



Bakalářská práce

Studie životnosti nástrojů při soustružení korozivzdorné oceli

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Jan Hochberg

Vedoucí práce:

Ing. Tomáš Knápek

Katedra obrábění a montáže

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

Studie životnosti nástrojů při soustružení korozivzdorné oceli

<i>Jméno a příjmení:</i>	Jan Hochberg
<i>Osobní číslo:</i>	S20000033
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra obrábění a montáže
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí poznatků o technologii soustružení, druhů opotřebení nástroje při obrábění. Shrnutí poznatků o korozivzdorných ocelích.
2. Volba nástrojů a řezných podmínek pro obrábění korozivzdorných ocelí.
3. Návrh metodiky experimentů v rámci volby řezných podmínek, nástrojů, chladící kapaliny, metodiky měření opotřebení nástroje, integrity povrchu obrobku, geometrické přesnosti obrobku a řezných sil.
4. Hodnocení dosažených výsledků.
5. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování práce:

Jazyk práce:

tištěná/elektronická

Čeština

Seznam odborné literatury:

1. ŠTULPA, M. Technologie obrábění: CNC: soustružení, frézování, vrtání: pro praxi. Praha: Grada Publishing, 2022. 158 s.
2. ČÍHAL, V. Koroziivzdorné oceli a slitiny. Praha: Academia, 1999. 437 s. ISBN: 80-200-0671-0.
3. YOUSSEF, H. A. Machining of Stainless Steels and Super Alloys Traditional and Nontraditional Techniques. Wiley-Blackwell, 2016. ISBN 9781118919569.
4. PLUHAŘ, J. Nauka o materiálech. Praha: SNTL, 1989. 552 s.

Vedoucí práce:

Ing. Tomáš Knápek

Katedra obrábění a montáže

Datum zadání práce:

2. října 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 2. dubna 2024

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. et Ing. Štěpánka
Dvořáčková, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá studií životnosti nástrojů při soustružení korozivzdorné oceli. Práce je členěna na dvě hlavní části, teoretickou a experimentální. V teoretické části jsou shrnuty důležité poznatky týkající se problematiky obrábění korozivzdorných ocelí. Dále jsou zde uvedeny druhy opotřebení soustružnických nástrojů spolu s měřením opotřebení. Závěr teoretické části pojednává o trvanlivosti a životnosti nástrojů včetně správné volby nástrojů, řezných podmínek a procesních kapalin při obrábění korozivzdorných ocelí. V experimentální části je charakterizována použitá ocel, příprava polotovaru včetně popisu strojů, nástrojů, volby řezných podmínek a procesních kapalin. Stěžejní pasáž praktické části se zabývá měřením opotřebení nástroje, kruhovitosti a drsnosti povrchu obráběného materiálu a řezných sil vzniklých při obrábění. Kapitoly diskuze a závěr, se zabývají vyhodnocováním významných dosažených hodnot a na konci uvádí vlastní doporučení autora bakalářské práce při volbě břitové destičky při daných řezných podmínkách s ohledem na provedený experiment.

Klíčová slova

korozivzdorná ocel, soustružení, opotřebení, životnost, trvanlivost, kruhovitost, drsnost povrchu

Annotation

The bachelor thesis deals with the study of tool life in stainless steel turning. The thesis is divided into two main parts, theoretical and experimental. In the theoretical part there are presented important findings concerning the machining of stainless steel. Furthermore, the types of wear of turning tools are presented along with the measurement of the wear. At the end of the theoretical part tool durability and tool life are discussed, including the correct choice of tools, cutting conditions and process fluids when machining stainless steel. The steel used, the preparation of the semi-finished product including the description of machines and tools and the choice of cutting fluids are characterized in the experimental part. The main passage of the practical part deals with the measurement of tool wear, roundness and surface roughness of the machined material and cutting forces generated during machining. The discussion and conclusion chapters deals with the evaluation of the significant values obtained and at the end there is the author's own recommendation of this bachelor thesis, in the choice of the cutting insert under the given cutting conditions with regarding to the experiment.

Key words

stainless steel, turning, tool wear, durability, surface roughness, roundness

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Tomáši Knápkovi za odborné vedení, trpělivost a vstřícnost během jejího zpracovávání. Dále bych chtěl poděkovat paní doc. Ing. et Ing. Štěpánce Dvořákové, Ph.D. za ochotu, věnovaný čas a cenné rady hlavně v oblasti metrologie. Rovněž děkuji panu Bc. Martinu Váňovi za pomoc a cenné praktické rady během provádění experimentu. Závěrem patří poděkování mé rodině a blízkým kamarádům za podporu při studiu na vysoké škole.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	10
1 Úvod	12
2 Teoretická část	13
2.1 Korozivzdorné oceli	13
2.1.1 Austenitické korozivzdorné oceli.....	13
2.1.2 Feritické korozivzdorné oceli	13
2.1.3 Martenzitické korozivzdorné oceli.....	14
2.1.4 Duplexní korozivzdorné oceli.....	14
2.1.5 Precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli	14
2.2 Soustružení	14
2.2.1 Síly při soustružení.....	15
2.3 Soustružení korozivzdorných ocelí.....	16
2.4 Druhy opotřebení soustružnických nástrojů	17
2.4.1 Abraze.....	17
2.4.2 Adheze.....	18
2.4.3 Difúze.....	19
2.4.4 Oxidace.....	19
2.4.5 Plastická deformace	19
2.4.6 Křehký lom	20
2.5 Měření opotřebení	21
2.5.1 Přímé metody.....	21
2.5.2 Nepřímé metody.....	22
2.6 Drsnost povrchu a její měření	23
2.6.1 Kontaktní měření.....	23
2.6.2 Bezkontaktní měření	24
2.7 Trvanlivost a životnost nástrojů.....	26
2.8 Nástroje pro obrábění korozivzdorných ocelí	28
2.9 Chlazení při obrábění	29

FAKULTA STROJNÍ TUL

2.10	Řezné podmínky.....	30
3	Experimentální část	31
3.1	Charakteristika korozivzdorné oceli 1.4301.....	31
3.2	Příprava polotovaru	31
3.3	Strojní zařízení	32
3.4	Nástroje a volba břitových destiček.....	33
3.5	Volba procesní kapaliny.....	35
3.6	Volba řezných podmínek	35
3.7	Podmínky měření	36
3.8	Statistické zpracování dat.....	36
3.9	Měření opotřebenění břitových destiček	37
3.10	Měření geometrie obrobku – kruhovitosti	40
3.11	Měření drsnosti povrchu	43
3.12	Měření řezných sil	46
4	Vyhodnocení a diskuze výsledků.....	47
4.1	Zhodnocení opotřebenění VB při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	47
4.2	Zhodnocení opotřebenění VB při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	48
4.3	Zhodnocení kruhovitosti obrobku při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	50
4.4	Zhodnocení kruhovitosti obrobku při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	50
4.5	Zhodnocení vybraných parametrů drsnosti povrchu	51
4.5.1	Zhodnocení drsnosti povrchu – parametr Ra – při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	51
4.5.2	Zhodnocení drsnosti povrchu – parametr Ra – při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	52
4.5.3	Zhodnocení drsnosti povrchu – parametr Rt – při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	53
4.5.4	Zhodnocení drsnosti povrchu – parametr Rt – při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	54
4.5.5	Zhodnocení drsnosti povrchu – parametr Rz – při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	55
4.5.6	Zhodnocení drsnosti povrchu – parametr Rz – při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	56
4.6	Shrnutí dosažených hodnot.....	56
5	Závěr	59
	Seznam použité literatury	61

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Popis	Jednotka
A_{cm}	křivka počátku vylučování Fe_3C z austenitu	[°C]
v_c	řezná rychlost	[m · min ⁻¹]
π	Ludolfovo číslo	[-]
D	průměr obráběného materiálu	[mm]
n	otáčky vřetene	[min ⁻¹]
v_f	rychlost posuvu nástroje	[mm · min ⁻¹]
z	počet zubů	[-]
f_z	posuv na zub	[mm]
f_{ot}	posuv za otáčku	[mm · ot ⁻¹]
a_p	hloubka řezu	[mm]
F_c	řezná síla	[N]
$F_a = F_p$	pasivní síla	[N]
$F_t = F_f$	posuvová síla	[N]
F	výsledná řezná síla	[N]
k_s	měrný řezný odpor	MPa
A	průřez třísky	[mm ²]
χ_{Fc}	empirický koeficient	[-]
χ_{Fa}	empirický koeficient	[-]
χ_{Ft}	empirický koeficient	[-]
y_{Fc}	empirický koeficient	[-]
y_{Fa}	empirický koeficient	[-]
y_{Ft}	empirický koeficient	[-]
C_{Fc}	empirická konstanta	[-]
C_{Fa}	empirická konstanta	[-]
C_{Ft}	empirická konstanta	[-]
R_a	střední výška nerovnosti profilu	[μm]
R_z	maximální – průměrná výška profilu	[μm]
R_t	celková výška profilu	[μm]

FAKULTA STROJNÍ TUL

R_p	maximální – průměrná výška výstupku profilu	[μm]
R_{mr}	materiálový poměr profilu	[%]
c	vztažná (referenční) úroveň	[μm]
Z	životnost destičky	[min]
Σ	operátor sčítání, sumace	[-]
T_i	trvanlivost dílčích ostří destičky	[min]
T	aritmetický průměr hodnot T_i	[min]
q	počet použitelných ostří destičky	[-]
x	počet všech možných ostření nástroje	[-]
T	trvanlivost nástroje	[min]
c_T	konstanta Taylorova vztahu	[-]
m	exponent Taylorova vztahu	[-]
c_v	konstanta Taylorova vztahu	[-]
v_{cT}	řezná rychlost při konstantní trvanlivosti nástroje	[-]
c_{vT}	konstanta Taylorova vztahu	[-]
x_v	vliv hloubky řezu	[-]
y_v	vliv posuvu za otáčku	[-]
R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
HB	tvrdost podle Brinella	[-]
α	součinitel teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]
ks	kus	[-]
Kč	koruna česká	[-]
\bar{x}	aritmetický průměr hodnot	[-]
VB	opotřeбенí na hřbetu	
CNC	číslicové řízení	
VBD	vyměnitelná břitová destička	
SK	slinutý karbid	
PVD	fyzikální depozice z plynné fáze	
CVD	chemická depozice z plynné fáze	
3D	trojrozměrný	

1 Úvod

Historický odkaz korozivzdorných ocelí sahá až na počátek dvacátého století kolem roku 1913, kde anglický metalurg, pan Harry Brearley, objevil jako první korozivzdornou ocel s obsahem 12,8 % *Cr*, 0,24 % *C*, 0,44 % *Mn* a 0,20 % *Si*. Již v dané době dosahovala tato ocel vynikající odolnosti proti korozi, avšak byla velmi obtížně tvářitelná a kalitelná. Z počátku se používala na příbory, které se předtím vyráběly z uhlíkové oceli. Postupem času a vlivem válečného období, se tato korozivzdorná ocel stala rozhodujícím materiálem ve výrobě, kde se ukázala jako ideální, především pro letecký průmysl (motory, klikové hřídele), z důvodu své velmi dobré odolnosti vůči vysokým teplotám u motoru letadel.

Modernizací a dalším historickým vývojem se korozivzdorná ocel dostává do dalších průmyslových odvětvích, jako je například chemický, potravinářský, nebo automobilový průmysl [1].

Problematika obrábění korozivzdorných ocelí, již se text zabývá, je velice složitá. Hlavním problémem je vysoké mechanické zpevnění, které vytváří tvrdý povrch, což má za následek zvýšené opotřebení nástroje. Další problém tvoří velmi nízká tepelná vodivost, jež způsobuje špatný odvod tepla z nástroje a vysoká tažnost ovlivňující tvorbu třísky (špatné dělení třísek, velká náchylnost k tvorbě nárůstku). Tyto tři hlavní parametry mají největší vliv na celkovou trvanlivost nástrojů. Z tohoto důvodu se strojírenské podniky neustále snaží optimalizovat a najít vhodné břitové destičky, které by zefektivnily a zlepšily produktivitu výroby [2].

Studii životnosti nástrojů při soustružení korozivzdorné oceli se zabývá i tato bakalářská práce. Hlavním cílem bylo posoudit a vyhodnotit trvanlivost pro 3 vybrané destičky z různých materiálů při 2 různých řezných podmínkách. Pro shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků bylo nutné nejdříve navrhnout metodiku pro volbu procesní kapaliny, měření opotřebení nástroje, drsnosti a geometrie povrchu obráběného materiálu a řezných sil vzniklých při obrábění.

Pro návrh metodiky jsou důležité teoretické znalosti, týkající se dané problematiky, které jsou shrnuty v teoretické části.

2 Teoretická část

V teoretické části jsou s ohledem na danou problematiku, nastíněny základní poznatky o korozivzdorných ocelích a jejich obrábění, respektive soustružení.

Hlavní část této kapitoly je věnována opotřebením a trvanlivosti nástrojů, měření opotřebením a drsnosti vzhledem k experimentální části.

Dále jsou zde uvedeny základní poznatky při volbě nástrojů, řezných podmínek a procesních kapalin.

2.1 Korozivzdorné oceli

Korozivzdorné oceli jsou dle ČSN vysoce legované oceli, třídy 17, obsahující celkový obsah přísad nad 10 %. Obecně je korozivzdorná ocel název pro skupinu korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí, které obsahují minimálně 11,5 % *Cr*. Při tomto obsahu chromu, mají korozivzdorné oceli schopnost tzv. pasivace, díky které odolávají elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Stabilita této pasivní vrstvy je dána složením, povrchovou úpravou a korozní odolností vůči danému prostředí. Přísady mají také velký vliv na vlastnosti korozivzdorné oceli. Například (*Mo*, *Cu*) zvětšují korozní odolnost a (*Ti*, *Nb*) snižují náchylnost k mezikrystalové korozi. Korozivzdorné oceli lze rozdělit do následujících pěti základních skupin, přičemž každá skupina má své specifické vlastnosti [3, 4].

2.1.1 Austenitické korozivzdorné oceli

Nejčastěji používané austenitické korozivzdorné oceli jsou založeny na obsahu 17 % až 18 % *Cr* a 8 % až 11 % *Ni*. Vyznačují se nízkou mezí kluzu (200 MPa až 300 MPa), nízkou pevností (550 MPa až 600 MPa), velkou tažností (až 40 %) a houževnatostí. Ve srovnání s feritickými nebo martenzitickými slitinami jsou obtížně obrobitelné. Důvodem je vyšší houževnatost, tažnost a především vyšší rychlost mechanického zpevnění. Austenitické korozivzdorné oceli nejsou feromagnetické, používají se ve stavu po rozpouštěcím žíhání (nad A_{cm}) a následném ochlazením ve vodní lázni, čímž získají homogenní strukturu s maximální korozní odolností.

2.1.2 Feritické korozivzdorné oceli

Feritické korozivzdorné oceli obsahují do 0,2 % *C*, zhruba 20 % *Cr* a další přísady. Mají velmi malé % *Ni*, a proto se svojí atomovou strukturou podobají konstrukčním uhlíkovým ocelím. Jsou obecně méně tvárné než austenitické oceli, pevnost se pohybuje v rozmezí 450 MPa až 700 MPa. Nejlépe odolávají koroznímu praskání (lokální koroze v důsledku napětí, vedoucímu k trhlinám a lomu) a bodové korozi. V provozu křehnou

důsledkem hrubnutí zrna při vysokých teplotách.

2.1.3 Martenzitické korozivzdorné oceli

Martenzitické korozivzdorné oceli obsahují 12 % až 18 % *Cr* a oproti feritickým korozivzdorným ocelím mají vyšší obsah *C*, zhruba 0,1 % až 1 %. Díky vyššímu obsahu *C* se tyto oceli tepelně zpracovávají kalením a temperováním, čímž získávají vysokou pevnost a střední korozní odolnost. Jsou citlivější na vruby než feritické, austenitické či, duplexní korozivzdorné oceli.

2.1.4 Duplexní korozivzdorné oceli

Duplexní korozivzdorné oceli, rovněž známé jako austenit feritické oceli, mají smíšenou mikrostrukturu austenitu a feritu. Vlastnosti této oceli závisí na podílu feritu a austenitu. Obsahují kolem 25 % *Cr*, 1% až 8 % *Ni* a další přísady, jako je například *Mo* (5 %). Vyznačují se vyšší pevností, dobrou tažností, avšak nižší tvářitelností v porovnání s austenitickými oceli. Mají vyšší odolnost proti koroznímu praskání.

2.1.5 Precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli

U těchto ocelí dochází k precipitačnímu vytvrzení přesyceného austenitu nebo martenzitu. Takto vytvrzené oceli mají vysokou hodnotu meze kluzu (až 1400 MPa). Uplatnění nacházejí především v leteckém průmyslu [3, 4].

2.2 Soustružení

Soustružení je třískové obrábění vnějších, nebo vnitřních tvarových ploch jednobřítým nástrojem. Nástroj se nazývá soustružnický (řezný) nůž. Při soustružení koná hlavní řezný pohyb (rotační) obrobek a vedlejší řezný pohyb (posuv, přísuv) koná nástroj. Na soustruhu je nutné zvolit správně řezné podmínky pro každý nástroj použitý pro obrábění. Mezi tyto řezné podmínky patří [5, 6]:

- velikost řezné rychlosti v_c , tedy obvodové rychlosti obrobku, se počítá dle následujícího vztahu:

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

Kde D je průměr obráběného materiálu [mm],
 n jsou otáčky vřetene [min^{-1}].

- rychlost posuvu nástroje v_f vůči obrobku je definovaná vztahem:

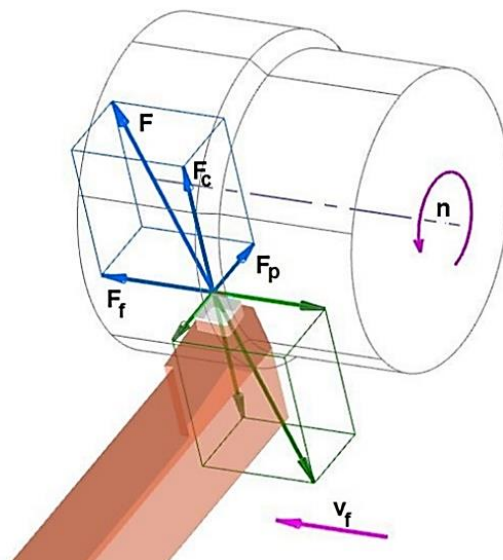
$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = n \cdot f_{ot} \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.2)$$

Kde z je počet zubů [-],
 f_z je zvolený posuv na zub [mm],
 f_{ot} je zvolený posuv za otáčku [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$].

- hloubka řezu a_p udává velikost odebírané třísky kolmo ke směru posuvu. S rostoucí hloubkou při malém posuvu úměrně roste náchylnost k vibracím.

2.2.1 Síly při soustružení

Výsledná řezná síla se při soustružení rozkládá do tří směrů. Řezná síla F_c , která je ze všech složek největší, působí ve směru vektoru řezné rychlosti. Pasivní síla $F_a = F_p$, někdy také přísuvová, působí kolmo na obráběnou plochu. Posuvová síla $F_t = F_f$ působí ve směru největší tuhosti soustruhu, tedy ve směru posuvu. Všechny tyto síly jsou znázorněny na obr. 1 [7].



Obr. 1 Řezné síly při soustružení [29]

Samotný výpočet řezných sil se dá popsat dle dvou způsobů:

- výpočet z měrného řezného odporu (se zmenšující se třískou, dochází k nárůstu měrného řezného odporu):

$$F_c = k_s \cdot A \quad [N] \quad (2.3)$$

Kde k_s je měrný řezný odpor [MPa],
 A je průřez třísky [mm²].

- výpočet pomocí empirických vztahů:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{\chi_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [N] \quad (2.4)$$

analogicky pro pasivní a posuvovou sílu:

$$F_a = C_{Fa} \cdot a_p^{\chi_{Fa}} \cdot f^{y_{Fa}} \quad [N] \quad (2.5)$$

$$F_t = C_{Ft} \cdot a_p^{\chi_{Ft}} \cdot f^{y_{Ft}} \quad [N] \quad (2.6)$$

Kde χ_{Fc} , χ_{Fa} , χ_{Ft} , y_{Fc} , y_{Fa} , y_{Ft} jsou empirické koeficienty,
 C_{Fc} , C_{Fa} , C_{Ft} jsou empirické konstanty.

Jak empirické koeficienty, tak konstanty vycházejí z empirických zkoušek. Výsledná řezná síla je pak dána vztahem: [8]

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_a^2 + F_t^2} \quad [N] \quad (2.7)$$

2.3 Soustružení korozivzdorných ocelí

Obecně lze korozivzdorné oceli shrnout jako problematický materiál pro obrábění. Důvodem je jejich nízká tepelná vodivost, vysoká tažnost a rychlost zpevňování. Díky těmto primárním aspektům je obrábění velice zdlouhavé. Nízká tepelná vodivost má za následek špatný odvod tepla z nástroje, a tedy snížení životnosti soustružnického nože.

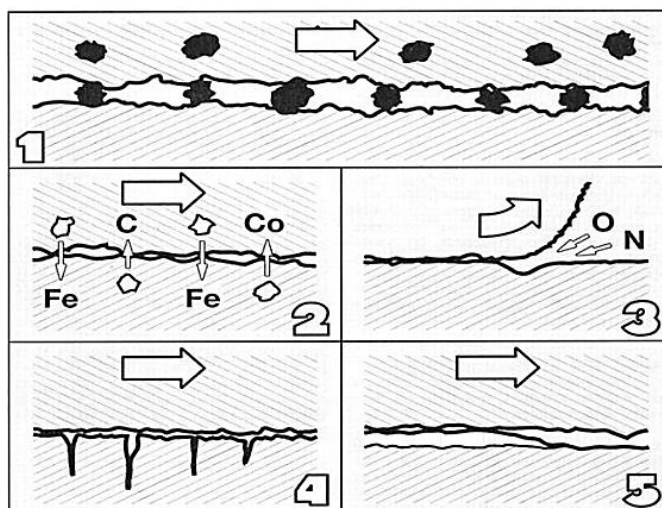
Vysoká rychlost zpevňování ovlivňuje tvorbu třísky, kdy již při nižších řezných rychlostech se vytváří segmentová tříska, která má výrazný podíl na opotřebením nástroje. Vysoká tažnost způsobuje hromadění třísek na břitě, a tím přispívá k nebezpečí vzniku nárůstku na břitě, čímž dochází k poškození povlaku.

Samotné obrábění korozivzdorných ocelí pak závisí na řadě aspektů, počínaje tuhostí a výkonem stroje, rychlostí výroby až po parametry obrábění, tedy řezné podmínky.

Jak už je známo, tak korozivzdorné oceli mají nízkou tepelnou vodivost, to znamená, že je nutné používat procesní kapaliny. Velký vliv na celkový proces obrábění má také úhel hřbetu soustružnického nože. Ten hraje důležitou roli u velikosti tření mezi nástrojem a obráběnou plochou. Měl by být udržován na 7° až 10°. Na závěr by měl být zvolený dostatečný posuv (konstantní) a hloubka řezu, aby se předešlo rychlému povrchovému zpevnění [9, 10].

2.4 Druhy opotřebení soustružnických nástrojů

Při obrábění kovů dochází k vzájemnému působení mezi nástrojem, třískou a obráběným materiálem. To má za následek opotřebení a otupení břitu nástroje, který je při soustružení enormně zatěžován. Toto opotřebení lze rozdělit podle různých mechanismů, viz obr. 2.



Obr. 2 Hlavní mechanismy opotřebení [15]

1. abraze, 2. difúze, 3. oxidace, 4. křehký lom, 5. adheze

2.4.1 Abraze

Abraze je způsobena třením, mezi tvrdými mikročásticemi obráběného materiálu a nástrojem. Oblast na nástroji opotřebovaná otěrem je typická rýhami rovnoběžnými se směrem řezu. Příkladem abrazivního opotřebení je opotřebení na hřbetu nástroje, či na čele nástroje ve tvaru žlábků.

- Opotřebení na hřbetu nástroje

Opotřebení na hřbetu, které lze vidět na obr. 3, je způsobeno abrazí. Toto opotřebení způsobuje zhoršení jakosti obrobené plochy a změnu geometrie nástroje, což vede k nepřesnému obrábění.



Obr. 3 Opotřebení na hřbetu [27]

- Opotřebení na čele nástroje – ve tvaru žlábků

Žlábek vzniká působením abraze a difúze. Jedná se o úbytek materiálu nástroje vlivem působení tvrdých mikročástic mezi obráběným materiálem a nástrojem a dále působením difúze v místě největší teploty, tedy v místě styku břitu a třísky. Toto opotřebení způsobuje změnu geometrie nástroje, ovlivňuje směr působení výslednice řezné síly a tvar třísky. Opotřebení je zobrazeno na obr. 4.



Obr. 4 Opotřebení ve tvaru žlábků [27]

2.4.2 Adheze

Adheze vzniká v důsledku vysokých teplot a tlaků mezi kovově čistými povrchy, což má za následek úbytek materiálu nástroje. Mezi tento způsob opotřebení spadá opotřebení ve tvaru vrubu a tvorba nárůstků na hřbetu nástroje.

- Opotřebení ve tvaru vrubu

Jedná se o typické adhezní opotřebení. Vrub (obr. 5) vzniká působením jedné strany třísky o břit nástroje. Typické místo pro vznik vrubu je dáno tím, kudy proniká vzduch do oblasti obrábění. Příliš velké opotřebení vrubem může vyústit až k lomu samotné destičky.



Obr. 5 Opotřebení ve tvaru vrubu [27]

- Tvorba nárůstku na hřbetu nástroje

Tvorba nárůstku je úzce spjatá s teplotou a řeznou rychlostí. Důsledkem vysokého tlaku a nízké teploty mezi třískou a nástrojem dochází k tzv. navařování za studena. Nárůstek (*obr. 6*) zhoršuje jakost obrobené plochy a může vyústit až k lomu destičky.



Obr. 6 Nárůstek na hřbetu [27]

2.4.3 Difúze

Difúze je proces přenosu atomů mezi nástrojem, obráběným materiálem a třískou při dosažení určité teploty. Dochází ke vnikání atomů z obráběného materiálu do mřížky kovu nástroje, načež se vytváří nežádoucí nové tuhé roztoky ve struktuře nástroje. Oblast nástroje postižená difúzí má hladký vzhled.

2.4.4 Oxidace

Vlivem vysokých teplot, tlaků, přítomnosti kyslíku v okolí a ztráty elektronů materiálu nástroje dochází k vytvoření chemické sloučeniny na povrchu nástroje.

2.4.5 Plastická deformace

V důsledku vysoké teploty, tlaku a mechanického zatížení dochází k vytvoření plastického stavu (nevratná deformace) na povrchu bříty. K opotřebení dochází vlivem postupného přemísťování plasticky deformované vrstvy materiálu. Typickým opotřebením je plastická deformace bříty.

- Plastická deformace břitu

Vlivem působení vysokých tlaků a teplot dochází k plastické deformaci břitu (*obr. 7*). Důsledkem této deformace, je vyboulení břitu, které dále zvyšuje teplotu. Celkový negativní dopad tohoto opotřebení způsobuje změnu geometrie soustružnického nože a špatný odvod třísek.



Obr. 7 Plastická deformace břitu [27]

2.4.6 Křehký lom

Jedná se o typické opotřebení ostří nástroje způsobené velkým mechanickým zatížením, např. při přerušovaném řezu. Křehký lom se vyskytuje především u slinutých karbidů či u řezné keramiky. Zde lze uvažovat o lom břitu nástroje a vydrolení ostří.

- Vydrolení ostří

Pokud se provádí přerušovaný řez nebo je nevhodně zvolený řezný materiál, tak může docházet k vydrolování ostří. To způsobuje postupné odlupování materiálu nástroje a výskyt trhlinek, které mohou vyústit až v lom břitu.

- Lom břitu nástroje

Poslední a zároveň nejdůležitější opotřebení nástroje, které lze vidět na *obr. 8*, je lom břitu. Oproti křehkému lomu se zde jedná o velmi nebezpečný lom, který ukončuje trvanlivost břitové destičky a může vést až ke značným škodám [11, 12].



Obr. 8 Lom břitu [27]

2.5 Měření opotřebení

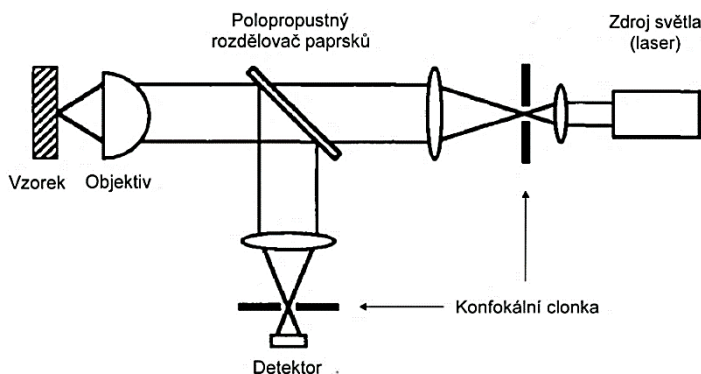
Měření opotřebení se rozděluje do dvou základních metod. Jedná se o metody přímého (kde se měří skutečné opotřebení) a nepřímého měření (kde se měří určující parametr spjatý s opotřebením nástroje), které se dále rozdělují do dalších dílčích způsobů.

2.5.1 Přímé metody

- Optická metoda – měření konfokálním mikroskopem

V současné době se v technické praxi využívají k měření opotřebení konfokální mikroskopy. Konfokální mikroskop (*obr. 9*) využívá odrazu světla, nebo fluorescenčního světla. Paprsek světla je objektivem zaměřen na daný bod snímaného vzorku a vlivem odrazu světla od zkoumaného vzorku přes stejný objektiv dochází k postupnému shromažďování světla v detektoru mikroskopu. Dále již nastává vytvoření obrazu. Výhodou oproti konvenčním optickým mikroskopům je stínítko obsažené v konfokálním mikroskopu. Při odrazu světla od bodu se část světla rozptýlí, což by mělo za následek rozmazání obrazu. Avšak tento problém je eliminován již zmíněným stínítkem, které blokuje rozptýlený paprsek světla. Samotné vytvoření výsledného obrazu spočívá v rychlém skenování bodů v rovině X-Y (poloha a pozice), a následném zpracování jednotlivých naskenovaných bodů a jejich sestavení v obraz po jednotlivých pixelech.

Na *obr. 9* lze vidět, že konfokální mikroskop se skládá z šesti základních prvků [13].



Obr. 9 Schéma konfokálního mikroskopu [14]

Detektor

Po průchodu malým otvorem konfokální clonky dopadá světlo na detektor. Detektor může být buď fotodioda, nebo v případě menšího osvětlení fotonásobič. Zde dochází ke vzniku elektrického signálu, který je zesílen a následně směřován do převodníku. V převodníku, jak již bylo zmíněno v principu konfokálního mikroskopu, dochází k transformaci naskenovaných bodů v rovině X-Y (poloha a pozice) ve finální obraz.

Otvor konfokální clonky

Správná volba otvoru konfokální clonky má velký vliv na kvalitu výsledného obrazu. Při větších otvorech dochází k propouštění více světla, a proto dochází k vzniku většího signálu, ale s menším rozlišením. Při menších otvorech se propouští méně světla ke vzorku, což má za následek snížení poměru signálu k šumu. Avšak je zde lepší rozlišení než u většího otvoru.

Objektiv

Nejdůležitější prvek konfokálního mikroskopu. Jelikož objektiv osvětluje a zároveň přijímá odražený zdroj světla, je nutné zajistit co nejmenší aberaci, tedy minimální rozdílné lámání světla.

Polopropustný rozdělovač paprsků

Rozdělovač paprsků má za úkol odrazit zdroj světla do detektoru skrz otvor konfokální clonky [14].

- Mikrometrická metoda

Mikrometrická metoda je poměrně jednoduchá metoda měření opotřebení. Využívá se především pro měření hloubky žlábků, která se měří buď úchylkoměry na dílenském mikroskopu s křížovým stolem nebo lze využít 3D souřadnicový stroj, který je jako u optické metody schopný vytvořit reálný trojrozměrný obraz.

Konfokální mikroskop a mikrometrická metoda jsou nejrozšířenější v praxi používané metody pro měření opotřebení, avšak existuje ještě celá řada dalších metod přímého měření opotřebení, jako příklad lze uvést: **stínovou a radioizotopovou metodu, měření elektrickým odporem nástroje nebo hmotnostní metodu.**

2.5.2 Nepřímé metody

- Měření opotřebení pomocí řezné síly

Zde dochází k uplatnění poznatku, že s opotřebením se mění řezná síla a řezný odpor. Jako měřidla se využívají dynamometry, pomocí kterých jsou měřeny deformace při obrábění. Výstupem měření je najít funkční závislost mezi opotřebením nástroje a dynamickou řeznou silou.

Jestliže dojde k ulomení hrotu nástroje mezi obrobkem a nástrojem, dojde k tzv.

nulové řezné síle, jež je zapříčiněna mezerou mezi obrobkem a nástrojem. Po uvolnění ulomené části nástroje dojde vlivem posuvu opět k záběru, a tudíž ke zvýšení řezných sil. S touto změnou lze dále pracovat pro identifikaci stavu zlomení nástroje.

Analogicky jak u přímého měření, tak u nepřímého měření opotřebenění existuje celá řada dalších metod používaných v praxi: **měření akustické emise, zvuku, vibrací, výkonu řezání nebo teploty řezání** [15, 16].

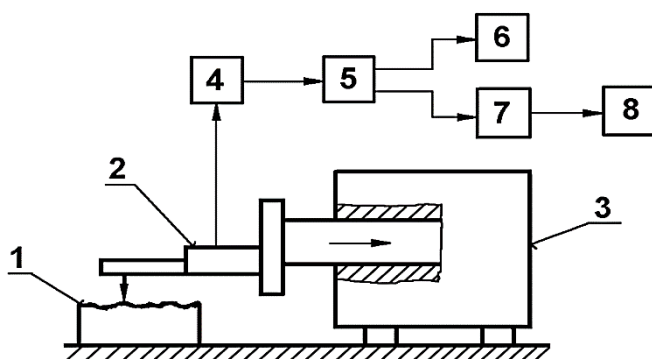
2.6 Drsnost povrchu a její měření

Kvalita povrchu při obrábění je ovlivněna především poloměrem špičky nástroje, řeznými podmínkami a mírou opotřebenění nástroje. Obecně lze říci, že drsnost povrchu se zhoršuje s vyšší rychlostí posuvu a zároveň se zlepšuje s nárůstem řezné rychlosti. Vliv poloměru zaoblení špičky hraje významnou roli při vysokých rychlostech posuvu. S rostoucím poloměrem zaoblení špičky nástroje se zlepšuje kvalita povrchu, avšak je nutné tento poloměr korigovat s ohledem na vibrace [17].

Měření drsnosti se dělí na kontaktní a bezkontaktní.

2.6.1 Kontaktní měření

U kontaktního měření dochází ke styku hrotu detektoru s povrchem. Dochází k elektrickému snímání vertikálního pohybu hrotu po povrchu, čímž se získává informace o profilu povrchu. V závislosti na zkoumaném materiálu je hrot opatřen povrchovou úpravou, nejčastěji leštěním, pro zamezení rychlého opotřebenění. Pro kontaktní měření se velmi často využívají profilometry s diamantovým hrotem, viz *obr. 10*.



Obr. 10 Schéma kontaktního profilometru s hrotem [28]

1. měřená součást, 2. hlavice s hrotem, 3. posuvný mechanismus, 4. zesilovač, 5. filtr,
6. registrační jednotka, 7. jednotka pro zpracování signálu, 8. zobrazovací jednotka

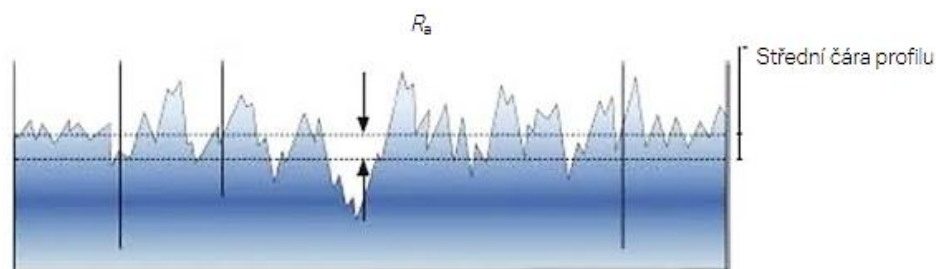
2.6.2 Bezkontaktní měření

Využívá oproti hrotu světlo. Primárně se používají 3D lasery, kde vysílaný laserový paprsek se odráží od povrchu a přes polopropustný rozdělovač paprsků je odražený paprsek přijímán zpět. Vyhodnocuje se velikost intenzity odrazu paprsku od snímaného povrchu. Na tomto principu pracují konfokální mikroskopy (informace zmíněné v kapitole 2.5.1) [18].

Při měření drsnosti povrchu se určuje 5 hlavních parametrů:

- R_a – Střední výška nerovnosti profilu (obr. 11) [μm],

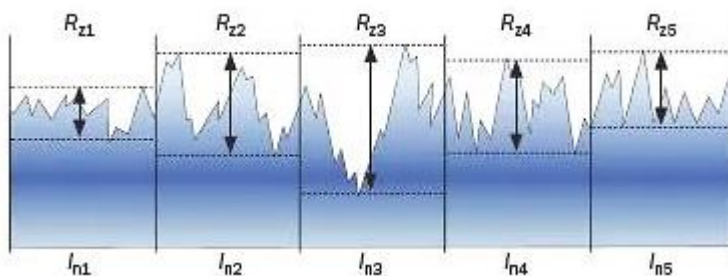
„Střední hodnota všech odchylek od střední čáry profilu“.



Obr. 11 Zobrazení vyhodnocování parametru R_a [19]

- R_z – Maximální – průměrná výška profilu (obr. 12) [μm],

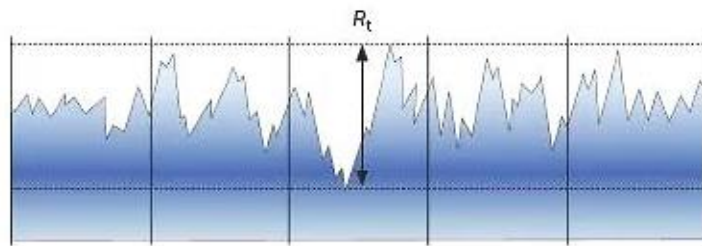
Jedná se o průměr maximálních hodnot všech měření jednotlivých úseků l_n .



Obr. 12 Zobrazení vyhodnocování parametru R_z [19]

- R_t – Celková výška profilu (obr. 13) [μm],

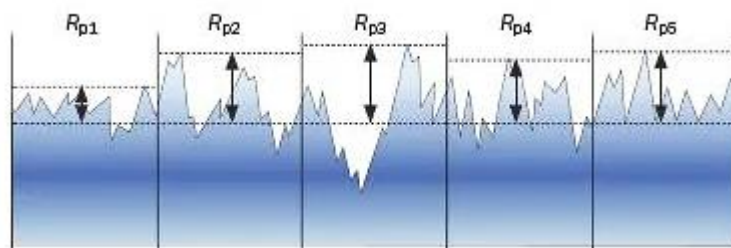
Jedná se o součet nejmenší a největší hodnoty na daném úseku.



Obr. 13 Zobrazení vyhodnocování parametru R_t [19]

- R_p – Maximální – průměrná výška výstupku profilu (obr. 14) [μm],

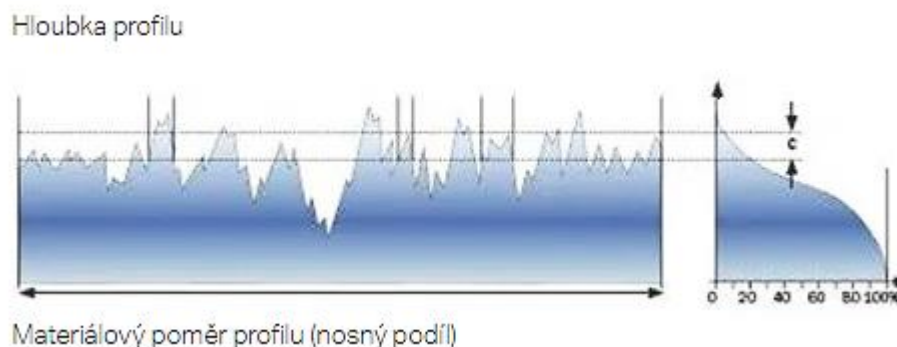
Oproti R_z se zde určuje střední hodnota maximálních výšek výstupků pro jednotlivý úsek.



Obr. 14 Zobrazení vyhodnocování parametru R_p [19]

- R_{mr} – Materiálový poměr profilu (nosný podíl, obr. 15) [%].

Parametr udávaný v %, který popisuje závislost hloubky profilu na materiálovém poměru profilu.



Obr. 15 Zobrazení vyhodnocování parametru R_{mr} [19]

Kde c je „vztažná (referenční) úroveň“ [μm] [19].

2.7 Trvanlivost a životnost nástrojů

Životností nástroje se rozumí součet všech dílčích trvanlivostí nástroje, tedy jak dlouho je daný nástroj schopen pracovat až do jeho vyřazení. Pokud se jedná o vyměnitelnou břitovou destičku, tak konec životnosti nastává s posledním opotřebovaným břitem. Životnost destičky pak lze spočítat dle vztahu:

$$Z = \sum T_i = q \cdot T \text{ [min]} \quad (2.9)$$

Kde T_i je trvanlivost dílčích ostří destičky [min],
 T je aritmetický průměr hodnot T_i [min],
 q je počet použitelných ostří destičky [-].

Pokud by bylo třeba počítat životnost nástroje, který se několikrát přebroušuje dokud není odbroušena celá jeho řezná část, vychází se ze vztahu:

$$Z = \sum T_i = (x + 1) \cdot T \text{ [min]} \quad (3.0)$$

Kde x je počet všech možných ostření nástroje [-].

Trvanlivost je doba, po kterou je daný nástroj schopen pracovat až po opotřebení jeho břitu. Trvanlivost nástroje úzce souvisí s opotřebením, které závisí na řadě aspektů, jako jsou například řezné podmínky, vlastnosti obráběného materiálu, nebo samotný materiál nástroje. S ohledem na všechny tyto aspekty, americký strojný inženýr F. W. Taylor zjistil, že největší vliv na trvanlivost nástroje má řezná rychlost. Proto se používá pro výpočet trvanlivosti nástroje tzv. Taylorův vztah:

$$T = \frac{c_T}{v_c^m} \text{ [min]} \quad (3.1)$$

Kde T je trvanlivost nástroje [min],
 c_T je konstanta Taylorova vztahu [-],
 m je exponent Taylorova vztahu [-].

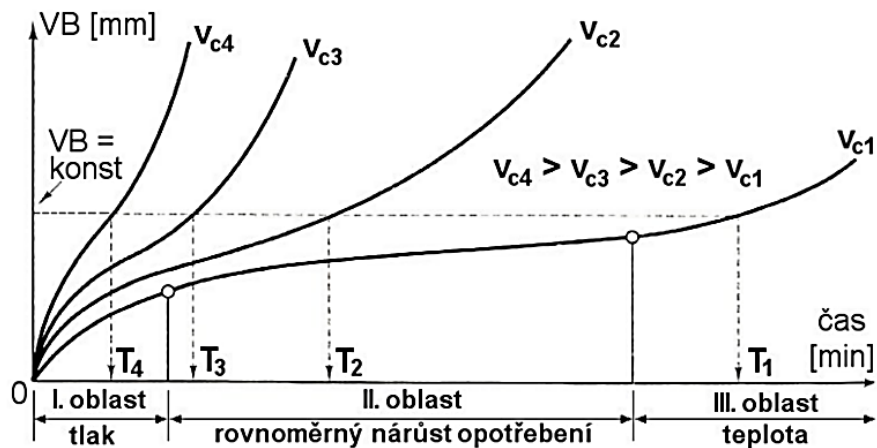
Protože hodnota konstanty c_T je poměrně nepraktická, lze se setkat i se vztahem:

$$v_c = \frac{c_v}{T^{1/m}} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3.2)$$

Kde c_v je konstanta Taylorova vztahu:

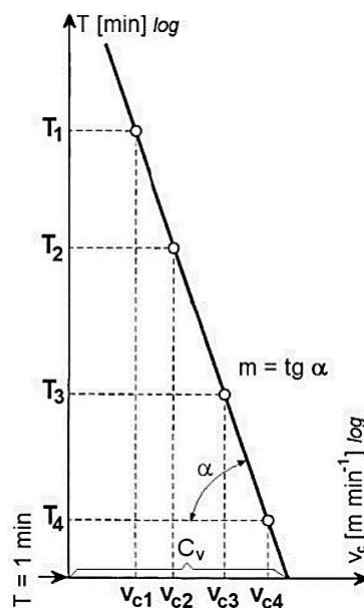
$$c_v = c_T^{1/m} \text{ [-]} \quad (3.3)$$

Určení trvanlivosti lze vidět na obr. 16. Daný nástroj je používán v procesu obrábění při čtyřech různých řezných rychlostech. Sleduje se opotřebení (VB) nástroje v závislosti na čase. Pro jednoduché (rovnoměrné) znázornění bodů v T - v_c diagramu, se volí řezné rychlosti dle normy ČSN ISO 3685. Při maximální řezné rychlosti by nástroj neměl mít trvanlivost pod pět minut a v případě ušlechtilých materiálů by trvanlivost neměla být nižší než dvě minuty.



Obr. 16 Závislost opotřebení na čase při různých řezných rychlostech [15]

Z konstruovaných křivek se dají odečíst body, tedy potřebné hodnoty T_1 až T_4 , pro které jsou typické řezné rychlosti v_{c1} až v_{c4} . Následně jsou tyto body vyneseny do zlogaritmovaného diagramu (obr. 17), kde je možné odečíst Taylorův koeficient m .



Obr. 17 Zlogaritmovaný diagram [15]

Nevýhodou tohoto způsobu řešení je značné omezení v řezných podmínkách:

$$a_p, f_{ot}, VB = konst. \quad (3.4)$$

Proto se v praxi často používají alternativy Taylorových vzorců, rovnice (3.5) a (3.6), které mají menší omezení v řezných podmínkách, pouze $VB = konst.$

$$v_{cT} = \frac{c_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f_v^{y_v}} [m \cdot min^{-1}] \quad (3.5)$$

Kde v_{cT} je řezná rychlost při konstantní trvanlivosti nástroje,

c_{vT} je konstanta Taylorova vztahu [-],

x_v je vliv hloubky řezu [-],

y_v je vliv posuvu za otáčku [-].

Nebo další alternativou [15]:

$$v_c = \frac{c_v}{T^{1/m} \cdot a_p^{x_v} \cdot f_v^{y_v}} [m \cdot min^{-1}] \quad (3.6)$$

2.8 Nástroje pro obrábění korozivzdorných ocelí

V současné době se v technické praxi využívá celá řada různých typů řezných nástrojů. Korozivzdorná ocel, jak je již známo, je celkově problematický materiál pro obrábění. Počínaje značným mechanickým zpevněním, přes její vysokou tažnost, nebo nízkou tepelnou vodivost. S ohledem na tyto problémy, je nutno co nejlépe zvolit vhodnou břitovou destičku. Proto je potřeba vybrat takovou břitovou destičku, která má vysokou otěruvzdornost a odolnost proti plastické deformaci.

Na základě dosavadních poznatků z praxe společnost Sandvik Coromant vyvinula novou nástrojovou třídu destiček GC2220, viz *obr. 18*.



Obr. 18 Břitová destička GC2220 [2]

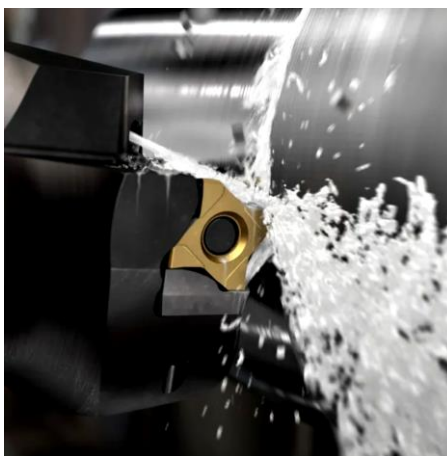
Tato destička dosahuje vysoké trvanlivosti. Důvodem je nový substrát se sníženým obsahem kobaltu, který zvyšuje tepelnou odolnost, a díky využití patentované technologie povlakování Inveio, kde dochází k vytvoření povlaku na bázi karbidonitridu titanu ($MT - Ti(C, N)$), se dosáhne ještě větší tepelné odolnosti při procesu obrábění.

Ve srovnání s ostatními nástrojovými materiály je zde nárůst odolnosti vůči plastické deformaci o zhruba 25 % [2].

2.9 Chlazení při obrábění

Při obrábění korozivzdorných ocelí je více než žádoucí použití procesních kapalin (*obr. 19*). Příčinou je nízká obrobitelnost a primárně nižší tepelná vodivost. Při nedostatečném odvodu tepla z místa řezu, by docházelo k enormnímu popálení nástroje a k přehřátí obrobeného povrchu. Přehřátí má za následek zhoršení korozní odolnosti materiálu a může vyústit až v deformaci obráběného materiálu.

Z tohoto důvodu se používají buď minerální, nebo ve vodě mísitelné oleje. Minerální oleje se používají spíše pro větší zatížení a u menších řezných rychlostí, kdežto ve vodě mísitelné oleje mají uplatnění u vyšších řezných rychlostí.



Obr. 19 Schéma přesného chlazení při obrábění [26]

- Minerální oleje

Jsou výrazně dražší, obsahují aktivní síru a buď mohou být s přídavkem oleje, nebo bez přídavku na bázi tuků. K ředění minerálních olejů se používá parafín, jehož množství je závislé na velikosti opotřebení nástroje. Pokud je větší riziko vzniku nárůstků, je na úvahu snížit množství ředění parafínem.

- Vodou mísitelné oleje

Jsou cenově dostupnější, avšak využití těchto procesních kapalin je poměrně omezené. Příliš nevydrží náročnější operace, ale mohou v některých méně náročnějších operacích vést k lepšímu odvodu tepla z řezné oblasti a tím zlepšovat povrch obrobeneho materiálu [10].

2.10 Řezné podmínky

Řezné podmínky je nutné volit s ohledem na typ použité korozivzdorné oceli. Například při použití austenitických korozivzdorných ocelí se volí co největší poloměr zaoblení špičky, aby se zredukovalo opotřebení ve tvaru žlábků a plastická deformace. Pokud by nastávalo opotřebení ve tvaru vrubu, tak je nutné snížit úhel nastavení, případně zvážit použití kruhové břitové destičky. Při zvýšeném riziku tvorby nárůstků, je na místě zvolit ostřejší břit.

Při soustružení duplexních korozivzdorných ocelí se zde opět využívá malý úhel nastavení pro zamezení většímu vzniku opotřebení ve tvaru vrubu. Pokud lze, vyžaduje se vnitřní, přesný přívod kapaliny do místa řezu, pro snížení rizika plastické deformace [20].

3 Experimentální část

Praktická část této bakalářské práce obsahuje charakteristiku vybraného typu oceli, přípravu polotovaru, popis strojů, nástrojů, řezných podmínek a procesních kapalin, které byly použity pro tento experiment.

Dále je zde uvedeno měření opotřebení (trvanlivosti) nástroje, na které navazuje úzce spolu související měření drsnosti a geometrie obrobku a poté je zde zmíněno měření řezných sil.

Veškeré zmíněné experimenty včetně měření probíhaly na budově L, Technické univerzity Liberec, v laboratořích Třískových technologií a procesů a Strojírenské metrologie.

3.1 Charakteristika korozivzdorné oceli 1.4301

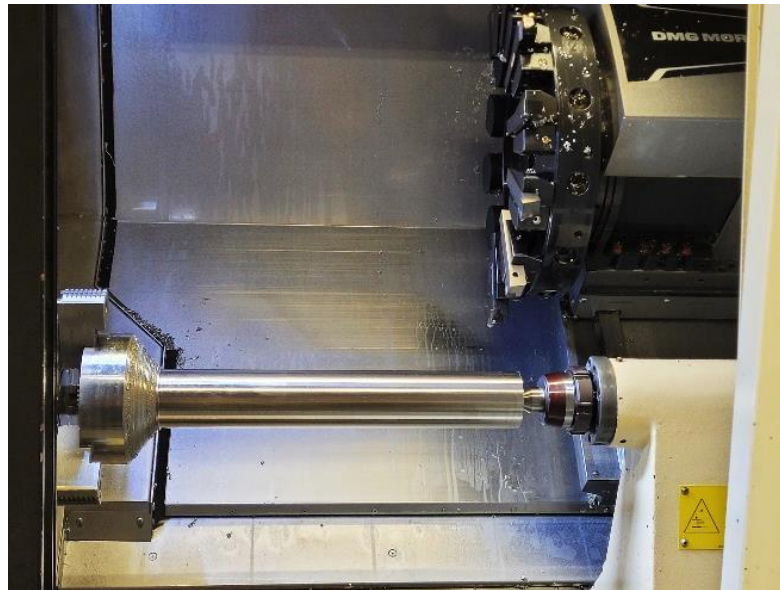
Pro experimentální část byla využita ocel 1.4301 (*X5CrNi18-10*). Jedná se o nejznámější a nejpoužívanější austenitickou korozivzdornou ocel, která se využívá především v potravinářském průmyslu. Z hlediska obrábění je právě největší problém obtížná obrobiteľnost této slitiny. Základní fyzikální a mechanické vlastnosti lze vidět v *tab. 1*. Další detailní popis vlastností této skupiny ocelí byl uveden v *kapitole 2.1.1*.

Tab. 1 Základní fyzikální a mechanické vlastnosti oceli 1.4301 [21]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Mez pevnosti v tahu R_m	520 až 700	MPa
Tvrдость	≤ 215 HB	-
Součinitel teplotní roztažnosti α	$18 \cdot 10^{-6}$	K^{-1}

3.2 Příprava polotovaru

Hutní polotovar kruhového průřezu byl upnut (hydraulické upínání) do tříčelistového sklíčidla číslicově řízeného stroje (CNC) a podepřen koníkem (*obr. 20*).



Obr. 20 Upnutí polotovaru

3.3 Strojní zařízení

Vytvoření programu pro následné soustružení bylo provedeno přímo na stroji v systému SIEMENS 840 D. Konkrétně jde tedy o již zmíněný číslicově řízený (CNC) soustruh CLX 350 od firmy DMG Mori (*obr. 21*). Parametry stroje jsou uvedeny v *tab. 2*.



Obr. 21 CNC soustruh CLX 350

Tab. 2 Parametry CNC soustruhu CLX 350

Parametr	Hodnota	Jednotka
Maximální průměr obrobku	320	mm
Maximální délka obrobku	530	mm
Maximální průměr použité tyčoviny	65	mm
Maximální pojezd v ose X	185	mm
Maximální pojezd v ose Y	80	mm
Maximální pojezd v ose Z	540	mm
Maximální výkon stroje	16,5	kW
Maximální krouticí moment	168	Nm
Maximální otáčky	5000	ot · min ⁻¹

3.4 Nástroje a volba břitových destiček

Nástrojem zde byl soustružnický nůž upnutý v revolverové hlavě stroje (obr. 22). Pro experimentální část byly zvoleny 3 typy vyměnitelných břitových destiček (VBD) od firmy Sandvik Coromant:



Obr. 22 Upnutí soustružnického nože v revolverové hlavě

3.5 Volba procesní kapaliny

V technické praxi je významné použití procesních kapalin pro obrábění korozivzdorných ocelí. Avšak kvůli opakovatelnosti tohoto experimentu a další případné návaznosti a porovnání dalších výzkumů je tento experiment prováděn bez využití kapaliny.

Hlavním důvodem je, že kapalina obsahuje velké množství proměnných parametrů ovlivňující její kvalitu a tím i kvalitu chlazení a mazání. Tyto parametry procesní kapaliny také nelze navolit vždy stejně. Jedná se například o sklon přívodu kapaliny, typ kapaliny, viskozita a povrchové napětí kapaliny nebo přísady a různá koncentrace kapaliny ovlivňující obrobek.

3.6 Volba řezných podmínek

Řezné podmínky byly stanoveny na základě zahraniční literatury a doporučených podmínek od výrobce nástrojů (Sandvik Coromant). Nejprve byl pro každou jednotlivou zkoumanou destičku zvolen konstantní posuv, hloubka záběru a dvě různé řezné rychlosti, viz *tab. 3* a *tab. 4*.

Tab. 3 Zvolené řezné podmínky, řezná rychlost $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Typ destičky	Řezná rychlost ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Posuv ($\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$)	Hloubka záběru (mm)
CERMET	200	0,1	0,2
PVD	200	0,1	0,2
CVD	200	0,1	0,2

Tab. 4 Zvolené řezné podmínky, řezná rychlost $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Typ destičky	Řezná rychlost ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Posuv ($\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$)	Hloubka záběru (mm)
CERMET	300	0,1	0,2
PVD	300	0,1	0,2
CVD	300	0,1	0,2

Dále bylo nutné navolit dobu obrábění, tedy jak dlouho se daná destička bude opotřebovávat. Doba, při které byla destička v záběru s obrobkem, se měřila pomocí digitálních stopek Pragotron DS 35 (obr. 24), a to přesně 10 minut.

Po každých 10 minutách došlo k přerušení obrábění mimo kontakt destičky s obrobkem a poté následovalo měření opotřebování břitové destičky, geometrie a drsnosti obrobku. Tento proces se opakoval několikrát až do samotného vyhodnocení konečné trvanlivosti břitové destičky.



Obr. 24 Digitální stopky Pragotron DS 35

3.7 Podmínky měření

Veškeré měření, zmíněné v tomto experimentu, bylo prováděno v laboratořích Technické univerzity Liberec při laboratorní teplotě $23\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ a za standardního atmosférického tlaku 101 325 Pa.

3.8 Statistické zpracování dat

Z naměřených hodnot byl vypočítán aritmetický průměr \bar{x} spolu s nejistotou měření. Nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02 M:2013.

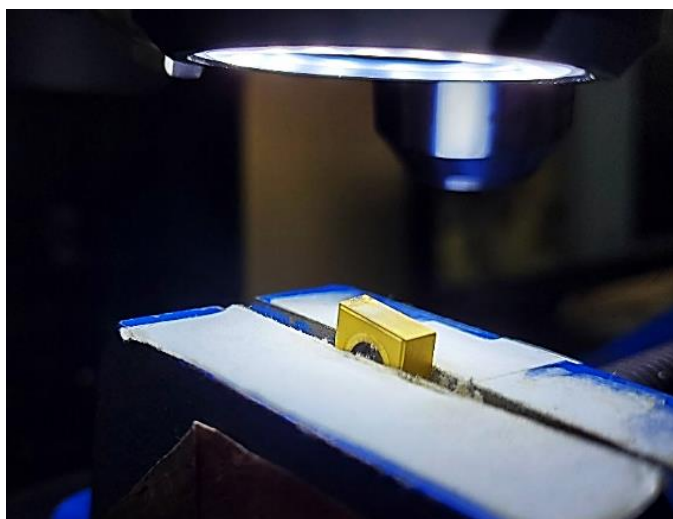
3.9 Měření opotřebení břitových destiček

Po každém ukončeném cyklu obrábění (10 minut), došlo k vyjmutí destičky z nástroje a následovalo měření opotřebení na konfokálním mikroskopu KEYENCE VK-X1100 (*obr. 25 a obr. 26*).

Měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 25178-2 (odkaz viz [23]). Měřeným parametrem byla šířka opotřebení na hřbetu destičky (*VB*).



Obr. 25 Konfokální mikroskop KEYENCE VK-X1100



Obr. 26 Detail měření opotřebení destičky

Postup měření opotřebení byl následující:

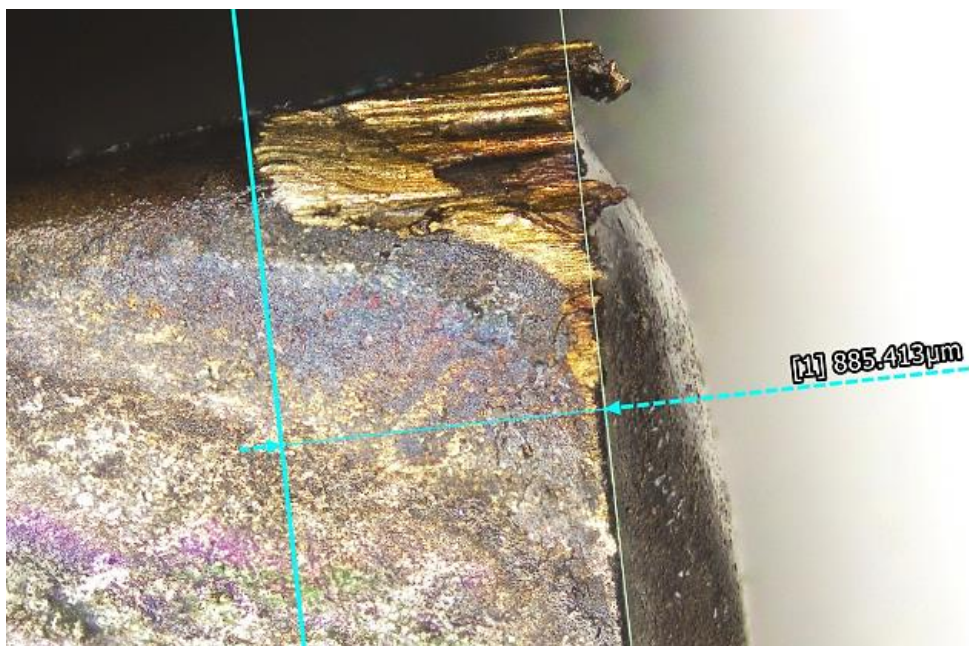
- Destička byla očištěna technickým lihem a smotky (*obr. 27*) od případných nečistot, které by mohly mít negativní vliv na kvalitu měření a následně temperována po dobu 1 hodiny na desce z přírodní kameniny.

- Následovalo upnutí destičky mezi čelisti upínacího přípravku na pracovní stůl konfokálního mikroskopu a automatické zaostření destičky v programu mikroskopu objektivem (optické zvětšení 5x, pracovní vzdálenost 22,5 mm).
- Poté již došlo pouze k měření opotřebení v programu (obr. 28), které spočívalo ve vytvoření přímkou na hraně destičky (počátek opotřebení) a paralelní čáry s již vytvořenou přímkou definující konec opotřebení. Celková šířka těchto dvou přímek udává hodnotu skutečného opotřebení.
- Pro co nejmenší tepelné ovlivnění destičky bylo celé měření prováděno s použitím jednorázových zdravotnických rukavic.

V této bakalářské práci byla **kritická hodnota opotřebení VB**, tedy míra vyhodnocující konec trvanlivosti břitové destičky, **zvolena nad 400 μm** .



Obr. 27 Technický líh a smotky



Obr. 28 Detail opotřebení CVD destičky po 160 minutách při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Po každém cyklu (každých 10 minut) a po skončení temperace destičky bylo měření prováděno celkem 5x pro co nejpřesnější výsledky opotřebení břitových destiček. Z tohoto důvodu jsou uvedeny v *tab. 5* a *tab. 6* průměrné hodnoty opotřebení včetně konečných hodnot ukončující trvanlivost břitové destičky zvýrazněných „tučně.“

Tab. 5 Opotřebení břitové destičky, řezná rychlost $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Opotřebení břitové destičky ± Nejistota měření (μm)			
Čas (min)	CERMET	PVD	CVD
10	145,896 ± 0,147	164,945 ± 0,157	62,145 ± 0,140
20	198,726 ± 0,150	195,262 ± 0,157	69,299 ± 0,139
30	234,994 ± 0,140	220,994 ± 0,151	72,801 ± 0,150
40	242,042 ± 0,150	235,909 ± 0,141	80,108 ± 0,150
50	285,585 ± 0,147	302,985 ± 0,050	85,325 ± 0,140
60	293,693 ± 0,150	356,803 ± 0,140	104,794 ± 0,138
70	299,862 ± 0,150	381,133 ± 0,150	112,309 ± 0,150
80	355,426 ± 0,149	466,540 ± 0,142	123,043 ± 0,150
90	433,474 ± 0,150		140,122 ± 0,148
100			160,246 ± 0,140
110			202,942 ± 0,150
120			208,210 ± 0,148
130		<i>Konec trvanlivosti břitové destičky</i>	223,270 ± 0,148
140			241,959 ± 0,140
150			320,792 ± 0,1240
160			885,413 ± 0,150

Tab. 6 Opotřebení břitové destičky, řezná rychlost $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

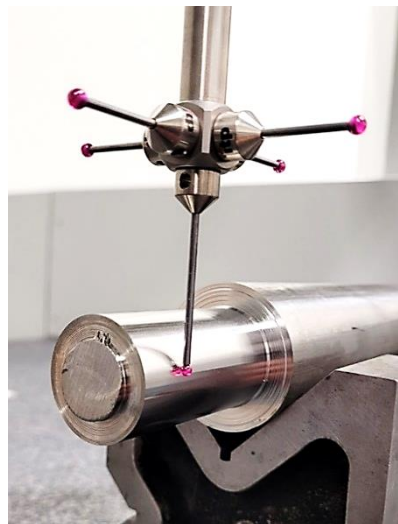
Opotřebení břitové destičky ± Nejistota měření (μm)			
Čas (min)	CERMET	PVD	CVD
10	182,957 ± 0,148	276,070 ± 0,150	74,051 ± 0,140
20	241,672 ± 0,145	399,009 ± 0,146	144,130 ± 0,140
30	288,720 ± 0,140	527,054 ± 0,146	353,010 ± 0,138
40	758,501 ± 0,143		1172,675 ± 0,148

3.10 Měření geometrie obrobku – kruhovitosti

Po vyjmutí obrobku ze sklíčidla CNC soustruhu následovalo měření kruhovitosti obrobku. Ta byla měřena na stroji ZEISS PRISMO 5. Jedná se o 3D skenovací zařízení, které obsahuje vyměnitelný hvězdicový snímač. Každý jednotlivý konec snímače je opatřen rubínovou kuličkou (*obr. 29*).

Měření probíhalo v souladu s normou ČSN ISO 4291 (odkaz viz [24]).

Polotovár byl opět před měřením temperován po dobu jedné hodiny na desce z přírodní kameniny. Po temperaci došlo k ustavení obrobku na dva prizma bloky (*obr. 30*) a dále za pomoci řídicího panelu byla provedena manuální volba zvoleného počtu bodů po obvodu obrobku. Tyto body poté sloužily pro automatické měření kruhovitosti, kdy stroj za pomoci softwaru, naměřil z daných bodů kruhovitost obrobku. Výstupem měření byl zvolený graf (*obr. 31 a obr. 32*).



Obr. 29 Hvězdicový snímač



Obr. 30 ZEISS PRISMO 5

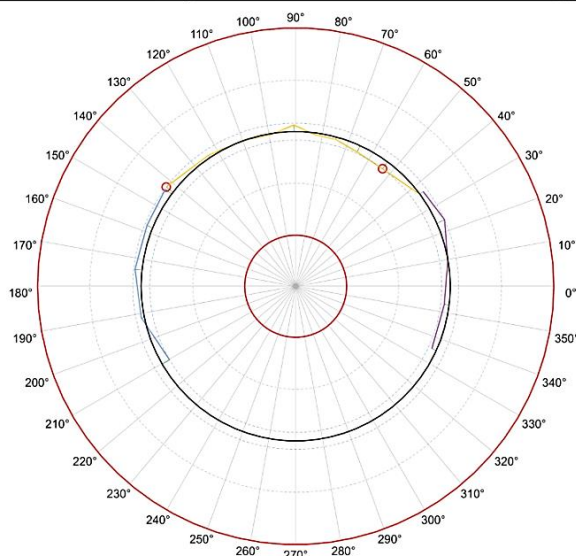


ZEISS CALYPSO
6.6.2011

Název součásti **Program 11**
Číslo výkresu
Číslo objednávky
Firma
Oddělení
Č.stroje 94500

Část identity 19
Čas/Datum 20.08.2022 13:06
Operator Master
Text

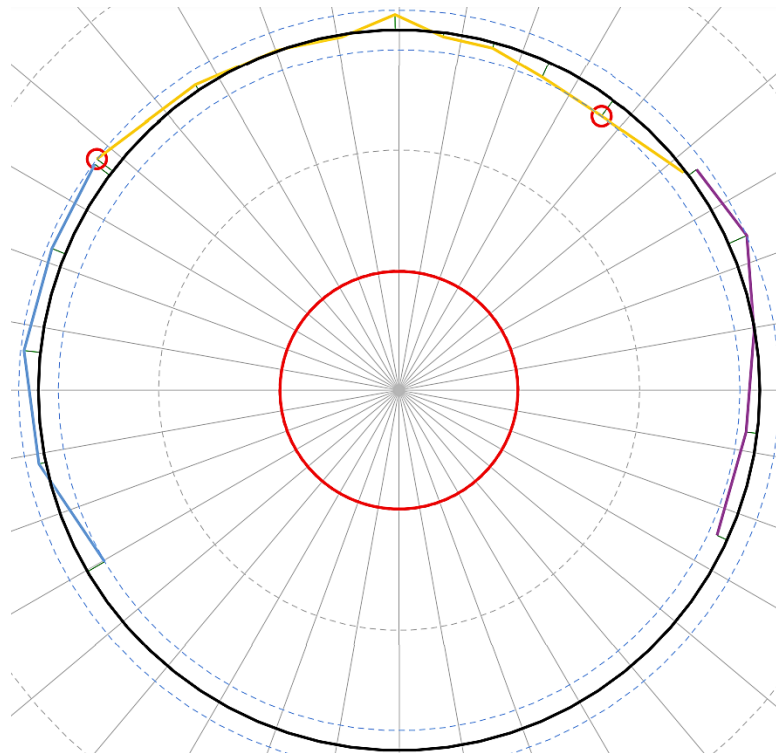
- V Toleranci
- Jmenovitá hodnota
- Tolerance
- - - Hranice posuzované oblasti
- - - Extrémní kružnice
- Segment 1
- Segment 2
- Segment 3
- Extrémní bod



20,00 μm
500 : 1

Název	Naměřená hodnota	Horní mez	Počet bodů	Typ filtru	Lc	upr	Poloměr sni...	Vmess[mm/sec]	Metoda vyhodnocení
○ Kruhovitost1	0,0082	0,1000	20	Žádný filtr	-	-	1,9988		Minimum prvků

Obr. 31 Graf kruhovitosti obrobku, PVD po 30 minutách při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 32 Detail střední kružnice, PVD po 30 minutách při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Toto měření bylo prováděno opět po každém cyklu obrábění (tedy po každých deseti minutách) až do konce trvanlivosti břitové destičky.

Z důvodu časové náročnosti bylo měření prováděno na 3 různých místech. V *tab. 7* a *tab. 8* lze vidět průměrné hodnoty včetně maximálních hodnot kruhovitosti obrobku zvýrazněných „tučně.“

Tab. 7 Kruhovitosť obrobku, řezná rychlost $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Kruhovitosť obrobku \pm Nejistota měření (mm)			
Čas (min)	CERMET	PVD	CVD
10	0,0070 \pm 0,0013	0,0052 \pm 0,0009	0,0073 \pm 0,0018
20	0,0074 \pm 0,0017	0,0062 \pm 0,0011	0,0065 \pm 0,0015
30	0,0060 \pm 0,0008	0,0054 \pm 0,0011	0,0089 \pm 0,0023
40	0,0081 \pm 0,0021	0,0062 \pm 0,0016	0,0078 \pm 0,0019
50	0,0088 \pm 0,0019	0,0056 \pm 0,0012	0,0089 \pm 0,0020
60	0,0086 \pm 0,0019	0,0063 \pm 0,0018	0,0101 \pm 0,0024
70	0,0099 \pm 0,0025	0,0069 \pm 0,0017	0,0071 \pm 0,0018
80	0,0138 \pm 0,0031	0,0064 \pm 0,0017	0,0077 \pm 0,0018
90	0,0102 \pm 0,0023		0,0116 \pm 0,0022
100			0,0162 \pm 0,0037
110			0,0085 \pm 0,0019
120			0,0177 \pm 0,0032
130	<i>Konec trvanlivosti břitové destičky</i>		0,0081 \pm 0,0020
140			0,0099 \pm 0,0021
150			0,0104 \pm 0,0020
160			0,0091 \pm 0,0017

Tab. 8 Kruhovitosť obrobku, řezná rychlost $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

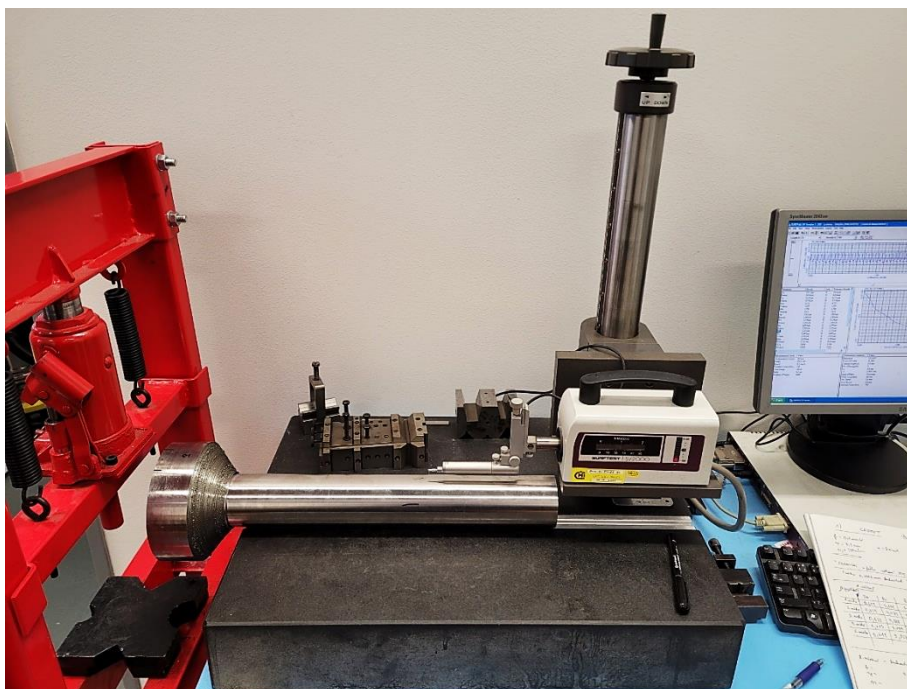
Kruhovitosť obrobku \pm Nejistota měření (mm)			
Čas (min)	CERMET	PVD	CVD
10	0,0081 \pm 0,0018	0,0092 \pm 0,0022	0,0067 \pm 0,0018
20	0,0076 \pm 0,0016	0,0070 \pm 0,0018	0,0072 \pm 0,0020
30	0,0073 \pm 0,0013	0,0082 \pm 0,0021	0,0074 \pm 0,0020
40	0,0071 \pm 0,0015		0,0219 \pm 0,0035

3.11 Měření drsnosti povrchu

Po měření kruhovitosti obrobku následovalo měření drsnosti povrchu. Měření probíhalo na profilometru SV-2000N2 od firmy Mitutoyo (*obr. 33 a obr. 34*). Princip profilometru byl zmíněn v kapitole 2.6.1.

Měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 21920-2 (odkaz viz [25]). Obrobek byl ustaven do drážky pracovního stolu stroje. Celkem se provedlo pět měření na pěti různých místech po obvodu obrobku.

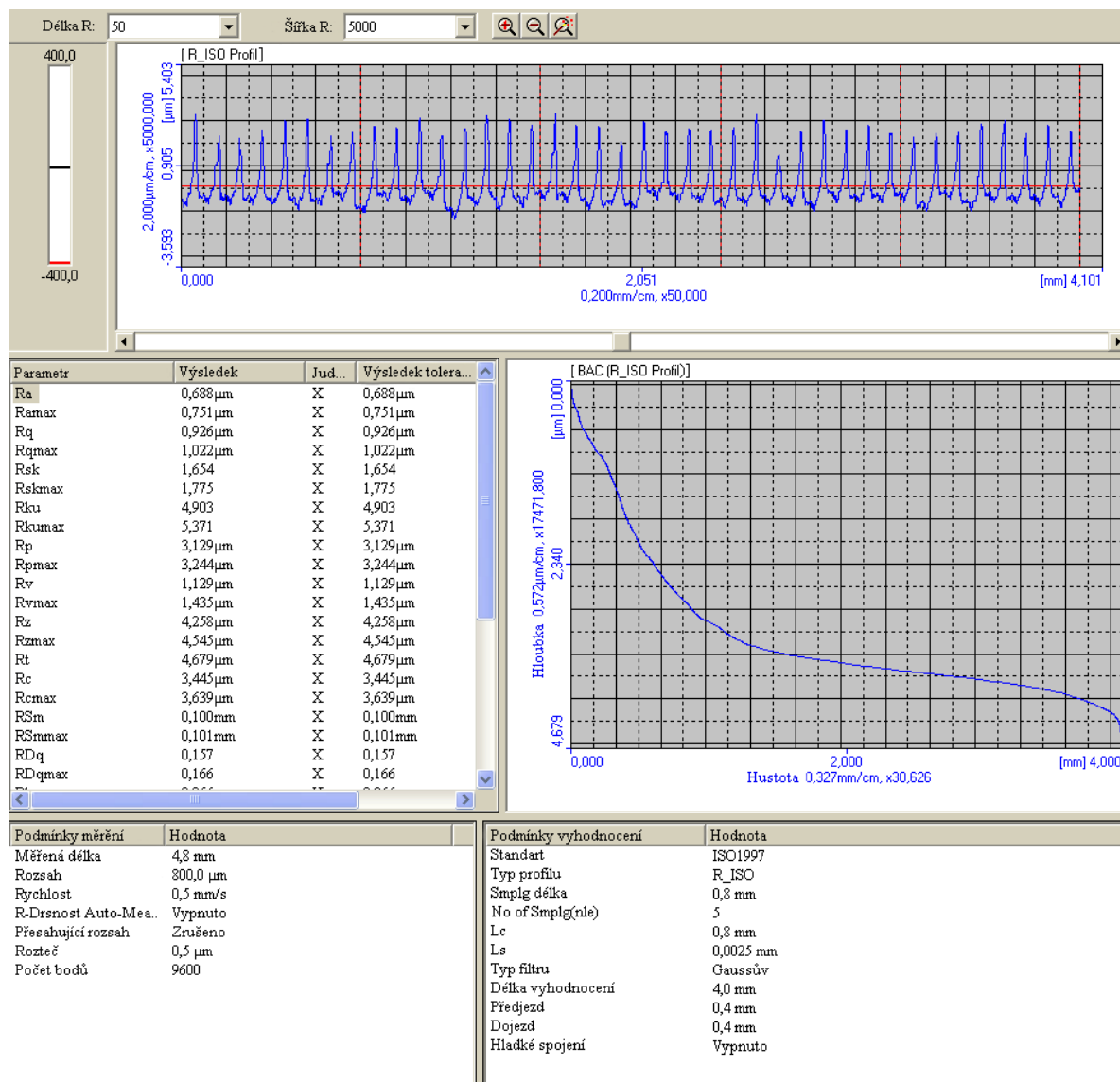
Daný program Surfpack (*obr. 35*) umožňuje získat celkem 26 parametrů drsnosti povrchu, avšak v tomto experimentu byly výstupem 3 zvolené základní parametry, a to R_a , R_t , R_z .



Obr. 33 Profilometr SV-2000N2



Obr. 34 Detail diamantového hrotu se snímaným povrchem



Obr. 35 Detail programu Surfpack

Toto měření se analogicky provádělo opět po každém cyklu obrábění (tedy po každých deseti minutách) až do posledního cyklu (konec trvanlivosti destičky).

Pro velký počet hodnot jsou v *tab. 9* a *tab. 10* uvedeny průměrné hodnoty parametrů R_a , R_t , R_z včetně maximálních hodnot drsnosti obrobku zvýrazněných „tučně.“

FAKULTA STROJNÍ TUL

Tab. 9 Drsnost obrobku, řezná rychlost $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Drsnost obrobku ± Nejistota měření (μm)										
Čas (min)	CERMET			PVD			CVD			
	Ra	Rt	Rz	Ra	Rt	Rz	Ra	Rt	Rz	
10	0,662 ± 0,02	4,191 ± 0,977	3,573 ± 0,298	0,599 ± 0,011	3,971 ± 1,029	3,394 ± 0,248	0,765 ± 0,047	4,892 ± 2,487	3,916 ± 0,568	
20	0,808 ± 0,022	6,123 ± 0,943	5,088 ± 0,409	0,663 ± 0,015	3,875 ± 0,154	3,661 ± 0,087	0,979 ± 0,033	8,031 ± 0,336	6,166 ± 0,202	
30	0,989 ± 0,157	8,484 ± 3,797	6,581 ± 1,389	0,819 ± 0,030	4,572 ± 0,992	3,932 ± 0,199	1,231 ± 0,074	11,944 ± 3,118	8,002 ± 1,092	
40	0,997 ± 0,053	7,825 ± 1,473	6,186 ± 0,815	0,883 ± 0,029	4,881 ± 0,256	4,506 ± 0,250	1,702 ± 0,211	12,406 ± 1,943	10,061 ± 0,575	
50	1,301 ± 0,041	8,870 ± 1,213	7,717 ± 0,438	0,931 ± 0,011	5,255 ± 0,351	4,776 ± 0,204	1,247 ± 0,089	11,065 ± 2,264	8,386 ± 0,973	
60	1,320 ± 0,064	9,256 ± 2,019	7,337 ± 0,583	1,666 ± 0,074	8,079 ± 4,140	6,646 ± 0,982	1,172 ± 0,121	8,867 ± 4,614	7,031 ± 0,959	
70	1,425 ± 0,046	7,642 ± 1,085	7,072 ± 0,642	1,804 ± 0,041	9,532 ± 2,776	7,977 ± 0,728	1,604 ± 0,134	11,647 ± 0,360	9,668 ± 0,721	
80	1,990 ± 0,142	12,358 ± 3,180	9,967 ± 1,101	1,957 ± 0,187	10,254 ± 2,143	8,521 ± 1,380	2,182 ± 0,083	11,123 ± 1,058	9,843 ± 0,343	
90	2,655 ± 0,226	16,521 ± 2,450	13,461 ± 1,353				1,881 ± 0,120	10,580 ± 1,074	9,377 ± 0,528	
100							1,799 ± 0,113	10,718 ± 1,013	9,274 ± 0,465	
110							2,475 ± 0,120	11,471 ± 0,378	10,803 ± 0,324	
120							1,932 ± 0,231	11,453 ± 1,371	9,500 ± 1,127	
	<i>Konec trvanlivosti břítové destičky</i>									
130							2,495 ± 0,277	12,474 ± 1,349	11,583 ± 0,663	
140							2,259 ± 0,170	14,112 ± 4,912	10,796 ± 1,716	
150							2,011 ± 0,235	12,126 ± 3,025	9,922 ± 1,645	
160							1,183 ± 0,117	8,511 ± 0,637	7,469 ± 0,365	

Tab. 10 Drsnost obrobku, řezná rychlost $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Drsnost obrobku ± Nejistota měření (μm)									
Čas (min)	CERMET			PVD			CVD		
	Ra	Rt	Rz	Ra	Rt	Rz	Ra	Rt	Rz
10	1,629 ± 0,026	7,563 ± 0,161	7,286 ± 0,123	0,826 ± 0,023	6,528 ± 0,804	5,299 ± 0,450	0,655 ± 0,016	4,172 ± 0,985	3,721 ± 0,273
20	1,094 ± 0,066	7,182 ± 0,888	6,517 ± 0,404	1,014 ± 0,040	6,896 ± 0,956	6,016 ± 0,145	0,645 ± 0,018	4,022 ± 0,248	3,793 ± 0,257
30	1,902 ± 0,098	10,366 ± 2,541	8,081 ± 0,958	2,042 ± 0,122	12,393 ± 0,949	11,063 ± 1,390	0,671 ± 0,031	4,741 ± 0,218	4,282 ± 0,107
40	3,198 ± 0,091	12,940 ± 1,157	12,020 ± 0,481				2,636 ± 1,630	26,464 ± 23,048	16,724 ± 13,564

3.12 Měření řezných sil

Z důvodu nemožnosti nastavení příslušného měřícího zařízení do zmiňovaného CNC stroje nebylo možné měřit řezné síly.

Dalším důvodem je, že geometrie destiček byla v podstatě stejná (mimo povlaky), což by mělo minimální vliv na velikosti odchylek naměřených řezných sil u jednotlivých břitových destiček.

4 Vyhodnocení a diskuze výsledků

Závěrečná část bakalářské práce je věnována hodnocení opotřebení břitových destiček, kruhovitosti a drsnosti obrobku při zvolených řezných podmínkách.

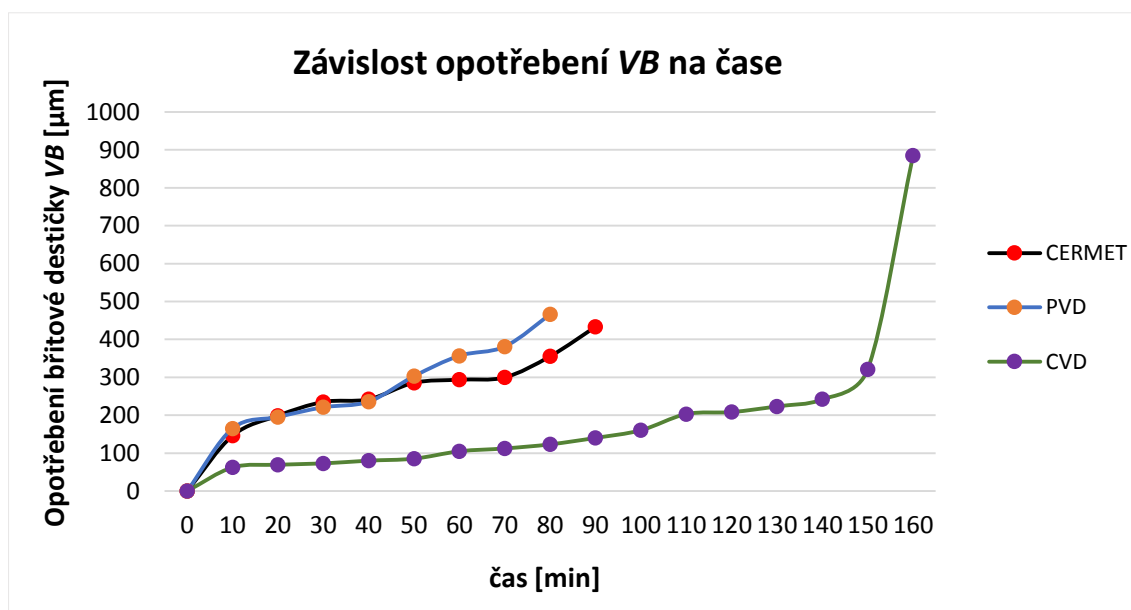
Pozornost zde byla zaměřena především na maximální a minimální hodnoty u zvolených typů břitových destiček, průběh grafu opotřebení včetně popisu jednotlivých úseků a ukázkám největšího opotřebení destičky pod mikroskopem.

Dále byla věnována pozornost grafickému znázornění vlivu kruhovitosti na čase, respektive na míře opotřebení. Posledním hodnotícím prvkem zde byla drsnost povrchu neboli zvolené parametry Ra , Rt , Rz včetně ukázky nejhorší jakosti povrchu (Ra blíží se $4 \mu\text{m}$).

Veškeré grafy byly vytvořeny z tabulek naměřených hodnot (*tab. 5 až tab. 10*) a jejich podstatné části byly příslušně okomentovány a zdůvodněny. Na závěr jsou zde shrnuty dosažené (významné) hodnoty, jež byly naměřeny v experimentální části této bakalářské práce.

4.1 Zhodnocení opotřebení VB při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Na základě naměřených hodnot (*obr. 36*) je patrné, že největší trvanlivost vykazuje destička typu CVD, a to konkrétně 160 minut.



Obr. 36 Graf opotřebení břitových destiček při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Jak už bylo zmíněno v kapitole 3.4, tato destička s CVD povlakem prokázala svojí vysokou odolnost proti opotřebení, kterou se CVD povlaky prezentují.

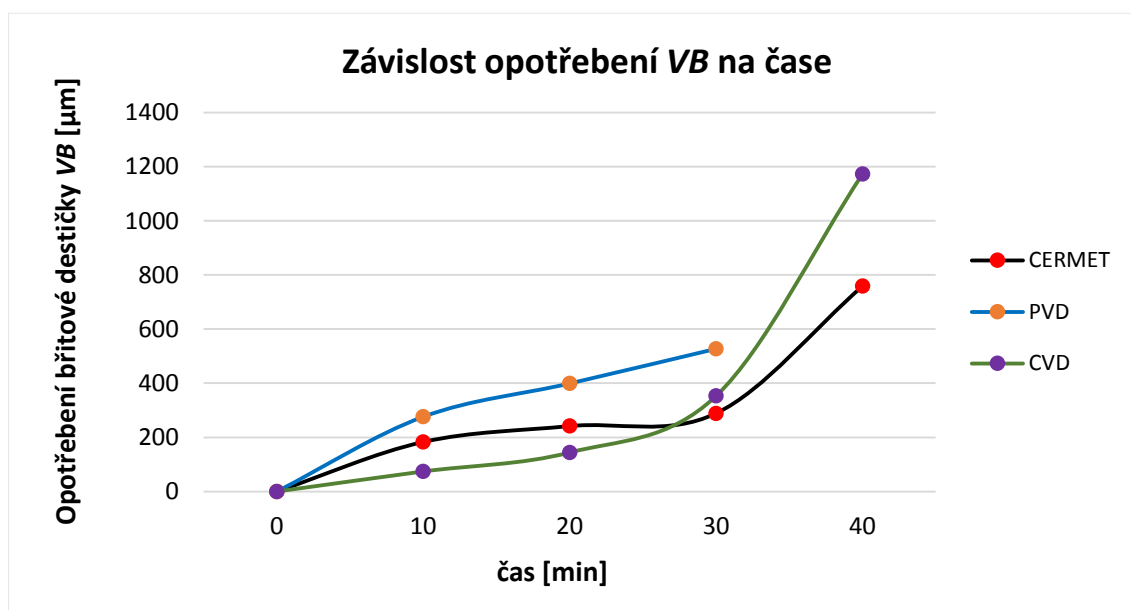
Destička vyrobená z CERMETU vykazovala po dobu 50 minut poměrně stejné hodnoty opotřebení ($(145,896 \pm 0,147) \mu\text{m}$ až $(285,585 \pm 0,147 \mu\text{m})$), jako PVD destička

((164,945 ± 0,157) μm až (302,985 ± 0,050) μm). Poté došlo k větší změně opotřebení, kde destička z CERMETU vydržela o 10 minut déle než destička s PVD povlakem (90 minut).

Dále si zde lze všimnout samotného průběhu opotřebení jednotlivých destiček. Během prvních 10 minut, respektive během prvního kontaktu destičky s obrobkem, dochází ke zrychlenému nárůstu opotřebení. Následně se zde vyskytuje „lineární“ nárůst opotřebení, jenž trvá až do poklesu tvrdosti materiálu destičky. Po lineární části dochází opět ke zrychlenému nárůstu opotřebení až do samotného konce trvanlivosti břitové destičky.

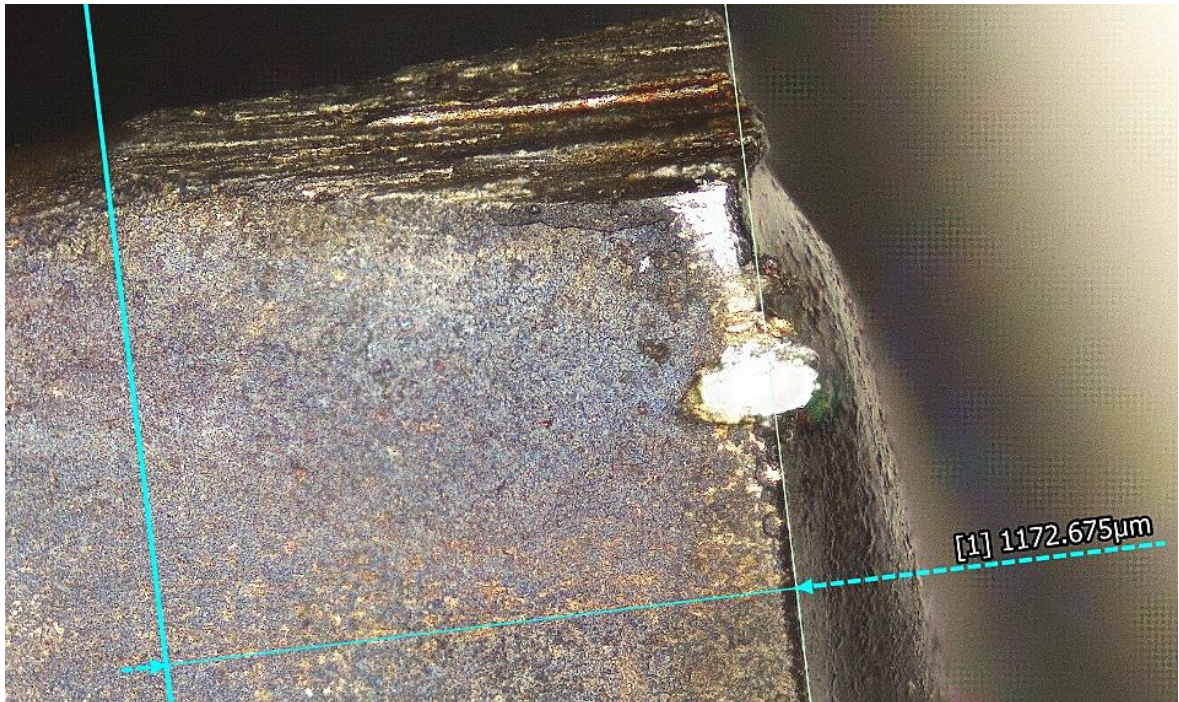
4.2 Zhodnocení opotřebení VB při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Druhá zvolená řezná rychlost, tedy $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, byla už poměrně kritická pro zvolené typy břitových destiček, protože trvanlivosti již dosahovaly maximálně 40 minut. Na *obr. 37* lze vidět, že nejvyšší trvanlivost zde zaznamenala opět destička s CVD povlakem avšak i destička z CERMETU (40 minut).



Obr. 37 Graf opotřebení břitových destiček při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Z grafu je možno také vidět, že destička s CVD povlakem dosáhla hodnoty opotřebení na hřbetu přes 1000 μm ((1172,675 ± 0,148) μm). Jedná se o vysokou hodnotu, jež představuje už poměrně fatální destrukci břitové destičky. Tak velké opotřebení destičky včetně detailu lomu lze vidět na *obr. 38*.



Obr. 38 Opatřebení CVD destičky po 40 minutách při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

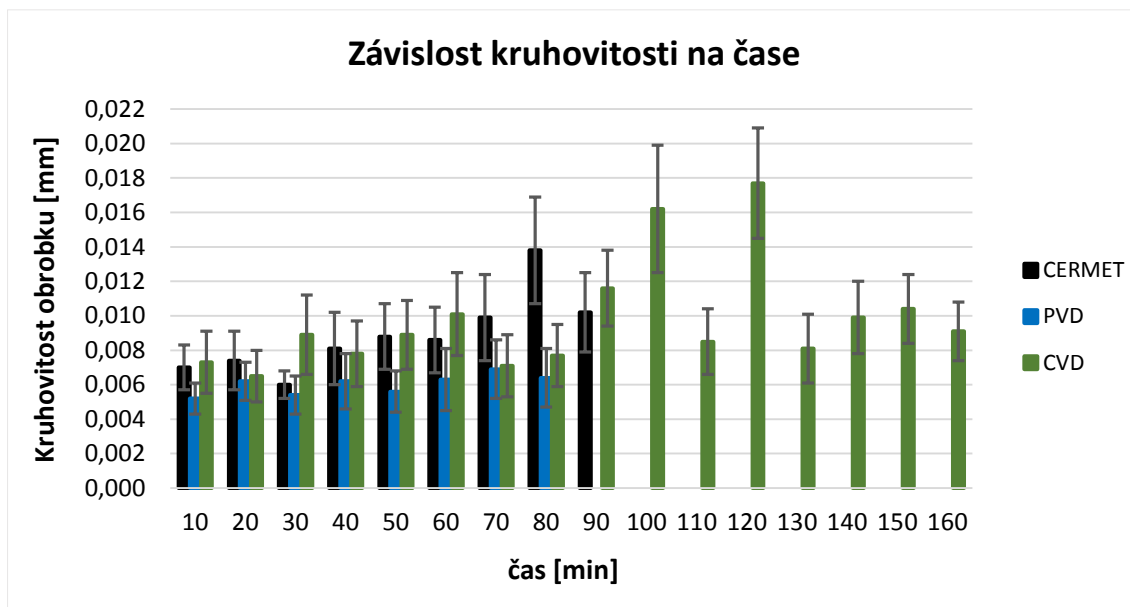
Na obr. 39 lze vidět pohled na lom CVD destičky ze špičky nástroje.



Obr. 39 Pohled na lom CVD destičky ze špičky nástroje po 40 minutách při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

4.3 Zhodnocení kruhovitosti obrobku při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Druhá měřená veličina byla kruhovitosť obrobku. Z grafu naměřených hodnot (obr. 40) je zřejmé, že nejlepší kruhovitosť obrobku po celou dobu experimentu vykazovala destička s PVD povlakem ((0,0052 ± 0,0009) mm až (0,0069 ± 0,0017) mm). Následně docházelo ke střídání lepší kruhovitosti mezi CERMETEM a CVD destičkou.



Obr. 40 Graf kruhovitosti obrobku při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

V průměru, ačkoliv to nemusí být úplně na první pohled zřejmé, destička s CVD povlakem způsobovala velmi těsně (zhruba o 0,0004 mm) nižší hodnoty kruhovitosti obráběného materiálu po dobu 90 minut ((0,0073 ± 0,0018) mm až (0,0116 ± 0,0022) mm) než destička vyrobená z CERMETU ((0,0070 ± 0,0013) mm až (0,0138 ± 0,0031) mm).

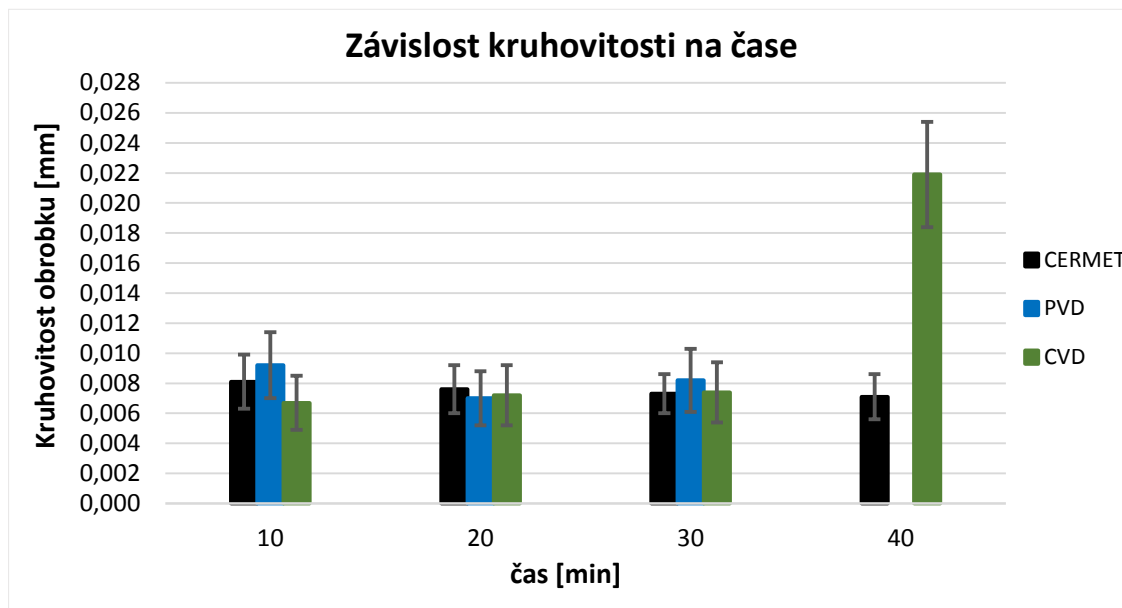
Maximální hodnota kruhovitosti obrobku byla naměřena u CVD destičky při 120 minutách ((0,0177 ± 0,0032) mm), přestože destička s CVD povlakem jevila při těchto časech nejmenší opotřebení ((208,210 ± 0,148) μm) ze všech tří typů použitých destiček.

4.4 Zhodnocení kruhovitosti obrobku při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Při vyšší řezné rychlosti byly kruhovitosti v průměru vyšší než při menší řezné rychlosti (obr. 41). Po dobu 30 minut způsobovala nejlepší kruhovitosť obrobku destička s CVD povlakem ((0,0067 ± 0,0018) mm až (0,0074 ± 0,0020) mm). Po překonání hranice 30 minut došlo ke konci trvanlivosti CVD destičky, což mělo za následek až enormní zhoršení kruhovitosti obráběného materiálu ((0,0219 ± 0,0035) mm).

Destička z CERMETU dosahovala po dobu 30 minut lepší kruhovitosti obrobku než destička s PVD povlakem ((0,0071 ± 0,0015) mm až (0,0081 ± 0,0018) mm), která naopak

vytvářela nejhorší kruhovitost obrobku (($0,0070 \pm 0,0018$) mm až ($0,0092 \pm 0,0022$) mm).



Obr. 41 Graf kruhovitosti obrobku při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

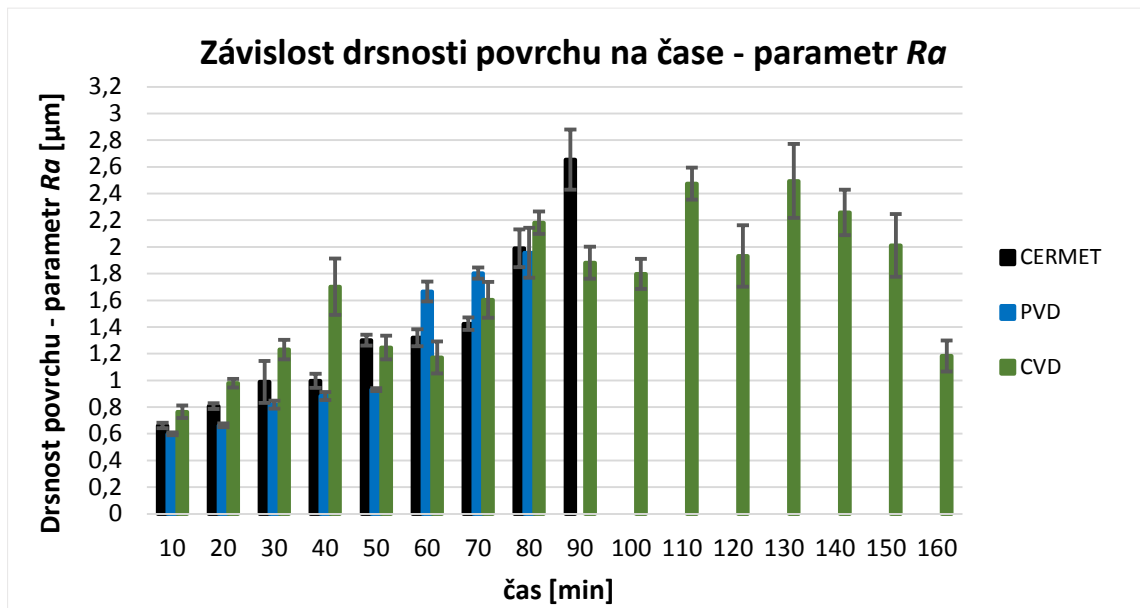
4.5 Zhodnocení vybraných parametrů drsnosti povrchu

Třetí a zároveň poslední měřenou veličinou byla drsnost povrchu. Z důvodu 3 zvolených parametrů drsnosti je tato část rozdělena do tří částí vyhodnocujících parametry R_a , R_t , R_z při zvolených řezných podmínkách.

4.5.1 Zhodnocení drsnosti povrchu – parametr R_a – při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Z obr. 42 je patrné, že prvních 50 minut vykazovala nejlepší drsnost povrchu obrobku PVD destička, která se držela v rozmezí ($0,599 \pm 0,011$) μm až ($0,931 \pm 0,011$) μm . Velmi těsně se držel za PVD destičkou CERMET, který dokonce nad 50 minut až do jeho konečné trvanlivosti vytvářel nižší hodnoty drsnosti povrchu obráběného materiálu než PVD destička (($1,301 \pm 0,041$) μm až ($2,655 \pm 0,226$) μm).

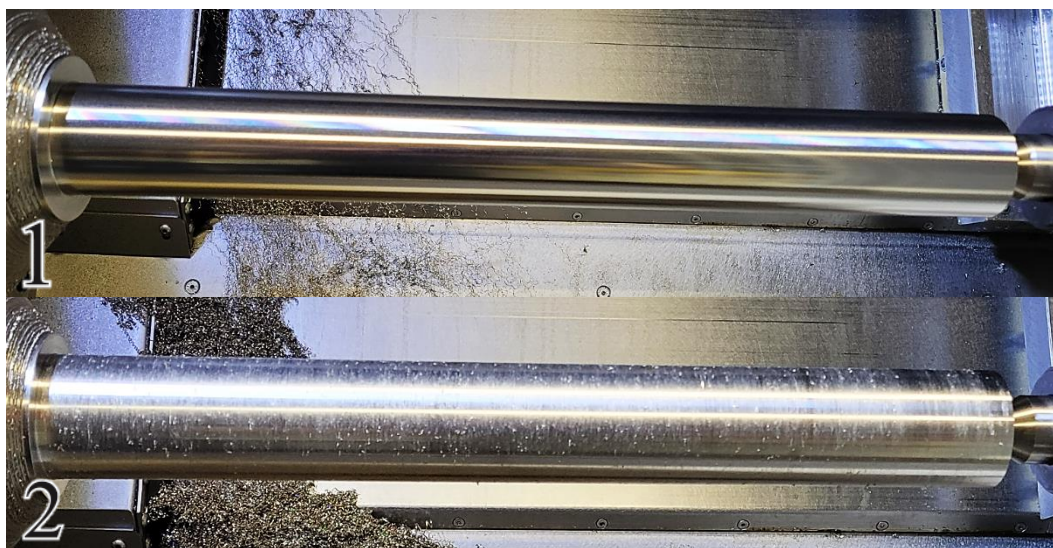
Naproti tomu destička s CVD povlakem způsobovala nejhorší drsnost povrchu obrobku (($0,765 \pm 0,047$) μm až ($2,495 \pm 0,277$) μm). Avšak zajímavostí je, že CVD destička při maximálním opotřebení (($885,413 \pm 0,150$) μm) zapříčinila poměrně dobrou drsnost povrchu obrobku (($1,183 \pm 0,117$) μm). To může vysvětlovat vytvoření takové geometrie, která měla příznivý vliv na jakost povrchu.



Obr. 42 Graf drsnosti povrchu - parametr R_a - při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

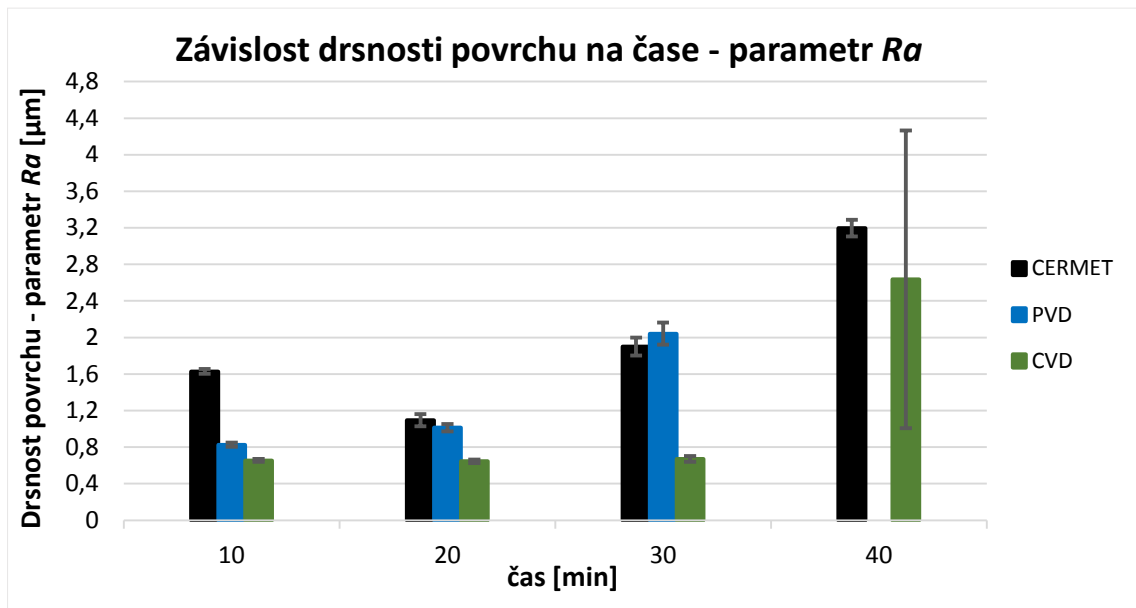
4.5.2 Zhodnocení drsnosti povrchu – parametr R_a – při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Při této řezné rychlosti dosahovala po dobu 30 minut nejnižší hodnoty drsnosti povrchu obrobku destička s CVD povlakem ($(0,645 \pm 0,018) \mu\text{m}$ až $(0,671 \pm 0,031) \mu\text{m}$). Avšak ke konci trvanlivosti této břitové destičky se blížila nejvyšší naměřená hodnota drsnosti k $R_a 4 \mu\text{m}$ ($(2,636 \pm 1,630) \mu\text{m}$). Kvalitu obrobené plochy při této drsnosti lze vidět na obr. 43. Z grafu (obr. 44) je možno také vidět, že PVD destička způsobovala až do svého maximálního opotřebení lepší jakost povrchu ($(0,826 \pm 0,023) \mu\text{m}$ až $(2,042 \pm 0,122) \mu\text{m}$) než destička vyrobená z CERMETU ($(1,094 \pm 0,066) \mu\text{m}$ až $(3,198 \pm 0,091) \mu\text{m}$).



Obr. 43 Porovnání obrobených ploch

1. Dobrý „kvalitní“ povrch ($R_a \pm 1,6 \mu\text{m}$)
2. Špatný „nekvalitní“ povrch (R_a blížící se $4 \mu\text{m}$)



Obr. 44 Graf drsnosti povrchu - parametr Ra - při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Další zajímavostí, která se zde vyskytuje, je pokles drsnosti povrchu obráběného materiálu u destičky z CERMETU při nárůstu opotřebení, tedy během 10 a 20 minut. Tento poměrně neobvyklý jev byl z vlastní iniciativy prověřen ještě jednou, novou destičkou z totožného materiálu. I na druhý pokus se dosáhlo poklesu drsnosti povrchu obráběného materiálu, který byl ještě větší než u první použité destičky. Důvodem může být opět vytvoření příznivé geometrie pozitivně ovlivňující drsnost povrchu.

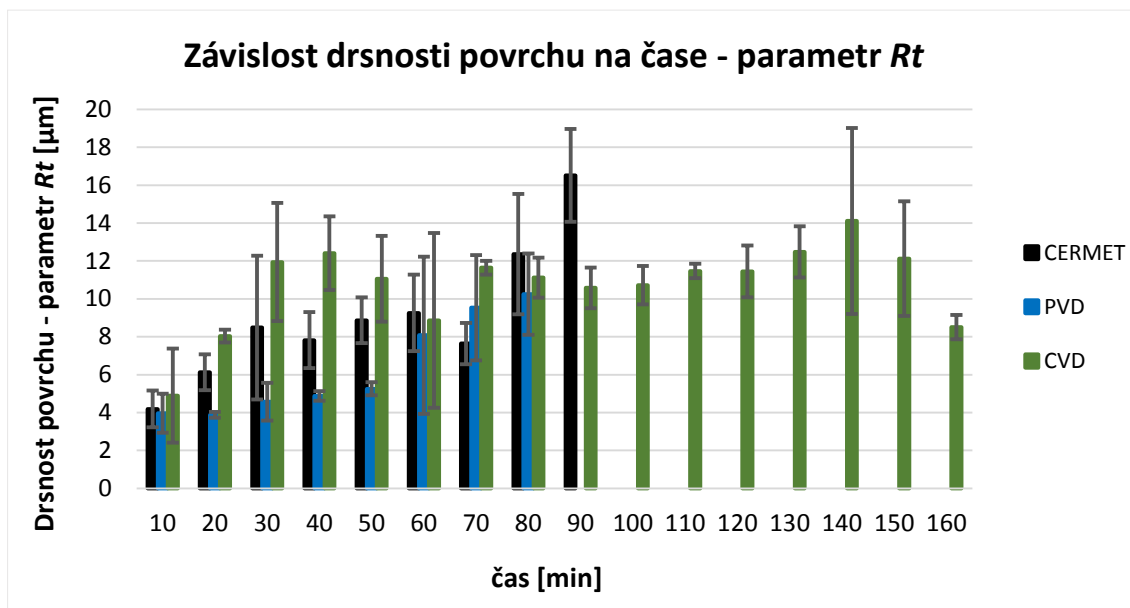
4.5.3 Zhodnocení drsnosti povrchu – parametr Rt – při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Druhým měřeným parametrem určující součet nejmenší a největší hodnoty daného měřeného úseku byl parametr Rt .

Z naměřených hodnot (obr. 45) lze snadno vidět, že nejnižších hodnot drsnosti povrchu obrobku dosahovala destička s PVD povlakem (**$(3,971 \pm 1,029) \mu\text{m}$ až $(10,254 \pm 2,143) \mu\text{m}$**).

Mírný nárůst parametru Rt oproti PVD destičce, způsobovala destička z CERMETU, která se držela po dobu 80 minut (**$(4,191 \pm 0,977) \mu\text{m}$ až $(12,358 \pm 3,180) \mu\text{m}$**). Ke konci své trvanlivosti (90 minut) zapříčinila naopak tato destička nejvyšší naměřenou průměrnou hodnotu parametru Rt (**$(16,521 \pm 2,450) \mu\text{m}$**).

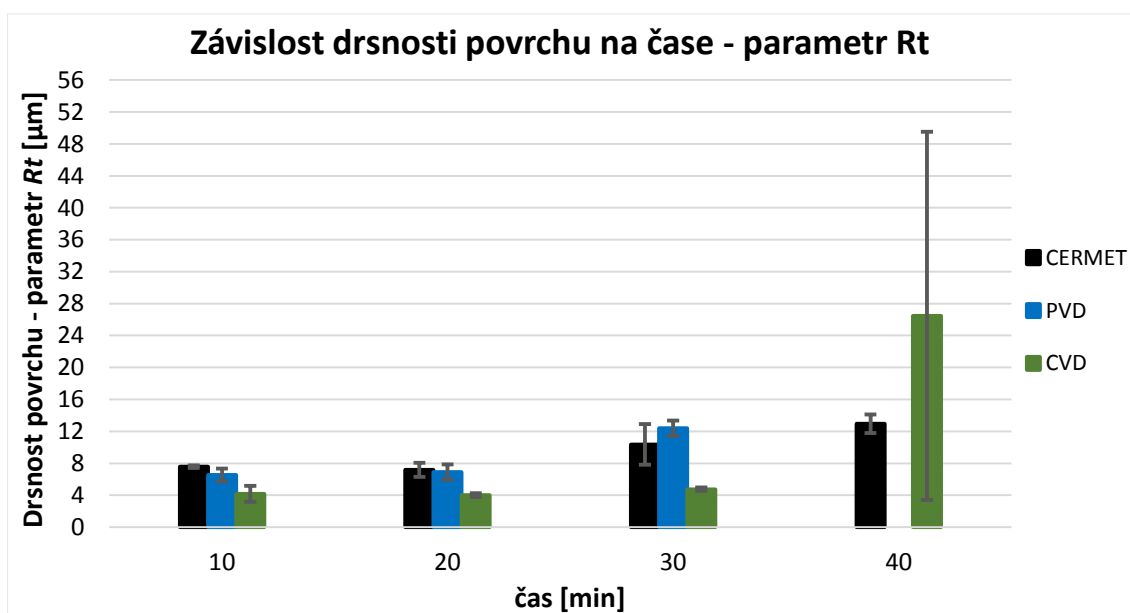
Destička s CVD povlakem se prezentovala poměrně stabilně naměřenými hodnotami drsnosti povrchu obrobku (**$(4,892 \pm 2,487) \mu\text{m}$ až $(14,112 \pm 4,912) \mu\text{m}$**), ale jednalo se o nejvyšší naměřené hodnoty parametru Rt .



Obr. 45 Graf drsnosti povrchu – parametr R_t - při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

4.5.4 Zhodnocení drsnosti povrchu – parametr R_t – při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Naměřené výsledky měření při této řezné rychlosti (obr. 46) byly opačné oproti menší řezné rychlosti. Po dobu 30 minut zde destička s CVD povlakem způsobovala nejnižší hodnoty parametru R_t ($(7,182 \pm 0,888) \mu\text{m}$ až $(10,366 \pm 2,541) \mu\text{m}$). Poté došlo vlivem zrychleného nárustu opotřebení k naměření naopak nejvyšší hodnoty parametru R_t z celého měření ($(26,464 \pm 23,048) \mu\text{m}$).



Obr. 46 Graf drsnosti povrchu – parametr R_t - při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Dále se po stejnou dobu (30 minut) v průměru lépe projevoval CERMET, který vytvářel o velmi málo (cca 0,3 μm) nižší hodnoty parametru R_t ($(7,182 \pm 0,888) \mu\text{m}$ až $(10,366 \pm 2,541) \mu\text{m}$) oproti PVD destičce ($(6,528 \pm 0,804) \mu\text{m}$ až $(12,393 \pm 0,949) \mu\text{m}$), která naopak způsobovala u menší řezné rychlosti nejnižší hodnoty drsnosti povrchu.

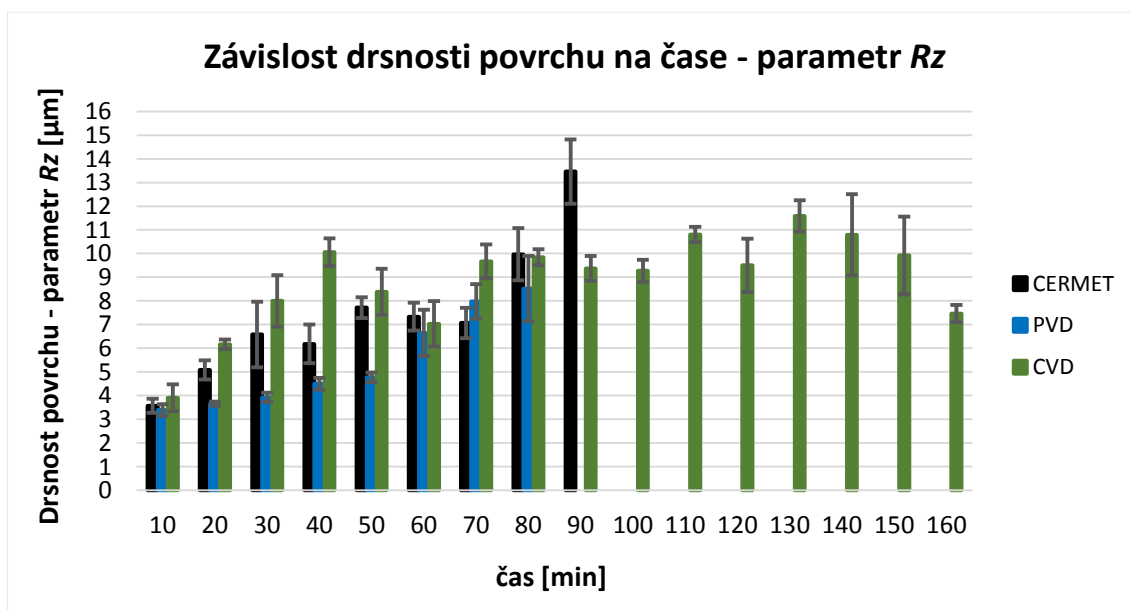
Zajímavostí je zde velmi vysoká odchylka nejistoty měření parametru R_t u CVD destičky při konci trvanlivosti břitové destičky (40 minut), která má horní hranici lehce nad 48 μm ($(26,464 \pm 23,048) \mu\text{m}$). To lze vysvětlit limitní dráhou hrotu profilometru. Jelikož na měřeném povrchu obráběného materiálu bylo rozmezí destrukce destičky (parametr R_a se blížil k hodnotě 4 μm), vůči ještě dobré geometrii (kvalitní povrch).

Protože byla drsnost měřena na pěti různých místech po obvodu a vyskytovalo se zde zmíněné rozmezí, lze předpokládat, že některá z hodnot se vyskytovala na lepším či horším povrchu obrobku. To mělo za následek tak velkou odchylku nejistoty měření.

4.5.5 Zhodnocení drsnosti povrchu – parametr R_z – při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Třetím a zároveň posledním zvoleným parametrem byl parametr R_z , který určuje průměr maximálních hodnot výšky profilu. Dle naměřených hodnot (obr. 47) je patrné, že nejnižších hodnot způsobovala destička s PVD povlakem ($(3,394 \pm 0,248) \mu\text{m}$ až $(8,521 \pm 1,380) \mu\text{m}$).

Destička z CERMETU vytvářela po dobu 80 minut nižší hodnoty drsnosti povrchu ($(3,573 \pm 0,298) \mu\text{m}$ až $(9,967 \pm 1,101) \mu\text{m}$) než destička s CVD povlakem ($(3,916 \pm 0,568) \mu\text{m}$ až $(10,061 \pm 0,575) \mu\text{m}$). Avšak analogicky jako u parametru R_t došlo při konci trvanlivosti břitové destičky (90 minut) k nárůstu parametru R_z , respektive k nejvyšší naměřené hodnotě parametru R_z ze všech použitých destiček ($(13,461 \pm 1,353) \mu\text{m}$).

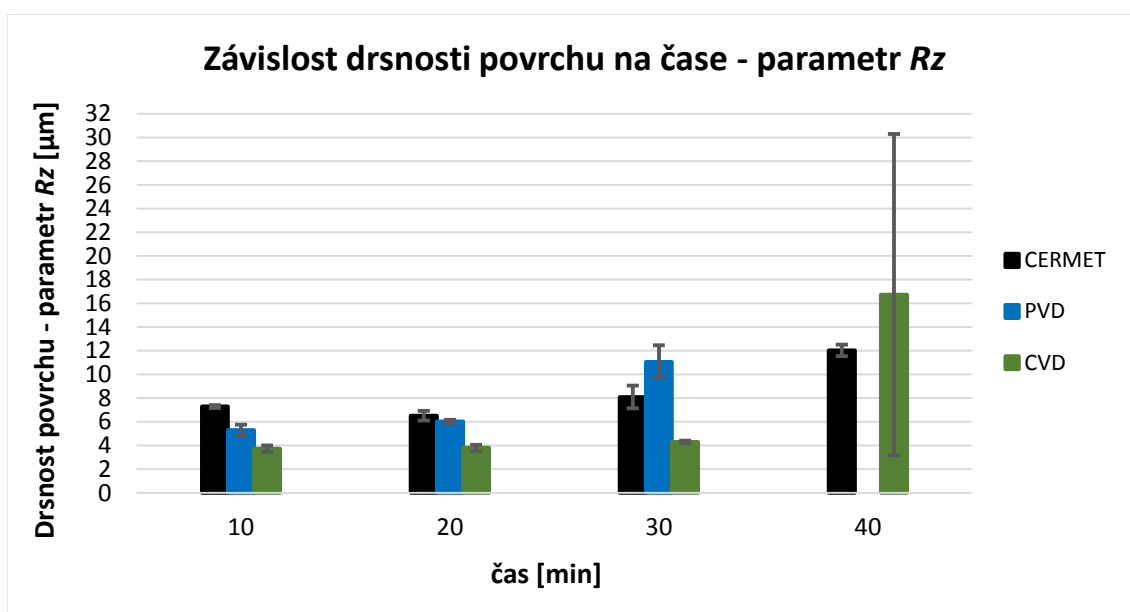


Obr. 47 Graf drsnosti povrchu – parametr R_z - při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

CVD destička se prezentovala analogicky jako u parametru R_t poměrně stabilně naměřenými hodnotami $((3,916 \pm 0,568) \mu\text{m}$ až $(11,583 \pm 0,663) \mu\text{m}$), ale opět se jednalo o nejvyšší naměřené hodnoty parametru R_z .

4.5.6 Zhodnocení drsnosti povrchu – parametr R_z – při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Obdobně jako u parametru R_t se zde jednalo o úplně přesně opačné naměřené výsledky než u menší řezné rychlosti. Na obr. 48 lze vidět, že CVD destička způsobovala po dobu 30 minut nejnižší hodnoty parametru R_z $((3,721 \pm 0,273) \mu\text{m}$ až $(4,282 \pm 0,107) \mu\text{m}$). Poté došlo vlivem zrychleného nárustu opotřebení k naměření naopak nejvyšší hodnoty parametru R_z z celého měření $((16,724 \pm 13,564) \mu\text{m})$.



Obr. 48 Graf drsnosti povrchu – parametr R_z - při $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Dále se po stejnou dobu (30 minut), v průměru lépe projevoval CERMET, který vytvářel o trochu nižší hodnoty parametru R_z $((6,517 \pm 0,404) \mu\text{m}$ až $(8,081 \pm 0,958) \mu\text{m}$) oproti destičce s PVD povlakem $((5,299 \pm 0,450) \mu\text{m}$ až $(11,063 \pm 1,390) \mu\text{m}$), která naopak způsobovala u menší řezné rychlosti nejnižší hodnoty parametru R_z .

4.6 Shrnutí dosažených hodnot

Pro přehlednost jsou v tab. 11 a tab. 12 shrnuty dosažené (významné) hodnoty bakalářské práce včetně ceny za 1 ks břitové destičky.

Kritická hodnota opotřebení na hřbetu VB byla v této práci stanovena nad $400 \mu\text{m}$, ale některé hodnoty vykazují mnohem vyšší opotřebení VB než $400 \mu\text{m}$. Důvodem je, že naměřená hodnota břitové destičky ještě nedosáhla v daném časovém okamžiku kritické

hodnoty VB 400 μm , ale pohybovala se na hranici životnosti ($\pm 300 \mu\text{m}$ až $350 \mu\text{m}$). Proto se provedlo další měření, kde během 10 minut došlo už k destrukci břitu. To je příčinou proč lze vidět vzrůst opotřebení v *tab. 11* a *tab. 12* u některých typů destiček dvojnásobně až skoro trojnásobně.

Tab. 11 Shrnutí dosažených hodnot, řezná rychlost $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Shrnutí dosažených hodnot	
CVD	
Dosažená trvanlivost	160 minut
Opotřebení na hřbetu VB	(62,145 \pm 0,140) μm až (885,413 \pm 0,150) μm
Kruhovitost	(0,0065 \pm 0,0015) mm až (0,0177 \pm 0,0032) mm
Parametr drsnosti R_a	(0,765 \pm 0,047) μm až (2,495 \pm 0,277) μm
Parametr drsnosti R_t	(4,892 \pm 2,487) μm až (14,112 \pm 4,912) μm
Parametr drsnosti R_z	(3,916 \pm 0,568) μm až (11,583 \pm 0,663) μm
Cena destičky	295 Kč
CERMET	
Dosažená trvanlivost	90 minut
Opotřebení na hřbetu VB	(145,896 \pm 0,147) μm až (433,474 \pm 0,150) μm
Kruhovitost	(0,0060 \pm 0,0008) mm až (0,0138 \pm 0,0031) mm
Parametr drsnosti R_a	(0,662 \pm 0,020) μm až (2,655 \pm 0,226) μm
Parametr drsnosti R_t	(4,191 \pm 0,977) μm až (16,521 \pm 2,450) μm
Parametr drsnosti R_z	(3,573 \pm 0,298) μm až (13,461 \pm 1,353) μm
Cena destičky	268 Kč
PVD	
Dosažená trvanlivost	80 minut
Opotřebení na hřbetu VB	(164,945 \pm 0,157) μm až (466,540 \pm 0,142) μm
Kruhovitost	(0,0052 \pm 0,0009) mm až (0,0069 \pm 0,0017) mm
Parametr drsnosti R_a	(0,599 \pm 0,011) μm až (1,957 \pm 0,187) μm
Parametr drsnosti R_t	(3,971 \pm 1,029) μm až (10,254 \pm 2,143) μm
Parametr drsnosti R_z	(3,394 \pm 0,248) μm až (8,521 \pm 1,380) μm
Cena destičky	268 Kč

Tab. 12 Shrnutí dosažených hodnot, řezná rychlost $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Shrnutí dosažených hodnot	
CVD	
Dosažená trvanlivost	40 minut
Opotřebení na hřbetu <i>VB</i>	(74,051 ± 0,140) μm až (1172,675 ± 0,148) μm
Kruhovitost	(0,0067 ± 0,0018) mm až (0,0219 ± 0,0035) mm
Parametr drsnosti <i>Ra</i>	(0,645 ± 0,018) μm až (2,636 ± 1,630) μm
Parametr drsnosti <i>Rt</i>	(4,022 ± 0,248) μm až (26,464 ± 23,048) μm
Parametr drsnosti <i>Rz</i>	(3,721 ± 0,273) μm až (16,724 ± 13,564) μm
Cena destičky	295 Kč
CERMET	
Dosažená trvanlivost	40 minut
Opotřebení na hřbetu <i>VB</i>	(182,957 ± 0,148) μm až (758,501 ± 0,143) μm
Kruhovitost	(0,0071 ± 0,0015) mm až (0,0081 ± 0,0018) mm
Parametr drsnosti <i>Ra</i>	(1,094 ± 0,066) μm až (3,198 ± 0,091) μm
Parametr drsnosti <i>Rt</i>	(7,182 ± 0,888) μm až (12,940 ± 1,157) μm
Parametr drsnosti <i>Rz</i>	(6,517 ± 0,404) μm až (12,020 ± 0,481) μm
Cena destičky	268 Kč
PVD	
Dosažená trvanlivost	30 minut
Opotřebení na hřbetu <i>VB</i>	(276,070 ± 0,150) μm až (527,054 ± 0,146) μm
Kruhovitost	(0,0070 ± 0,0018) mm až (0,0092 ± 0,0022) mm
Parametr drsnosti <i>Ra</i>	(0,826 ± 0,023) μm až (2,042 ± 0,122) μm
Parametr drsnosti <i>Rt</i>	(6,528 ± 0,804) μm až (12,393 ± 0,949) μm
Parametr drsnosti <i>Rz</i>	(5,299 ± 0,450) μm až (11,063 ± 1,390) μm
Cena destičky	268 Kč

5 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce byla studie životnosti nástrojů při soustružení korozivzdorné oceli. Práce byla členěna do třech hlavních částí.

Teoretická část se zabývá základními typy korozivzdorných ocelí na bázi stručného a věcného obsahu. Následně jsou zde uvedeny nutné základy soustružení, řezných sil a soustružení korozivzdorných ocelí. Stěžejní kapitoly jsou věnovány opotřebením soustružnických nástrojů, měření opotřebením a drsnosti povrchu s ohledem na experimentální část. Kromě toho je zde rozebrána tematika trvanlivosti a životnosti nástrojů, volby nástrojů při obrábění korozivzdorných ocelí a následná volba řezné kapaliny a řezných podmínek.

V experimentální části je stručně uveden popis použitého polotovaru (ocel 1.4301), jeho příprava a použité strojní zařízení, nástroje, procesní kapalina a řezné podmínky. Zbytek dané části je věnován měření opotřebením, kruhovitosti a drsnosti povrchu včetně zanesení všech výsledných hodnot do tabulek.

Třetí oddíl textu se věnuje diskuzi a vyhodnocování naměřených výsledků měření. Je zde grafické zobrazení naměřených hodnot z experimentální části a následný komentář k dosaženým výsledkům včetně okomentování a zdůvodnění podstatných částí. Na závěr diskuze jsou shrnuty dosažené (významné) hodnoty bakalářské práce.

Výsledné hodnoty získané v experimentální části, které jsou uvedeny v *tab. 11* a *tab. 12*. a jejich následné grafické znázornění v diskuzi a zhodnocení lze shrnout následovně:

1. Při menší řezné rychlosti, tedy $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, vykazovala během celého experimentu v průměru nejmenší opotřebením destička s CVD povlakem, ale na druhou stranu způsobovala v průměru vyšší hodnoty kruhovitosti, a dokonce měla rovněž nejvyšší všechny parametry drsnosti povrchu obrobku.

Destička z CERMETU vytvářela celou dobu průměrných hodnot při všech zbylých měřených veličinách kromě kruhovitosti, kde dosáhla v průměru nejhorších výsledků.

Nejhorší opotřebením až do konce své trvanlivosti vykazovala v průměru destička s PVD povlakem, avšak způsobovala v průměru nejnižší hodnoty kruhovitosti a všechny parametry drsnosti povrchu obráběného materiálu.

2. Při druhé vyšší zvolené řezné rychlosti ($v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) dosahovala během 30 minut v průměru všude nejnižších hodnot CVD destička. Avšak na konci své trvanlivosti (40 minut) způsobovala CVD destička v průměru nejvyšší hodnoty

opotřebení, kruhovitosti a drsnosti povrchu mimo parametry R_a a R_z , které byly naopak nejnižší.

Destička z CERMETU vytvářela po dobu 30 minut v průměru druhé nejnižší hodnoty opotřebení a kruhovitosti, ale parametr drsnosti povrchu R_a byl nejvyšší. Na konci své trvanlivosti (40 minut) způsobovala tato destička v průměru nejnižší hodnoty opotřebení a kruhovitosti, ale naopak způsobovala nejvyšší parametry drsnosti povrchu R_a a R_z .

Poslední destička s PVD povlakem vytvářela během své trvanlivosti v průměru nejvyšší hodnoty opotřebení, kruhovitosti, parametry drsnosti povrchu R_t a R_z , mimo parametr R_a .

Vzhledem k provedenému experimentu a zhodnocení dosažených výsledků bych doporučil následující.

- Jelikož zvolené řezné podmínky odpovídají jemnému obrábění, respektive soustružení, tak je velice důležitý parametr drsnosti povrchu R_a , který by se měl pohybovat kolem R_a 0,2 μm až 1,6 μm .
- Z tohoto důvodu bych při menší řezné rychlosti a řezných podmínkách:
 $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,1 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$ volil destičku s PVD povlakem, jež způsobovala nejnižší hodnoty drsnosti a kruhovitosti obrobku. Dosahovala sice v průměru nejvyšších hodnot opotřebení, ale i tak by se trvanlivost měla pohybovat kolem ± 80 minut. Z ekonomického hlediska se jedná o nejlevnější destičku ze všech zkoumaných destiček v této bakalářské práci.
- Naopak při vyšší řezné rychlosti a řezných podmínkách:
 $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,1 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$ bych volil destičku s CVD povlakem, která si udržovala po celou dobu experimentu nejnižší hodnoty parametru drsnosti povrchu R_a a rovněž velmi dobré hodnoty kruhovitosti obrobku při obstojných hodnotách opotřebení. Je sice dražší o 27 Kč než zbylé dvě destičky, ale dosahuje výrazně lepších hodnot drsnosti povrchu. Zároveň tato destička měla nejvyšší trvanlivost, jež se pohybuje kolem ± 40 minut.

Seznam použité literatury

- [1] COBB, Harold M. *The history of stainless steel*. B.m.: ASM International, 2010. ISBN 1-61503-011-5.
- [2] Optimalizace soustružení korozivzdorných ocelí | MM Průmyslové spektrum. www.mmspektrum.com [online]. [vid. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/optimalizace-soustruzeni-korozivzdornych-oceli>
- [3] PLUHAŘ. *PLUHAŘ, J. Nauka o materiálech. Praha: SNTL, 1989. 552 s. nedatováno.*
- [4] BADDOO, Nancy. *Structural Stainless Steel*. nedatováno, 159.
- [5] ŠTULPA, Miloslav. *Technologie obrábění*. nedatováno, 162.
- [6] ELUC 1218. *Elektronická učebnice - ELUC* [online]. [vid. 2022-10-14]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1218>
- [7] NETOLICKÁ BC, Fakulta. *ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE*. nedatováno, 58.
- [8] BUCEK, Michal. *Zařízení pro měření řezných sil při třískovém obrábění* [online]. 2013 [vid. 2022-10-24]. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/handle/10195/51758>
- [9] KOLOMÝ, Štěpán. *Hodnocení řezivosti nástroje při obrábění* [online]. Brno, 2019 [vid. 2022-10-24]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/176846>
- [10] YOUSSEF, Helmi A. *Machining of stainless steels and super alloys: traditional and nontraditional techniques*. Hoboken: John Wiley and Sons, 2015. ISBN 978-1-118-91936-1.
- [11] ELUC 1203. *Elektronická učebnice - ELUC* [online]. [vid. 2022-10-15]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1203>
- [12] DINIZ, Anselmo Eduardo, Álisson Rocha MACHADO a Janaina Geilser CORRÊA. *Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steels. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, **87**(9–12), 3157–3168. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: [doi:10.1007/s00170-016-8704-3](https://doi.org/10.1007/s00170-016-8704-3)
- [13] NWANESHIUDU, Adaobi, Christiane KUSCHAL, Fernanda H. SAKAMOTO, R. Rox ANDERSON, Kathryn SCHWARZENBERGER a Roger C. YOUNG. *Introduction to Confocal Microscopy. Journal of Investigative Dermatology* [online]. 2012, **132**(12), 1–5. ISSN 0022-202X, 1523-1747. Dostupné z: [doi:10.1038/jid.2012.429](https://doi.org/10.1038/jid.2012.429)
- [14] CORLE, Timothy R. a Gordon S. KINO. *Confocal scanning optical microscopy and related imaging systems*. San Diego: Academic Press, 1996. ISBN 978-0-12-408750-7.
- [15] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II 1. díl. VŠB-Technická univerzita Ostrava*. 2007.

- [16] DAN, Li a J. MATHEW. Tool wear and failure monitoring techniques for turning—A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 1990, **30**(4), 579–598. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/0890-6955(90)90009-8
- [17] CORREIA, A. Esteves a J. Paulo DAVIM. Surface roughness measurement in turning carbon steel AISI 1045 using wiper inserts. *Measurement* [online]. 2011, **44**(5), 1000–1005. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.01.018
- [18] *Introduction To Roughness | KEYENCE America* [online]. [vid. 2022-11-06]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/>
- [19] Měření jakosti povrchu. *Sandvik Coromant* [online]. [vid. 2022-11-22]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-surface-measurement.aspx>
- [20] Jak postupovat při soustružení různých typů materiálů. *Sandvik Coromant* [online]. [vid. 2022-11-10]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-do-turning-in-different-materials.aspx>
- [21] *EN 1.4301 / 304 / 1.4307 / 304L | Sverdrup Steel* [online]. [vid. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.sverdrupsteel.com/cs/products/austenitic-alloys/alloy-1-4301-304-1-4307-304l>
- [22] KŘÍŽ, Antonín. Tenké vrstvy. *Západočeská univerzita v Plzni, ATeam-materiálový výzkum.[2005][cit. 2016-04-12]. Dostupný z WWW:< http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf. 2006.*
- [23] ESTUDIO.CZ. ČSN EN ISO 25178-2 (014451) [online]. [vid. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-25178-2-014451-246395.html>
- [24] ESTUDIO.CZ. ČSN ISO 4291 (014411) [online]. [vid. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-iso-4291-014411-160108.html>
- [25] ESTUDIO.CZ. ČSN EN ISO 21920-2 (014457) [online]. [vid. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-21920-2-014457-246397.html>
- [26] Použití řezné kapaliny a chlazení při soustružení. *Sandvik Coromant* [online]. [vid. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-apply-coolant-and-cutting-fluid-in-turning.aspx>
- [27] Opatřebení břitu. *Sandvik Coromant* [online]. [vid. 2022-11-07]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>
- [28] TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie část 1. *Ostrava: VŠB-Technická univerzita. 2004.*
- [29] SADÍLEK, M, J DUBSKÝ, Z SADÍLKOVÁ a Z PORUBA. Cutting forces during turning with variable depth of cut. *Perspectives in Science. 2016, 7, 357–363. ISSN 2213-0209.*