

Vliv volby technologie obrábění na jakost výrobku

Bc. Dominik Janečka

Diplomová práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Dominik Janečka
Osobní číslo:	T17573
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Vliv volby technologie obrábění na jakost výrobku

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární rešerši na dané téma
- Proveďte návrh experimentu
- Proveďte měření a vyhodnocení dat
- Data statisticky zpracujte

Forma zpracování diplomové práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

KOČMAN, Karel, a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

FOREJT, Milan, a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. Strojírenská technologie 3. 2. Vyd. Praha: Scientia, 2005, 256 s. ISBN 80-718-3337-1.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Řezníček, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na zkoumání vlivu technologických parametrů a technologie na výslednou jakost povrchu výrobku. Teoretická část je věnována současným možnostem dokončovacích operací a následné měření jakosti povrchu. Praktická část se zabývá samotnou výrobou zkušebních těles a s tím související volbou technologických parametrů. Dále se praktická část zaměřuje na měření a následné vyhodnocení jakosti povrchu pro jednotlivé podmínky. Výsledkem je vyhodnocení vhodnosti použití technologie soustružení za tvrda namísto broušení.

Klíčová slova: broušení, soustružení, kubický nitrid boru, jakost povrchu

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on a study of the effect of surface quality of the component and the influence of technological parameters on the final surface quality of product. The theoretical part is devoted to the current possibilities of finishing and subsequent measurement of surface quality. The practical part deals with the production of test bodies and related optimization of technological parameters. The practical part of this thesis is also focused on the measurement and evaluation of the surface quality for individual manufacturing conditions. Final outcome is evaluation of manufacturing process suitability by comparing process of hard turning and grinding.

Keywords: grinding, turning, cubic boron nitride, surface quality

Děkuji tímto vedoucímu práce Ing. Martinu Řezníčkovi, Ph.D. za cenné připomínky, trpělivost a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svojí rodině a svým přátelům za podporu během celého mého studia.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 TECHNOLOGIE BROUŠENÍ.....	11
1.1 METODY BROUŠENÍ.....	14
1.2 KINEMATIKA BROUŠENÍ.....	15
1.3 JEDNOTKOVÝ STROJNÍ ČAS.....	17
1.4 ZÁKLADNÍ DRUHY BROUSICÍCH MATERIÁLŮ.....	19
2 TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ.....	21
2.1 KINEMATIKA SOUSTRUŽENÍ.....	21
2.2 JEDNOTKOVÝ STROJNÍ ČAS.....	22
3 TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ KALENÝCH DÍLŮ.....	24
3.1 ROZDÍLY PŘI OBRÁBĚNÍ ZA TVRDA.....	24
3.2 POŽADAVKY NA OBRÁBĚCÍ STROJE.....	25
3.3 ŘEZNÉ MATERIÁLY K OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH MATERIÁLŮ.....	26
3.3.1 Cermety.....	26
3.3.2 Řezná keramika.....	26
3.3.3 Polykrystalický kubický nitrid bóru.....	27
4 PARAMETRY URČUJÍCÍ KVALITU OBROBENÉ PLOCHY.....	28
4.1 PARAMETRY STRUKTURY POVRCHU.....	28
4.2 PARAMETRY PROFILU NEROVNOSTI.....	29
4.3 VÝŠKOVÉ (AMPLITUDOVÉ) PARAMETRY.....	29
5 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ POVRCHU.....	31
5.1 KONTAKTNÍ SNÍMAČE.....	31
5.2 BEZKONTAKTNÍ SNÍMAČE.....	32
6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	34
6.1 STATISTICKÝ SOUBOR.....	34
6.2 STATISTICKÉ PARAMETRY.....	34
6.2.1 Základní statistické vlastnosti.....	34
6.2.2 Aritmetický průměr.....	34
6.2.3 Medián.....	35
6.2.4 Směrodatná odchylka.....	35
6.3 METODY ZOBRAZENÍ KVANTITATIVNÍCH DAT.....	36
6.3.1 Graf časové řady.....	36
6.3.2 Histogram.....	37
6.3.3 Krabicový (boxplot) graf.....	37
6.3.4 Grubbsův parametrický test extrémních odchylek.....	38

6.4	TESTOVÁNÍ HYPOTÉZ	39
6.4.1	Procedury pro testování hypotéz	39
6.4.2	Určení statistické hypotéz	39
6.4.3	Hladina významnosti testu	40
II	PRAKTICKÁ ČÁST	41
7	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	42
8	OBROBĚNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	43
8.1	NÁVRH ZKUŠEBNÍHO VZORKU	43
8.2	SOUSTRUŽENÍ ZKUŠEBNÍHO TĚLESA	44
8.3	ŘEZNÝ NÁSTROJ A DEFINICE PODMÍNEK OBRÁBĚNÍ	45
8.4	BROUŠENÍ ZKUŠEBNÍHO TĚLESA	48
8.5	POUŽITÝ BROUSICÍ KOTOUČ	49
9	MĚŘENÍ.....	51
10	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	54
10.1	ANALÝZA EXPERIMENTÁLNÍCH DAT	54
10.2	OPTIMALIZACE EXPERIMENTÁLNÍCH DAT	56
10.3	ZHODNOCENÍ KONTROLY DAT	60
10.4	PREZENTACE VÝSLEDKŮ	60
11	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	64
11.1	NEJVĚTŠÍ VÝŠKY PROFILU – RZ	64
11.2	SROVNÁNÍ PRŮMĚRNÉ ARITMETICKÉ ÚCHYLKY PROFILU – RA	65
11.3	SROVNÁNÍ MATERIÁLOVÉHO PODÍLU PROFILU – RMR	65
12	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	67
	ZÁVĚR	69
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	70
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	74
	SEZNAM OBRÁZKŮ	77
	SEZNAM TABULEK.....	79
	SEZNAM PŘÍLOH.....	80

ÚVOD

Zvyšující se požadavky na výrobky dnešní doby s sebou nesou také zvyšování nároků na technologie a metody, jejichž prostřednictvím jsou tyto požadavky realizovány.

Ve strojírenství je z technologického a funkčního hlediska kladen vysoký nárok na rozměrovou a geometrickou přesnost a v neposlední řadě na jakost povrchu. Povrch součásti je ve vysoké míře prostředkem pro vzájemnou interakci součásti s okolím či ostatními součástmi a jsou na něj kladeny vysoké nároky. Při volbě způsobu dokončení povrchu je nutné zhodnotit požadavky, které jsou na výrobek kladeny, a zvolit technologii nebo metodu, která bude nejefektivnější pro danou součást.

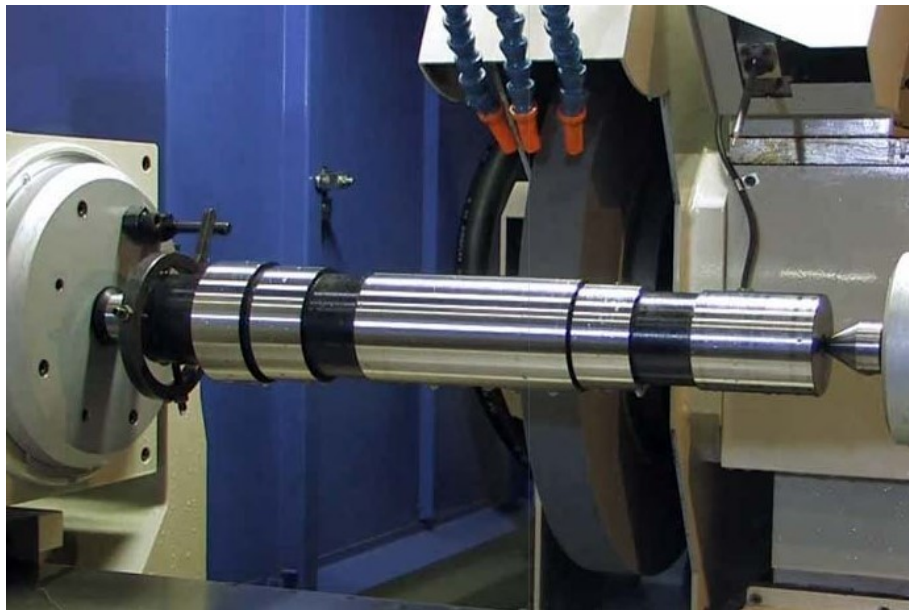
V současné době je konvenční broušení nahrazováno soustružením. Základním rozdílem mezi soustružením a broušením je, že při broušení nástroj vykonává hlavní řezný pohyb, a obrobek koná vedlejší pohyb. Při soustružení je tomu naopak, hlavní řezný pohyb vykonává obrobek, zatímco nástroj opisuje danou konturu. Vysoká rychlost brusného kamene způsobuje, že se obráběný materiál rozmělnuje do velkého množství malinkých třísek, poněvadž brusné zrno má na svém povrchu mnoho „řezných hran“. Při soustružení vzniká dlouhá tříska, která se téměř vždy rozláme na menší části. Je tedy zřejmé, že broušení je více náročné na čas a energii než soustružení.

V mnoha případech je tedy soustružení tvrdých kovů úspornější alternativou ke konvenčnímu broušení, poněvadž tvrzené obrobky lze obrábět na jedno upnutí, což výrazně zkracuje pracovní čas stroje. Další výhodou je, že se lze obejít bez procesní kapaliny.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE BROUŠENÍ

Brousící proces (Obr. 1) spočívá v hromadném mikrořezání (odírání) povrchové vrstvy materiálu. K tomuto účelu se využívá mnohobřítý nástroj s nedefinovaným úhlem ostří, který je tvořen zrny brusiva, spojenými pojivem. Proces probíhá při vysokých rychlostech nejčastěji do $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, v některých případech se může řezná rychlost pohybovat i kolem $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Charakteristické jsou malé průřezy třísky, odebírané jedním zrnem, běžný je velký úhel řezu. To má za příčinu vznik značných teplot a velkého řezného odporu. [1,2,4]

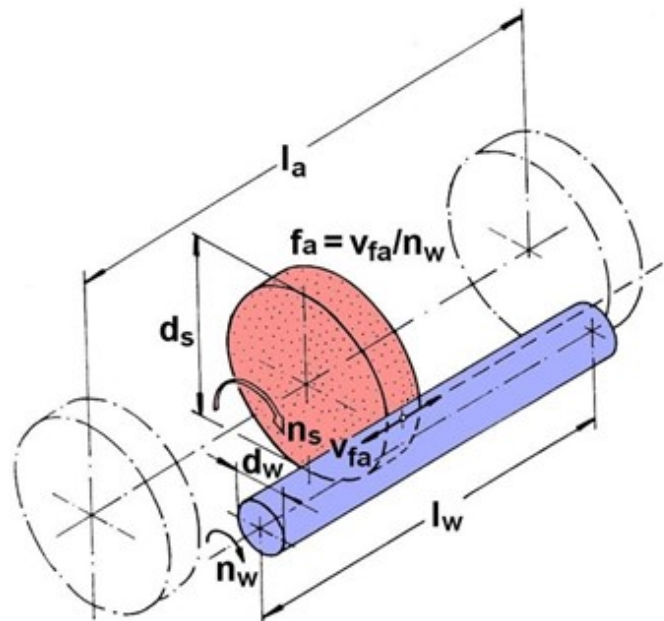


Obr. 1 Ukázka vnějšího broušení mezi hroty [3]

Broušení jako metoda obrábění na čisto se vyznačuje:

- vysokou produktivitou určenou velikostí plochy obrobku, opracované za určitou časovou jednotku
- vysokou přesností obrobených rozměrů až do $1 \mu\text{m}$,
- velkou geometrickou přesností tvaru obrobených ploch,
- vysokou kvalitou povrchu – obvykle v desetinách μm ,
- vysokou kvalitou povrchové vrstvy obrobku s minimálním stavem napjatosti jeho materiálu,
- možností obrábění velmi tvrdých materiálů (kalené oceli, slinutých karbidů, minerál-keramických materiálů atd.), protože zrna brusiva nástroje jsou velmi tvrdá a tepelně odolná. Tím, že se při broušení odebírá množství velmi jemných

třísek z povrchu obrobku při působení malých řezných sil, se dosahuje velmi dobrých vlastností součástí. [2]



Obr. 2 Broušení vnějších válcových ploch s posuvem podél osy obrobku [4]

l_a – délka axiální dráhy broušícího kotouče [mm],

d_s – průměr broušícího kotouče [mm],

l_w – délka obrobku [mm],

d_w – průměr obrobku [mm],

n_s – frekvence otáčení broušícího kotouče [min^{-1}],

n_w – frekvence otáčení obrobku [min^{-1}],

v_{fa} – axiální rychlost posuvu [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],

f_a – axiální posuv [mm]. [4]

Mezi jednotlivými způsoby obrábění kovů není zásadní rozdíl, protože vytváření třísek na řezných plochách různými obráběcími nástroji probíhá vždy stejně, nezávisle na konstrukci a tvaru nástroje. Ve všech případech je řezání postupný smyk nebo skluz jednotlivých částic (třísek), způsobovaný klínem, na který působí určitá řezná síla. To zhruba platí i pro broušení kovů. [2]

Celkový počet třísek ubíraných broušícím kotoučem za časovou jednotku je neobyčejně velký. Protože zrna brusiva působí při broušení na povrchovou vrstvu pouze v místě styku

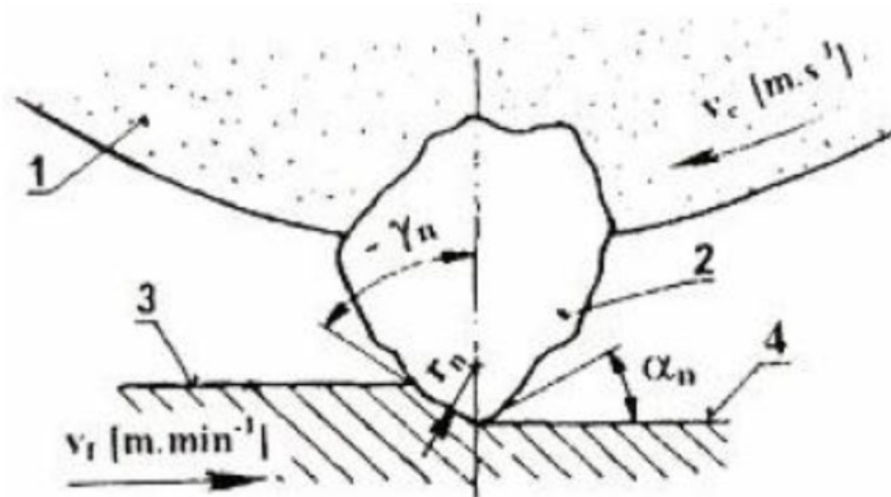
kotouče s obráběným materiálem, vznikají zde značné teploty, které ovlivňují průběh broušení a vlastnosti povrchové vrstvy obrobku. V místě působení jednotlivých zrn mohou vzniknout vysoké okamžité teploty, které se často blíží k teplotě tavení obráběného materiálu [2].

Zdrojem tepla vznikajícího při broušení je hlavně práce plastických deformací obráběného materiálu a práce vnějšího tření zrn brusiva a pojiva o povrch materiálu. Třecí síly vzrůstají zvláště při práci s otupeným broušicím kotoučem. [2]

Při broušení kovových obrobků broušicími kotouči se prudce zvyšuje plasticita kovu v místě působení zrna. To se příznivě projevuje při ubírání třísky zaoblenými zrny kotouče. Povrchová vrstva broušené plochy je souborem mikronerovností, které mají nerovnoměrnou rozteč a relativně velké výškové rozdíly. [2]

Povrch krystalu brusiva má vždy určitou drsnost, kterou způsobuje jeho vnitřní nedokonalost nebo podmínky jeho vzniku. Největší drsnost povrchu mají syntetické diamanty. [2]

Všechna zrna kotouče nemohou být rovnoměrně zatížena, protože jsou různě vysoká. Brusný kotouč má nedokonalý geometrický tvar a jisté házení. Nejvíce zatížená zrna jsou vystupující nad ideální válcový povrch, zatímco ostatní snížená zrna určitou dobu nepracují. Tato zrna začínají působit pouze po přirozeném opotřebování vyšších zrn nebo po orvnání kotouče. [2]



Obr. 3 Model záběru broušícího zrna [1]

v_c – řezná rychlost, v_f – posunová rychlost, γ_n – normálový úhel čela, α_n – normálový úhel hřbetu, r_n – poloměr zaoblení ostří

1 – broušící kotouč, 2 – broušící zrno, 3 – obráběná plocha, 4 – obrobená plocha

1.1 Metody broušení

Proces broušení se vykonává různými metodami, které jsou definovány podle různých kritérií. Jednotlivá kritéria jsou:

Tvar obrobeného povrchu a způsob jeho vytváření:

- rovinné broušení – výsledkem je rovinná plocha,
- broušení do kulata – výsledkem je rotační povrch,
- broušení na otáčivém stole – broušení s rotačním posuvem,
- tvarovací broušení – typ broušení kde není výsledkem plochý, ani válcový povrch (např. broušení závitů, ozubených kol atd.),
- kopírovací broušení – tvarové broušení,
- broušení tvarovými broušicími kotouči.

Aktivní část broušících kotoučů

- obvodové broušení – broušení obvodem kotouče,
- čelní broušení – broušení čelem kotouče kolmým k jeho ose.

Vzájemná poloha broušícího kotouče a obrobku

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

Hlavní pohyb posuvu stolu vzhledem k broušícímu kotouči

- axiální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s osou kotouče,
- tangenciální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě,
- radiální broušení – hlavní posuv stolu je radiální vzhledem ke kotouči,
- obvodové zapichovací broušení – broušení s plynulým radiálním posuvem stolu,
- čelní zapichovací broušení – broušení s plynulým axiálním posuvem stolu.

Vzájemný vztah tangenciálních rychlostí broušících kotoučů a obrobku ve zvoleném bod

- protiběžné broušení – broušení s opačným směrem pohybu broušícího kotouče a obrobku,

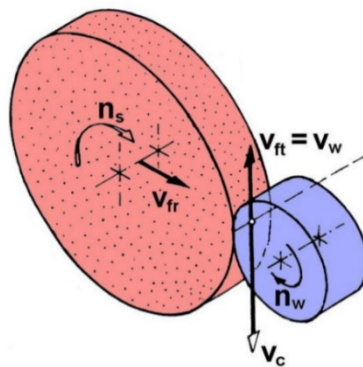
- souběžné broušení – broušení se stejným směrem pohybu brousícího kotouče a obrobku.

Typ brousícího nástroje

- vázaným brusivem – zrna brusného materiálu jsou spojena pojivem do určitého tvaru,
- volné brusivo – zrna nejsou stmelena pojivem, vyskytují se ve formě prášku. [4]

1.2 Kinematika broušení

Směr pohyby a rychlosti pohybů při broušení jsou definovány na základě charakteristik jednotlivých způsobů broušení - např. pro obvodové vnější broušení do kulata radiálním nebo axiálním způsobem. [4]



Obr. 4 Kinematika broušení vnějších válcových ploch [4]

n_s – frekvence otáčení brousícího kotouče [min^{-1}],

n_w – frekvence otáčení obrobku [min^{-1}],

V_w – obvodová rychlost obrobku [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$],

V_{ft} – tangenciální rychlost posuvu [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$],

V_{fr} – radiální rychlost posuvu [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$],

V_c – řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

Řezná rychlost v_c se vyjádří vztahem (1.1)

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.1)$$

kde: d_s – průměr brusného kotouče [mm],

n_s – frekvence otáčení kotouče [min^{-1}].

Řezná rychlost při běžném broušení dosahuje hodnot okolo 30 až 35 m.s⁻¹. Při rychlostním broušení je nutné využití kotouče se speciálním druhem pojiva a řezná rychlost obvykle přesahuje 80 m.s⁻¹, ve zvláštních případech až 180 m.s⁻¹. [4]

Obvodová rychlost obrobku v_w při broušení do kulata se vyjádří vztahem

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.2)$$

kde: d_w – průměr obrobku [mm],

n_w – frekvence otáčení obrobku [min⁻¹].

Stykový oblouk broušícího kotouče a obrobku lze kvantifikovat jako geometrickou délku styku l_g , kinematickou délku styku l_k nebo skutečnou délku styku l_e . Pro běžné podmínky obvodového broušení je geometrická délka styku dána vztahem

$$l_g = \sqrt{2 \cdot f_r \cdot r_{eq}} \quad [\text{mm}] \quad (1.3)$$

kde: f_r – radiální posuv stolu brusky [mm],

r_{eq} – ekvivalent poloměru broušícího kotouče [mm].

Kinematická délka styku se vyjádří vztahem

$$l_k = l_g \cdot \left(1 + \frac{1}{q}\right) \quad [\text{mm}] \quad (1.4)$$

kde: q [-] je poměr rychlosti, který se pro broušení do kulata stanoví podle vztahu (1.5)

$$q = \frac{60 \cdot v_c}{W_w} \quad [-] \quad (1.5)$$

a pro rovinné broušení podle vztahu (1.6)

$$q = \frac{60 \cdot v_c}{W_{ft}} \quad [-] \quad (1.6)$$

kde: v_c – řezná rychlost [m.s⁻¹],

W_w – obvodová rychlost obrobku [m.min⁻¹],

W_{ft} – tangenciální rychlost posuvu stolu brusky [m.min⁻¹].

Ekvivalent poloměru broušícího kotouče r_{eq} je poloměr fiktivního brusného kotouče, který má v záběru s obrobkem stejnou délku geometrického styku l_g jako broušící kotouč s poloměrem r_s , v záběru s obrobkem o poloměru r_w při obvodovém broušení. Hodnota r_{eq} se vyjádří pomocí vztahu (1.7). [4]

$$r_{eq} = \frac{r_w \cdot r_s}{r_w \pm r_s} \quad [\text{mm}] \quad (1.7)$$

Ve vztahu (1.7) se pro vnější broušení do kulata použije znaménko plus a pro vnitřní broušení do kulata znaménko minus. [4]

1.3 Jednotkový strojní čas

Výpočet hodnoty jednotkového strojního času závislý na způsobu broušení. Např. vnější axiální broušení s radiálním posuvem stolu o hodnotu f_r na každý zdvih stolu, bez vyjiskřování má vztah pro výpočet jednotkového strojního času: [4]

$$t_{as} = \frac{l_a}{f_a \cdot n_w} \cdot \frac{p}{2 \cdot f_r} = \frac{l_a \cdot p}{2 \cdot 10^3 \cdot v_{fa} \cdot f_r} \quad [\text{min}] \quad (1.8)$$

$l_a = l_{na} + l_w + l_{pa}$ – dráha pohybu stolu brusky v axiálním směru [mm],

l_{na} – délka náběhu v axiálním směru [mm],

$l_{pa} = l_{na} + b_s/2$ – délka přeběhu v axiálním směru [mm],

b_s – šířka broušícího kotouče [mm],

l_w – délka obrobku [mm],

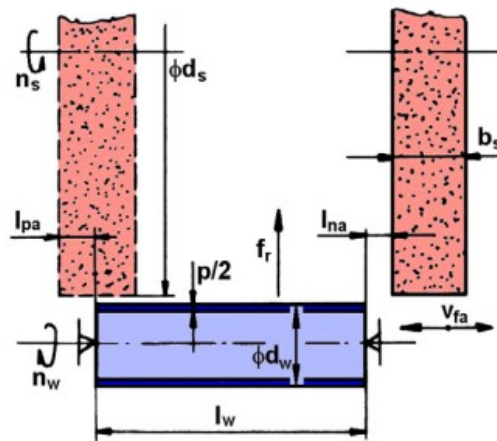
f_a – axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku [mm],

n_w – frekvence otáčení obrobku [min^{-1}],

p – přídavek na broušení [mm],

f_r – radiální posuv stolu brusky na jeden axiální zdvih stolu [mm],

v_{fa} – axiální rychlost posuvu stolu brusky [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$].



Obr. 5 Schéma pro výpočet t_{as} pro obvodové axiální broušení [4]

Výpočet jednotkového strojního času pro rovinné obvodové broušení s přímočarým pohybem stolu při axiálním posuvu stolu o hodnotu f_a na každý zdvih stolu, bez vyjiskřování: [4]

$$t_{as} = \frac{l_t}{10^3 \cdot v_{ft}} \cdot \frac{l_a}{f_a} \cdot \frac{p}{a_e} \quad [min] \quad (1.9)$$

$l_t = l_{at} + l_w + l_{pt}$ – dráha pohybu stolu brusky v tangenciálním směru [mm],

$l_{at} = \sqrt{3 \cdot d_s + 9}$ - délka náběhu v tangenciálním směru [mm],

d_s – průměr broušícího kotouče [mm],

$l_{pt} = l_{at}$ – délka přeběhu v tangenciálním směru [mm],

l_w – délka obrobku [mm],

v_{ft} – tangenciální rychlost posuvu stolu brusky [$m \cdot min^{-1}$],

$l_a = l_{na} + b_w + l_{pa}$ – dráha pohybu stolu brusky v axiálním směru [mm],

$l_{na} = b_s/2$ – délka náběhu v axiálním směru [mm],

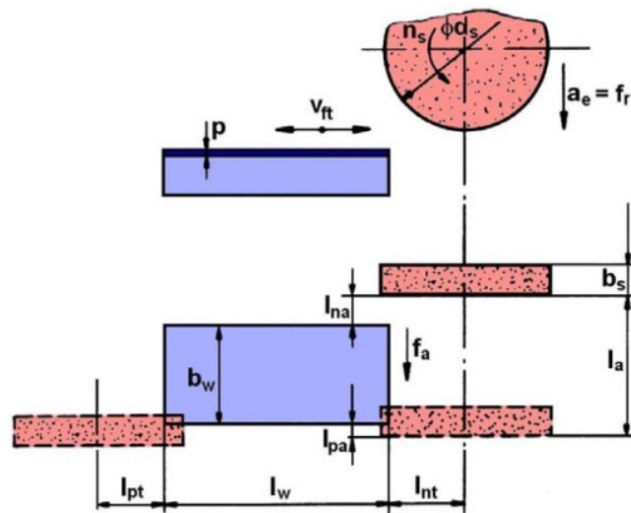
b_w – šířka broušené plochy [mm],

l_{pa} – délka přeběhu v axiálním směru [mm],

f_a – axiální posuv stolu brusky na jeden zdvih v tangenciálním směru [mm],

p – přídavek na broušení [mm],

a_e – pracovní záběr [mm]. [4]



Obr. 6 Schéma pro výpočet t_{as} pro rovinné obvodové broušení [4]

1.4 Základní druhy brousicích materiálů

Materiál zrna ovlivňuje výrazně vlastnosti povrchu nejen svými geometrickými parametry, ale také fyzikálními a chemickými jako je tepelná vodivost, schopnost vazby k pojivu atd. Materiály brousicích kotoučů dělíme na přírodní a umělé (syntetické). [36]

Přírodní brousicí materiály

Z přírodních brousicích materiálů se používá korund, smírek a křemen. Přírodní brusiva se úspěšně nahrazují umělými. [2]

Přírodní diamant

Je modifikací uhlíku krystalické struktury, která obvykle obsahuje nevelké množství příměsí různých chemických prvků. [2]

Korund

Minerál skládající se hlavně z krystalického oxidu hlinitého (až 80 až 90 % Al_2O_3) s příměsí dalších minerálů. Je to velmi tvrdý, nepříliš křehký materiál. [2]

Smírek

Je minerál na bázi krystalického oxidu hlinitého, obsahující ne více než 60 % Al_2O_3 . Různé vedlejší příměsí snižují v porovnání s korundem jeho brusné vlastnosti. [2]

Křemen

Je minerál, který obsahuje hlavně oxid křemičitý a příměsí dalších minerálů. [2]

Syntetické brousící materiály

Umělá brusiva se získávají tavením v pecích. Po vychladnutí se rozbíjejí na kousky, které se v drtičkách drtí na zrno a prášek. [2]

Umělý diamant

Získává se pomocí katalyzátoru z materiálu obsahující uhlík. Jako výchozí materiál se používá pro výrobu umělého diamantu grafit. [2]

Kubický nitrid boru

Velmi tvrdý materiál, obsahuje 43,6 % boru a 56,4 % dusíku. Krystalografické mřížka se podobá mřížce diamantu, což znamená, že má stejnou stavbu, ale obsahuje atomy boru a dusíku. [2]

Karbid křemíku

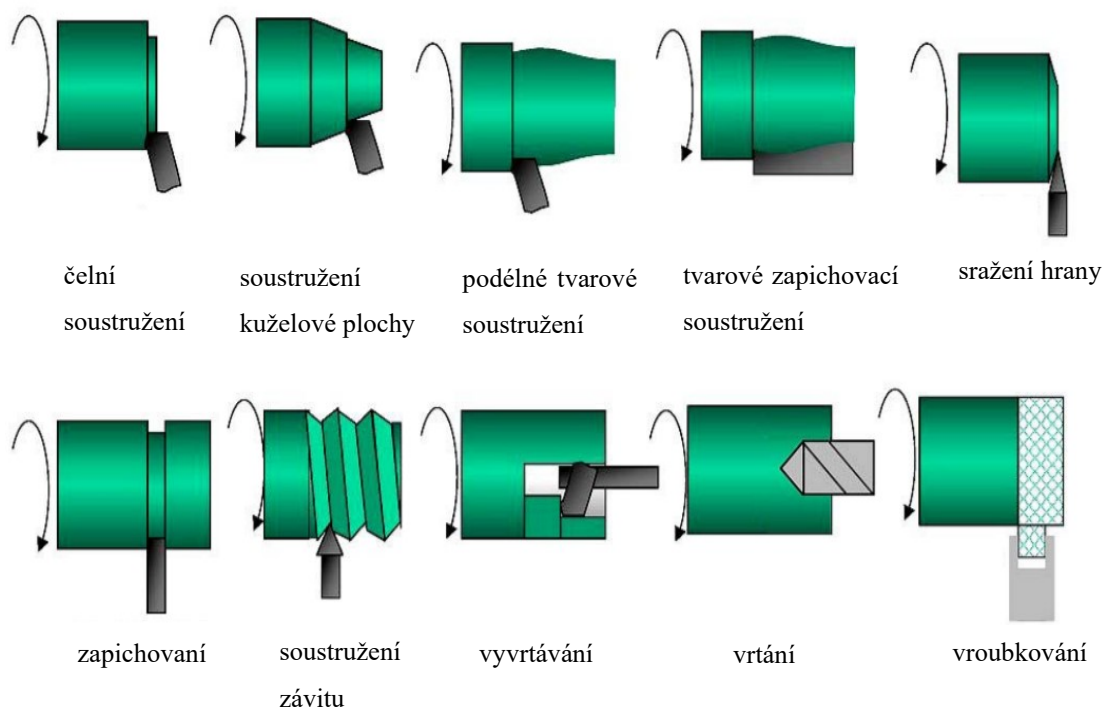
Jedná se o sloučeninu křemíku s uhlíkem (SiC). Technický karbid křemíku bývá dvojího druhu, zelený a černý karbid. Zelený karbid se používá hlavně k ostření nástrojů ze slinitých karbidů. Černý karbid křemíku se používá na broušení kovů s malou pevností v tahu. [2]

Karbid bóru

Obsahuje krystalický karbid boru (do 94 % B₄C) a malé množství příměsí. Vyrábí se v elektrických pecích z technické kyseliny borité (B₂O₃) a uhlíčitého materiálu s malým obsahem popela ropného koksu. [2]

2 TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ

Technologie soustružení patří k nejstarší metodě obrábění. Vznik této technologie se datuje do 13. století. Je to metoda, která se používá pro výrobu rotačních součástí. Většina součástí strojů je tvořena právě rotačními plochami, které jsou vyrobeny za použití této technologie. Více než třetina obráběcích úkonů je realizována na soustruzích, tudíž technologie soustružení patří k nejpoužívanějším obráběcím metodám. Za pomoci soustružení lze zhotovovat vnější i vnitřní válcové, kuželové i tvarové plochy, zápichy a rovinné čelní ploch. Mimo soustružení lze na soustruzích dále vrtat, vyvrtávat, hladit, řezat závity, leštit, vroubkovat (Obr. 7) nebo vyrábět hřbetní plochy tvarových fréz. K soustružení se zpravidla používá jednobřítý nástroj. Přesto se jedná o velmi všestranný postup, při kterém je potřeba zohlednit mnoho faktorů ovlivňujících řezný nástroj. K těmto faktorům patří tvar obrobku, materiál obráběné součásti, podmínky při soustružení, způsob obrábění nebo také náklady apod. [5,6,7,8,9]



Obr. 7 Základní druhy operací při soustružení [5]

2.1 Kinematika soustružení

Hlavním pohybem při soustružení je pohyb rotační koná ho obrobek. Obrobek upnutý ve sklíčidle rotuje se stanovenými otáčkami za minutu, které mu dodává vřeten. Řezná

rychlost v_c , které je dána vztahem (2.1), se rovná obvodové rychlosti bodu na obvodě obrobku. Řezná rychlost je tedy rychlostí, kterou se pohybuje obrobek ve směru proti břítu nástroje. Je důležité si uvědomit, že řezná rychlost je závislá na průměru soustružené součásti D a na otáčkách vřetene n , a proto její hodnota zůstává konstantní, pokud jsou otáčky vřetene a průměru součásti nezměněny. [5,7,8,10]

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.1)$$

Vedlejší pohyb při soustružení vůči obrobku vykonává nástroj. Posuvová rychlost v_f nástroje dle vztahu (2.2) je definována otáčkami obrobku n a posuvem na otáčku f . [4,8]

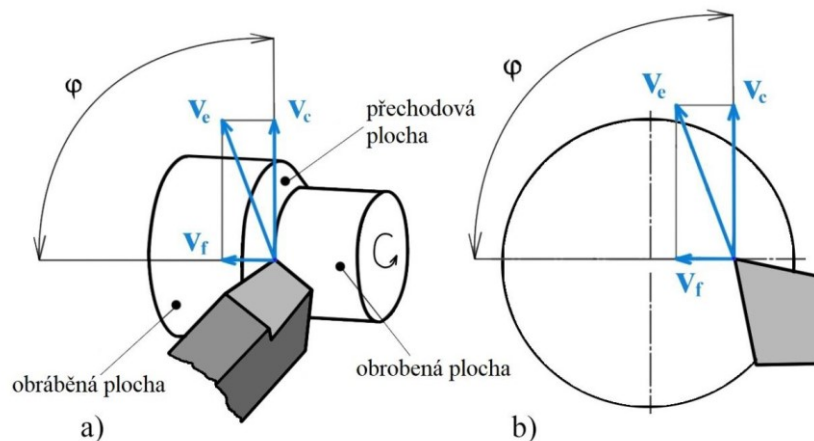
$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.2)$$

Účinný výsledný pohyb v_e dle vztahu (2.3) je určen vektorovým součtem posuvového a řezného pohybu. Směry vektorů v_e , v_f a v_c jsou znázorněny na Obr. 8. [4,8]

$$v_e = v_f + v_c \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.3)$$

Vztah (2.4) je skalárním tvarem vztahu (2.3): [8]

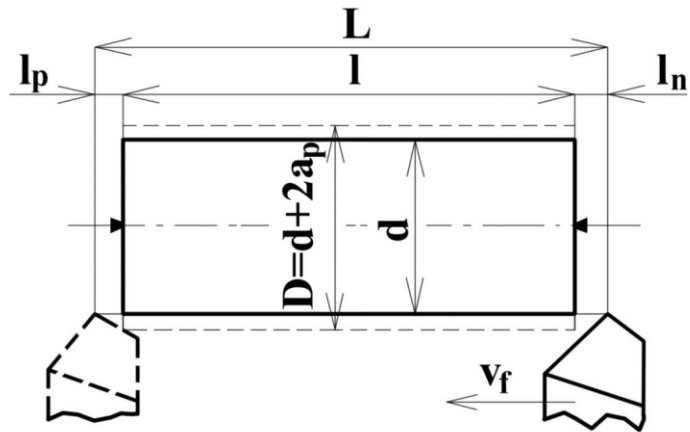
$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.4)$$



Obr. 8 Vektory rychlostí při soustružení: a) válcové plochy, b) čelní plochy [8]

2.2 Jednotkový strojní čas

Při soustružení se určují dva druhy jednotkového strojního času, a to pro soustružení čelní a soustružení podélné. Při stanovení vztahů pro jednotkový strojní čas se vychází z poměrů na Obr. 9. Jednotkový strojní čas t_{AS} pro soustružení podélné válcové plochy je určen dle vztahu 2.5. [5]



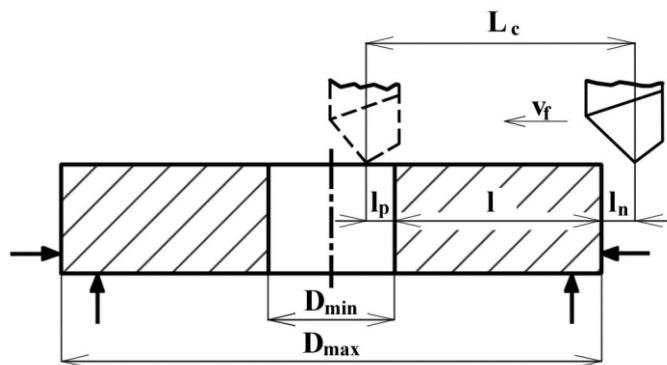
Obr. 9 Jednotkový strojní čas pro soustružení podélné válcové plochy [5]

$$t_{as} = \frac{L}{n \cdot f} \quad [\text{min}] \quad (2.5)$$

Kde L je dráha nástroje ve směru posuvu a je určena vztahem 2.17. [5]

$$L = l + l_n + l_p \quad [\text{mm}] \quad (2.6)$$

Jednotkový strojní čas pro soustružení čelních ploch je rozdělen pro obrábění při konstantních otáčkách obrobku t_{ASn} a pro obrábění konstantní řeznou rychlostí t_{ASv} , který je definován vztahem 2.8. Dráha L_c při čelním soustružení je určena dle vztahu 2.7. Poměry při soustružení čelní plochy jsou na Obr. 10. [5]



Obr. 10 Poměry pro určení strojního času při čelním soustružení [5]

$$L_c = \frac{[(D_{max} + 2 \cdot l_n) - (D_{min} - 2 \cdot l_p)]}{2} \quad [\text{mm}] \quad (2.7)$$

$$t_{ASv} = \frac{\pi \cdot [(D_{max} + 2 \cdot l_n)^2 - (D_{min} - 2 \cdot l_p)^2]}{4 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \quad [\text{min}] \quad (2.8)$$

3 TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ KALENÝCH DÍLCŮ

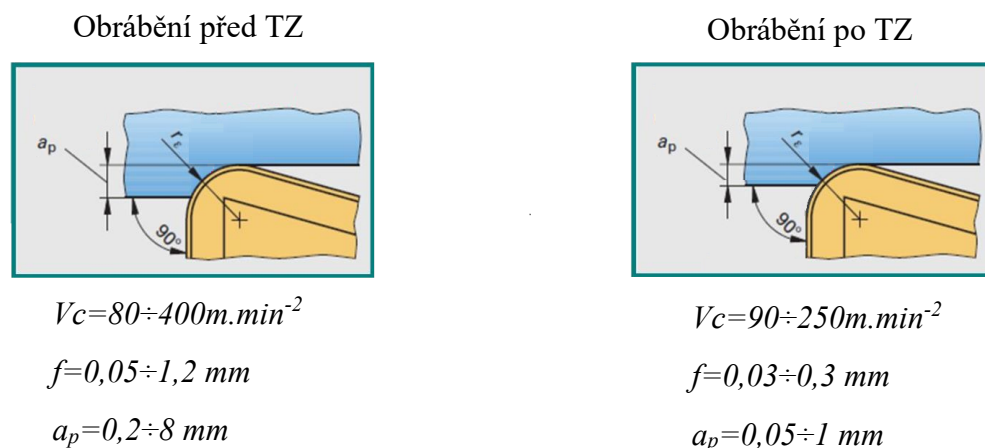
Nové řezné materiály umožňují produktivně obrábět i materiály o tvrdosti až 63 HRC. Pro tyto účely se nejčastěji používají keramické materiály nebo materiály z kubického nitridu bóru. Pokud je požadavkem vysoká produktivita výroby nebo požadavky na jakost obroběného povrchu, přichází v úvahu náhrada broušení soustružením. [11]

Výhody soustružení kalených dílců:

- vyšší produktivita výroby,
- jednodušší obrábění složitých tvarů,
- větší pružnost pro seřízení strojů,
- nižší náklady na nástroje,
- menší investiční náklady na stroje. [11]

3.1 Rozdíly při obrábění za tvrda

Při tvrdém obrábění je snaha nahradit dokončovací operaci broušení kalených dílců geometricky definovaným řezným klínem. Obrábění tvrdých materiálů umožňuje použití řezných materiálů jako je kubický nitrid bóru, který je po diamantu druhým nejtvrdějším materiálem a má nejvyšší odolnost vůči tepelným a mechanickým rázům. Je také možné využít směs oxidické keramiky. Hlavní oblastí tvrdého obrábění je obrábění kalených ocelí v rozmezích tvrdosti 55 ÷ 64 HRC. Řezná rychlost se pohybuje v rozmezí 100 ÷ 175 m.min⁻¹. Základním rozdílem mezi obráběním před tepelným zpracováním a tvrdým obráběním (Obr. 11) je aplikace menších posuvů na otáčku a menších hloubek řezu. [12,13,14,15,16]



Obr. 11 Rozdíly mezi obráběním před TZ a tvrdým obráběním

3.2 Požadavky na obráběcí stroje

Pro soustružení kalených součástí se používají konvenční stroje. U těchto strojů se za přírodních podmínek dá dosáhnout přesnosti obrobků okolo IT 6÷7. Pro dosažení vyšší přesnosti je nutné použít stroje s vyšší tuhostí. Skutečností je, že geometrické poměry tvrdého soustružení jsou v mnohých ohledech stejné jako při broušení. Je všeobecně známo, že právě pasivní složka řezné síly významně ovlivňuje deformace v technologické soustavě, a to se projevuje v přesnosti obrobku. [16]

Při vývoji obráběcích strojů došlo ke konstrukci velmi přesných soustruhů, které zvyšují kvalitu a přesnost obrábění kalených materiálů. Použitím velmi přesných soustruhů je dosažená rozměrová a geometrická přesnost v rozmezí IT 4÷6. V současné době je možné realizovat výrobu kalených dílů s hodnotou drsnosti $Rz = 1 \mu\text{m}$. To je ovšem možné při splnění dalších podmínek v souvislosti s geometrií nástroje a jeho konstrukce. Na Obr. 12 je příklad přesného soustruhu od americké firmy Hardinge, jedná se přesný revolverový CNC soustruh Hardinge Super-Precision T51. [16]

Vysoce zatížitelná konstrukce integrovaných motorových vřetena zvyšuje tepelnou stabilitu

Výkonné motory a pohony FANUC

Jedinečné vřeteno připravené k okamžitému použití

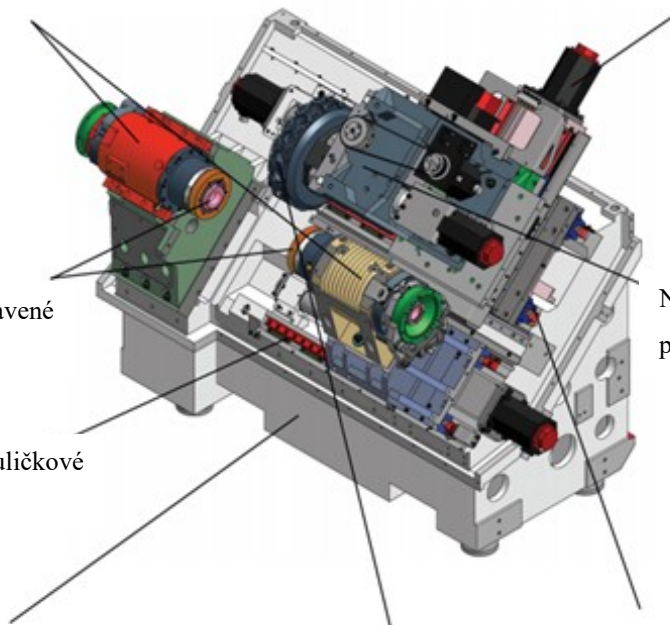
Nezávislá Y-osa pro přesnost dílů

Tuhé lineární vedení, kuličkové šrouby a pohony os

Litého lože HARCRETE (syntetický granit)

Horní deska Hardinge-T pro statickou kompatibilitu nástrojů

Lineární odměřovací pravítka



Obr. 12 Konstrukce soustruhu T51 Hardinge [17]

3.3 Řezné materiály k obrábění tvrdých materiálů

Při obrábění kalených ocelí jsou požadavky kladené na řezný materiál o mnoho vyšší v porovnání s obráběním ocelí před tepelným zpracováním. Řezný materiál musí mít třikrát vyšší tvrdost oproti obrobku, aby došlo k zabránění deformace řezné hrany při kontaktu nástroje a obrobku. Vysoký poměr mezi tvrdostí a modulem pružnosti minimalizuje lokální deformaci. Tepelná vodivost řezného materiálu ovlivňuje dilataci nástroje. Proto materiály s vysokou hodnotou tepelné vodivosti eliminují pravděpodobnost odchylek geometrického tvaru v souvislosti s tepelným účinkem. Dále musí mít být odolný vůči tvrdým částicím v obrobku a mít vysokou odolnost proti opotřebení. V neposlední řadě je důležitá vysoká tepelná stabilita řezného materiálu. [18,19]

3.3.1 Cermety

Cermet je název pro tvrdý řezný materiál obsahující tvrdé částice TiC, TiN, TiCN a další v kovovém (Ni, Mo, Co) pojivu, vyrobený obdobně jako slinuté karbidy práškovou metalurgií. Název zahrnuje počáteční písmena slovního spojení CERamic/METal použitý pro označení keramických částic v kovovém pojivu.

Charakteristickou vlastností cermetů je nízká měrná hmotnost. Ve srovnání se slinutými karbidy (SK) jsou tyto hodnoty zhruba poloviční a jsou dány zejména tím, že cermety v drtivé většině neobsahují těžký karbid wolframu. [4,21]

Hlavní výhodou cermetů je jejich vysoká tvrdost, která zůstává zachována i při použití za zvýšených teplot, kdy si lépe udržují svůj tvar než slinuté karbidy. Jsou levnější než SK, mají vyšší chemickou stabilitu, odolnost proti oxidaci a tvorbě nárůstku. Jejich hlavní nevýhodou je nízká houževnatost, která je sice neustále zvyšována, ale přesto nedosahuje hodnot obvyklých u slinutých karbidů. [4]

3.3.2 Řezná keramika

V minulosti se pod širokým pojmem keramika rozuměl oxid hlinitý Al₂O₃. V současnosti známe široké spektrum keramických materiálů vhodných pro nasazení v technologiích obrábění. Hlavními charakteristickými znaky současné keramiky jsou vysoká tvrdost, teplotní odolnost, chemická stabilita i v oblasti vysokých teplot, nízká hmotnost (oproti oceli je hustota keramiky na úrovni 33 %). Tyto vlastnosti nám při správném používání zaručují dlouhou

trvanlivost břítu, respektive životnost řezného nástroje, což se v kombinaci s vysokými řeznými rychlostmi projeví do velkého objemu úběru materiálu. Keramika se rozděluje do několika skupin, a to na oxidickou keramiku na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3), neoxidickou keramiku na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4) a vyztuženou keramiku (oxidická nebo nitridová vyztužená whiskery SiC nebo Si_3N_4). Ve skupině oxidické keramiky se vyskytují další podskupiny. [4,10,11,20]

Obecně je vhodnost nasazení řezné keramiky ve velké míře závislá na podmínkách obrábění. Musíme zaručit vysokou tuhost a stabilitu systému Stroj-Nástroj-Obrobek. Přizpůsobit geometrii břítu nástroje k způsobu obrábění. Nejčastěji jsou keramické řezné nástroje využívány pro oblast soustružení, kde je možné zaručit nepřerušovaný řez. Nevýhodami řezné keramiky patří nízká odolnost vůči teplotním trhlinám a nízká lomová houževnatost. [11,20,21]

3.3.3 Polykrystalický kubický nitrid bóru

Elementárními chemickými prvky řezného materiálu jsou bór a dusík. Zařazuje se do skupiny supertvrdých nástrojových materiálů. Polykrystalický kubický nitrid boru (CBN) se volně v přírodě nenachází. Z atomárního hlediska má směrovou kovalentní vazbu podobně jako diamant. [4]

Tvrдость materiálu se pohybuje mezi 4000 až 5500 HV. Zároveň si zachovává odolnost za extrémních teplotních podmínek (2000 °C). Je odolný vůči abrazivnímu opotřebení a na rozdíl od diamantu se vyznačuje chemickou stálostí při interakci se železem nebo jinými kovy. Typickými příklady materiálu polotovaru pro použití CBN jsou ocelové výkovky, zakalená ocel nebo slitina a povrchově kalené obrobky. CBN se vyrábí při vysokých tlacích a teplotách při kterých dochází ke spojení kubických krystalů boru s keramickým nebo kovovým spojovacím materiálem. Konečné vlastnosti CBN může ovlivňovat zrnitost krystalu, množství a druh spojovacího materiálu. [10,22]

Omezením pro nasazení CBN je tvrdost polotovaru, avšak na rozdíl od jiných řezných materiálů se jedná o její minimální hranici. Pokud bychom chtěli obrábět ocel s hodnotou tvrdosti nižší, než je 45 HRC, začal by se nástroj výrazně opotřebovávat. [10,23]

4 PARAMETRY URČUJÍCÍ KVALITU OBROBENÉ PLOCHY

Kvalitu obrobků ze stanoviska technologie výroby je možné stanovit pomocí mnoha kritérií, kterými jsou kupříkladu přesnost rozměrů, přesnost tvaru atd. Jedním z nejdůležitějších kritérií je struktura neboli drsnost povrchu. Drsnost (kvalita povrchu) je jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňující funkční vlastnosti, trvanlivost a spolehlivost výrobku. [26,27]

4.1 Parametry struktury povrchu

Profil je pomyslná průsečnice dané roviny se skutečným povrchem. Tato rovina je kolmá ke skutečnému povrchu ve vhodném směru. Profil povrchu je základním zdrojem informací pro další posuzování struktury povrchu. [28]

Tvar

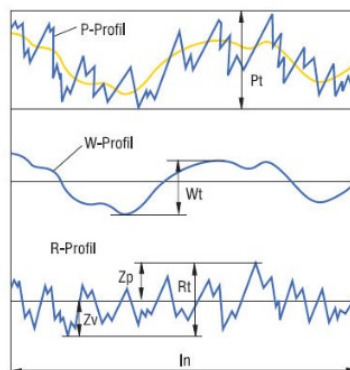
Základní profil (P-profil) – hlavní základ pro hodnocení tzv. P/parametrů (Obr. 13). Tvar tohoto povrchu vzniká nedostatečnou tuhostí, špatnou přímostí vodících ploch nebo teplem které způsobuje deformaci obrobku. [28]

Vlnitost

Profil vlnitosti (W-profil) – tyto makro-nerovnosti jsou základním parametrem pro hodnocení profilu vlnitosti, tzv. W-parametrů (Obr. 13). Vlnitost povrchu je nejčastěji způsobena deformací, chvěním nebo zpevněním materiálu. [28]

Drsnost

Profil drsnosti (R-profil) – mikro-nerovnost, ze které vychází hodnocení parametrů profilu povrchu struktury, tzv. R-parametrů (Obr. 13). Drsnost povrchu je způsobena blízkými nerovnostmi, které vznikají především během výrobního procesu. [28]



Obr. 13 Profil povrchu [28]

4.2 Parametry profilu nerovnosti

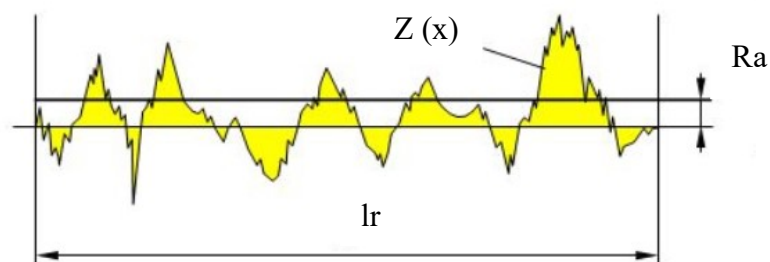
Parametry profilu nerovnosti se dělí do následujících skupin:

- Výškové (amplitudové) parametry – určeny výhradně výškami výstupků a prohlubní nebo jejich kombinacemi. (např. parametr drsnosti R_a).
- Frekvenční parametry – tyto parametry se zkoumají pouze v podélném směru a určují se pouze při roztečích nepravidelností podél plochy (např. R_{sm} – průměrná šířka prvků profilu).
- Hybridní parametry – kombinují parametry amplitudové a rozteče (př. střední vlnová délka). [29]

4.3 Výškové (amplitudové) parametry

Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a

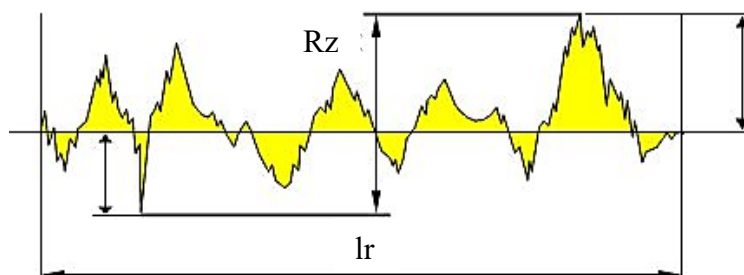
Je stanovena pomocí aritmetického průměru hodnot úchylek v rozsahu výchozí délky l_r . Jedná se o nejdůležitější výškový parametr drsnosti povrchu, a také jeden z nejpoužívanějších parametrů pro vyhodnocení jakosti povrchu v technické praxi. Parametr je vhodný pro řízení nebo pro regulaci výrobního procesu. Změní-li se hodnota R_a , je to zpravidla způsobeno změnou podmínek vykonávaného procesu. Hlavním nedostatkem tohoto parametru je jeho náchylnost na vychýlené hodnoty. [27,30]



Obr. 14 Parametr drsnosti R_a [31]

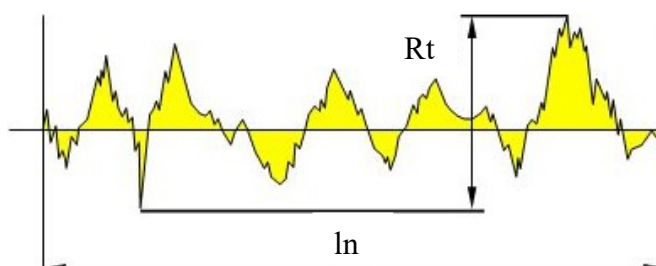
Největší výška profilu R_z

Vyjadřuje průměrnou hodnotu ze všech R_t změřených na jednotlivých základních délkách rozsahu základní délky l_r . Hodnota parametru je oproti hodnotě parametru R_t stálejší, jelikož není tak náchylná na rušivé vlivy, které se mohou vyskytnout na povrchu (rýhy, otěpy nebo prach). [29]

Obr. 15 Největší výška profilu R_z [31]

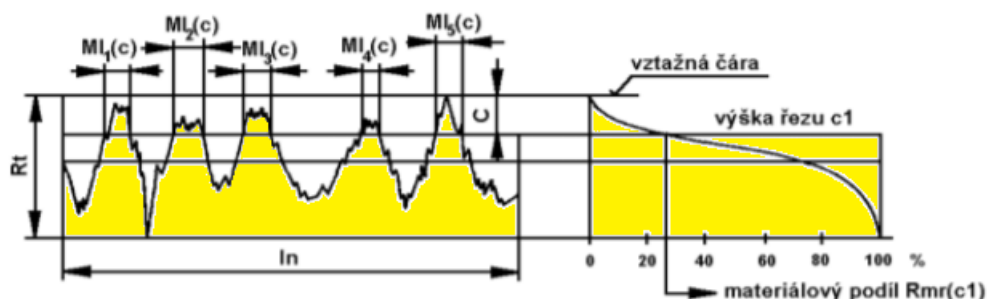
Celková výška profilu R_t

Celková výška profilu R_t je součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky (l_n), jak je naznačeno na Obr. 16. Hodnotu parametru ovlivňují jednotlivé výstupky i jednotlivé rýhy vyskytující se na povrchu. Proto tento parametr může mít velmi nestálou a proměnlivou hodnotu. [29]

Obr. 16 Celková výška profilu R_t [31]

Materiálový podíl profilu R_{mr}

Je procentuální poměr materiálové délky profilu $MI(c)$ na dané úrovni c , ku vyhodnocované délce l_n . [37]



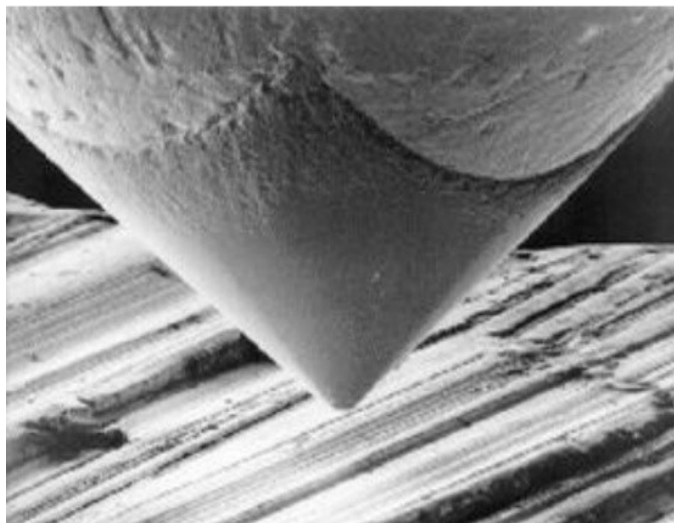
Obr. 17 Materiálový podíl drsnosti [37]

5 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ POVRCHU

Povrchy, které se většinou posuzují, jsou povrchy po technologických operacích obrábění. Současně jsou sledovány vlivy technologických procesů, nástrojů, materiálu apod. Snahy o miniaturizaci součástí výrazně změnilly hranice rozměrů nejen pokud jde o délky, ale také i o vyhodnocení struktury povrchu. Nejvýznamnější příčinou jsou nanotechnologie. Působení této nové filozofie má svůj dopad i na výrobu. Do výhod kontaktního snímání kontaktních snímačů můžeme zařadit: měření dílů, které nejsou ve vodorovné poloze, rozšířenost a jednoduchost měření, menší náročnost na čistotu měřeného povrchu. [32,33]

5.1 Kontaktní snímače

Měření profilu povrchu dotykovou metodou je zatím nejrozšířenější. Její výhodou je to, že se dá použít pro jakékoli typy povrchů, přesně vyobrazuje geometrický profil povrchu, ale u některých citlivých materiálů může dojít k poruše měřeného povrchu, což se může projevit nepatříčně na hodnocení měření. Na druhé straně i malá přítlačná síla snímacího hrotu může znamenat, že měření ztrácí svoji věrohodnost. [33]

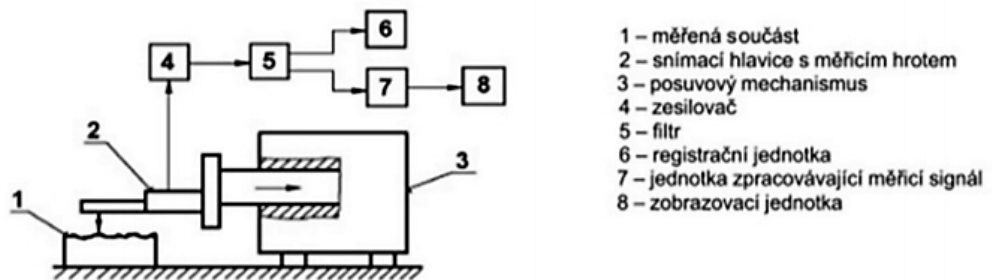


Obr. 18 Diamantový měřící hrot [33]

Snímání povrchu je zajišťováno posuvem ramínka snímače s hrotem, který je přítlačován k povrchu výrobku. Hrot má zpravidla kuželový tvar se zakulacenou špičkou a je vyroben z tvrdého materiálu (diamant). V průběhu jednoho měření je snímán pouze jeden profil povrchu, což zabezpečuje velkou citlivost na lokální vady povrchu. Přístroj se skládá ze dvou částí – mechanické a elektronické.

Mechanická část je tvořena stolcem, na němž je umístěna měřená součást, a ramenem se snímacím hrotem. Rameno se pohybuje stálou rychlostí a snímá nerovnosti povrchu.

Elektronická část slouží k převedení mechanického signálu vytvářeného snímacím hrotem, který přejíždí přes nerovnosti povrchu měřené plochy na elektrický signál, který je dále vyhodnocován. Schéma kontaktního snímání povrchu je vyobrazeno na Obr. 19. [34]



Obr. 19 Schéma kontaktního snímání povrchu [34]

Ve strojírenství je kontaktní metoda upřednostňována kvůli větší toleranci na znečištění povrchu, ať už drobnými nečistotami nebo olejovou vrstvou.

Vertikální pohyb hrotu při přechodu výstupků a prohlubní je indukčním měřidlem převáděn na elektrický signál. Ten se potom dále počítačově zpracovává a následně vyhodnocuje. Pro tento systém snímání je charakteristická malá měřicí síla, což minimalizuje nebezpečí poškození měřeného povrchu. [34]

5.2 Bezkontaktní snímače

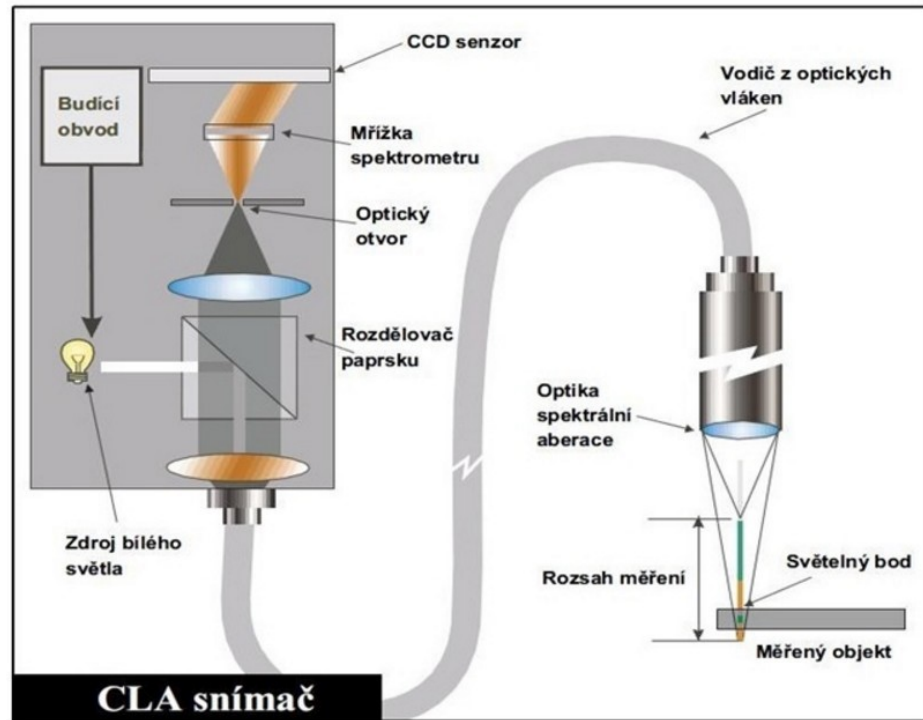
Analýza povrchu pomocí bezkontaktních snímačů je často využíváno především v laboratorních a vědeckých podmínkách. Provádí se pomocí bezkontaktních snímačů a mezi nejvyužívanější patří CLA snímač a laserový snímač, který však není přesný tak jako CLA.

Mezi výhody bezkontaktních snímačů patří: měření materiálů choulostivých, pružných a měkkých materiálů, trvanlivost snímače (snímač není v přímém kontaktu s povrchem součástí, a proto nemůže být poškozen), efektivita (rychlost měření) a možnost bezpečně přejít jevy vymykající se rozsahu. [34]

Snímač CLA

Bílé světlo je rozkládáno a optikou je směřováno na kontrolovaný povrch. Optika rozprostře světlo podle vlnových délek a v každém bodě povrchu je zaostřena jen určitá vlnová délka.

Světlo odražené z povrchu prochází otvorem, který propustí jen světlo zaostřené vlnové délky. Spektrometr vychýlí světlo na maticový senzor, kde je každému bodu připravena prostorová poloha, která je následně počítačově zpracována a vyhodnocena. [34]



Obr. 20 Schéma indukčního systému měření povrchu kontaktním způsobem [34]

Laserový snímač

Paprsek polovodičového laseru se odráží od měřeného povrchu a je přijímán do optického systému, zde je paprsek zaostřen na obrazovou matici, u které se využívá jejích obrazových prvků pro určení polohy zaměřeného bodu. [34]

6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Pro vyhodnocování výsledků je použito statistických metod. Základní statistické veličiny jsou popsány v kapitolách níže.

6.1 Statistický soubor

O statistickém souboru mluvíme tehdy, pokud jsou přesně definovány identické vlastnosti prvků určité množiny. Statickým souborem může být množina lidí, zvířat, věcí, událostí atd. Sledovaným prvkem (znakem) určité množiny může být výška jedince, hmotnost jedince, věk atd. [37]

6.2 Statistické parametry

Základní soubor neboli populace je soubor všech možných objektů (jedinců), u nichž se může vyskytovat sledovaný znak. [37,38]

- konečný – oblast zkoumání je přesně definována,
- nekonečný – oblast zkoumání není přesně definována.

Jelikož populace je velmi rozsáhlá a není možné jak z časového, tak finančního či etického důvodu zkoumat u všech jedinců požadované znaky, zavádíme soubor výběrový. [37]

6.2.1 Základní statistické vlastnosti

Data v tabulkách a grafech nám po stránce vizuální usnadňují čitelnost a rychlost orientace. Pro další zpracování je však potřebné tyto data, často z velmi velkého počtu, koncentrovat. K tomu to „zahušťování dat“ nám pomáhají tzv. popisné statistiky, mezi něž patří charakteristiky centrální tendence, rozptyl, šikmost nebo špičatost. Mezi míry centrální tendence se zařazuje aritmetický průměr, medián a modus. Tyto charakteristiky se snaží o popsání střední hodnoty dat nebo míry polohy (popisují, kde se daný vzorek na číselné ose nachází), jedná se o tzv. typickou hodnotu dat. [38]

6.2.2 Aritmetický průměr

Aritmetický průměr lze definován jako součet všech naměřených údajů (hodnot) vydělený jejich počtem. [38]

Pro označení odhadu aritmetického průměru je používán symbol \bar{x} a vypočte se dle vzorce:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6.1)$$

Kde znak Σ vyjadřuje součet x_i pro všechny hodnoty indexu i .

Aritmetický průměr lze použít:

- jsou-li data získána v intervalovém měřítku,
- pokud je rozdělení dat symetrické,
- pokud chceme data použít na statistické testy. [38]

6.2.3 Medián

Medián je hodnota, jež rozděluje řadu, seřazených výsledků dle velikosti, na dvě stejně početné poloviny. Symbol označení odhadu mediánu je \tilde{x} a vypočte se dle vzorce:

pro sudý počet hodnot (n)

$$\tilde{x} = 0,5 \left(x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1} \right) \quad (6.2)$$

pro lichý počet hodnot (n)

$$\tilde{x} = x_{(n+1)/2} \quad (6.3)$$

Medián lze použít:

- chceme-li znát střed rozdělení hodnot,
- pokud jsou data získána minimálně v ordinálním měřítku,
- pokud je rozdělení dat silně zešikmené,
- pokud data obsahují odlehlé hodnoty. [38]

6.2.4 Směrodatná odchylka

Odhad směrodatné odchylky s je odmocnina z rozptylu a vrací míru rozptýlenosti do měřítka původních dat. [38]

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6.4)$$

6.3 Metody zobrazení kvantitativních dat

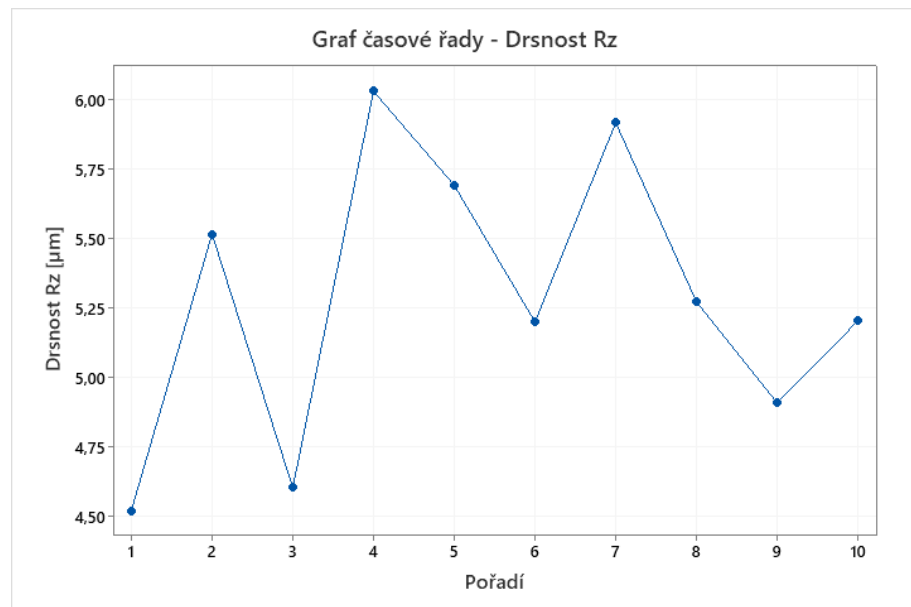
Data získána z měření jsou nejprve vložena do tabulek, kde nám slouží pro první přehled. Pro ještě větší přehlednost vložíme data do grafů. Grafické zobrazení může být tvořeno z bodů, úseček, ploch a vytváří tak různé geometrické obrazce.

6.3.1 Graf časové řady

Časová řada realizuje náhodné procesy a hodnoty uspořádává chronologicky.

Časovou řadu můžeme dělit do několika skupin:

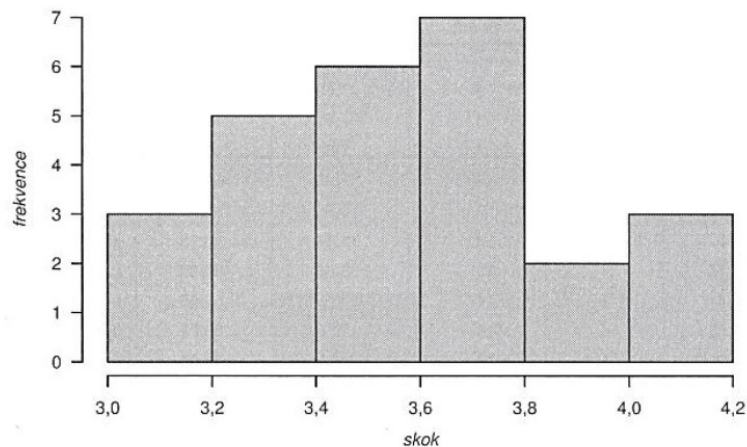
- krátkodobé – perioda je kratší než jeden rok,
- intervalové – velikost ukazatele závisí na délce intervalu,
- s absolutními ukazateli – hodnoty,
- deterministická – neobsahuje žádný prvek, stochastické obsahuje náhodný prvek,
- ekvidistantní – konstantní časová vzdálenost,
- neekvidistantní – různé časové vzdálenosti,
- stacionární – hodnoty aritmetického průměru jsou v celém průběhu řady stejné,
- nestacionární – hodnoty se v průběhu liší. [38]



Obr. 21 Ukázka graf časové řady

6.3.2 Histogram

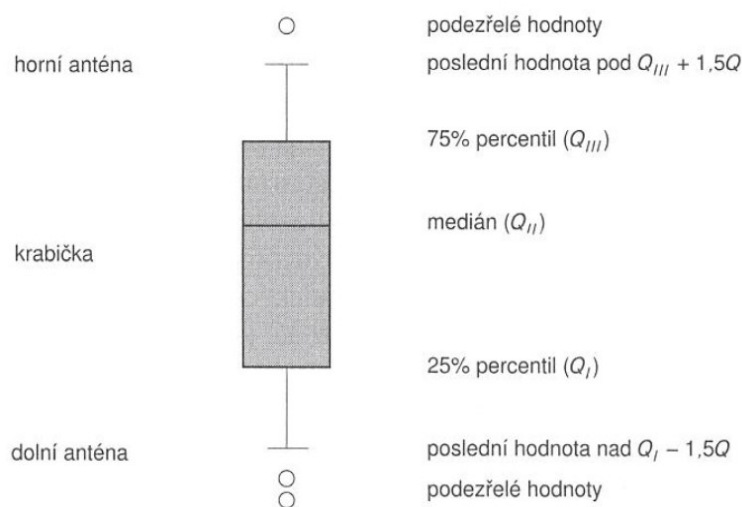
Histogram je nejznámější způsob zobrazení hodnot jedné proměnné. Pro správné zobrazení je potřeba zvolit optimální počet tříd pro kompletní pokrytí rozmezí hodnot. Čím méně hodnot, tím menší počet tříd. Pro malé rozsahy dat se histogram nesestavuje. [38]



Obr. 22 Histogram četností [38]

6.3.3 Krabicový (boxplot) graf

Box plot neboli krabicový graf patří mezi sofistikovanější metody grafického zobrazení hodnot. Zahrnuje v sobě pět hodnot (Obr. 23), které se využívají k sestavení box-plotového grafu. Tento typ zobrazení se používá pro znázornění jedné množiny, častěji však pro porovnávání více skupin. [38]



Obr. 23 Konstrukce box plotu [38]

6.3.4 Grubbsův parametrický test extrémních odchylek

Grubbsův test používáme pro vylučování takzvaných extrémních hodnot. Provádíme ho na základě vypočteného testovacího kritéria u souborů dat, které odpovídají do Gaussova normálního rozdělení.

Postup pro použití Grubbsova testu je následující:

- seřazení hodnot výběrového souboru do vzestupné variační řady,
- výpočet aritmetického průměru \bar{x} a směrodatné odchylky s ze všech hodnot souboru,
- stanoví se H_0 (chyba náhodná) a k ní alternaci H_A (hrubá chyba),
- zvolí se hladiny významnosti α (nejčastěji 0,050 či 0,010),
- výpočet testovacího kritéria pro první (n -tou) hodnotu variační řady,

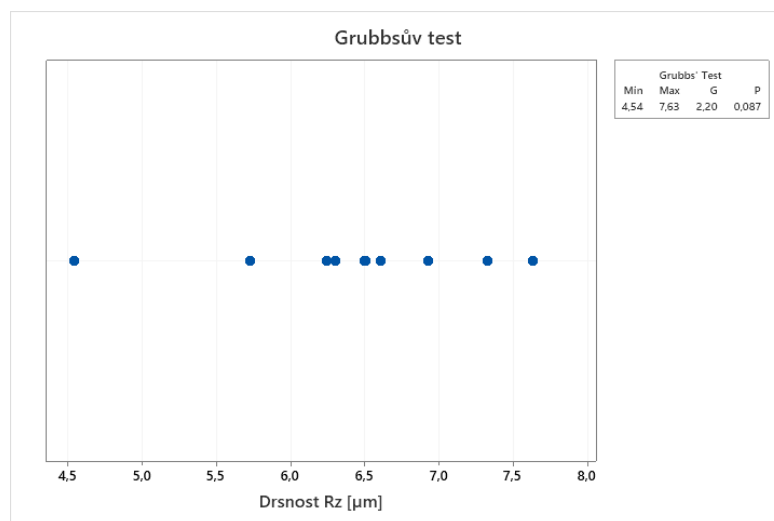
$$T_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s} \quad (6.5)$$

$$T_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s} \quad (6.6)$$

- porovnání vypočteného kritéria s tabulkovou kritickou hodnotou pro příslušné n výběrového souboru a zvolenou hodnotou α pro Grubbsův test.

Pokud $T_{1(n,\alpha)} > T_{krit.}$ – první, eventuálně poslední, hodnotu řady vyloučíme ze souboru, je nutné vypočítat nový aritmetický průměr a směrodatnou odchylku bez vyřazené extrémní hodnoty.

Pokud $T_{1(n,\alpha)} \leq T_{krit.}$ – první, eventuálně poslední, hodnota patří do souboru a nelze ji vyloučit. [38]



Obr. 24 Ukázka Grubbsova testu

6.4 Testování hypotéz

Pomocí testování statistických hypotéz můžeme posuzovat, zda získaná data splňují předpoklad, který jsme před měřením učinili.

Při testování hypotéz vždy stavíme naproti sobě dvě hypotézy: první, kterou testujeme, a naproti ní je hypotéza druhá – alternativní. První testovanou hypotézu nazýváme nulovou. [39]

6.4.1 Procedury pro testování hypotéz

Procedury pro testování hypotéz lze možné rozdělit do následujících kroků:

- formulace výzkumné otázky ve formě nulové a alternativní hypotézy,
- volba hladiny významnosti, zjištění kritické hodnoty,
- výpočet testovacího kritéria,
- závěr (rozhodnutí o platnosti statistické hypotézy). [38]

6.4.2 Určení statistické hypotéz

Prvním krokem je formulace hypotéz:

- Nulové hypotézy H_0 je tvrzení vyjadřující tzv. „žádný rozdíl“ (v případě nalezení rozdílu ho přičítáme přirozené variabilitě dat). [37,38]
- Alternativní hypotéza H_a popírá hypotézu nulovou. Lze ji vyjádřit jako existenci rozdílu mezi skupinami či existence závislosti mezi proměnnými.

Máme dvě základní varianty hypotéz – jednostrannou (pravostranná, levostranná) a oboustrannou.

V případě jednostranné hypotézy můžeme například tvrdit:

$$H_0: \mu_x = \mu_y \quad (6.7)$$

$$H_a: \mu_x > \mu_y \text{ nebo } \mu_x < \mu_y. \quad (6.8)$$

Pokud hovoříme o hypotéze oboustranné, formulace by vypadala takto: [40]

$$H_0: \mu_x = \mu_y \quad (6.9)$$

$$H_a: \mu_x \neq \mu_y \quad (6.10)$$

6.4.3 Hladina významnosti testu

Pravděpodobnost zamítnutí nulové hypotézy i v případě, že platí, označujeme jako hladinu významnosti α . Nejčastěji hodnota, kterou volíme je $\alpha = 0,05$. Jedná se o tzv. chybu I. druhu, kdy se zamítne nulová hypotéza i přes její pravdivost. V opačném případě, kdy nulovou hypotézu nezamítáme, ale ve skutečnosti platí hypotéza alternativní, hovoříme o tzv. chybě druhého druhu. Pravděpodobnost, se kterou se můžeme této chybě dopustit, značíme β . [38]

Tabulka 1 Chyby α a β při testování hypotéz [37]

ROZHODNUTÍ SKUTEČNOST	ZAMÍTÁME H_0	NEZAMÍTÁME H_0
H_0 PLATÍ	Chyba I.druhu α	SPRÁVNĚ $1 - \alpha$
H_0 NEPLATÍ	SPRÁVNĚ $1 - \beta$ (síla testu)	Chyba II.druhu β

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je zjistit vhodnost alternativy soustružení za konvenční broušení. Pro praktickou část byly stanoveny tyto cíle:

- **Navrhnout experiment**

Navrhněte experiment k ověření zaměnitelnosti použití technologie soustružení za broušení. Určete vzorek pro experiment, jeho tvar a materiál, popřípadě tepelné zpracování. Zvolte vhodný obráběcí stroj.

- **Navrhnout postup vyhodnocení drsnosti**

Zvolte postup pro měření drsnosti obráběného povrchu, měřící zařízení a metodu vyhodnocení naměřených hodnot.

- **Zvolit vhodný řezný materiál pro soustružení**

Při obrábění na soustruhu vyberte dva nástroje z odlišného materiálu. Porovnejte dosažené hodnoty drsnosti u těchto nástrojových materiálů.

- **Zvolit optimální řezné podmínky**

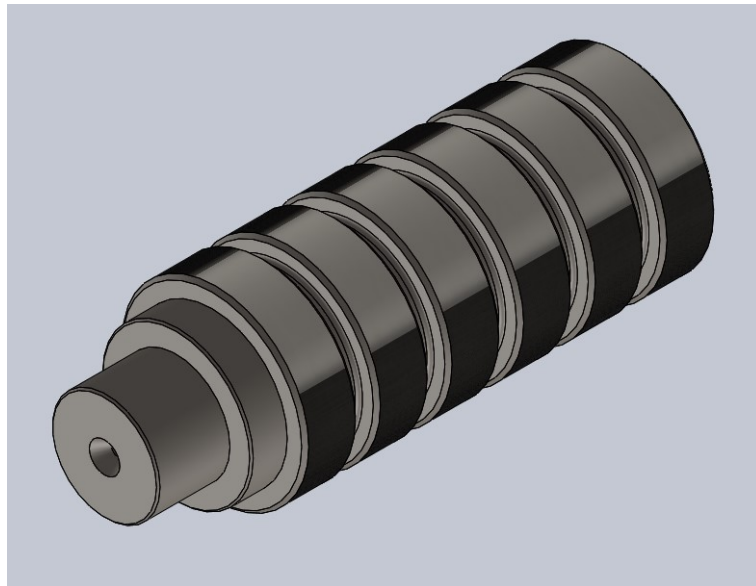
Stanovte řezné podmínky pro proces obrábění na soustruhu. Z vyhodnocených dat určete optimální řezné podmínky pro jednotlivé materiály.

8 OBROBĚNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

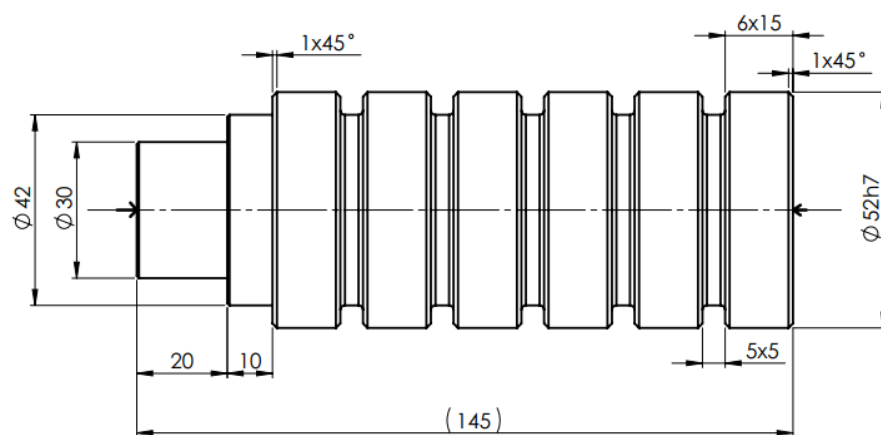
Tato diplomová práce se zabývá výzkumem vlivu technologie na výslednou jakost povrchu. Návrh a průběh experimentu a následné obrábění je zachyceno v této kapitole.

8.1 Návrh zkušebního vzorku

Zkušebním obrobkem pro experiment je součást válcového tvaru, která je rozdělena na šest článků. Základní rozměry obrobku jsou vyobrazeny na Obr. 26 a výrobní výkres (Příloha P I). Byly použity vzorky z ložiskové oceli EN 100Cr6. Materiálový atest je přiložen v příloze P II. Tento materiál je vhodný ke kalení. Vzorek byl zakalen na tvrdost 60 ± 2 HRC.



Obr. 25 3D model vzorku



Obr. 26 Rozměry zkušebního vzorku

Materiál 100Cr6

Ocel je dobře tvářitelná za tepla a je vhodná k přímému kalení, ve stavu žíhaném na měkko, dobře obrobitelná. Optimální průměr, nebo tloušťka zušlechtnění je asi 20 mm. Ocel je vhodná na součásti s velmi tvrdým povrchem odolným proti opotřebení. Přesný popis chemického složení je v tabulce č.2. [39]

Tabulka 2 Chemické složení ložiskové oceli 100Cr6 [hm. %] [39]

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Ni+Cu	P	S
0,90-1,1	0,30-0,50	0,15-0,35	1,30-1,65	max.0,30	max.0,25	max.0,50	max.0,027	max.0,030

Tabulka 3 Základní mechanické vlastnosti ložiskové oceli 100Cr6 [39]

Polotovar	Tvrdość [HB]	Mez kluzu Re [MPa]	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Tažnost A5 [%]
Předvalky, výkovky, tyče válcované za tepla	max.210	441	608 – 726	18
Bezešvé trubky tváření ta tepla	max.220	-	608 – 726	18
Tyče a dráty tažené za studena	max.225	441	628 – 765	18

8.2 Soustružení zkušební tělesa

Obrábění zkušební obrobku (Obr. 25) bude probíhat nejprve na CNC soustruhu. Použitým strojem je GILDEMEISTER CTX beta 1250 od Německého výrobce DMG. Součást byla upnuta do měkkých čelistí a podepřena otočným hrotem, který byl upevněn v protivřetenu. [40]

GILDEMEISTER CTX beta 1250

Univerzální obráběcí soustruh DMG CTX Beta 1250, který je zachycen na Obr. 27 je vybaven revolverovou hlavou o kapacitě 12 nástrojů. Ve standardní výbavě je poháněna osa C. Revolverovou hlavu lze osadit držáky s poháněnými nástroji. Dále pak je soustruh vybaven protivřetenem pro šestistranné kompletní obrábění. Použitý stroj je řízen pomocí řídicího systému Sinumerik 840D od firmy Siemens. Základní parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 4. [40]



Obr. 27 DMG CTX Beta 1250 [40]

Tabulka 4 Základní parametry stroje [40]

Parametry stroje DMG CTX Beta 1250	
Max. průměr soustružení	410 mm
Max. délka soustružení	1 200 mm
Integrovaný motor včetně s osou C (0,01°)	4 000 ot/min
Max. pracovní průměr použité tyčoviny	95 mm
Max. počet nástrojových pozic	12

8.3 Řezný nástroj a definice podmínek obrábění

Pro soustružení budou použity dva řezné materiály - materiál typu CBN a řezná keramika. V této kapitole jsou rozebrány jednotlivé VBD a řezné podmínky.

VBD z materiálu CBN

První volbou při experimentu je břitová destička s označením WNGA080404S01030A 7025 od Švédského výrobce Sandvik Coromant. Materiálová sorta CB7025 je tvořena 60 % kubického nitridu bóru s bimodálním rozdělením velikosti zrna okolo 1 až 3 μm , které je spojeno pomocí keramického pojiva. Vzhledem k její vysoké odolnosti proti vzniku lomu, se jedná o vysoce univerzální třídu pro soustružení tvrzených součástí. Vyznačuje se vynikající životností při přerušovaných řezech. Rozměry a grafické znázornění první volby VBD, s poloměrem špičky 0,4 mm, je uvedené v tabulce 5. [41]

Tabulka 5 Rozměry a geometrie VBD WNGA080404S01030A 7025 [42]

	IC	Průměr vepsané kružnice	12,7 mm
	RE	Poloměr rohu	0,397 mm
	LE	Účinná délka břitu	3 mm
	S	Tloušťka destičky	4,763 mm
		Počet břitů	6

První volbou v oblasti nastavení řezných parametrů, jakými jsou řezná rychlost, posuv a šířka záběru hlavního ostří, budou hodnoty, které udává výrobce ve specifikaci sorty destičky, s přihlédnutím na možnosti použitého obráběcího stroje. Tyto údaje budou optimalizované, s cílem dosáhnout různých hodnot drsnosti. Dle informací, které výrobce udává je doporučena počáteční hodnota řezné rychlosti pro obrábění: $v_c = 165 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, posuvová rychlost $v_f = 0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $a_p = 0,1 \text{ mm}$.

VBD z materiálu řezná keramika

V případě keramického materiálu byla zvolena břitová destička s označením WNGA080404S01525 6050 od stejného výrobce. Sorta CC6050 patří do skupiny směsné keramiky na bázi Al_2O_3 . Smíšená keramika je vyztužená částicemi, konkrétně přísadou kubických karbidů nebo karbonitridů (TiC , $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$). Tím je dosaženo zvýšení houževnatosti a zlepšení tepelné vodivosti. Tato sorta má dobrou tepelnou vlastnost a odolnost proti ořezu. Přednostně je doporučována pro lehké spojitě řezy při dokončování. [43]

Tabulka 6 Rozměry a geometrie VBD WNGA080404S01525 6050 [42]

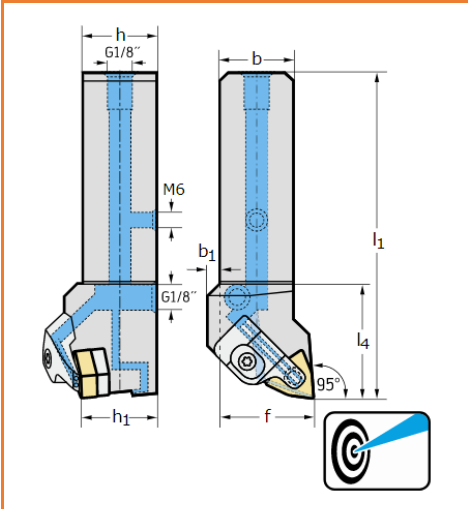
	IC	Průměr vepsané kružnice	12,7 mm
	RE	Poloměr rohu	0,397 mm
	LE	Účinná délka břitu	8,287 mm
	S	Tloušťka destičky	4,763 mm
		Počet břitů	6

Výrobce doporučuje jako počáteční hodnoty pro obrábění řeznou rychlost: $v_c = 160 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, posuvová rychlost $v_f = 0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $a_p = 0,1 \text{ mm}$.

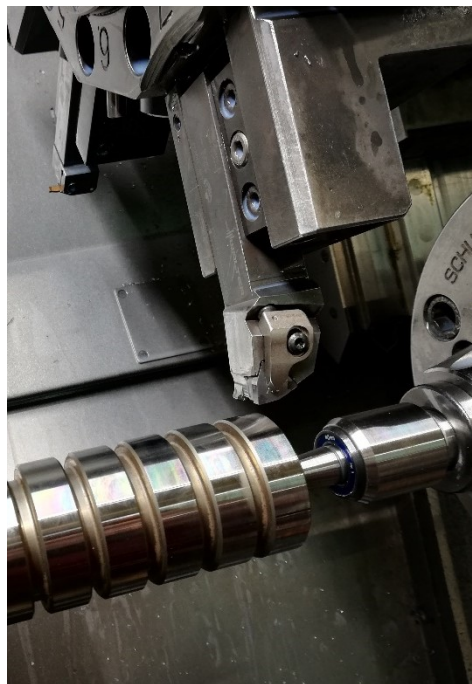
Nožový držák pro VBD

K VBD je potřebné nakonfigurovat kompatibilní nožový držák. Vzhledem k požadavku a teoretickým předpokladům, které jsme uvedli výše, budeme volit nástroj s nastavením hlavního úhlu 95° . Jedná se levostranný nůž s označením DWLNL2525X08-P od firmy Walter. Označení a grafický náhled držáku jsou prezentovány v tabulce 7.

Tabulka 7 Rozměry a geometrie držáku Walter DWLNL2525X08-P [44]

	Úhel	kr	95°
	Výška tělesa nože	$h=h_1$	25mm
	Šířka tělesa nože	b	25mm
	Funkční šířka	f	32mm
	Funkční délka	l_1	135mm
	Funkční délka	l_4	43,5mm
	Úhel čela ortogonálně	γ	$-6,5^\circ$
	Úhel sklonu	λ_s	$-5,5^\circ$

Na Obr. 28 je zachycen detail na celkovou sestavu zvolené břitové destičky a vhodného držáku.



Obr. 28 Detail sestavy držáku a břitové destičky

Jak je patrné z Obr. 29 kde je zachycen obráběcí proces, součást byla upnuta do měkkých čelistí a podepřena otočným hrotem upevněným v protivřetenu. Při obrábění nebyla použita chladicí kapalina, na základě doporučení výrobce.



Obr. 29 Obrábění vzorku číslo 1 břitovou destičkou z CBN

8.4 Broušení zkušebního tělesa

Broušení vzorku probíhalo na hrotové brusce BUC 63 C Practic od českého výrobce TOS ČELÁKOVICE.

Hrotové brusky TOS BUC 63 C Practic

Hrotová CNC bruska TOS BUC 63 C Practic (Obr. 30). Stroj umožňuje jak ruční broušení, tak i broušení v automatických cyklech. V základním provedení je stroj vybaven čtyřmi připravenými základními programy, které umožňují programování dialogovým způsobem (parametrické zadávání hodnot) přímo na stroji.



Obr. 30 TOS BUC 63 C Practic [45]

Základní programy obrábění na této brusce jsou:

- broušení zápichem,
- podélné broušení,
- postupné zápichové broušení na jeden průměr s následným podélným přebroušením a šest různých průměrů broušených zápichem s jedním technologickým zadáním.

Obrobky je možné upínat mezi hroty, letmo do sklíčidla, kleštin, případně na magneticou upínací desku unášecího vřeteníku. Stroje v provedení Practic jsou vybaveny řídicím systémem Siemens 840 D s 10“ monitorem. [45]

Tabulka 8 Základní parametry stroje [45]

Parametry stroje BUB 50 B Practic	
Oběžný průměr	500 mm
Vzdálenost mezi hroty max.	1 200 mm
Hmotnost obrobku upnutého:	
v hrotech max.	500 kg
v hrotech a opěrkách	700 kg
letmo, včetně upínače, max.	100 kg

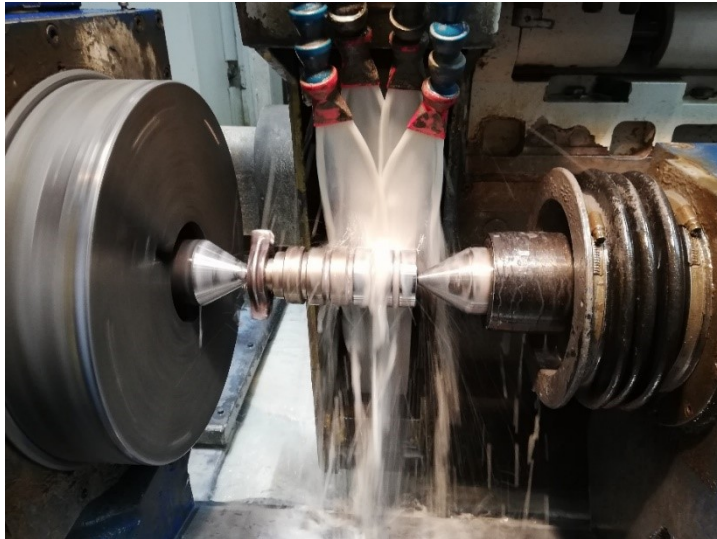
8.5 Použitý brousicí kotouč

Pro experiment byl použit brousicí kotouč s označením 5A 88120-K8-4U1EH, který je zachycen na Obr. 31. Maximální povolené otáčky kotouče udává výrobce na $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dle označení výrobce je tento kotouč vyroben z monokrystalického korundu jemné zrnitosti, měkké tvrdosti a má otevřenou strukturu zrna.



Obr. 31 Použitý brusný kotouč o rozměrech 750 x 63 x 305 mm

Počáteční hodnoty pro broušení jsou řezná rychlost: $v_c=27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a rychlost obrotů $v_w = 20 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Vzorek je upevněn mezi hroty a unášení je zajištěno pomocí unášecího srdce. Při broušení musí být použita procesní kapalina. Proces broušení můžeme vidět na Obr. 32.



Obr. 32 Broušení zkušebního vzorku číslo 3

9 MĚŘENÍ

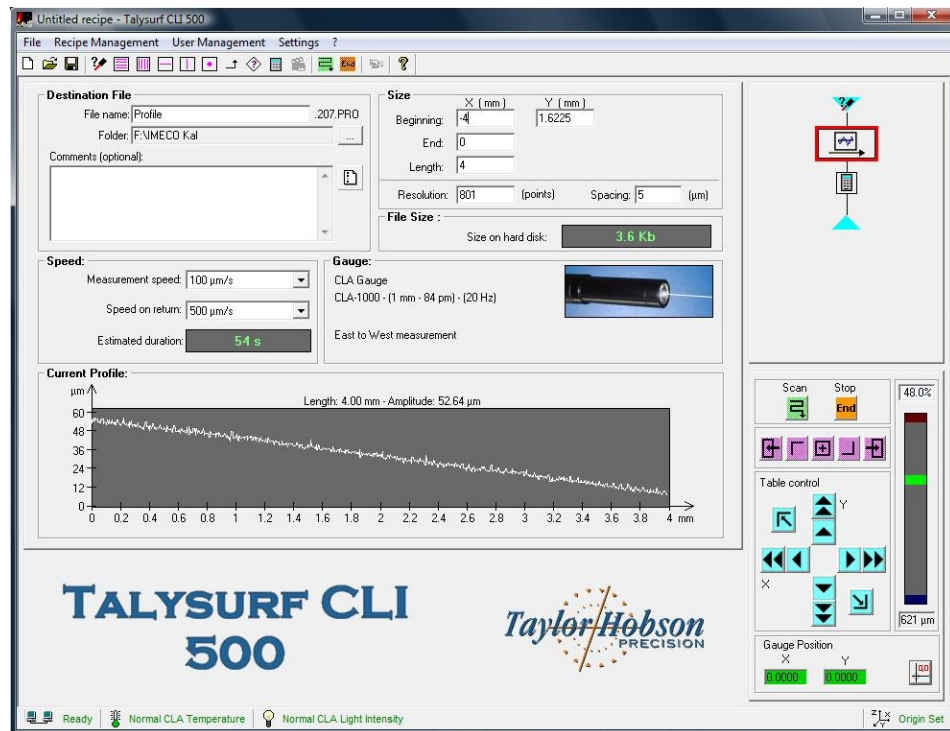
Měření jakosti povrchu bude probíhat pomocí CLA drsnoměru. Pro měření jednotlivých zkušebních těles byl použit bezkontaktní optický přístroj Talysurf CLI 500 (Obr. 33) a příslušný software od společnosti Taylor Hobson. Základní parametry drsnoměru Talysurf CLI 500 jsou vypsány v tabulce 9.



Obr. 33 Soustava pro bezkontaktní měření drsnosti

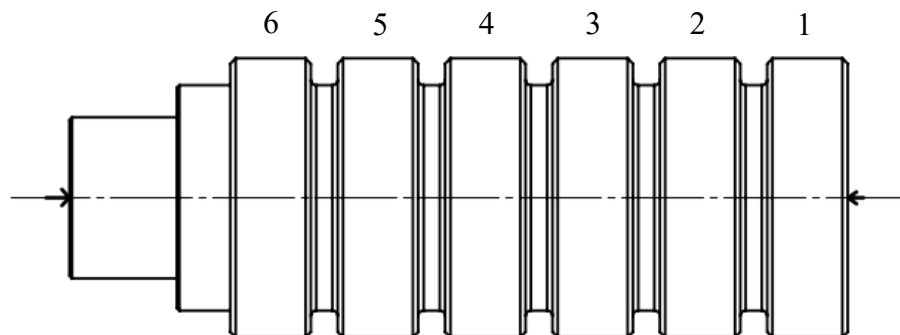
Tabulka 9 Základní parametry drsnoměru Talysurf CLI 500

Charakteristika	
Prostor měření D x H x V [mm]	50 x 50 x 50
Délka posuvu na osách X - Y - Z [mm]	50
Osové rozlišení [μm]	0,5
Rozměry D x H x V [mm]	500 x 310 x 450
Nosnost [kg]	10
Hmotnost [kg]	55
Max. rychlost polohování [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	30
Maximální rozlišitelnost [nm]	1
Maximální přípustná chyba měření [nm]	10



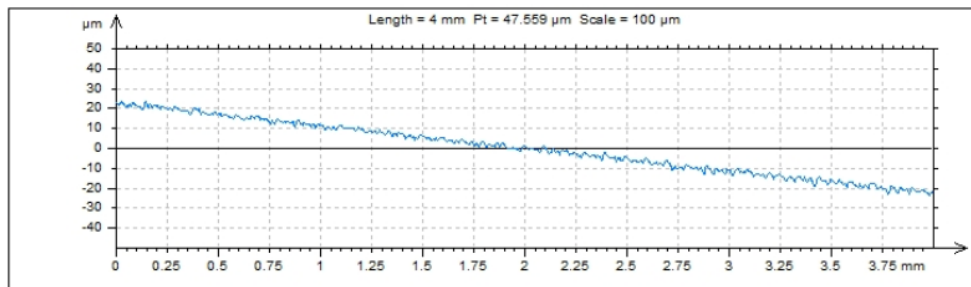
Obr. 34 Nastavení parametrů měření drsnosti

Vzorek je rozdělen na šest ploch. Na každé snímané ploše bylo provedeno deset náhodných měření. Měření probíhalo na ploše o délce 4 mm a rychlost měření byla nastavena na $100 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nastavení parametrů měření je zobrazeno na Obr. 34. Na Obr. 35 je znázorněno schéma rozdělení snímaných ploch u vzorku.

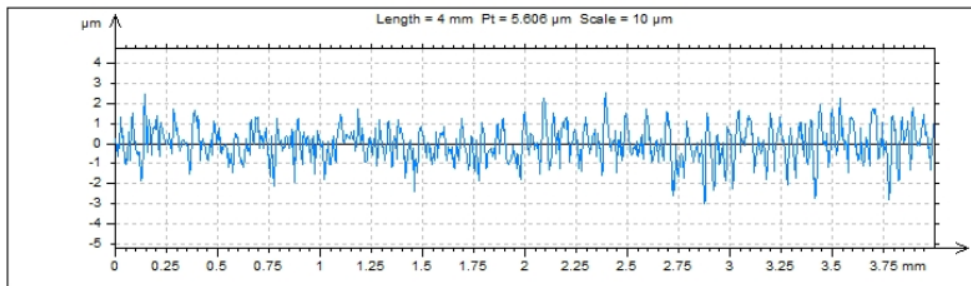


Obr. 35 Oblasti měření na vzorku

Po ukončení měření na zvolené ploše dostaneme k dispozici nasnímaný povrch zkušební vzorku (Obr. 36a). Následně je nutné provést odstranění tvaru, viz obr. 36b.



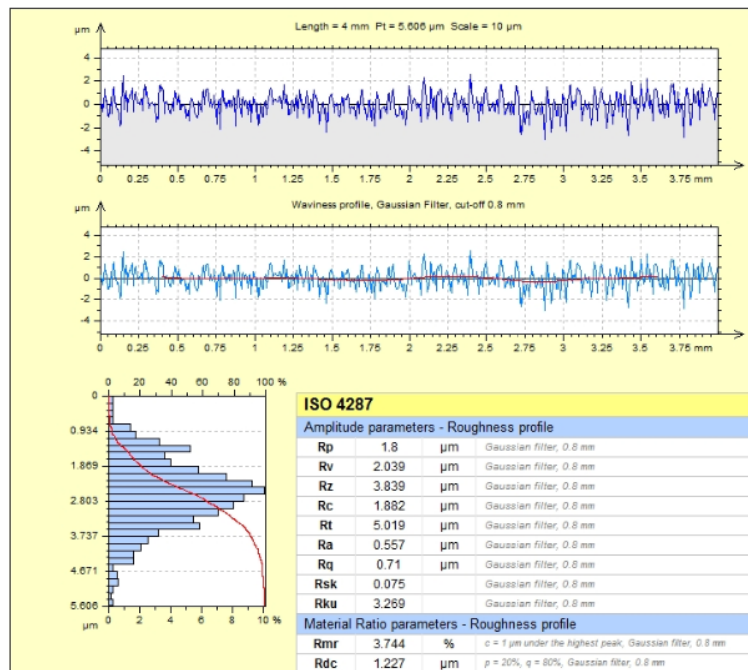
a) nasnímaný povrch zkušební vzorku



b) nasnímaní povrch po odstranění tvaru zkušební vzorku

Obr. 36 Nasnímaní zkušební vzorku 1 v oblasti 4

Pro další statistické zpracování jsou vybrány parametry drsnosti Ra, Rt a Rmr. Výsledek měření je uveden na Obr. 37. Hodnoty byly následně zpracovány pomocí statistického programu.



Obr. 37 Data z programu TalyMap

10 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

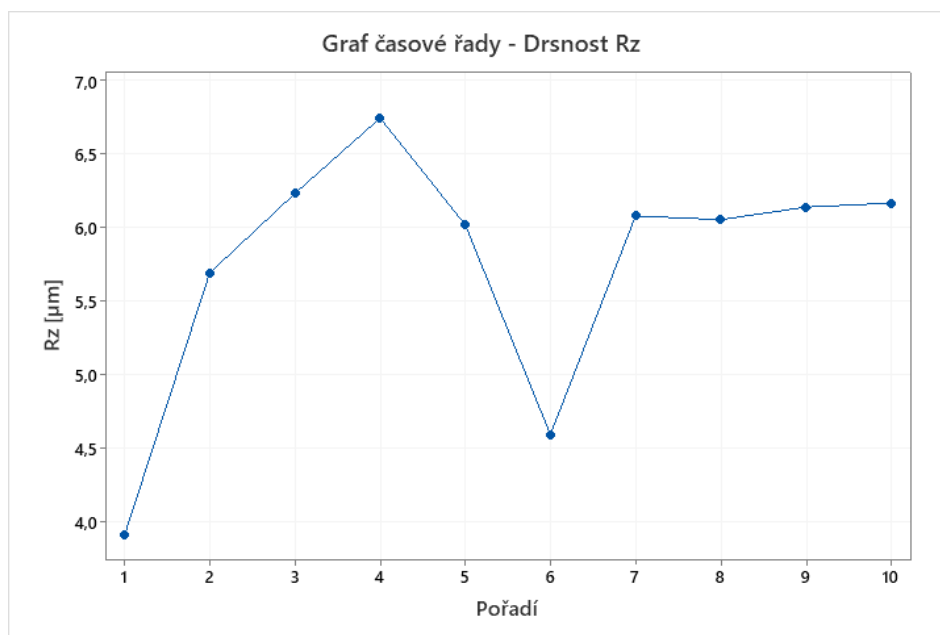
Pro ověření naměřených hodnot byl použit statistický software Minitab.

10.1 Analýza experimentálních dat

Jednotlivá měření byla provedena 10krát pro každou plochu zkušebního vzorku. V datech bylo potřeba nalézt případné vychýlené hodnoty a určit, zda vychýlení jsou extrémní nebo hrubé chyby. Pro tuto kontrolu dat byl použit graf časové řady a Boxplotový graf. Pro příklad analýzy bylo vybráno hodnocení dat z drsnosti Rz při posuvu $0,005 \text{ mm.m}^{-1}$.

Graf časové řady

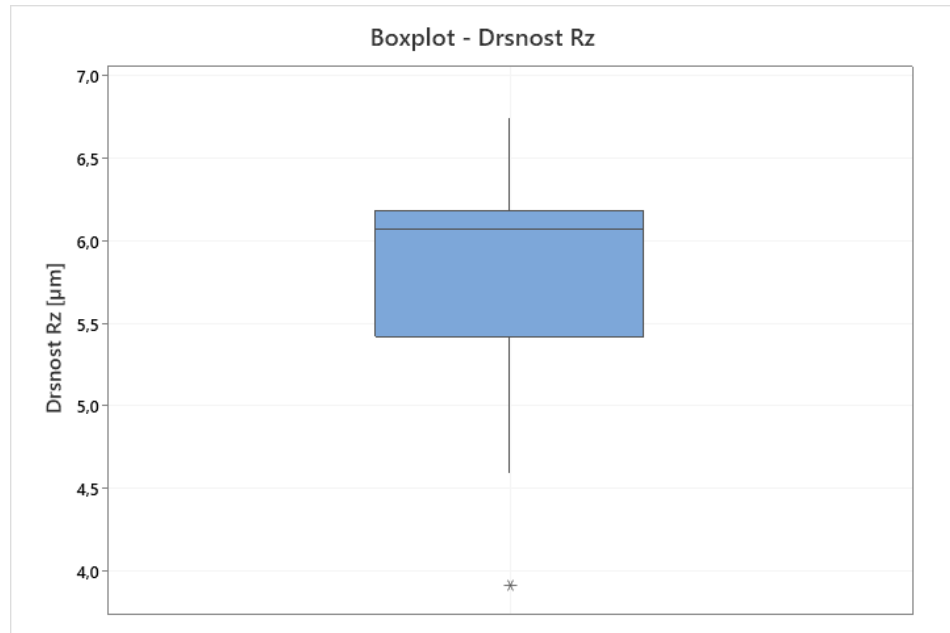
Na Obr. 38 je vidět graf časové řady parametru drsnosti Rz, kde jsou vidět dvě podezřelé vychýlené hodnoty.



Obr. 38 Graf časové řady – Drsnost Rz

Boxplot

I na dalším grafu (Obr. 39), který znázorňuje boxplot graf parametru drsnosti Rz. Je vidět vychýlená hodnota označena hvězdičkou. U této hodnoty je potřeba vyšetřit proč je hodnota vychýlená. Jestli se jedná o chybu hrubou, nebo chybu náhodnou.



Obr. 39 Boxplot – Drsnost Ra

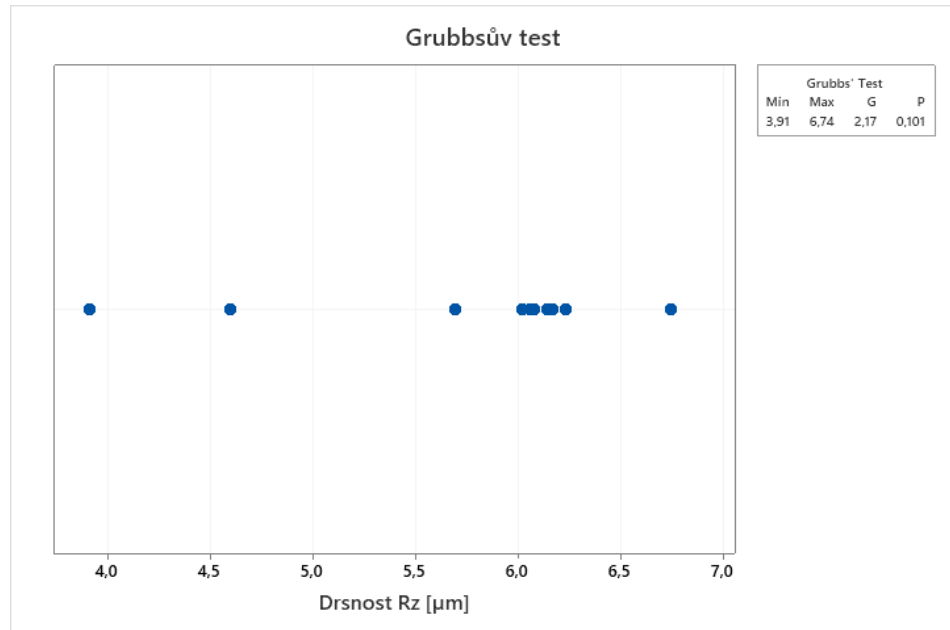
Je nutné zjistit, jak chyba vznikla, a poté je potřeba tuto chybu opravit a vychýlenou hodnotu vynechat z výběrového souboru, nebo ji nahradit nově naměřenou hodnotou. Pokud by chybná hodnota zůstala ve výběrovém souboru, mohla by ovlivnit výsledky měření, a to především odhad aritmetického průměru. Ten je totiž ovlivněn těmito odlehlými pozorováními, protože není pak zachována stejnorodost výběrového souboru, tedy neodpovídá Gaussově normálnímu rozdělení.

Z grafu (Obr. 39) jsou podezřelá hodnota: 3,91 μm. Byl použit jednostranný Grubbsův test. Pomocí Grubbsova testu určíme, zda měření č.1, tedy nejvíce vychýlená hodnota je pouze náhodná chyba nebo se jedná o chybu hrubou:

H_o : MIN (hodnota 3,91) = EXTRÉM

H_a : MIN (hodnota 3,91) \neq EXTRÉM

S hladinou významnosti $\alpha = 0,050$.



Obr. 40 Grubbsův test pro měření

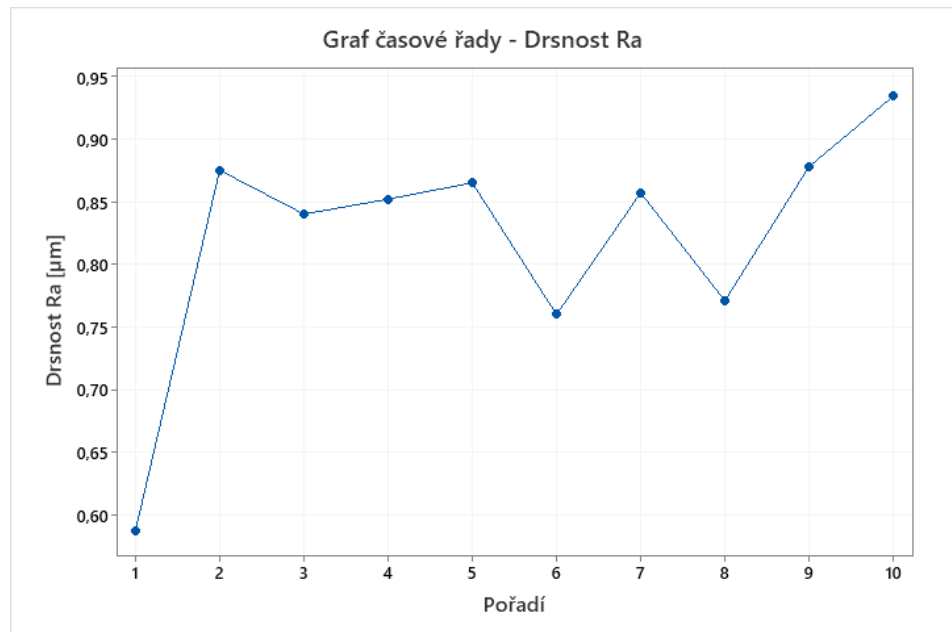
Z grafu (Obr. 40) vidíme, že hodnota $p = 0,101$ je větší než $\alpha (0,050)$. Tím pádem nezamítáme nulovou hypotézu H_0 a mohu s 95 % pravděpodobností říct, že hodnota $3,91 \mu\text{m}$ je pouze extrém a nikoli hrubá chyba.

10.2 Optimalizace experimentálních dat

Při kontrole hodnot, se u některých měření vyskytly hrubé odchylky dat, které se muselo vyřešit následujícím způsobem.

Graf časové řady

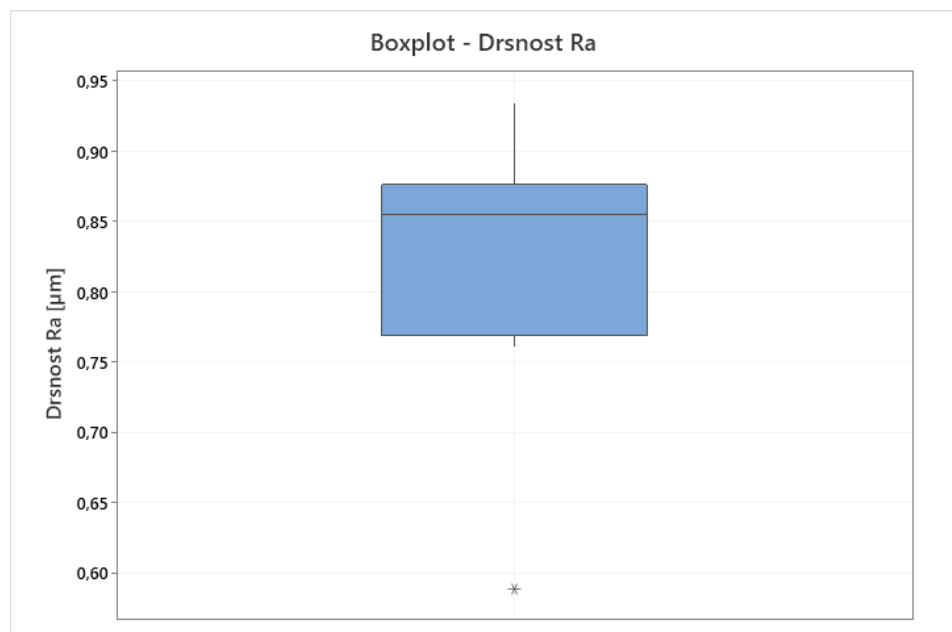
Z grafu časové řady (Obr. 41), vidíme jasný problém u měření č. 1 a měření č. 10. Je nutné zjistit, zda se jedná o extrémní či o hrubé chyby. Jako v předchozím případě jsme hodnoty vložily do Boxplot grafu.



Obr. 41 Graf časové řady – Drsnost Ra

Boxplot

Obr. 42 nám ukazuje, že v hodnocených datech jsou podezřelé odlehlé hodnoty. Provedeme tedy Grubbsův test pro ověření hodnot.



Obr. 42 Boxplot – Drsnost Ra

Grubbsův test

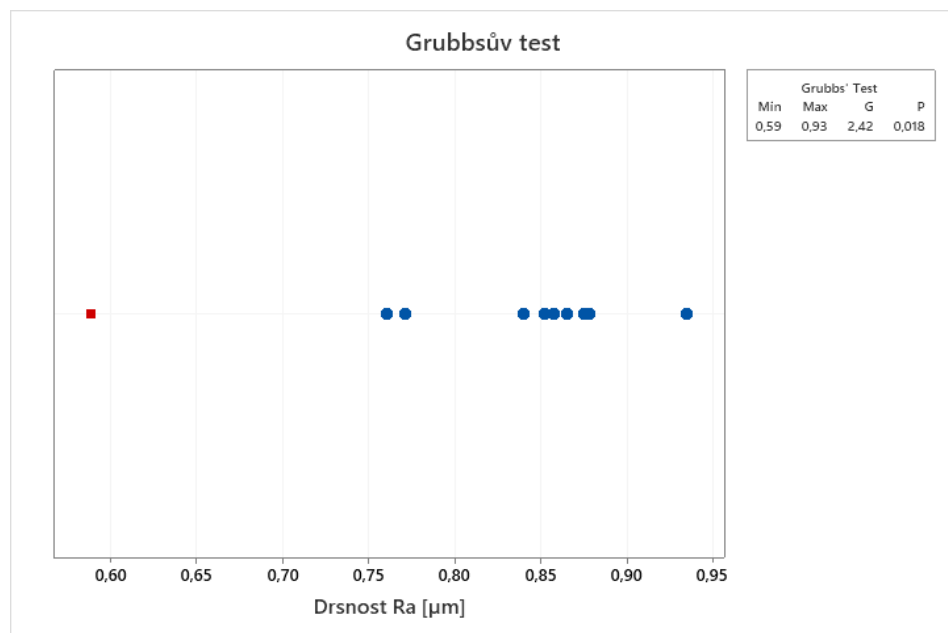
Z grafu časové řady jsou podezřelé dvě hodnoty: 0,588 μm a 0,934 μm . V jako předchozím případě byl použit jednostranný Grubbsův test.

Pomocí Grubbsova testu určíme, zda měření č.1 je pouze náhodná chyba nebo se jedná o chybu hrubou:

H_0 : MIN (hodnota 0,588) = EXTRÉM

H_a : MIN (hodnota 0,588) \neq EXTRÉM

S hladinou významnosti $\alpha = 0,050$.

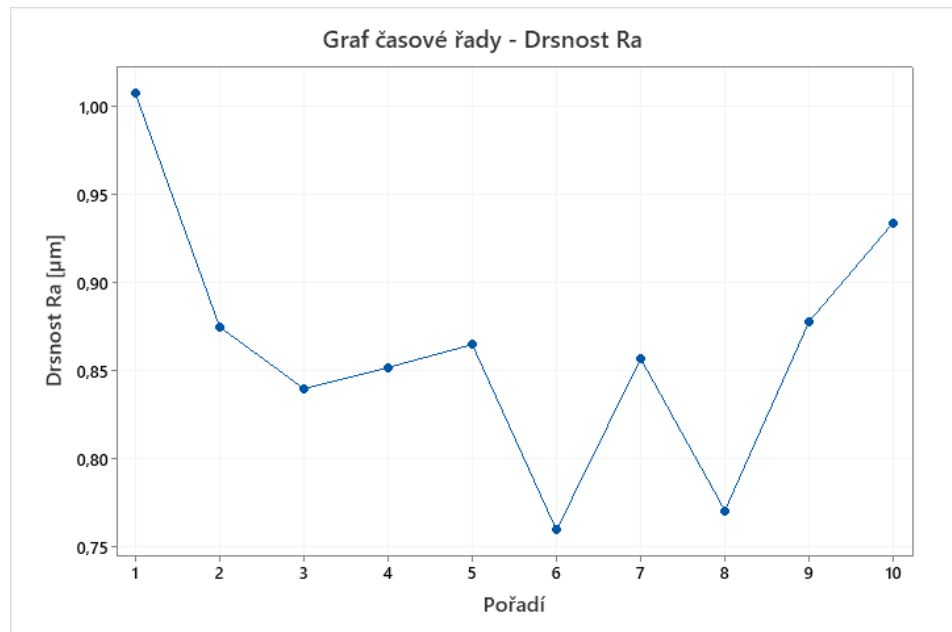


Obr. 43 Grubbsův test pro měření

Z grafu (Obr. 43) vidíme, že hodnota $p = 0,018$ tedy je menší než $\alpha (0,050)$. Tím pádem zamítám H_0 ve prospěch H_a – tedy měření č.1 je hrubá chyba a může být z hodnocených dat vyřazena. Jelikož by nám ve vyhodnocení chyběla hodnota, muselo být provedeno nové měření.

Graf časové řady

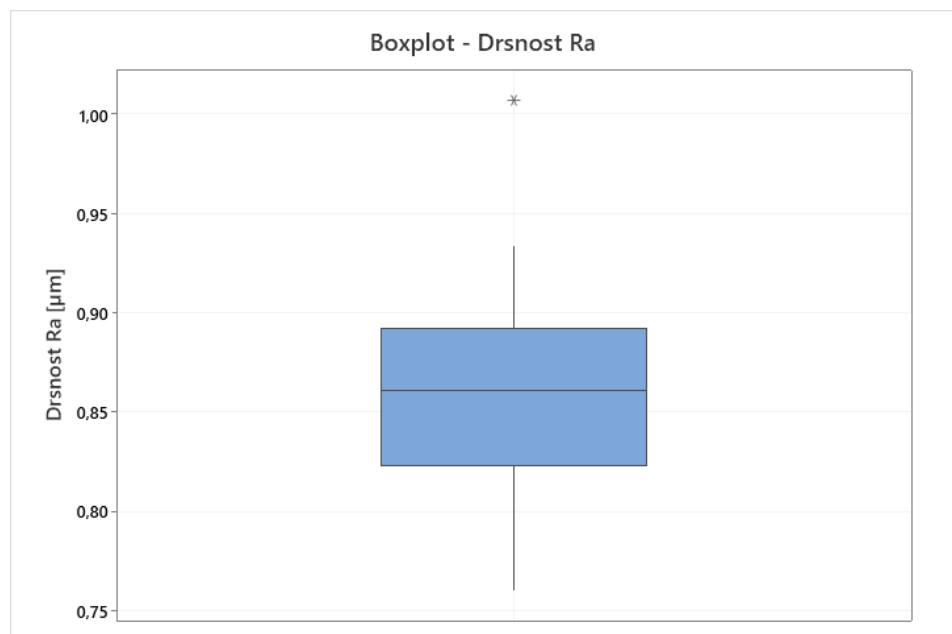
Obr. 44 vyobrazuje graf časové řady s novou naměřenou hodnotou, vidíme problém zase u měření č. 1. Je nutné zjistit, zda se jedná o extrémní či o hrubé chyby.



Obr. 44 Graf časové řady – Drsnost Ra

Boxplot

Vidíme, že boxplot (Obr. 45) nám ukazuje, že v hodnocených datech je podezřele odlehlá hodnota.



Obr. 45 Boxplot – Drsnost Ra

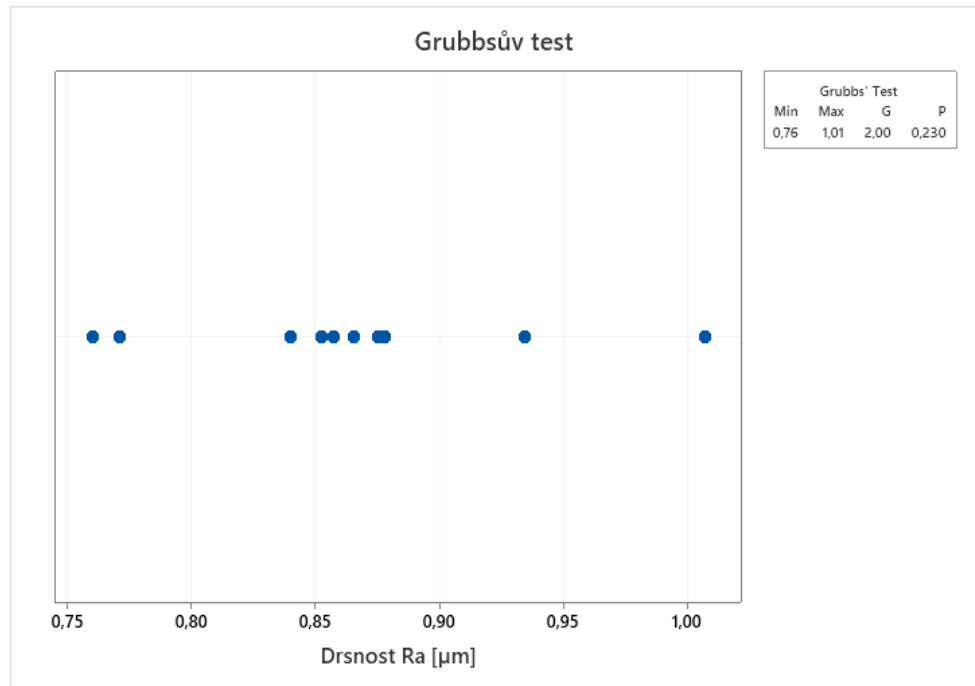
Grubbsův test

Nyní je potřeba Grubbsův test s novou naměřenou hodnotou zopakovat. Znovu musíme zjistit, zda se v měření vyskytuje náhodná nebo chyba hrubá:

H_0 : MIN (hodnota 1,007) = EXTRÉM

H_a : MIN (hodnota 1,007) \neq EXTRÉM

S hladinou významnosti $\alpha = 0,05$.



Obr. 46 Grubbsův test pro měření

Z grafu (Obr. 46) vidíme, že hodnota $p = 0,230$ je větší než $\alpha (0,050)$. Tím pádem nezamítám nulovou hypotézu H_0 a mohu s 95 % pravděpodobností říct, že hodnota $1,007\mu\text{m}$ je pouze extrém a nikoli hrubá chyba.

10.3 Zhodnocení kontroly dat

Při analýze zbylých dat byla provedena, dle postupu zmíněného v kapitole 10.2. V ostatních datech se již žádné větší výchyly nevyskytovaly tudíž považujeme tato data za validní. Tím pádem již bylo možné pokračovat k dalšímu kroku, kterým je grafické znázornění výsledků.

10.4 Prezentace výsledků

Z naměřených a optimalizovaných dat byly následně vytvořeny tabulky 10 až 15, kde jsou pro příklad uvedeny hodnoty naměřených drsností za použití výměnné břitové destičky z materiálu CBN (kubický nitrit bóru). Zbylá hodnocená data jsou uvedena v přílohách P III – P VIII.

Největší výšky profilu Rz

V tabulce 10 jsou uvedeny naměřené hodnoty Rz, ze kterých byl následně vypočítán aritmetický průměr, viz tabulka 11.

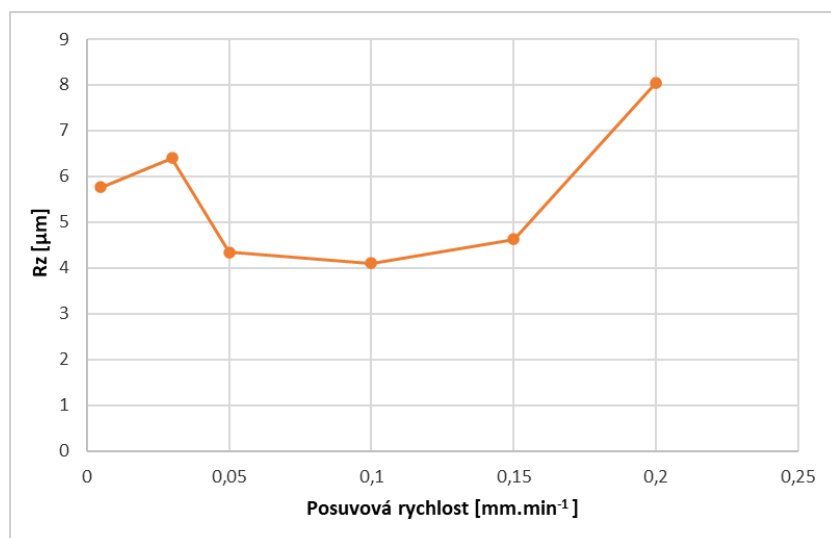
Tabulka 10 Naměřené hodnoty Rz

Plocha	1	2	3	4	5	6
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,005	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2
Pořadí měření	Drsnost Rz [μm]					
1.	3,911	4,53	3,195	3,833	4,935	9,692
2.	5,69	5,902	3,114	3,619	4,15	9,726
3.	6,229	6,965	3,902	3,575	4,95	9,423
4.	6,74	5,607	4,178	3,896	5,086	8,206
5.	6,018	6,934	4,56	4,301	4,538	9,692
6.	4,595	7,597	4,46	4,085	5,302	5,649
7.	6,077	7,53	5,178	3,839	4,018	6,007
8.	6,052	6,953	5,918	4,873	4,589	6,537
9.	6,137	6,018	4,495	4,111	4,793	7,282
10.	6,164	5,922	4,446	4,929	3,869	8,224

Tabulka 11 Aritmetický průměr hodnot Rz

Posuv [mm.min ⁻¹]	0,005	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2
Průměr Rz [μm]	5,761	6,396	4,345	4,106	4,623	8,044
<i>S</i>	0,85107	0,96424	0,83814	0,47295	0,4802	1,59716

Z tabulky 11 byl dále sestaven graf závislosti průměrné hodnoty Rz na posuvu, kde vidíme, že optimálních hodnot bylo dosaženo při posuvové rychlosti mezi 0,05 až 0,15 mm.min⁻¹. Mimo toto pásmo pozorujeme rostoucí hodnoty drsnosti.



Obr. 47 Aritmetický průměr hodnot Rz

Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra

Pro každý sloupec tabulky 12, byl spočítán aritmetický průměr. Tyto hodnoty jsou shrnuty v tabulce 13.

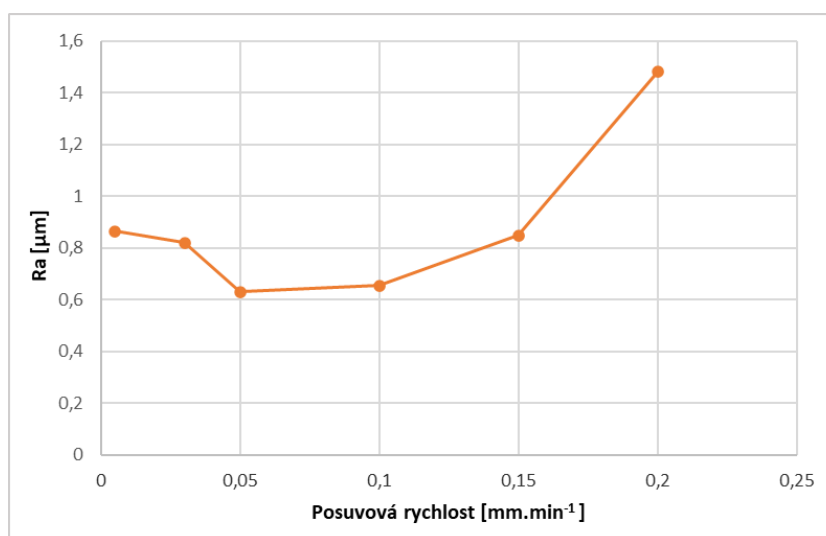
Tabulka 12 Naměřené hodnoty Ra

Plocha	1	2	3	4	5	6
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,005	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2
Pořadí měření	Drsnost Ra [μm]					
1.	1,007	0,649	0,485	0,585	0,891	1,651
2.	0,875	0,704	0,48	0,696	0,755	1,964
3.	0,84	0,834	0,502	0,613	0,875	1,647
4.	0,852	0,716	0,614	0,663	0,888	1,354
5.	0,865	0,861	0,694	0,654	0,866	1,651
6.	0,76	0,98	0,642	0,66	0,855	1,141
7.	0,857	0,991	0,755	0,557	0,824	1,229
8.	0,771	0,859	0,735	0,734	0,848	1,561
9.	0,878	0,824	0,669	0,692	0,901	1,248
10.	0,934	0,788	0,722	0,68	0,785	1,357

Tabulka 13 Aritmetický průměr hodnot Ra

Posuv [mm.min ⁻¹]	0,005	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2
Průměr Ra [μm]	0,864	0,821	0,630	0,653	0,849	1,480
S	0,07141	0,11195	0,10596	0,054	0,0478	0,25602

Z grafu na Obr. 48 opět stanovíme optimální pásmo hodnot. Na rozdíl od Rz je toto pásmo užší (0,05 až 0,1 mm.min⁻¹). Nalevo od tohoto pásma jsou hodnoty mírně vyšší, a napravo již pozorujeme značně stoupající trend.



Obr. 48 Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra

Materiálový podíl profilu Rmr

Také u naměřených a optimalizovaných dat pro Rmr byl z hodnot v každém sloupci tabulky 14 spočítán aritmetický průměr zobrazený v tabulce 15.

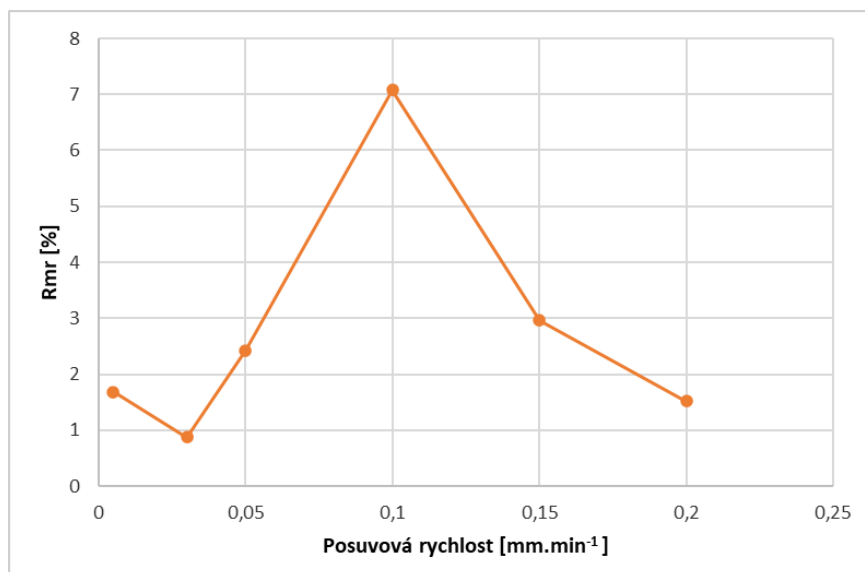
Tabulka 14 Naměřené hodnoty Rmr

Plocha	1	2	3	4	5	6
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,005	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2
Pořadí měření	Materiálový podíl Rmr [%]					
1.	3,12	0,312	4,524	7,536	3,744	0,624
2.	0,312	0,312	6,403	7,18	0,624	1,248
3.	0,936	1,134	1,092	8,736	4,524	1,248
4.	2,496	1,872	1,135	6,708	2,184	1,248
5.	1,092	1,56	2,028	11,765	5,01	0,624
6.	1,404	0,936	1,716	12,48	2,762	3,9
7.	3,341	0,312	1,716	3,744	1,092	3,432
8.	1,404	1,404	0,312	0,468	1,716	1,716
9.	1,913	0,312	2,808	6,118	2,34	0,624
10.	0,78	0,624	2,496	6,084	5,616	0,468

Tabulka 15 Aritmetický průměr hodnot Rmr

Posuv [mm.min ⁻¹]	0,005	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2
Průměr Rmr [%]	1,680	0,878	2,423	7,082	2,961	1,513
S	1,01575	0,59111	1,80895	3,51145	1,6943	1,20624

Z grafu Obr. 49 vidíme, že od hodnoty posuvu 0,1 mm.min⁻¹ pozorujeme trend klesající. Mírný pokles vidíme při zvyšování posuvu od 0,005 po 0,03 mm.min⁻¹, mezi touto hodnotou posuvu až po maximum v bodě 0,1 mm.min⁻¹ je rostoucí trend téměř lineární.



Obr. 49 Podíl materiálového profilu Rmr

11 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

V následujících kapitolách budou u všech zkoumaných vzorků porovnány průměrné hodnoty parametru drsnosti Rz, Ra a Rmr v závislosti na změně posuvu.

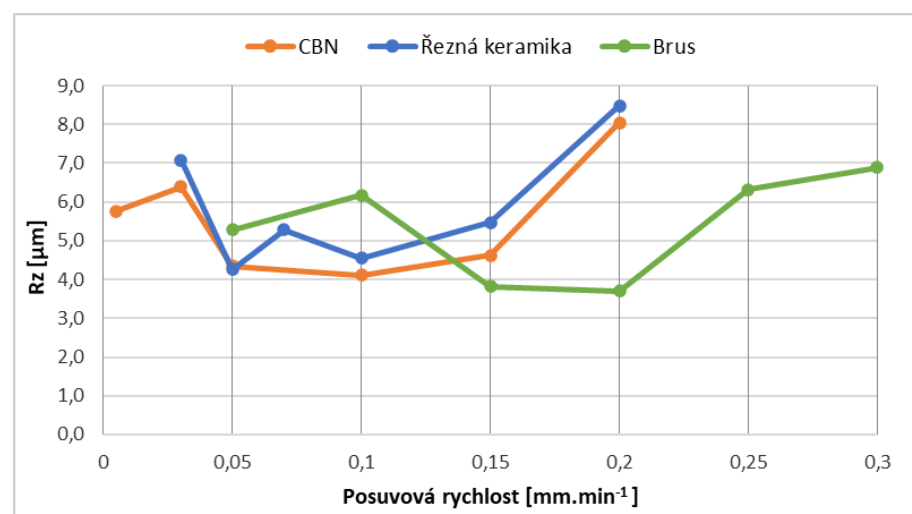
11.1 Největší výšky profilu – Rz

V této části bude porovnáván parametr Rz.

Tabulka 16 Tabulka porovnání drsnosti Rz

CBN						
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,005	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2
Parametr Rz [μm]	5,761	6,396	4,345	4,106	4,623	8,044
Řezná keramika						
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,03	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2
Parametr Rz [μm]	7,0776	4,2594	5,2849	4,5444	5,4759	8,4762
Broušení						
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Parametr Rz [μm]	5,2871	6,1671	3,8195	3,6984	6,315	6,8908

Na Obr. 50 vidíme graf srovnání parametru drsnosti Rz. Jsou zde znázorněny tři křivky. Dvě z nich představují technologii soustružení (oranžová, modrá) a jedna technologii broušení (zelená). Pokud se podíváme na výsledky měření pro soustružení, vykazují křivky podobný trend. Se stoupající posuvovou rychlostí se zpočátku parametr Rz značně snižuje, avšak od posuvu 0,1 mm.min⁻¹ a výše vidíme jak u CBN tak u řezné keramiky postupné zvyšování drsnosti obráběného povrchu. Zatímco u broušení dosahujeme nejnižšího hodnot při posuvu 0,15 až 0,2 mm.min⁻¹. Se zvyšujícím posuvem, zde vidíme opět rostoucí hodnotu drsnosti povrchu.



Obr. 50 Porovnání drsnosti Rz

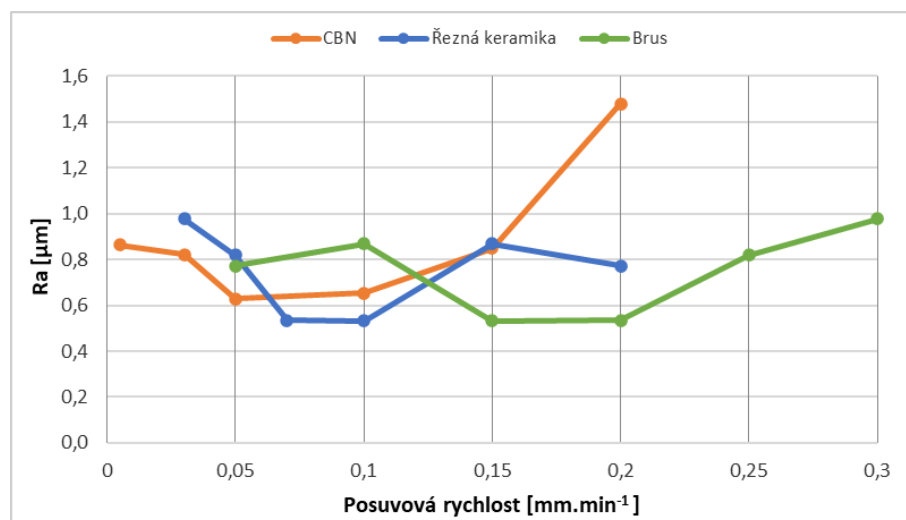
11.2 Srovnání průměrné aritmetické úchytky profilu – Ra

Porovnávání parametru Ra pro zkoumané technologie, proběhne obdobným způsobem jako v předchozím případě.

Tabulka 17 Tabulka porovnání drsnosti Ra

CBN						
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,005	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2
Parametr Ra [μm]	0,864	0,821	0,630	0,653	0,849	1,480
Řezná keramika						
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,03	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2
Parametr Ra [μm]	0,9783	0,8195	0,5358	0,5328	0,8685	0,7709
Broušení						
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Parametr Ra [μm]	0,7709	0,8685	0,5328	0,5358	0,8195	0,9783

Při srovnání parametru drsnosti Ra (Obr. 51) se dostáváme k podobným výsledkům, jako u parametru Rz. I zde pozorujeme obdobný trend u soustružení a mnohem optimálnější hodnoty drsnosti u broušení, zejména u vyššího posuvu. Na rozdíl od předchozího grafu, zde nepozorujeme tak markantní rozdíl drsnosti povrchu obráběného metodou broušení v závislosti na změně rychlosti posuvu.



Obr. 51 Porovnání drsnosti Ra

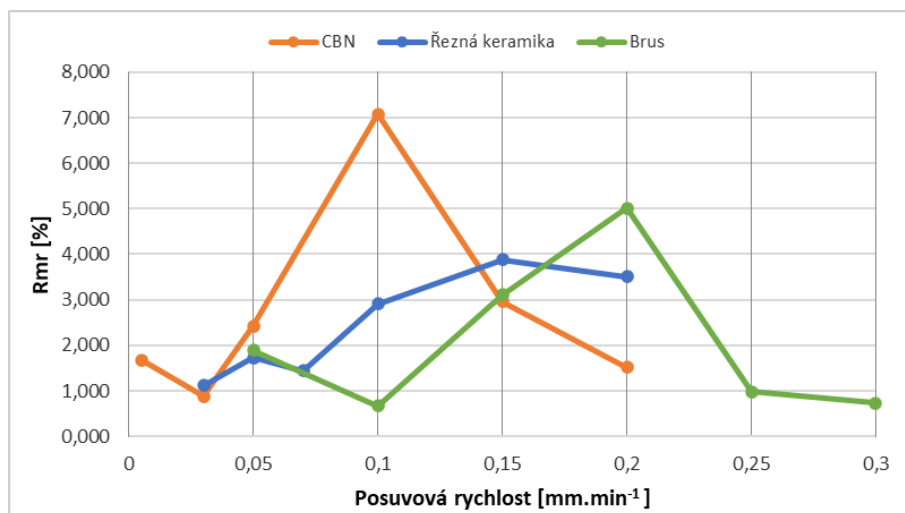
11.3 Srovnání materiálového podílu profilu – Rmr

V této části bude porovnáván parametr Rmr pro zkoumané technologie, podobně jako předchozích podkapitolách.

Tabulka 18 Tabulka porovnání drsnosti Rmr

CBN						
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,005	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2
Mat. poměr Rmr [%]	1,680	0,878	2,423	7,082	2,961	1,513
Řezná keramika						
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,03	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2
Mat. poměr Rmr [%]	1,1113	1,7316	1,4422	2,9144	3,8786	3,5115
Broušení						
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Mat. poměr Rmr [%]	1,8878	0,6701	3,1072	5,0098	0,9828	0,7371

Posledním grafickým výstupem měření je Obr. 52, který zobrazuje závislost materiálového podílu na posuvové rychlosti. Nejmeně vyhovující výsledek byl dosažen pomocí soustružení s destičkami z CBN, a to při hodnotě posuvu 0,1 mm.min⁻¹. Obecně jsou hodnoty dosažené soustružením relativně vyšší. Trend je u nižších rychlostí stoupající.



Obr. 52 Porovnání profilu Rmr

12 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Obrábění dílů je nutné provádět s jistou efektivitou, při které se hlavní pozornost zaměřuje na výslednou cenu vyrobené součásti. Důležitým faktorem je volba správné technologie a řezného materiálu, který je schopen funkční plochu obrobku s požadovanou přesností a jakostí povrchu při minimálních výrobních časech. Z porovnání křivek vyplývá, že ideální posuvová rychlost, při které je zajištěna ideální drsnost povrchu Rz a Ra je hodnota $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Nejdříve tedy budou vypočteny strojní časy soustružení. Řezná rychlost byla zvolena podle výrobce výměnné břitové destičky a jako hodnotu posuvu dosadíme $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. U broušení volíme stejný posuv. K výpočtu jednotkového strojního času pro soustružení použijeme vzorec (2.5). Pro L, které je dráha nástroje ve směru posuvu a je určena vztahem (2.6)

K získání vzorce pro výpočet otáček musíme upravit vzorec (2.1) po úpravě dostaneme vzorec pro výpočet n , do kterého dosadíme stanovenou řeznou rychlost, u destiček z CBN byla zvolena hodnota $v_c = 165 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Výpočet jednotkového strojního času při použití břitové destičky z CBN bude vypadat následovně:

$$n = \frac{1000 \cdot 165}{\pi \cdot 52} = 1010 \text{ ot/min}$$

$$L = 15 + 2 + 2 = 19 \text{ mm}$$

$$t_{AS} = \frac{19}{1010 \cdot 0,1} = 0,19 \text{ min}$$

Pro výpočet času řezné keramiky postupujeme stejným způsobem jako v případě CBN. Tedy použijeme stejný vzorec a jako řeznou rychlost volíme hodnotu $v_c = 160 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

$$n = \frac{1000 \cdot 160}{\pi \cdot 52} = 979,4 \text{ ot/min}$$

$$L = 15 + 2 + 2 = 19 \text{ mm}$$

$$t_{AS} = \frac{19}{979,4 \cdot 0,1} = 0,194 \text{ min}$$

Výpočet jednotkového strojního času pro broušení, lze spočítat pomocí vzorce (1.8). Počáteční hodnoty pro broušení byly zvoleny následovně. Řeznou rychlost: $v_c = 27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, přírůstek $a_p = 0,3 \text{ mm}$ a rychlost obrobku $v_w = 20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Při broušení se brusný kotouč přisouvá

při každé otáčce obrobku a přísuv se volí v mezích 0,001 mm až 0,005 mm na otáčku podle rychlosti obrobku. V našem případě vychází přísuv na hodnotu 0,00082 mm.

V našem případě se jedná o broušení zápichové, tedy konečný tvar rovnice bude po úpravě následující:

$$t_{as} = \frac{p_c}{v_{fa}} + t_v \text{ [min]}$$

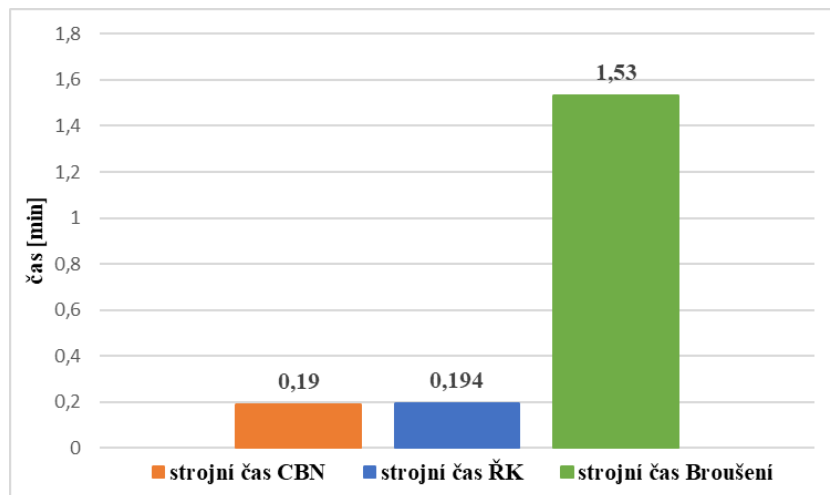
Kde p_c je součet přídávku p a bezpečné vzdálenosti p_b . V našem případě byla bezpečná vzdálenost zvolena na hodnotu 0,05 mm. Přídavek na průměru pro broušení byl 0,2 mm. Čas na vyjiskření $t_v = 0,03$ min.

$$p_c = \frac{p}{2} + p_b \text{ [mm]}$$

$$p_c = \frac{0,2}{2} + 0,05 = 0,15 \text{ mm}$$

$$t_{as} = \frac{0,125}{0,1} + 0,03 = 1,53 \text{ min}$$

Výsledné časy se pro lepší názornost vložily do sloupcového grafu, který můžeme vidět níže.



Obr. 53 Graf porovnání strojního času

Z grafického znázornění můžeme vidět, že technologie soustružení je časově mnohem efektivnější než broušení, a to v jak v případě použití destiček z kubického nitridu bóru, tak řezné keramiky.

ZÁVĚR

Diplomová práce byla zaměřena na posouzení vhodnosti alternativy soustružení za konvenční technologii broušení za snížení nákladů při zachování kvality. Konkrétně se tato práce zaměřila na studium vlivu změny posuvové rychlosti na jakost povrchu zkušební vzorku.

Teoretická část práce byla věnována technologii broušení a soustružení. V této části se práce zabývá obecným popisem procesu obou technologií. Jsou rozebrány nejen aspekty kinematické a fyzikální, ale taky i možnosti použití řezných materiálů při obrábění. Další část byla vyhrazena parametrům drsnosti povrchu a problematice měření drsnosti povrchu. Závěrečná část literární rešerše byla zaměřena na interpretaci naměřených dat a statistický soubor.

Praktická část se zabývá samotným návrhem zkušební tělesa a experimentem. Konkrétně zde byly popsány jednotlivé aspekty, jako je tvar experimentálního vzorku a použitý materiál. Dále pak navržené stroje a nástroje. Další oblast práce byla určena popisu a nastavení jednotlivých parametrů měření drsnosti povrchu na bezkontaktním optickém přístroji Talysurf CLI 500. Poslední část byla zaměřena na zpracování výsledků měření drsnosti povrchu zkušebních vzorků a ekonomické zhodnocení.

Ze samotných výsledků měření můžeme konstatovat obecný závěr, že technologie soustružení dokáže plně zastoupit konvenční broušení po stránce kvality povrchu, za předpokladu dodržení mezí optimální posuvové rychlosti, která dle provedeného experimentu je v rozmezí $0,05$ až $0,15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, kde dosahujeme drsnosti v mezích $Rz 4$ až $5 \mu\text{m}$. Při soustružení dosahujeme tohoto rozmezí jak za použití břitové destičky z CBN, tak i řezné keramiky.

Při zhodnocení ekonomického hlediska, byl vyvozen závěr, že užitím metody soustružení lze obdobné kvality povrchu dosáhnout za osminu časových nákladů oproti konvenčnímu broušení. Zatímco u broušení bylo potřeba $1,53$ min na přebroušení jednoho segmentu, u soustružení bylo dosaženo času $0,19$ min.

Další výhodou jsou nižší náklady na strojní park, jelikož odpadá potřeba užití brusky, a její úlohu dokáže v rámci zachování požadované jakosti povrchu nahradit soustruh.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOČMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [2] MASLOV, J. Teorie broušení kovů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1979, 246 s
- [3] CNC broušení. MESIT machining, s.r.o. [online]. MESIT machining, 2019 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://www.mesitmachining.cz/brouseni>
- [4] HUMÁR, Antonín. Technologie I – Technologie obrábění – 3. část.: Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program [online]. Brno, 2005 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [5] HUMÁR, Antonín. Technologie I – Technologie obrábění – 1. část.: Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program [online]. Brno, 2005 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf.
- [6] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. Strojírenská technologie 3. 2. Vyd. Praha: Scientia, 2005, 256 s. ISBN 80-718-3337-1.
- [7] KOČMAN, Karel, a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [8] FOREJT, Milan, a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [9] 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.
- [10] GROTE, Karl-Heinrich, a Erik K. ANTONSSON. Springer handbook of mechanical engineering. New York: Springer, c2009. ISBN 978-3-540-49131-6.
- [11] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Obrábění kalených součástí kubickým nitridem bóru: Trendy obrábění [online]. 2004 [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-kalenych-soucasti-kubickymnitridem-boru.html>
- [12] KOENIG, W.; KOMANDURI, R. ; TÖNSHOFF, H. ; ACKERSCHOTT, G. Machining of Hard Materials. CIRP Annals 3/2/1984, ISBN 978-80-227-2636-8

- [13] CHOU, Y. K. - EVANS, CH. J. - BARASH, M. M.: Experimental Investigation on Cubic Boron Nitride Turning of Hardened AISI 52100 Steel, *Journal of materials processing technology*, 2003
- [14] TONSHOFF, H.K. - ARENDT, C. - BEN AMOR, R.: Cutting of hardened steel, *CIRP Annals* 2/2000
- [15] MAŇKOVÁ, I., SALANCI, S.: Nástroje z KNB pri sústružení kalených ocelí. *Strojárstvo* roč. V.6/2001
- [16] NESLUŠAN, Miroslav. Sústruženie kalených ocelí. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žilíně, 2009. ISBN 978-80-554-104-1.
- [17] Soustruh Hardinge T-51 [online]. [cit. 2019-09-13]. Dostupné z: <https://www.gosiger.com/machines/horizontal-lathes/hardinge/t-series/t-51>
- [18] HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM Publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [19] BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. 1. vyd. Trenčín: TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 2004. ISBN 80-8075-013-0.
- [20] Řezná keramika. Sandvik Coromant [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2011 [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/ceramics/pages/default.aspx
- [21] DRASTÍK, František. Strojnická příručka: vývoj, výpočty, konstrukce, technologie, výroba. Praha: Dashöfer, 2002. ISBN 1801-7991.
- [22] DRASTÍK, František. Strojnická příručka: vývoj, výpočty, konstrukce, technologie, výroba. Praha: Dashöfer, 2002. ISBN 1801-7991.
- [23] Polykrystalický kubický nitrid bóru. Sandvik Coromant [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2011 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/polycrystalline_cubic_boron_nitride/pages/default.aspx
- [24] Kubický nitrid boru [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/03011.html>

- [25] Nástrojové materiály Sandvik [online]. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- [26] ČOP, Jiří, Vladimír PATA a Ondřej BÍLEK. Influence of Technological Parameters on Surface Quality of Injectionmolded parts. In: Key Engineering Materials [online]. Novi Sad: Trans Tech Publications Ltd, 2016, s. 131-136. [cit. 2018-10-12]. ISSN 1013-9826. Dostupné z: <https://publikace.k.utb.cz/handle/10563/1006308>
- [27] GADELMAWLA, E. S., KOURA, M. M., MAKSOU, T.M.A., ELEWA, I. M., SOLIMAN, H. H. Roughness parameters, Journals of Materials Processing Technology. Vol. 123, 2002. p. 133-145. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602000602>
- [28] ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999.
- [29] Zvýšení kvality hodnocení textury povrchu [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvyseni-kvality-hodnoceni-textury-povrchu.html>
- [30] A Different Slice of Surface Finish [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/92095-a-different-slice-of-surface-finish>
- [31] Integrita obráběného povrchu [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: http://images.slideplayer.cz/7/1913161/slides/slide_26.jpg
- [32] Dotykové nebo bezdotykové měření struktury povrchu [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dotykove-nebo-bezdotykovemereni-struktury-povrchu.html>
- [33] BUMBÁLEK, L.; BUMBÁLEK, B. Pokrokové trendy v hodnocení textury povrchu, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.
- [34] Měření drsnosti povrchu [online]. [cit.2020-12-20]. Dostupné z WWW: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1103>
- [35] HOLEŠOVSKÝ, František. Broušení a jeho vliv na vlastnosti povrchu. 2007. VŠB-TU Ostrava. 2007. ISBN 978-80-248-1644-9.

- [36] TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2004. ISBN 978-80-248-0671-6.
- [37] BEDÁŇNOVÁ, Iveta a Vladimír VEČEREK. Základy statistiky [online]. Brno, 2007, 130 s. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/stat-potr/POTR/Skripta.pdf>
- [38] HENDL, Jan. *Přehled statistických metod: analýza a metaanalýza dat*. 4., rozš. vyd. Praha: Portál, 2012, 734 s. ISBN 978-80-262-0200-4
- [39] Materiálový list ČSN 14 109 [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: http://kulicky.wbs.cz/14_109.pdf
- [40] CNC obráběcí stroje, kovoobráběcí stroje DMG MORI [online]. Copyright © 2020 DMG MORI. [cit. 06.02.2020]. Dostupné z: https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/soustruzeni/soustruzeni-frezovani/ctx-tc/ctx-beta-1250-tc?gclid=EAIaIQobChMIrfKw2_yi4QIVxeJ3Ch3VDgsuEAAYAS-AAEgJYvfD_BwE
- [41] Soustružení tvrzených součástí pomocí CBN [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/c-2940-137.pdf>
- [42] Výměnné břitové destičky Sandvik [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/pages/search15products.aspx?tpcleaf=INSTRNG_COR&q=WNGA080404
- [43] Řezná keramika – Moderní a produktivní způsob obrábění žárovzdorných slitin [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/cs-cz/c-2929-61.pdf>
- [44] Soustružnické nástroje Walter Turn [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/cs-cz/search/pages/default.aspx#/product/DWLNL2525X08-P>
- [45] Hrotové brusky BUB 50 B Practic | TOS Čelákovice. Slovákcké strojírny, a. s. [online]. Copyright © 2008 [cit. 06.02.2020]. Dostupné z: <http://www.sub.cz/tos-celakovice/hrotove/bub-50-b-practic.aspx>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_D	Jmenovitý průřez třísky
a_e	Pracovní záběr
a_p	Šířka záběru ostří.
b	Šířka tělesa nože
b_D	Šířka třísky
b_s	Šířka broušícího kotouče
CBN	Kubický nitrid bóru
CLA	Chromatic Lenght Aberration
D	Průměr broušícího kotouče
d	Průměr obrobku
d_s	Průměr broušícího kotouče
d_w	Průměr obrobku
F	Celková síla
F_c	Řezná síla
F_p	Pasivní síla
F_f	Posuvová síla
f	Funkční délka
f_a	Axiální posuv
f_r	Radiální posuv stolu brusky na jeden axiální zdvih stolu
H	Šířka broušícího kotouče
H_A	Alternativní hypotéza
H_o	Nulová hypotéza
HB	Tvrlost materiálu podle Brinella
HRC	Tvrlost materiálu podle Rockwella

h	Přísuv
h_1	Výška tělesa nože
h_D	Jmenovitá tloušťka třísky
k_c	Měrná řezná síla
L	Délka broušené plochy obrobku
L_c	Dráha při čelním soustružení
l_a	Délka axiální dráhy brousícího kotouče
l_{at}	Délka náběhu v tangenciálním směru
l_e	Skutečná délka styku
l_g	Geometrická délka styku
l_k	Kinematická délka styku
l_{pa}	Délka přeběhu v axiálním směru
l_w	Délka obrobku
MPa	Megapascal
n_s	Frekvence otáčení brousícího kotouče
n_w	Frekvence otáčení obrobku
p	Přídavek na broušení
p_b	Bezpečná vzdálenost najetí brusného kotouče
q	Poměr rychlostí
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu
Rt	Celková výška profilu
Rmr	Materiálový podíl drsnosti
Rz	Největší výška profilu
r_{eq}	Ekvivalent poloměru brousícího kotouče
r_n	Poloměr zaoblení ostří
s	Odhad směrodatné odchylky

SK	Slinuté karbidy
T	Testovací kritérium t-testu
T_{krit}	Kritická hodnota t-testu
t_{ASn}	Jednotkový strojní čas při konstantních otáčkách obrobku
t_{ASv}	Jednotkový strojní čas pro obrábění konstantní řeznou rychlostí
t_{as}	Jednotkový strojní čas
v_c	Řezná rychlost
v_e	Účinný výsledný pohyb
v_f	Posuvová rychlost
V_{fa}	Axiální rychlost posuvu
v_{ft}	Tangenciální rychlost posuvu
v_{fr}	Radiální rychlost posuvu
v_k	Obvodová rychlost brousicího kotouče.
v_{ob}	Obvodová rychlost obrobku
v_s	Podélný posuv
v_w	Obvodová rychlost obrobku
\bar{x}	Odhad aritmetického průměru
\tilde{x}	Odhad medián
α_n	Normálový úhel hřbetu
γ_n	Normálový úhel čela
κ_r	Úhel nastavení nože
γ	Úhel čela
λ_s	Úhel sklonu

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Ukázka vnějšího broušení mezi hroty [3]</i>	11
<i>Obr. 2 Broušení vnějších válcových ploch s posuvem podél osy obrobku [4]</i>	12
<i>Obr. 3 Model záběru brousícího zrna [1]</i>	13
<i>Obr. 4 Kinematika broušení vnějších válcových ploch [4]</i>	15
<i>Obr. 5 Schéma pro výpočet t_{as} pro obvodové axiální broušení [4]</i>	18
<i>Obr. 6 Schéma pro výpočet t_{as} pro rovinné obvodové broušení [4]</i>	19
<i>Obr. 7 Základní druhy operací při soustružení [5]</i>	21
<i>Obr. 8 Vektory rychlostí při soustružení: a) válcové plochy, b) čelní plochy [8]</i>	22
<i>Obr. 9 Jednotkový strojní čas pro soustružení podélné válcové plochy [5]</i>	23
<i>Obr. 10 Poměry pro určení strojního času při čelním soustružení [5]</i>	23
<i>Obr. 11 Rozdíly mezi obráběním před TZ a tvrdým obráběním</i>	24
<i>Obr. 12 Konstrukce soustruhu T51 Hardinge [17]</i>	25
<i>Obr. 13 Profil povrchu [28]</i>	28
<i>Obr. 14 Parametr drsnosti R_a [31]</i>	29
<i>Obr. 15 Největší výška profilu R_z [31]</i>	30
<i>Obr. 16 Celková výška profilu R_t [31]</i>	30
<i>Obr. 17 Materiálový podíl drsnosti [37]</i>	30
<i>Obr. 18 Diamantový měřící hrot [33]</i>	31
<i>Obr. 19 Schéma kontaktního snímání povrchu [34]</i>	32
<i>Obr. 20 Schéma indukčního systému měření povrchu kontaktním způsobem [34]</i>	33
<i>Obr. 21 Ukázka graf časové řady</i>	36
<i>Obr. 22 Histogram četností [38]</i>	37
<i>Obr. 23 Konstrukce box plotu [38]</i>	37
<i>Obr. 24 Ukázka Grubbsova testu</i>	38
<i>Obr. 25 3D model vzorku</i>	43
<i>Obr. 26 Rozměry zkušebního vzorku</i>	43
<i>Obr. 27 DMG CTX Beta 1250 [40]</i>	45
<i>Obr. 28 Detail sestavy držáku a břitové destičky</i>	47
<i>Obr. 29 Obrábění vzorku číslo 1 břitovou destičkou z CBN</i>	48
<i>Obr. 30 TOS BUC 63 C Practic [45]</i>	48
<i>Obr. 31 Použitý brusný kotouč o rozměrech 750 x 63 x 305 mm</i>	49
<i>Obr. 32 Broušení zkušebního vzorku číslo 3</i>	50

<i>Obr. 33</i> Soustava pro bezkontaktní měření drsnosti	51
<i>Obr. 34</i> Nastavení parametrů měření drsnosti	52
<i>Obr. 35</i> Oblasti měření na vzorku	52
<i>Obr. 36</i> Nasnímaní zkušebního vzorku 1 v oblasti 4.....	53
<i>Obr. 37</i> Data z programu TalyMap	53
<i>Obr. 38</i> Graf časové řady – Drsnost Rz.....	54
<i>Obr. 39</i> Boxplot – Drsnost Ra	55
<i>Obr. 40</i> Grubbsův test pro měření	56
<i>Obr. 41</i> Graf časové řady – Drsnost Ra	57
<i>Obr. 42</i> Boxplot – Drsnost Ra	57
<i>Obr. 43</i> Grubbsův test pro měření	58
<i>Obr. 44</i> Graf časové řady – Drsnost Ra	59
<i>Obr. 45</i> Boxplot – Drsnost Ra	59
<i>Obr. 46</i> Grubbsův test pro měření	60
<i>Obr. 47</i> Aritmetický průměr hodnot Rz.....	61
<i>Obr. 48</i> Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra.....	62
<i>Obr. 49</i> Podíl materiálového profilu Rmr	63
<i>Obr. 50</i> Porovnání drsnosti Rz	64
<i>Obr. 51</i> Porovnání drsnosti Ra	65
<i>Obr. 52</i> Porovnání profilu Rmr	66
<i>Obr. 53</i> Graf porovnání strojního času	68

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Chyby α a β při testování hypotéz [37].....	40
Tabulka 2 Chemické složení ložiskové oceli 100Cr6 [hm. %] [39].....	44
Tabulka 3 Základní mechanické vlastnosti ložiskové oceli 100Cr6 [39].....	44
Tabulka 4 Základní parametry stroje [40]	45
Tabulka 5 Rozměry a geometrie VBD WNGA080404S01030A 7025 [42]	46
Tabulka 6 Rozměry a geometrie VBD WNGA080404S01525 6050 [42]	46
Tabulka 7 Rozměry a geometrie držáku Walter DWLNL2525X08-P [44].....	47
Tabulka 8 Základní parametry stroje [45]	49
Tabulka 9 Základní parametry drsnoměru Talysurf CLI 500.....	51
Tabulka 10 Naměřené hodnoty Rz	61
Tabulka 11 Aritmetický průměr hodnot Rz.....	61
Tabulka 12 Naměřené hodnoty Ra	62
Tabulka 13 Aritmetický průměr hodnot Ra.....	62
Tabulka 14 Naměřené hodnoty Rmr.....	63
Tabulka 15 Aritmetický průměr hodnot Rmr	63
Tabulka 16 Tabulka porovnání drsnosti Rz.....	64
Tabulka 17 Tabulka porovnání drsnosti Ra.....	65
Tabulka 18 Tabulka porovnání drsnosti Rmr	66

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výrobní výkres vzorku – TL4130983

Příloha P II: Materiálový certifikát 100Cr6

Příloha P III: Vyhodnocení parametru Rz vzorek 2

Příloha P IV: Vyhodnocení parametru Ra vzorek 2

Příloha P V: Vyhodnocení parametru Rmr vzorek 2

Příloha P VI: Vyhodnocení parametru Rz vzorek 3

Příloha P VII: Vyhodnocení parametru Ra vzorek 3

Příloha P VIII: Vyhodnocení parametru Rmr vzorek 3

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ CERTIFIKÁT 100Cr6




TRINECKÉ ŽELEZÁŘNY
MORAVIA STEEL

A02 Art der Prüfbescheinigung / Type of Inspection document																																																	
Abnahmeprüfzeugnis 3.1 - Inspection certificate 3.1, EN 10204:2004																																																	
A01/A05 Herstellerwerk / Manufacturer issued by TRINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech Republic								Seite / Page 1/2																																									
A07 Kundenbestellnummer / Purchaser's order No. TA27615-SB 6769 2016								A03 Bescheinigungsnummer / Document No. 2016/08/004674-MRO																																									
A10 Kontraktnummer / Contract No. 0041402717								A06 Empfänger / Consignee																																									
A08 Werksauftragsnummer / Manufacturer's order No. 3300244594/000010																																																	
B01, B09-B11 Spezifikation der Produkt / Masse / Toleranz Product description / Dimensions / Tolerance				B02, B04 Stahlbezeichnung / Lieferzustand Steel designation / Deliv. state		B03 Materialnorm Classification standard		B03 Massnorm Dimensional standard																																									
STABSTAHL GEWALZT 100Cr6 gkz - gegluht (AC) MSD TA27615 SB 6769 2016 60 mm + 1,000 - 1,000 6,000 m +200 -0				100Cr6 +AC		EN ISO 683-17:2014 100Cr6 + AC		EN 10060																																									
A11 Wagen Nr. Wagon No.		A13 Lieferschein Nr. Delivery note		B07 Schmelze Heat No.	B08 Ringen / Stück Coils / Pieces	B08 Krbd Crbd	B13 Gewicht (kg) Weight (kgs)																																										
8T48367 3T41919		16/08/002296/02 15.08.2016		T40398	0	2	5592																																										
B07, B14, C70 Schmelze / Herstellungsjahr / Stahlerstellung. Heat No. / Year of production / Steelmaking process																																																	
Chemische Zusammensetzung-Chemical composition [%]																																																	
T40398/2016 BO-Strangguss																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>Mn</th> <th>Si</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Cu</th> <th>Cr</th> <th>Ni</th> <th>Al</th> <th>O</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.96</td> <td>0.34</td> <td>0.21</td> <td>0.012</td> <td>0.002</td> <td>0.02</td> <td>1.48</td> <td>0.04</td> <td>0.023</td> <td>0.0006</td> </tr> <tr> <th>Mo</th> <th>Ti</th> <th>As</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th colspan="5"></th> </tr> <tr> <td>0.014</td> <td>0.0011</td> <td>0.002</td> <td>0.002</td> <td>0.002</td> <td colspan="5"></td> </tr> </tbody> </table>										C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	O	0.96	0.34	0.21	0.012	0.002	0.02	1.48	0.04	0.023	0.0006	Mo	Ti	As	Sn	Sb						0.014	0.0011	0.002	0.002	0.002					
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	O																																								
0.96	0.34	0.21	0.012	0.002	0.02	1.48	0.04	0.023	0.0006																																								
Mo	Ti	As	Sn	Sb																																													
0.014	0.0011	0.002	0.002	0.002																																													
Mechanische Werte-Mechanical values																																																	
B07 Schmelze Heat No.	B05 Probezustand Test state	C11 Streckgrenze Yield point Re [MPa]	C12 Zugfestigkeit Tensile strength Rm [MPa]	C13 Bruchdehnung Elongation A5 [%]	C14 Bruchweinschn. Contraction Z [%]	B05 Probezustand Test state	C03 Prüftemperatur Test temperature	C48, C42 Schlagarbeit Energy of impact KV [J] / KCV [J/cm ²]																																									
T40398	+AC	350 347	611 611	30,5 30,6	64,8 65,0																																												
B07 Schmelze Heat No.	D56 Stampfproben Heading tests [EN 10263-1]		D57 Entkohlen Decarburization (max. / mm)	C54 Reinheitsgrad Micropurity [DIN 50602]		C57 Korngröße Grain size [ASTM E 112]	C30 Härte HB Hardness HB	C93 Vakuumentgast Vacuum degassing																																									
T40398			0,14			8	175 - 175 ja																																										
B07 Schmelze Heat No.	D53 Verwechsellprüfung 100% Spark test 100%			D02 US Prüfung US test		D54 Oberflächenfehler Surface defects																																											
T40398	entspricht			100% EN 10308/4		max. 0,40 mm																																											



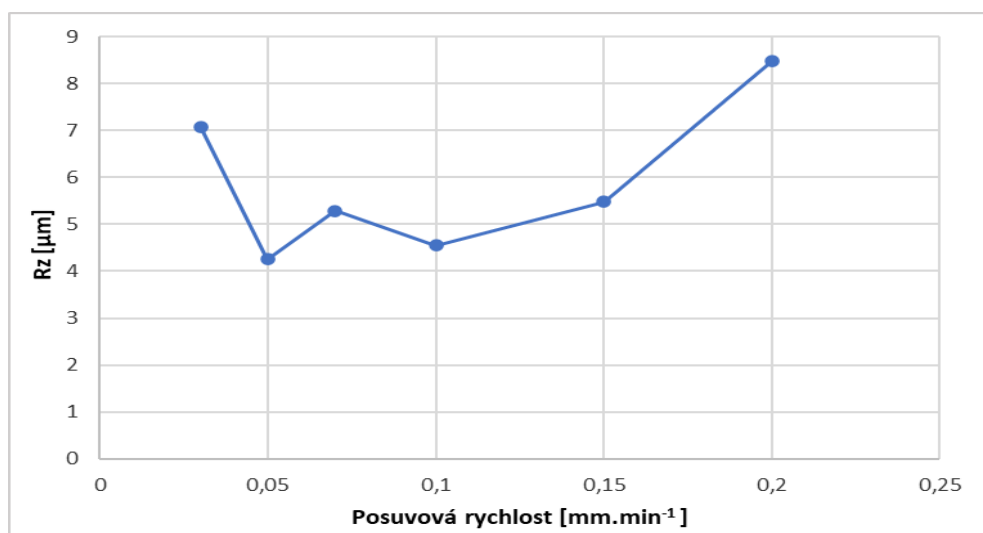
TRINECKÉ ŽELEZÁŘNY
MORAVIA STEEL

A02 Art der Prüfbescheinigung / Type of inspection document		Abnahmeprüfzeugnis 3.1 - Inspection certificate 3.1, EN 10204:2004	
A01005 Herstellerwerk / Manufacturer Issued by		Seite / Page 2 / 2	
TRINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 81 Třinec, Czech Republic		A03 Bescheinigungsummer / Document No. 2016/08/004674-MRO	
B07 Schmelze Heat No.	D61 Umformungsgrad Reduction ratio		
T40398	47		
B07 Schmelze Heat No.	C64 Reinheitsgrad Micropurity (ISO 4967 A)		
	Typ A Type A dünn thin	Typ B Type B dünn thin	Typ C Type C dünn thin
	grob thick	grob thick	grob thick
T40398	0,0 0,0	0,6 0,0	0,0 0,0
		Typ D Type D dünn thin	Typ D5 Type D5 dünn thin
		grob thick	grob thick
		0,5 0,3	0,0
<p>D61 Die Kontrolle der Oberfläche, Form und Abmessung entspricht der Bestellung. Control of surface, shape and dimension corresponds to the order.</p>			
<p>D65 Die radioisotopische Aktivität max. 100 Bq/kg wurde eingehalten. Radio - isotopic activity was controlled in ledie sample, it was no higher than 100 Bq/kg.</p>		<p>A04 Herstellerzeichen / Manufacturer's logo</p> 	
<p>Z01 Die obengenannten Erzeugnisse entsprechen den Bestimmungsvorschriften. Products conform with the prescription of order.</p>			
<p>Z03 Dieses Dokument wurde mit elektronischer Unterschrift im Einklang mit dem Gesetz Nr. 227/2000Sg. versehen. This document was electronically undersigned according to Law No. 227/2000Coll.</p>			
<p>Z02 Der Werksachverständige -Expert Kantor Adam, Ing., Třinec: 16.08.2016</p>		<p>Der Sachbearbeiter der Qualitätskontrolle für Freigabe und Atteste, unabhängiger berechtigter Vertreter Officer for Quality Inspection, Releasing and Attestation, independent authorized agent</p>	

PŘÍLOHA P III: VYHODNOCENÍ PARAMETRU Rz VZOREK 2

Plocha	1	2	3	4	5	6
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,03	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2
Pořadí měření	Drsnost Rz [μm]					
1.	6,385	5,014	8,845	3,728	4,673	7,286
2.	8,192	4,417	4,741	4,983	5,533	7,345
3.	6,675	3,749	5,546	5,821	5,077	7,812
4.	6,852	3,468	4,21	7,306	5,517	8,359
5.	8,479	4,237	5,234	4,265	5,294	8,233
6.	6,484	3,855	4,736	3,882	5,328	10,597
7.	6,402	4,004	4,379	4,275	5,394	8,677
8.	7,278	5,022	5,288	4,57	5,065	8,081
9.	7,149	5,176	5,587	3,054	6,391	9,211
10.	6,88	3,652	4,283	3,56	6,487	9,161

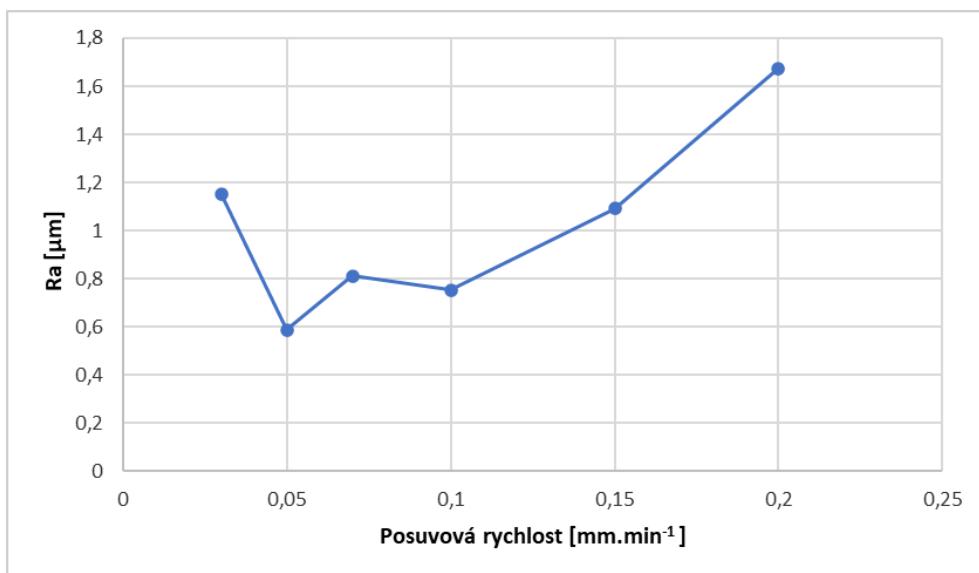
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,03	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2
Průměr Rz [μm]	7,078	4,259	5,285	4,544	5,476	8,476
<i>S</i>	0,73	0,624	1,35	1,243	0,568	0,995



PŘÍLOHA P IV: VYHODNOCENÍ PARAMETRU Ra VZOREK 2

Plocha	1	2	3	4	5	6
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,03	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2
Pořadí měření	Drsnost Ra [μm]					
1.	1,111	0,609	1,306	0,623	1,022	1,758
2.	1,276	0,615	0,701	0,801	1,141	1,846
3.	1,114	0,527	0,884	0,949	1,143	1,854
4.	1,091	0,498	0,632	1,219	1,206	1,665
5.	1,275	0,565	0,809	0,723	1,098	1,481
6.	1,135	0,533	0,694	0,652	1,184	1,664
7.	1,074	0,553	0,743	0,68	1,048	1,74
8.	1,202	0,704	0,78	0,755	0,984	1,672
9.	1,186	0,777	0,915	0,524	1,002	1,647
10.	1,076	0,497	0,646	0,617	1,086	1,416

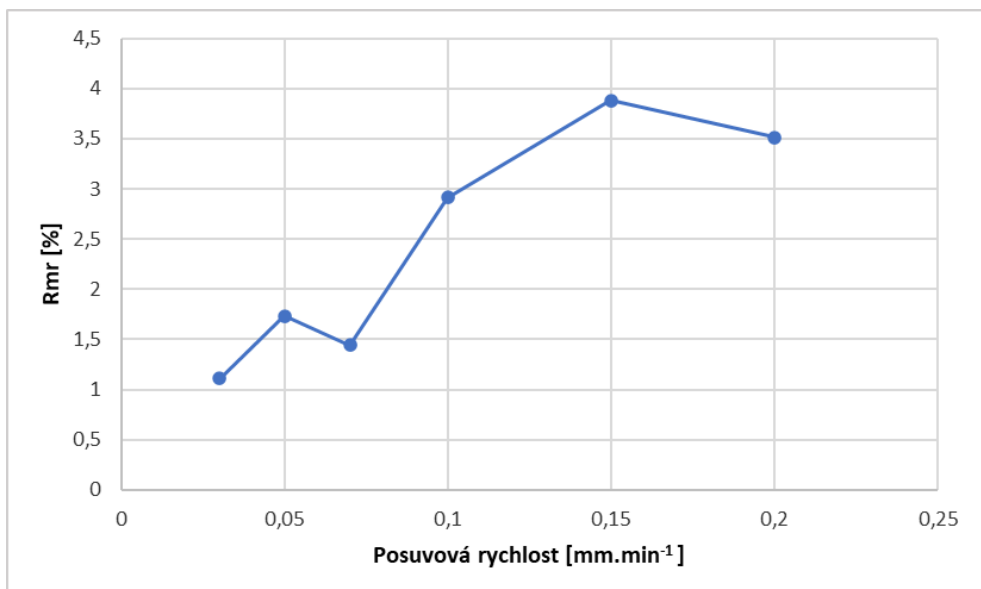
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,03	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2
Průměr Ra [μm]	1,154	0,588	0,811	0,754	1,091	1,674
S	0,077	0,091	0,198	0,201	0,077	0,141



PŘÍLOHA P V: VYHODNOCENÍ PARAMETRU Rmr VZOREK 2

Plocha	1	2	3	4	5	6
Posuv [mm.min-1]	0,03	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2
Pořadí měření	Materiálový podíl Rmr [%]					
1.	1,716	0,156	0,694	1,536	8,765	10,408
2.	0,624	1,716	0,936	2,496	3,744	10,85
3.	0,312	3,12	1,872	3,432	1,56	2,028
4.	0,624	1,56	1,872	0,312	1,248	3,561
5.	1,092	3,744	2,652	1,872	11,77	0,78
6.	0,817	1,092	1,092	2,34	4,212	0,312
7.	0,624	1,56	0,624	2,652	3,902	0,624
8.	1,716	1,404	0,468	1,872	0,468	2,496
9.	2,652	2,028	1,404	5,612	1,56	2,028
10.	0,936	0,936	2,808	7,02	1,56	2,028

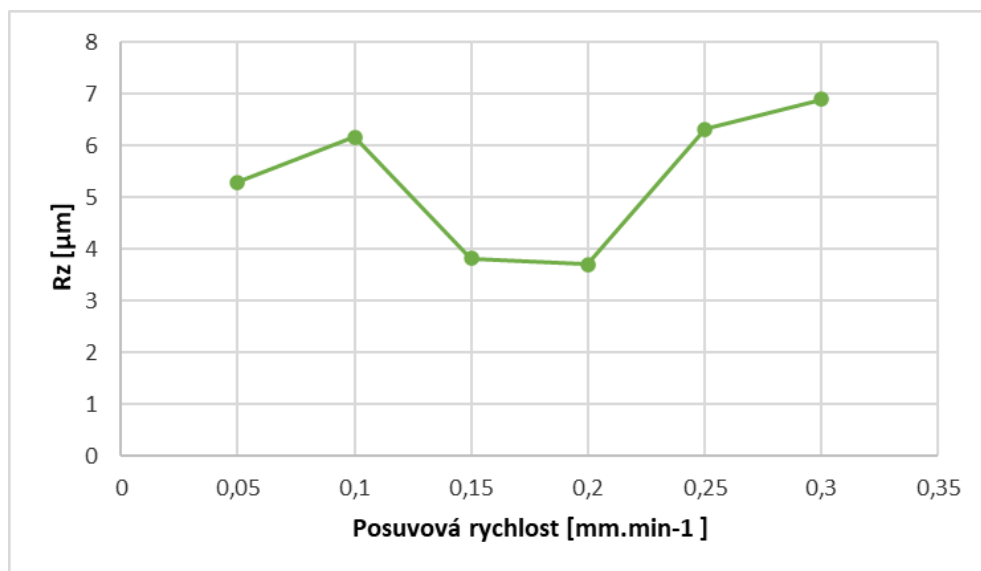
Posuv [mm.min-1]	0,03	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2
Průměr Rmr [%]	1,111	1,732	1,442	2,914	3,879	3,512
S	0,713	1,041	0,834	1,995	3,665	3,874



PŘÍLOHA P VI: VYHODNOCENÍ PARAMETRU Rz VZOREK 3

Plocha	1	2	3	4	5	6
Posuv [mm.min-1]	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05
Pořadí měření	Drsnost Rz [μm]					
1.	6,249	5,774	3,585	4,005	6,241	4,524
2.	6,621	6,261	3,583	4,59	5,727	5,516
3.	7,406	7,258	3,178	4,842	6,3	4,606
4.	7,264	6,272	3,858	3,594	4,714	6,029
5.	6,635	8,396	4,215	2,839	6,921	5,691
6.	7,315	5,917	2,812	3,731	6,504	5,201
7.	6,859	7,023	3,6	3,085	6,492	5,916
8.	7,388	5,161	4,278	3,62	6,607	5,273
9.	6,651	5,148	3,862	4,102	7,626	4,91
10.	6,52	5,94	4,013	3,787	4,539	5,205

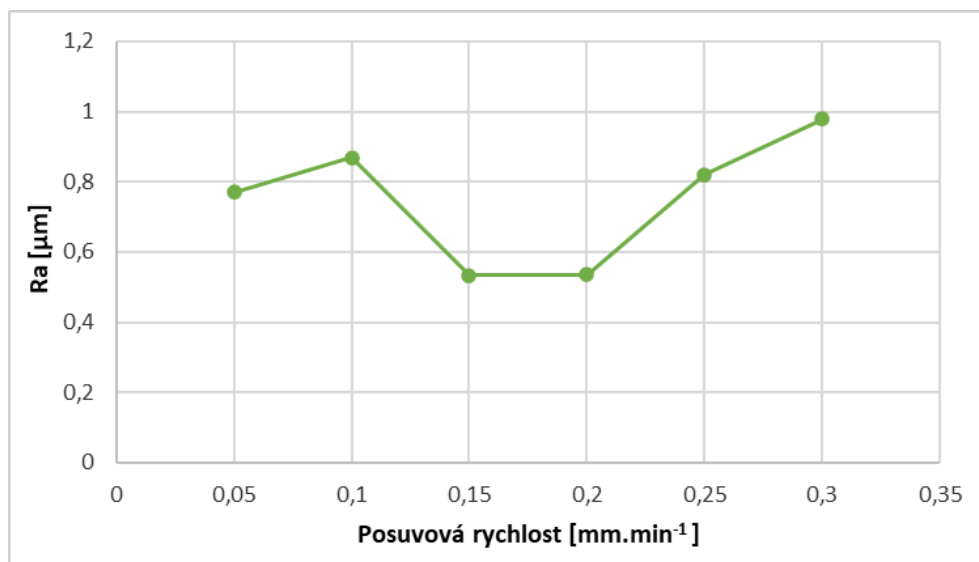
Posuv [mm.min-1]	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05
Průměr Rz [μm]	6,8908	6,315	3,6984	3,8195	6,1671	5,2871
S	0,4187	1,0006	0,4529	0,6104	0,948	0,5125



PŘÍLOHA P VII: VYHODNOCENÍ PARAMETRU Ra VZOREK 3

Plocha	1	2	3	4	5	6
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05
Pořadí měření	Drsnost Ra [μm]					
1.	0,871	0,741	0,505	0,582	0,857	0,655
2.	0,964	0,906	0,528	0,598	0,832	0,691
3.	0,972	1,057	0,455	0,561	0,871	0,683
4.	0,968	0,919	0,525	0,527	0,948	0,781
5.	1,021	0,919	0,56	0,45	0,933	0,793
6.	1,075	0,715	0,448	0,511	0,918	0,837
7.	0,959	0,811	0,539	0,492	0,975	0,797
8.	1,033	0,725	0,64	0,503	0,989	0,816
9.	1,012	0,66	0,567	0,533	0,703	0,841
10.	0,908	0,742	0,591	0,571	0,659	0,815

Posuv [mm.min ⁻¹]	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05
Průměr Ra [μm]	0,9783	0,8195	0,5358	0,5328	0,8685	0,7709
S	0,0601	0,1253	0,0585	0,0458	0,1113	0,0684



PŘÍLOHA P VIII: VYHODNOCENÍ PARAMETRU Rmr VZOREK 3

Plocha	1	2	3	4	5	6
Posuv [mm.min ⁻¹]	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05
Pořadí měření	Drsnost Rmr [%]					
1.	0,156	0,312	6,396	0,78	0,936	0,936
2.	0,663	1,092	2,34	6,544	0,793	2,145
3.	1,092	1,872	12,66	2,028	0,78	1,092
4.	1,092	0,468	0,312	1,404	0,78	1,092
5.	0,624	0,156	0,624	1,56	0,156	1,872
6.	0,312	0,936	16,85	1,716	0,78	2,028
7.	0,468	1,872	1,872	4,248	0,312	1,687
8.	1,716	0,624	0,312	5,928	0,624	2,254
9.	0,468	0,936	7,332	2,964	0,916	3,12
10.	0,78	1,56	1,404	3,9	0,624	2,652

Posuv [mm.min ⁻¹]	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05
Průměr Rmr [%]	0,7371	0,9828	5,0098	3,1072	0,6701	1,8878
<i>S</i>	0,4587	0,6199	5,7669	1,9869	0,2537	0,7099

