



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ZKOUŠKY ŘEZIVOSTI VBD PŘI SOUSTRUŽENÍ
KONSTRUKČNÍ KALENÉ OCELI**

CUTTING TESTS OF INSERT FOR TURNING STRUCTURAL HARDENED STEEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Šolc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Michal Šolc
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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:

Zkoušky řezivosti VBD při soustružení konstrukční kalené oceli

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat analýzou opotřebení řezných nástrojů při soustružení konstrukční kalené 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.

KOCMAN, 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 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá opotřebením vyměnitelných břitových destiček při soustružení konstrukční kalené oceli. Teoretická část popisuje stručnou charakteristiku technologie soustružení, silové zatížení na nástroji a nástroje používané při soustružení. Dále obsahuje rozbor chemického složení obráběného materiálu, jeho mikrostrukturu a mikrotvrdost. Stroje a zařízení použité při experimentu a jejich specifikace. Experimentální část práce popisuje způsob měření a vyhodnocení opotřebení nástroje, následují samotné řezné zkoušky, dokumentování výsledku a jejich vyhodnocení. Závěrem práce je zpracování naměřených dat, zhodnocení dosažených výsledků a navržení dalšího postupu ke zlepšení procesu.

Klíčová slova

Experimentální metody, soustružení, konstrukční kalená ocel, 100CrMnSI6-4, 100Cr6, matice kuličkového šroubu, silové zatížení

ABSTRACT

The thesis deals with the wear of replaceable inserts during the turning of structural hardened steel. The theoretical part describes a brief characteristic of turning technology, force loading on tools and tools used in turning. Moreover, it contains an analysis of the chemical composition of the machined material, its microstructure and microhardness. Machines and equipment used for the experiment and their specifications. The experimental part of the thesis describes the method of measuring and evaluating of tool wear, followed by the cutting tests themselves, documenting of the result and their evaluation. The conclusion of the thesis is the processing of measured data, the evaluation of achieved results and the proposal of further steps to improve the process.

Key words

Experimental methods, turning, construction hardened steel, 100CrMnSI6-4, 100Cr6, ball screw nut, strength load

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠOLC, Michal. Zkoušky řezivosti VBD při soustružení konstrukční kalené oceli. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125024>. 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 **Zkoušky řezivosti pro VBD při soustružení konstrukční kalené oceli** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....23.6.2020

Datum

Bc. Michal Šolc

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D., za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval katedře strojírenství Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany, hlavně pak mjr. doc. Ing. Zbyňku Studenému, Ph.D., kpt. Ing. Davidu Dobrockému, Ph.D., za pomoc při získávání a zpracování dat. Za odborný dohled a asistenci při obrábění bych rád poděkoval panu Jiřímu Čechovi a Ing. Aleši Jarošovi, Ph.D. Velké díky také patří mé rodině za podporu při studiu.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD	9
1 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ	10
1.1 Kinematika soustružení	10
1.2 Silové zatížení	11
1.3 Nástroje pro soustružení	12
2 PRŮBĚH ŘEZNÝCH ZKOUŠEK	15
2.1 Materiál obrobku	15
2.1.1 <i>Ověření chemického složení.....</i>	<i>16</i>
2.1.2 <i>Metalografické pozorování struktury</i>	<i>17</i>
2.1.3 <i>Měření mikrotvrdosti</i>	<i>20</i>
2.2 Obráběcí stroj	21
2.3 Použitá aparatura	22
2.4 Řezné podmínky pro zkoušky řezivosti.....	24
2.5 Řezné nástroje pro zkoušky řezivosti	25
2.6 Metody ke zjištění opotřebení nástroje	27
2.6.1 <i>Přímé metody měření opotřebení.....</i>	<i>27</i>
2.6.1.1 Váhová metoda	28
2.6.1.2 Mikrometrická metoda.....	28
2.6.1.3 Optická metoda	28
2.6.2 <i>Nepřímé metody měření.....</i>	<i>29</i>
2.6.2.1 Optická metoda	29
2.6.2.2 Měření řezných sil a kroutícího momentu	29
2.6.3 <i>Elektrické dynamometry.....</i>	<i>30</i>
2.6.4 <i>Mechanické dynamometry</i>	<i>30</i>
2.6.5 <i>Pneumatické dynamometry.....</i>	<i>30</i>
2.6.6 <i>Hydraulické dynamometry.....</i>	<i>30</i>
2.6.7 <i>Piezometrické dynamometry.....</i>	<i>31</i>
2.7 Měření drsnosti povrchu	31
2.8 Silové působení.....	32
3 VYHODNOCENÍ ŘEZNÝCH ZKOUŠEK	34
3.1 První série testování	34
3.1.1 <i>Silové zatížení pro přerušovaný řez – série 1</i>	<i>34</i>
3.1.2 <i>Drsnost povrchu pro přerušovaný řez – série 1</i>	<i>37</i>
3.1.3 <i>Opotřebení VBD pro přerušovaný řez – série 1.....</i>	<i>38</i>
3.1.4 <i>Silové zatížení pro nepřerušovaný řez – série 1</i>	<i>40</i>
3.1.5 <i>Drsnost povrchu pro nepřerušovaný řez – série 1</i>	<i>43</i>
3.1.6 <i>Opotřebení VBD pro nepřerušovaný řez – série 1.....</i>	<i>44</i>

3.1.7	Dílčí zhodnocení první série	46
3.2	Druhá série testování	47
3.2.1	Silové zatížení pro přerušovaný řez – série 2	47
3.2.2	Drsnost povrchu pro přerušovaný řez – série 2	49
3.2.3	Opotřebení VBD pro přerušovaný řez – série 2.....	50
3.2.4	Silové zatížení pro nepřerušovaný řez – série 2	55
3.2.5	Drsnost povrchu pro nepřerušovaný řez – série 2	57
3.2.6	Opotřebení VBD pro nepřerušovaný řez – série 2.....	58
3.2.7	Dílčí zhodnocení druhé série	62
3.3	Opotřebení VBD na dráze 850 m	62
3.3.1	Silové zatížení.....	62
3.3.2	Opotřebení VBD – přerušovaný řez	64
3.3.3	Opotřebení VBD – nepřerušovaný řez.....	66
3.3.4	Dílčí zhodnocení	68
4	ZÁVĚR.....	69
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	74
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	77
	SEZNAM PŘÍLOH	78

ÚVOD

V dnešní době stále rychlejšího vývoje a nástupu nových technologií na trh je nutné, aby se firmy tomuto trendu uměly přizpůsobit. Tlak na cenu, rychlost produkce a konkurenční boj mezi strojírenskými firmami roste. Pokud chce podnik v tomto prostředí obstát, musí stále hledat nové postupy a technologie výroby, které povedou k výše zmíněným požadavkům. To zahrnuje celou řadu činností jako je výzkum a vývoj, testování a vyhodnocování inovací a jejich následná implementace do procesů. Konkrétní příklad může být proces testování řezných nástrojů na obráběném materiálu s cílem zjistit trvanlivost nástroje, popř. jeho opotřebení.

Teoretická část zprávy přibližuje charakteristiku technologie obrábění z hlediska kinematiky sil a použitých řezných nástrojů. Dále pak uvádí způsoby měření opotřebení řezného nástroje a rozbor materiálu obrobku (chemické složení, mikrostruktura a mikrotvrdość).

V experimentální části byly provedeny řezné zkoušky pro konstrukční kalenou ocel označovanou jako ČSN 14 109.3 (dále jen 100Cr6). Materiál byl dodán ve dvou variantách – polotovar trubky (dále jen matice bez otvorů) a matice kuličkového šroubu s vnitřním závitem (po obvodu s otvory pro lůžka, dále jen matice s otvory) – obě varianty byly dlouhé 95 mm a $\varnothing 104,5$ mm. Při experimentu byl vnější povrch obrobku podélně soustružen při zadaných řezných podmínkách. Cílem experimentu bylo sledovat silové zatížení na nástroji a opotřebení vyměnitelné břitové destičky (VBD), která byla dodána v počtu pěti kusů s označením CBN VBGW 160408 HS-NC2 BNC 300 s povlakem z TiAlN.

Výsledkem řezných zkoušek je vyhodnocení a zpracování získaných dat během experimentu. Mezi tato data patří silové zatížení, drsnost povrchu a analýza opotřebení VBD s fotografiemi na elektronovém mikroskopu. Pro ověření správnosti výsledků byly provedeny celkem dvě série měření za stejných podmínek. Závěrem zprávy je celkové zhodnocení opotřebení VBD a určení trvanlivosti VBD pro dané řezné podmínky a obráběný materiál.

1 CHARAKTERISTIKA 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 tedy jedná o nejrozšířenější metodu obrábění. Soustruhy se využívají nejen pro obrábění vnějších a vnitřních válcových, kuželových i tvarových ploch, vytváření zápchů a řezání závitů, ale umožňují také vrtání, vyvrtávání, vystružování atd. [1, 2, 3].

1.1 Kinematika soustružení

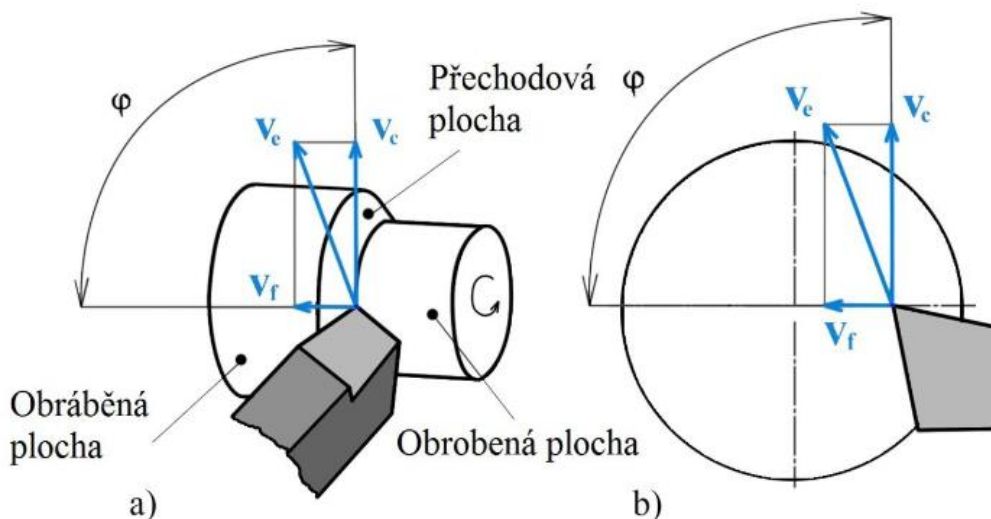
Hlavní pohyb u technologie soustružení je rotační a vykonává ho obrobek, posuvový pohyb je přímočarý a koná ho nástroj viz obr. 1.1. Řezný pohyb se při soustružení válcové plochy (podélné soustružení) realizuje po šroubovici a při soustružení čelní plochy po Archimedově spirále [1, 2, 3].

Hlavní pohyb se charakterizuje řeznou rychlostí, která je definována na základě vztahu (1.1) [1]:

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

Vedlejší pohyb, tedy pohyb nástroje se charakterizuje posuvovou rychlostí, která se vypočte podle vztahu (1.2) [1]:

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



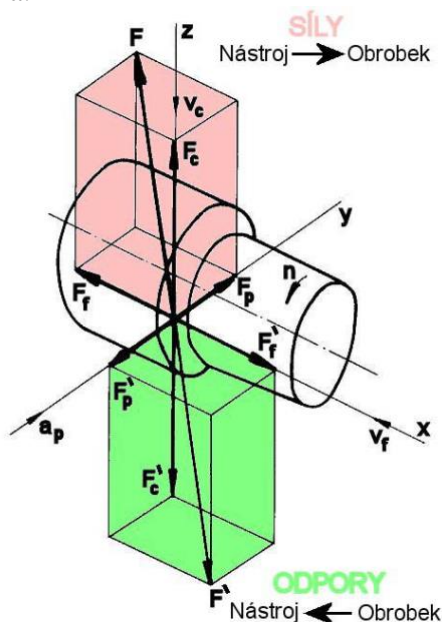
a) podélné soustružení; b) čelní soustružení

Obr. 1.1 Kinematika soustružení [2].

1.2 Silové zatížení

Rozložení silového zatížení je zobrazeno na obr. 1.2, kde celková působící síla je složena ze složek:

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



Obr. 1.2 Rozložení silového zatížení při podélném soustružení [1].

Jednotlivé hodnoty působících silových složek je možné zjistit použitím vhodného dynamometru nebo je lze spočítat pomocí tzv. empirických vztahů. Vztahy jsou závislé na hodnotě posuvu na otáčku f , šířce záběru hlavního ostří nástroje a_p , materiálové konstantě C_{Fc} a na exponentech x a y . Pro užití těchto vztahů je nutno znát materiálové charakteristiky obráběného materiálu, ze kterých jsou hodnoty těchto konstant a exponentů zjištěny experimentálně. Pro výpočet jednotlivých silových složek jsou odvozeny následující vztahy (1.3) až (1.5) [1, 3]:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [\text{N}] \quad (1.3)$$

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

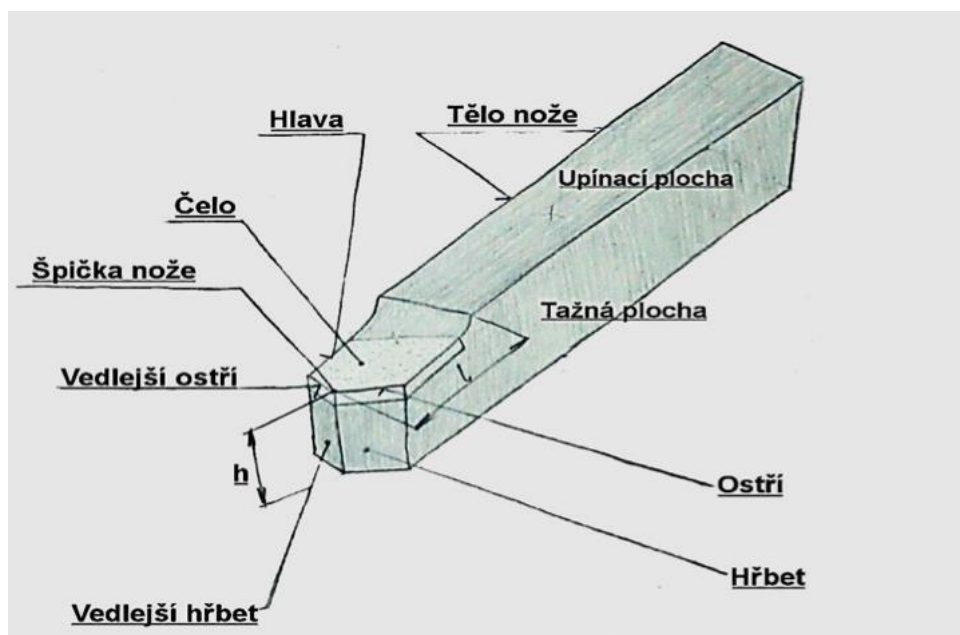
$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad [\text{N}] \quad (1.5)$$

Celková působící síla F (viz obr. 1.2) se vypočítá na základě jednotlivých silových složek podle vztahu (1.6) [1]:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad [\text{N}] \quad (1.6)$$

1.3 Nástroje pro soustružení

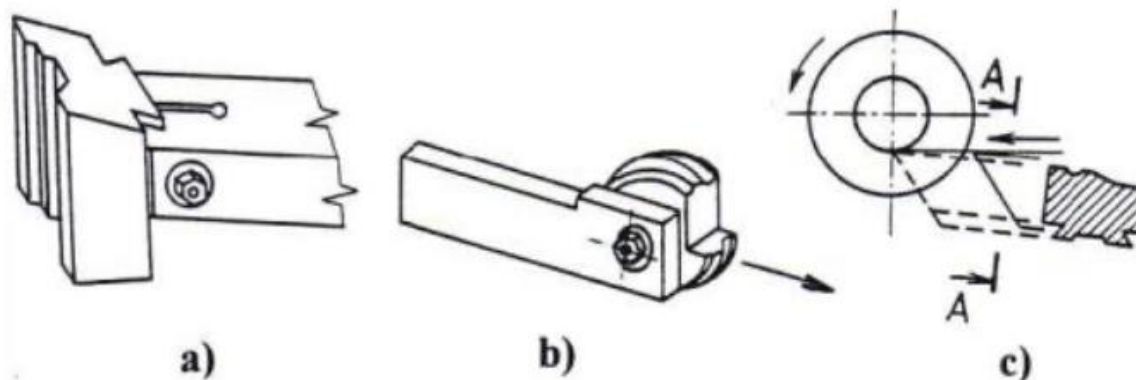
Nástroje pro soustružení se nazývají soustružnické nože. Vyrábí se v různých velikostech a tvarech. Velikost nože se určuje podle velikosti obrobku a druhu obráběcího stroje, na kterém bude provedeno obrábění. Tvar soustružnického nože nejvíce ovlivňuje funkce strojního obrábění. Hlavní částí soustružnického nože je hlava a tělo. Činnou částí je hlava, kterou se odebírá tříska z materiálu, tělo slouží k bezpečnému upnutí nástroje do stroje. Ostatní části jsou znázorněny na obr. 1.3 [4].



Obr. 1.3 Soustružnický nůž [5].

Soustružnické nástroje je možné dělit podle několika hledisek. Z technologického hlediska se soustružnické nože dělí na [3, 6]:

- radiální (nejpoužívanější),
- prizmatické,
- kotoučové,
- tangenciální.

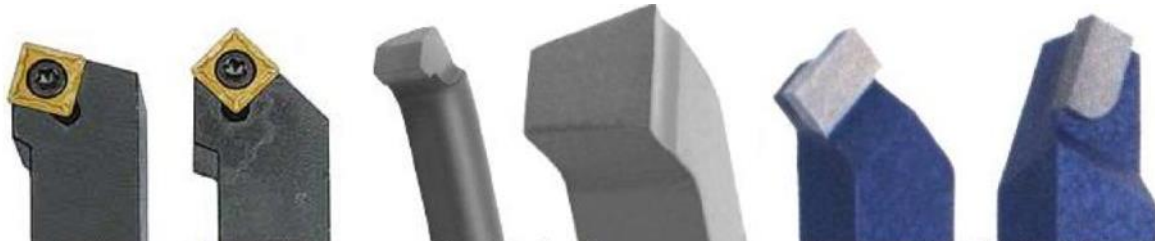


Obr. 1.4 Soustružnické nože: a) prizmatické, b) kotoučové, c) tangenciální [3].

Radiální soustružnické nože se dále dělí podle konstrukce na [6]:

- **monolitní** (celistvé) – celý nástroj je vyrobený z nástrojové rychlořezné oceli (HSS),
- **pájené** – lepené – pájí/lepí se pouze řezná část nástroje, která je většinou ze slinutého karbidu (SK),
- **VBD** (vyměnitelná břitová destička) – upínání VBD je za pomoci systému ISO v nožovém držáku z konstrukční oceli. Tento systém zaručuje jednoduché a rychlé vyměnění opotřebované břitové destičky.

Všechny soustružnické nože musí obsahovat Českou státní normu (ČSN) a lze je najít v dílenských tabulkách, popř. v katalogu nástrojů [3].

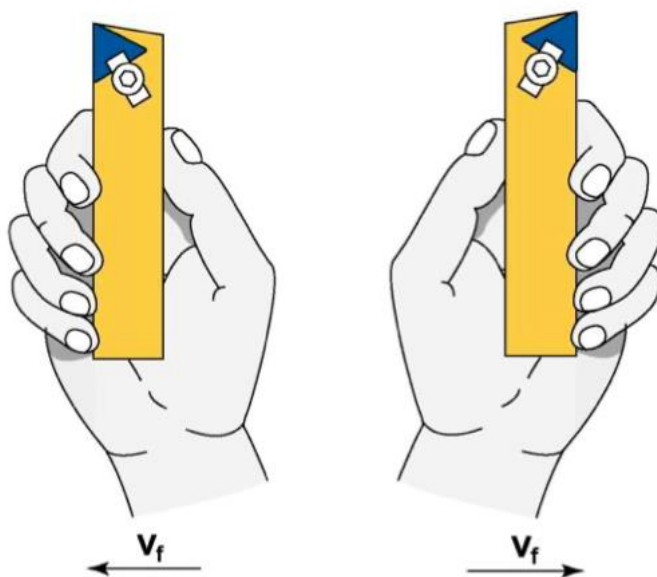


Obr. 1.5 Soustružnické nože zleva – nože s VBD, celistvé nože, nože s pájenými destičkami [5].

Další dělení radiálních nožů je:

Podle směru obrábění na [5]:

- pravé – nástroj se pohybuje od koníku k vřetenu stroje,
- levé – nástroj se pohybuje od vřetena stroje ke koníku.



Obr. 1.6 Pravý a levý soustružnický nůž [5].

Podle způsobu obrábění [5]:

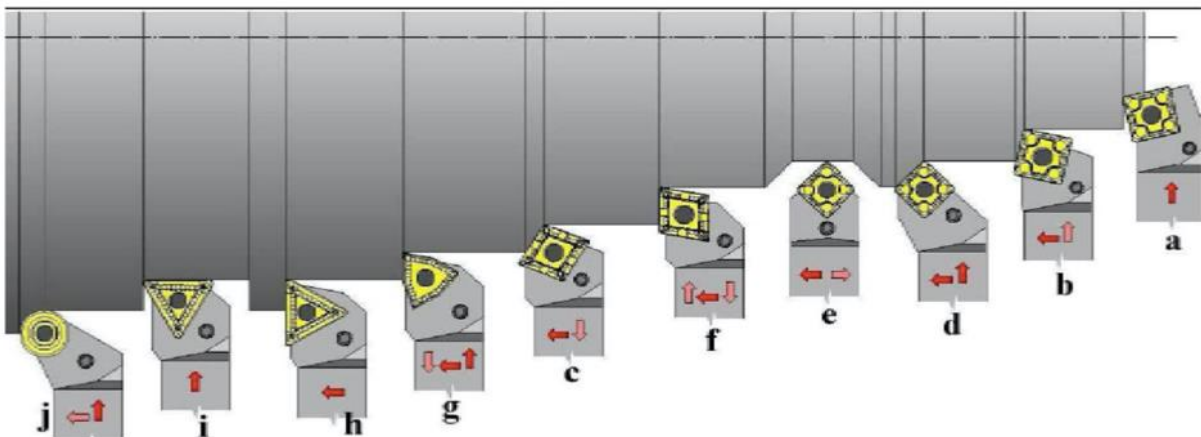
- obrábění vnějších ploch,
- obrábění vnitřních ploch.

Ty se dále mohou členit na nože [5]:

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

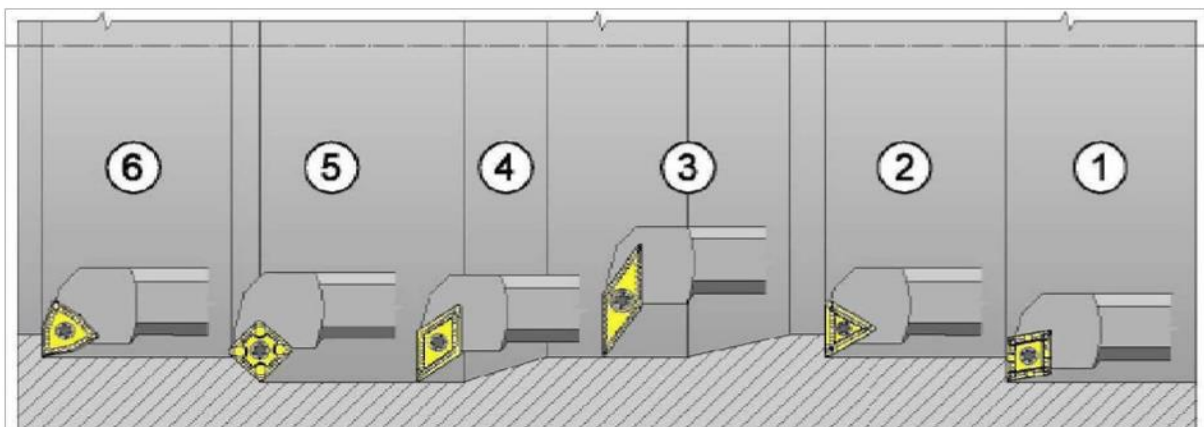
Podle tvaru tělesa nože [5]:

- přímé,
- ohnuté.



a) ubírací čelní nůž, b) ubírací nůž přímý, c) ubírací nůž přímý,
d) ubírací nůž ohnutý, e) ubírací nůž oboustranný, f) rohový nůž, g) rohový nůž, h) ubírací nůž
stranový, i) hladící nůž, j) rádiusový nůž

Obr. 1.7 Vnější soustružnické nože [6].



1) vnitřní ubírací, 2) vnitřní rohový, 3) vnitřní kopírovací,
4) vnitřní ubírací, 5) vnitřní ubírací, 6) vnitřní rohový

Obr. 1.8 Vnitřní soustružnické nože [6].

2 PRŮBĚH ŘEZNÝCH ZKOUŠEK

Cílem experimentu bylo zjistit a porovnat opotřebení na použitých VBD při obrábění konstrukční kalené oceli 100Cr6.

Během experimentu bylo postupně testováno celkem pět VBD – dvě pro dvě série přerušovaného řezu u matice s otvory, dvě pro dvě série nepřerušovaného řezu u trubky, poslední destička byla použita pro soustružení vzdálenosti 850 m jak pro přerušovaný řez (břit 1), tak pro nepřerušovaný řez (břit 2). Testování nepřerušovaných i přerušovaných řezů probíhalo po předem vypočítaných vzdálenostech. Každá destička urazila celkem 450 m, tento úsek byl rozdělen na úseky po 50 m, 2x100 m a 200 m.

Následné focení opotřebení VBD bylo prováděno na elektronovém mikroskopu zn. TESCAN. Silové působení na nástroji bylo během experimentu měřeno pro každou z uražených drah dynamometrem KISTLER typ 9257B, který byl propojen s počítačem. S využitím softwaru Dynoware byly vytvořeny grafy s průběhem silových složek F_i v závislosti na čase t . Ze získaných grafů byly dále vyvozeny závěry a další doporučení.

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

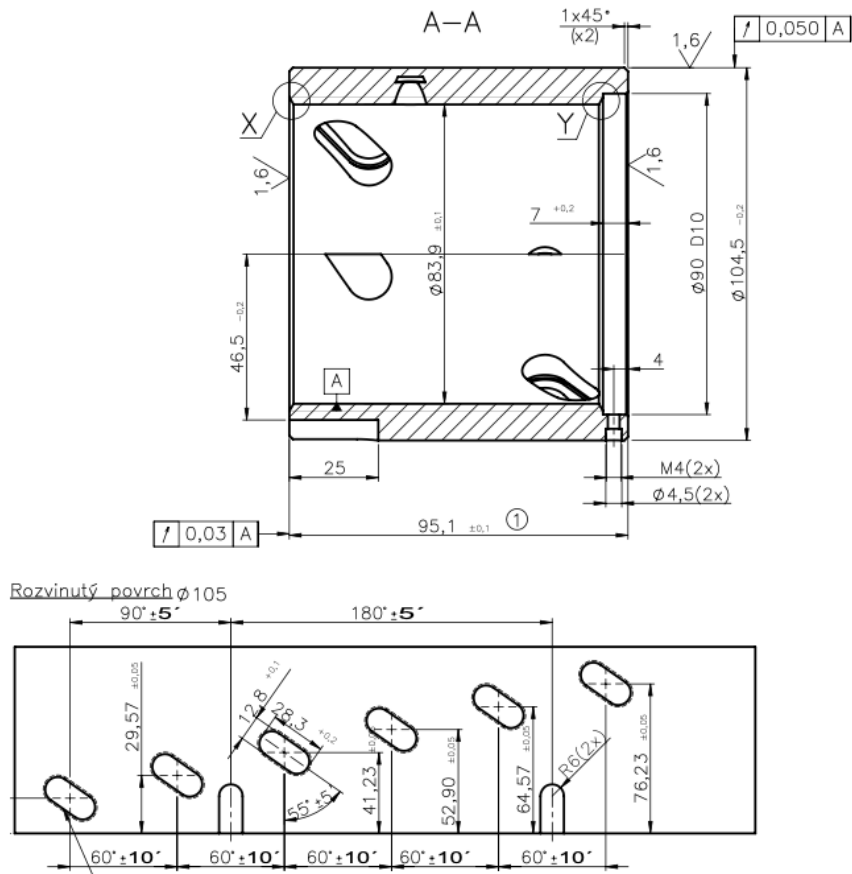
2.1 Materiál obrobku

Materiálem obrobku je podle dodavatele nízkolegovaná konstrukční chromová ocel k zušlechťování, označovaná jako 100Cr6 dle ČSN 41 4109. Obvykle se cementují, zušlechťují a kalí. Mezi hlavní využití patří výroba kuličkových ložisek. Pro testování VBD byly dodány celkem 2 ks matic. Jedna viz obr. 2.1 (příloha P1), druhý byl polotovar ve formě trubky o stejných rozměrech jako matice z obr. 2.1.

Dodané polotovary byly zkoumány rovněž pro ověření chemického složení materiálu, průběhu mikrotvrlosti a mikrostruktury napříč celým polotovarem. Pokud materiál nemá zaručené chemické složení, není zaručená ani požadovaná kvalita tepelného zpracování. Všechny tyto vlastnosti materiálu přispívají vysokou mírou k průběhu následného třískového obrábění. Dodané vzorky byly označeny 1A – matice bez otvoru, vzorek 2A – matice s otvory.

Analýza spočívala v provedení následujících experimentů:

- ověření chemického složení,
- metalografické analýzy mikrostruktury,
- měření mikrotvrlosti.



Obr. 2.1 Rozměry zkušební matice z materiálu 100Cr6.

2.1.1 Ověření chemického složení

Ověření chemického složení bylo provedeno na optickém emisním jiskrovém spektrometru TASMÁN Q4. Z obou vzorků byla odebrána jeho malá část za účelem provedení ověření chemického složení. Na odebraném vzorku bylo 5x měřeno chemické složení. V tab. 2.1 je uvedeno vzorové porovnání výsledků spektrální analýzy vzorku A1 a A2 s chemickým složením konstrukční oceli 100CrMnSi6-4 dle ČSN 41 4209.

Tab. 2.1 Chemické složení konstrukční oceli 100CrMnSi6-4 dle ČSN 41 4209 v porovnání se spektrální analýzou vzorku 1A [7].

Chemické složení	C	Mn	Si	Cr	P	S
Min. [hm. %]	0,90	0,90	0,35	1,30	-	-
Max. [hm. %]	1,10	1,20	0,65	1,65	0,027	0,030
Spektrální analýza vzorek 1A [hm. %]	0,983	1,15	0,559	1,478	0,014	0,0001

Tab. 2.2 Chemické složení konstrukční oceli 100Cr6 dle ČSN 41 4109 v porovnání se spektrální analýzou vzorku 2A [7].

Chemické složení	C	Mn	Si	Cr	P	S
Min. [hm. %]	0,90	0,30	0,15	1,30	-	-
Max. [hm. %]	1,10	0,50	0,35	1,65	0,027	0,030
Spektrální analýza vzorek 2A [hm. %]	0,560	0,488	0,378	1,598	0,023	0,0084

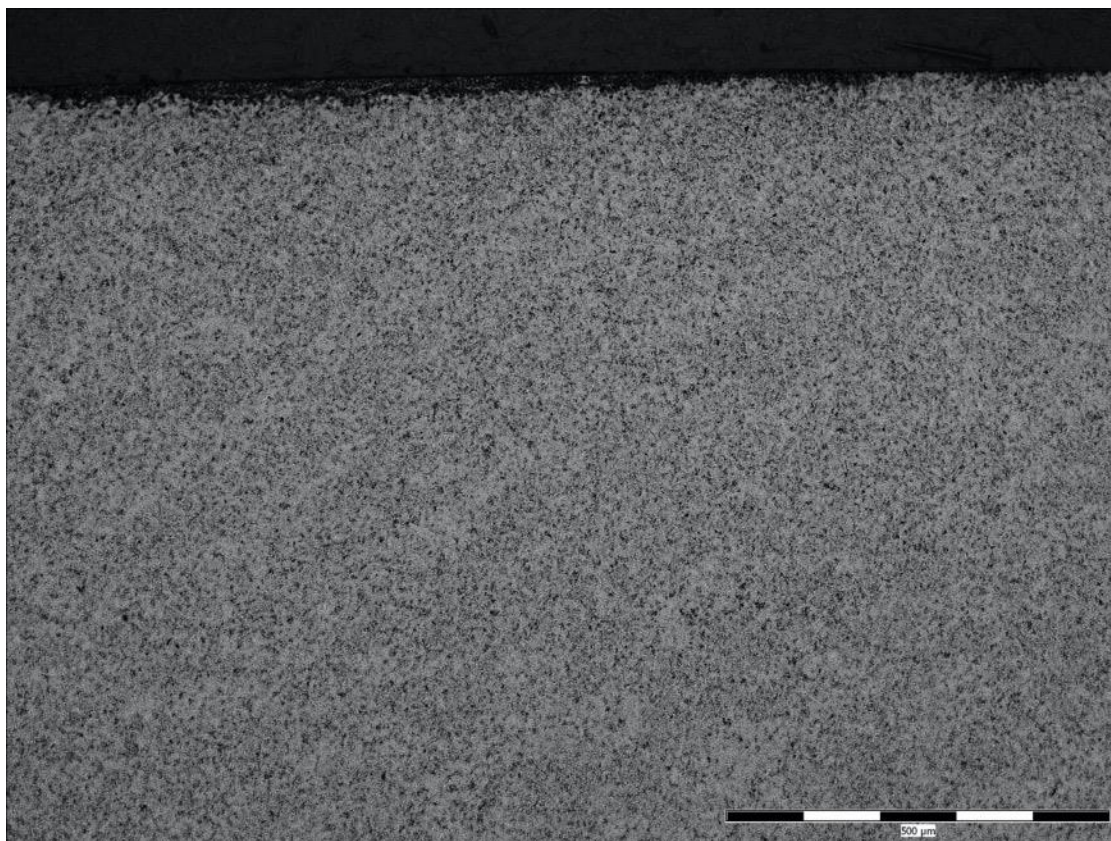
Při porovnání výsledků ze spektrální analýzy v tab. 2.1 a tab. 2.2 a hodnot z normy ČSN 41 4209, ČSN 41 4109 je zřejmé, že u vzorku A1 se opravdu jedná o ocel ČSN 41 4209 (100CrMnSi6-4). Vzorek A2 neodpovídal deklarovanému chemickému složení, protože měl poloviční hodnotu uhlíku. Pokud se následně provádělo tepelné zpracování pro ocel 14 209 s obsahem uhlíku 1 %, mohla z toho vyjít zcela jiná struktura, než byla požadována. Naměřené hodnoty ukazují, že byly dodány dvě odlišné oceli. U vzorku A1 se jedná o ocel ČSN 41 4209 (100CrMnSi6-4). U vzorku A2 se jedná o ocel ČSN 41 4109 (100Cr6), avšak s jiným obsahem uhlíku.

2.1.2 Metalografické pozorování struktury

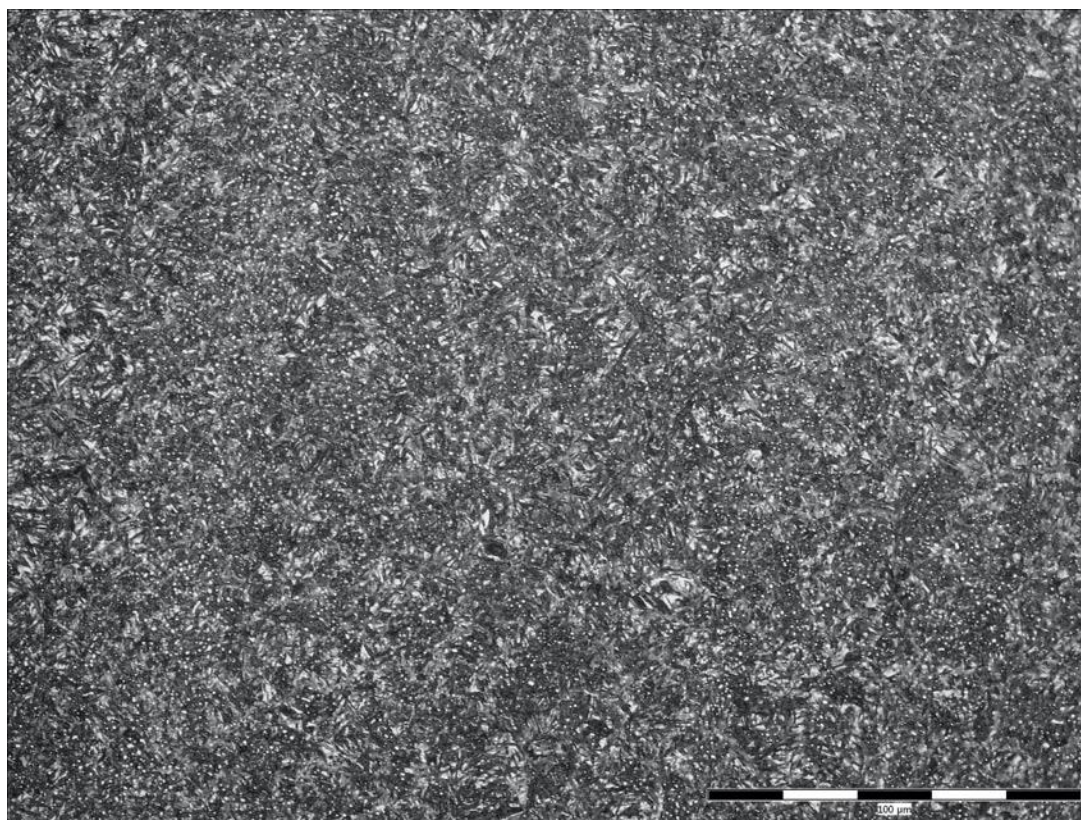
Dodané vzorky byly rozřezány na metalografické kotoučové pile LECO VIPER – 300M2. Části vzniklé oddělením z jednotlivých vzorků byly zalisovány za tepla do lisovací hmoty STRUERS ISOFAST na metalografickém lisu LECO RR-4X při tlaku lisu 2600 kPa. Lisování probíhalo po dobu 4 minut při teplotě 180 °C. Následně byly jednotlivé vzorky označeny a jejich povrch byl broušen a leštěn na metalografické brusce PX500A LECO. K broušení byly použity brusné papíry firmy Hermes o zrnitosti 80, 120, 240, 400, 600, 1000 a 2000. Leštění vzorků probíhalo na brusném plátně LECO BROWN TECHNOTRON byla při něm použita diamantová pasta LECO PREMIUM GRADE s velikostí diamantových částí 3 μm a 1 μm.

Poslední fází bylo očištění vzorků ultrazvukem v přístroji POLSONIC – 2 a následně byla vyvolána mikrostruktura povrchu. Vzorky byly leptány v roztoku NITAL 5 %. Pozorování mikrostruktury bylo provedeno na invertovaném metalografickém mikroskopu Olympus GX 51.

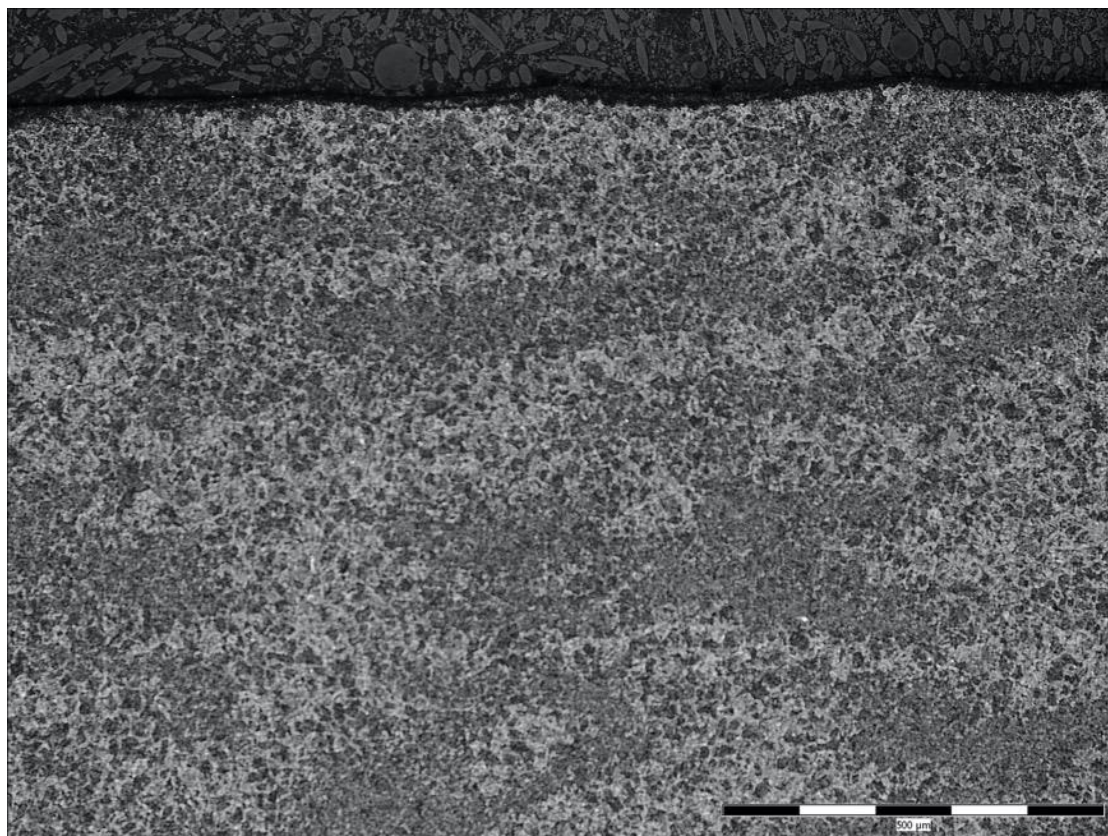
Na obr. 2.2. až obr. 2.5. lze vidět mikrostrukturu povrchové části vzorků 1A a 2A. Vzorky byly foceny se zvětšením 100x a 500x. Při zvětšení 500x je na fotkách jasně vidět mikrostruktura každého vzorku a jsou zde jasně patrné rozdíly mezi materiály.



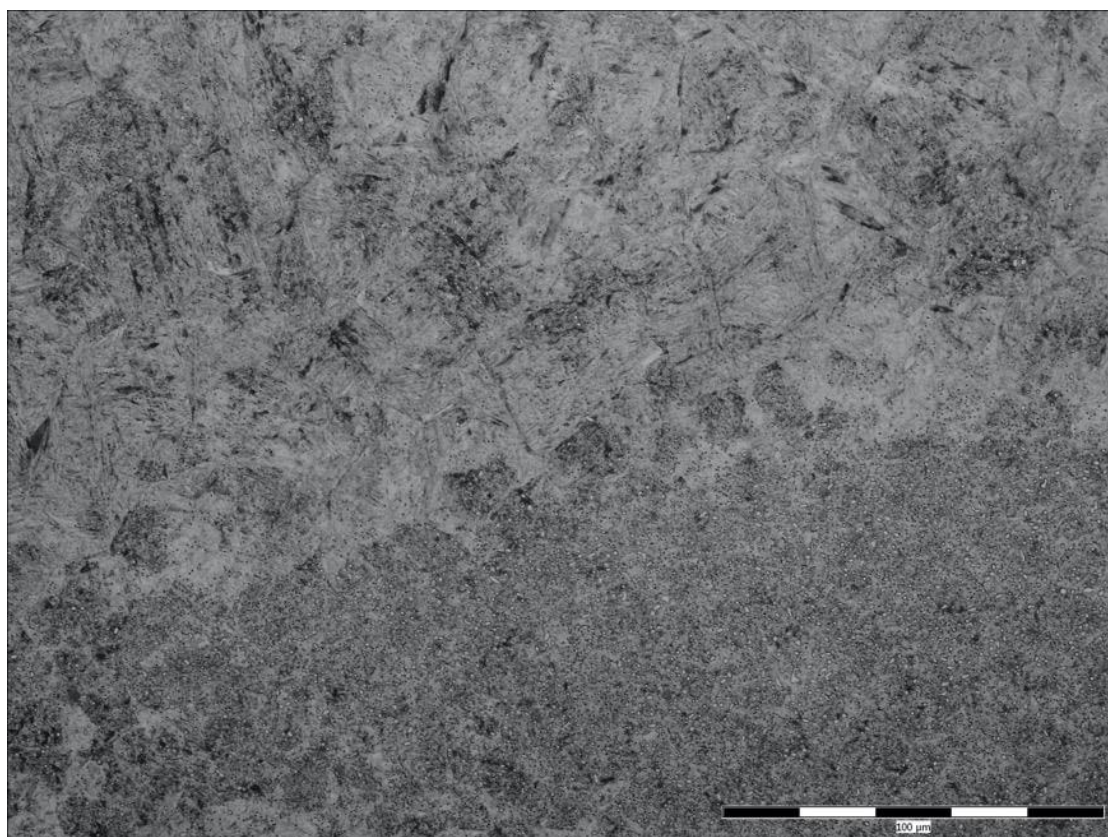
Obr. 2.2 Mikrostruktura povrchové části vzorku 1A zvětšeno 100x.



Obr. 2.3 Mikrostruktura povrchové části vzorku 1A zvětšeno 500x.



Obr. 2.4 Mikrostruktura povrchové části vzorku 2A zvětšeno 100x.

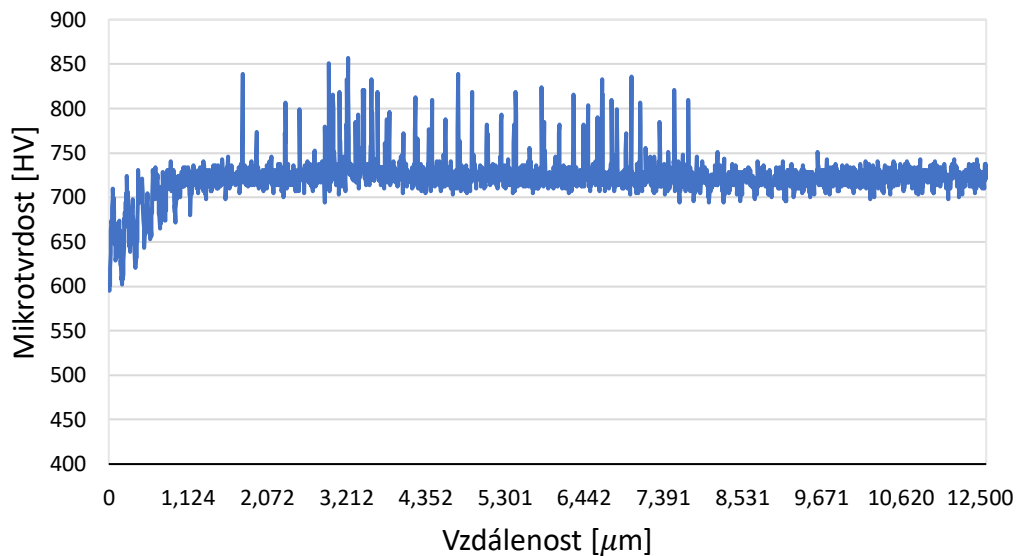


Obr. 2.5 Mikrostruktura povrchové části vzorku 2A zvětšeno 500x.

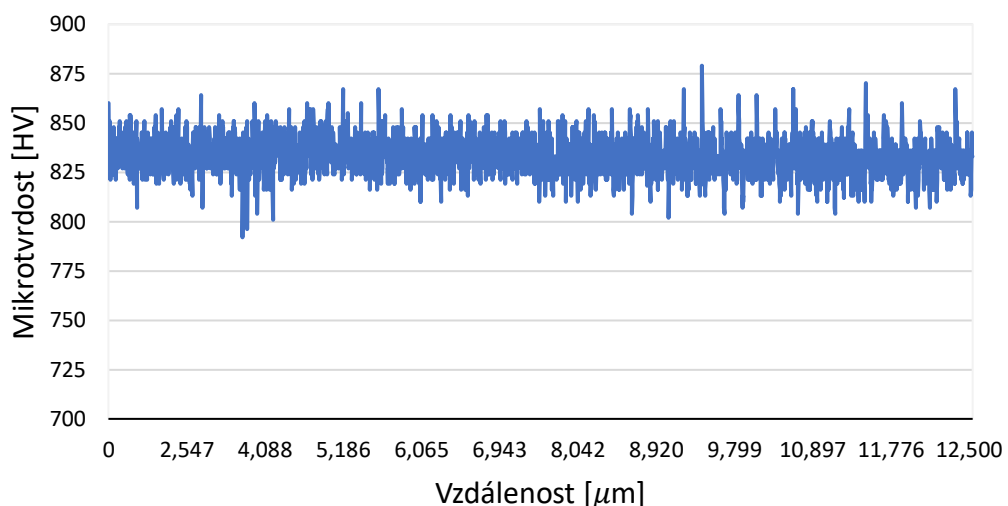
Z metalografického pozorování je patrné, že u obou vzorků se vyskytuje odlišná mikrostruktura. U vzorku 1A je mikrostruktura tvořena popuštěným martenzitem s rovnoměrně rozloženými karbidickými částicemi. U vzorku 2A je mikrostruktura tvořena 2 strukturálními složkami. Bílé oblasti jsou tvořeny strukturou hrubého martenzitu, tmavá oblast je tvořena strukturou sorbitu. Přechod mezi těmito oblastmi je vidět na obr. 2.5.

2.1.3 Měření mikrotvrdomosti

Na vzorcích byly měřeny mapy mikrotvrdomosti, aby se ověřilo, že mikrostruktura je v objemu celého vzorku stejná. Mikrotvrdomost byla měřena na automatizovaném mikrotvrdoměru LECO AMH 55. Pro experiment byla použita metoda dle Vickerse. Zatížení indentoru bylo 500 gramů, prodleva při zatížení 10 s. Vzdálenost mezi vtisky byla zvolena 190 μm a vzdálenost od okraje 120 μm .



Obr. 2.6 Grafická závislost mikrotvrdomosti na vzdálenosti vzorku 1A.



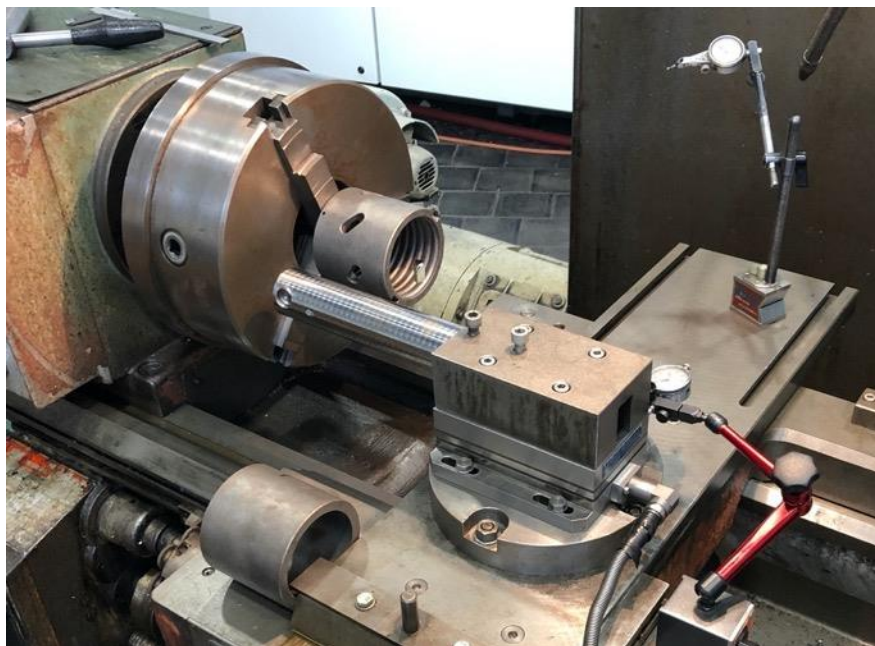
Obr. 2.7 Grafická závislost mikrotvrdomosti na vzdálenosti vzorku 2A.

Hodnoty ukazují, že vzorky 1A a 2A mají i rozdílnou mikrotvrdot. U vzorku 1A je mikrotvrdot rovnoměrně rozložená a dosahuje v průměru hodnot okolo 720 HV_{0,3} (62 HRC). Nižší hodnoty na kraji grafu jsou způsobeny tepelným ovlivněním materiálu během preparace vzorku. U vzorku 2A jsou hodnoty také rovnoměrně rozloženy, ale jejich průměrná hodnota je 830 HV_{0,3} (65 HRC). Při bližším pozorování není možné z tohoto měření určit rozdíl mezi oblastmi, které jsou patrné při metalografickém pozorování.

Závěrem lze konstatovat, že obráběné matice jsou ze dvou různých materiálů. Vzorek 1A je z oceli ČSN 41 4209. Vzorek 2A je z oceli ČSN 41 4109. Mezi další rozdíly patří i typ mikrostruktury u obou vzorků. Zatím co u vzorku 1A je struktura popuštěného martenzitu s rovnoměrně rozloženými karbidickými částicemi, u vzorku 2A je mikrostruktura složená ze dvou oblastí. Jedna oblast je tvořena hrubým martenzitem a druhá je tvořena popuštěným sorbitem. Z metalografické analýzy je patrné, že u tohoto vzorku došlo k chybě v tepelném zpracování, protože struktura není homogenní.

Při měření mikrotvrdoti se ukázalo že vzorek 1A má tvrdost 740 HV_{0,3} a vzorek 2A má tvrdost 850 HV_{0,3}.

Upnutí a připravení materiálu 100Cr6 k provedení řezných zkoušek pro přerušovaný řez je znázorněno na obr. 2.8.



Obr. 2.8 Ukázka upnutí obrobku vyrobeného z konstrukční oceli 100Cr6.

2.2 Obráběcí stroj

Pro zkoušky řezivosti byl použit univerzální hrotový soustruh SU 50 A/1500 s přidavným snímačem otáček, který je určen k přesnému soustružení obrobků střední velikosti v malosériové a kusové výrobě viz obr. 2.9. Umožňuje využití nástrojů se slinutými karbidy a řezání závitů ve velkém rozsahu stoupání. Pracovní vřeteno je poháněno dvěma elektromotory přes převodovku unášecí spojkou. Posuvy a závitů se nastavují pákami. V tab. 2.3 je seznam základních technických údajů stroje [3, 8].

Tab. 2.3 Technické údaje univerzálního hrotového soustruhu SU 50 A/1500 [8].

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. 2.9 Univerzální hrotový soustruh SU 50 A/1500.

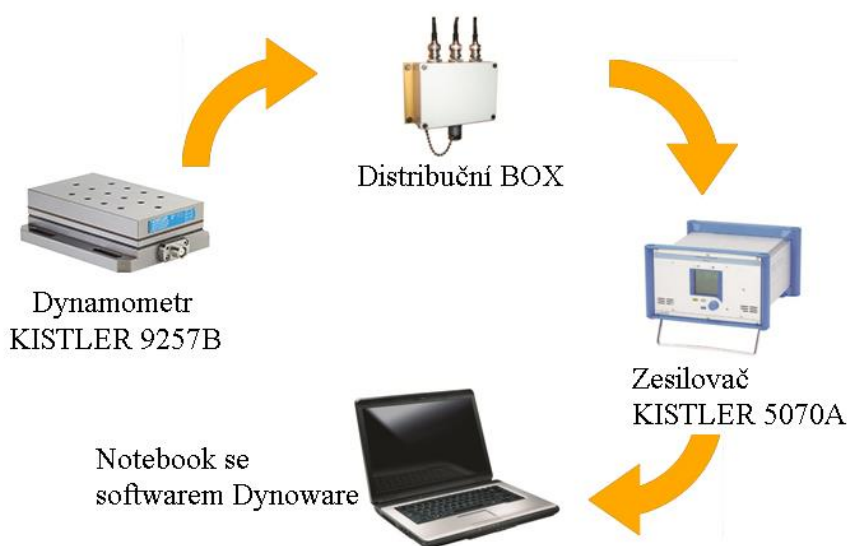
2.3 Použitá aparatura

V průběhu experimentu byl pro detailní focení opotřebení VBD použit elektronový mikroskop zn. TESCAN. Ten začal mít v průběhu zkoušek technické problémy, a proto musel být nahrazen jiným elektronovým mikroskopem TESCAN VEGA 3, který je znázorněn na obr. 2.10. Z tohoto důvodu jsou v této zprávě dva různé formáty fotografií.



Obr. 2.10 Elektronový mikroskop TESCAN VEGA 3 [9].

Při experimentální části byly během soustružení měřeny síly působící na nástroj. Pro tento účel byl využit dynamometr KISTLER typu 9257B, který byl umístěn na supportu pod nožovou hlavu. Při měření jde přenášený signál z dynamometru pomocí spojovacího kabelu do distribučního boxu, ze kterého jde signál dále do nábojového zesilovače KISTLER typu 5070A. Zesilovač je připojen na notebook, na kterém jsou zobrazena výsledná zatížení pomocí softwaru Dynoware. Celé schéma zapojení aparatury je na obr. 2.11.



Obr. 2.11 Schéma zapojení dynamometru [3].

Po dokončení každé série obráběcího procesu byla měřena střední aritmetická úchylka profilu Ra a výška nerovnosti profilu Rz. Pro toto měření byl použit ruční drsnoměr TR 100 Surface Roughness Tester, který je zobrazen na obr. 2.12. V tab. 2.4 jsou zpracovány základní parametry přístroje.



Obr. 2.12 Ruční drsnoměr TR 100 Surface Roughness Tester [3].

Tab. 2.4 Technické údaje TR 100 Surface Roughness Tester [10].

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	-

2.4 Řezné podmínky pro zkoušky řezivosti

Pro experiment byla určena řezná rychlost v_c , ze které se vypočítaly otáčky stroje. Při soustružení dochází ke zmenšování průměru obrobku a pokud stroj není schopen redukovat otáčky, je třeba je posupně korigovat. Při reálném testování se však nastavené otáčky v okamžiku doteku nástroje s obrobkem o nějakou zanedbatelnou část sníží. Proto je možné, že se skutečné otáčky od otáček teoretických mírně lišily. Pro zamezení házení byl obrobek

srovnán několika průjezdy, proto se začínalo na $\varnothing 103,5$ mm. Otáčky použité při experimentu zachycuje tab. 2.5. Výpočet pro obráběný průměr materiálu proběhl dle vztahu (2.1).

$$D_i = D_{i+1} - 2 \cdot a_p \text{ [mm]} \quad (2.1)$$

Vzorový výpočet pro 2. průjezd je uveden níže:

$$D_2 = 103,5 \text{ mm} - 2 \cdot 0,045 \text{ mm} = 103,410 \text{ mm}$$

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. 2.5 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	103,50	369,3	120	0,045	0,05
2	103,41	369,4	120	0,045	0,05
3	103,32	369,7	120	0,045	0,05
4	103,23	370,0	120	0,045	0,05

Otáčky v tab. 2.5 jsou vypočítány dle vztahu 2.2. Vzorový výpočet pro $\varnothing D = 103,5$ mm, je uveden níže:

$$n = \frac{1000 \cdot v_{cD}}{\pi \cdot D} \quad (2.2)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 120 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}}{\pi \cdot 103,5 \text{ mm}} = 369,3 \text{ min}^{-1}$$

2.5 Řezné nástroje pro zkoušky řezivosti

Od zadavatele bylo k řezným zkouškám dodáno celkem 5 ks řezných VBD s označením CBN VBGW 160408 HS-NC2 BNC300, povlakované z TiAlN. Karbidové destičky jsou vhodné pro dokončovací přerušované obrábění kalené oceli, mají vysokou lomovou odolnost a výborný oteřuvzdorný povlak. Destičky jsou kosočtvercového tvaru s úhlem 35°, úhlem hřbetu 5° a poloměrem zaoblení špičky 0,8 mm. Doporučená řezná rychlost $v_c = 100$ m/min (rozsah rychlostí může být 50 až 150 m/min), doporučený posuv na otáčku $f = 0,1$ mm. (0,03 až 0,2 mm.). Vybrané charakteristické hodnoty jsou v tab. 2.6.

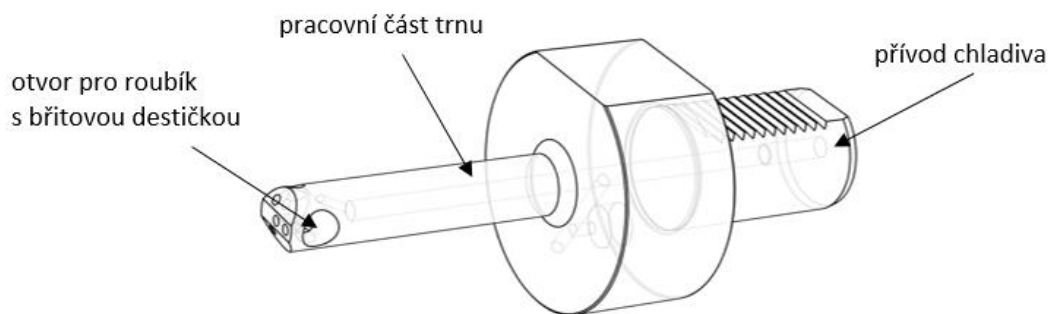


Obr. 2.13 Tvar použité VBD a její základní parametry.

Tab. 2.6 Charakteristické hodnoty BNC300. [11]

Třída obráběného materiálu	Pojivo	Obsah uhlíku [%]	Velikost zrna [μm]	Tvrдость HV [GPa]	TRS [GPa]
H	TiAlN	60–65	1	33–35	1,15–1,25

Pro zachování co nepřesnějších podmínek při obrábění bylo nutné vytvořit přípravek pro uchycení VBD. Zadavatel na svém obráběcím centru používá soustružnický trn viz obr. 2.14, do kterého je vložen roubík s VBD. Na obr. 2.15 je zobrazen přípravek (držák pro VDB) pro experiment na dílně FSI VUT v Brně. Přípravek měl být vyroben z konstrukční nízkolegované oceli třídy 15. Nakonec byl přípravek vyroben z materiálu 14 260.9 (54SiCr6), což je Si-Cr ocel na pružiny. Tato změna materiálu způsobila nemalé problémy, o kterých se dále píše v této zprávě.



Obr. 2.14 Soustružnický trn.



Obr. 2.15 Přípravek – držák pro VBD (soustružnický trn) vyrobený pro experiment.

2.6 Metody ke zjištění opotřebení nástroje

Opotřebení je běžným jevem u všech strojních součástí, které jsou navzájem v kontaktu a v relativním pohybu. Během procesu obrábění dochází k relativnímu pohybu a kontaktu mezi nástrojem a obrobkem, a to na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje. Dále je v kontaktu nástroj s třískou na čele nástroje [12].

Opotřebování nástroje je velice komplikovaný děj, který je ovlivňován několika faktory. Mezi hlavní faktory patří fyzikální a zejména mechanické vlastnosti materiálu obrobku a materiálu nástroje. Dále se tam řadí řezné prostředí, pracovní podmínky, druh obráběcí operace a další. V průběhu procesu opotřebení působí mnoho odlišných fyzicko-chemických jevů (mechanizmů opotřebení). Mezi základní mechanismy opotřebení patří [12]:

- abraze,
- difuze,
- plastická deformace,
- adheze,
- oxidace,
- křehký lom.

Ve strojírenství se lze setkat s mnoha experimentálními metodami, které vedou ke zjištění opotřebení nástroje. Vzhledem k velkému počtu těchto metod jsou níže popsány pouze vybrané metody, u kterých dochází nejčastěji k vyhodnocení [13]:

- opotřebení břitu nástroje,
- řezné síly,
- tepla a teploty řezu.

2.6.1 Přímé metody měření opotřebení

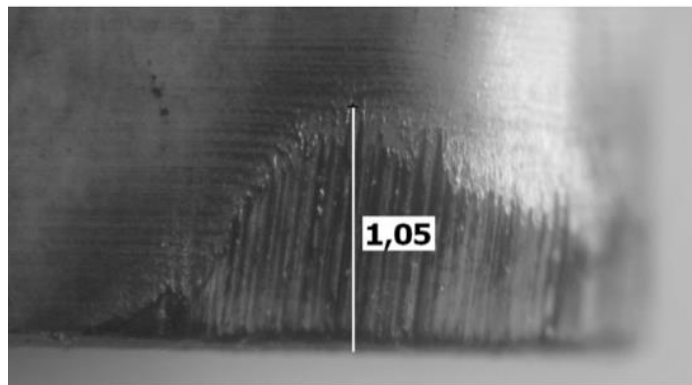
Přímé metody měření opotřebení jsou velice těžko aplikovatelné v praxi z důvodu nedostatečného prostoru pro měřicí přístroje v místě otupující se plochy. Je tedy nutné obráběcí proces přerušit, což ale ovlivní charakter otupení břitu v dalších fázích experimentu. Většina přímých metod měření se provádí z nožového držáku, který následně přináší změnu podmínek obrábění. Některé z přímých metod jsou popsány níže [3,13].

2.6.1.1 Váhová metoda

Při této metodě se jako míra opotřebení bere váhový úbytek hmotnosti VBD. Nevýhoda této metody je v nemožnosti využití přímo během obrábění. Vytvoření nárůstku na břitu také znemožňuje přesné určení hmotnostního rozdílu. Výhodou však zůstává poměrně vysoká přesnost, kdy váhový rozdíl určuje míru opotřebení nástroje. Tato metoda se používá výhradně u nástrojů s VBD [13].

2.6.1.2 Mikrometrická metoda

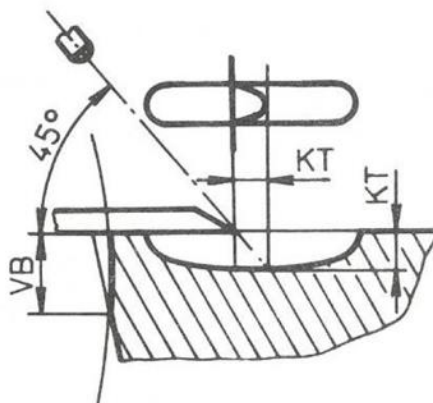
U této metody je využíván dílenský mikroskop s křížovým stolem. Míra opotřebení břitu se určuje přímým měřením lineárních rozměrů. Je také možné využít on-line softwaru, které dokáží přepočítat hodnotu opotřebení z daného zvětšení a optického výstupu (obr. 2.16) [13].



Obr. 2.16 Měření opotřebení na hřbetě VB pomocí software IMPOR [13].

2.6.1.3 Optická metoda

Jedná se o diskontinuální metodu také nazývanou stínová metoda. Slouží k určení hloubky žlábků v čele břitové destičky. Měření probíhá sledováním nasvětleného hřbetu nebo čela nástroje digitální kamerou přes objektiv. Paprsek světla musí svírat se hřbetem nebo čelem nástroje 45° , poté se určí vzdálenost tečny ke stínu, která odpovídá hloubce žlábků KT (obr. 2.17) [13].



Obr. 2.17 Schéma měření stínovou metodou [14].

2.6.2 Nepřímé metody měření

Všechny nepřímé metody se řadí mezi kontinuální. Pro vyhodnocení opotřebenosti břitu je využívána hodnota, která má určitý vztah k požadované veličině, ale dle své definice s ní přímo nesouvisí. Všechny tyto metody jsou pouze přibližné. Některé z nepřímých metod jsou popsány v následujících podkapitolách [3].

2.6.2.1 Optická metoda

Použití optické metody se může jevit jako slibné, ale spolehlivost při praktickém použití může způsobit nemalé problémy. Metody jsou založeny na odrazu určitého množství světelného paprsku, který dopadá na špičku břítové destičky. Charakteristika odraženého paprsku ukazuje stav opotřebenosti nástroje. Tato metoda se využívá převážně u technologie frézování a broušení. Pro technologii soustružení je využíváno speciálních kamer, které se postaví před testovací plochy nástroje. Výsledný obraz je dále analyzován pomocí mikroprocesoru a poskytuje informaci o velikosti opotřebenosti [15].

2.6.2.2 Měření řezných sil a kroučícího momentu

Měření jednotlivých složek řezných sil patří k nejrozsáhlejším nepřímým metodám pro zjištění míry opotřebenosti řezného nástroje. Během procesu obrábění dochází k postupnému opotřebenosti řezného nástroje a tím dochází ke zvyšování jednotlivých složek řezné síly. Hlavním smyslem měření je deformace v soustavě stroj – nástroj – obrobek. Měření jednotlivých složek procesu obrábění (řezné síly, řezného odporu a kroučícího momentu) je prováděné pomocí dynamometru. Měření dynamometrem je jedna z nejrozsáhlejších metod měření opotřebenosti břitu nástroje ve strojírenství [13, 16].

Dynamometr je zařízení, které je využíváno k měření řezných sil a odporů. Musí zaručit nezávislost měřené veličiny v závislosti na provozních podmínkách stroje. Dále je požadována od dynamometru možnost nastavení potřebného měřicího rozsahu s maximální přesností. Základní požadavky na dynamometr jsou pak následující [16]:

- **Citlivost dynamometru** – nejmenší odečítaná hodnota při dané přesnosti odpovídá celkové hodnotě měřené veličiny.
- **Tuhost dynamometru** – určuje jí velikost zatěžující síly, která působí na deformaci. Toto je zásadní požadavek při dynamickém měření.
- **Stálost údajů** – závisí na citlivosti, tuhosti a přesnosti zařízení.
- **Konstrukce dynamometru** – zajišťuje vzájemnou neovlivnitelnost jednotlivých složek sil.

Rozdělení dynamometrů lze provést podle následujících kritérií:

- Podle počtu měřených složek řezných sil – jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření kroučících momentů.
- Podle metody obrábění – pro soustružení, frézování, broušení, vrtání apod.
- Podle aplikované měřicí metody – dynamometry mechanické, pneumatické, hydraulické, elektrické, optické atd.

Mezi další metody měření řezných sil patří měření tenzometrem, který je umístěn v místech, kde jsou ložiska posuvných šroubů stroje. Dále je to metoda s využitím wattmetru nebo lze měřit průtok elektrické energie strojem [17].

2.6.3 Elektrické dynamometry

Jedná se nejrozšířenější typ dynamometrů v technické praxi. Jejich hlavní přednosti jsou využití miniaturních měřicích součástí, snadný přenos signálu, čistota provozu a snadná dostupnost napájecích zdrojů, snímání signálů u rotujících a pohybujících se součástí.

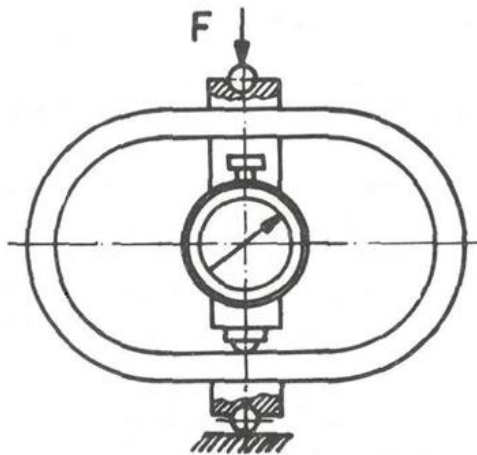
Dle způsobu přenosu mechanicko-elektrické transformace lze rozdělit elektrické dynamometry na dva základní systémy [16].

1. Systémy parametrické – jsou založeny na změně parametrů elektrického obvodu (indukčnost L, kapacita C, odpor R).
2. Systémy generátorové – při deformaci elementů dochází ke vzniku proudu nebo napětí.

Mezi elektrickými dynamometry mají své zastoupení také dynamometry indukční a piezoelektrické [3, 17].

2.6.4 Mechanické dynamometry

Mechanické dynamometry se užívají zejména k cejchování jiných dynamometrů. Je to z důvodu vyloučení nežádoucích vedlejších vlivů a z důvodu naprosto lineárního vztahu mezi sledovanou silou a vlastními naměřenými údaji. Mechanické dynamometry využívají přenos působící síly přímo nebo mechanicky znásobené na měřicí prvek (číselníkový úchylkoměr). Deformace silových pružin, třmenů, nosníků případně hloubka vtlačené kuličky do materiálu o známé tvrdosti ukazuje velikost síly (viz obr. 2.18). Výhodou mechanických dynamometrů je jejich jednoduchost, spolehlivost a vyznačují se přesností 0,5 až 2 % [16, 18].



Obr. 2.18 Mechanický dynamometr prstencový [18].

2.6.5 Pneumatické dynamometry

Pneumatické dynamometry jsou založené na principu využití pružného členu. Snímač deformace pneumatického systému klapka – tryska využívá dynamických vlastností vzduchu procházejícího malým otvorem. Velikost zatěžující síly se určí z rozdílu výšky hladiny kapaliny v zařízení. Výhody a nevýhody tohoto dynamometru jsou podobné jako u dynamometru mechanického [3].

2.6.6 Hydraulické dynamometry

Problémy se zajištěním těsnosti soustavy a nízká přesnost při malých silách je důvodem nízkého využití hydraulických dynamometrů v technické praxi. Využití těchto dynamometrů je například při měření zatížení svazku lan na ukotvení zavěšených mostů [3].

2.6.7 Piezometrické dynamometry

Princip použití snímání deformace spočívá ve využití piezoelektrického jevu, který je popisován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Mezi nejvíce využívané piezoelektrické materiály patří především křemen, materiály na bázi titaničitanu barnatého, Seignettovy soli a další. Základní částí piezoelektrického snímače je vhodně vyříznutá měřicí destička z příslušného krystalu. Velikost náboje je přímo úměrná zatěžující síle a s poklesem síly se lineárně snižuje. Při nulovém zatížení zcela vymizí. V dnešní době jsou pro technologii obrábění speciálně vyrobené piezoelektrické dynamometry KISTLER [16].

Na obr. 2.19 jsou znázorněny některé typy piezoelektrických dynamometrů od firmy KISTLER. Dynamometr KISTLER typ 9257B byl použit při experimentu v praktické části práce k určování silového zatížení.



Obr. 2.19 Dynamometry KISTLER – zleva typ 9272, typ 9257B, typ 9129A [19].

2.7 Měření drsnosti povrchu

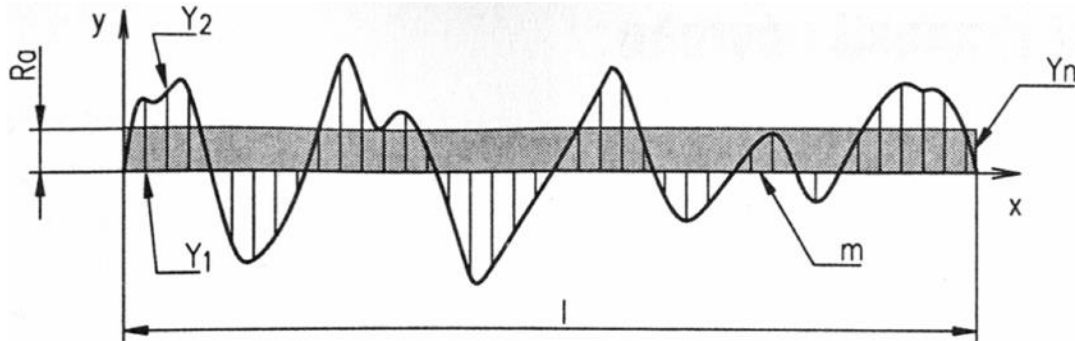
Drsnost povrchu vysokou mírou ovlivňuje životnost a spolehlivost všech provozních součástí, jako je například hlučnost, přesnost chodu, ztráty třením atd. Proto je důležité drsnost povrchu funkčních ploch kontrolovat a vyhodnocovat naměřené hodnoty. Kontroly se provádí z důvodů odhalení nepřesnosti výroby (neshodných kusů) a především k jejímu předcházení [20].

V technické dokumentaci je uvedena požadovaná drsnost povrchu. Skutečný povrch však obsahuje jisté nerovnosti, které vznikly v důsledku plastické deformace díky mechanickému a tepelnému působení. Dochází ke změně povrchové vrstvy, a tím i ke změně makro a mikro trhlin povrchu [3].

Na výslednou hodnotu drsnosti povrchu má velký vliv technologie výroby povrchu. Při obrábění dochází k opotřebování nástroje a tím dochází ke zhoršování kvality obrobenej plochy. Nové obráběcí stroje disponují funkcí, kde předem stanovený nárůst opotřebení značí potřebu výměny rezného nástroje za nový [20].

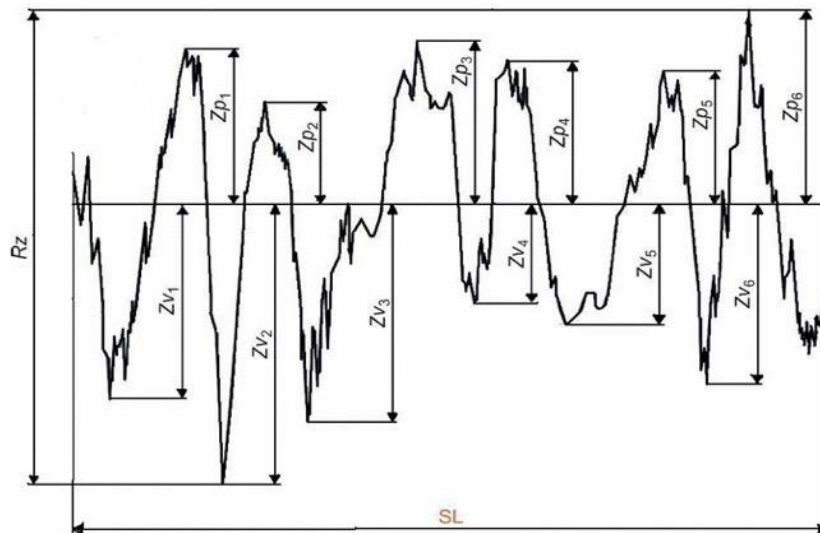
Při experimentu byla průběžně měřena drsnost obrobenej plochy pomocí dílenského ručního drsnoměru TR 100 Surface Roughness Tester, který měří aritmetickou úchylku profilu Ra a výšku nerovnosti profilu Rz, která je určena 10-ti body.

Ra – aritmetický průměr absolutních hodnot filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř základní délky [21].



Obr. 2.20 Metodika měření drsnosti povrchu Ra [20].

Rz – je střední vzdálenost mezi pěti nejvyššími a pěti nejnižšími body zjištěného profilu od jeho střední čáry v délce měřeného úseku. Orientačně lze tuto hodnotu určit jako čtyřnásobně Ra. Parametr odpovídá střední hloubce drsnosti dle DIN 4762 [22].



Obr. 2.21 Metodika měření drsnosti povrchu Rz [22].

2.8 Silové působení

Průběh silového zatížení byl měřen za pomoci dynamometru KISTLER typu 9257B na již zmíněných drahách (50 m, 2x 100 m, 200 m). Pro co největší přesnost ujeté dráhy a plynulé najetí a vyjetí VBD z řezu byly provedeny před samotným testováním zápichy do materiálu obrobku. První zápich byl proveden ve vzdálenosti 7,65 mm od začátku obrobku, další byl vyroben ve vzdálenosti 15,3 mm od prvního zápichu a poslední pak ve vzdálenosti 30,6 mm od zápichu č. 2. Vzdálenost 7,65 mm odpovídá ujeté dráze 50 m (15,3 mm dráze 100 m, 30,6 mm dráze 200 m). 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, tak jak je uvedeno v kap. 1.2 (řezné síly F_c , pasivní síly F_p a posuvové síly F_f) a tato data byla exportována do tabulkového editoru MS Excel. Pomocí těchto složek byla vypočítána celková řezná síla F dle vztahu 1.6.

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.

Po skončení každé série testování byla provedena analýza vlastností obrobené plochy a byla měřena drsnost povrchu Ra a Rz. Pro potvrzení údajů bylo provedeno několik měření vždy od sebe pootočených o několik stupňů.

3 VYHODNOCENÍ ŘEZNÝCH ZKOUŠEK

Pro vyhodnocení experimentu bylo nutné zpracovat data, která byla v průběhu zkoušek nasbírána. Pro lepší orientaci v datech bylo zavedeno následující značení dat.

- xP_50m – přerušovaný řez, dráha 50 m,
- xP_150m – přerušovaný řez, dráha 150 m,
- xP_250m – přerušovaný řez, dráha 250 m,
- xP_450m – přerušovaný řez, dráha 450 m.

- xN_50m – nepřerušovaný řez, dráha 50 m,
- xN_150m – nepřerušovaný řez, dráha 150 m,
- xN_250m – nepřerušovaný řez, dráha 250 m,
- xN_450m – nepřerušovaný řez, dráha 450 m.

- P_850m – přerušovaný řez, dráha 850 m,
- N_850m – nepřerušovaný řez, dráha 850 m.

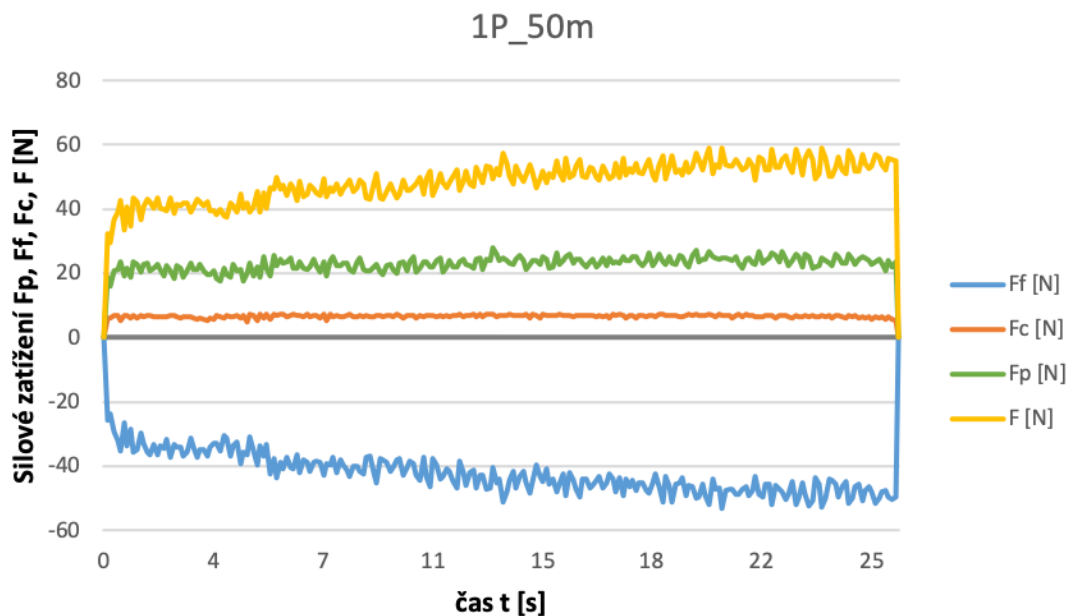
x – (1, 2) – číslo série.

3.1 První série testování

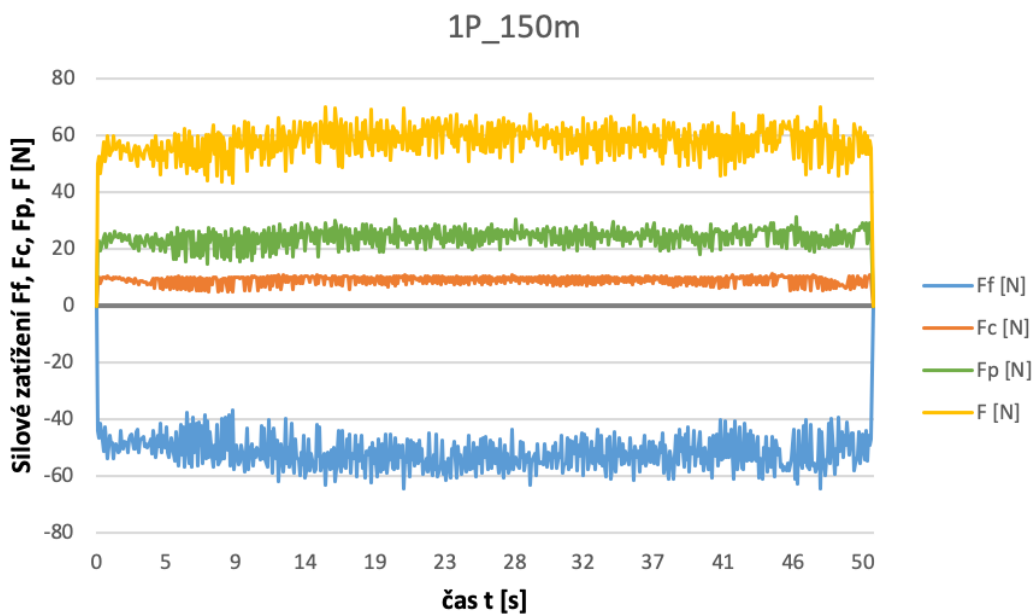
Dle výše zmíněného byly v průběhu experimentu provedeny celkem dvě série testování z důvodu ověření správnosti dat a eliminace anomálií v naměřených datech. V této kapitole bude komplexní zhodnocení všech nasbíraných dat z první série. Vyhodnoceno bude silové zatížení, drsnost obrobeného povrchu a vizuální opotřebení bříty. Vyhodnocení bude provedeno pro přerušovaný i nepřerušovaný řez.

3.1.1 Silové zatížení pro přerušovaný řez – série 1

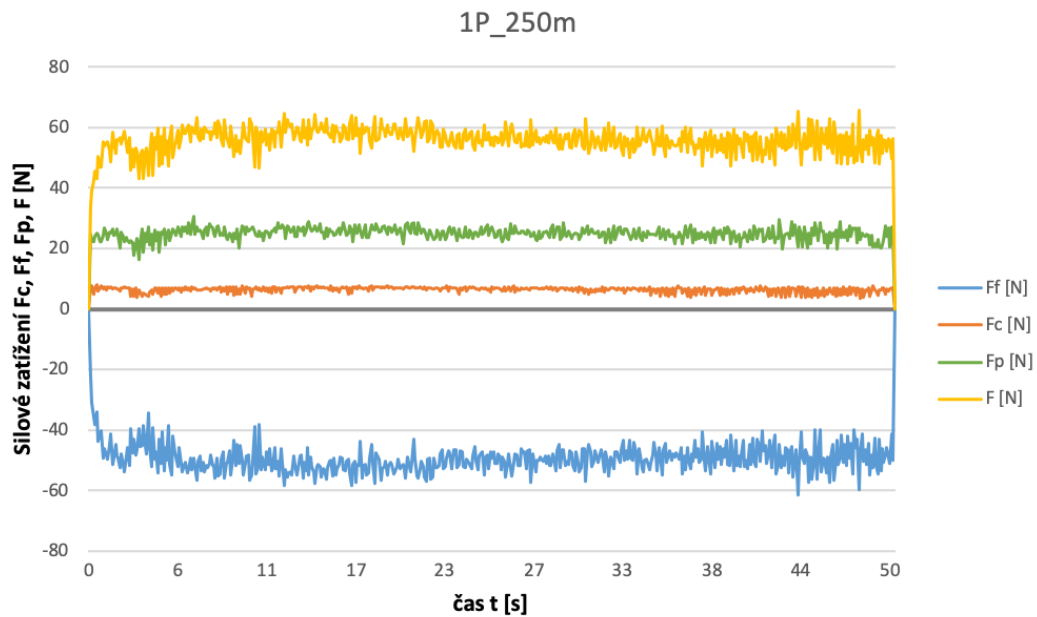
Na obr. 3.1 až obr. 3.4 lze sledovat grafickou závislost silového zatížení na čase pro dráhu 50 až 450 m při přerušovaném řezu.



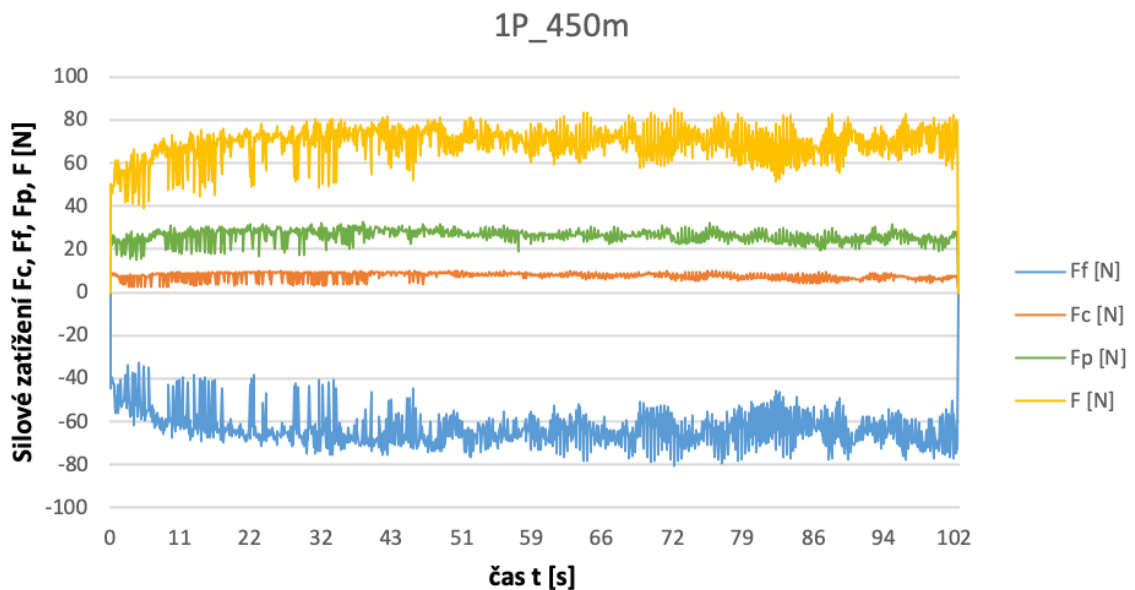
Obr. 3.1 Grafická závislost silového zatížení – přerušovaný řez na dráze 0 m až 50 m.



Obr. 3.2 Grafická závislost silového zatížení – přerušovaný řez na dráze 50 m až 150 m.



Obr. 3.3 Grafická závislost silového zatížení – přerušovaný řez na dráze 150 m až 250 m.



Obr. 3.4 Grafická závislost silového zatížení – přerušovaný řez na dráze 250 m až 450 m.

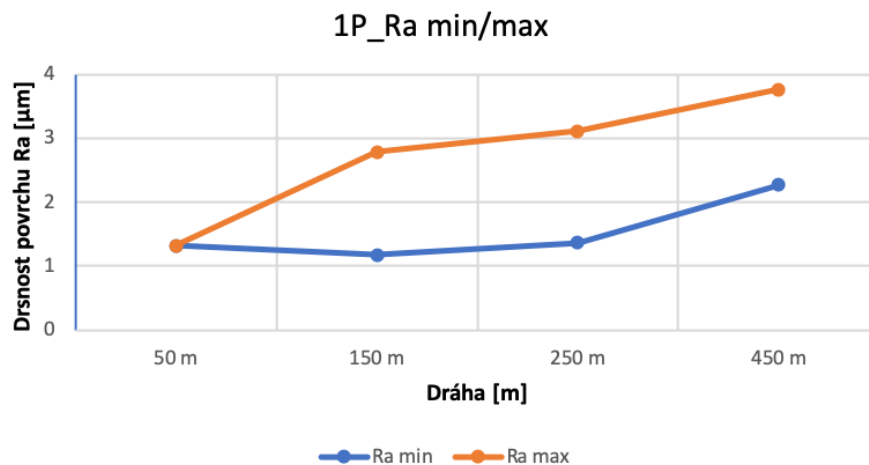
V grafické závislosti na obr. 3.1 lze vidět prvotní nárůst výsledné síly F , který vznikl vniknutím VBD do materiálu obrobku a „prvotním“ opotřebením břitu. Lze zde také sledovat postupné zvyšování výsledné síly F , která dále navazuje na obr. 3.2. Z důvodů velkého množství vibrační způsobeného značným vysunutím nástroje a přerušovaným řezem, není možné přesně určit velikost výsledné síly. Z obr. 3.2 je zřejmé, že výsledná síla F se pohybuje kolem hodnoty cca 60 N. Na tuto hodnotu navazuje grafická závislost na obr. 3.3. Zde dochází k mírnému poklesu a následnému růstu výsledné síly F . Výsledná síla F se pohybuje kolem hodnoty cca 60 N. Na obr. 3.4 je konečná část 200 m, kde je již patrný nárůst výsledné síly F až na hodnotu přes cca 80 N. Tento nárůst může naznačovat vznikající opotřebením VBD, ale bez dalšího měření není možné určit, o jak závažné opotřebením břitu jde.

3.1.2 Drsnost povrchu pro přerušovaný řez – série 1

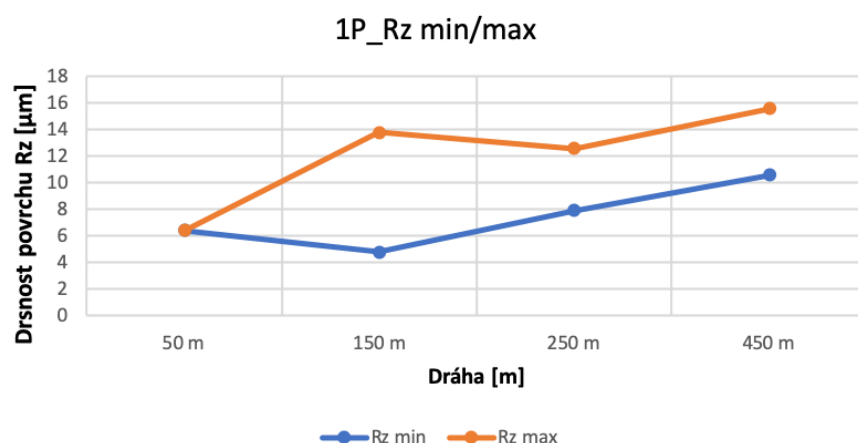
Po dokončení obrábění každého úseku bylo provedeno měření střední aritmetické úchytky profilu Ra a výšky nerovností profilu Rz. Tyto hodnoty zpracovává tab. 3.1 a jsou vyneseny v grafické závislosti na uražené dráze VBD viz obr. 3.5 a obr. 3.6.

Tab. 3.1 Hodnoty Ra a Rz pro VBD_1P.

Drsnost/Vzdálenost	50 m	150 m	250 m	450 m
Ra [μm]	1,32	$\frac{1,17}{2,78}$	$\frac{1,36}{3,11}$	$\frac{2,27}{3,76}$
Rz [μm]	6,40	$\frac{4,8}{13,8}$	$\frac{7,9}{12,6}$	$\frac{10,6}{15,6}$



Obr. 3.5 Grafická závislost Ra na dráze uražené VBD_1P.



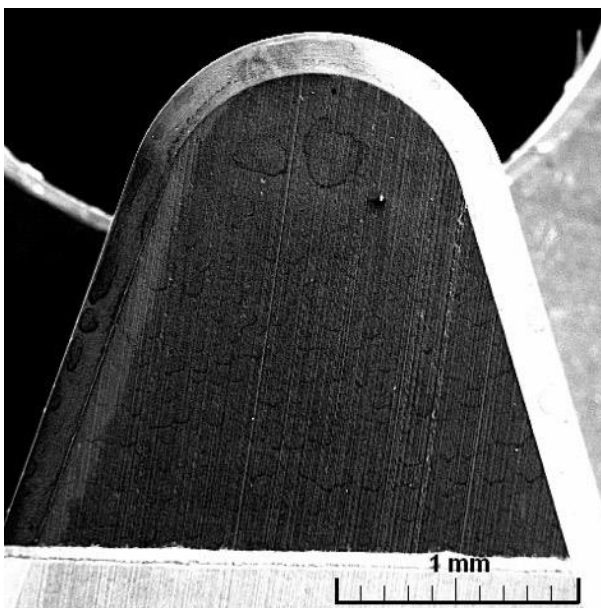
Obr. 3.6 Grafická závislost Rz na dráze uražené VBD_1P.

Hodnoty drsnosti byly měřeny na obráběném úseku minimálně 4x, pootočené od sebe o 90°. V tab. 3.1 lze vidět (kromě sloupce 50 m) vždy dvě hodnoty, což je zapříčiněno tím,

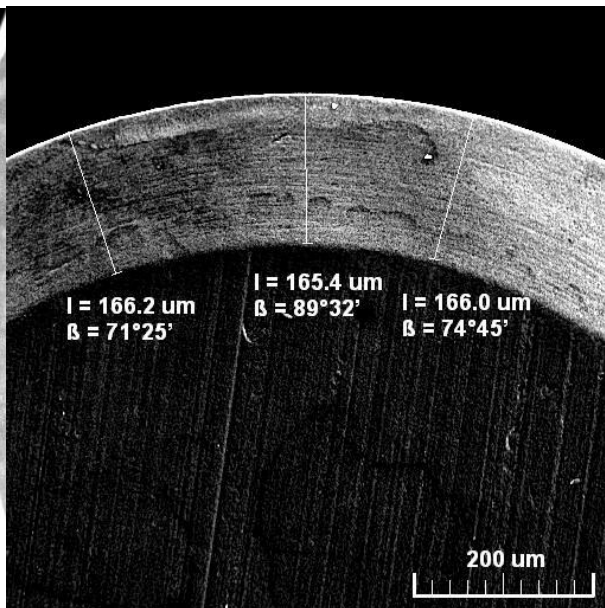
že zhruba po 180° byla znatelně jiná drsnost (bylo nutné tuto skutečnost zaznamenat). Z obr. 3.5 a obr. 3.6 lze vidět vzrůstající rozdíl mezi 50 m a 450 m. Možná příčina může být opotřebením bříty VBD, pro další závěry by bylo ale nutné dále pokračovat v experimentu a měření.

3.1.3 Opotřebení VBD pro přerušovaný řez – série 1

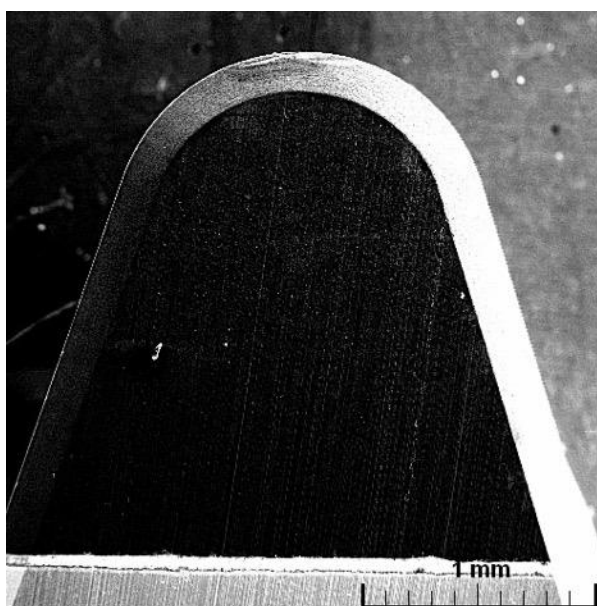
Tato kapitola zobrazuje stavy VBD po obrobení jednotlivých drah. Na obr. 3.7 až obr. 3.15 jsou postupně zobrazeny jednotlivé stavy bříty VBD. Fotografie byly pořízené na elektronovém mikroskopu zn. TESCAN.



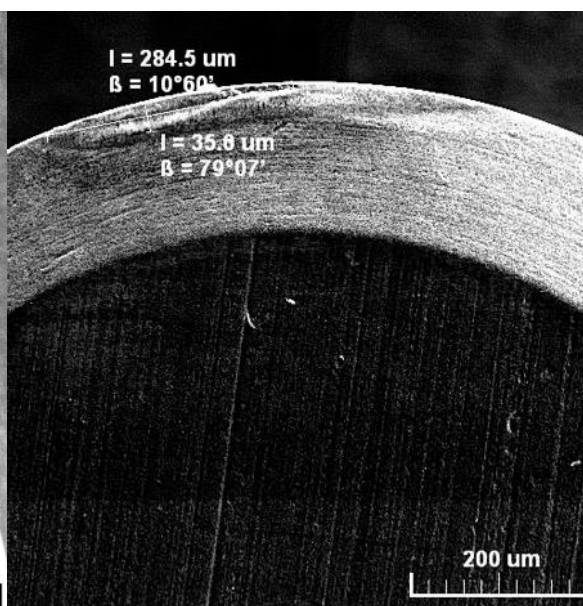
Obr. 3.7 VBD_1P po uražení dráhy 50 m.



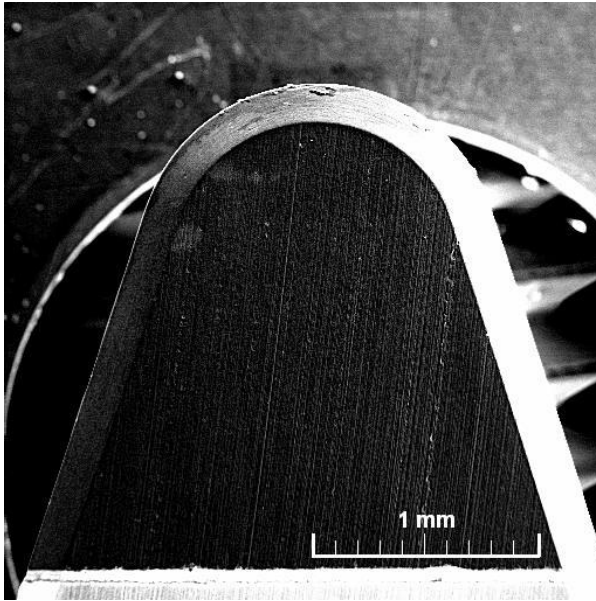
Obr. 3.8 VBD_1P po uražení dráhy 50 m – detail.



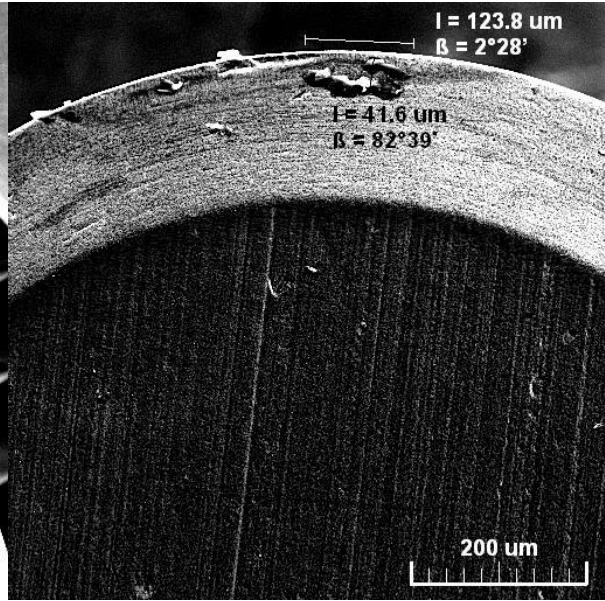
Obr. 3.9 VBD_1P po uražení dráhy 150 m.



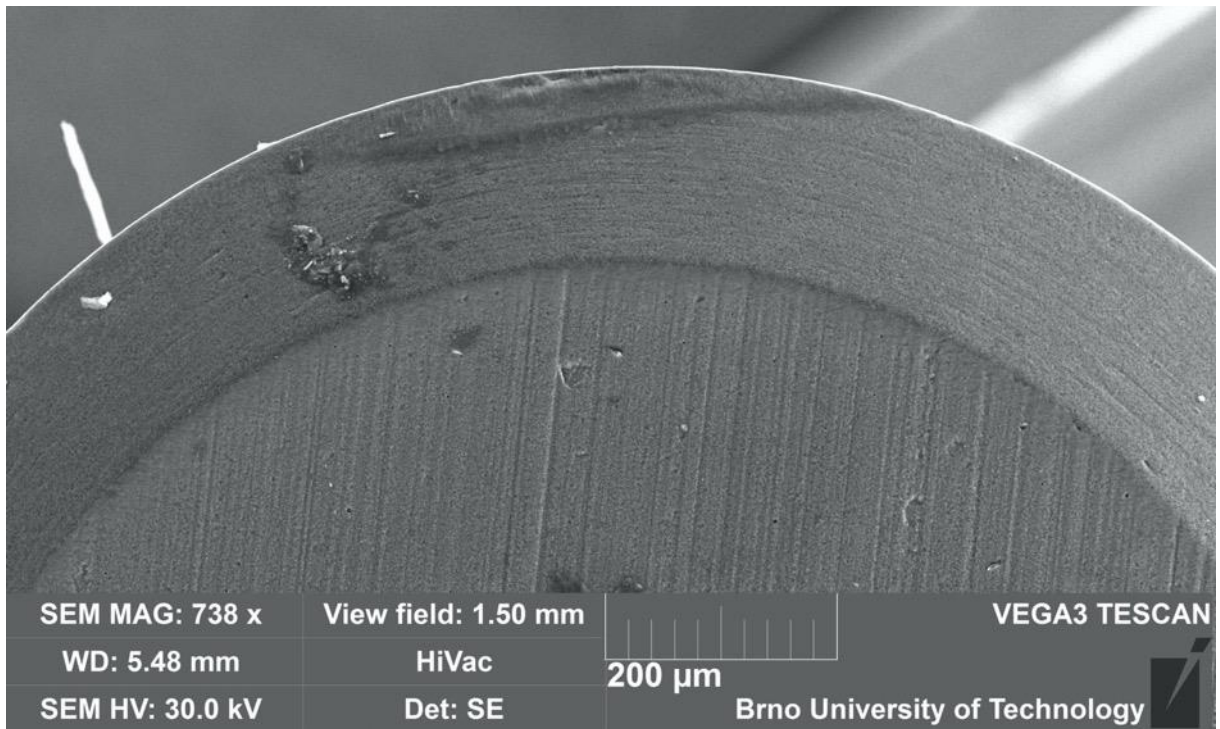
Obr. 3.10 VBD_1P po uražení dráhy 150 m – detail



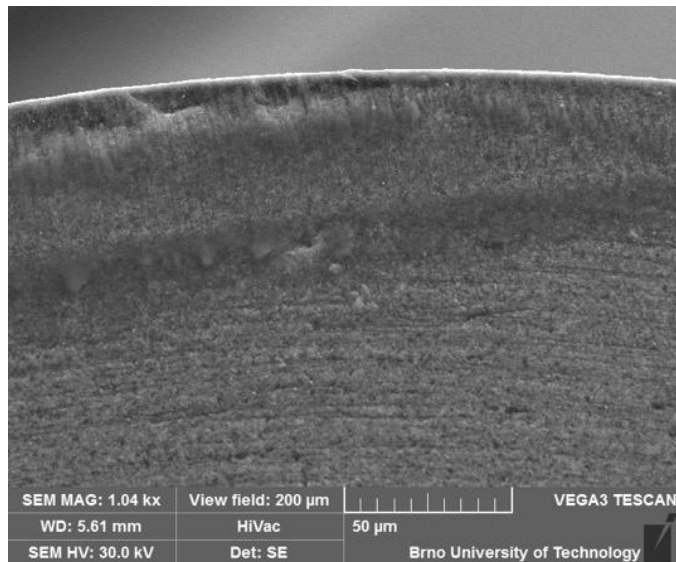
Obr. 3.11 VBD_1P po uražení dráhy 250 m.



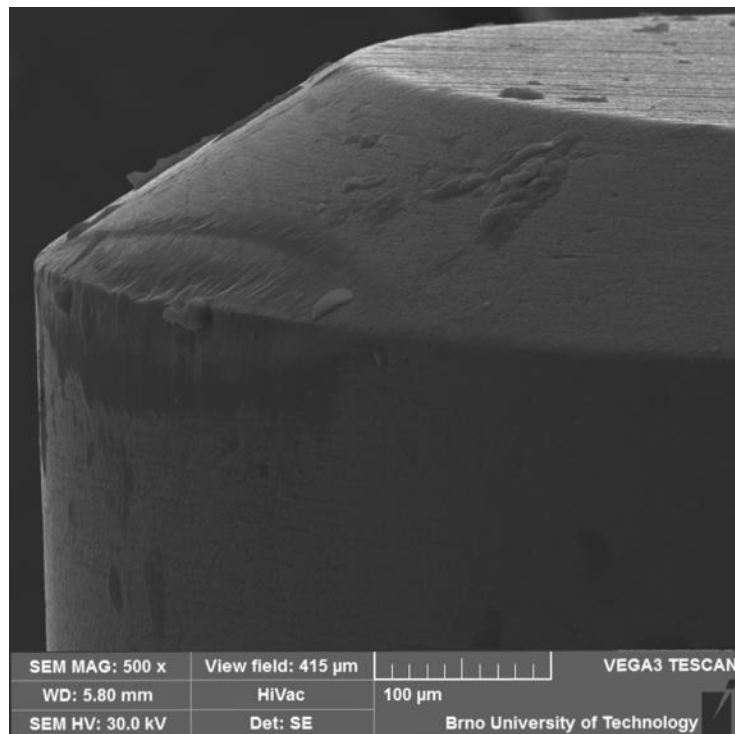
Obr. 3.12 VBD_1P po uražení dráhy 250 m – detail.



Obr. 3.13 VBD_1P po uražení dráhy 450 m.



Obr. 3.14 VBD_1P po uražení dráhy 450 m – detail.

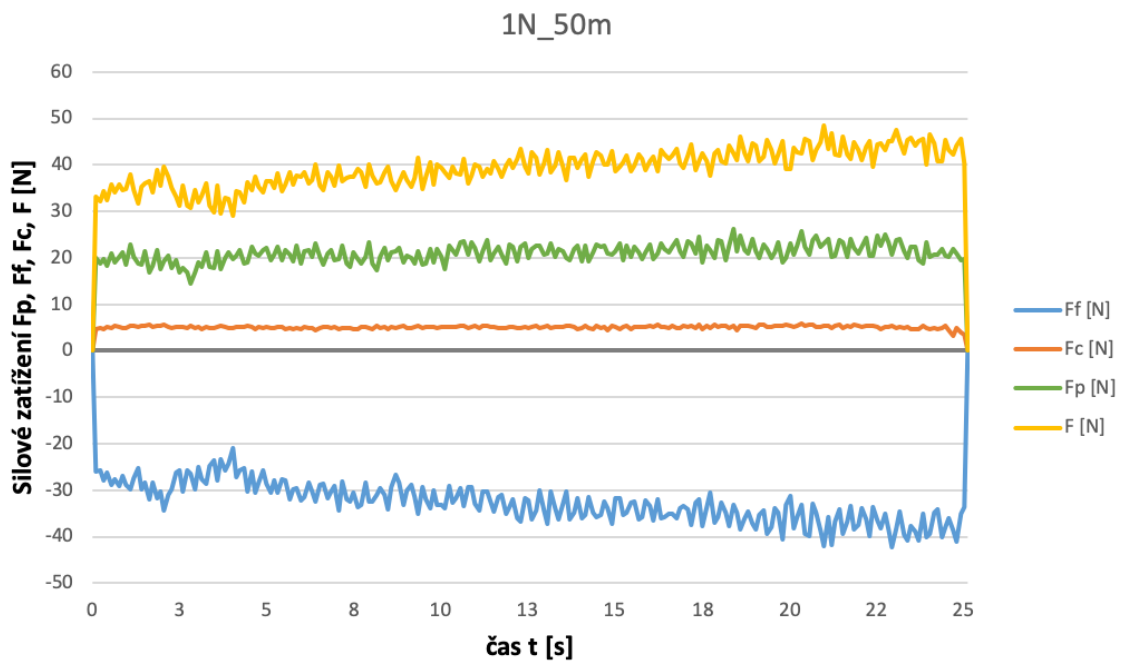


Obr. 3.15 VBD_1P po uražení dráhy 450 m – opotřebení VB.

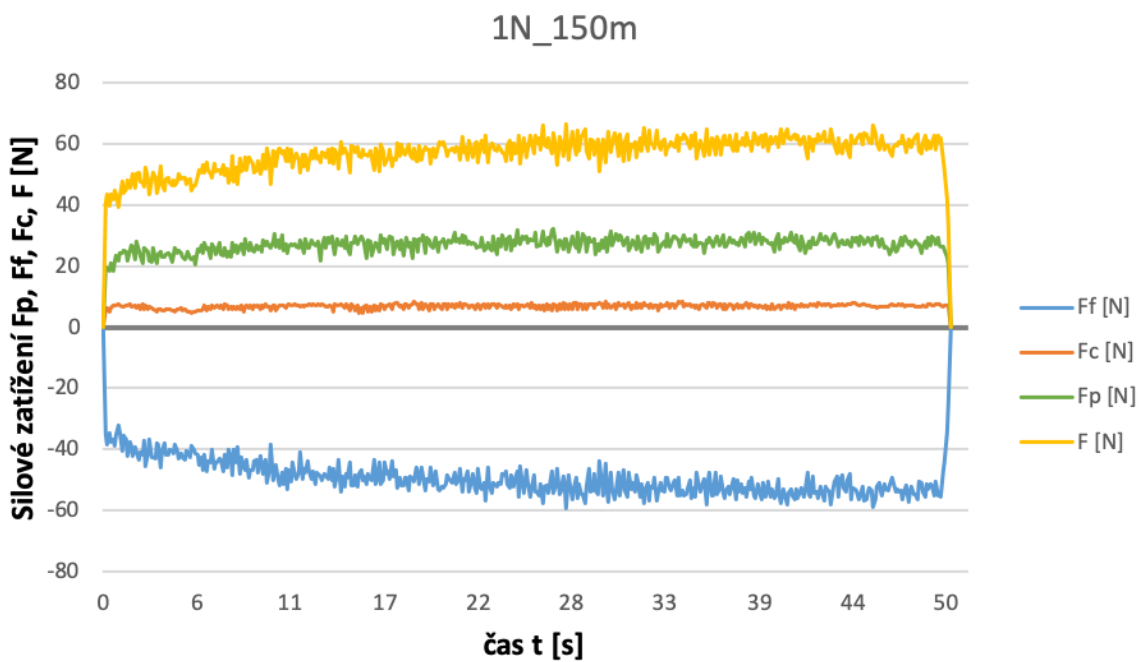
Z obr. 3.7 až obr. 3.14 je patrné opotřebení břitu VBD_1P, nejvíce pak na dráze 50 m až 150 m. Na obr. 3.15 lze vidět opotřebení VB na hřbetě nástroje, které dosahuje velikosti 100 µm. I přes tyto známky opotřebení je VBD_1P stále způsobilá k dalšímu testování a navyšování hodnoty obráběné dráhy.

3.1.4 Silové zatížení pro nepřerušovaný řez – série 1

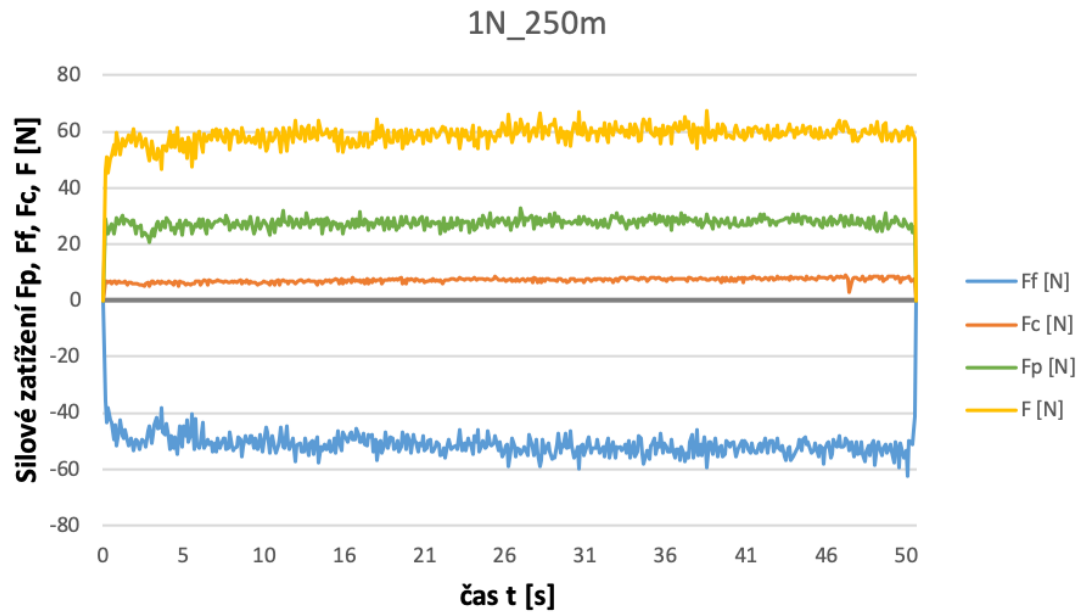
Na obr. 3.16 až obr. 3.19 lze sledovat grafickou závislost silového zatížení na čase pro dráhu 50 až 450 m při nepřerušovaném řezu.



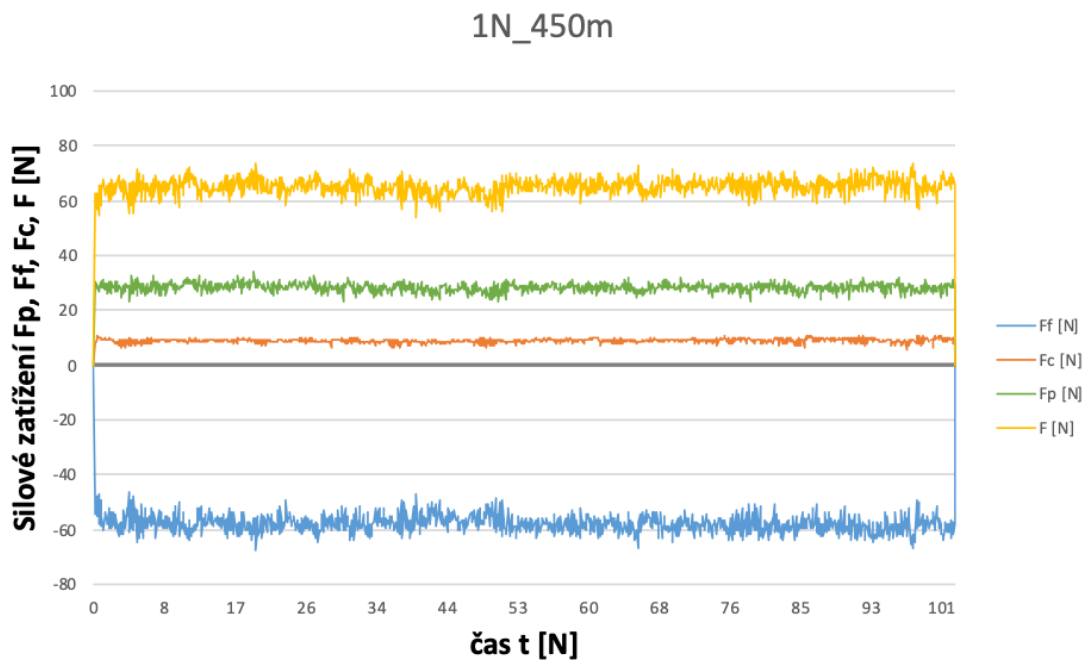
Obr. 3.16 Grafická závislost silového zatížení – nepřerušovaný řez na dráze 0 m až 50 m.



Obr. 3.17 Grafická závislost silového zatížení – nepřerušovaný řez na dráze 50 m až 150 m.



Obr. 3.18 Grafická závislost silového zatížení – nepřerušovaný řez na dráze 150 m až 250 m.



Obr. 3.19 Grafická závislost silového zatížení – nepřerušovaný řez na dráze 250 m až 450 m.

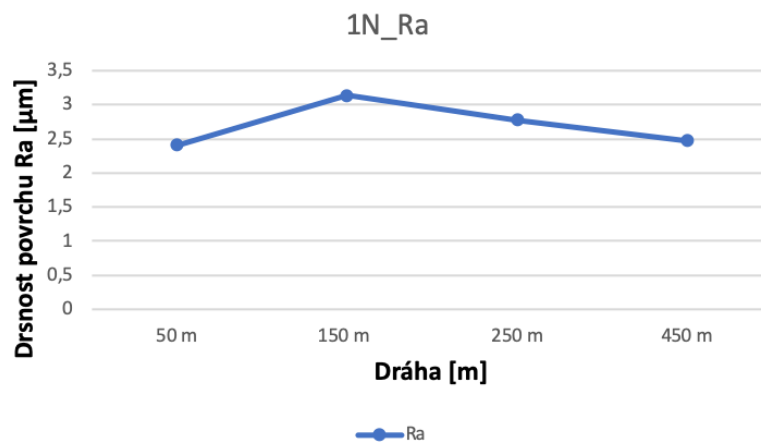
V grafické závislosti na obr. 3.16 lze vidět prvotní nárůst a následný pokles výsledné síly F , který vznikl vniknutím VBD do materiálu obrobku a „prvotním“ opotřebením břitu VBD. Na dráze 50 m skončila výsledná síla F na hodnotě cca 45 N. Na tuto hodnotu dále navazuje grafická závislost na obr. 3.17, kde se hodnota výsledné síly F ustálí na hodnotě cca 60 N. Zde si lze také povšimnout zmenšení vibrací oproti sérii s přerušovaným řezem. Na obr. 3.19 výsledná síla F vzroste na hodnotu cca 70 N, kde také skončí. Při porovnání výsledků s přerušovaným řezem se celkový rozdíl hodnoty výsledné síly F pohybuje v rozmezí ± 10 N.

3.1.5 Drsnost povrchu pro nepřerušovaný řez – série 1

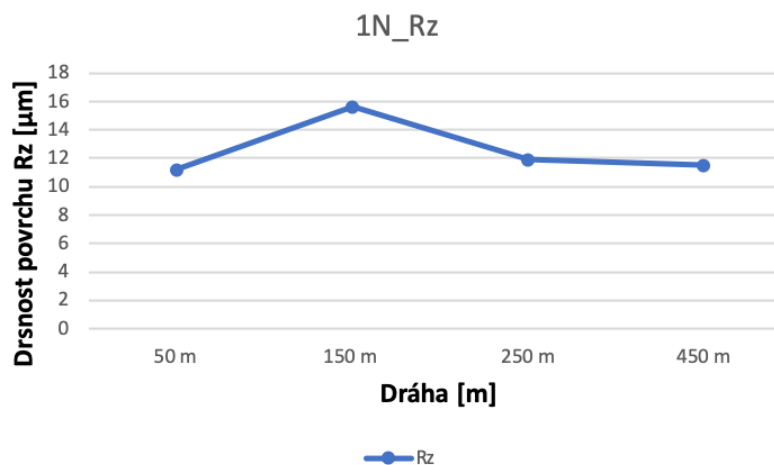
Stejně jako u první série přerušovaného řezu bylo i zde po dokončení obrábění každého úseku provedeno měření střední aritmetické úchlky profilu Ra a výšky nerovností profilu Rz. Tyto hodnoty zpracovává tab. 3.2 a jsou vyneseny v grafické závislosti na uražené dráze VBD viz obr. 3.20 a obr. 3.21.

Tab. 3.2 Hodnoty Ra a Rz pro VBD_1N.

Drsnost/Vzdálenost	50 m	150 m	250 m	450 m
Ra [μm]	2,41	3,14	2,78	2,47
Rz [μm]	11,20	15,60	11,90	11,50



Obr. 3.20 Grafická závislost Ra na dráze uražené VBD_1N.



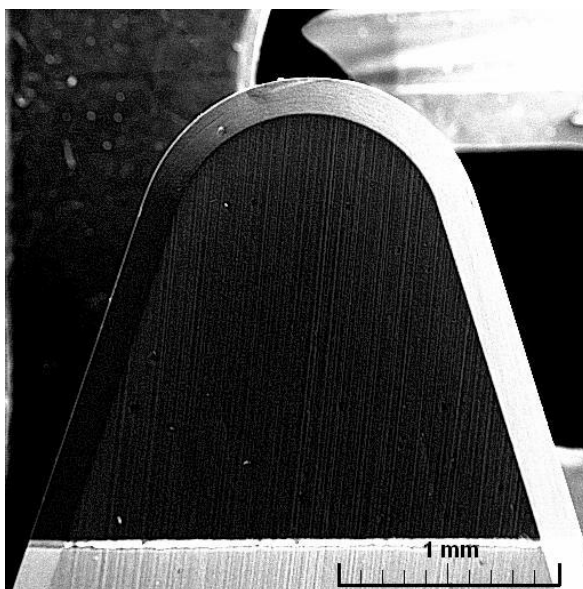
Obr. 3.21 Grafická závislost Rz na dráze uražené VBD_1N.

Hodnoty drsnosti byly měřeny stejně jako u série s přerušovaným řezem, tedy 4 x po 90°. Zde však nedocházelo ke dvěma různým hodnotám drsnosti, a proto je v tab. 3.2 zaznamenána vždy pouze jedna hodnota, která se vyskytovala nejčastěji. Z obr. 3.20 a obr. 3.21 lze vidět prvotní nárůst drsnosti, který následně klesá a skončí na hodnotě z prvního měření (50 m).

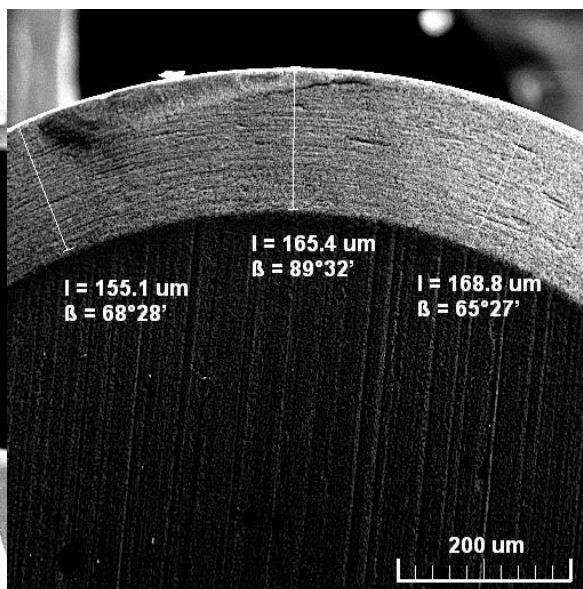
Tato hodnota neznáčí výrazné opotřebení břitu VBD, ale pro další závěry by bylo nutné dále pokračovat v experimentu a měření.

3.1.6 Opotřebení VBD pro nepřerušovaný řez – série 1

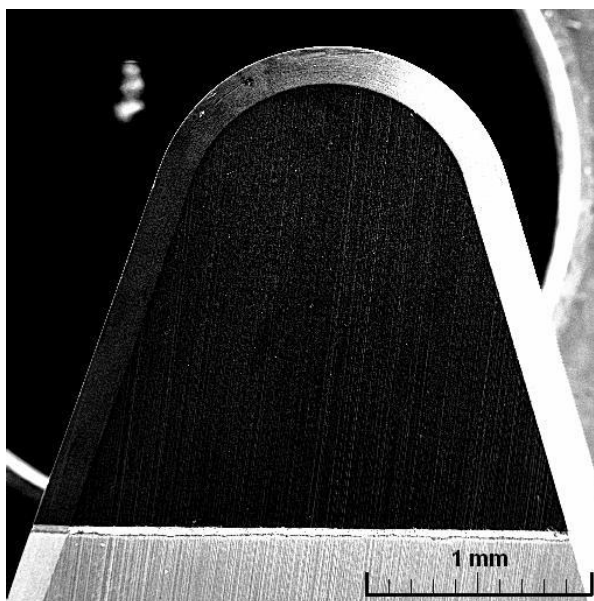
Tato kapitola zobrazuje stavy VBD po obrobení jednotlivých drah. Na obr. 3.22 až obr. 3.30 jsou postupně zobrazeny jednotlivé stavy břitu VBD. Fotografie byly pořízené na elektronovém mikroskopu zn. TESCAN.



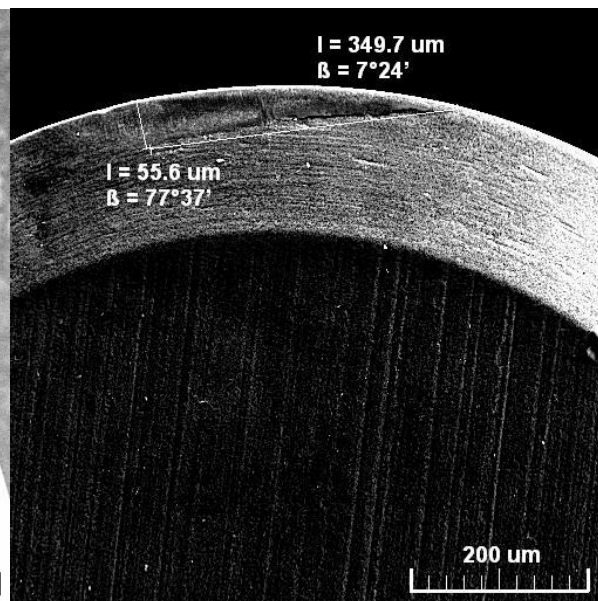
Obr. 3.22 VBD_1N po uražení dráhy 50 m.



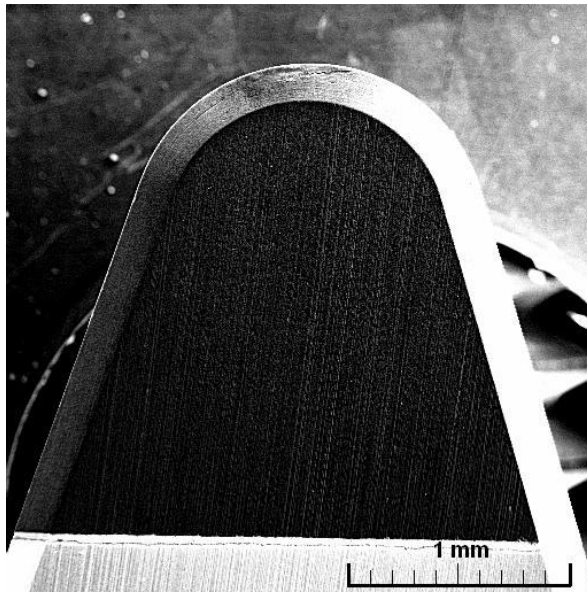
Obr. 3.23 VBD_1N po uražení dráhy 50 m – detail.



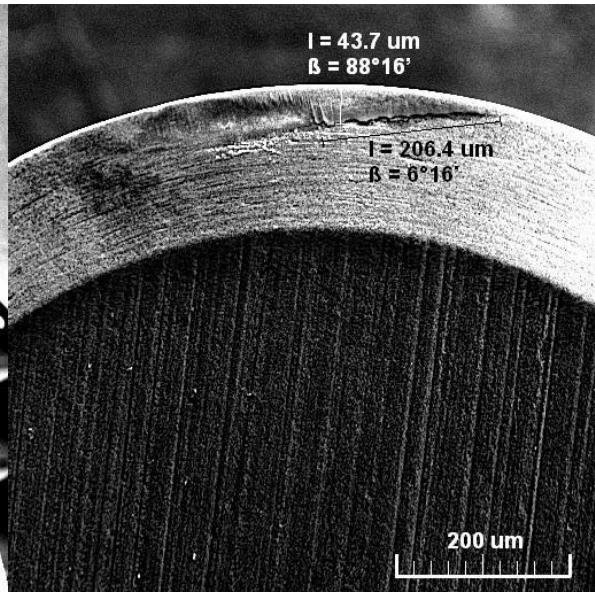
Obr. 3.24 VBD_1N po uražení dráhy 150 m.



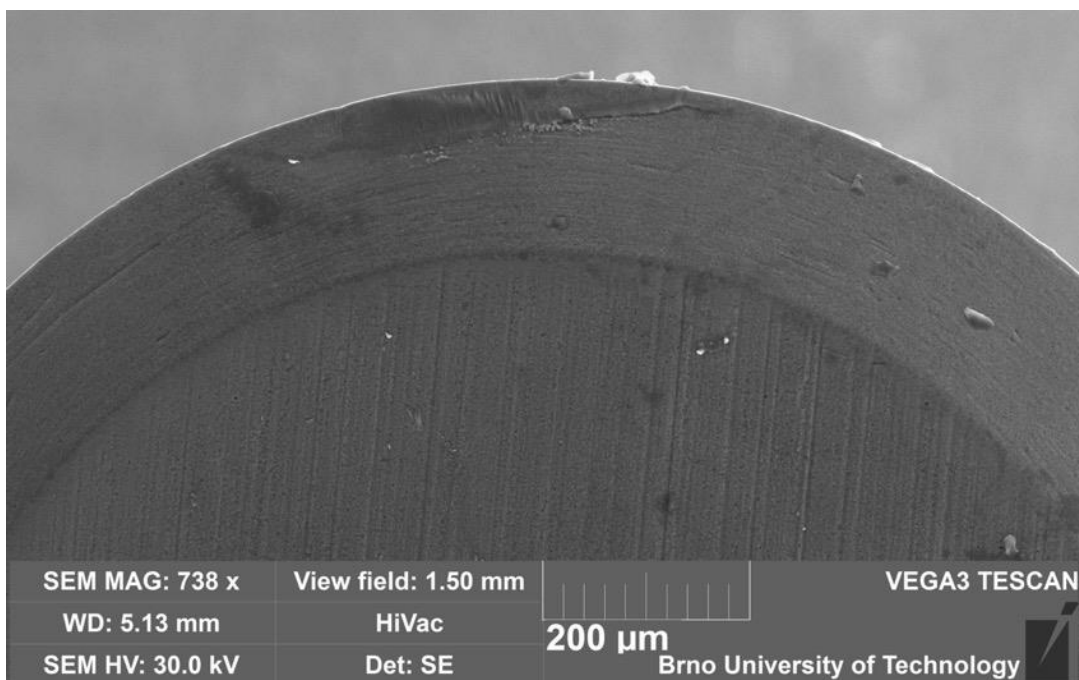
Obr. 3.25 VBD_1N po uražení dráhy 150 m – detail.



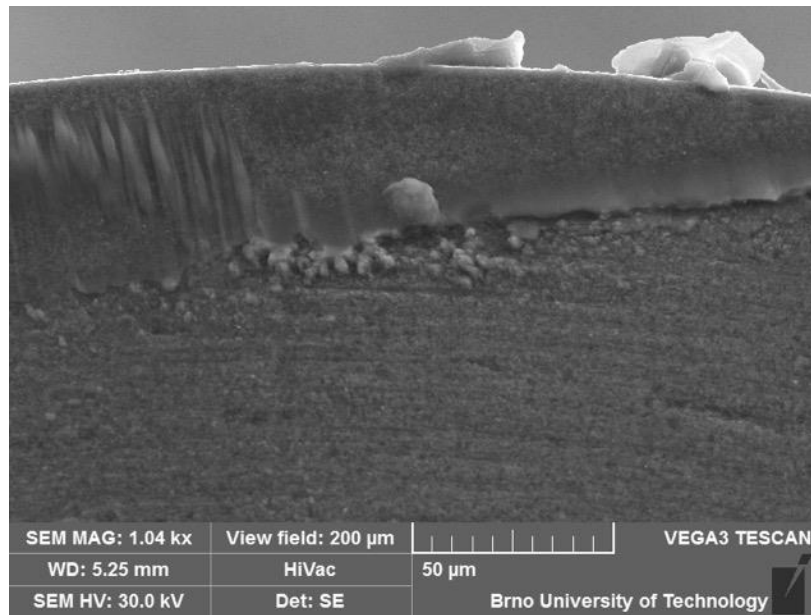
Obr. 3.26 VBD_1N po uražení dráhy 250 m.



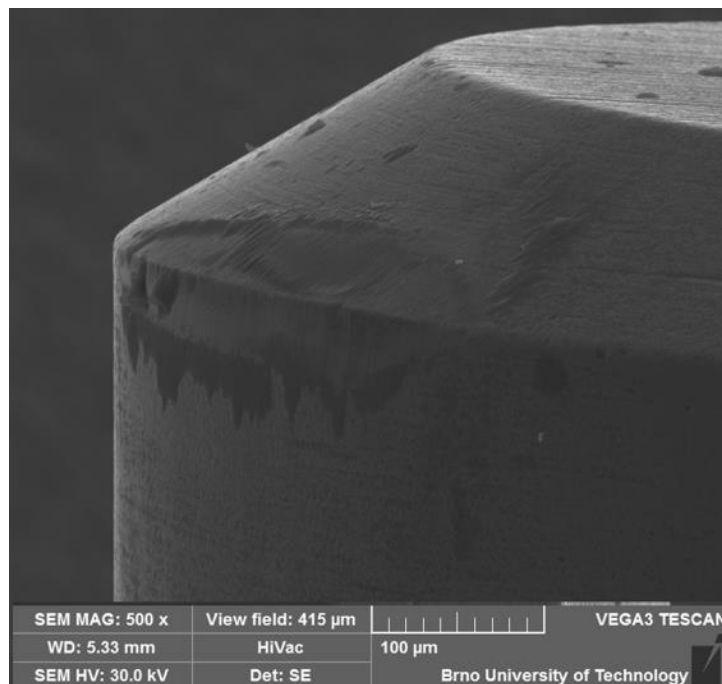
Obr. 3.27 VBD_1N po uražení dráhy 250 m – detail.



Obr. 3.28 VBD_1N po uražení dráhy 450 m.



Obr. 3.29 VBD_1N po uražení dráhy 450 m – detail.



Obr. 3.30 VBD_1N po uražení dráhy 450 m – opotřebení VB.

Z obr. 3.22 až obr. 3.29 je patrné opotřebení břitu VBD_1N, nejvíce pak na dráze 150 m až 250 m, kde dochází k trhlinám v povlaku břitu VBD. Na obr. 3.30 lze vidět opotřebení VB na hřbetě nástroje, které dosahuje velikosti 90 µm. I přes známky opotřebení je VBD_1N stále způsobilá k dalšímu testování a navyšování hodnoty obráběné dráhy.

3.1.7 Dílčí zhodnocení první série

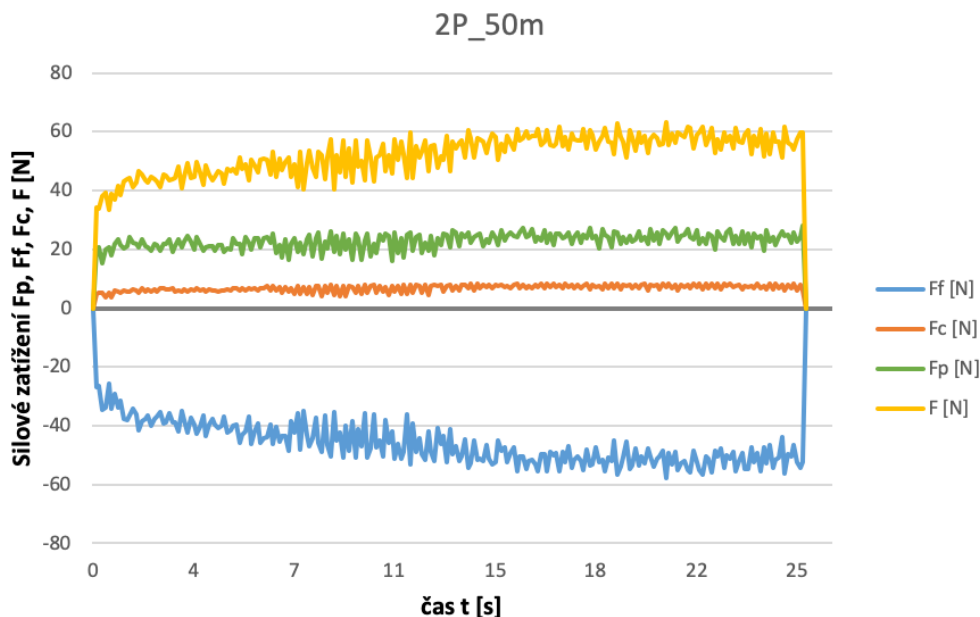
Před testováním první série bylo nutné vyřešit nejprve problém s vibracemi přípravku, ve kterém byl upnutý rezný nástroj. Tyto vibrace vznikaly kvůli značnému vyložení nástroje a také z důvodu špatné volby materiálu pro přípravek (soustružnický trn). I přes tuto skutečnost jsou u přerušovaného řezu patrné vibrace nástroje. Nicméně přes tyto prvotní problémy

se podařilo maximálně přizpůsobit podmínky testování reálnému provozu. Podle předpokladů se silové hodnoty v průběhu experimentu zvyšovaly, což odpovídá opotřebení břitů VBD během obrábění. Pro ověření správnosti dat však bylo nutné provést druhou sérii testování.

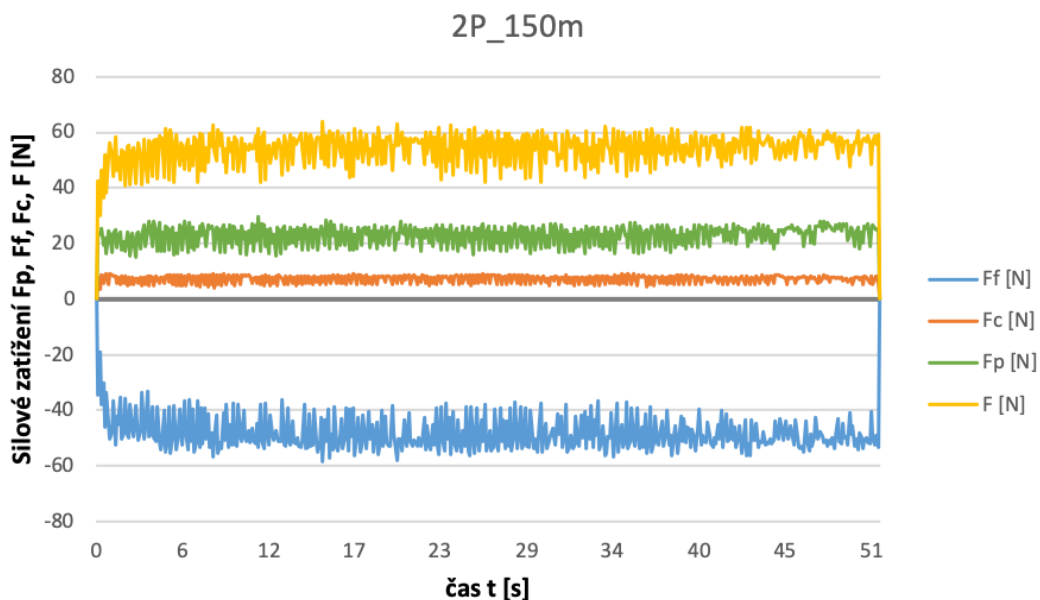
3.2 Druhá série testování

3.2.1 Silové zatížení pro přerušovaný řez – série 2

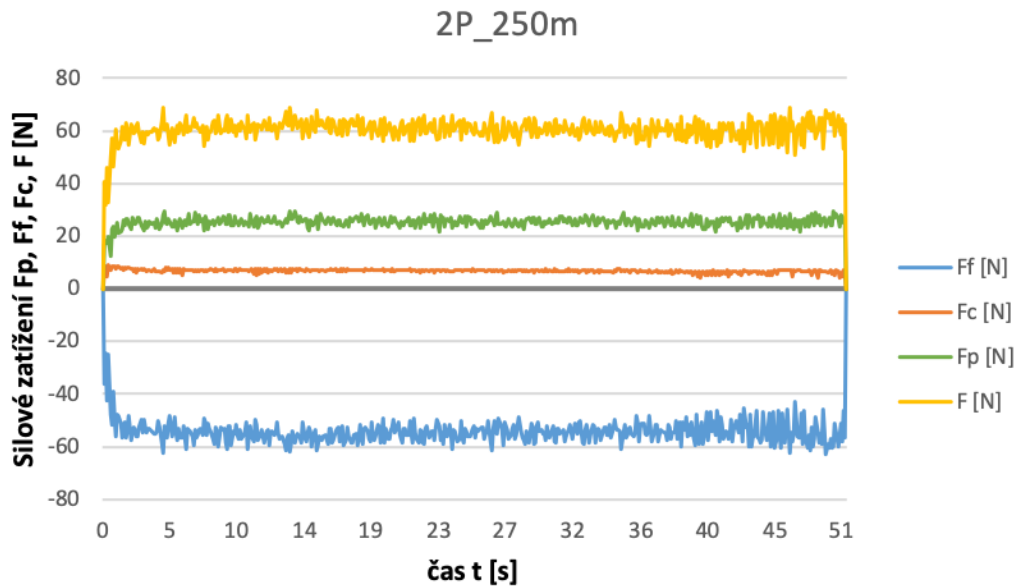
Na obr. 3.31 až obr. 3.34 lze sledovat grafickou závislost silového zatížení na čase pro dráhu 50 až 450 m při přerušovaném řezu.



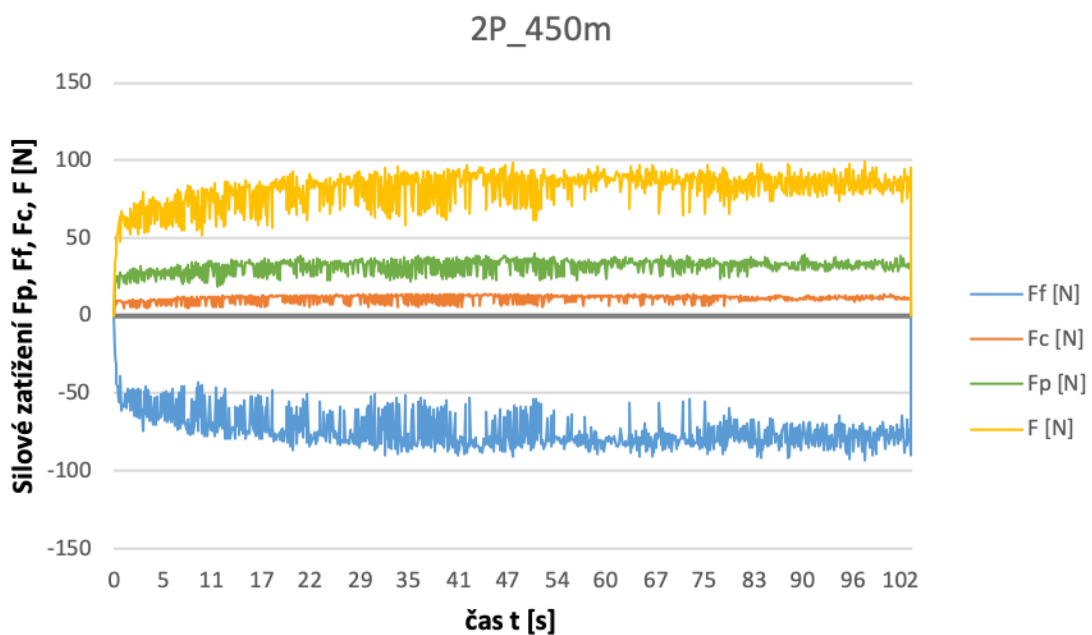
Obr. 3.31 Grafická závislost silového zatížení – přerušovaný řez na dráze 0 m až 50 m.



Obr. 3.32 Grafická závislost silového zatížení – přerušovaný řez na dráze 50 m až 150 m.



Obr. 3.33 Grafická závislost silového zatížení – přerušovaný řez na dráze 150 m až 250 m.



Obr. 3.34 Grafická závislost silového zatížení – přerušovaný řez na dráze 250 m až 450 m.

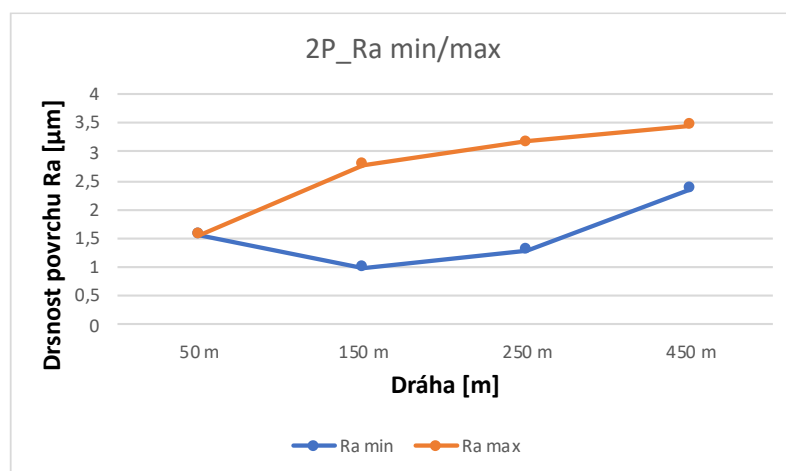
V grafické závislosti na obr. 3.31 je možné vidět postupný nárůst výsledné síly F , až k ustálení se na hodnotě 60 N. Na tuto hodnotu dále navazuje grafická závislost na obr. 3.32. Zde se hodnota výsledné síly F ustálí těsně pod 60 N. Na dráze 250 m výsledná síla F lehce narostla a ke konci dráhy 450 m se výsledná síla F ustálila na hodnotě mezi 80 až 90 N. Při porovnání s první sérií, kde ke konci dráhy 450 m byla hodnota výsledné síly F mezi 60 až 80 N se jedná jen o zanedbatelný rozdíl. Silové rozpětí v grafických závislostech je opět zapříčiněno větším množstvím vibrací.

3.2.2 Drsnost povrchu pro přerušovaný řez – série 2

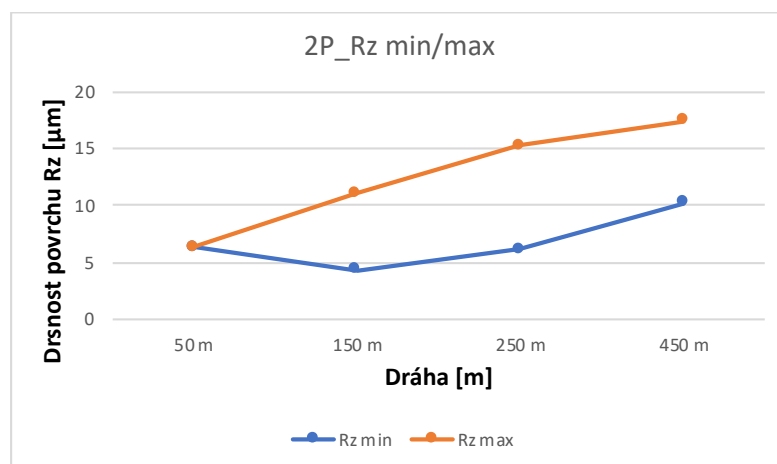
Po dokončení obrábění každého úseku bylo provedeno měření střední aritmetické úchytky profilu Ra a výšky nerovností profilu Rz. Tyto hodnoty zpracovává tab. 3.3 a dále jsou vyneseny v grafické závislosti na uražené dráze VBD viz obr. 3.35 a obr. 3.36.

Tab. 3.3 Hodnoty Ra a Rz pro VBD_2P.

Drsnost/Vzdálenost	50 m	150 m	250 m	450 m
Ra [μm]	1,56	$\frac{0,99}{2,78}$	$\frac{1,29}{3,18}$	$\frac{2,36}{3,45}$
Rz [μm]	6,30	$\frac{4,3}{11,1}$	$\frac{6,1}{15,2}$	$\frac{10,2}{17,4}$



Obr. 3.35 Grafická závislost Ra na dráze uražené VBD_2P.



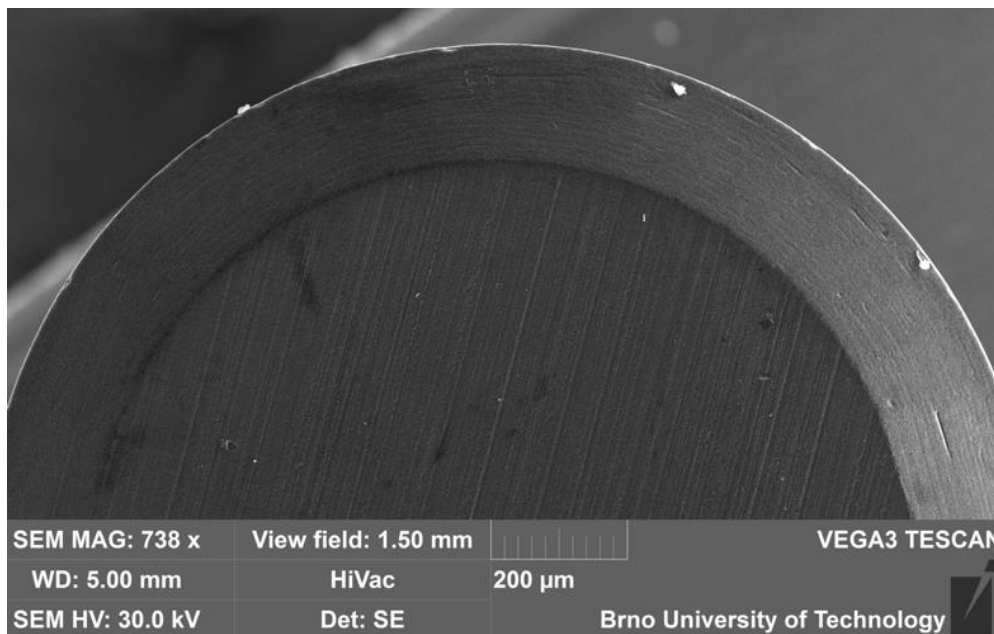
Obr. 3.36 Grafická závislost Rz na dráze uražené VBD_2P.

Měření drsností probíhalo stejně jako v předchozí sérii. V tab. 3.3 jsou uvedeny u parametrů Ra a Rz dvě hodnoty z důvodu rozdílné drsnosti na obráběné ploše. Při porovnání parametrů Ra a Rz s předchozí sérií zjistíme, že hodnoty jsou velice podobné. Vyšší hodnoty parametrů Ra, Rz (na obr. 3.35 a obr. 3.36 označeny oranžovou barvou) mohou být zapříčiněny rozvibrováním nástroje při přerušovaném řezu. Zde lze také vidět vzrůstající hodnoty parametrů

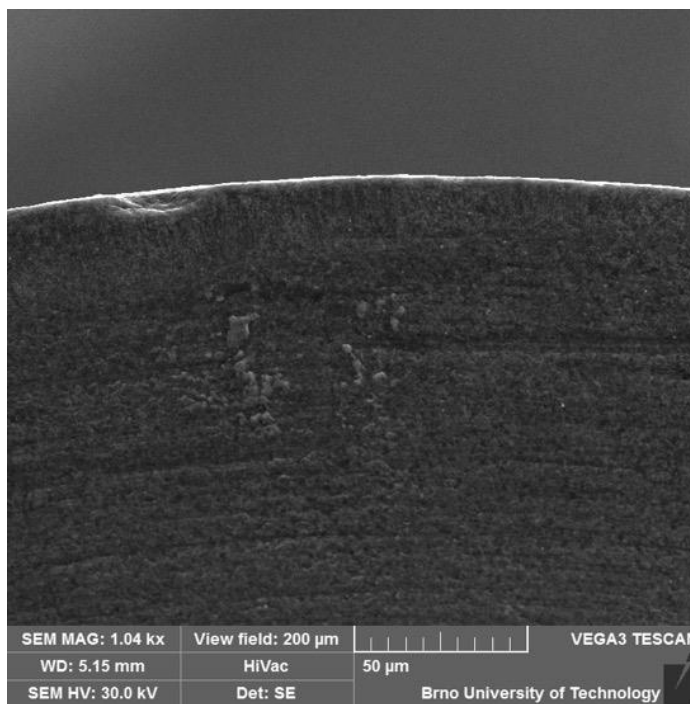
Ra a Rz, což může být zapříčiněno opotřebením VBD. Nejedná se o výrazné opotřebenění bříty VBD, ale pro další závěry by bylo nutné dále pokračovat v experimentu a měření.

3.2.3 Opotřebenění VBD pro přerušovaný řez – série 2

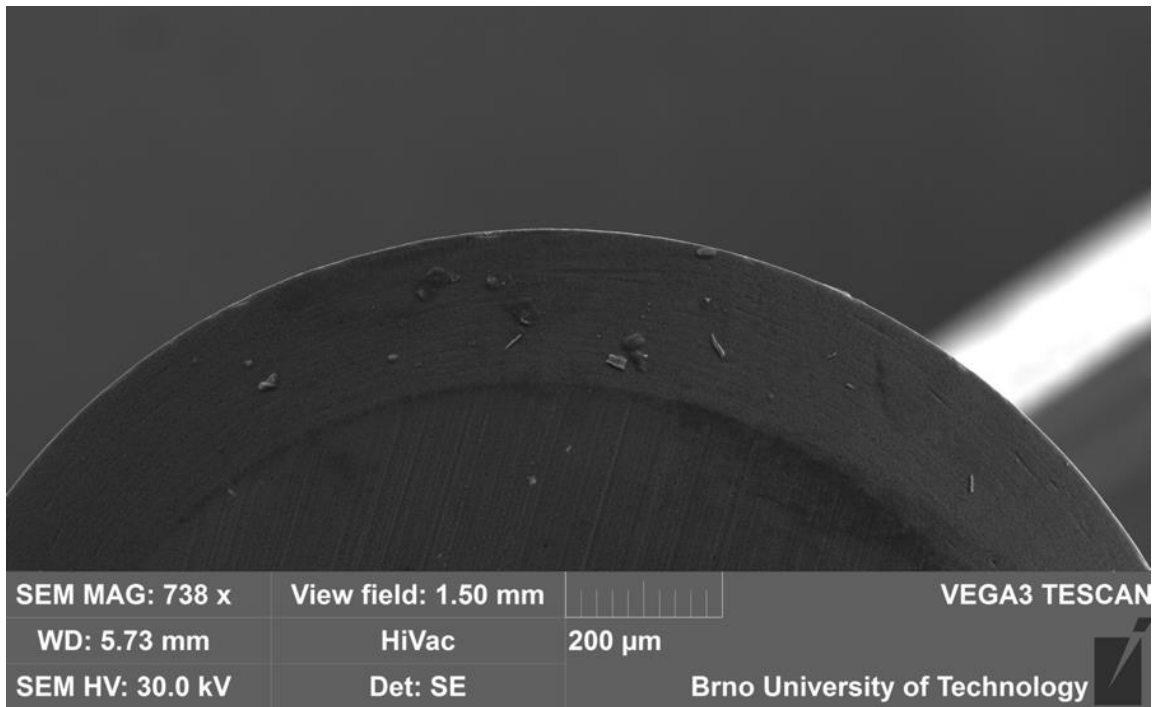
Tato kapitola zobrazuje stavy VBD po obrobení jednotlivých drah. Na obr. 3.37 až obr. 3.45 jsou postupně zobrazeny jednotlivé stavy bříty VBD. Fotografie byly pořízené na elektronovém mikroskopu TESCAN VEGA 3.



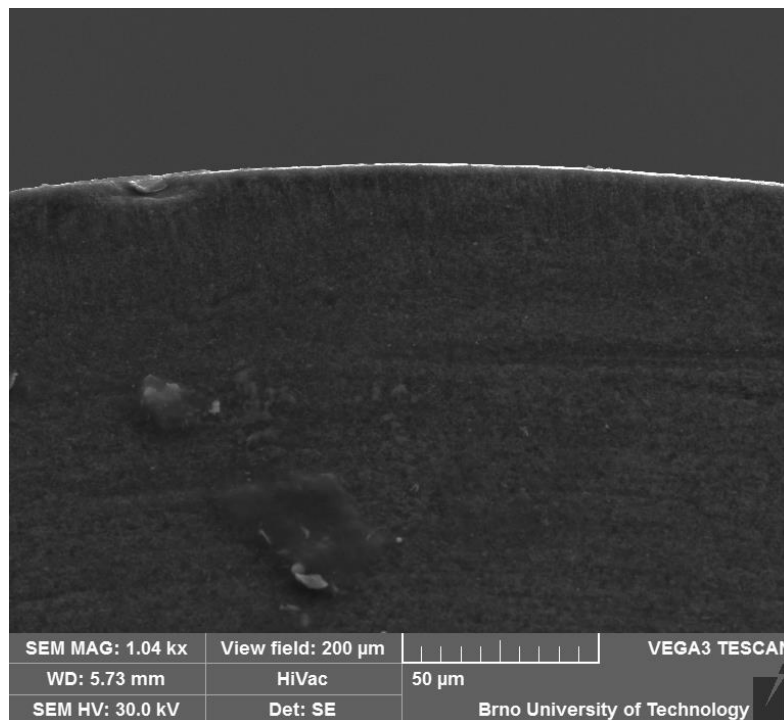
Obr. 3.37 VBD_2P po uražení dráhy 50 m.



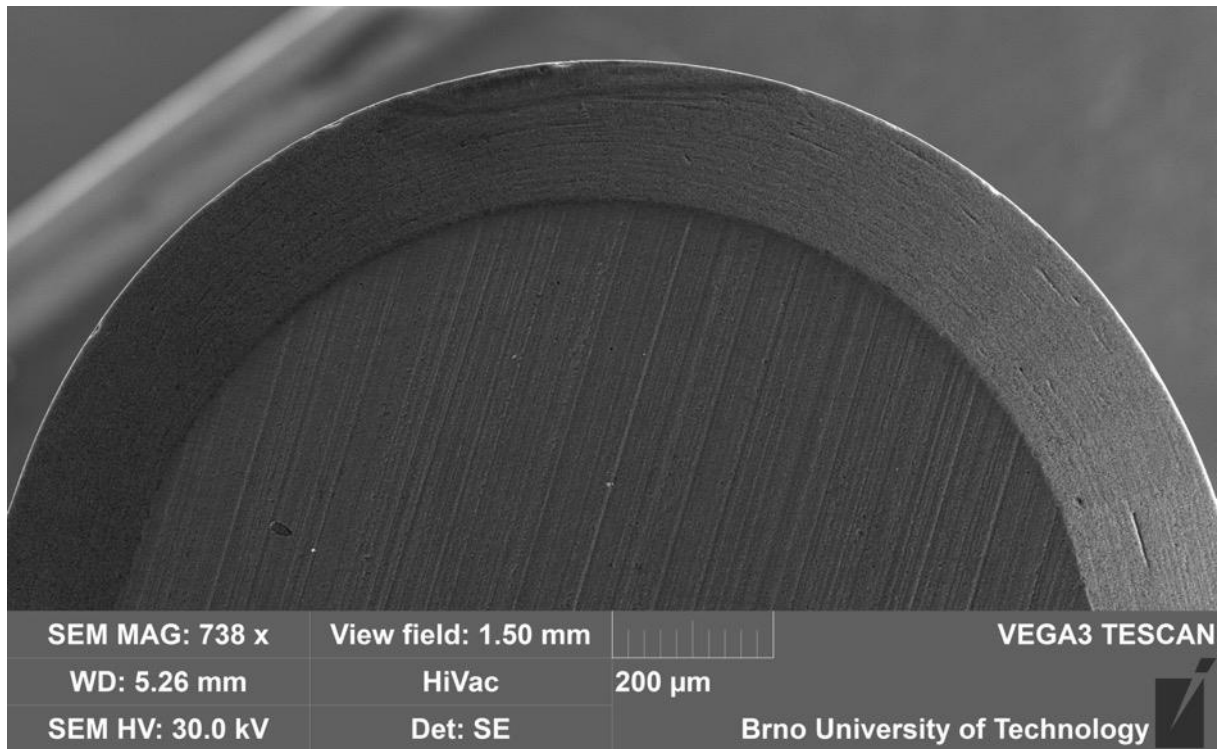
Obr. 3.38 VBD_2P po uražení dráhy 50 m – detail.



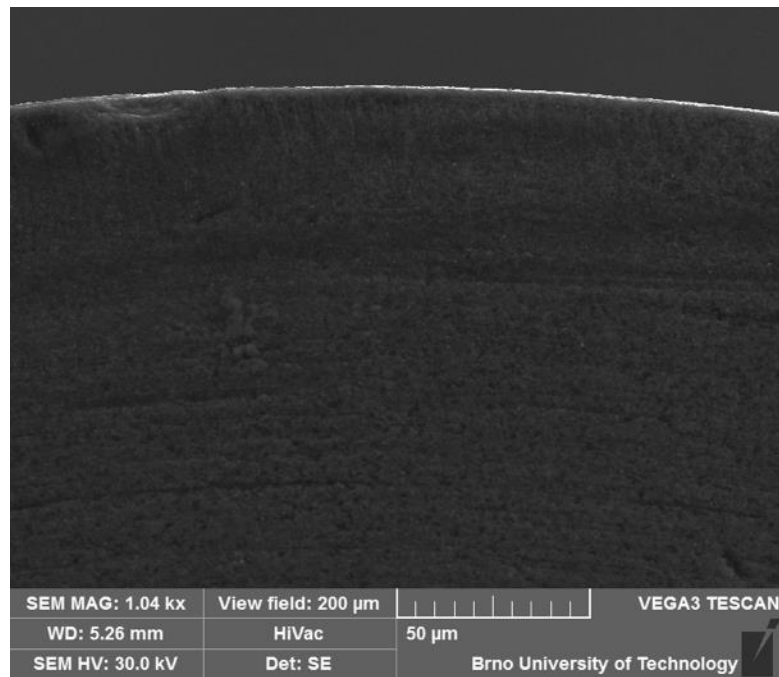
Obr. 3.39 VBD_2P po uražení dráhy 150 m.



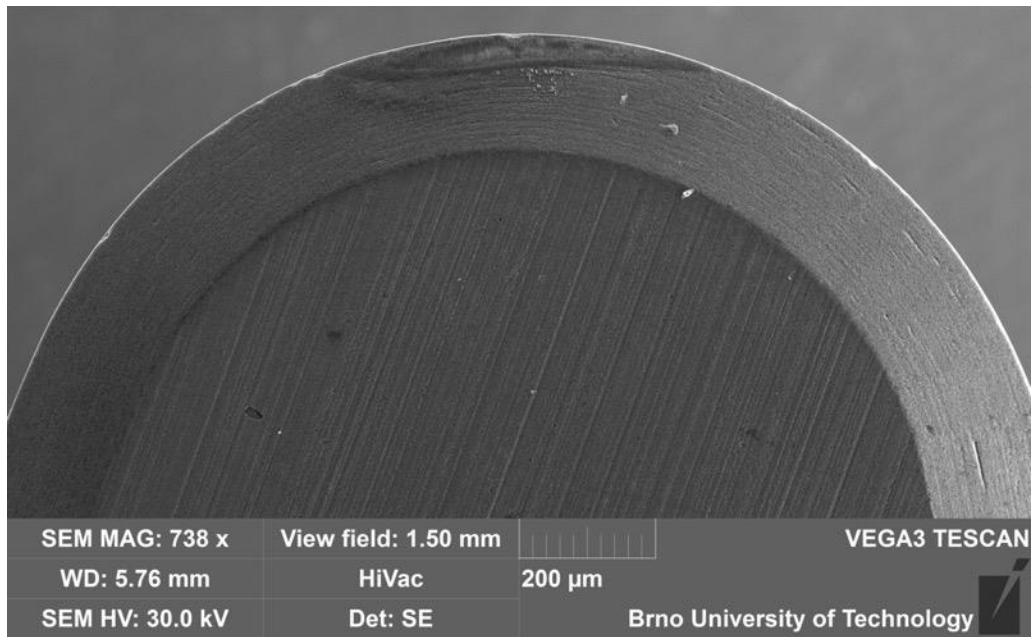
Obr. 3.40 VBD_2P po uražení dráhy 150 m – detail.



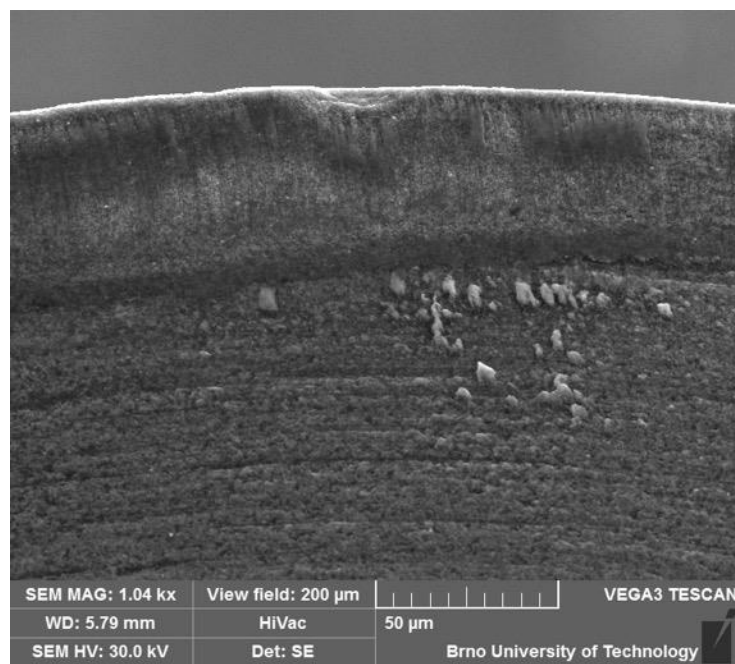
Obr. 3.41 VBD_2P po uražení dráhy 250 m.



Obr. 3.42 VBD_2P po uražení dráhy 250 m – detail.

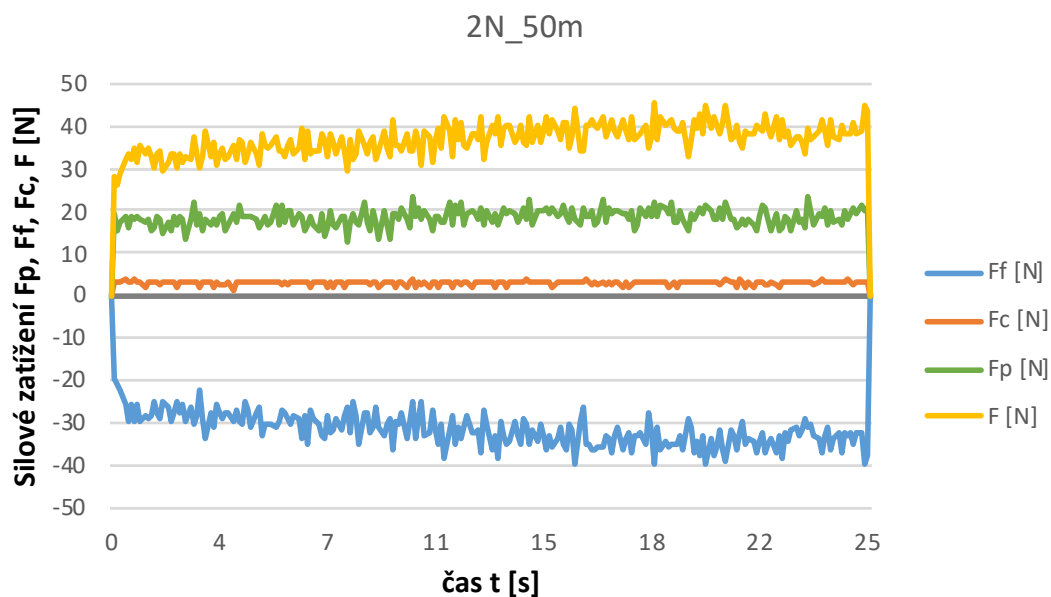


Obr. 3.43 VBD_2P po uražení dráhy 450 m.

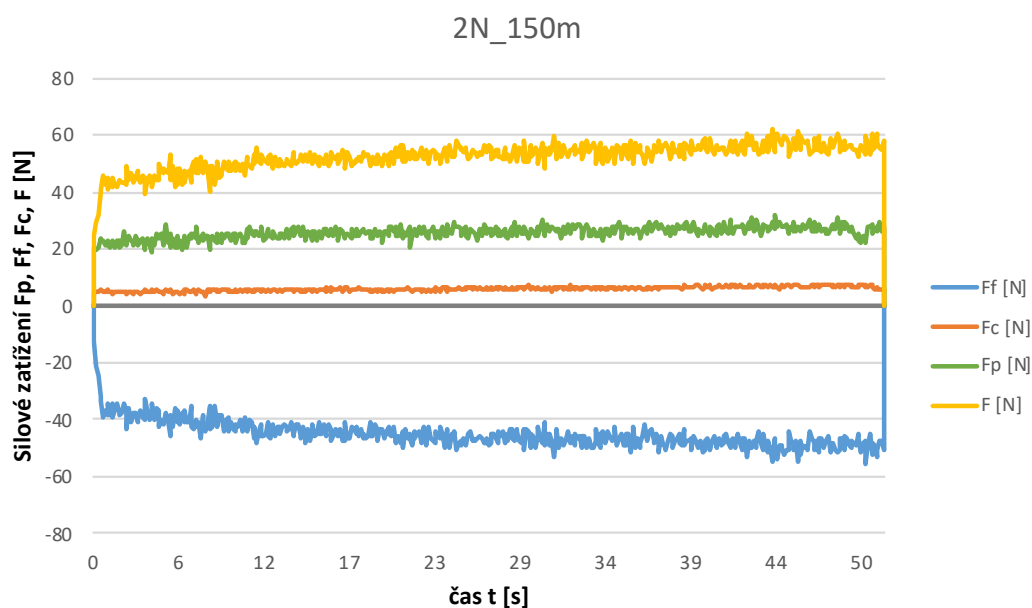


Obr. 3.44 VBD_2P po uražení dráhy 450 m – detail.

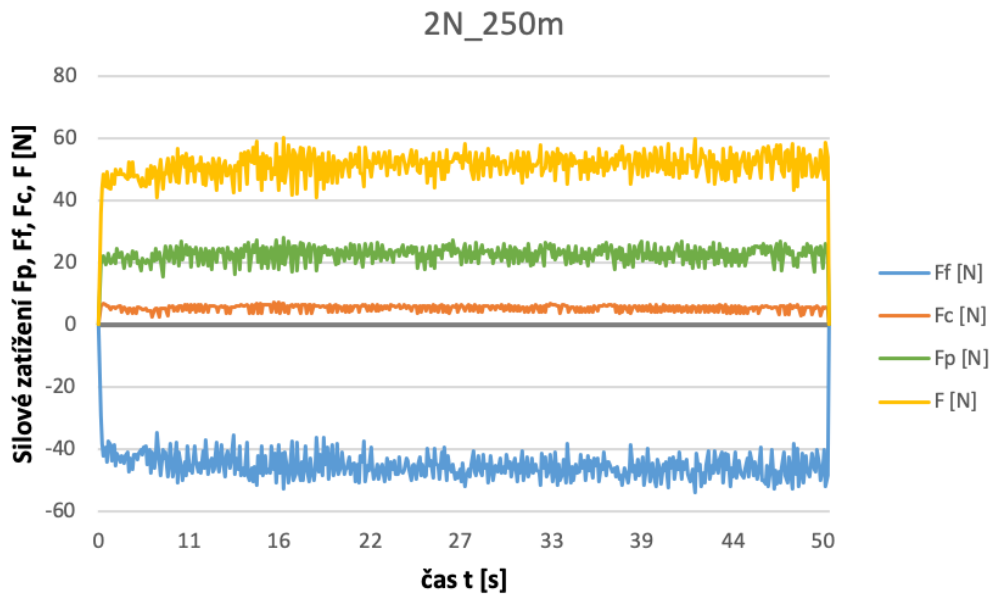
3.2.4 Silové zatížení pro nepřerušovaný řez – série 2



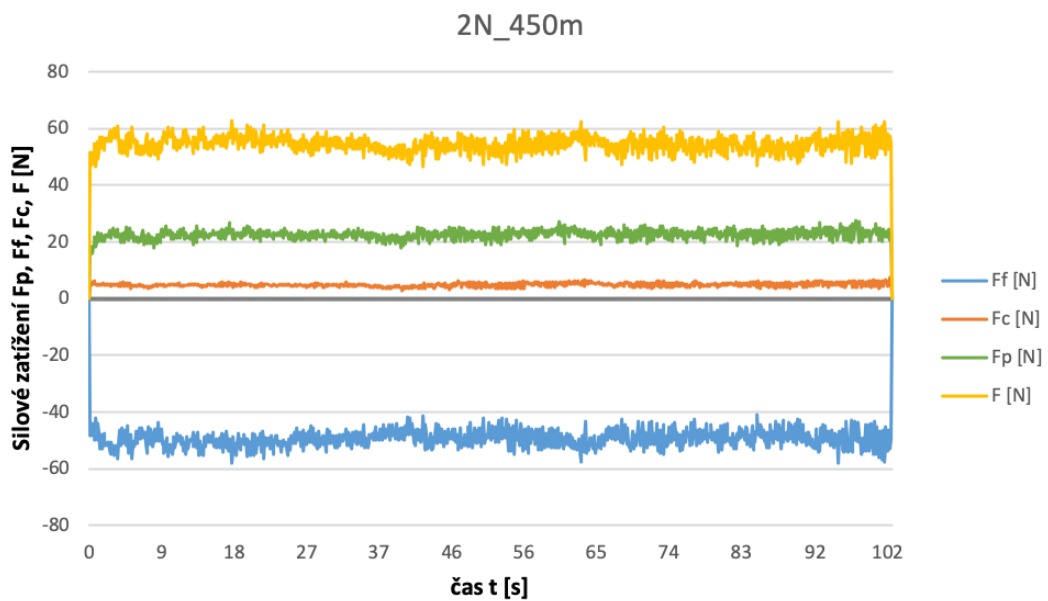
Obr. 3.46 Grafická závislost silového zatížení – nepřerušovaný řez na dráze 0 m až 50 m.



Obr. 3.47 Grafická závislost silového zatížení – nepřerušovaný řez na dráze 50 m až 150 m.



Obr. 3.48 Grafická závislost silového zatížení – nepřerušovaný řez na dráze 150 m až 250 m.



Obr. 3.49 Grafická závislost silového zatížení – nepřerušovaný řez na dráze 250 m až 450 m.

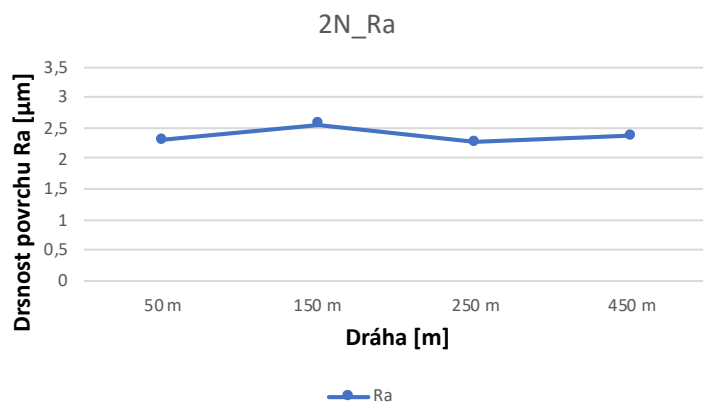
V grafické závislosti na obr. 3.46 lze sledovat postupný nárůst výsledné síly F a mírné kolísání sil, které může být způsobeno značným vysunutím nástroje a tím vznikajícími vibracemi. Výsledná síla F se stejně jako u první série ustálí kolem hodnoty cca 60 N viz obr. 3.49. Provedeným testováním se potvrdily výsledky z první série a dle výše uvedeného platí, že výsledná síla F nenaznačuje takové opotřebení břitu VBD, které by znemožňovalo jeho další použití.

3.2.5 Drsnost povrchu pro nepřerušovaný řez – série 2

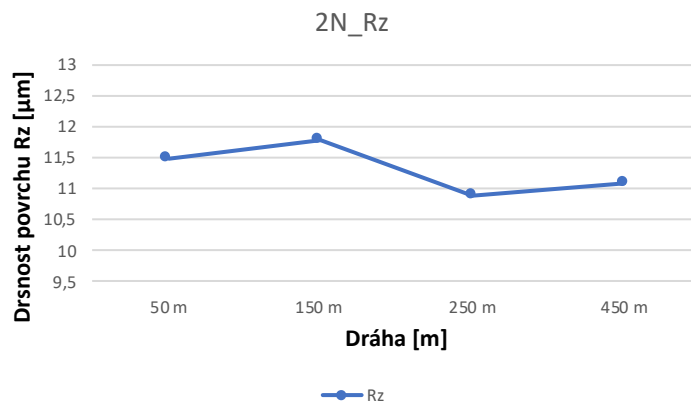
Naměřené hodnoty střední aritmetické úchylnosti profilu R_a a výšky nerovností profilu R_z jsou uvedeny v tab. 3.4. Měření probíhalo za stejných podmínek jako v první sérii. Naměřené hodnoty zpracovává tab. 3.4 a následně jsou vyneseny v grafické závislosti na uražené dráze VBD viz obr. 3.50 a obr. 3.51.

Tab. 3.4 Hodnoty R_a a R_z pro VBD_2N.

Drsnost/Vzdálenost	50 m	150 m	250 m	450 m
R_a [μm]	2,30	2,55	2,27	2,37
R_z [μm]	11,50	10,10	10,60	11,10



Obr. 3.50 Grafická závislost R_a na dráze uražené VBD_2N.

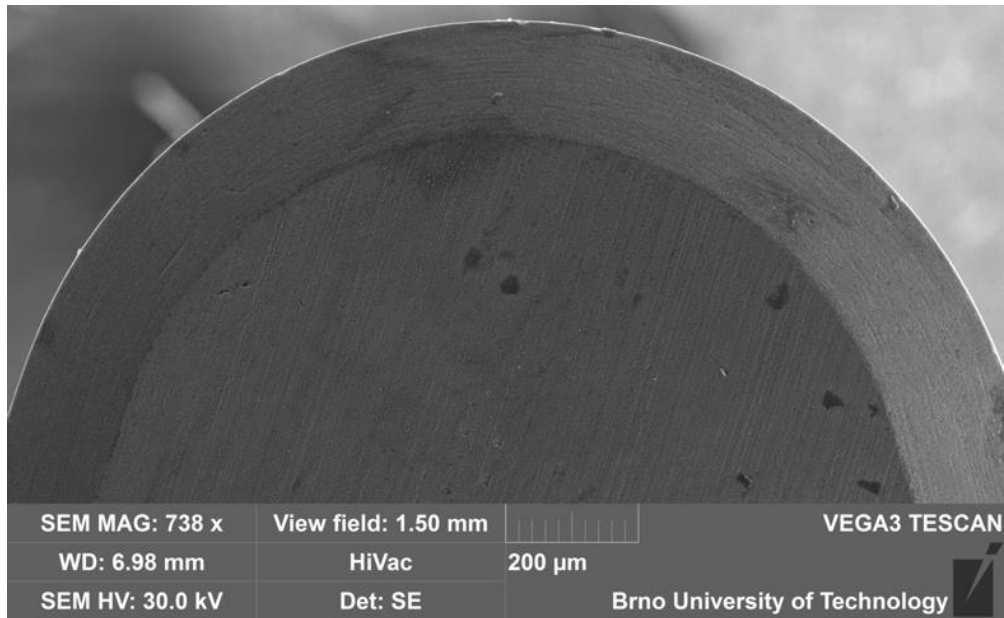


Obr. 3.51 Grafická závislost R_z na dráze uražené VBD_2N.

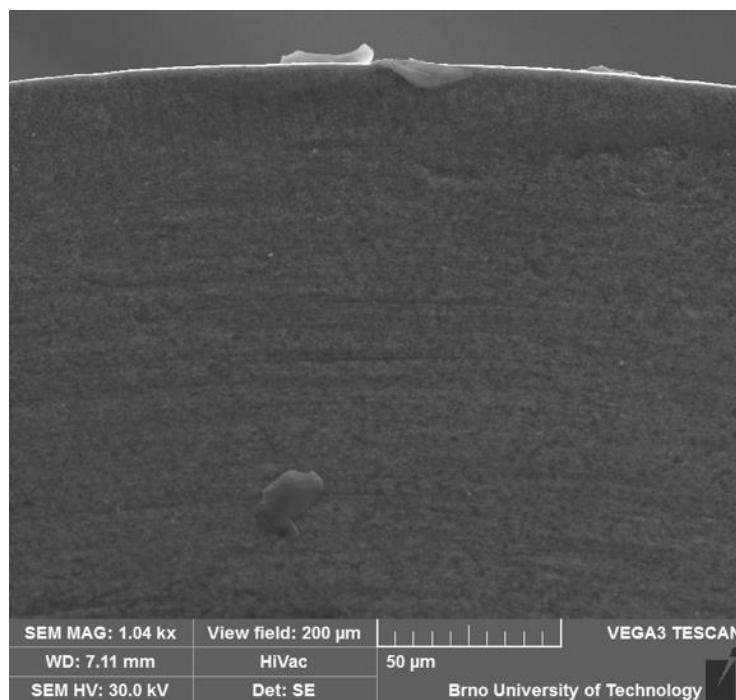
Při porovnání parametrů R_a a R_z s předchozí sérií lze zjistit, že hodnoty jsou velice podobné. V tab. 3.4 jsou zaznamenány nejčastěji se vyskytující hodnoty. Z obr. 3.50 a obr. 3.51 lze vidět prvotní nárůst drsnosti, který poté opět klesá a skončí blízko hodnotě z prvního měření (50 m). Nejedná se o výrazné opotřebení bříty VBD, ale pro další závěry by bylo nutné pokračovat dále v experimentu a měření.

3.2.6 Opatření VBD pro nepřerušovaný řez – série 2

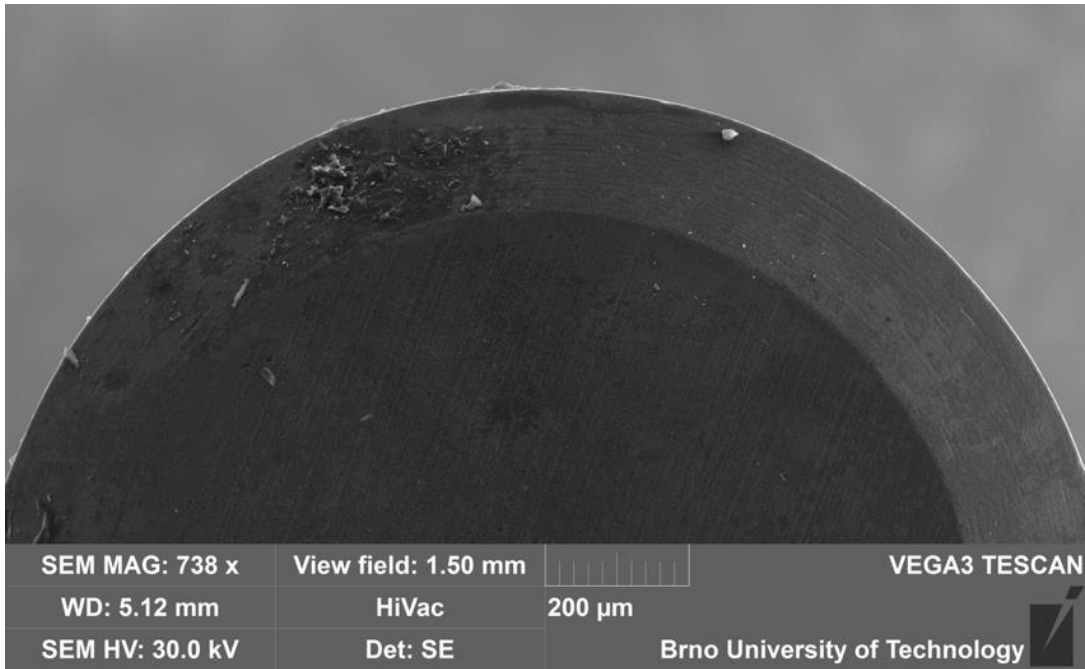
Na obr. 3.52 až obr. 3.60 jsou postupně zobrazeny jednotlivé stavy bříty VBD. Fotografie byly pořízené na elektronovém mikroskopu TESCAN VEGA 3.



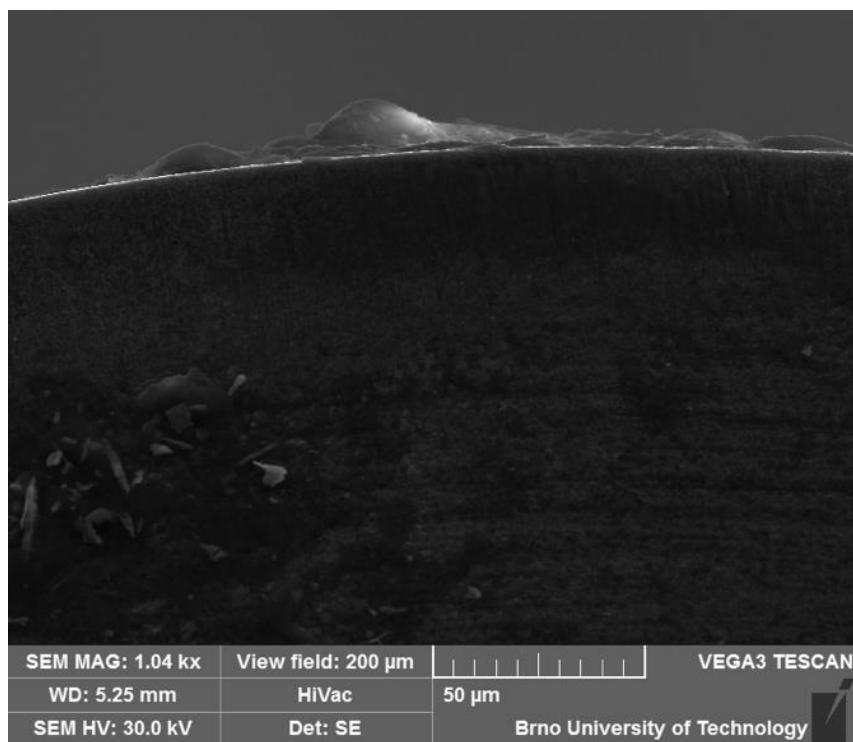
Obr. 3.52 VBD_2N po uražení dráhy 50 m.



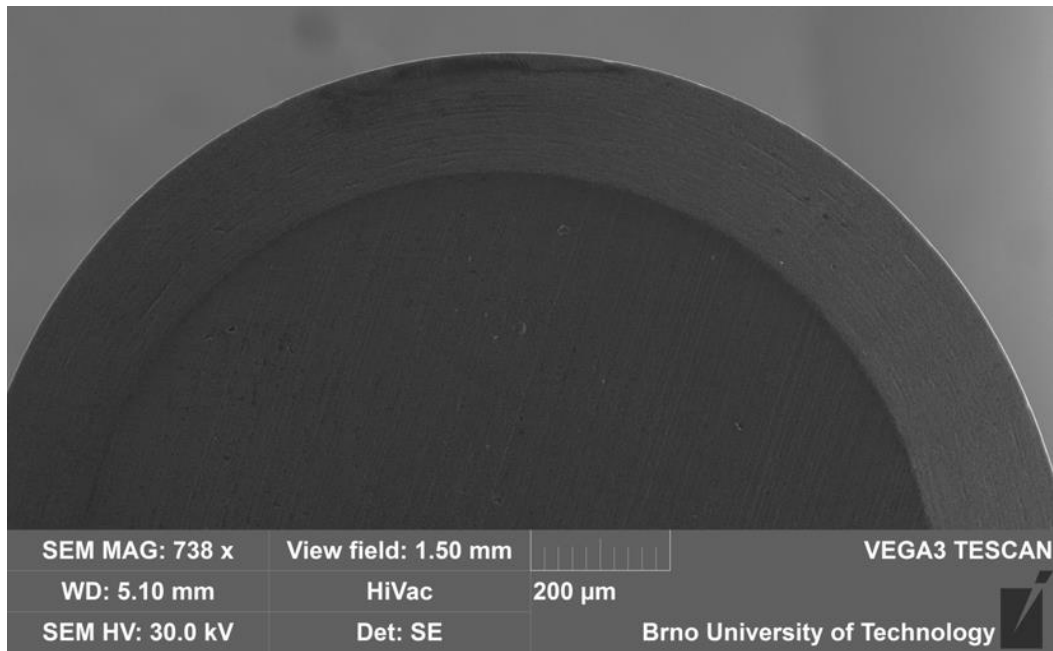
Obr. 3.53 VBD_2N po uražení dráhy 50 m – detail.



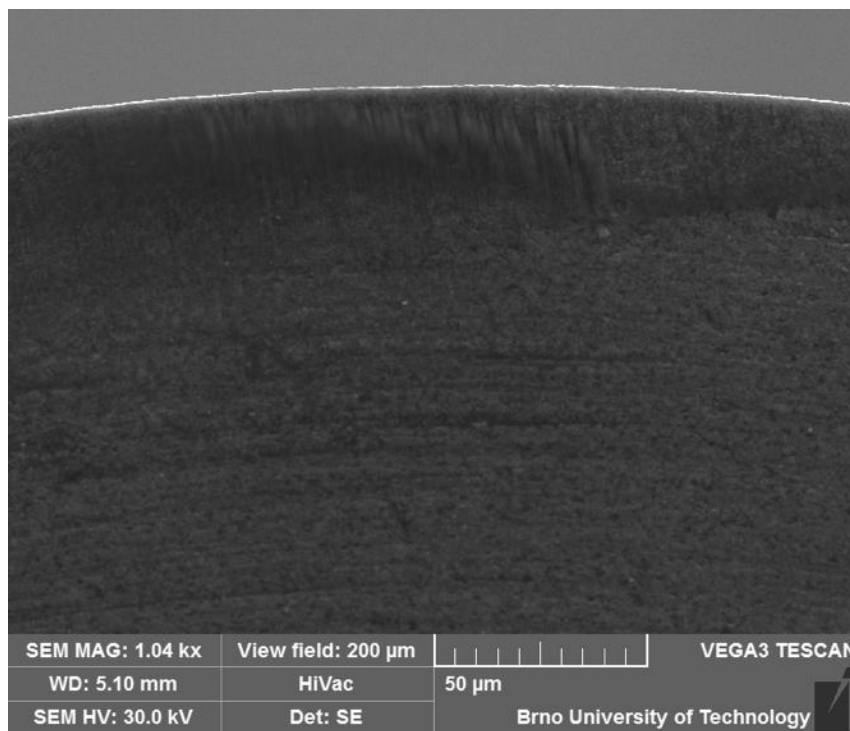
Obr. 3.54 VBD_2N po uražení dráhy 150 m.



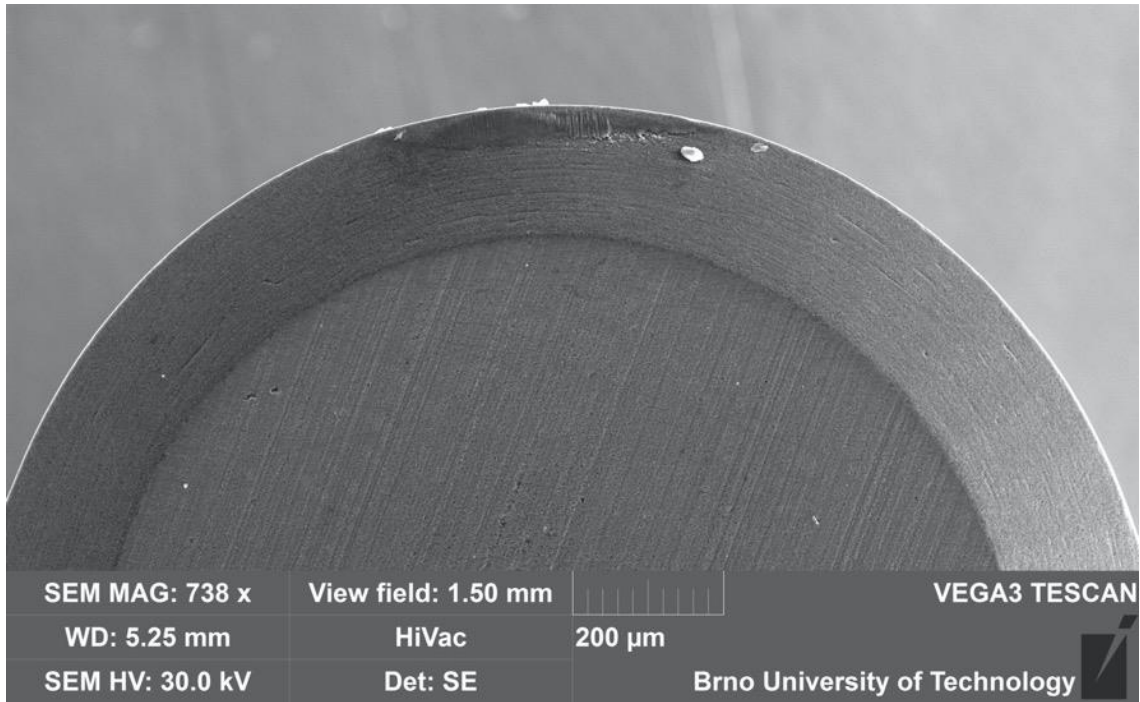
Obr. 3.55 VBD_2N po uražení dráhy 150 m – detail.



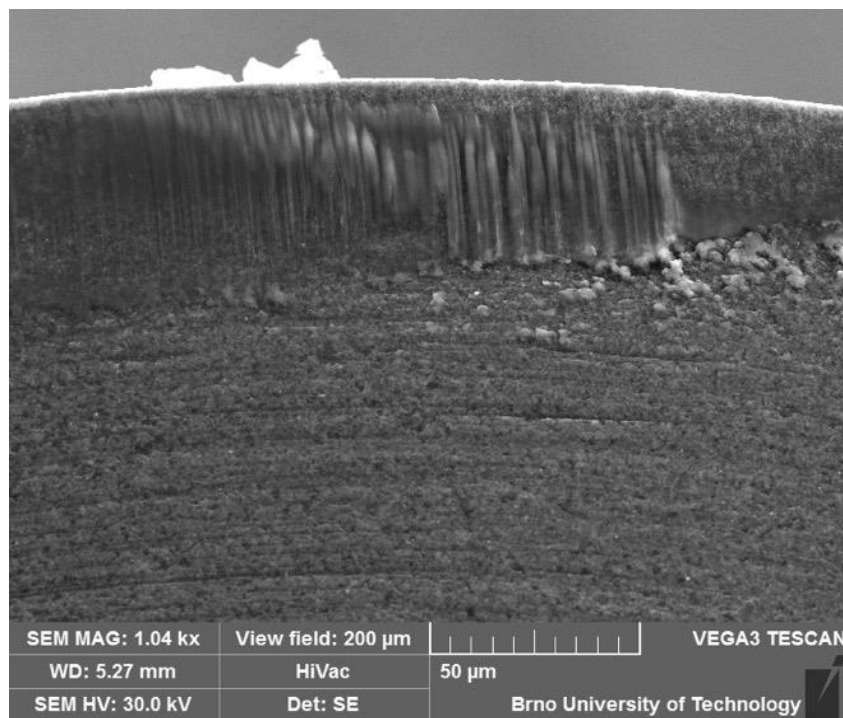
Obr. 3.56 VBD_2N po uražení dráhy 250 m.



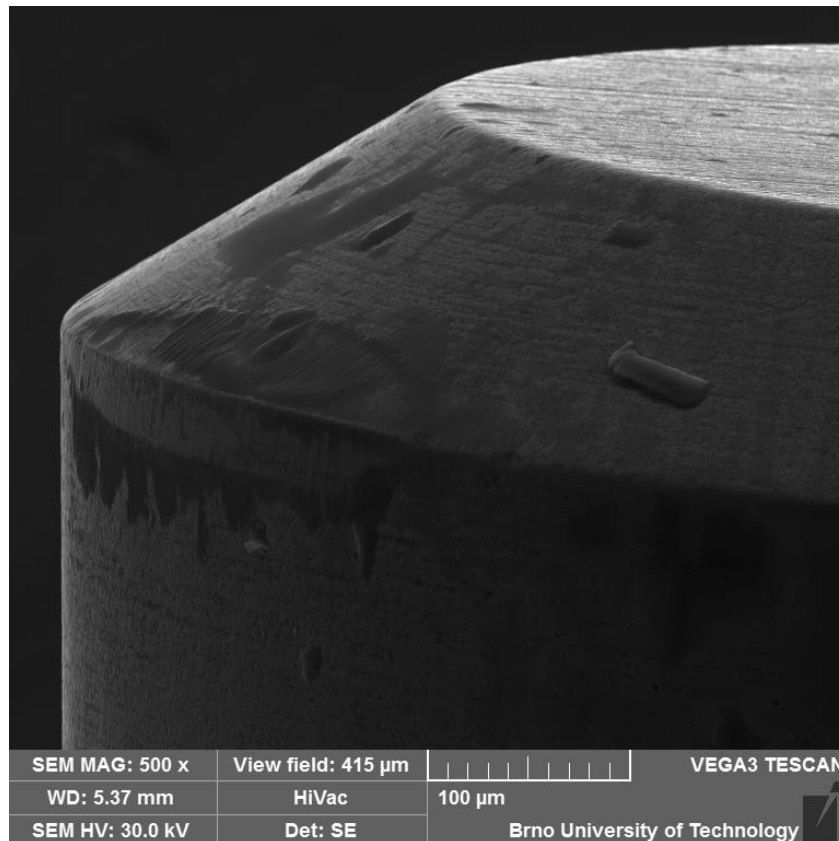
Obr. 3.57 VBD_2N po uražení dráhy 250 m – detail.



Obr. 3.58 VBD_2N po uražení dráhy 450 m.



Obr. 3.59 VBD_2N po uražení dráhy 450 m – detail.



Obr. 3.60 VBD_2N po uražení dráhy 450 m – opotřebení VB.

Na obr. 3.52 až 3.59 je patrné opotřebení bříty VBD_2N, nejvíce však na dráze 250 m až 450 m. Na obr. 3.60 lze vidět opotřebení VB na hřbetu nástroje VBD, které dosahuje velikosti 100 µm. I přes tyto známky opotřebení je VBD_2N dále způsobilá k dalšímu testování a navyšování hodnoty obráběné dráhy.

3.2.7 Dílčí zhodnocení druhé série

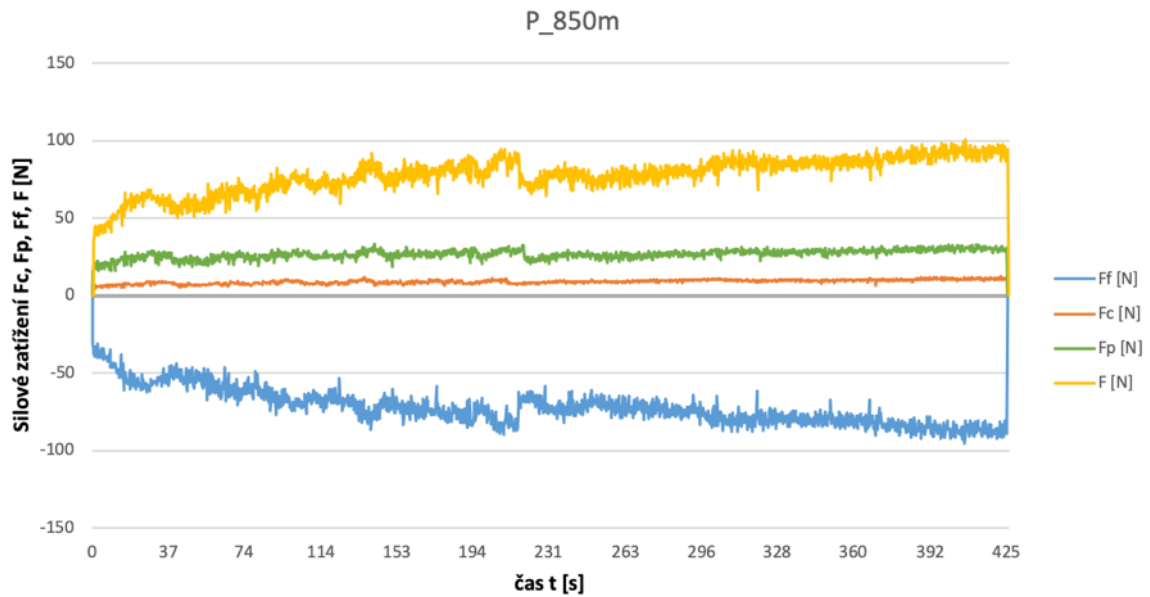
Při druhé sérii testování se dospělo k závěru, že naměřené hodnoty silového zatížení v druhé sérii odpovídají hodnotám z první série (zanedbatelný silový rozdíl). Hodnoty parametrů drsnosti jsou velice podobné u obou sérií. Výsledky z první a druhé série testování mohou být považovány za shodné a odpovídající skutečnosti.

3.3 Opotřebení VBD na dráze 850 m

Pro doplnění experimentu bylo provedeno testování VBD na celkové uražené dráze 850 m pro přerušovaný i nepřerušovaný řez. Pro testování byla použita nová VBD, řezné podmínky byly nastavené stejně jako u předchozích sérií. Dráha 850 m odpovídá délce 133,6 mm na obrobku. Maximální délka, na které bylo možné matici obrábět byla 67 mm, a proto bylo nutné rozdělit obrábění do dvou průjezdů po 425 m.

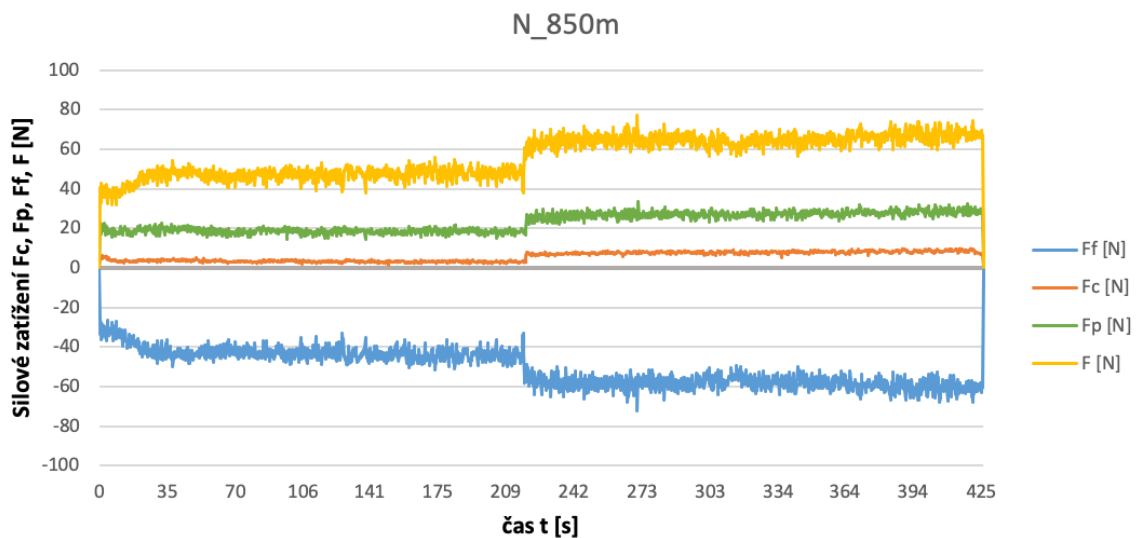
3.3.1 Silové zatížení

Dle výše uvedeného bylo nutné měření zatížení na dráze 850 m rozdělit na dva průjezdy. Naměřená data byla následně upravena a spojena tak, aby bylo možné zanést data do jedné grafické závislosti. V grafické závislosti lze tuto anomálii vidět uprostřed, kde došlo k rozdílným hodnotám naměřených sil.



Obr. 3.61 Grafická závislost silového zatížení – přerušovaný řez na dráze 0 m až 850 m.

Na obr. 3.61 je patrný zlom v čase t mezi 194 a 231 s, který odpovídá ujeté dráze nástroje 425 m. Před tímto zlomem je výsledná síla F kolem hodnoty cca 90 N, což odpovídá výsledkům z první a druhé série přerušovaného řezu. Při dalším nájezdu výsledná síla F klesne a poté opět pozvolna naroste k maximální hodnotě cca 100 N. Pro téměř dvojnásobek obrobené dráhy tedy došlo k nárůstu výsledné síly F o hodnotu cca 10 N. Z provedeného měření vyplývá, že VBD je způsobitelná pro další testování a navyšování hodnoty uražené dráhy.



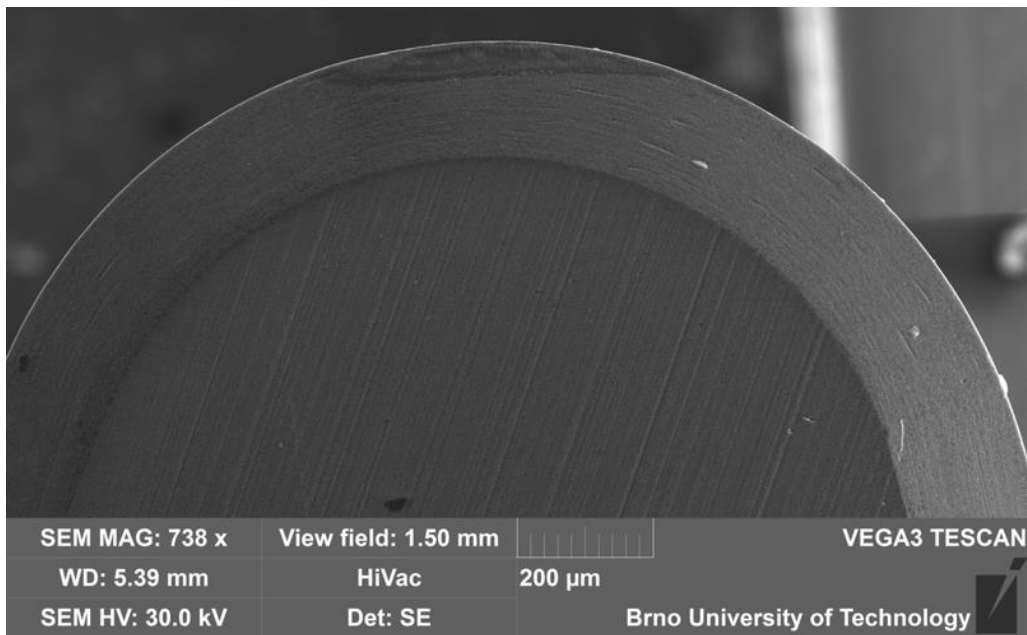
Obr. 3.62 Grafická závislost silového zatížení – nepřerušovaný řez na dráze 0 m až 850 m.

Na obr. 3.62 je patrný zlom v čase t kolem hodnoty 209 s, který odpovídá ujeté dráze 425 m. Před tímto zlomem je výsledná síla F kolem hodnoty cca 50 N. V porovnání s předchozími sériemi to znamená pokles minimálně o cca 10 N. Při druhém nájezdu lze vidět navýšení měřených sil. Nutno však podotknout, že šířka záběru ostří a_p byla nastavena na hodnotu 0,045 mm. Tato hodnota je pro použitý typ a fyzický stav soustruhu velice „nízká“, a proto byl pro přesnější nastavování použit úchylkoměr s magnetickým držákem. I přes tuto skutečnost mohlo dojít k setinovému rozdílu šířky záběru ostří a_p a spolu s nízkými

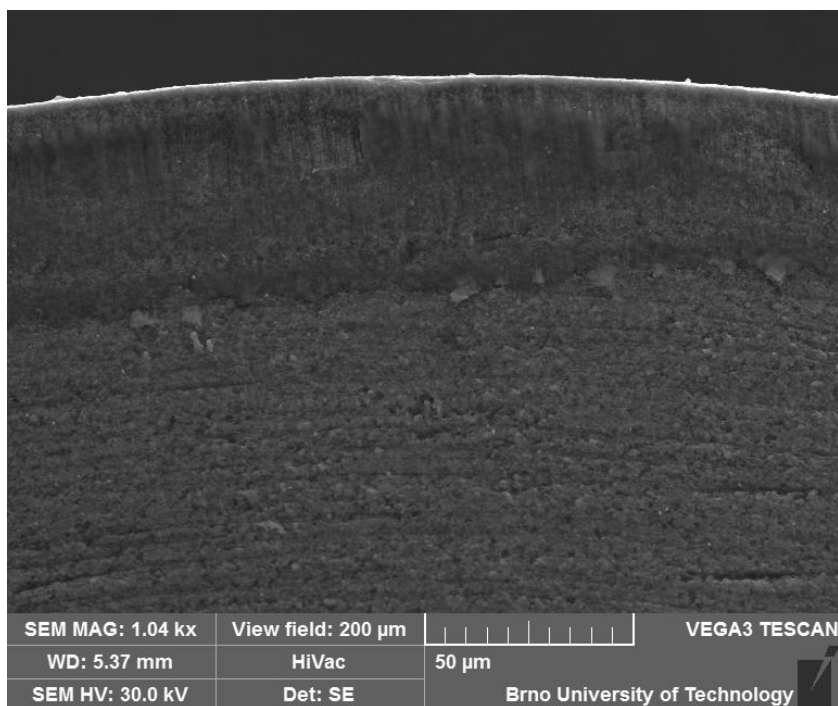
naměřenými silami došlo k projevu ve výsledné grafické závislosti viz obr. 3.62. Na konci obrobené dráhy 850 m měla výsledná síla F hodnotu cca 70 N. Pro téměř dvojnásobek obrobené dráhy tedy došlo k silovému nárůstu pouze o cca 10 N, oproti druhé sérii nepřerušovaného řezu (viz obr. 3.49). Při porovnání s první sérií nepřerušovaného řezu (obr. 3.19) jsou hodnoty silového zatížení shodné. Z provedeného měření vyplývá, že VBD je způsobilá pro další testování a navyšování hodnoty uražené dráhy.

3.3.2 Opotřebení VBD – přerušovaný řez

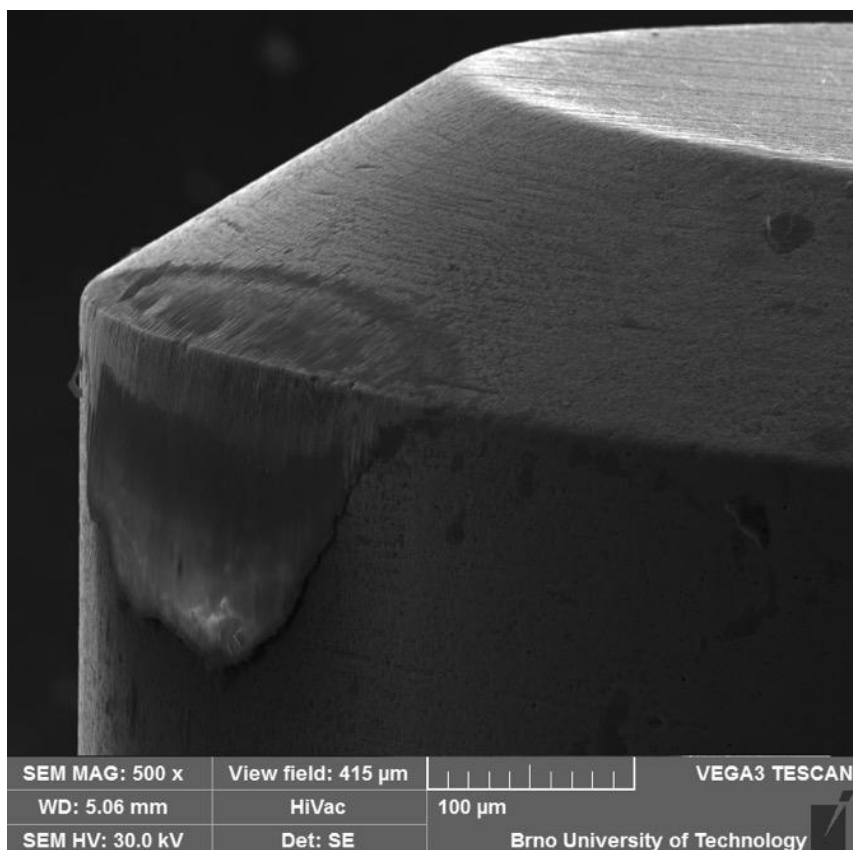
Při obrábění dráhy 850 m byla VBD analyzována pouze na konci ujeté vzdálenosti. Výsledné fotografie jsou zobrazeny na obr. 3.63 až obr. 3.65.



Obr. 3.63 VBD_P po uražení dráhy 850 m.



Obr. 3.64 VBD_P po uražení dráhy 850 m – detail.



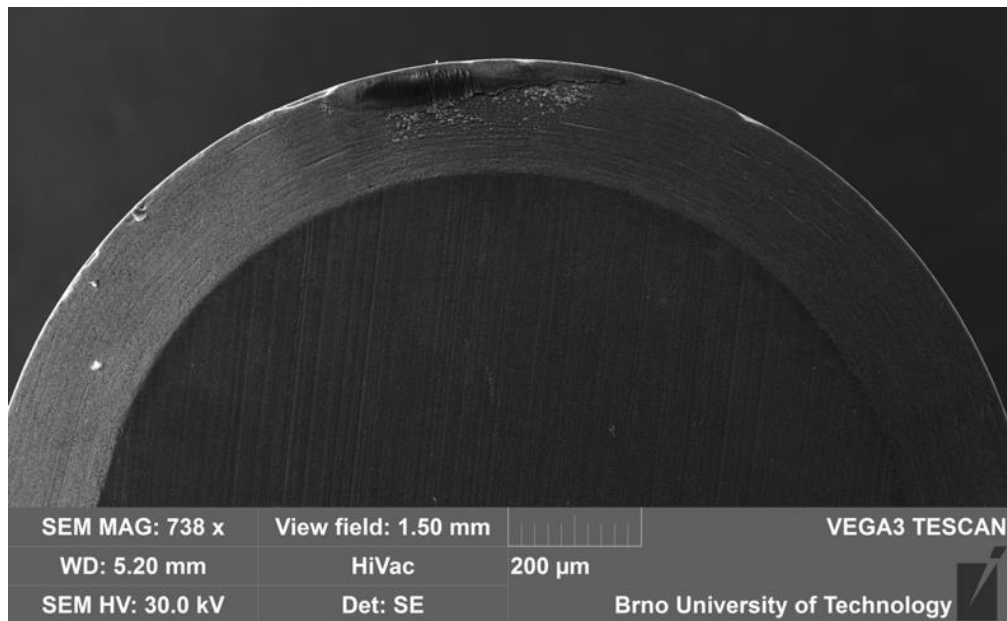
Obr. 3.65 VBD_P po uražení dráhy 850 m – opotřebení VB.

Pokud porovnáme obr. 3.63 s obr. 3.43 z druhé série přerušovaného řezu zjistíme, že opotřebení břitu nástroje je velice podobné, i když celková ujetá dráha vzrostla téměř dvojnásobně. Pokud se zaměříme na porovnání opotřebení VB z obr. 3.45 a obr. 3.65 zjistíme, že u dráhy 850 m je znatelně vyšší. Velikost opotřebení VB je v tomto případě cca 160 µm.

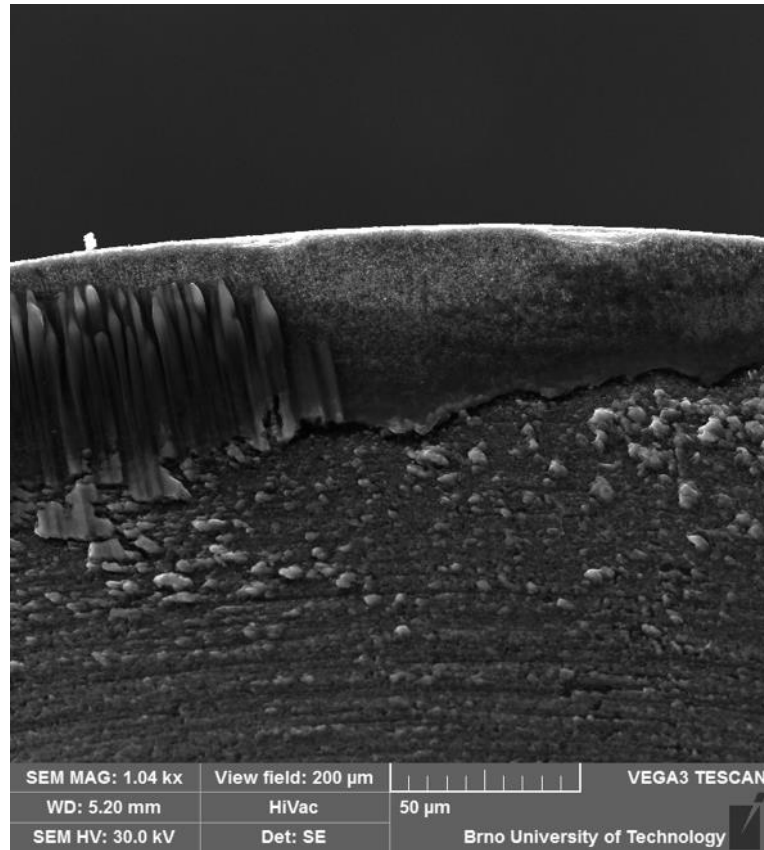
Ani v jednom případě však nedošlo k vyštípnutí nebo ulomení části břitu VBD. Z provedeného měření vyplývá, že VBD_P by byla schopná dalšího testování a navyšování hodnot obráběné dráhy.

3.3.3 Opotřebení VBD – nepřerušovaný řez

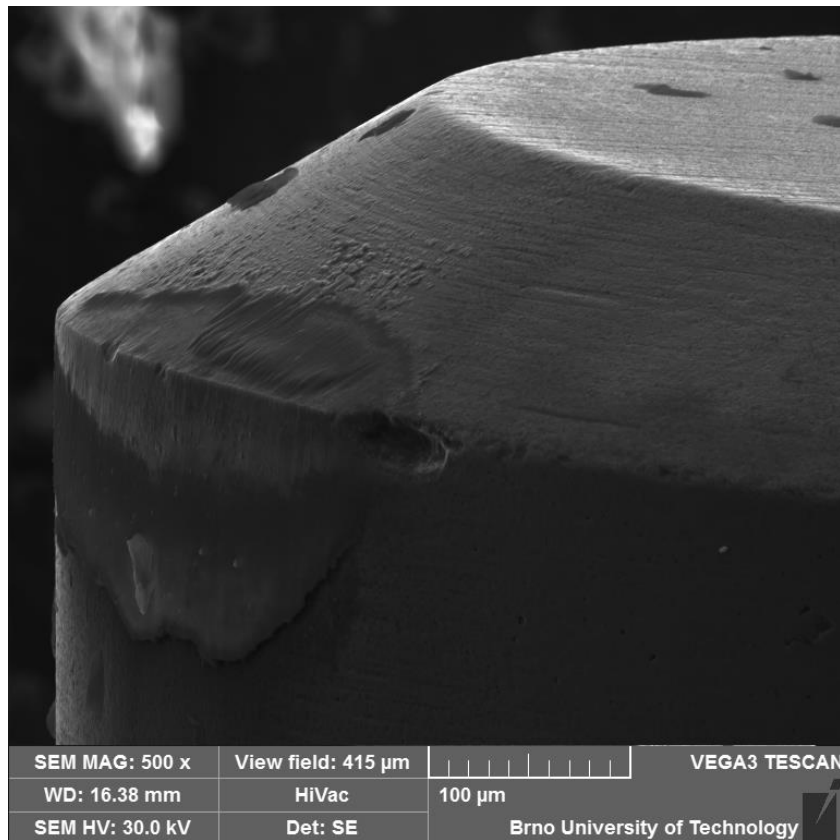
Při obrábění dráhy 850 m byla VBD analyzována pouze na konci ujeté vzdálenosti. Výsledné fotografie jsou zobrazeny na obr. 3.66 až 3.68.



Obr. 3.66 VBD_N po uražení dráhy 850 m.



Obr. 3.67 VBD_N po uražení dráhy 850 m – detail.



Obr. 3.68 VBD_N po uražení dráhy 850 m – opotřebení VB.

Při porovnání obr. 3.66 s obr. 3.58 z druhé série nepřerušovaného řezu lze vidět, že opotřebení břitu VBD je vyšší v případě uražené dráhy 850 m. Při porovnání opotřebení VB, které je na obr. 3.68 s obr. 3.60 z druhé série nepřerušovaného řezu lze pozorovat opět nárůst opotřebení u dráhy 850 m. Hodnota opotřebení VB zde dosahuje velikosti cca 150 μm . Dále si lze povšimnout malého odštípnutí VBD_N viz obr. 3.68. I přes tuto skutečnost by bylo možné pokračovat v testování a navyšování hodnot obráběné dráhy.

3.3.4 Dílčí zhodnocení

V této sérii byla testována VBD na dráze 850 m za stejných řezných podmínek jako u předchozích dvou sérií. Opotřebení břitu na čele při přerušovaném řezu bylo podobné jako u dráhy 450 m. Opotřebení VB na hřbetě nástroje však bylo mnohem vyšší než na dráze 450 m.

U nepřerušovaného řezu opotřebení na čele a opotřebení VB na hřbetě nástroje bylo vyšší u dráhy 850 m, dokonce zde došlo i k drobnému vyštípnutí břitu VBD.

Z provedeného měření vyplývá, že ani u jednoho druhu řezu nebylo opotřebení tak značné, aby zabránilo VBD dalšímu testování a navyšování hodnoty obrobene dráhy.

4 ZÁVĚR

Teoretická část zprávy pojednává o teorii soustružení, která slouží jako základ pro vykonání experimentálních zkoušek. Teorie se zabývá charakteristikou z hlediska kinematiky, řezných sil, použití vhodných řezných nástrojů a způsobu měření opotřebování VBD.

Před samotným provedením experimentu se řešila řada problémů spojených se zkouškami. V první řadě to byla tuhost soustavy Stroj-Nástroj-Obrobek-Přípravek (S-N-O-P), kde docházelo k velkým vibracím a tím i k vysokým parametrům drsnosti obrobene plochy. Z tohoto důvodu tedy bylo nutné vymezit všechny vůle na stroji, především na supportu. Dalším krokem bylo správné uchycení obrobku, kde byly možné tři varianty. Uchycení za vnější průměr obrobku – tento způsob z důvodu zkrácení možné dráhy obrábění a vysoké házivosti byl zamítnut. Další variantou bylo uchycení obrobku mezi hroty (s využitím koníku soustruhu) viz obr. 4.1. Pro tuto variantu byl vytvořen speciální hrot, který byl uchycen do sklíčidla a na něho nasunut obrobek. Ani tento způsob však neměl požadovanou tuhost soustavy S-N-O-P. Poslední variantou bylo uchycení obrobku za vnitřní průměr do sklíčidla soustruhu – tato varianta byla nakonec zvolena.



Obr. 4.1 Uchycení polotovaru mezi hroty.

V dalším kroku bylo nutné vyřešit tuhost přípravku a řezného nástroje. Dle výše uvedeného, přípravek (soustružnický trn) byl vyroben z pružinové oceli a byl uchycen do nožového držáku dvěma šrouby viz obr. 4.2. Stopka přípravku však byla oproti jeho průměru velmi zeslabena viz obr. 4.2 a i přes vymezení vůlí a silné dotažení šroubů zde nebyla dosažena požadovaná tuhost.

Problém byl vyřešen až navařením ocelové pásoviny na stopku přípravku, jeho třískovým opracování a pro zvýšení tuhosti přivařením přípravku k držáku nožového přípravku viz obr. 4.3.

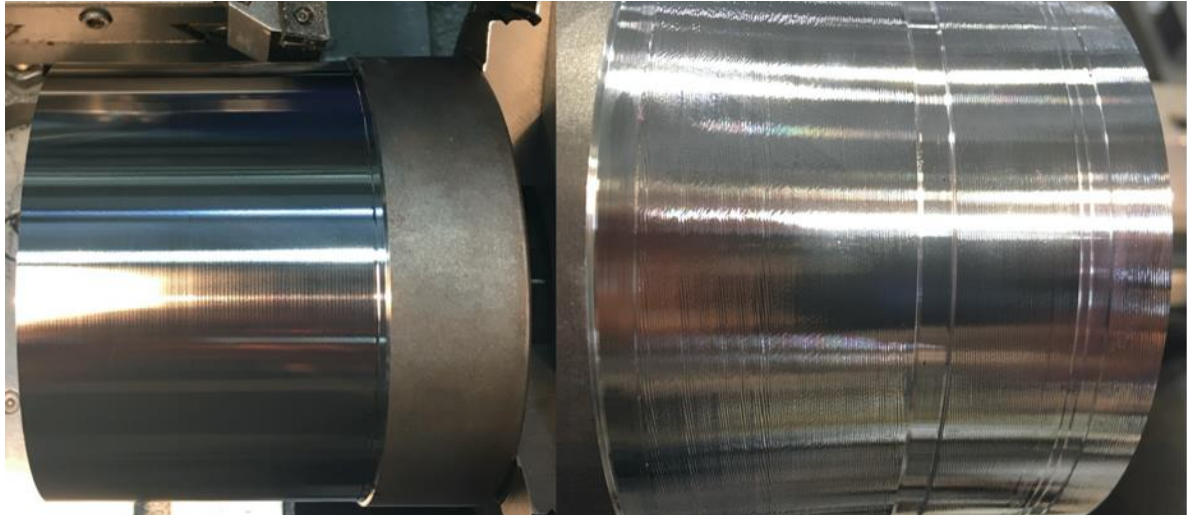


Obr. 4.2 Stopka přípravku.



Obr. 4.3 Přivaření přípravku k přípravku nožového držáku.

Při řešení tuhosti soustavy S-N-O-P byl proveden testovací průjezd na jiném konvenčním soustruhu. Na tento průjezd byl použit klasický soustružnický nůž s karbidovou VBD. Řezné parametry byly nastaveny stejně jako od zadavatele. Drsnost povrchu a vibrace však byly zcela odlišné. Porovnání parametrů drsnosti povrchu pro testovací VBD a karbidovou VBD lze vidět na obr. 4.4. Je však nutné podotknout, že vyložení nástroje u karbidové destičky bylo zcela jiné než u testované VBD.



Obr. 4.4 Porovnání parametrů drsnosti povrchu, vlevo karbidová VBD, vpravo testovaná VBD.

U přerušovaného řezu se v tab. 3.1 a tab. 3.3 parametrů drsnosti vyskytují dvě hodnoty u jednoho měření, což je z důvodu odlišné hodnoty drsnosti v jedné vzdálenosti měření, avšak pootočené zhruba o 180° . Různá drsnost v jedné vzdálenosti měření u přerušovaného řezu může být zapříčiněna vibracemi vznikajícími u přerušovaného řezu. Druhým odůvodněním výskytu tohoto jevu může být rozdílná tvrdost obrobku. Obrobek by podle zadavatele měl být zakalen v celém objemu na tvrdost 60-2 HRC. Z kapitoly 2.1.3. víme, že vzorek 1A (matice bez otvorů) má dle analýzy mikrotvrdosti tvrdost 720 HV, což odpovídá 62 HRC a je v celém objemu matice. U vzorku 2A (matice s otvory) je tvrdost 830 HV, což odpovídá 65 HRC a je v celém objemu matice. Také víme z kapitoly 2.1.1. a 2.1.2, že se jedná o dva rozdílné materiály. Všechny tyto zjištěné poznatky mohly jistou mírou ovlivnit průběh experimentu.

Pro tento druh testování by bylo vhodnější použít obráběcí centrum, které umožňuje plynulou regulaci otáček a přesnější nastavení velikosti třísky. Nastal by ale problém s uchycením dynamometru a přípravku do nožové hlavy. Dále by nebylo možné měřit silové zatížení na nástroji a tím i průběh opotřebení VBD.

V experimentální části byly provedeny celkem 3 série testování na 5 VBD. Dvě série byly testovány na uražené dráze 450 m pro přerušovaný a nepřerušovaný řez. Třetí série pak byla provedena pro dráhu 850 m, opět pro oba typy řezů. Všechny série byly testovány za stejných řezných podmínek (v_c , f , a_p). Jak už víme testovanými materiály byly oceli 100Cr6 a 100CrMnSi6-4 dodané ve dvou kusech polotovarů (matice s otvory, matice bez otvorů). Cílem testování bylo sledování závislosti silového zatížení a parametrů drsnosti povrchu na opotřebení VB u řezného nástroje z VBD.

Z výsledků testování na dráze 450 m vyplývá následující:

- při porovnání výsledků z první a druhé série vyplývá, že dosažené výsledky jsou velmi podobné a lze je tedy brát za odpovídající skutečnosti,
- při měření silového zatížení u první a druhé série na dynamometru KISTLER dochází k pozvolnému zvyšování a konečnému ustálení výsledné síly F . Z důvodu krátké uražené dráhy však nedochází k razantnímu nárůstu výsledné síly F , což by značilo vznikající opotřebení VB na řezném nástroji z VBD,

- u vyhodnocení parametrů drsnosti povrchu obrobku se neprojevuje nárůst hodnot Ra a Rz s přibývajícím obrobenou dráhou, což znamená, že VBD nepřekročila svou trvanlivost a je schopna dalšího testování,
- na snímcích z elektronového mikroskopu TESCAN není ani u první ani u druhé série prokazatelné opotřebení VB u řezného nástroje z VBD, které by znemožňovalo další testování.

První ani druhá série testování tedy neprokázala opotřebení VBD, které by znemožnilo další testování. Přistoupilo se tedy ke třetí sérii testování, která převzala řezné podmínky z předchozích dvou sérií. Testovaná dráha byla 850 m, silové zatížení bylo měřeno v celém průběhu testování a VBD byly analyzovány pouze na konci uražené dráhy.

Z výsledků testování pro dráhu 850 m vyplývá:

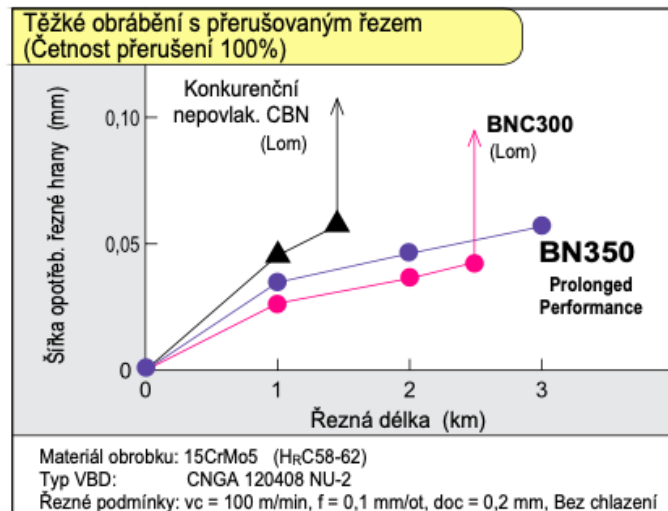
- grafická silová závislost ukazuje pozvolný nárůst u přerušovaného řezu až do vzdálenosti 850 m, kde výsledná síla F dosahuje hodnoty cca 100 N. U nepřerušovaného řezu se výsledná síla F ustálí na hodnotě kolem cca 50/70 N. Pokud tyto hodnoty porovnáme se sérií 450 m, jedná se o nárůst u obou řezů o cca 10 N,
- při porovnání snímků z elektronového mikroskopu TESCAN je vidět u obou druhů řezů nárůst opotřebení VB na hřbetě řezného nástroje. U nepřerušovaného řezu je dokonce malé vyštípnutí řezného nástroje. Zjištěné opotřebení řezného nástroje není tak výrazné, aby zapříčinilo vyřazení VBD a konec její trvanlivosti.

Při technologii soustružení materiálů 100Cr6, 100CrMnSi6-4 a daných řezných podmínkách a povlakovaného řezného nástroje z CBN VBGW 160408 HS-NC2 BNC300 je možné obrábět delší dráhu než 850 m pro přerušovaný i nepřerušovaný řez.

Trvanlivost VBD za daných podmínek při technologii soustružení dosahuje hodnoty $T_{850} = 6,92$ min. Tento čas odpovídá uražené dráze 850 m. Běžná trvanlivost VBD se udává kolem cca $T = 15$ min. Zadavatel mění břit po ujetí dráhy 450 m, která odpovídá času $T_{450} = 3,75$ min, což je 25 % teoretické trvanlivosti VBD [1, 8].

Hraniční opotřebení VB se v praxi běžně uvádí od 0,2 do 0,8 mm. Při experimentu opotřebení VB na hřbetě řezného nástroje dosáhlo nejvyšší hodnoty cca 0,16 mm, a to na dráze 850 m u přerušovaného řezu. Velikost tohoto opotřebení platí pro podmínky testování na dílně FSI VUT v Brně, kde byly dosaženy výše uvedené parametry drsnost Ra a Rz. Hodnoty parametrů drsnosti Ra a Rz nebyly optimální z důvodu tuhosti soustavy S-N-O-P, vyložení řezného nástroje, materiálu přípravku a tvrdosti materiálu obrobku (kolísání mikrotvrdosti) [1, 8].

V katalogu od výrobce VBD byl uveden obr. 4.5 ve kterém použitá VBD BNC 300 urazila vzdálenost 2500 m při šířce opotřebení řezné hrany VB cca 0,04 mm. Řezné podmínky byly nastaveny na $v_c = 100$ m/min, $f = 0,1$ mm, $d_{oc} = a_p = 0,2$ mm. Obrábění přerušovaného řezu probíhalo bez použití procesní kapaliny [11].



Obr. 4.5 Grafická závislost šířky opotřebení řezné hrany na řezné délce [11].

Návrhy na pokračování testování a optimalizaci:

- kontrola správnosti použitého řezného nástroje (levnější varianta při zachování stejné kvality povrchu),
- určení T-v_c závislosti pro použitý řezný nástroj a obráběný materiál,
- tvrdost materiálu obrobku (garantovaná tvrdost obrobku v celém objemu),
- výroba přípravku z oceli třídy 15, minimalizace vyložení řezného nástroje a zvýšení průřezu stopky přípravku (upínací část),
- kontrola správnosti materiálu obrobku (zaručené chemické složení).

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění – 1. část: Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program* [online]. Brno: VUT FSI, Ústav strojírenské technologie, 2003 [vid. 3. dubna 2018]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [2] KOCMAN, Karel, a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [3] KUDELA, Jan. *Analýza opotřebení řezných nástrojů při soustružení konstrukční oceli*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Josef SEDLÁK.
- [4] SANDVIK AB – SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky*. Vyd. 1. Praha: Scientia, s.r.o., 1997, 857 s. ISBN 91-97 22 99-46.
- [5] Nástroje. [online]. Střední odborná škola technická Uherské Hradiště [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <http://www.uh.cz/szegsm/files/sblizovani/pdf/nastroje.pdf>
- [6] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, [2007] [cit. 2020-03-12]. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [7] Focan spol., s.r.o. [online]. © 2019. Všechna práva vyhrazena. [vid. 12. prosince 2019]. Dostupné z: http://www.focam.cz/_data/norms_76_1.xls
- [8] ŠTRAJBL, Jan. *Obráběcí Stroje 1974*. 2. dopl. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, n. p., 1975. L13-E1-III-31/22476.
- [9] TESCAN performance in nanospace: VEGA 3 [online]. [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.tescan.com/en-us/technology/sem/vega3>
- [10] NT – Nové technologie: Drsnoměr TR 100 [online]. [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: http://www.ndt-nt.cz/eshop-produkt/meridla_povrchovych_vrstev/drsnomer_TR_100/cz
- [11] Produktový katalog. *SUMITOMO ELECTRIC Hardmetal* [online]. SUMITOMO ELECTRIC Hardmetal Ltd., 2017 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: https://www.sumitomotool.com/fileadmin/user_upload/Blaetterkataloge/catalogs/Sumitomo_Catalogue_2018-2019_L-M/pdf/complete.pdf
- [12] FOREJT, Milan a Anton HUMÁR. *Experimentální metody: Syllabus* [online]. Brno, 2003 [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Exp_metody_he2.pdf
- [13] Měření opotřebení nástrojů. [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf

- [14] BILÍK, O.: *Obrábění II*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1994. ISBN 80-7078-228-5
- [15] ŽIŽKA, J.: *Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje*. Liberec: TU Liberec, 2003. 106. s ISBN 80-7083-687-1
- [16] Přímé měření sil a momentů. [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf
- [17] VESELÝ, Václav. *Průběh sledování opotřebenosti obráběcího stroje*. Brno, 2018. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně. Fakulta agronomická. Vedoucí práce Michal Černý
- [18] MÁDL, J. - SCHUBERT, V.: *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha: ČVUT Praha, 1985
- [19] Produktový katalog. KISTLER [online]. Kistler Eastern Europe, s.r.o., 2018 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-002e-05.14.pdf>
- [20] Technická dokumentace. [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/td/01-textyVSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf
- [21] Měření drsnosti. M & B Calibr [online]. M & B Calibr, spol. s r.o., ©2019 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.mbcaltbr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [22] Drsnost povrchu. [online]. OVMT – Odborné vzdělání s moderní technikou. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <http://files.ovmt.webnode.cz/200000030-3094f328a0/Drsnost%20povrchu.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Popis
DIN	Deutsche Industrie-Norm
HSS (RO)	High Speed Steel (rychlořezná ocel)
ISO	International Organization for Standardization
SK	slinuté karbidy
TRS	Transverse Rupture Strength – Pevnost v ohybu SK dle normy EN 23 327 [GPa]
VBD	vyměnitelná břitová destička

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Popis
$A\alpha$	[-]	označení hlavního hřbetu nástroje
$A'\alpha$	[-]	označení vedlejšího hřbetu nástroje
$A\gamma$	[-]	označení čela nástroje
K_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
γ_n	[°]	nástrojový úhel čela
T	[min]	trvanlivost nástroje
AD_i	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky
C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp}	[-]	materiálová konstanta pro výpočet řezné síly
F	[N]	celková řezná síla
F_c	[N]	řezná síla
F_f	[N]	posuvová síla
F_p	[N]	pasivní síla
L	[mm]	dráha nástroje při podélném soustružení
L_c	[mm]	dráha nástroje při čelním soustružení
LF	[mm]	celková délka
P_c	[kW]	řezný výkon
Ra	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
Rz	[μm]	výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů
S	[mm]	tloušťka destičky
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
d	[mm]	průměr obrobku
l	[mm]	délka obrobku
n	[min ⁻¹]	otáčky vřetene
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[mm.min ⁻¹]	posuvová rychlost
x_{Fc}, x_{Ff}, x_{Fp}	[-]	exponent vlivu šířky záběru ostří a_p
y_{Fc}, y_{Ff}, y_{Fp}	[-]	exponent vlivu posuvu f

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA č. 1 – Výkres matice kuličkového šroubu typu A (bez příruby),
č.v. 3 813784 37.