnocení [24]:

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

3.1 Přímé metody měření opotřebení řezného nástroje

Přímými metodami se rozumí metody, kde sledování a vyhodnocování stavu opotřebení probíhá přímo na řezném nástroji. Následující podkapitoly 3.1.1 až 3.1.6 popisují nejčastěji používané přímé metody [23].

3.1.1 Kritéria opotřebení

Kritérium opotřebení udává stav destičky, ve které se řezný nástroj nahradí novým z důvodu rizika, že dojde k jeho porušení. U každé operace je zvoleno kritérium opotřebení, kdy bude obrobek vyroben v požadované kvalitě. Mezi nejčastější požadavky patří např. tolerance, jakost povrchu a jiné vlastnosti obrobku [25].

Měření střední šířky fazetky opotřebení na hřbetě VB probíhá na dílenském mikroskopu. Hloubka výmolu na čele KT se zpravidla měří profilometrem. Pro zjištění opotřebení špičky KVy se využívá délkové měřidlo. Všechna zmíněná kritéria opotřebení jsou zároveň diskontinuální metodou, měření tedy musí probíhat na nástroji, který se aktuálně neúčastní obráběcího procesu [24].

3.1.2 Vážení břitové destičky

Vážením břitové destičky nelze zjistit způsob poškození břitové destičky, ale pouze hmotnost materiálu, který byl při obráběcím procesu z destičky odebrán. Tato metoda se také řadí mezi diskontinuální metody [23].

3.1.3 Optické sledování funkční plochy nástroje

Jedná se o další diskontinuální metodu. Princip spočívá ve sledování hřbetu nebo čela nástroje digitální kamerou přes objektiv. Touto metodou lze také určit opotřebení špičky nástroje [23].

3.1.4 Elektrické metody

Elektrickými metodami lze měřit stav opotřebení za chodu stroje, čímž je možné ušetřit náklady spojené s výměnou za nový nástroj a následné zjištění opotřebení na nástroji vyjmutém [23, 24].

- Odporové metody – hřbet nástroje je pokryt tenkou vrstvou elektricky vodivého materiálu. Při postupném opotřebení nástroje je tato vrstva porušována a odstraňována, což zapříčiňuje změnu elektrického odporu. Po dosažení předem určené limitní hodnoty elektrického odporu je nástroj považován za opotřebený [23, 24].
- Sledování vzájemné polohy nástroje a obrobku – metoda spočívá na principu neustálého sledování nástroje a obrobku pomocí snímačů jejich polohy. Tímto způsobem nelze určit formu opotřebení nástroje [23].

3.1.5 Ultrazvukové metody

Způsob určení velikosti KVy. Do řezného nástroje jsou vysílány ultrazvukové vlny, které se odrazí, a putují zpět ke zdroji. Opotřebením dojde ke kratšímu intervalu mezi vyslaným a odraženým signálem. Časový rozdíl mezi novou a opotřebovanou břitovou destičkou odpovídá určité míře opotřebení. Tyto metody jsou také řazeny mezi kontinuální [23].

3.1.6 Radioaktivní metody

Kontinuální metody, mezi které se řadí ozáření řezného nástroje a mikroizotopový snímač [23].

- Ozáření řezného nástroje – VBD je vystavena radioaktivnímu záření. Čítač snímá hodnotu ozáření nástroje. Při určité míře opotřebení nástroje hodnota ozáření klesne na limitní hodnotu, kdy je potřeba nástroj vyměnit za nový. Nevýhodou je nemožnost určení formy opotřebení [23].
- Mikroizotopový snímač – na břitové destičce se vytvoří radioaktivní bod. Při odstranění tohoto bodu opotřebením nástroje dochází ke ztrátě hodnoty radioaktivního záření vyzařované z tohoto bodu [23].

3.2 Nepřímé metody měření

Všechny nepřímé metody měření se řadí mezi kontinuální. K analýze opotřebení řezného nástroje se využívá veličina, která má určitý vztah s požadovanou veličinou, ale dle své definice s ní přímo nesouvisí. V následujících podkapitolách 3.2.1 až 3.2.3 jsou popsány některé z těchto metod [23].

3.2.1 Měření a vyhodnocování sil

Měření jednotlivých složek řezné síly patří k nejrozšířenějším nepřímým metodám k určení stavu opotřebení řezného nástroje. Se změnou geometrie nástroje vlivem opotřebení se mění také velikosti jednotlivých složek řezné síly. Pro tuto práci hrálo důležitou roli sledování změn řezných sil během soustružení, proto je kapitola rozpracována podrobněji než ostatní. Rozboru silového zatížení při soustružení se věnuje kapitola 1.1.2 [2, 23, 26].

Měření složek řezných sil může probíhat následujícími metodami [23]:

- 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.

Dynamometry jsou zařízení, které se používají pro měření řezných sil a odporů. Tyto přístroje mohou být založeny na různém principu, z nichž každý přináší do měření výhody a nevýhody. Podle principu snímačů se dynamometry rozdělují do následujících skupin [23].

Mechanické dynamometry

Zařízení založené na principu elastické deformace pružného členu. Deformace je snímána číselníkovým úchylkoměrem. Hlavní výhodou je jednoduchá konstrukce a obsluha při měření. Mezi nevýhody patří zejména nutnost vyměňovat pružné členy pro různé hodnoty zatížení. Z toho plyne náchylnost k přetížení a nevratné plastické deformaci pružného členu [23].

Pneumatické dynamometry

Stejně jako u mechanických tenzometrů je princip založen na využití pružného členu. Deformace se určuje na základě pneumatického principu. Na těleso působí zatěžující síla, jejíž velikost se určí rozdílem výšek kapaliny v zařízení. Výhody a nevýhody jsou díky použití pružného členu obdobné jako v předchozím případě [23].

Hydraulické dynamometry

Jedná se o méně využívanou metodu v důsledku problémů týkajících se utěsnění pracovní kapaliny a špatné přesnosti při menších zatěžujících silách. Využívají se u měření zatížení kotev jednotlivých svazků lan visutých a zavěšených mostů [23].

Elektrické dynamometry

V technické praxi se řadí k nejrozšířenějším a nejpoužívanějším dynamometrům. Mezi výhody těchto zařízení patří např. možnost snímání signálu u rotujících a pohybujících se součástí nebo čistota provozu zařízení. Elektrické dynamometry se mohou rozdělit podle mechanicko-elektrické transformace na dvě základní skupiny [27]:

- Parametrické systémy – princip je založen na změně jednoho z parametrů vyskytující se v elektrickém obvodu (indukčnost, kapacita, odpor),
- Generátorové systémy – principem je generování napětí nebo proudu při deformaci elementů (např. piezoelektrický jev).

Mezi elektrickými dynamometry mají své zastoupení indukční a piezometrické.

Indukční dynamometry

Indukční dynamometry pracují na principu změny indukčnosti v obvodu použitého snímače. Při zatížení se deformační člen deformuje, čímž je posunuto jádro cívky. Snímače pracující v tomto zařízení většinou s malou vzduchovou mezerou. Zátěžová síla přes deformační člen ovlivňuje šířku vzduchové mezery, čímž se mění impedance magnetického obvodu. Odpor magnetického obvodu indukčního snímače je složen z odporu vzduchové mezery a feromagnetické části [23, 27].

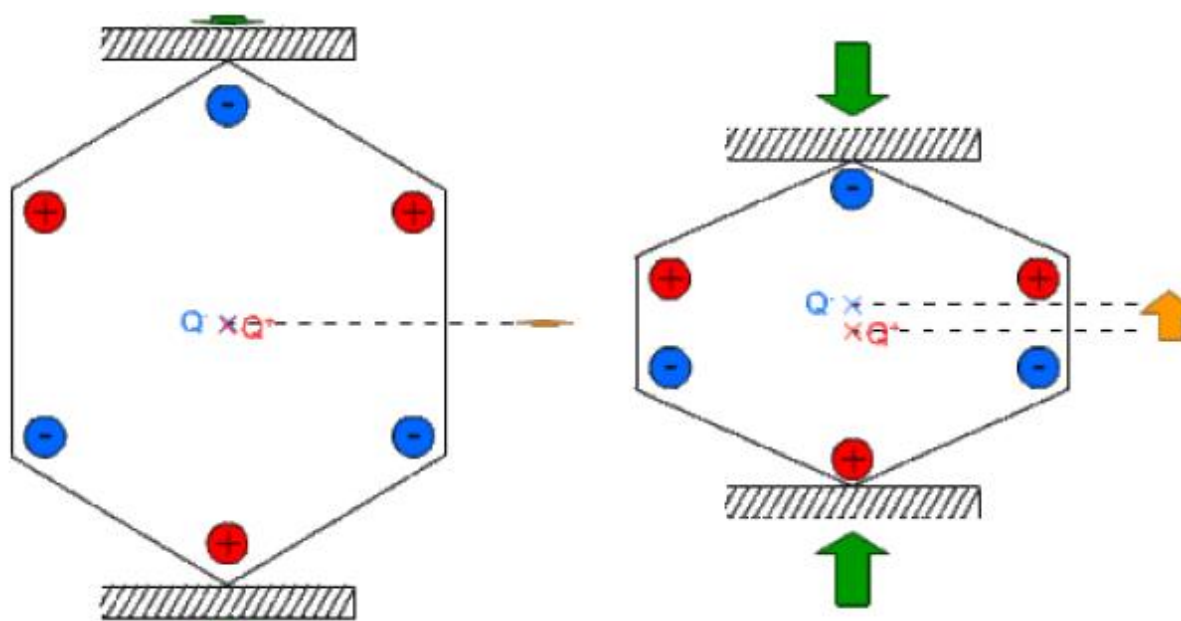
Snímače využívané pro tento typ dynamometrů se dle uspořádání magnetického obvodu rozdělují [27]:

- snímače s malou vzduchovou mezerou (uzavřený magnetický obvod),
- snímače s otevřeným magnetickým obvodem,
- snímače se stálým magnetickým obvodem.

Piezometrické dynamometry

Deformace je určena za pomoci piezometrického jevu, pro který je typický vznik elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení viz obr. 3.1. Nejčastěji využívaný piezoelektrický materiál je zejména křemen, mezi další materiály patří látky na bázi titaničitanu barnatého nebo Seignettovy soli. Piezometrický snímač obsahuje jako základní prvek vhodně vyříznutou měřicí destičku z patřičného krystalu. Velikost náboje

je přímo úměrná zatěžovací síle. Poklesem působící síly se hodnota zatížení lineárně snižuje až k nulové hodnotě při ukončení zatěžování [23, 26, 27]:



Obr. 3.1 Princip vzniku elektrické polarizace při deformaci [28].

Na obr. 3.2 jsou zobrazeny různé typy piezometrických dynamometrů od firmy KISTLER. Dynamometr KISTLER typu 9257B byl také použit pro určování velikosti sil v experimentální části. Postup měření je zpracován v kapitole 4.3.



Obr.3.2 Dynamometry KISTLER pro různé operace [23].

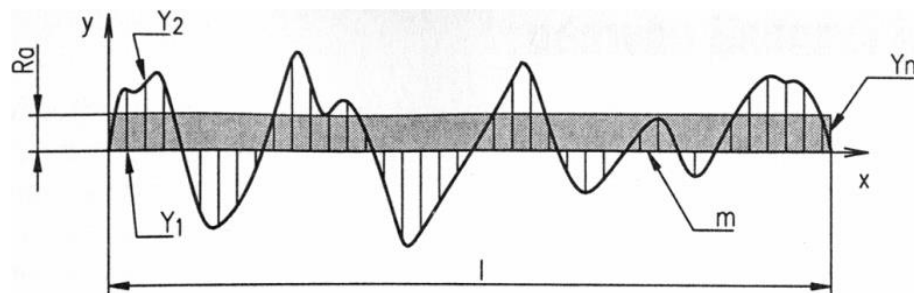
3.2.2 Měření drsnosti povrchu

Povrch obrobku není nikdy ideální, jako je tomu uvedeno v technické dokumentaci. Skutečný povrch obsahuje velmi jemné nerovnosti rozložené s jistou pravidelností po obrobené ploše. Na hodnotu drsnosti má velký vliv také metoda výroby povrchu [29].

Se zvyšujícím se opotřebením řezného nástroje se zhoršuje také kvalita obrobené plochy. Předem definovaný nárůst opotřebením může značit potřebu vyměnit řezný nástroj za nový [29].

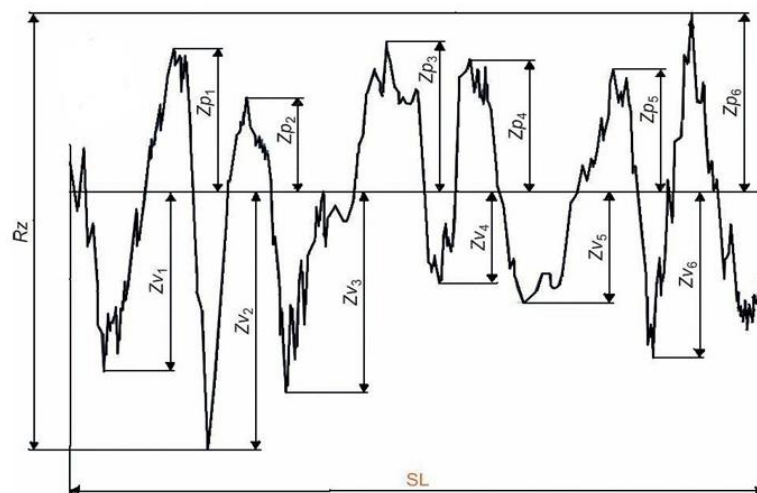
V experimentální části byla měřena drsnost povrchu ručním drsnoměrem TR 100 Surface Roughness Tester, který je schopen měřit aritmetickou úchylku profilu R_a a výšku nerovnosti profilu určenou z 10 bodů R_z . Parametry přístroje jsou uvedeny v kapitole 4.3. Na obr. 3.3 a obr. 3.4 jsou zobrazeny profily obrobené plochy a zakótované měřené veličiny R_a , R_z .

R_a – aritmetický střed absolutních odchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř základní délky [28].



Obr. 3.3 Metodika měření drsnosti povrchu R_a [29].

R_z – součet výšky nejvyššího výstupku a hloubky nejnižší rýhy uvnitř základní délky. Parametr odpovídá střední hloubce drsnosti de DIN 4762 [29].



Obr. 3.4 Metodika měření drsnosti povrchu R_z [30].

3.2.3 Měření teploty řezného nástroje

Monitorováním tepla jsou získány údaje o teplotě v požadovaném místě, které nás informují o stavu nástroje, způsobu odvodu tepla a vhodnosti obráběcích podmínek [23].

Nejvhodnější způsob měření vychází z pevně umístěné termokamery, která je vhodně zaostřena na okolí řezu, ideálně přímo na břit nástroje. Následně termokamera v pravidelných intervalech snímá místo řezu. Naměřené výsledky jsou odeslány do počítače a pomocí vhodného softwaru vyhodnoceny. Při náhlé změně teploty v daném místě, případně naměřené teplotě mimo definovaný interval, software upozorní obsluhu stroje, upraví řezné podmínky nebo v krajním případě zastaví obráběcí proces [23].

4 PRŮBĚH ŘEZNÝCH ZKOUŠEK

Cílem experimentální části bylo zjistit a porovnat opotřebení na použitých VBD při obrábění konstrukční oceli 42CrMo4.

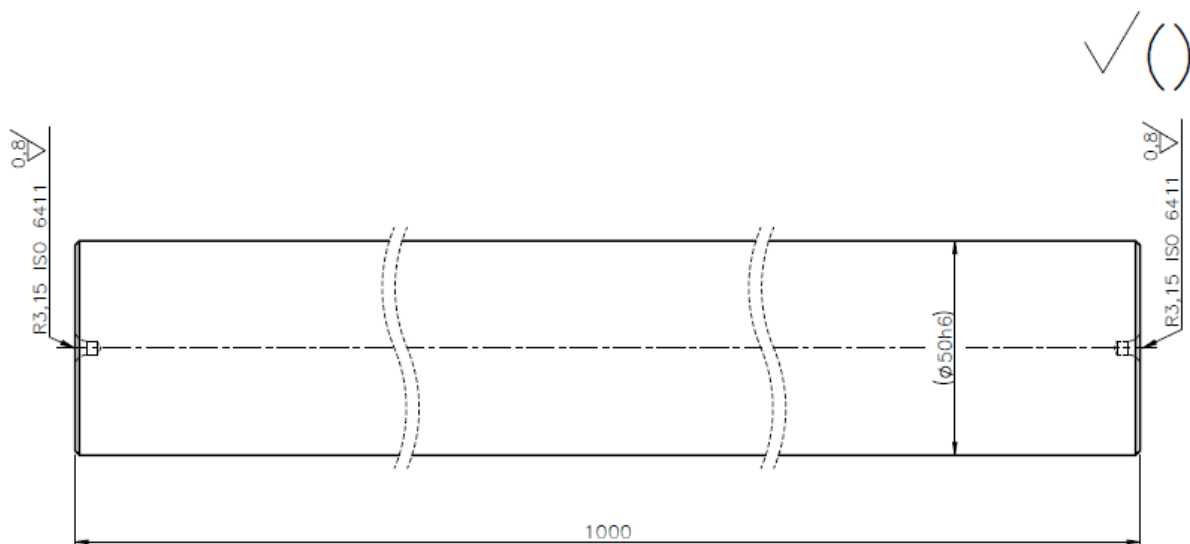
Řezné zkoušky byly rozděleny do dvou sérií, z nichž každá série obsahovala testování dvou VBD. Pro každou dvojici VBD byly nastaveny řezné podmínky, které se lišily pouze v hodnotě šířky záběru ostří. Řezné zkoušky probíhaly na univerzálním hrotovém soustruhu SU 50 A/1500. Každá VBD urazila požadovanou dráhu 850 m. Tato vzdálenost byla rozdělena na úseky 50 m, 100 m, 100 m a 3x 200 m.

Fotografická dokumentace vzniklého opotřebení byla pořízena na elektronovém mikroskopu TESCAN VEGA 3. Silové zatížení bylo měřeno pro každou z uražených drah VBD za pomoci dynamometru KISTLER typu 9257B. S využitím softwaru Dynoware byly vytvořeny grafické průběhy silových složek F_i v závislosti na čase t .

Součástí experimentální části byla rovněž charakteristika testovaného materiálu, zvolených řezných nástrojů a použitého stroje.

4.1 Materiál obrobku

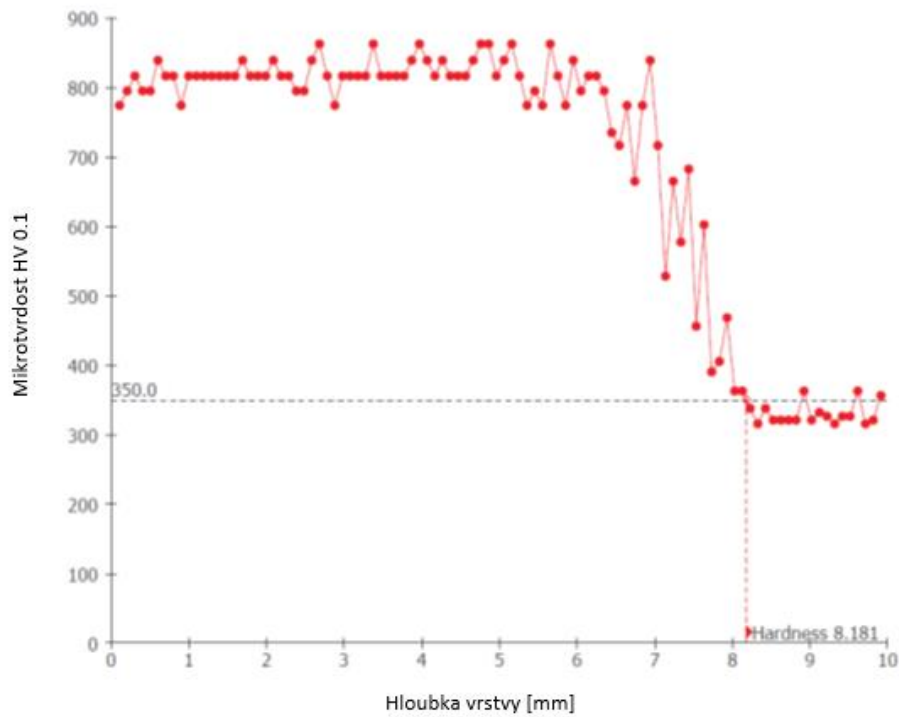
Materiálem obrobku byla nízkolegovaná ušlechtilá chrom-molybdenová ocel k zušlechťování 42CrMo4, která byla indukčně zakalena na tvrdost 800 HV 0.1. Pro testování VBD bylo dodáno celkem 6 ks zkušebních tyčí, které splňovaly požadavky uvedené na obr. 4.1.



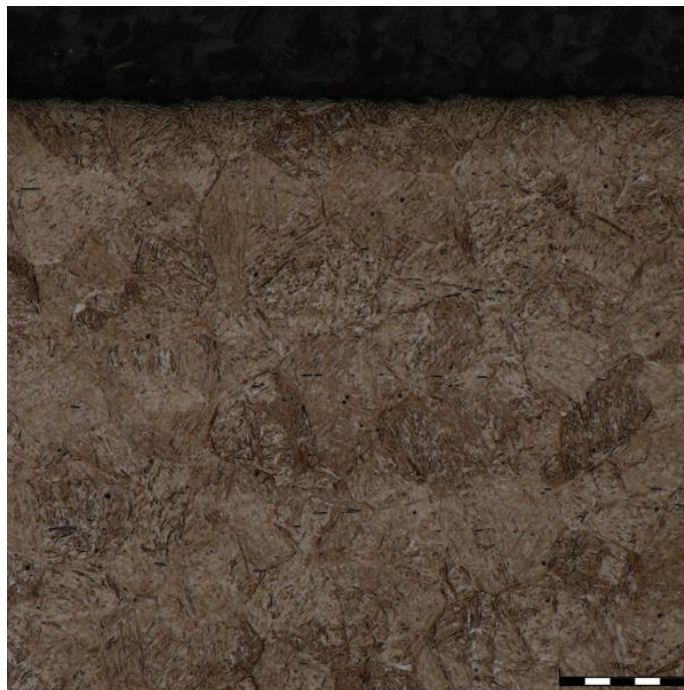
Obr. 4.1 Požadavky na zkušební tyče z konstrukční oceli 42CrMo4.

Dodané tyče byly zkoumány rovněž z důvodu ověření mikrotvrdosti, mikrostruktury a chemického složení. Testování tyčí bylo nezbytné z důvodu ověření vlastností materiálu garantované od dodavatele. Na obr. 4.2 je zobrazen jeden z diagramů průběhu mikrotvrdosti směrem od povrchu obrobku. Analýza mikrostruktury prokázala, že původní materiál polotovaru jemnozrný martenzit postupuje přechodovou oblastí směrem k povrchu a mění se na hrubozrný martenzit. Detaily mikrostruktury jsou patrné na obr. 4.3 až obr. 4.5.

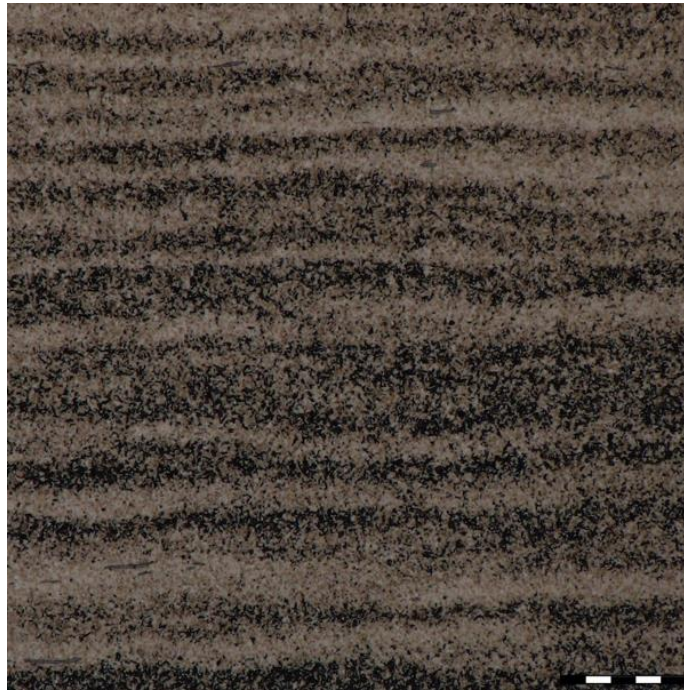
Pomocí spektrální analýzy bylo zjištěno chemické složení několika vzorků obráběného materiálu. V tab. 4.1. je uvedeno vzorové porovnání výsledků spektrální analýzy jednoho ze vzorků s chemickým složením konstrukční oceli 42CrMo4 dle ČSN EN 10083-1 [31].



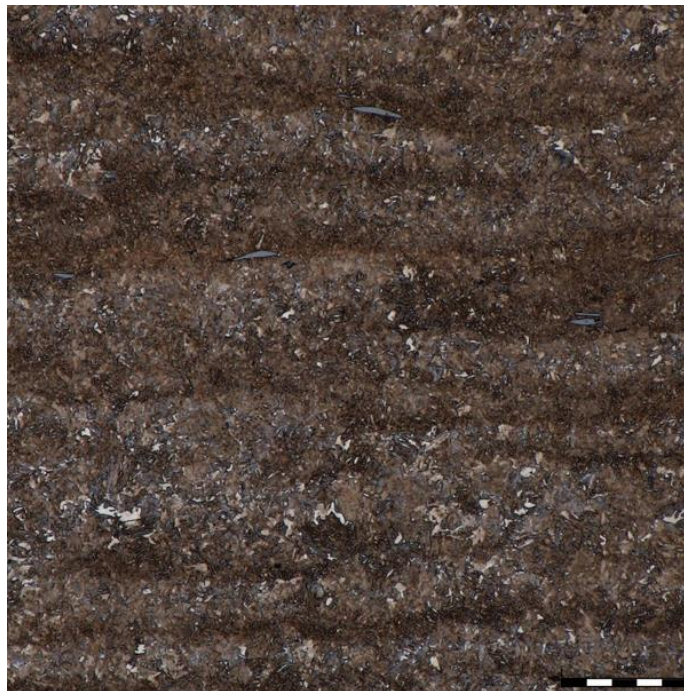
Obr.4.2 Mikrotvrđost vzorku od povrchu směrem do jádra.



Obr. 4.3 Mikrostruktura povrchu vzorku, leptáno NITAL 5%, přibližné zvětšení 500x.



Obr. 4.4 Mikrostruktura přechodové části vzorku, leptáno NITAL 5%, přibližné zvětšení 500x.



Obr. 4.5 Mikrostruktura základního materiálu vzorku, leptáno NITAL 5%, přibližné zvětšení 500x.

Tab. 4.1 Chemické složení konstrukční oceli 42CrMo4 dle ČSN EN 10083-1 v porovnání se spektrální analýzou vzorku [31].

Chemické složení	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Min. [hm. %]	0,38	-	0,60	-	-	0,90	0,15
Max. [hm. %]	0,45	0,40	0,90	0,025	0,035	1,20	0,30
Spektrální analýza [hm. %]	0,40	0,19	0,77	0,01	0,02	0,98	0,17

Upnutý a připravený materiál 42CrMo4 k provedení řezných zkoušek je znázorněn na obr. 4.6.



Obr. 4.6 Ukázka upnutí zkušební tyče vyrobené z konstrukční oceli 42CrMo4.

4.2 Obráběcí stroj

Pro obrábění byl použit univerzální hrotový soustruh SU 50 A/1500 s přídavným snímačem otáček, který je určen k přesnému soustružení obrobků střední velikosti v malosériové a kusové výrobě viz obr. 4.7. Umožňuje využití široké škály nástrojů a řezání závitů ve velkém rozsahu stoupání. Posuvy a závitů se nastavují pákami. Pracovní vřeteno je poháněno dvěma elektromotory přes převodovku unášecí spojkou. V tab. 4.2 přehled základních technických parametrů stroje [32, 33, 34].

Tab. 4.2 Technické údaje univerzálního hrotového soustruhu SU 50 A/1500 [32].

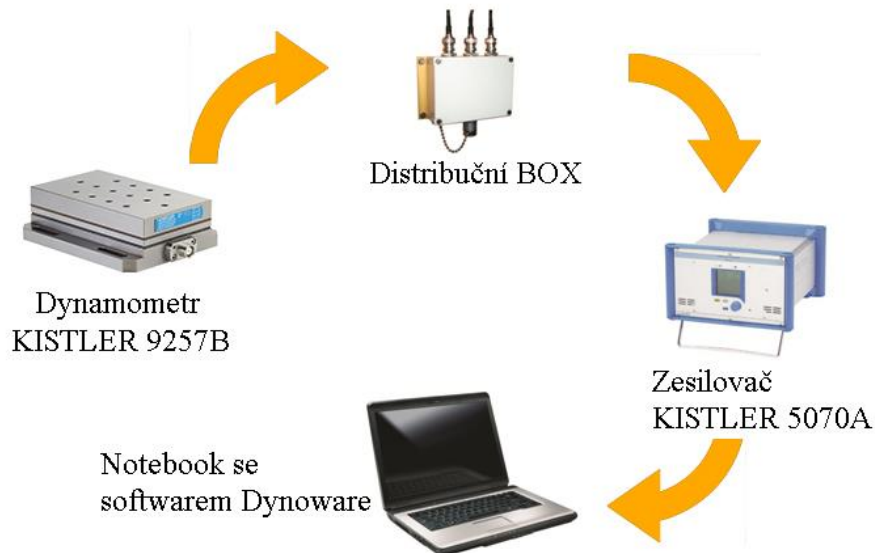
Technická specifikace	Hodnota	Jednotka
Oběžný průměr nad ložem	500	mm
Oběžný průměr nad suportem	250	mm
Vrtání vřetene	56	mm
Největší hmotnost obrobku	850	kg
Největší průměr nože	32 x 32	mm
Otáčky vřetene	11,2 až 1 400	min ⁻¹
Elektromotor pro pohon vřeteníku	11	kW
Elektromotor rychloposuvu	0,55	kW



Obr. 4.7 Univerzální hrotový soustruh SU 50 A/1500.

4.3 Použitá aparatura

V rámci experimentální části jsou měřeny síly při soustružení. K tomuto účelu byl využit dynamometr KISTLER typu 9257B, který byl umístěn místo standardního nožového suportu. Přenášený signál z dynamometru putuje pomocí spojovacího kabelu do distribučního boxu, ze kterého signál pokračuje dále do nábojového zesilovače KISTLER typu 5070A. Zesilovač je propojen s notebookem, na kterém jsou zobrazovány výsledné zatížení pomocí softwaru Dynoware. Schéma zapojení celé aparatury je na obr. 4.8.



Obr. 4.8 Schéma zapojení dynamometru [22].

Po dokončení obráběcího procesu byla v pravidelných intervalech měřena střední aritmetická úchylka profilu R_a a výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů R_z . Pro toto měření byl použit ruční drsnoměr TR 100 Surface Roughness Tester, který je zobrazen na obr. 4.9.



Obr. 4.9 Ruční drsnoměr TR 100 Surface Roughness Tester.

V tab. 4.3 jsou zpracovány základní parametry přístroje.

Tab. 4.3 Technické údaje TR 100 Surface Roughness Tester [35].

Technická specifikace	Hodnota	Jednotka
Norma	ISO class 3	-
Měřený rozsah Ra	0,05 – 15,00	μm
Měřený rozsah Rz	0,1 – 50	μm
Měřený parametr Ra	ISO	-
Měřený parametr Rz	DIN	-
Rozlišitelnost	0,01 – 0,1	μm
Cut-off	0,25/0,8/2,5	mm
Měřená délka	6	mm
Snímač	Diamantový 10 ± 2,5	μm
Okolní teplota	0 – 40	°C
Digitální filtry	RC	-

K detailnímu zkoumání VBD byl využit elektronový mikroskop TESCAN VEGA 3, který znázorňuje obr. 4.10.



Obr. 4.10 Elektronový mikroskop TESCAN VEGA 3 [36].

4.4 Řezné podmínky při zkoušce řezivosti

Jak již bylo zmíněno, při testování VBD bylo použito pro každou sérii dvou rozdílných šířek záběru ostří. V případě zmenšujícího se průměru a konstantních otáček klesá řezná rychlost. Vzhledem k zachování konstantní řezné rychlosti byly předem určeny otáčky pro každý soustružený průměr. Ve skutečnosti se předem nastavené otáčky ve chvíli dotyku nástroje s obráběným materiálem sníží o určitou hodnotu, a proto se skutečné řezné podmínky mírně lišily od těch teoreticky určených, které jsou uvedeny v tab. 4.4. Zkušební tyč byla prokalena do minimální hloubky 5 mm od povrchu obrobku. Průměr, do které bylo možné obrábět tedy činil $\varnothing 40$ mm. Výpočet pro obráběný průměr materiálu proběhl dle vztahu (4.1).

$$D_i = D_{i+1} - 2 \cdot a_p \quad [\text{mm}] \quad (4.1)$$

Vzorový výpočet pro 2. průjezd je uveden níže:

$$D_2 = 50 \text{ mm} - 2 \cdot 0,045 \text{ mm} = 49,910 \text{ mm}$$

Na konvenčních strojích (bez plynulé regulace otáček), jako je univerzální hrotový soustruh SU 50 A/1500, je téměř nemožné dodržet „stejně“ řezné podmínky při zmenšujícím se průměru obrobku.

Tab. 4.4 Stanovené řezné podmínky pro zkoušky řezivosti.

Průjezd číslo	Obráběný průměr	Otáčky	Řezná rychlost	Šířka záběru ostří	Posuv na otáčku
-	D	n	v_c	a_p	f
[-]	[mm]	[min ⁻¹]	[m.min ⁻¹]	[mm]	[mm]
1	50	1145,92	180	0,045	0,34
2	49,91	1147,98	180	0,45	0,34
3	49,01	1169,06	180	0,045	0,34
4	48,92	1171,21	180	0,45	0,34
5	48,02	1193,17	180	0,045	0,34
6	47,93	1195,41	180	0,45	0,34
7	47,03	1218,28	180	0,045	0,34
8	46,94	1220,62	180	0,45	0,34
9	46,04	1244,48	180	0,045	0,34
10	45,95	1246,92	180	0,45	0,34
11	45,05	1271,83	180	0,045	0,34
12	44,96	1274,37	180	0,45	0,34
13	44,06	1300,40	180	0,045	0,34
14	43,97	1303,07	180	0,45	0,34
15	43,07	1330,29	180	0,045	0,34
16	42,98	1333,08	180	0,45	0,34
17	42,08	1361,59	180	0,045	0,34
18	41,99	1364,51	180	0,45	0,34
19	41,09	1394,40	180	0,045	0,34
20	41	1397,46	180	0,45	0,34
21	40,1	1428,82	180	0,045	0,34

Otáčky v tab. 3.4 jsou vypočítány dle vztahu 4.2. Vzorový výpočet pro $\varnothing D = 50 \text{ mm}$, je uveden níže:

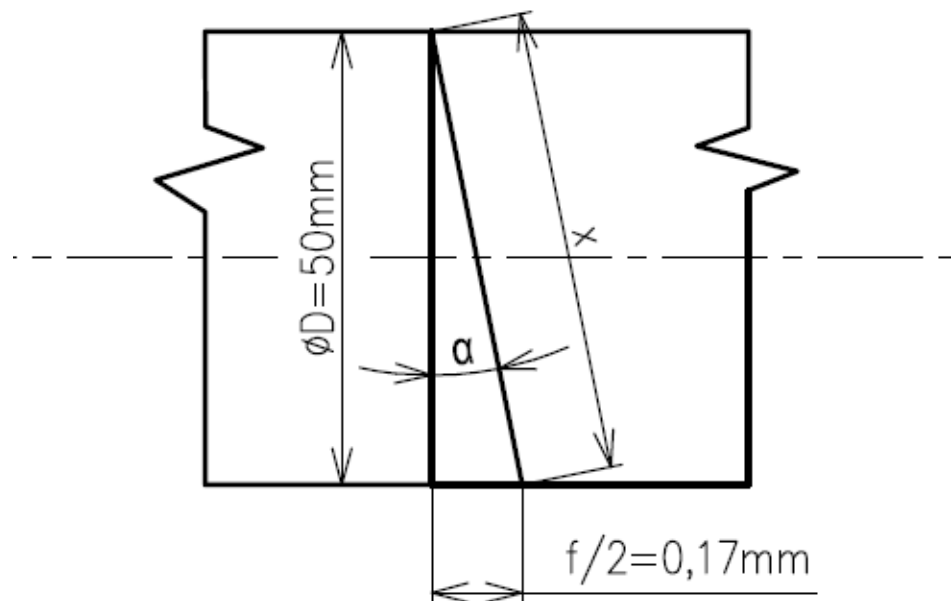
$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad (4.2)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}}{\pi \cdot 50 \text{ mm}} = 1145,92 \text{ min}^{-1}$$

Při výpočtech pro dráhu nože byly použity hodnoty aktuálních průměrů tyče. Jelikož nůž při řezném procesu opisuje šroubovici o stoupání rovnající se posuvu na otáčku $f = 0,34 \text{ mm}$, byla by správná hodnota vypočtena dle vztahu 4.3. Pro lepší pochopení je hodnota “X” znázorněna na obr. 4.11.

$$X = \sqrt{D^2 + \left(\frac{f}{2}\right)^2} \quad (4.3)$$

$$X = \sqrt{50^2 \text{ mm} + \left(\frac{0,34 \text{ mm}}{2}\right)^2} = 50,000289 \text{ mm}$$



Obr. 4.11 Znázorněné hodnoty pro vztah 4.3 a 4.4.

Nepatrný rozdíl mezi hodnotami $\varnothing D$ a X je zapříčiněn velmi malým úhlem α , který je vypočítán dle vztahu 4.4.

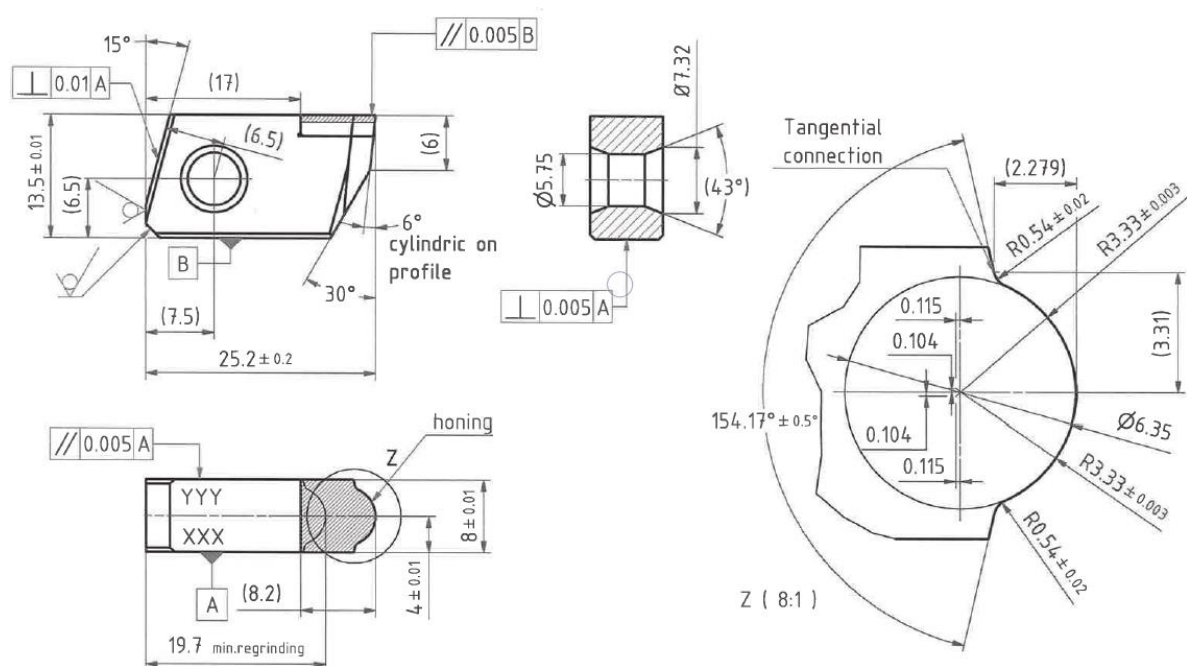
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{f}{\frac{D}{2}} \quad (4.4)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0,34}{\frac{50}{2}} = 0,0034$$

$$\alpha = 0,1948^\circ$$

4.5 Řezné nástroje pro zkoušku řezivosti

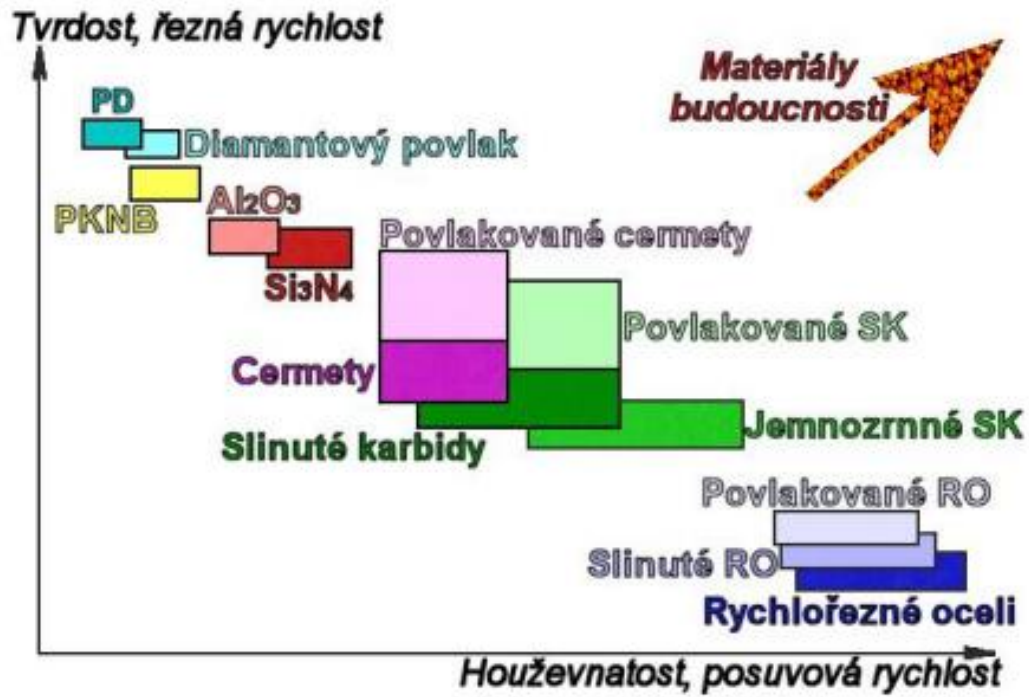
K řezným zkouškám byly použity celkem 4 řezné nástroje CBN WP4291 BN 350. Nástroje jsou vhodné pro těžké přerušované obrábění kalené oceli a vyznačují se vysokou pevností břitu. Jejich základní rozměry jsou znázorněny na obr. 4.12 a vybrané charakteristické hodnoty v tab. 4.5. Porovnání materiálu VBD s ostatními materiály používanými pro řezné nástroje je zobrazeno na obr. 4.13 a obr. 4.14.



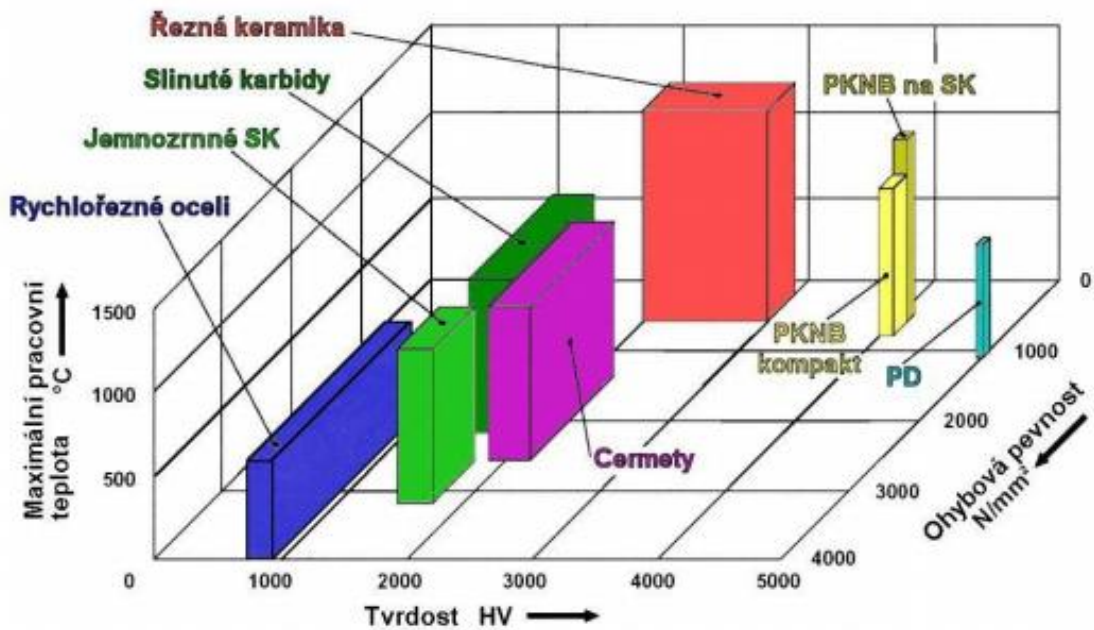
Obr. 4.12 Základní rozměry použité VBD.

Tab. 4.5 Charakteristické hodnoty BN350 [37].

Třída obráběného materiálu	Pojivo	Obsah uhlíku [%]	Velikost zrna [μm]	Tvrдость HV [GPa]	TRS [GPa]
H	TiN	60 – 65	1	33 – 35	1,20 – 1,30



Obr. 4.13 Oblasti použití řezných materiálů [1].



Obr. 4.14 Hodnoty vybraných vlastností řezných materiálů [1].

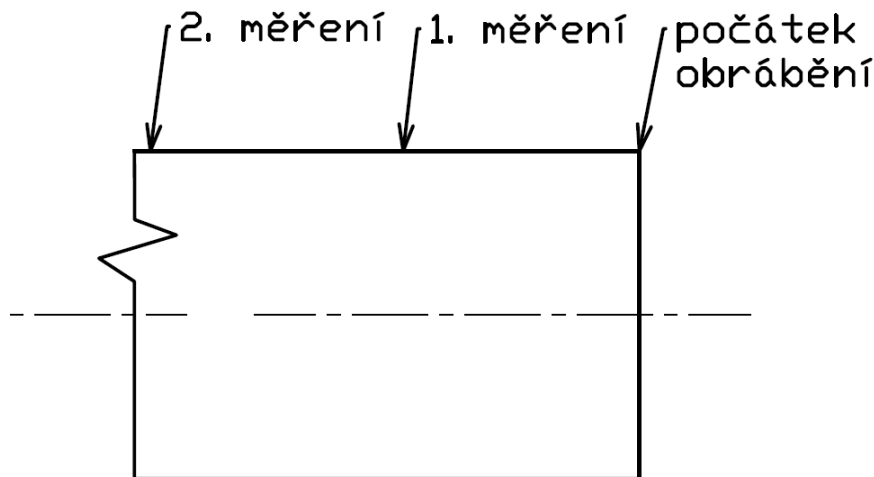
4.6 Silové působení

Silové zatížení bylo měřeno za pomoci dynamometru KISTLER typu 9257B na již zmíněných drahách VBD (50 m, 2x 100 m, 3x 200 m). První průjezd započal na výchozím průměru tyče $\varnothing 50$ mm a další průjezdy by probíhaly dle tab. 4.4. z důvodu zachování stejných vlastností materiálu (tyč povrchově zakalena). Tyč byla rozdělena na zmíněné úseky a na koncích těchto úseků byly zapichovacím nožem vytvořeny zápichy pro volné vyjetí nože ze záběru po uražení stanovené dráhy. Kvůli zachování konstantní řezné rychlosti se musely neustále zvyšovat otáčky z důvodu zmenšujícího se obráběného průměru. Tato skutečnost se projevila i na časech průjezdů, kdy první průjezd trval nejdéle a poslední průjezd byl nejkratší (vzhledem ke zvyšujícím se otáčkám). Výsledkem jsou grafické průběhy silového zatížení v závislosti na čase s různým časovým úsekem na ose x pro jednotlivé průjezdy.

Rovněž byly měřeny všechny tři složky silového zatížení a tato data byla exportována do tabulkového editoru Excel. Pomocí těchto složek byla vypočítána celková řezná síla F dle vztahu 1.7. Všechny složky včetně celkové řezné síly byly vyneseny do grafických závislostí v závislosti na čase.

Pro VBD jsou ve zprávě uvedeny grafické závislosti příslušných úseků obrábění, je tedy možné sledovat, jak se silové zatížení mění se vzrůstajícím opotřebením nástroje.

Z hlediska analýzy vlastností obrobené plochy byla měřena drsnost povrchu R_a a R_z dle schématu na obr. 4.16.



Obr. 4.16 Schématický nákres postupu měření parametru drsnosti R_a a R_z .

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části byly zpracovány data, která byla získána při provádění experimentu. Pro lepší přehlednost jsou zavedeny následující označení destiček:

- vyměnitelná břitová destička 1 (VBD_1) – šířka záběru ostří $a_p = 0,045$ mm,
- vyměnitelná břitová destička 2 (VBD_2) – šířka záběru ostří $a_p = 0,45$ mm,
- vyměnitelná břitová destička 3 (VBD_3) – šířka záběru ostří $a_p = 0,045$ mm,
- vyměnitelná břitová destička 4 (VBD_4) – šířka záběru ostří $a_p = 0,45$ mm.

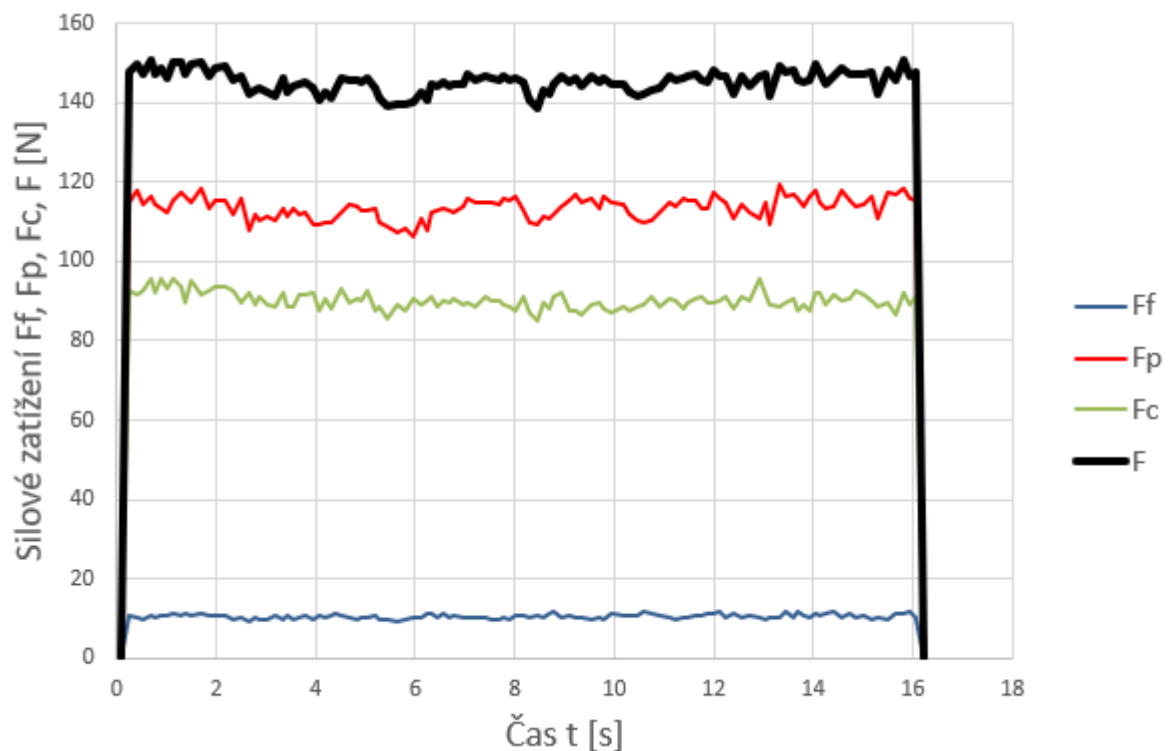
Pro testování byla požadována šířka záběru ostří $a_p = 0,045$ mm. Z důvodu porovnání opotřebení vzhledem k zadanému a_p byla v každé sérii testována také VBD s desetinasobnou šířkou záběru ostří $a_p = 0,45$ mm.

5.1 První série testování

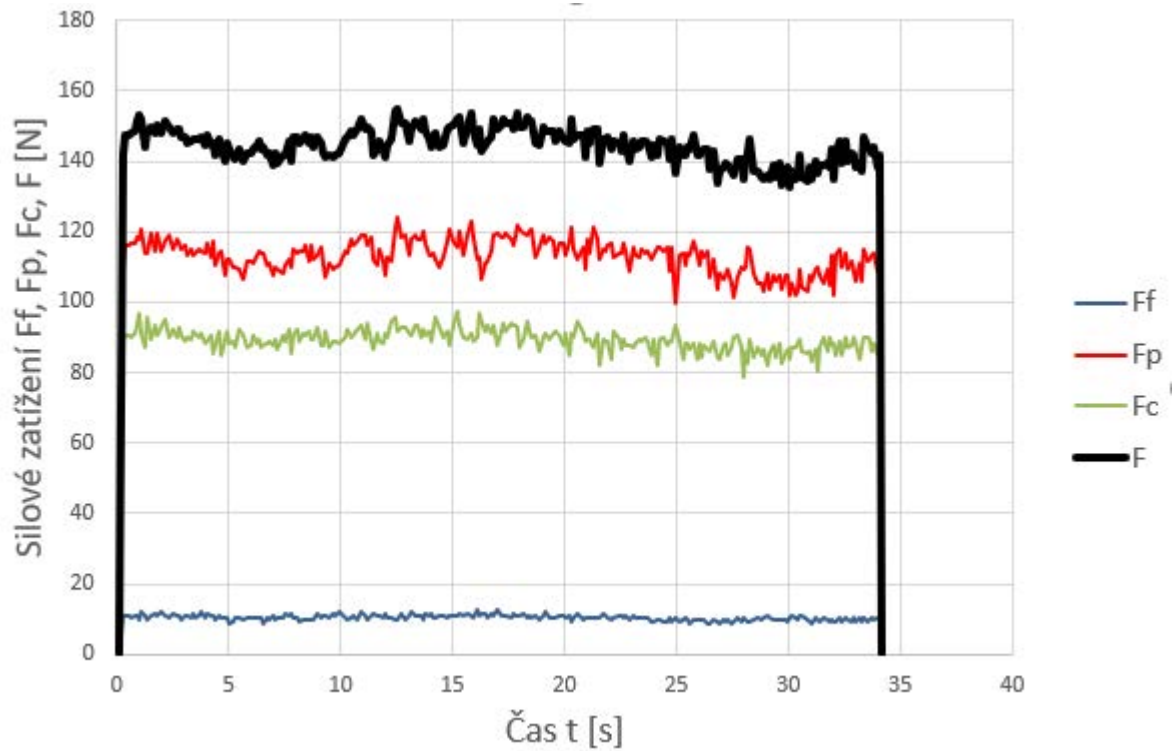
Pro tuto sérii bylo vyhodnoceno silové zatížení mezi 0 m až 850 m uraženými VBD, drsnost povrchu a opotřebení pro VBD_1 a VBD_2.

5.1.1 Silové zatížení pro vyměnitelnou břitovou destičku 1

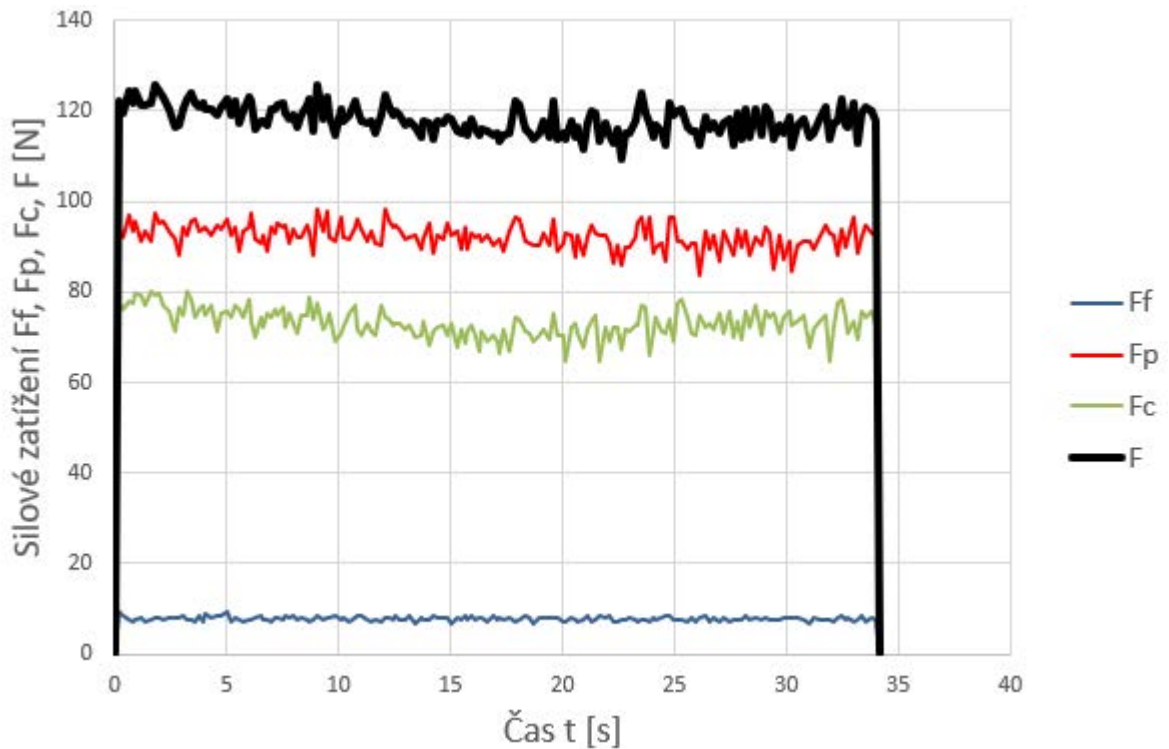
Na grafických závislostech uvedených na obr. 5.1 až obr. 5.6 je možné pozorovat průběh silových zatížení na čase.



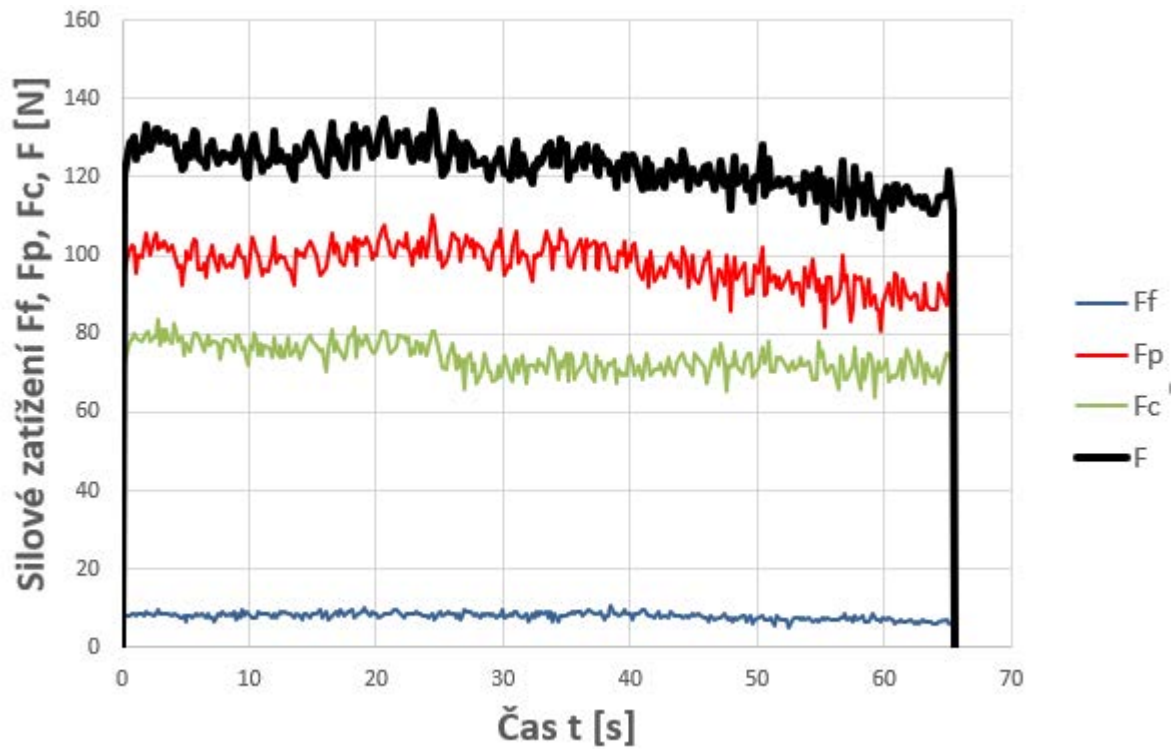
Obr. 5.1 Grafická závislost silového zatížení VBD_1 na dráze 0 m až 50 m v závislosti na čase.



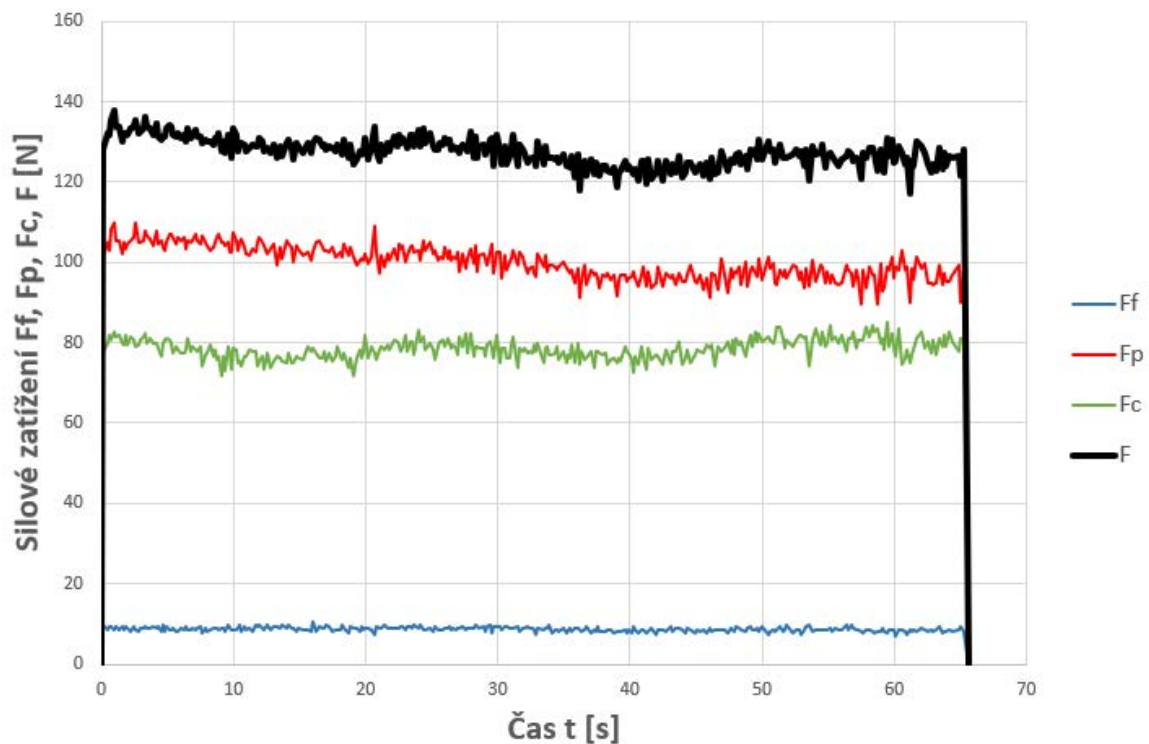
Obr. 5.2 Grafická závislost silového zatížení VBD_1 na dráze 50 m až 150 m v závislosti na čase.



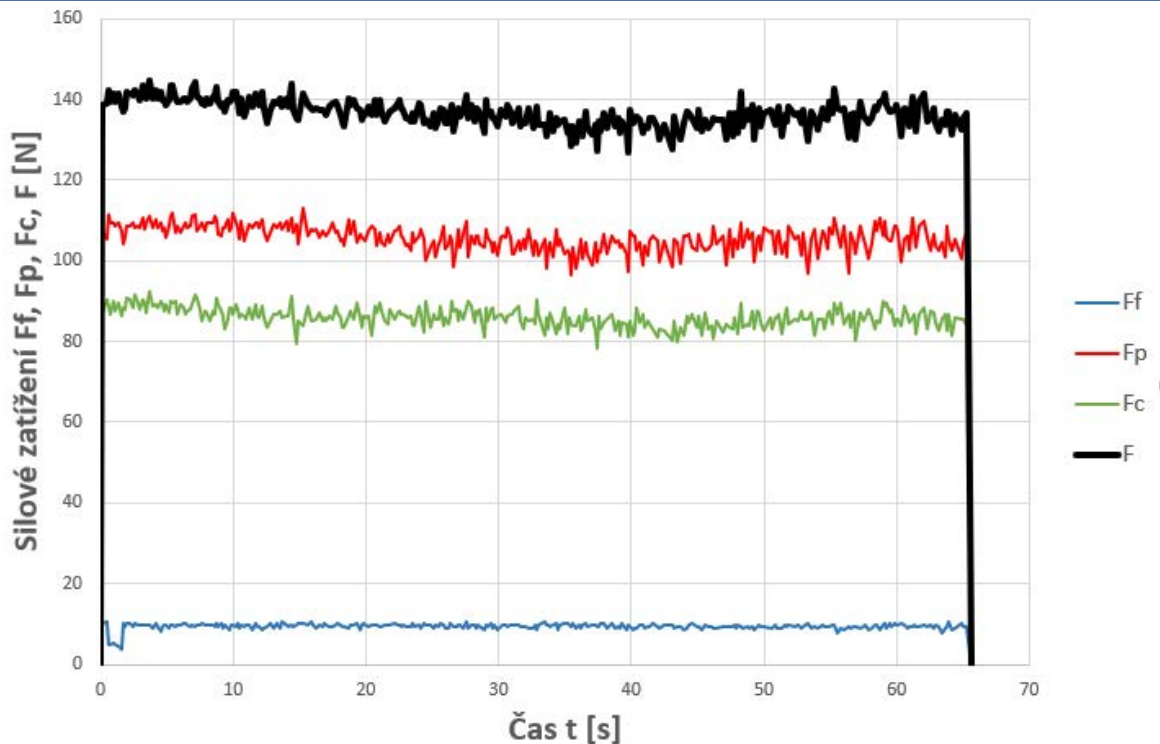
Obr. 5.3 Grafická závislost silového zatížení VBD_1 na dráze 150 m až 250 m v závislosti na čase.



Obr. 5.4 Grafická závislost silového zatížení VBD_1 na dráze 250 m až 450 m v závislosti na čase.



Obr. 5.5 Grafická závislost silového zatížení VBD_1 na dráze 450 m až 650 m v závislosti na čase.



Obr. 5.6 Grafická závislost silového zatížení VBD_1 na dráze 650 m až 850 m v závislosti na čase.

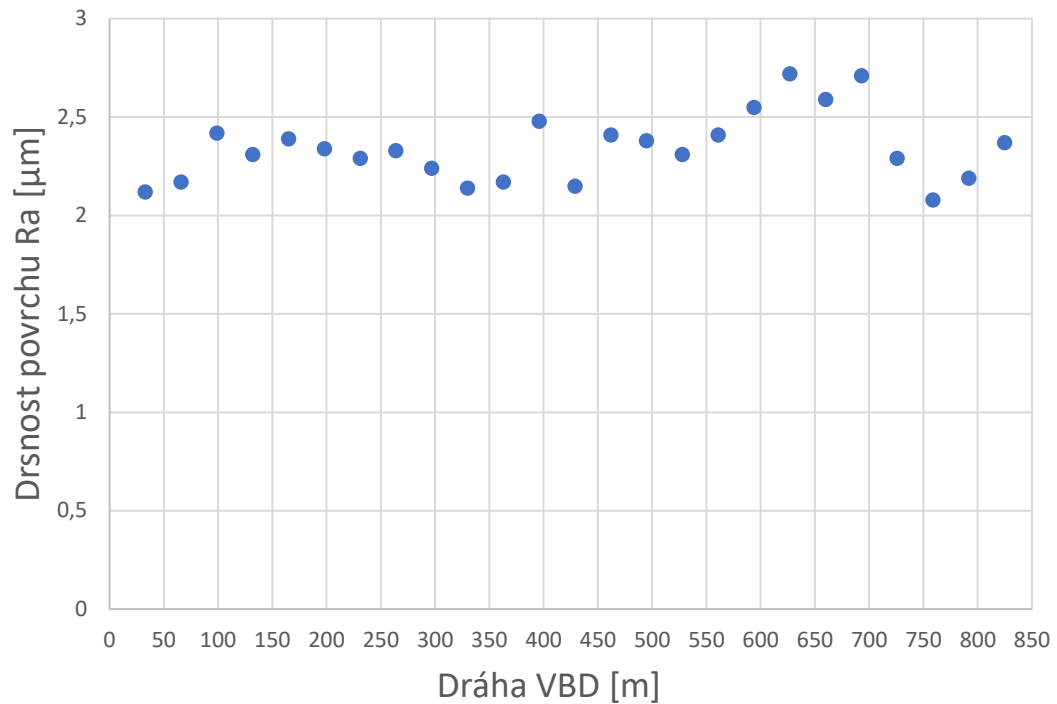
Grafická závislost vyznačuje plynulý přechod naměřených hodnot z obr. 5.1 na obr. 5.2. Následně na obr. 5.3 došlo k mírnému poklesu těchto hodnot, což mohlo být zapříčiněno stabilizováním použité VBD_1. Velikosti měřených sil se na obr. 5.4 až obr. 5.6 mírně zvyšovaly až na hodnoty naměřené za začátku měření. Dle průběhu zatěžujících sil nic nenasvědčuje opotřeбенí VBD_1, které by znemožnilo pokračovat v dalším testování.

5.1.2 Drsnost povrchu pro vyměnitelnou břitovou destičku 1

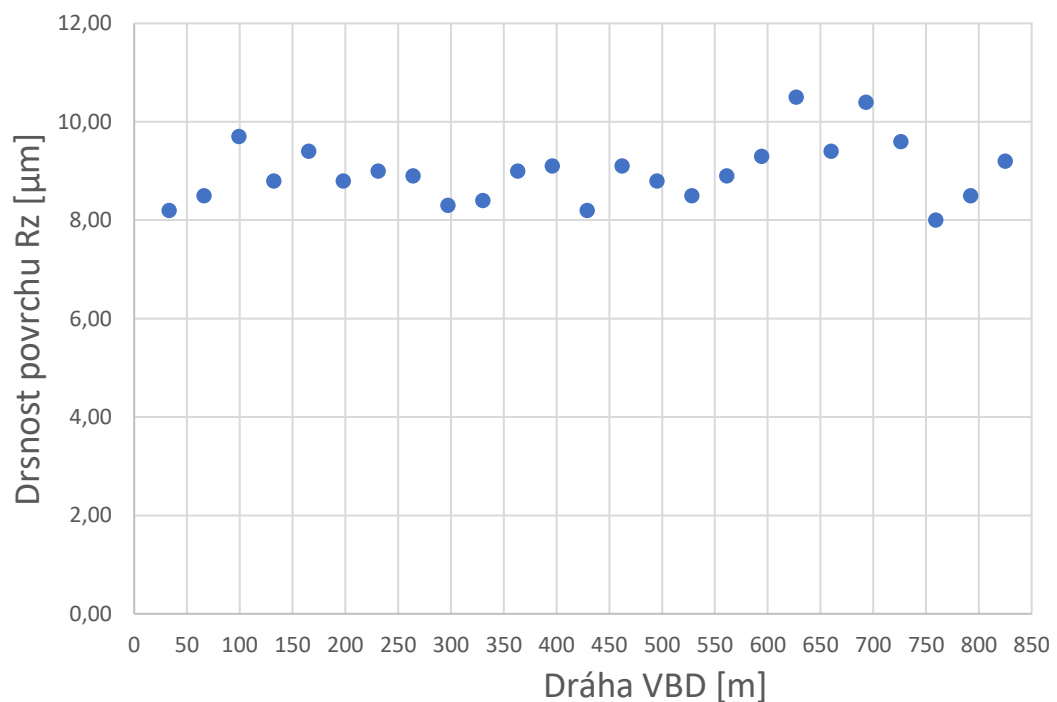
Po dokončení daného úseku obrábění byla v pravidelných intervalech uražené dráhy VBD_1 měřena střední aritmetická úchylka profilu R_a a výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů R_z . Tyto hodnoty zpracovává tab. 5.1 a jsou vyneseny v grafické závislosti na uražené dráze VBD_1 na obr. 5.7 a obr. 5.8.

Tab. 5.1 Hodnoty Ra a Rz pro vyměnitelnou břitovou destičku 1.

Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1	2,12	8,20
2	2,17	8,50
3	2,42	9,70
4	2,31	8,80
5	2,39	9,40
6	2,34	8,80
7	2,29	9,00
8	2,33	8,90
9	2,24	8,30
10	2,14	8,40
11	2,17	9,00
12	2,48	9,10
13	2,15	8,20
14	2,41	9,10
15	2,38	8,80
16	2,31	8,50
17	2,41	8,90
18	2,55	9,30
19	2,72	10,50
20	2,59	9,40
21	2,71	10,40
22	2,29	9,60
23	2,08	8,00
24	2,19	8,50
25	2,37	9,20



Obr. 5.7 Grafická závislost Ra na dráze uražené VBD_1.

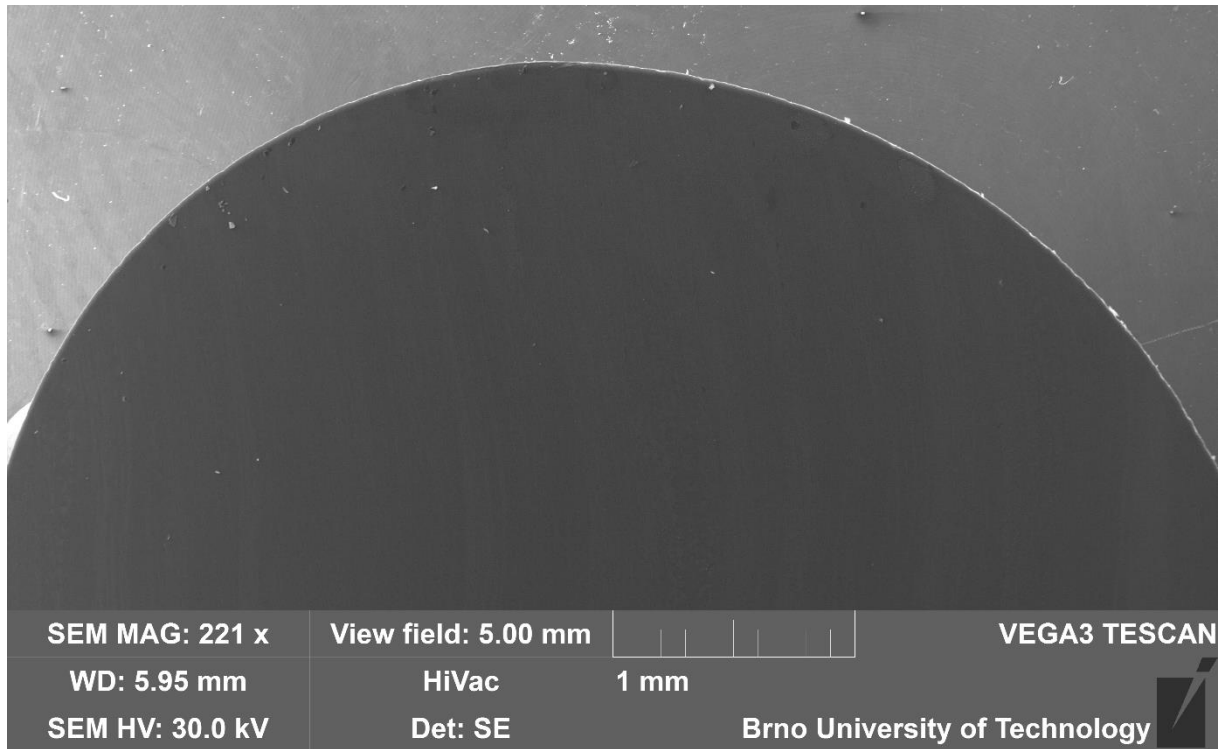


Obr. 5.8 Grafická závislost Rz na dráze uražené VBD_1.

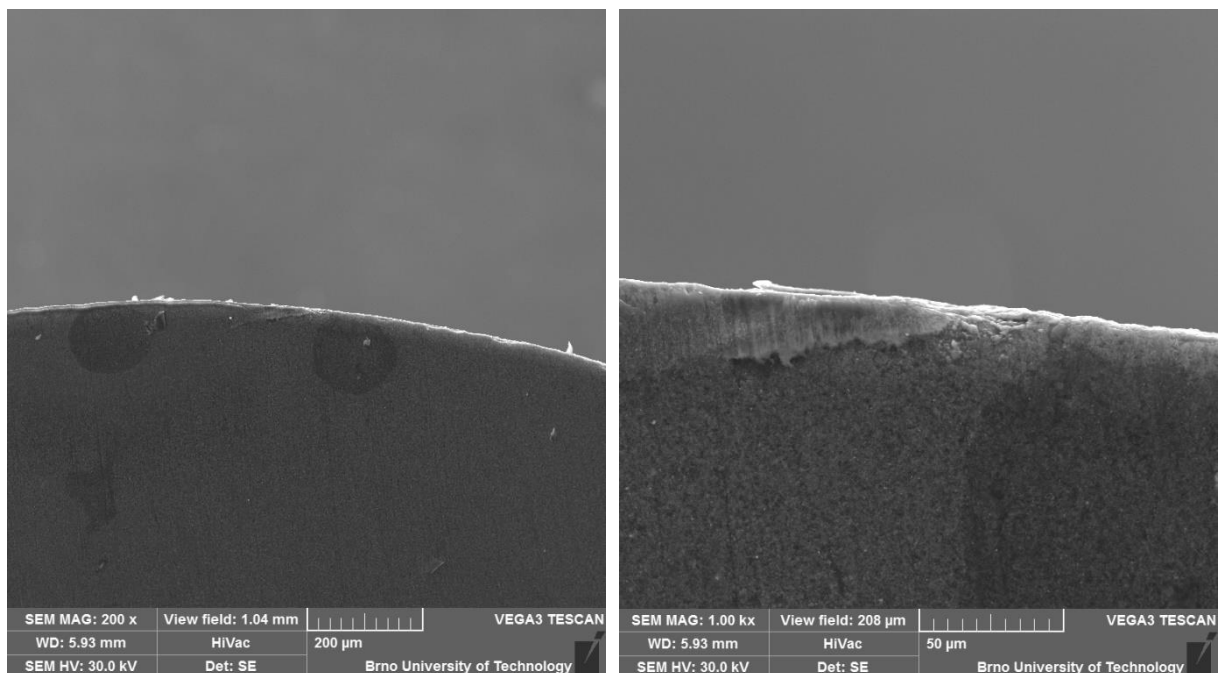
Parametry drsnosti byly měřeny dle principu zobrazeném na obr. 4.16. V rozmezí hodnot 600 m až 700 m uražené dráhy VBD_1 došlo k navýšení parametrů drsnosti Ra a Rz. Při dalším měření se ovšem nárůst opotřebení VBD_1 nepotvrdil. Je pravděpodobné, že svou roli sehrál i výběr místa pro měření. VBD_1 je tedy způsobilá dalšímu testování.

5.1.3 Opatření vyměnitelné břitové destičky 1

Kapitola zobrazuje stav VBD_1 po obrobení dráhy 850 m. Na obr. 5.9 a obr. 5.10 jsou postupně zobrazeny fotografie pořízené na elektronovém mikroskopu TESCAN VEGA 3.



Obr. 5.9 VBD_1 po uražení 850 m.

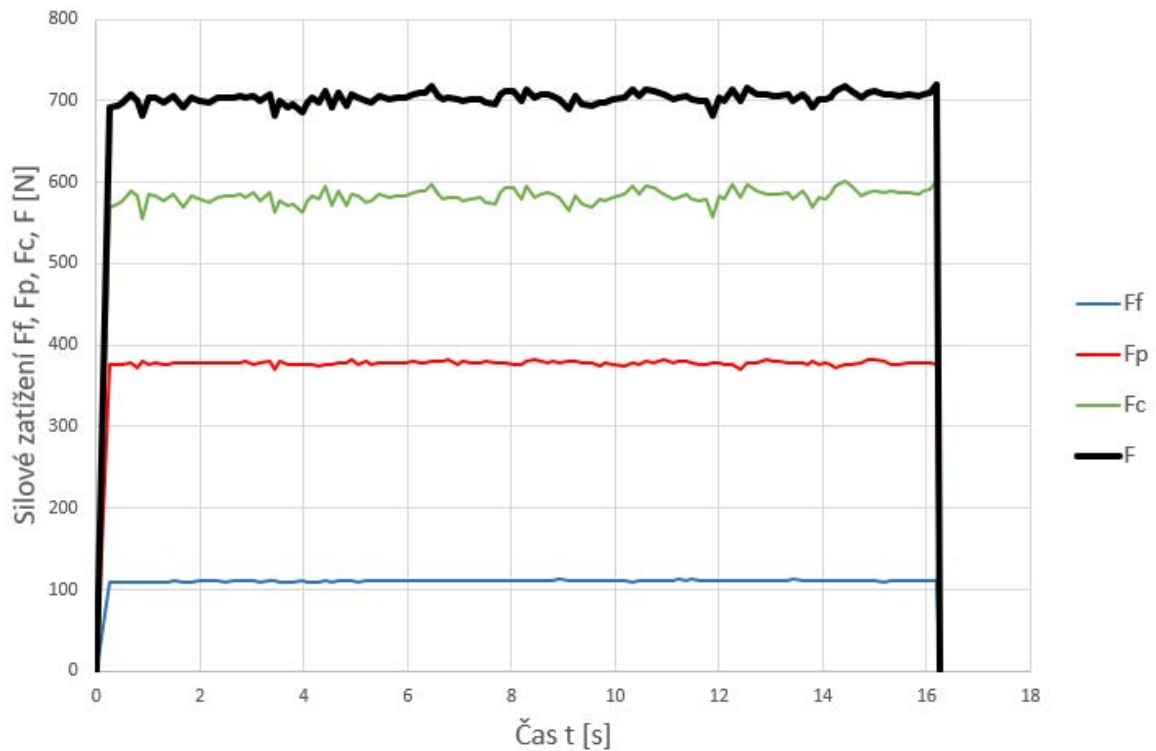


Obr. 5.10 VBD_1 po uražení 850 m – detail břítu.

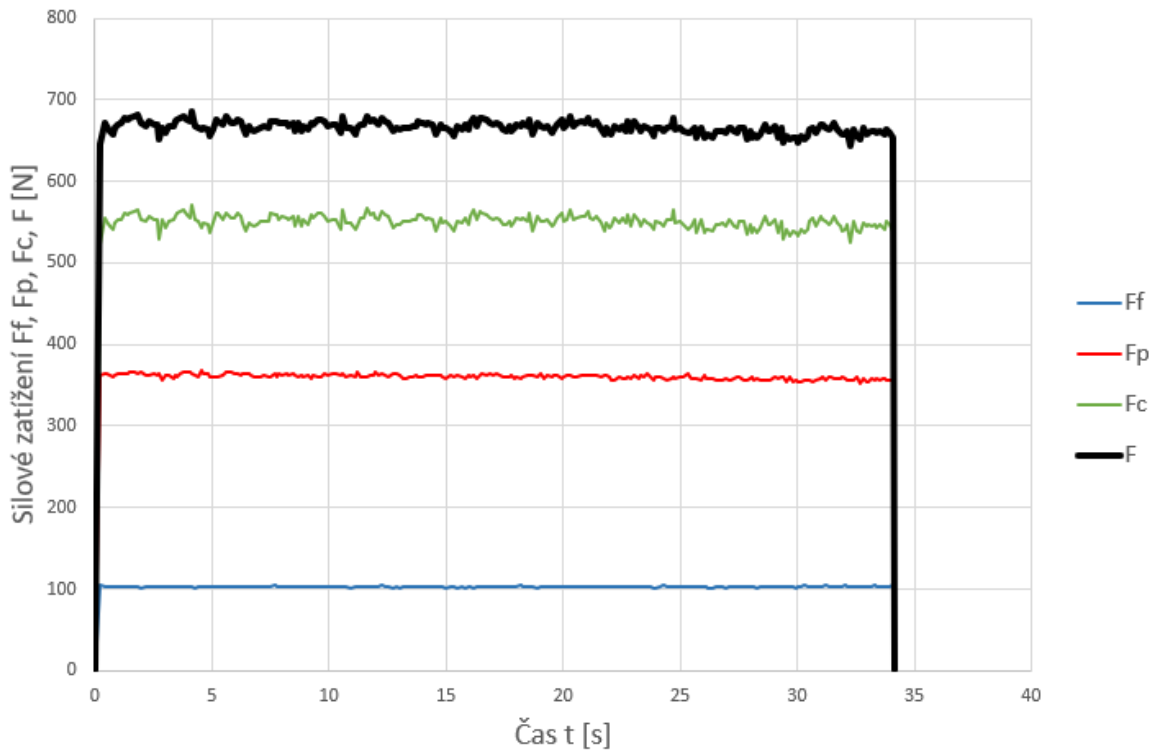
Snímky z elektronového mikroskopu TESCAN VEGA 3 na obr. 5.9 a obr. 5.10 prokazují, že došlo pouze k minimálnímu opotřebení bříty nástroje. VBD_1 je tedy schopna pokračovat v dalším testování a navyšování hodnoty uražené dráhy.

5.1.4 Silové zatížení pro vyměnitelnou břitovou destičku 2

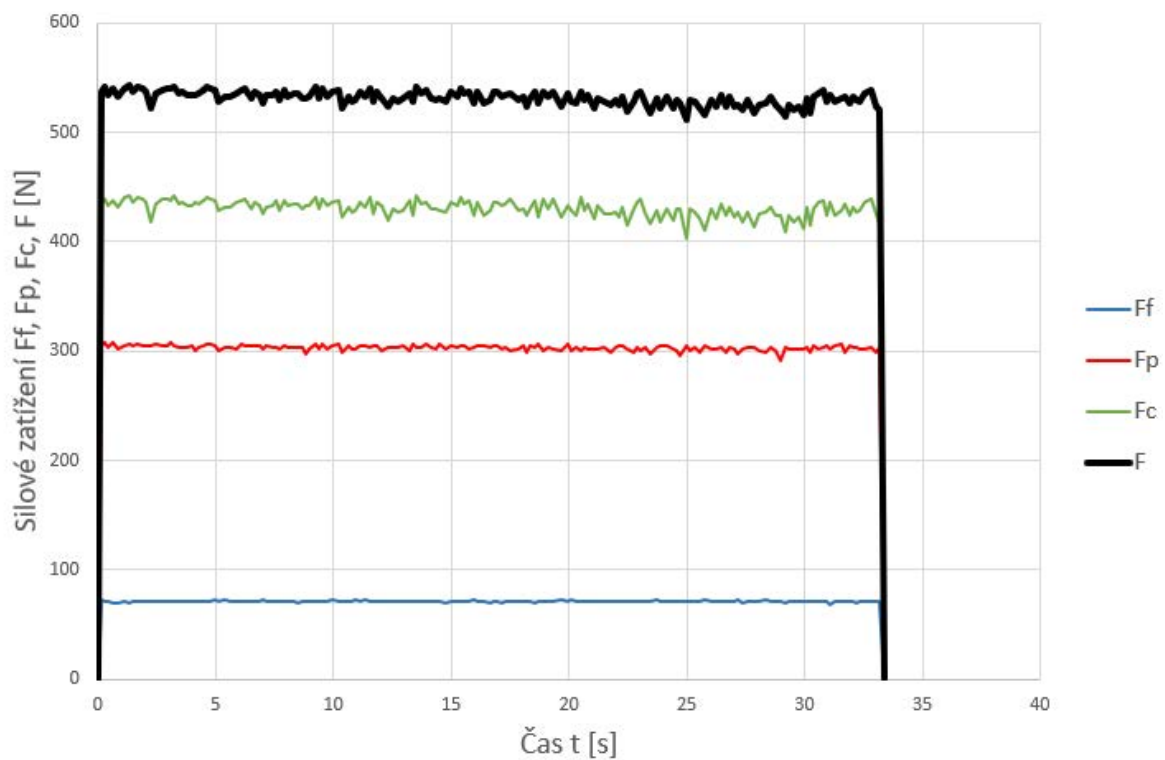
Na grafických závislostech uvedených na obr. 5.11 až obr. 5.16 je možné pozorovat průběh silových zatížení na čase.



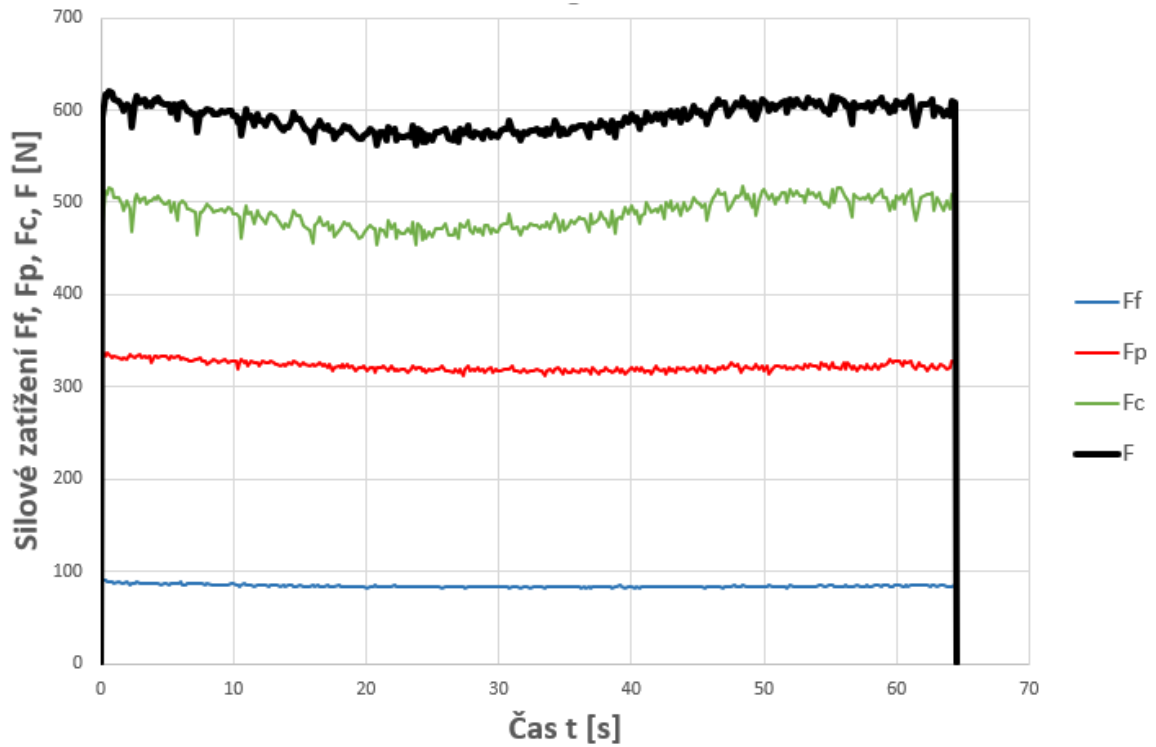
Obr. 5.11 Grafická závislost silového zatížení VBD_2 na dráze 0 m až 50 m v závislosti na čase.



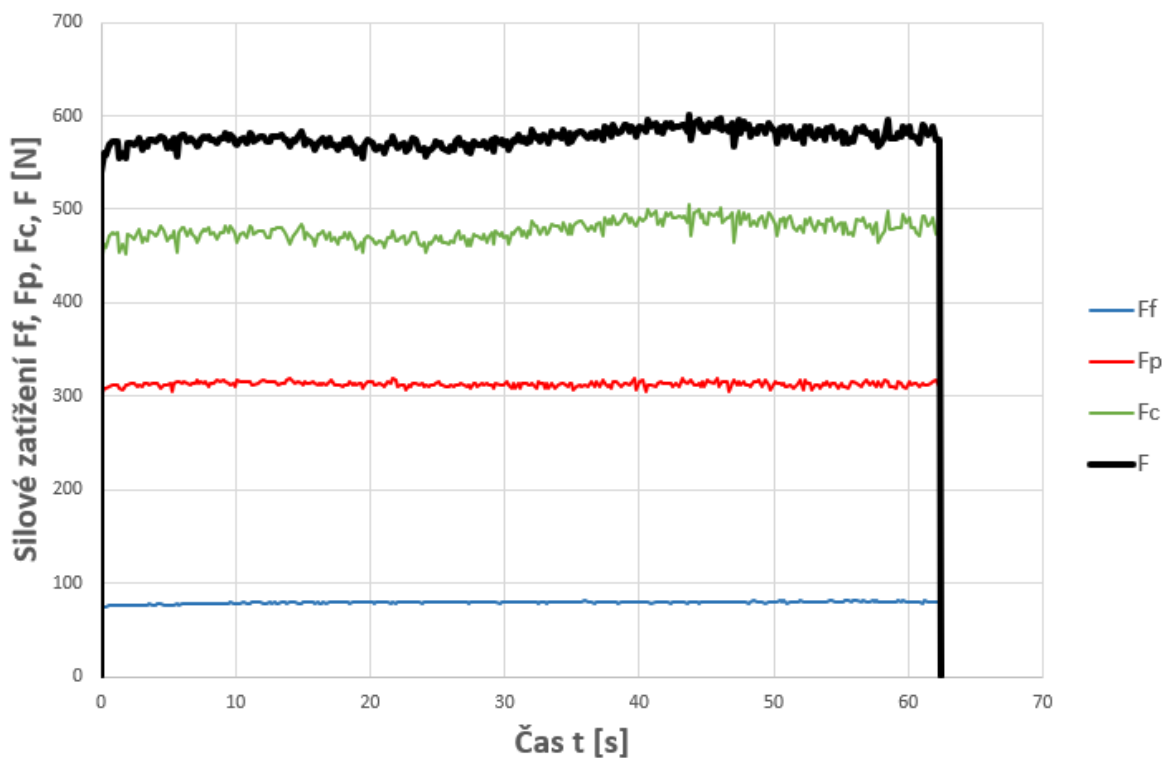
Obr. 5.12 Grafická závislost silového zatížení VBD_2 na dráze 50 m až 150 m v závislosti na čase.



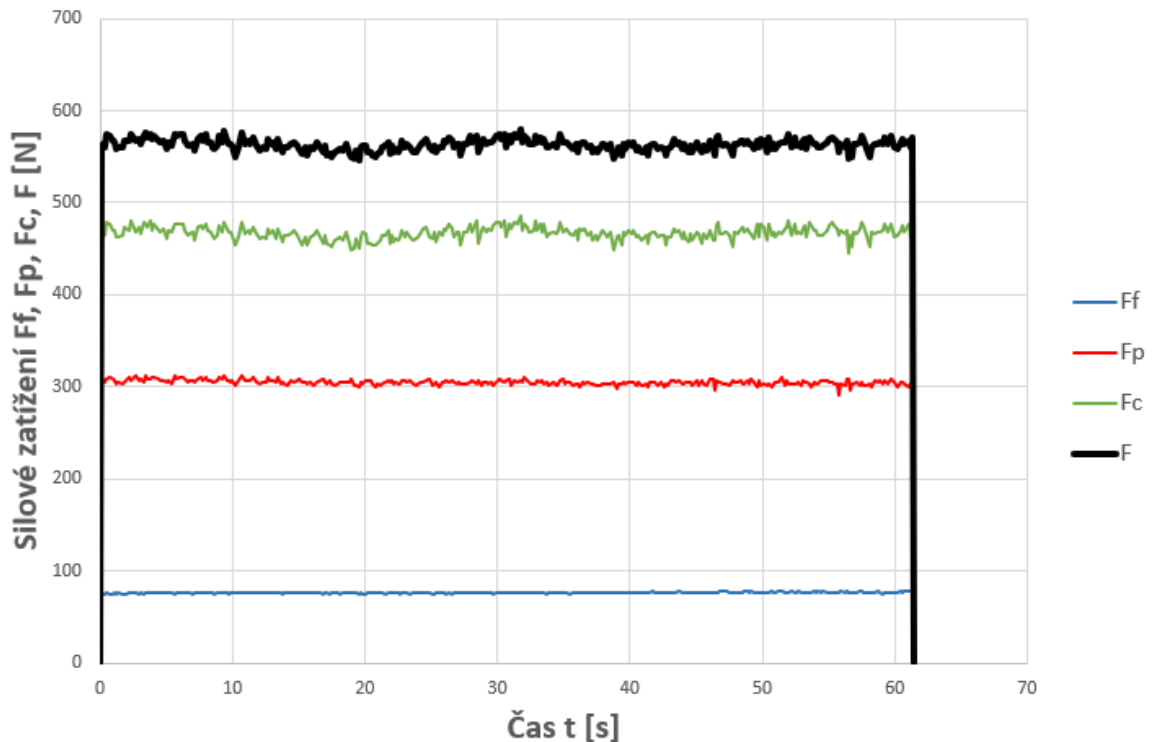
Obr. 5.13 Grafická závislost silového zatížení VBD_2 na dráze 150 m až 250 m v závislosti na čase.



Obr. 5.14 Grafická závislost silového zatížení VBD_2 na dráze 250 m až 450 m v závislosti na čase.



Obr. 5.15 Grafická závislost silového zatížení VBD_2 na dráze 450 m až 650 m v závislosti na čase.



Obr. 5.16 Grafická závislost silového zatížení VBD_2 na dráze 650 m až 850 m v závislosti na čase.

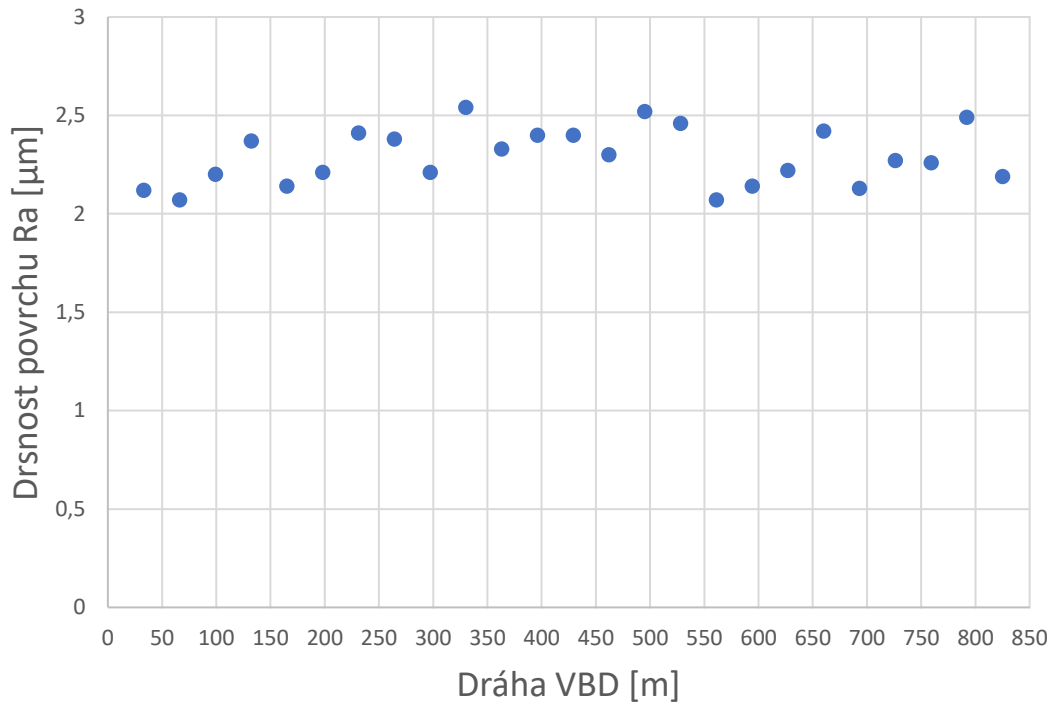
V prvních dvou měřeních na obr. 5.11 a obr. 5.12 došlo k plynulému přechodu výsledné zatěžující síly. Na následujícím úseku popsaném obr. 5.13 došlo k poklesu naměřených sil, které se na dalších analyzovaných úsecích dle obr. 5.14 až obr. 5.15 mírně zvýšily a ustálily. Zmíněný pokles mohl být zapříčiněn překonáním prvotního opotřebení VBD. Následné ustálení naměřených sil značí, že břit nástroje je v dobrém stavu a je schopen pokračovat dále v testování.

5.1.5 Drsnost povrchu pro vyměnitelnou břitovou destičku 2

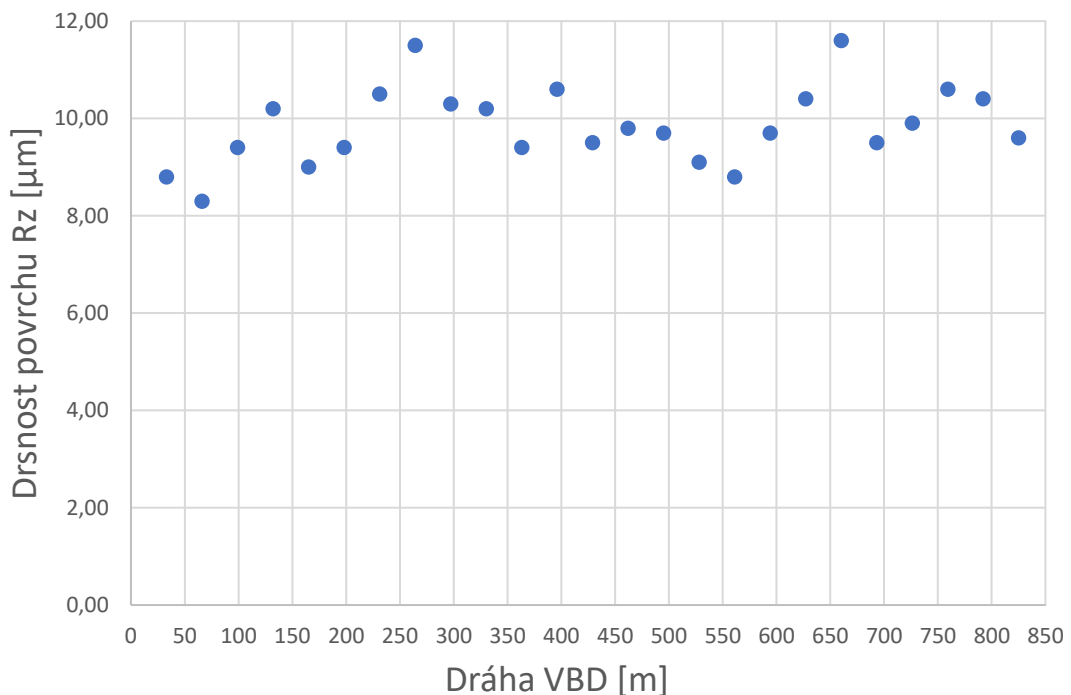
Po dokončení každého úseku obrábění se v pravidelných intervalech uražené dráhy VBD_2 měřily veličiny R_a a R_z . Tyto hodnoty zpracovává tab. 5.2 a jsou vyneseny v grafické závislosti na zmiňované uražené dráze na obr. 5.17 a obr. 5.18.

Tab. 5.2 Hodnoty Ra a Rz pro vyměnitelnou břitovou destičku 2.

Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1	2,12	8,80
2	2,07	8,30
3	2,2	9,40
4	2,37	10,20
5	2,14	9,00
6	2,21	9,40
7	2,41	10,50
8	2,38	11,50
9	2,21	10,30
10	2,54	10,20
11	2,33	9,40
12	2,4	10,60
13	2,4	9,50
14	2,3	9,80
15	2,52	9,70
16	2,46	9,10
17	2,07	8,80
18	2,14	9,70
19	2,22	10,40
20	2,42	11,60
21	2,13	9,50
22	2,27	9,90
23	2,26	10,60
24	2,49	10,40
25	2,19	9,60



Obr. 5.17 Grafická závislost Ra na dráze uražené VBD_2.



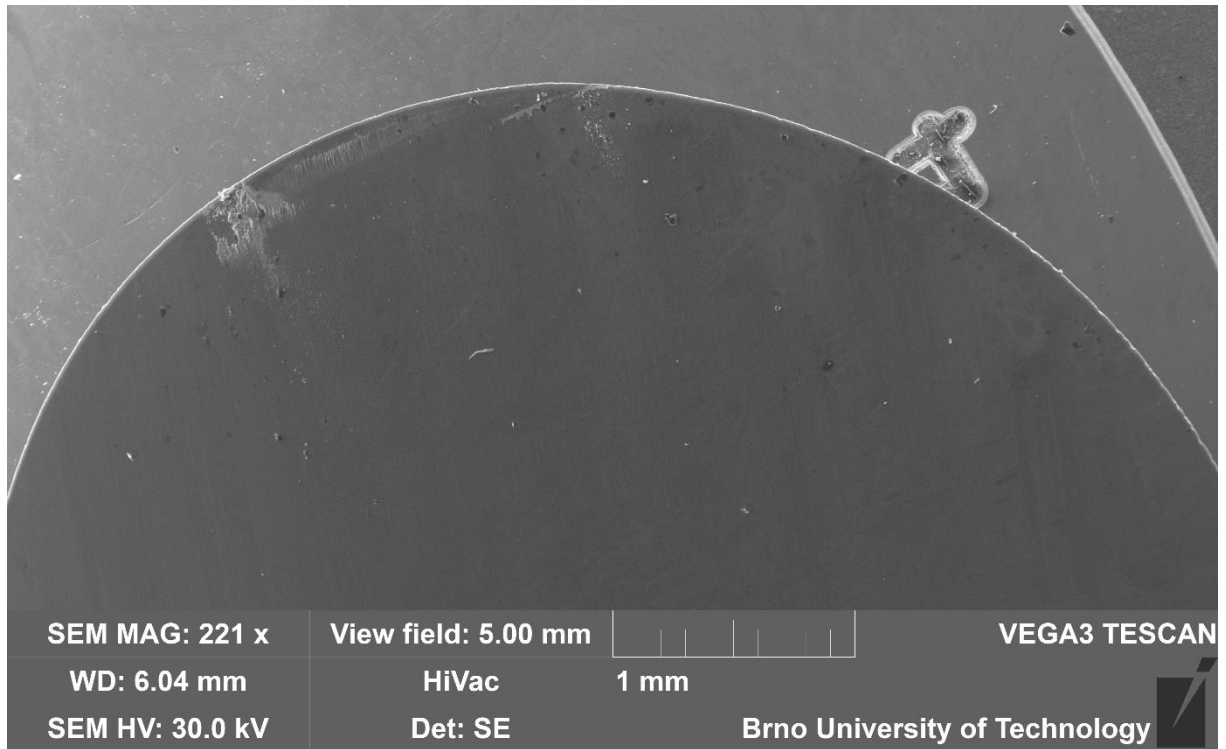
Obr. 5.18 Grafická závislost Rz na dráze uražené VBD_2.

Měření parametrů drsnosti probíhalo stejně jako v minulém případě dle obr. 4.16. U střední aritmetické úchytky Ra dle obr. 5.17 nedošlo na k vzrůstající tendenci naměřených hodnot. U hodnot parametru Rz zobrazených na obr. 5.18 je patrný mírný nárůst naměřené drsnosti. Tato skutečnost může znamenat zvyšující se opotřebování břitu nástroje. Výsledný

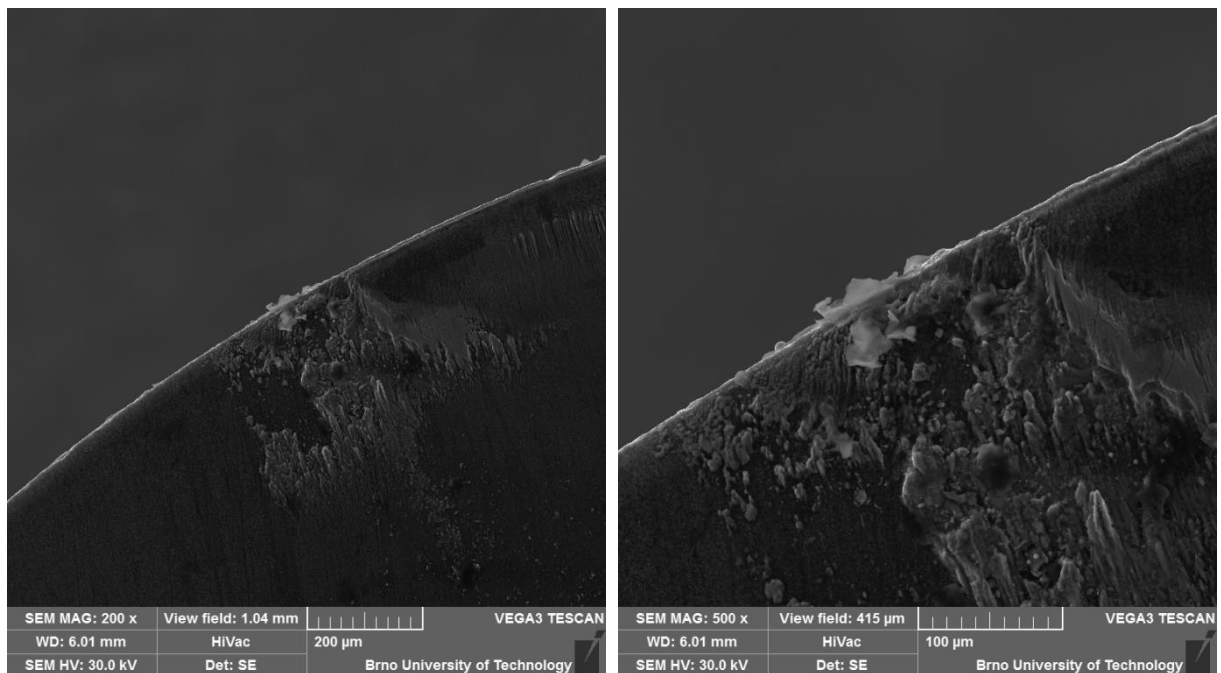
stav opotřebení bude ověřen analýzou opotřebení VBD_2 na elektronovém mikroskopu v následující kapitole 5.1.6.

5.1.6 Opotřebení vyměnitelné břitové destičky 2

Kapitola zobrazuje stav VBD_2 po obrobení dráhy 850 m. Na obr. 5.19 a obr. 5.20 jsou postupně zobrazeny fotografie pořízené na elektronovém mikroskopu TESCAN VEGA 3.



Obr. 5.19 VBD_2 po uražení 850 m.



Obr. 5.20 VBD_2 po uražení 850 m – detail břítu.

Snímky z elektronového mikroskopu TESCAN VEGA 3 na obr. 5.19 a obr. 5.20 prokazují, že došlo pouze k minimálnímu opotřebení břítu nástroje. VBD_2 je způsobilá pokračovat v dalším testování a navyšování hodnoty uražené dráhy.

5.1.7 Dílčí zhodnocení první série

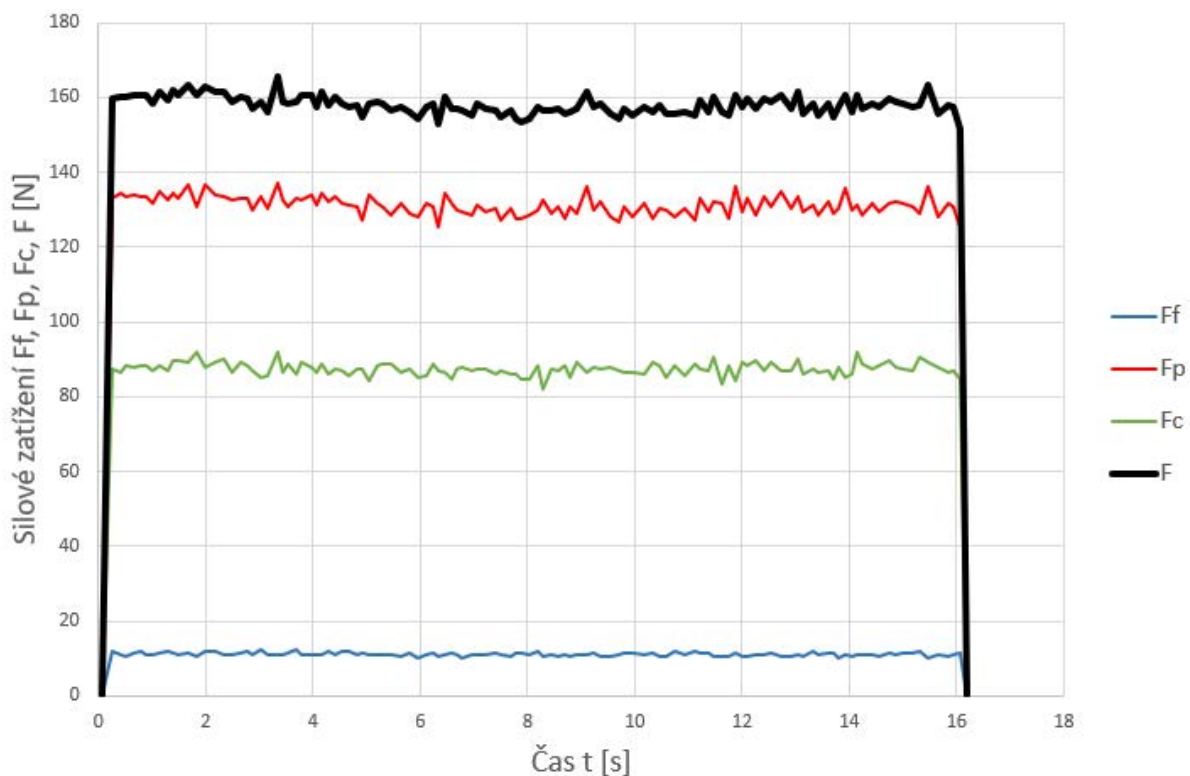
V první sérii proběhlo úspěšně testování VBD_1 a VBD_2. Při vyhodnocení dílčích výsledků obsahujících záznamy řezných sil, drsnosti obrobených povrchů a snímky z elektronového mikroskopu obou VBD bylo dospěno k následujícímu závěru. VBD_1 i VBD_2 urazily požadovanou dráhu 850 m za stanovených řezných podmínek při minimálním opotřebení řezných nástrojů. Pro ověření daného závěru proběhla druhá série testování za stejných podmínek.

5.2 Druhá série testování

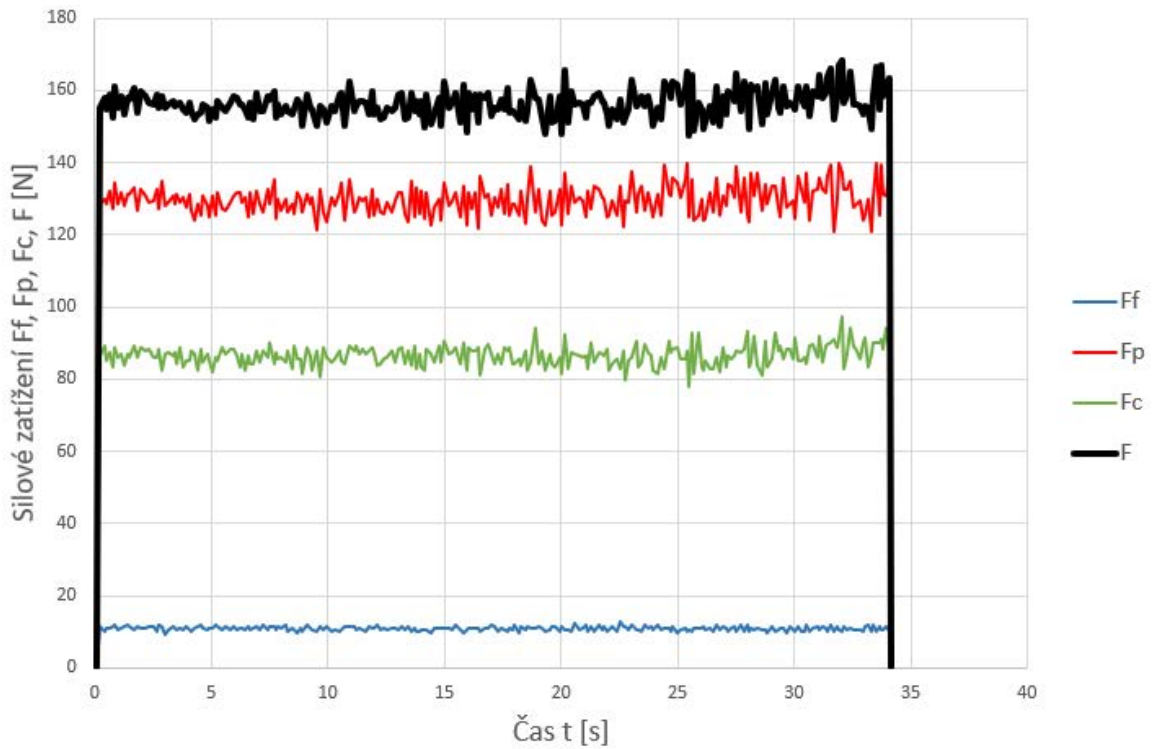
Pro tuto sérii bylo vyhodnoceno silové zatížení mezi 0 m až 850 m uraženými VBD, drsnost povrchu a opotřebení pro VBD_3 a VBD_4.

5.2.1 Silové zatížení pro vyměnitelnou břitovou destičku 3

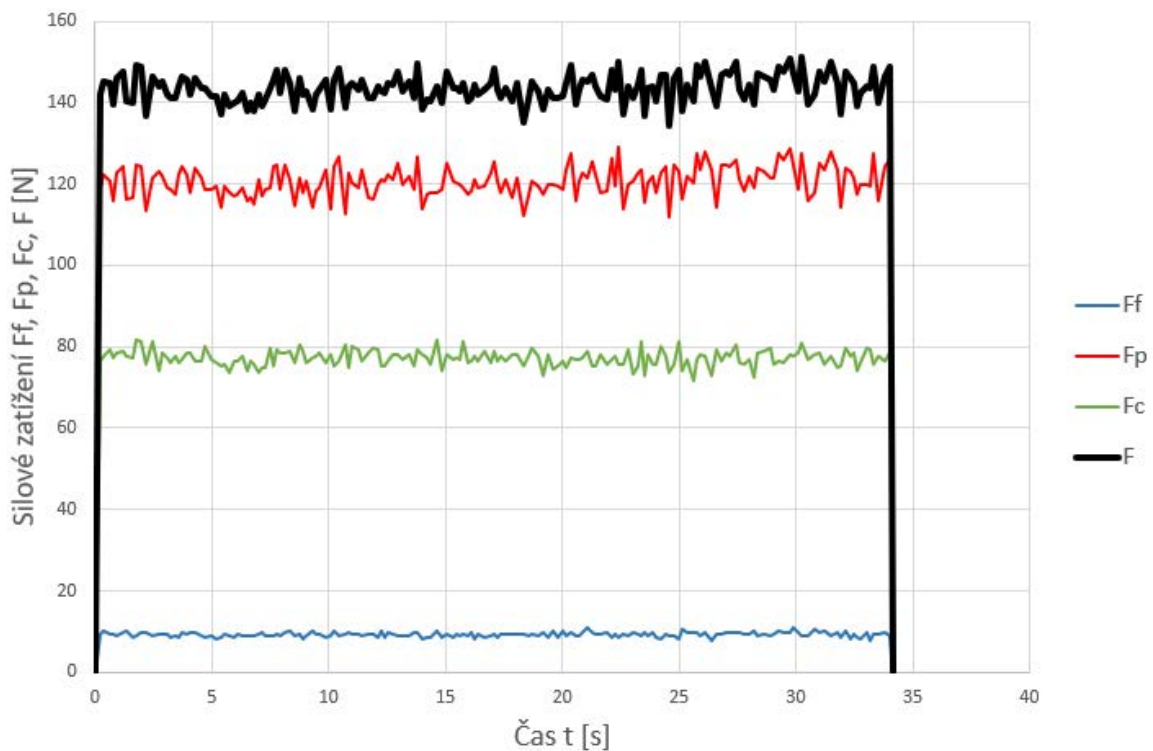
Na grafických závislostech uvedených na obr. 5.21 až obr. 5.26 je možné pozorovat průběh silových zatížení na čase.



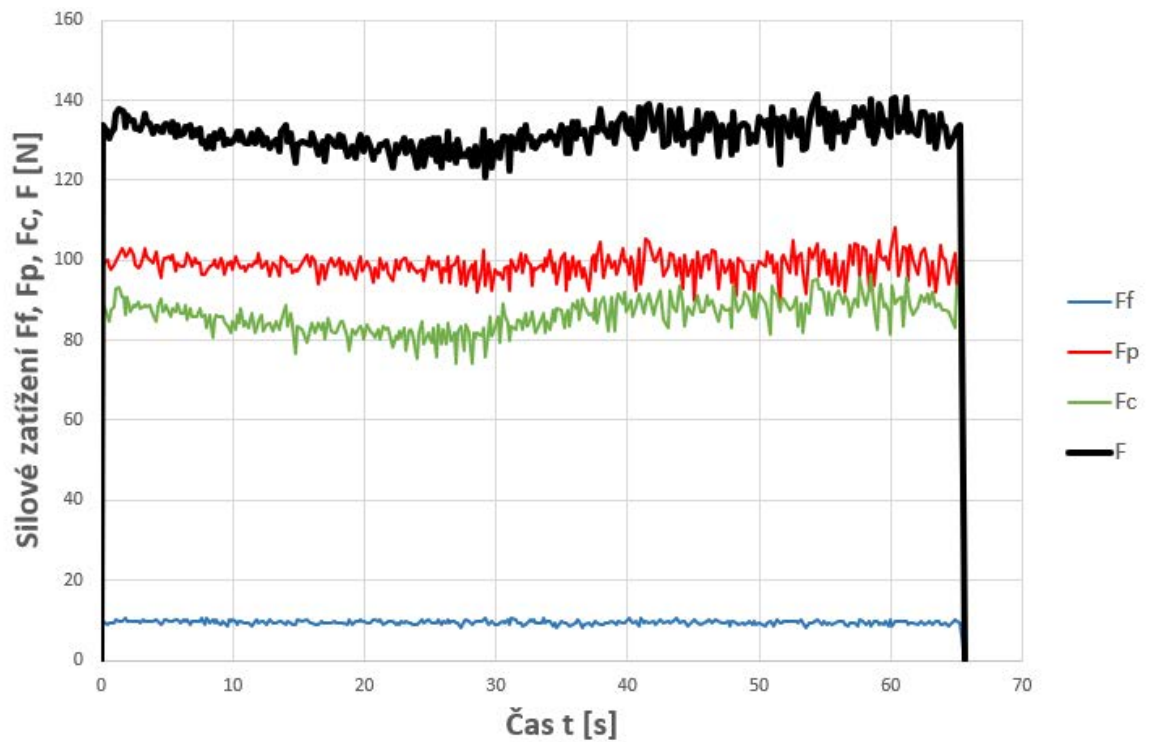
Obr. 5.21 Grafická závislost silového zatížení VBD_3 na dráze 0 m až 50 m v závislosti na čase.



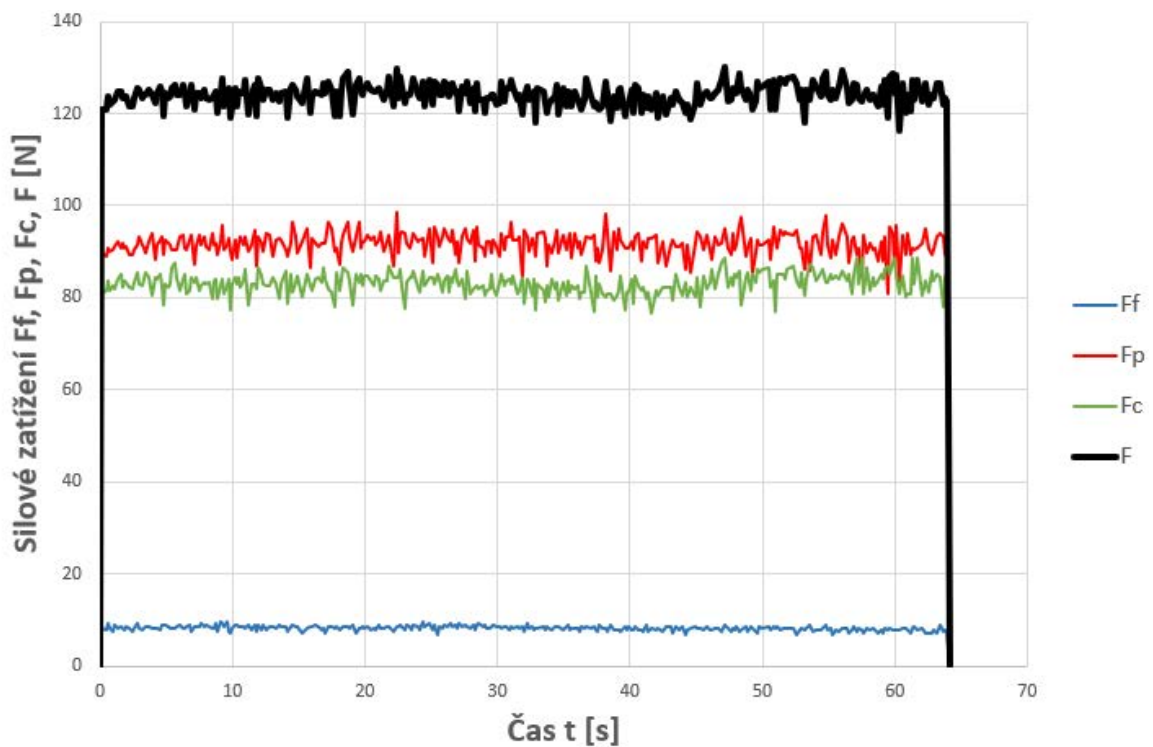
Obr. 5.22 Grafická závislost silového zatížení VBD_3 na dráze 50 m až 150 m v závislosti na čase.



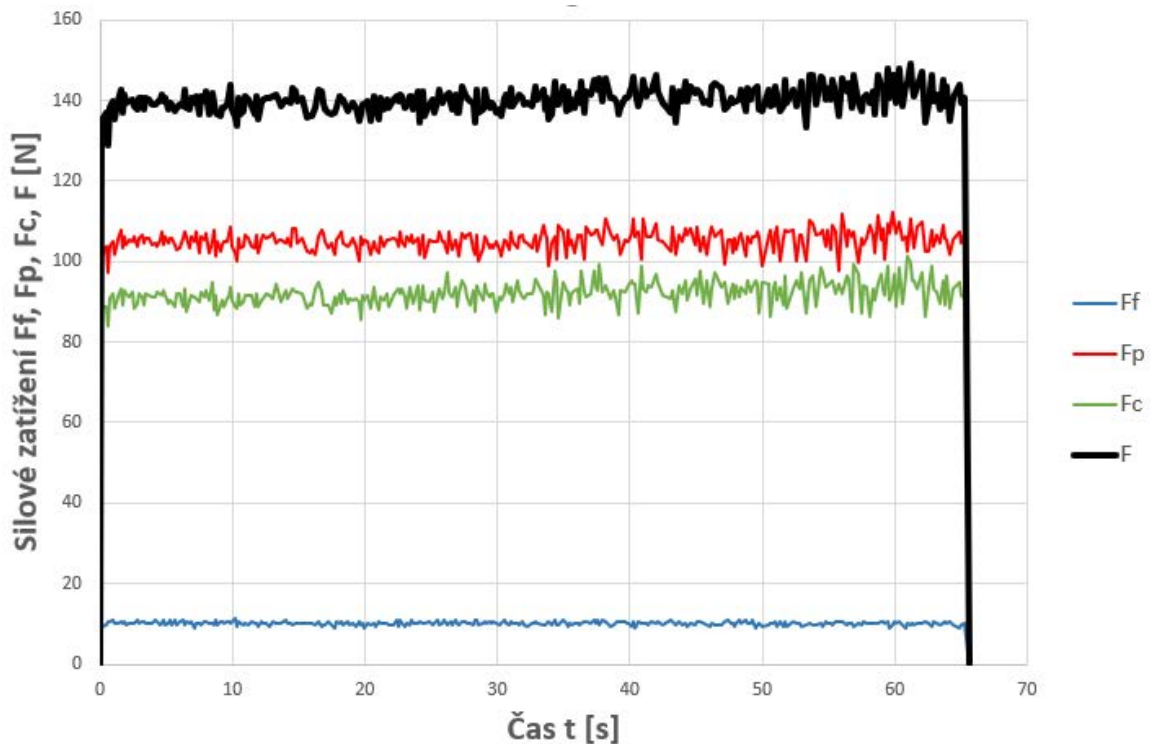
Obr. 5.23 Grafická závislost silového zatížení VBD_3 na dráze 150 m až 250 m v závislosti na čase.



Obr. 5.24 Grafická závislost silového zatížení VBD_3 na dráze 250 m až 450 m v závislosti na čase.



Obr. 5.25 Grafická závislost silového zatížení VBD_3 na dráze 450 m až 650 m v závislosti na čase.



Obr. 5.26 Grafická závislost silového zatížení VBD_3 na dráze 650 m až 850 m v závislosti na čase.

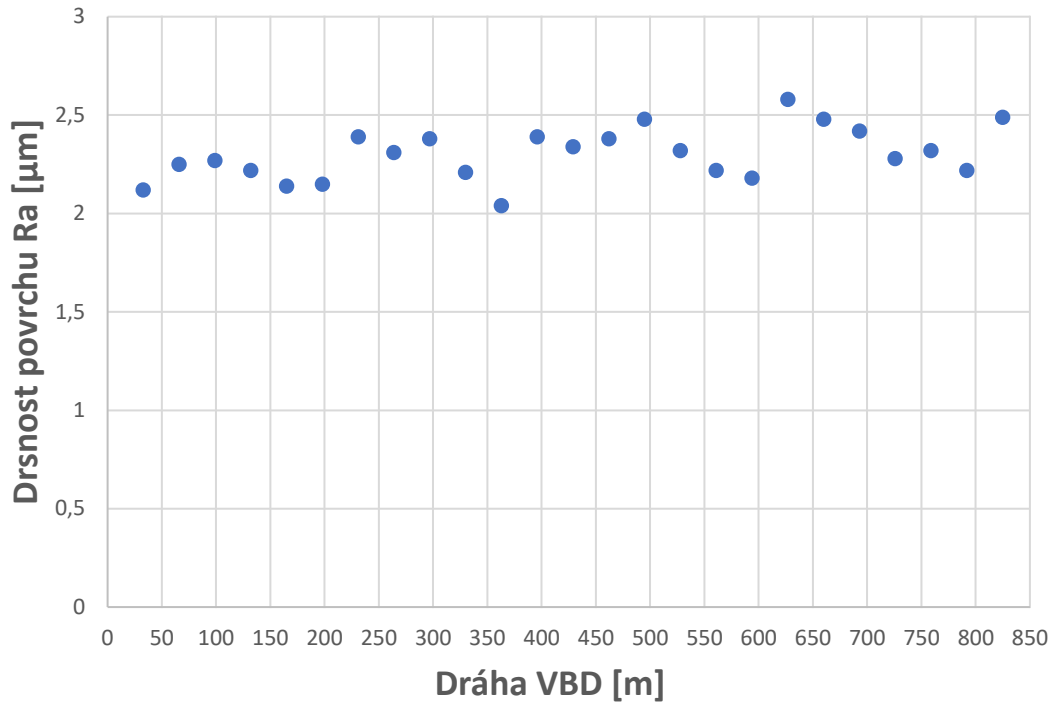
Grafická závislost vyznačuje plynulý přechod naměřených hodnot z obr. 5.21 na obr. 5.22. Hodnoty výsledné síly začaly poté mírně klesat, což je zřejmé na obr. 5.23, obr. 5.24 a obr. 5.25. Na posledním měřeném úseku došlo k navýšení řezných sil viz obr. 5.26. Naměřené síly nevykazují plynulé navýšování hodnot, které je typické pro zvětšující se opotřebování nástroje. Daný nástroj je tedy doporučen k dalšímu testování.

5.2.2 Drsnost povrchu pro vyměnitelnou břitovou destičku 3

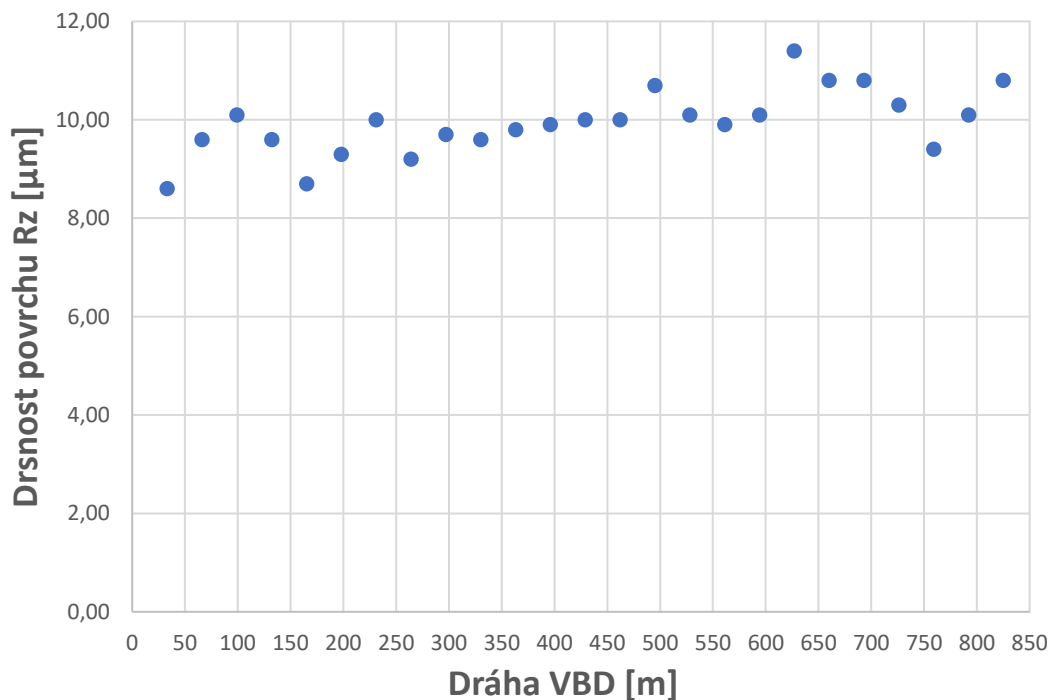
Po dokončení každého úseku obrábění se v pravidelných intervalech uražené dráhy VBD_3 měřily veličiny R_a a R_z . Tyto hodnoty zpracovává tab. 5.3 a jsou vyneseny v grafické závislosti na zmiňované uražené dráze na obr. 5.27 a obr. 5.28.

Tab. 5.3 Hodnoty Ra a Rz pro vyměnitelnou břitovou destičku 3.

Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1	2,12	8,60
2	2,25	9,60
3	2,27	10,10
4	2,22	9,60
5	2,14	8,70
6	2,15	9,30
7	2,39	10,00
8	2,31	9,20
9	2,38	9,70
10	2,21	9,60
11	2,04	9,80
12	2,39	9,90
13	2,34	10,00
14	2,38	10,00
15	2,48	10,70
16	2,32	10,10
17	2,22	9,90
18	2,18	10,10
19	2,58	11,40
20	2,48	10,80
21	2,42	10,80
22	2,28	10,30
23	2,32	9,40
24	2,22	10,10
25	2,49	10,80



Obr. 5.27 Grafická závislost Ra na dráze uražené VBD_3.

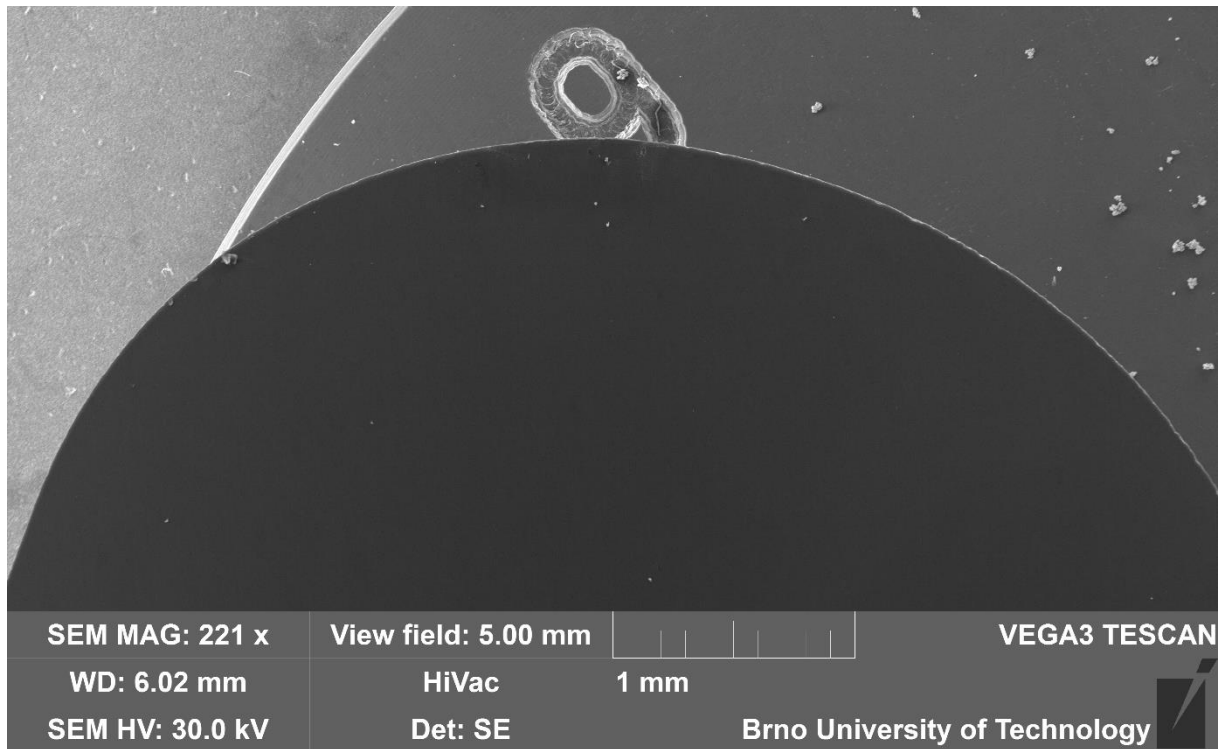


Obr. 5.28 Grafická závislost Rz na dráze uražené VBD_3.

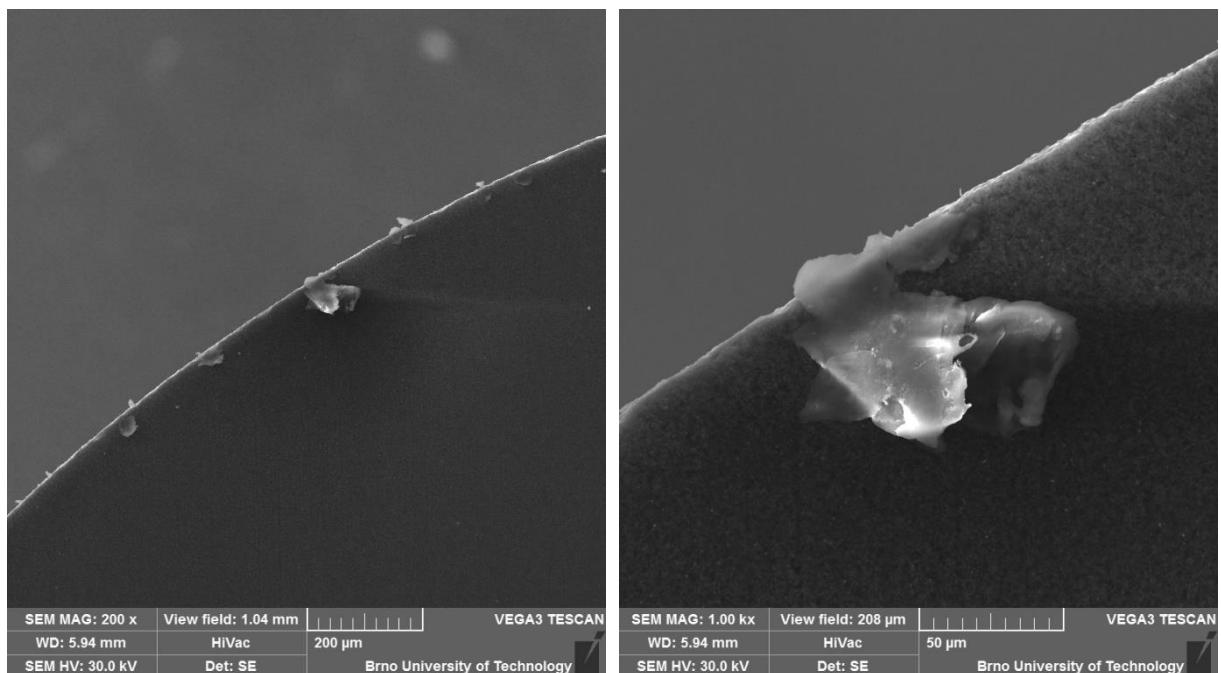
Parametry drsnosti byly měřeny dle principu zobrazeném na obr. 4.16. U obou posuzovaných parametrů drsnosti došlo k pozvolnému narůstání drsnosti, jak je patrné z obr. 5.27 a obr. 5.28. tento nárůst by mohl značit zvětšující se opotřebení VBD_3. Výsledný stav opotřebení bude ověřen analýzou opotřebení VBD_3 na elektronovém mikroskopu v následující kapitole 5.2.3.

5.2.3 Opatření vyměnitelné břitové destičky 3

Kapitola zobrazuje stav VBD_5 po obrobení dráhy 850 m. Na obr. 5.29 a obr. 5.30 jsou postupně zobrazeny fotografie pořízené na elektronovém mikroskopu TESCAN VEGA 3.



Obr. 5.29 VBD_3 po uražení 850 m.

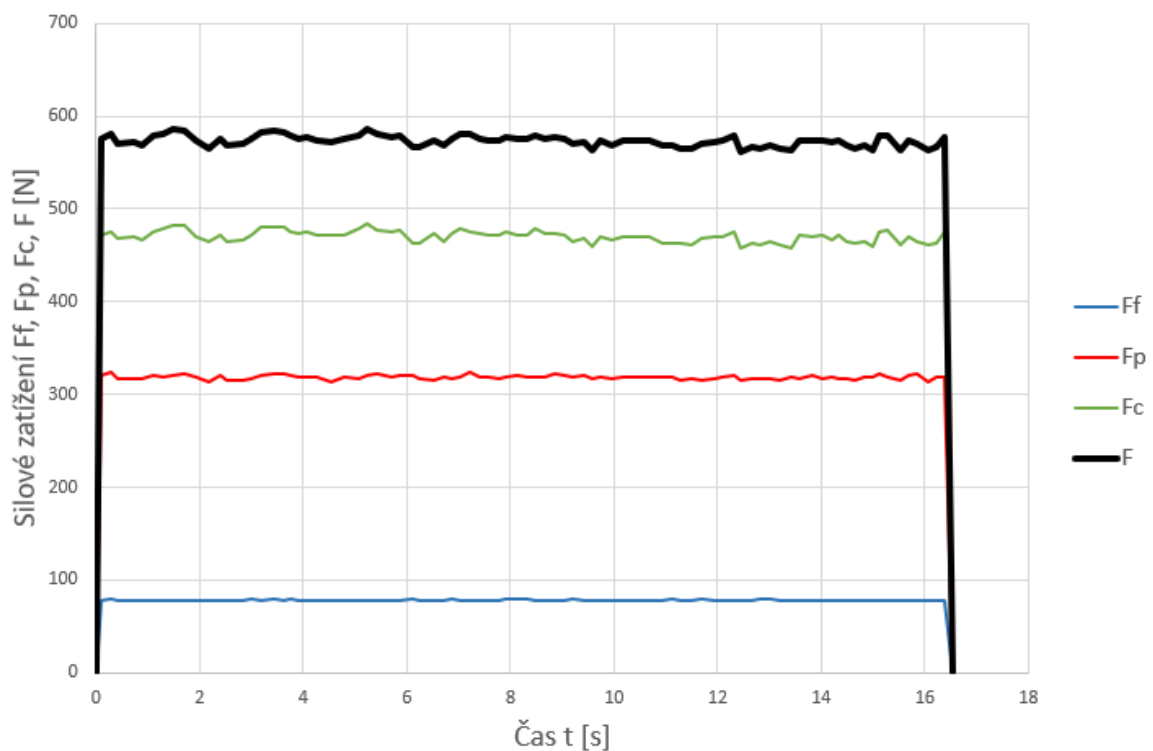


Obr. 5.30 VBD_3 po uražení 850 m – detail břítu.

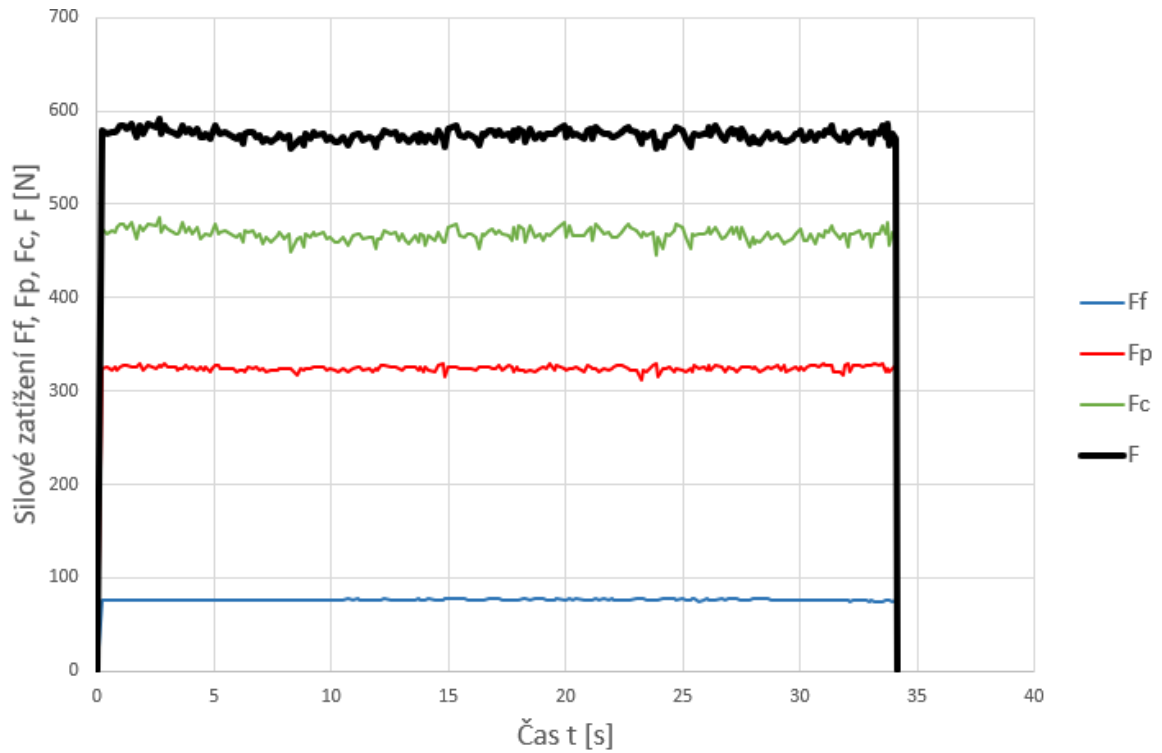
Snímky z elektronového mikroskopu TESCAN VEGA 3 na obr. 5.29 a obr. 5.30 prokazují pouze minimální opotřebení břitu nástroje. VBD_3 je shledána jako způsobila k dalšímu pokračování testování a navyšování hodnoty uražené dráhy.

5.2.4 Silové zatížení pro vyměnitelnou břitovou destičku 4

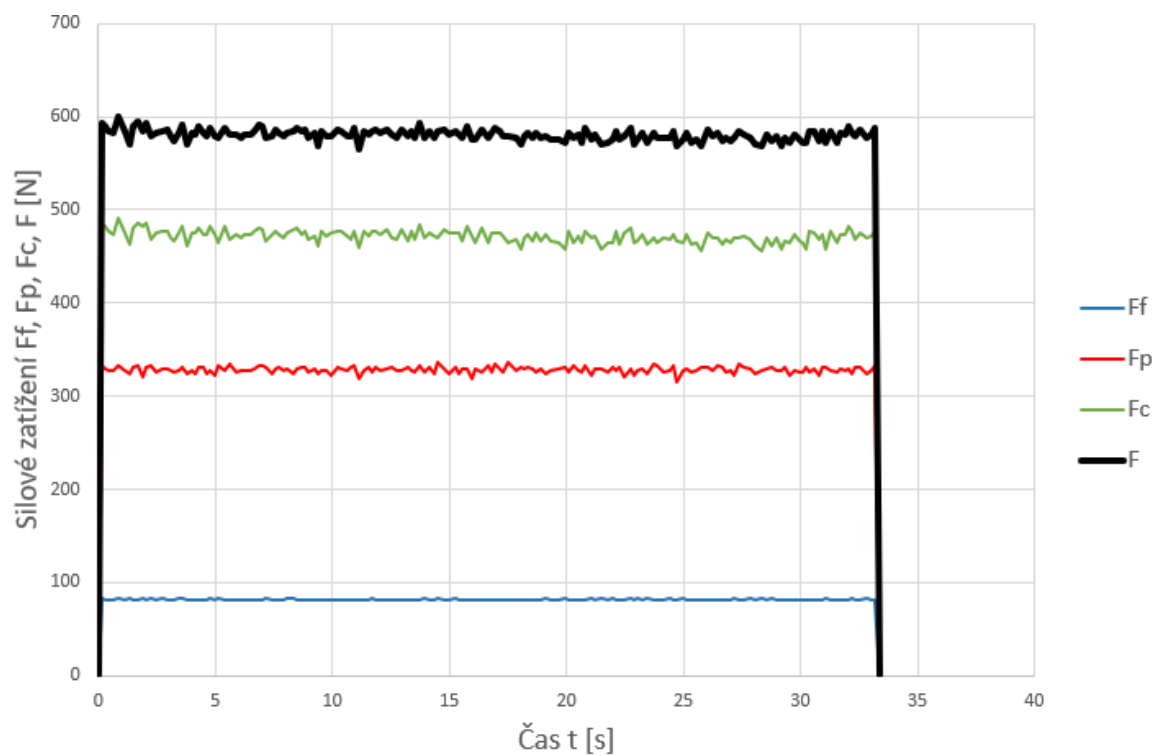
Na grafických závislostech uvedených na obr. 5.31 až obr. 5.36 je možné pozorovat průběh silových zatížení na čase.



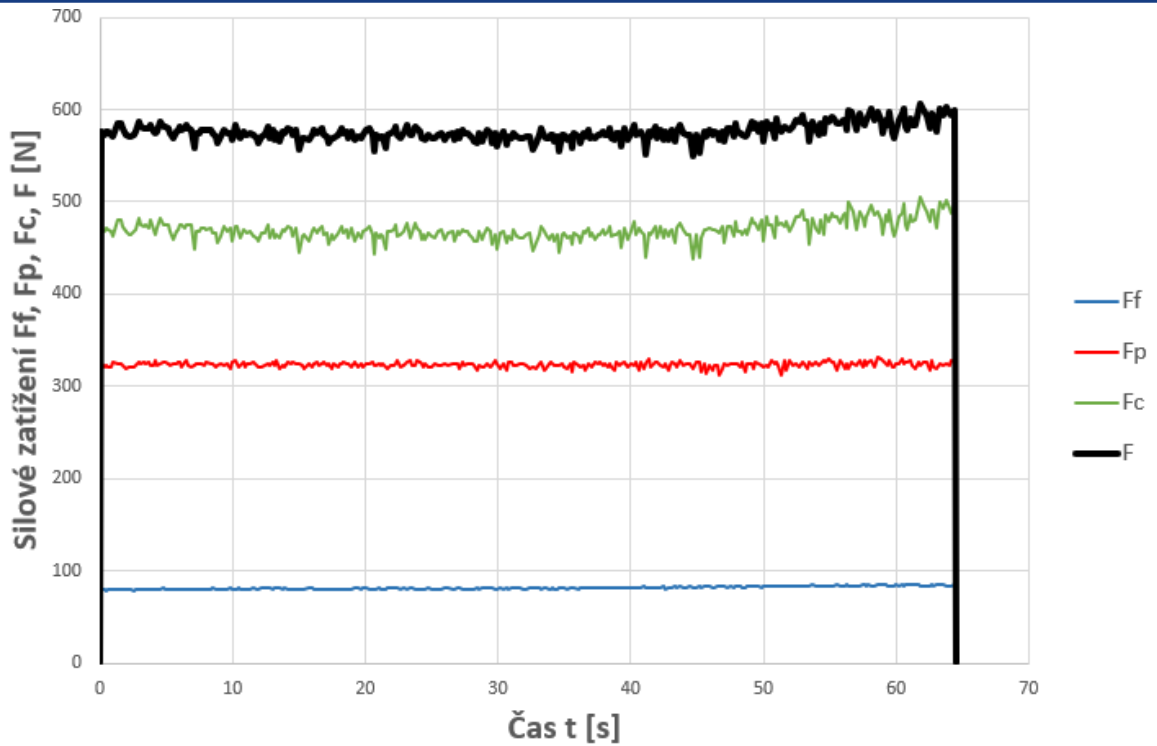
Obr. 5.31 Grafická závislost silového zatížení VBD_4 na dráze 0 m až 50 m v závislosti na čase.



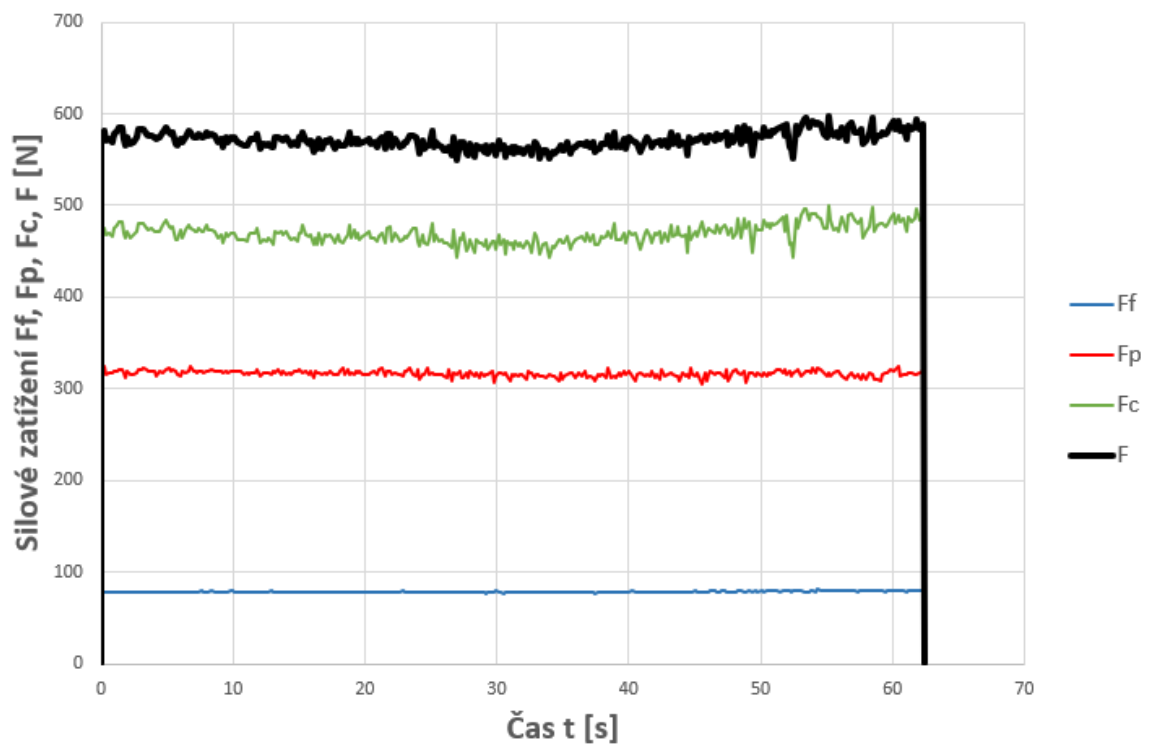
Obr. 5.32 Grafická závislost silového zatížení VBD_4 na dráze 50 m až 150 m v závislosti na čase.



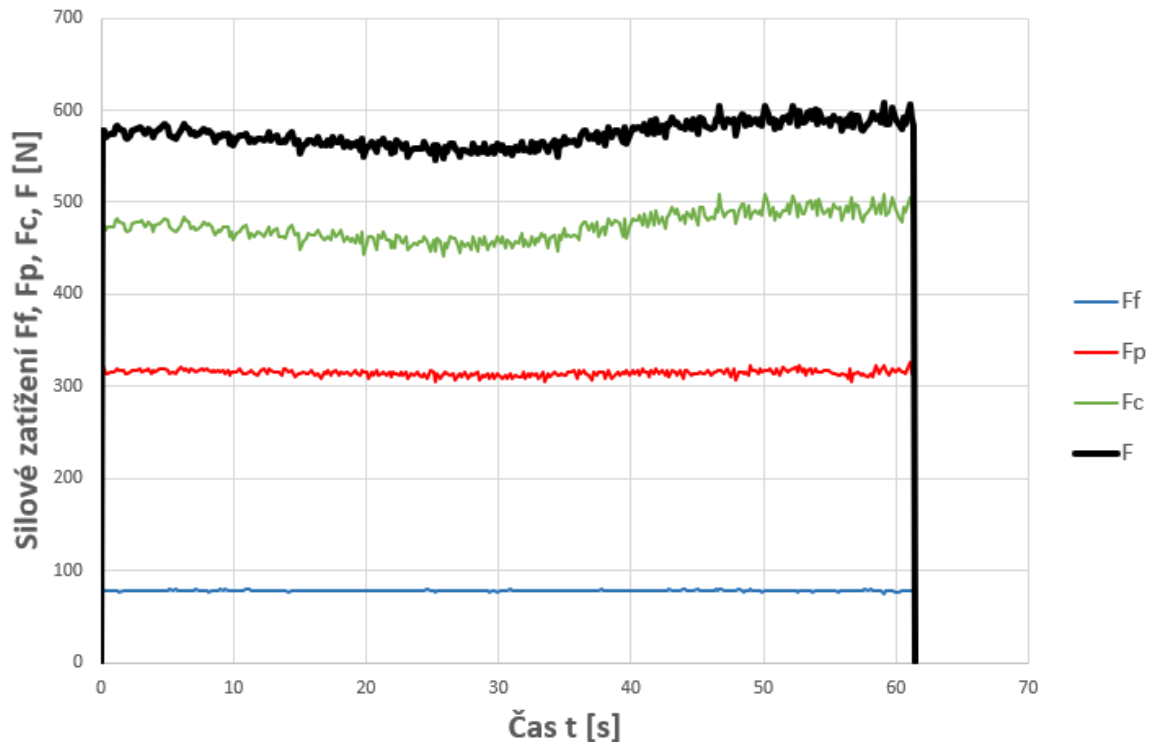
Obr. 5.33 Grafická závislost silového zatížení VBD_4 na dráze 150 m až 250 m v závislosti na čase.



Obr. 5.34 Grafická závislost silového zatížení VBD_4 na dráze 250 m až 450 m v závislosti na čase.



Obr. 5.35 Grafická závislost silového zatížení VBD_4 na dráze 450 m až 650 m v závislosti na čase.



Obr. 5.36 Grafická závislost silového zatížení VBD_4 na dráze 650 m až 850 m v závislosti na čase.

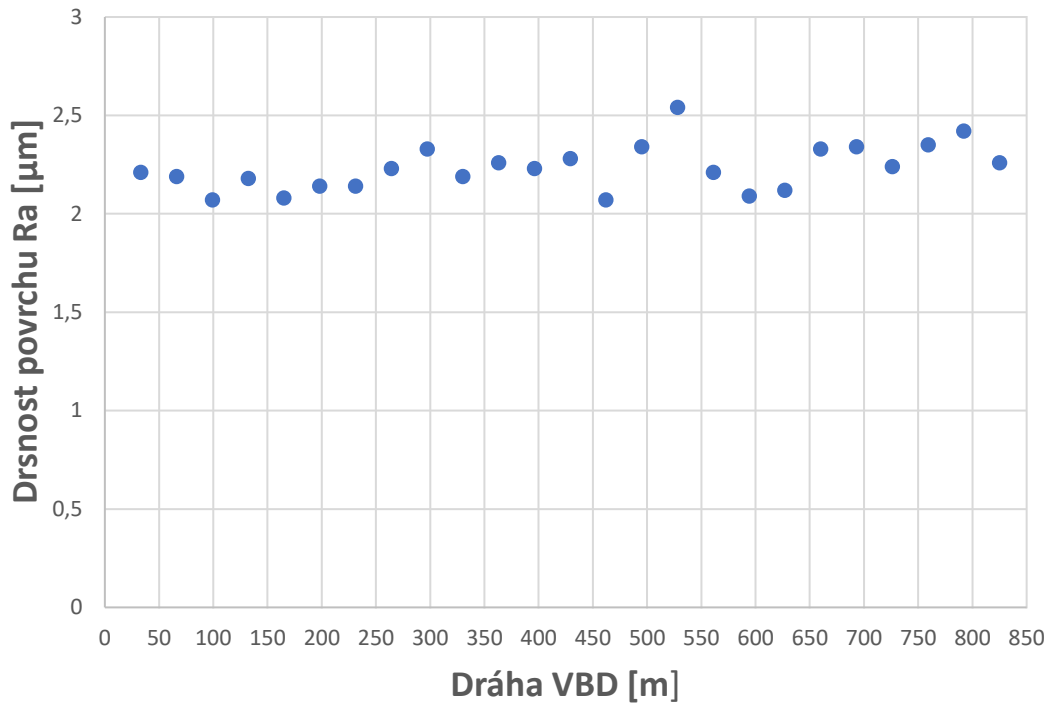
Testovaná VBD_4 vykazovala během celého měření prakticky konstantní řezné síly, které na sebe plynule navazovaly viz obr. 5.31 až obr. 5.36. Uražená dráha s VBD_4 je tedy příliš krátká, aby došlo k jejímu opotřebení. Pro další závěry by bylo třeba pokračovat dále v započatých zkouškách.

5.2.5 Drsnost povrchu pro vyměnitelnou břitovou destičku 4

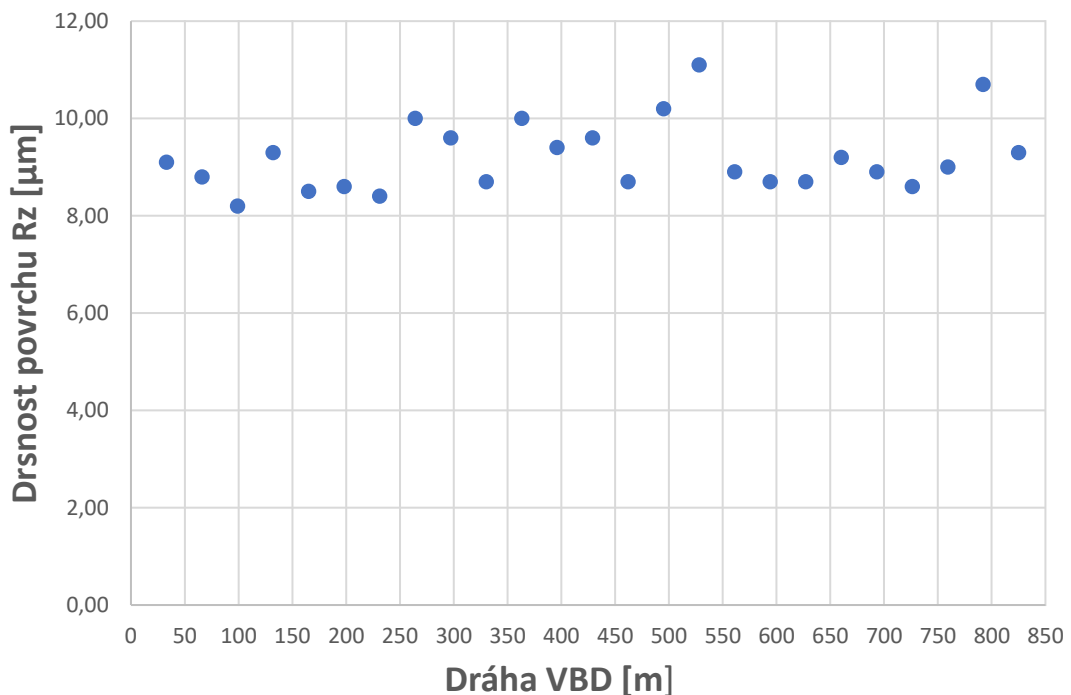
Po dokončení každého úseku obrábění se v pravidelných intervalech ураžené dráhy VBD_4 měřily veličiny R_a a R_z . Tyto hodnoty zpracovává tab. 5.4 a jsou vyneseny v grafické závislosti na zmiňované ураžené dráze na obr. 5.37 a obr. 5.38.

Tab. 5.4 Hodnoty Ra a Rz pro vyměnitelnou břitovou destičku 4.

Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1	2,21	9,10
2	2,19	8,80
3	2,07	8,20
4	2,18	9,30
5	2,08	8,50
6	2,14	8,60
7	2,14	8,40
8	2,23	10,00
9	2,33	9,60
10	2,19	8,70
11	2,26	10,00
12	2,23	9,40
13	2,28	9,60
14	2,07	8,70
15	2,34	10,20
16	2,54	11,10
17	2,21	8,90
18	2,09	8,70
19	2,12	8,70
20	2,33	9,20
21	2,34	8,90
22	2,24	8,60
23	2,35	9,00
24	2,42	10,70
25	2,26	9,30



Obr. 5.37 Grafická závislost Ra na dráze uražené VBD_4.

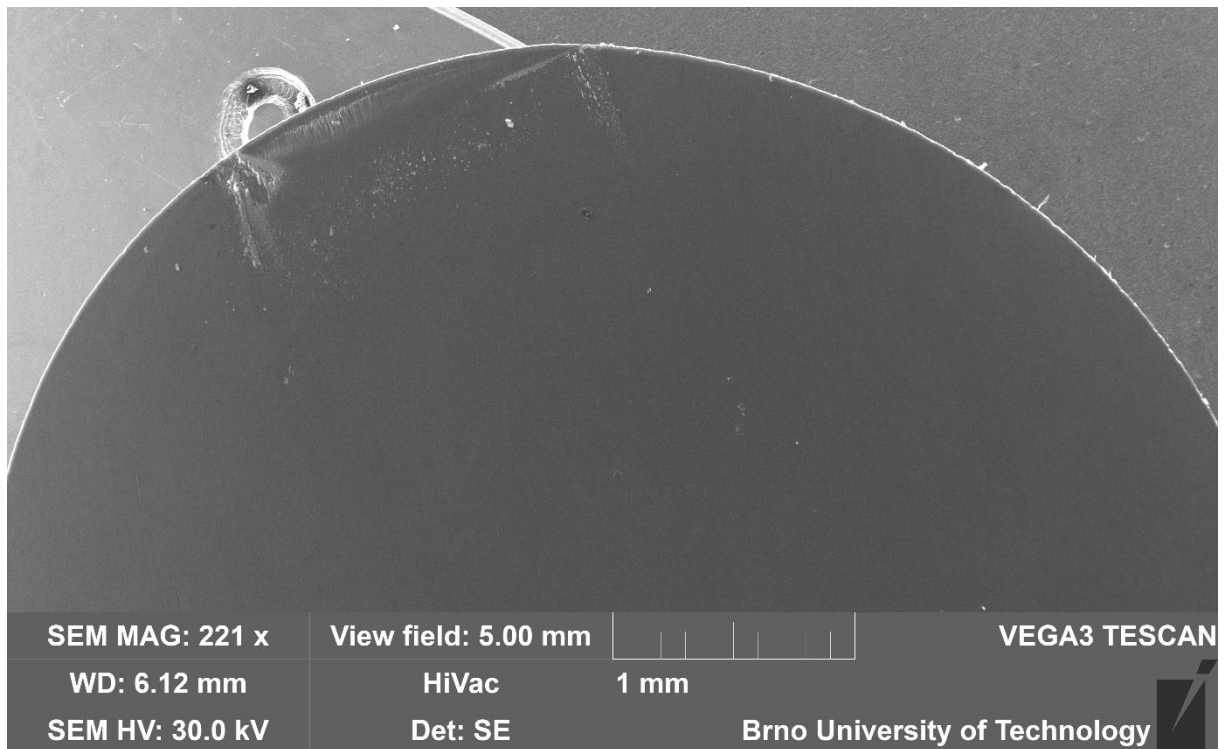


Obr. 5.38 Grafická závislost Rz na dráze uražené VBD_4.

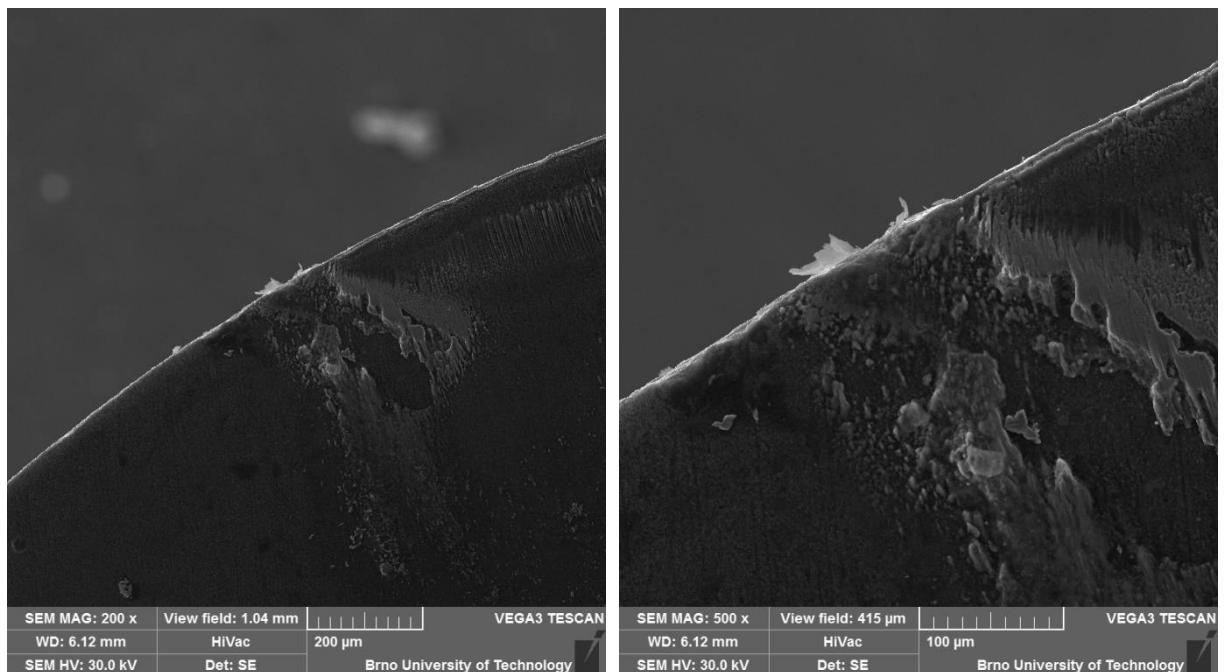
Parametry drsnosti byly měřeny dle principu zobrazeném na obr. 4.16. U hodnoceného parametru Ra nedošlo k téměř žádnému zvětšení naměřené hodnoty. Parametr Rz vykazuje dvě drsnosti, které vyčnívají nad zbylé naměřené hodnoty. Jelikož se to týká pouze dvou hodnot, lze usoudit, že svou roli sehrál i výběr místa pro měření a VBD_4 je tedy způsobilá dalšímu testování.

5.2.6 Opatření vyměnitelné břitové destičky 4

Kapitola zobrazuje stav VBD_4 po obrobení dráhy 850 m. Na obr. 5.39 a obr. 5.40 jsou postupně zobrazeny fotografie pořízené na elektronovém mikroskopu TESCAN VEGA 3.



Obr 5.39 VBD_4 po uražení 850 m.



Obr. 5.40 VBD_4 po uražení 850 m – detail bříty.

Snímky z elektronového mikroskopu TESCAN VEGA 3 na obr. 5.39 a obr. 5.40 prokazují, že nedošlo k závažnému opotřebení břitu nástroje, které by zapříčinilo vyřazení VBD_4 z dalšího testování. VBD_4 je tedy schopna pokračovat v dalším testování a navyšování hodnoty uražené dráhy.

5.2.7 Dílčí zhodnocení druhé série

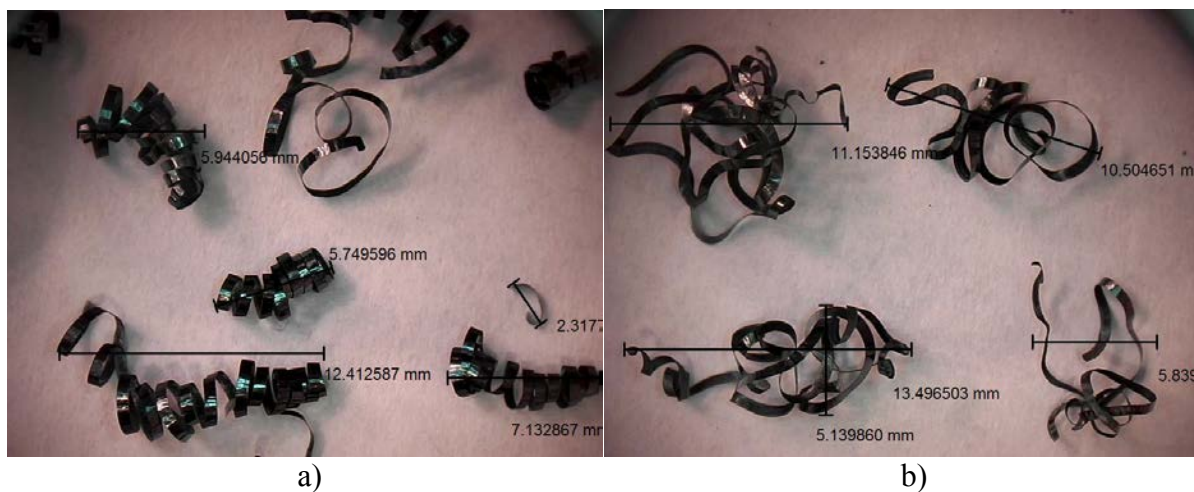
V druhé sérii proběhlo úspěšně testování VBD_3 a VBD_4. Při vyhodnocení dílčích výsledků obsahujících záznamy řezných sil, drsnosti obrobených povrchů a snímky z elektronového mikroskopu obou VBD bylo dospěno stejně jako u první série k následujícímu závěru. VBD_3 a VBD_4 urazily požadovanou dráhu 850 m za stanovených řezných podmínek při minimálním opotřebení řezných nástrojů. Hodnoty zmíněných analýz druhé série odpovídají hodnotám získaným v první sérii.

6 TVAR OBROBENÉ TŘÍSKY

Při podélném soustružení konstrukční oceli 42CrMo4 byly po daných uražených drahách odebrány třísky, na kterých byl zkoumán především jejich tvar. Tvar vzniklých třísek VBD_1 se nachází na obr. 6.1 až obr. 6.6.



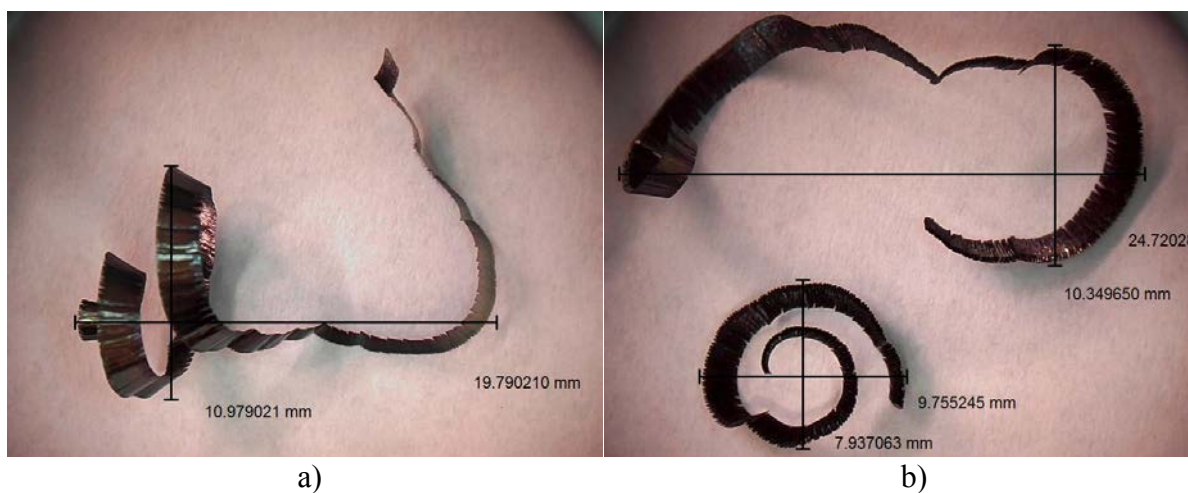
Obr. 6.1 Ukázka třísek VBD_1 po obrobení dráhy – a) 0 m až 50 m, b) 50 m až 150 m.



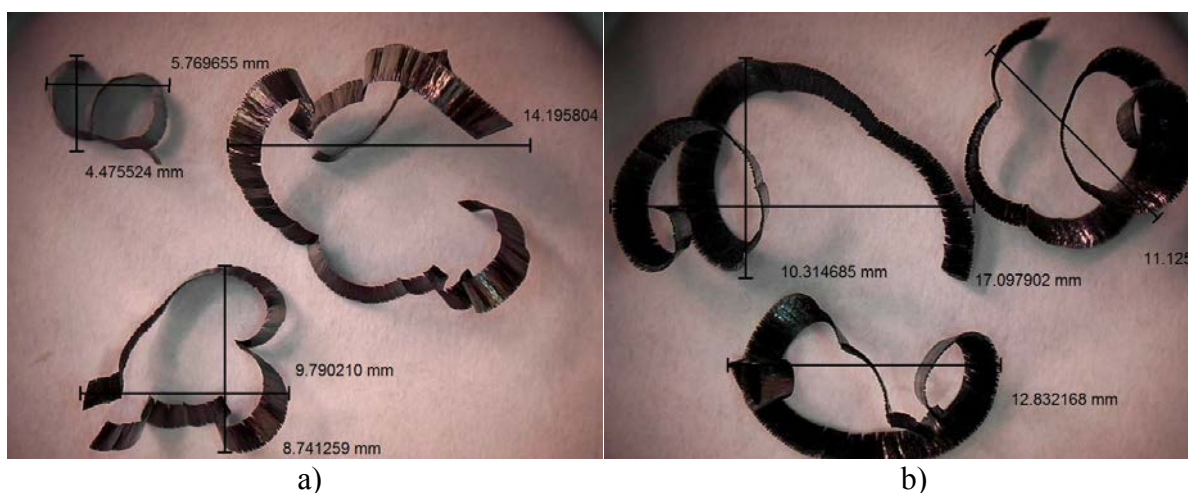
Obr. 6.2 Ukázka třísek VBD_1 po obrobení dráhy – a) 150 m až 250 m, b) 250 m až 450 m.



Obr. 6.3 Ukázka třísek VBD_1 po obrobení dráhy – a) 450 m až 650 m, b) 650 m až 850 m.



Obr. 6.4 Ukázka třísek VBD_2 po obrobení dráhy – a) 0 m až 50 m, b) 50 m až 150 m.



Obr. 6.5 Ukázka třísek VBD_2 po obrobení dráhy – a) 150 m až 250 m, b) 250 m až 450 m.



Obr. 6.6 Ukázka třísek VBD_2 po obrobení dráhy – a) 450 m až 650 m, b) 650 m až 850 m.

Pro porovnání byl přidán obr. 6.7, který zobrazuje základní rozdělení tvarů třísek a obr. 6.8 popisující tvary třísky vzniklé při obrábění materiálu 12 050.1; VBD: CNMG 120404- F.



Obr. 6.7 Základní tvary třísek při soustružení [22].

Hloubka a_p [mm]	VBD: CNMG 120404-F			Druh SK: HF7/5580 Povlak: PVD	Řezná rych.: 180 m/min	Materiál: 12 050.1	$\kappa_r = 95^\circ$	Poznámka:							
3,0															
2,5															
2,0															
1,5															
1,0															
0,5															
0,3															
0,2															
0,1															
Posuv f [mm/ot]	0,060	0,067	0,082	0,090	0,105	0,120	0,135	0,150	0,167	0,180	0,210	0,240	0,270	0,330	0,360

Obr. 6.8 Ukázka třísek vzniklých při obrábění materiálu 12 050.1; VBD: CNMG 120404-F [22].

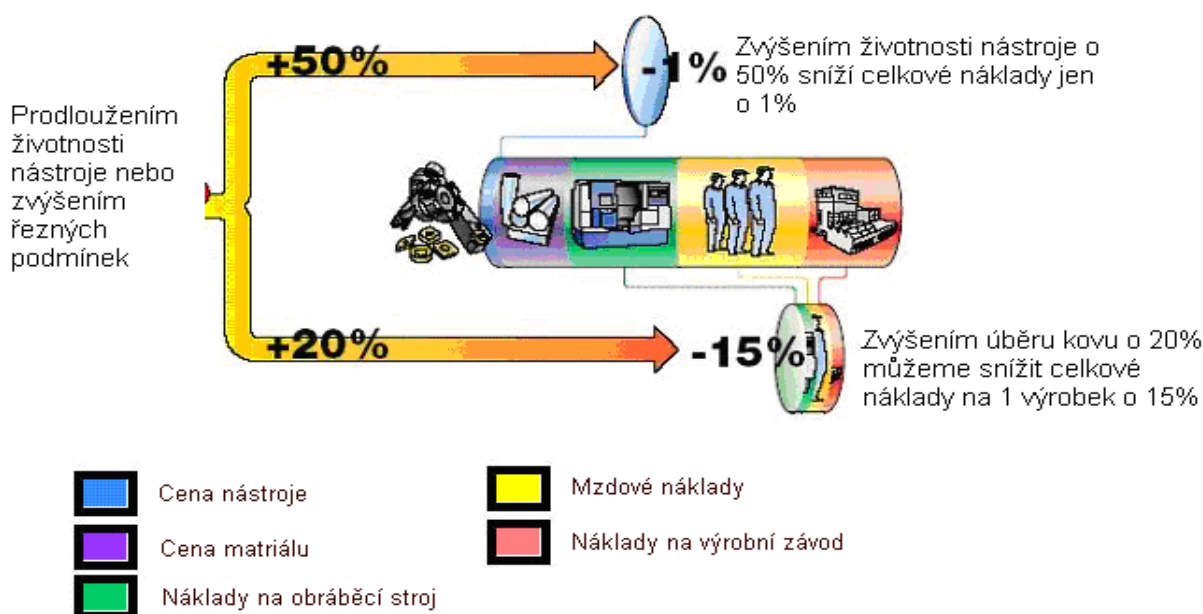
Jak je z obr. 6.8 patrné, zvolené řezné podmínky pro obě VBD se nachází v hraniční oblasti, kdy pro klasické soustružení není zaručen vhodný tvar třísky. Na obr. 6.1 až obr. 6.6 se vyskytují jak třísky šroubové lámavé a spirálové lámavé třísky, tak i smotané třísky (ukázky možných tvarů třísek se nachází na obr. 6.7). Zvolené řezné podmínky u tohoto testování ovšem nahrazují řezné podmínky vyskytující se u technologie okružování, kde je dělitelnost třísky zajištěna samotnou technologií. Neprobíhá zde konstantní úběr materiálu jedinou VBD jako u soustružení, ale na úběru materiálu se podílí více VBD. Každá VBD po vyjetí ze záběru vytvoří a oddělí vlastní oddělenou třísku.

7 DISKUSE

Největší vliv na měřené hodnoty silového zatížení má obráběný materiál. I nepatrné rozdíly v homogenitě materiálu a hodnotách tvrdosti po zakalení hrají zásadní roli. Materiál 42CrMo4 byl proto analyzován a bylo dospěno k závěru, že materiál je z daných hledisek považován za vyhovující.

Mírné rozdíly hodnot měřených silových zatížení mezi jednotlivými VBD se stejnými řeznými podmínkami mohly být způsobeny rozdílným geometrickým tvarem břitu nástroje dodaného výrobcem a po jeho přebroušení. Geometrický tvar břitu nástroje hraje důležitou roli při velikosti odporových sil, které vykazuje materiál bránící se procesu obrábění. Břity VBD byly zkoumány na elektronovém mikroskopu TESCAN VEGA 3, který potvrdil, že pro testování byly použity pouze nepřebroušované VBD dodané přímo výrobcem. Dílčí zpráva se tedy zabývá pouze zkoumáním nepřebroušovaných VBD.

Z dosažených výsledků je zřejmé, že u technologie soustružení je možné s dodanými VBD zvýšit požadovanou šířku záběru ostří ($a_p = 0,045$ mm) na desetinásobek, aniž by došlo k výraznějšímu poškození VBD. Je tedy otázkou, zda by nebylo možné u technologie okružního frézování zvýšit hodnoty šířky záběru ostří. Tímto krokem by se zvýšila produktivita úběru třísky za jednotku času a snížily se náklady spojené s obráběním kuličkového šroubu, jak je patrné na obr. 7.1.



Obr. 7.1 Hodnoty vybraných vlastností řezných materiálů [22].

ZÁVĚR

Diplomová práce byla zaměřena na analyzování řezných nástrojů při soustružení konstrukční oceli označované jako 42CrMo4. Teoretická část práce zahrnovala rozbor technologií soustružení a frézování, způsoby výroby kuličkových šroubů, pro které se daná ocel a použité VBD využívají, a experimentální metody analyzování opotřebení na nástroji. V experimentální části byly analyzovány celkem 4 VBD rozdělených do dvou sérií. Každá série obsahovala dvě VBD, které byly testovány za stejných řezných podmínek (v_c , f) s výjimkou rozdílné šířky záběru ostří (a_p). Cílem testování bylo pozorovat v každé sérii obě VBD v závislosti na silovém zatížení, drsnosti obrobeného povrchu a opotřebení břitu VBD.

Z dosažených výsledků vyplývá:

- u analýzy silového zatížení na zařízení Kistler došlo u první i druhé série k očekávanému ustálení hodnot měřených silových zatíženích, ale nedošlo z důvodu krátké uražené dráhy k výraznému postupnému narůstání této hodnoty, což by značilo vznikající opotřebení břitu VBD,
- při vyhodnocení drsností obrobeného povrchu přístrojem TR 100 Surface Roughness Tester taktéž nedošlo u posuzovaných sérií k tendenci výraznému zhoršování drsnosti povrchu obrobku, z čehož vyplývá, že VBD nepřekročila mez své trvanlivosti,
- zkoumání elektronovým mikroskopem TESCAN VEGA 3 po uražení dráhy 850 m neprokázalo u žádné z posuzovaných VBD výrazné opotřebení, které by znamenalo její nezpůsobilost pro další obrábění.

Vyhodnocení tvaru třísky prokázalo, že řezné podmínky se nachází na hranici vhodnosti pro technologii soustružení. Jelikož ale dané testování pouze zjednodušilo a dočasně nahradilo technologii okružování, lze tuto skutečnost zanedbat.

Pro dané testování by bylo vhodné použít soustružnické centrum s plynulou regulací otáček, ale nastal by problém, že by na tomto centru nebylo možné upnout nožový držák a dynamometr. Nebyla by tedy možnost měřit a následně zkoumat hodnoty působících silových složek v průběhu opotřebení testovaných řezných nástrojů.

Pro technologii soustružení při daných řezných podmínkách s danou VBD je možné obrábět požadovaný materiál 42CrMo4 pro větší dráhu než 850 m, která byla dosažena i při desetinásobném zvětšení hodnoty šířky záběru ostří bez výrazného poškození VBD. Dodané VBD jsou ve firmě měněny po uražení dráhy 500 m, zadaná dráha 850 m představuje navýšení původní hodnoty na 170 %.

Trvanlivost VBD pro technologii soustružení za již zmíněných řezných podmínek dosahuje hodnoty $T = 4,72$ min, která byla dosažena všemi analyzovanými VBD. Z dosažených výsledků je patrné, že daná hodnota není konečná a bude se nadále zvyšovat.

Při technologii soustružení je VBD v záběru po celou dobu procesu. U technologie okružování, ať už sousledné nebo nesousledné, VBD při každé otáčce vřetene musí překonat odpor při vniknutí do obrobku a následně z něho vyjet. Trvanlivost VBD při tomto procesu je zpravidla nižší než u soustružení. Z tohoto důvodu nelze spolehlivě zaručit, že by VBD po uražení dráhy 850 m při technologii okružování byla vhodná k dalšímu obrábění.

Návrhy na pokračování testování a optimalizaci:

- dle zjištěných výsledků mají řezné podmínky obráběcího procesu potenciál na zvýšení používané hodnoty a_p , a tím zvýšení produktivity a snížení výrobních nákladů na kuličkový šroub,
- určení $T-v_c$ závislosti pro použitý řezný nástroj a obráběný materiál,
- použití povlaků na bázi CBN pro VBD,
- návrh řezného materiálu na bázi slinutého karbidu opatřeného povlakem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOČMAN, Karel, a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
2. HUMÁR, Anton. *Technologie I - Technologie obrábění – 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno: VUTFSI, Ústav strojírenské technologie, 2003 [cit. 15. dubna 2019]. Dostupné z: http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologie_I.pdf
3. FOREJT, Milan, a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
4. BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2007] [cit. 2019-05-15]. ISBN 978-80-248-1505-3.
5. Prospekty. KSK Precise Motion [online]. KSK Precise Motion, a.s., 2017 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.ksk-pm.cz/media/downloads/ke_stazeni/Produktovy_katalog_2017_CZ.pdf
6. MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2, přeprac., rozš. Praha: MM publishing, 2010, 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3.
7. Produktový katalog. KSK Precise Motion [online]. KSK Precise Motion, a.s., 2012 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6176730-Produktovy-katalog-kulickove-srouby-kurim-a-s-vzdy-mame-reseni.html>
8. HUMÁR, Anton. *Technologie I - Technologie obrábění – 2. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno: VUTFSI, Ústav strojírenské technologie, 2004 [cit. 3. května 2019]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf
9. *THREAD ROLLING MACHINES* [online]. REED MACHINERY, INC., ©2018 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.reed-machinery.com/pdf/thread-and-form-rolling-tech-data-master.pdf>
10. *RWT Catalogue* [online]. Rollwalztechnik Abele + Höltich GmbH, ©2018 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.rollwalztechnik.de/images/PDF/RWT_Brochure.pdf
11. *Závitové válcovací hlavy* [online]. NAREX MTE. NAREX MTE - výrobce přesných nástrojů, 2016 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: www.narexmte.cz/prospekty/In_Zhv.pdf

12. *Thread Whirling - What it is, and How Does it Work?* Genswiss - Tooling and Accessories for Swiss-Type CNC Machines [online]. ©2019 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.genswiss.com/whirlldata.htm>
13. DRÁBEK, Michal. *Životnost kuličkových šroubů při různém způsobu výroby a tepelného zpracování profilů valivých drah*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 60 s., 3 přílohy. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
14. *Thread Whirling Basics*. Production machining [online]. ©2019 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.productionmachining.com/articles/thread-whirling-basics>
15. Contributed by the Manufacturing Engineering Division of ASME for publication in the JOURNAL OF MICRO- AND NANO-MANUFACTURING. Manuscript received September 1, 2014; final manuscript received May 26, 2015; published online August 13, 2015. Assoc. Editor: Martin Jun.
16. *Whirling technology*. In: *Burgsmüller wear technology* [online]. Burgsmüller GmbH, ©2019 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.burgsmueller.de/en/whirling-technology.html>
17. DOBEŠ, Milan. Efektivní výroba velkých kuličkových šroubů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/efektivni-vyroba-velkych-kulickovych-sroubu.html>
18. *TVÁRNENIE ZÁVITOV* [online]. EMUGE-FRANKEN nástroje spol. s r.o., ©2016 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://www.emuge.sk/sub/emuge.sk/images/katalogy/ZP10019_GB-InnoForm.pdf
19. *Thread Rolling Attachments* [online]. Wagner Tooling Systems Baublies GmbH, ©2019 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.wagner-werkzeug.de/fileadmin/pdf/Prospekt-SRW-ENG.pdf>
20. HUMÁR, Anton. Technologie I - Technologie obrábění – 3. část: Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program [online]. Brno: VUT FSI, Ústav strojírenské technologie, 2005 [cit. 6. května 2019]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
21. *Satellite Roller Screws* [online]. In: . Kugel Aerospace & Defence, ©2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.kugelaerospace.com/sites/default/files/styles/gallery-large/public/images/Multi-start%20planetary%20roller%20screw.jpg?itok=z7RQASGi>

-
22. SEDLÁK, Josef. *Přednášky Technologie obrábění: Ekonomika obrábění, produktivita a hospodárnost obrábění*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019.
 23. HUMÁR, Anton. *Přednášky z předmětu Experimentální metody*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013.
 24. FOREJT, Milan a Anton HUMÁR. *Experimentální metody: Syllabus* [online]. Brno, 2003 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Exp_metody_he2.pdf
 25. SZCZYGIEL, P. *Zkoušky řezivosti vyměnitelných břitových destiček pro obrábění kolejevých součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. XY s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
 26. SEDLÁK, J., KOUŘIL, K., CHLADIL, J., JAROŠ, A., FIALA, Z. Analysis of finishing very precise holes by the reaming head MT3. *MM Science Journal*, 2018, Vol. 2018, No. 3, p. 2421-2428. ISSN: 1803-1269.
 27. *Přímé měření sil a momentů*. [online]. Vysoká škola báňská - Technická univerzita [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf
 28. Piezoelektrický jev: mechanismus vzniku elektrické polarizace při deformaci. Wikipedie, otevřená encyklopedie [online]. c 2017 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrick%C3%BD_jev#Reference
 29. FIALA, Zdeněk. *Prezentace Experimentální metody: Drsnost povrchu*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014.
 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. Bohdan Bolzano, s.r.o. [online]. © 2019. Všechna práva vyhrazena. [cit. 6. března 2019]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_42CrMo4.pdf
 32. ŠTRAJBL, Jan. *Obráběcí Stroje 1974*. 2. dopl. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, n. p., 1975. L13-E1-III-31/22476.
 33. SEDLÁK, J., TROPP, P., CHLADIL, J., KOUŘIL, K., POLZER, A., OSIČKA, K. Analysis of Selected Aspects of Turned Bearing Rings Regarding Required Workpiece Quality. *Manufacturing TECHNOLOGY*, 2016, Vol. 2016, No. 3, p. 612-622. ISSN: 1213-2489.
-

34. SEDLÁK, J., DRÁBEK, T., MOURALOVÁ, K., CHLADIL, J., KOUŘIL, K. Machining Issues of Titanium Alloys. *International Journal of Metalcasting*, 2015, Vol. 9, No. 2, p. 41-50. ISSN: 1939-5981.
35. *NT - Nové technologie: Drsnoměr TR 100* [online]. [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: http://www.ndt-nt.cz/eshop-produkt/meridla_povrchovych_vrstev/drsnomer_TR_100/cz
36. *TESCAN Performance in nanospace: VEGA 3* [online]. [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <https://www.tescan.com/en-us/technology/sem/vega3>
37. *Catalogue. Sumitomo Tool* [online]. SUMITOMO ELECTRIC Hartmetall GmbH, 2018 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://www.sumitomotool.com/fileadmin/user_upload/Catalogues_Download/General_Catalogue_2018-2019_interactive_CZ.compressed.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
aj.	[-]	A jiné
atd.	[-]	A tak dál
CBN	[-]	Kubický nitrid bóru
ČSN	[-]	Česká národní norma
DIN	[-]	Německá národní norma
EN	[-]	Evropská národní norma
ISO	[-]	Mezinárodní organizace pro normalizaci
KŠ	[-]	Kuličkový šroub
např.	[-]	Například
obr.	[-]	Obrázek
PKD	[-]	Polykrystalický diamant
SK	[-]	Slinutý karbid
tab.	[-]	Tabulka
tzv.	[-]	Takzvaný
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
κ_r	[°]	Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
φ	[°]	Úhel posuvového pohybu
φ_{max}	[°]	Maximální úhel posuvového pohybu
μ	[°]	Úhel řezného pohybu
Ψ	[°]	Úhel záběru frézy
A_D	[mm ²]	Plocha průřezu třísky
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
b_D	[mm]	Jmenovitá šířka třísky
C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp}	[-]	Materiálové konstanty
D	[mm]	Průměr
f	[mm]	Posuv na otáčku
F	[N]	Celková působící síla
F_c	[N]	Řezná síla
F_{ci}	[N]	Řezná síla
F_{cNi}	[N]	Kolmá řezná síla
F_f	[N]	Posuvová síla
F_{fi}	[N]	Posuvová síla u frézování
F_{fNi}	[N]	Kolmá posuvová síla
F_i	[N]	Celková řezná síla
F_p	[N]	Pasivní síla
f_z	[mm]	Posuv na zub
h_D	[mm]	Jmenovitá tloušťka třísky
k_c	[MPa]	Měrná řezná síla

n	[min ⁻¹]	Otáčky obrobku
n_z	[-]	Počet zubů v záběru
P_{fe}	[-]	Pracovní boční rovina
Ra	[μm]	Střední aritmetická úchylka drsnosti
Rz	[μm]	Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů
t	[s]	čas
v_c	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost
v_e	[m.min ⁻¹]	Rychlost řezného pohybu
v_f	[m.min ⁻¹]	Posuvová rychlost
x_{Fc}, x_{Ff}, x_{Fp}	[-]	Exponenty vlivu <i>a_p</i>
x	[-]	Exponent vlivu tloušťky třísky
y_{Fc}, y_{Ff}, y_{Fp}	[-]	Exponenty vlivu <i>f</i>
z	[-]	Počet zubů frézy