



Vliv nanočástic v procesních kapalinách na trvanlivost nástroje a kvalitu obrobeneho povrchu při soustružení antikorozi oceli

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Ondřej Pech**
Vedoucí práce: prof. Ing. Alexey Popov, DrSc.





Effect of the nanoparticles in the process fluid on the tool life and the quality of cutting surface finish when turning stainless steel

Master thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301T048 – Engineering Technology and Materials
Author: **Bc. Ondřej Pech**
Supervisor: prof. Ing. Alexey Popov, DrSc.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Pech**
Osobní číslo: **S16000281**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Vliv nanočástic v procesních kapalinách na trvanlivost nástroje a kvalitu obrobeneho povrchu při soustružení antikorozi oceli**
Zadávací katedra: **Katedra obrábění a montáže**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Shrnutí poznatků o chlazení při obrábění, klasifikace procesních kapalin pro obrábění, vlastnosti a charakteristiky procesních kapalin, analýza vlivu procesních kapalin na trvanlivost nástroje, použití nanočástic v procesních kapalinách.
2. Shrnutí poznatků o kvalitě povrchu po obrábění. Definice pojmu drsnost povrchu, metody měření drsnosti povrchu.
3. Navržení metodiky zkoumání trvanlivosti nástroje a drsnosti povrchu u součástí soustružených v laboratoři KOM FS TUL.
4. Zjištění vlivu nanočástic v procesních kapalinách na trvanlivost nástroje a kvalitu povrchu při soustružení v laboratoři KOM FS TUL.
5. Analýza laboratorních výsledků; vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací: obrázky, tabulky a grafy - dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: cca 50 - 60 stran textu
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. MÁDL, J. Řezné kapaliny v současné technologii obrábění. In: *Sborník vědeckých prací*. 1. vyd. Ekologie obrábění, Strojírenská technologie knihovnička, 2000, s. 9 - 18. ISBN 80-7044-232-8.
2. JERSÁK, J., REJZEK, M. Účinek procesní kapaliny na proces soustružení a vybrané parametry integrity povrchu. *Strojírenská technologie*. Rec. prof. Vasilko, prof. Holešovský. roč. 16, duben 2011, č. 2. s. 17 - 23. ISSN 1211-4162.
3. SANDVIK Coromant, Sandviken: *Technická příručka obrábění, soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, upínání nástrojů*. 2005. 601 s.
4. HOLEŠOVSKÝ, F., DUŠÁK, K., JERSÁK, J., aj. *Terminologie obrábění a montáže*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, ÚTŘV, 2005. 208 s. ISBN 80- 7044-616-1.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Alexey Popov, DrSc.**
Katedra obrábění a montáže
Konzultant diplomové práce: **Ing. Stanislav Servinský, MBA**
Katedra obrábění a montáže

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2018**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. dubna 2020**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jan Jersák, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 16. října 2018

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

23. 4. 2019

Bc. Ondřej Pech

ANOTACE

VLIV NANOČÁSTIC V PROCESNÍCH KAPALINÁCH NA TRVANLIVOST NÁSTROJE A KVALITU OBROBENÉHO POVRCHU PŘI SOUSTRUŽENÍ ANTIKOROZNÍ OCELI

ANOTACE:

Tato diplomová práce ve své teoretické části shrnuje informace o procesních kapalinách pro obrábění, nanočásticích, trvanlivosti nástroje, drsnosti obrobeného povrchu a metodách jejího měření. V praktické části je dále zaměřena na návrh a provedení experimentu v laboratořích KOM FS TUL pro zjištění vlivu nanočástic v procesních kapalinách na trvanlivost břítu nástroje a drsnost obrobené plochy při soustružení antikorozní oceli. Výsledná data získána z experimentu byla zanalyzována a byly z nich vyvozeny závěry.

Klíčová slova: PROCESNÍ KAPALINY, DRSNOST POVRCHU, TRVANLIVOST BŘITU, NANOČÁSTICE.

EFFECT OF THE NANOPARTICLES IN THE PROCESS FLUID ON THE TOOL LIFE AND THE QUALITY OF CUTTING SURFACE FINISH WHEN TURNING STAINLESS STEEL

ANNOTATION:

This diploma thesis in its theoretical part summarizes knowledge about process fluids for machining, nanoparticles, the tool life, the quality of the cutting surface and methods of its measurement. In practical part is focused on designing and performing experiment in KOM FS TUL laborstudies to determine influence of nanoparticles in process fluids on the life of tool's edge and quality of machined surface after turning of stainless steel. Datas from experiment were analysed and conclusions were made.

Key words: PROCESS FLUIDS, SURFACE ROUGHNESS, TOOL LIVE, NANOPARTICLES.

Katedra obrábění a montáže

Evidenční číslo práce: **KOM 1303**

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej PECH**

Vedoucí práce: Prof. Ing. Alexey Popov, DrSc.
Konzultant: Ing. Stanislav Servinský, MBA

Počet stran: 75
Počet příloh: 3
Počet tabulek: 32
Počet obrázků: 45
Počet diagramů: 17

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu práce prof. Ing. Alexeyi Popovovi, DrSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi diplomové práce Ing. Stanislavu Servinskému, MBA za dohled a spolupráci při provádění experimentu v laboratořích KOM FS TU v Liberci. V neposlední řadě děkuji také své rodině a přátelům za podporu při dosavadním studiu.

OBSAH

ANOTACE.....	5
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH	8
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	10
ÚVOD.....	13
1 Shrnutí poznatků o chlazení při obrábění, klasifikace procesních kapalin pro obrábění, vlastnosti a charakteristiky procesních kapalin, analýza vlivu procesních kapalin na trvanlivost nástroje, použití nanočástic v procesních kapalinách.....	14
1.1 Chlazení při procesu obrábění.....	14
1.1.1 Chlazení procesní kapalinou.....	14
1.1.2 Mazání pomocí pevných látek (gely a pasty)	15
1.1.3 Chlazení olejovou mlhou.....	16
1.1.4 Chlazení pomocí plynu.....	16
1.2 Klasifikace a charakteristika procesních kapalin.....	17
1.2.1 Vodné roztoky	17
1.2.2 Emulzní kapaliny	17
1.2.3 Řezné oleje	18
1.2.4 Syntetické a polosyntetické kapaliny.....	19
1.3 Vlastnosti procesních kapalin	20
1.3.1 Chladící účinek	20
1.3.2 Mazací účinek.....	20
1.3.3 Čistící účinek.....	20
1.3.4 Ochranný účinek	21
1.3.5 Provozní stálost	21
1.3.6 Zdravotní nezávadnost.....	21
1.3.7 Přiměřené náklady	21
1.4 Opotřebení bříty a trvanlivost nástroje.....	22
1.4.1 Opotřebení bříty nástroje	22
1.4.2 Trvanlivost a životnost nástroje.....	27
1.5 Nanomateriály	29
1.5.1 Rozdělení nanoobjektů	29
1.5.2 Vlastnosti nanomateriálů.....	30
1.5.3 Metody výroby nanomateriálů	31
1.5.4 Využití nanomateriálů.....	31
2 Shrnutí poznatků o kvalitě povrchu po obrábění. Definice pojmu drsnost povrchu, metody měření drsnosti povrchu	32
2.1 Integrita povrchu	32
2.2 Struktura povrchu	32
2.2.1 Průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu Ra	33
2.2.2 Největší výška profilu Rz.....	34
2.2.3 Nosný podíl materiálu Rmr(c)	34

2.3 Metody měření drsnosti povrchu	35
2.3.1 Porovnání s etalony drsnosti	35
2.3.2 Dotykové profilometry	35
2.3.3 Metoda světelného řezu	36
2.3.4 Metoda využití interference světla	37
3 Navržení metodiky zkoumání trvanlivosti nástroje a drsnosti povrchu při soustružení v laboratoři KOM FS TUL	38
3.1 Obráběný materiál	38
3.2 Použitý soustružnický nástroj	39
3.3 Strojní vybavení	40
3.4 Příprava procesních kapalin	41
3.5 Metoda zkoumání trvanlivosti nástroje	42
3.6 Metoda zkoumání drsnosti povrchu po soustružení	44
4 Zjištění vlivu nanočástic v procesních kapalinách na trvanlivost nástroje a kvalitu povrchu při soustružení v laboratořích KOM FS TUL	46
4.1 Vliv nanočástic v PK na trvanlivost nástroje	46
4.2 Vliv nanočástic v PK na kvalitu obrobeného povrchu	50
4.2.1 Procesní kapalina Vasco 6 000	50
4.2.2 Procesní kapalina Blasocut BC 25MD	56
5 Analýza laboratorních výsledků; vyvození závěrů	63
5.1 Vyhodnocení trvanlivosti nástroje	63
5.2 Vyhodnocení drsnosti obrobeného povrchu	65
ZÁVĚRY	70
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	71
SEZNAM PŘÍLOH	75

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	tažnost
A_p	[mm]	šířka záběru ostří nástroje
Ar	[-]	argon
C	[-]	uhlík
c	[%]	požadovaná koncentrace procesní kapaliny
CNC	[-]	číslicové řízení pomocí počítače (Computer Numerical Control)
CO₂	[-]	oxid uhličitý
C_PT₅₀	[μm]	Padesátiprocentní nosný podíl posuzovaného profilu
Cr	[-]	chrom
C_T	[-]	konstanta Taylorova vztahu
C_v	[-]	konstanta Taylorova vztahu
CVD	[-]	Chemická depozice z plynné fáze (Chemical Vapor Deposition)
ČSN	[-]	česká technická norma
d	[mm]	průměr vepsané kružnice VBD
E	[GPa]	modul pružnosti v tahu
EN	[-]	evropská norma
f	[mm]	posuv na otáčku
Fe₂O₃	[-]	oxid železitý
FS	[-]	fakulta strojní
GaAs	[-]	arsenid gallitý
H₂S	[-]	sulfan
ISO	[-]	mezinárodní organizace zabývající se tvorbou norem (International Organization for Standardization)
K	[-]	refrakční faktor
KOM	[-]	katedra obrábění a montáže
L	[μm]	vzdálenost interferenčních proužků
ΔL	[μm]	vychýlení interferenčních proužků
ln	[-]	přirozený logaritmus
l_n	[mm]	vyhodnocovaná délka při měření drsnosti povrchu

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
l_r	[mm]	základní délka při měření drsnosti povrchu
m	[-]	exponent Taylorova vztahu
MI	[mm]	délka prvku v profilu
Mn	[-]	mangan
Mo	[-]	molybden
N	[-]	dusík
N₂	[-]	molekula dusíku
n	[-]	počet měření
Ni	[-]	nikl
P	[-]	fosfor
PEG	[-]	polymerizovaný obal
pH	[-]	vodíkový exponent
R	[μ m]	parametr drsnosti povrchu
r	[%]	hodnota na refraktometru
Ra	[μ m]	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Rm	[MPa]	mez pevnosti v tahu
Rmr(c)	[μ m]	nosný podíl materiálu
Rz	[μ m]	největší výška profilu
r_ϵ	[mm]	poloměr zaoblení špičky VBD
S	[-]	síra
s	[mm]	výška VBD
SI	[-]	mezinárodní systém jednotek
Si	[-]	křemík
SiO₂	[-]	oxid křemičitý
S1	[-]	světelný paprsek
S2	[-]	světelný paprsek
T	[min]	trvanlivost nástroje
t	[s]	čas
TiO₂	[-]	oxid titaničitý
TU	[-]	technická univerzita
u_A	[-]	standardní nejistota typu A
VB	[mm]	průměrné opotřebení hřbetu nástroje

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
VB_{kr}	[mm]	průměrné kritické opotřebení hřbetu nástroje
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
\bar{x}	[-]	výběrový průměr hodnot
x_i	[-]	obecné naměřené údaje
Y_(x)	[μm]	výšková hodnota odchylny profilu drsnosti povrchu
Z_p	[μm]	největší výška profilu v rozsahu základní délky
ZrO₂	[-]	oxid zirkoničitý
Z_v	[μm]	největší hloubka profilu v rozsahu základní délky
λ	[μm]	změna klínové vrstvy u metody měření drsnosti povrchu pomocí interference světla
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří nástroje

ÚVOD

Tato diplomová práce si klade za cíl zhodnotit vliv nanočástic SiO_2 a SiO_2 s polymerizovaným obalem (PEG) přimíchaných do vybraných procesních kapalin na trvanlivost nástroje a drsnost obrobeného povrchu při soustružení austenitické antikorozi oceli 1.4404. Jako procesní kapaliny byly zadavatelem zvoleny Vasco 6 000 a Blasocut BC 25MD v koncentraci 10 %. Experiment byl zrealizován v laboratořích Katedry obrábění a montáže Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci na CNC soustruhu CHEVALIER FCL-2140F a univerzálním hrotovém soustruhu SU 50/1500 (viz obr. 1).

Procesní kapaliny působí na proces obrábění několika důležitými vlivy. Především odvádí z místa řezu vznikající teplo, ovlivňují míru tření nástroje a obráběného materiálu. Ale mají i mnoho dalších účinků, jako například zlepšení drsnosti obrobené plochy, zlepšení přesnosti rozměrů obrobku, snížení hlučnosti obrábění, snížení spotřebované energie a také menší spotřebu používaných rezných nástrojů. [1]

V teoretické části této diplomové práce jsou prostřednictvím rešerše shrnuty informace týkající se procesních kapalin využívaných pro obrábění, nanočástic, trvanlivosti nástroje, drsnosti obrobeného povrchu a metod měření parametrů drsnosti povrchu.

V praktické části je tato diplomová práce soustředěna na návržení a provedení experimentu a získání potřebných dat týkajících se vlivu nanočástic v procesních kapalinách na drsnost obrobeného povrchu a trvanlivost nástroje při soustružení. Tato data byla dále zpracována, vyhodnocena a byly z nich vyvozeny příslušné závěry.



Obr. 1 Experiment provedený v laboratořích KOM FS TU v Liberci:

- a) CNC soustruh CHEVALIER FCL-2140F,
- b) univerzální hrotový soustruh SU 50/1500.

1 Shrnutí poznatků o chlazení při obrábění, klasifikace procesních kapalin pro obrábění, vlastnosti a charakteristiky procesních kapalin, analýza vlivu procesních kapalin na trvanlivost nástroje, použití nanočástic v procesních kapalinách

1.1 Chlazení při procesu obrábění

Prostředí v místě řezu má výrazný vliv na kvantitativní, kvalitativní a ekonomické parametry řezného procesu. Téměř všechna mechanická energie (95 – 98 %), jenž je vynaložena na tvorbu třísky, je přeměňována na energii tepelnou. Vzniklé teplo významně ovlivňuje řezný proces protože [1] [2]:

- působí negativně na řezné vlastnosti nástroje,
- ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- má vliv na zpevňování a pěchování obráběného materiálu,
- ovlivňuje podmínky tření na hřbetě a čele nástroje.

Fyzikální a chemické vlastnosti prostředí, v němž probíhá proces obrábění, mohou výrazně ovlivnit teplotu řezání a řezný odpor, plastickou deformaci odcházející třísky, trvanlivost nástroje a přesnost i jakost obrobené plochy. Řezné prostředí je nejčastěji tvořeno procesními kapalinami, pastami, olejovou mlhou nebo plynem. [1]

1.1.1 Chlazení procesní kapalinou

Způsob přívodu procesní kapaliny do místa řezu může významně ovlivnit parametry řezného procesu, především trvanlivost břitu nástroje a jakost obrobené plochy. [2]

Standardní chlazení

Zpravidla nevyžaduje žádnou úpravu přívodního potrubí a bývá standardně dodáváno výrobcem obráběcího stroje. Je tvořeno nádrží na procesní kapalinu, čerpadlem a rozvodovým potrubím (viz obr. 2). Průtok lze regulovat výstupním kohoutem nebo ventilem, přičemž množství dodávané kapaliny je dáno typem použitého čerpadla. [1] [2]



Obr. 2 Standardní chlazení [3].

Tlakové chlazení

Procesní kapalina je do místa řezu přiváděna pod vysokým tlakem (viz obr. 3). Průměr výstupní trysky bývá v rozmezí 0,3 – 1 mm a tlak kapaliny bývá 3 – 100 MPa. Využívá se především v případech, kdy má vznikající teplo prokazatelný vliv na trvanlivost nástroje. Nevýhodou je, že je kapalina rozstříkována do okolí a je třeba pracovní prostor stroje uzavřít. [1] [2]



Obr. 3 Tlakové chlazení [4].

Podchlazování řezných kapalin

Řezná kapalina je podchlazována na teplotu nižší, než je okolní prostředí, což příznivě přispívá k zvýšení trvanlivosti nástroje. Standardní druhy procesních kapalin mohou být podchlazeny na 5 – 7 °C při zachování jejich mazacích vlastností, oleje však pouze na 15 – 20 °C. Při podchlazení na nižší teplotu hrozí v případě řezných kapalin zhoršení stálosti a u řezných olejů nebezpečí houstnutí. Výkon obrábění lze zvýšit podchlazením procesní kapaliny pod bod mrazu, v tomto případě však musí být využita kapalina speciálního složení. [2]

Vnitřní chlazení

Vnitřní chlazení umožňuje významné zvýšení výkonu obrábění a také vede k lepšímu odvodu třísek z místa řezu. Řeznou rychlost je možné zvýšit o 5 – 25 %. Je použitelné především pro nástroje ze slinutých karbidů. V případě vrtání jsou kanály pro přívod řezné kapaliny přímo součástí těla nástroje. Obrovský význam má tento způsob přivádění procesních kapalin při vrtání hlubokých děr a také při vrtání těžko obrobitelných materiálů. [1] [2]

1.1.2 Mazání pomocí pevných látek (gely a pasty)

Je využíváno především ve velice náročných pracovních podmínkách, např. při velkých měrných tlacích. Jedná se například o sirník molybdeničitý, jenž je používán ve formě koloidní suspenze v řezném oleji nebo grafit rozptýlený v tuku nebo oleji. Nevýhodou je, že tyto pasty podporují v nádržích vznik usazenin, proto je jejich využití značně omezené. [1]

1.1.3 Chlazení olejovou mlhou

Olejová nebo emulzní mlha je přechodem mezi kapalným a plynným rezným prostředím. Jedná se zpravidla o olejovou emulzi, která je rozptýlena pomocí stlačeného vzduchu. Rychlost může být až $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Rozptýlením procesní kapaliny na drobné částičky ve stlačeném vzduchu mnohonásobně zvýší chladicí účinek. Tryska bývá nasměrována přímo do místa řezu na břit nástroje před jeho najetím do řezu. Stroj by měl být zakrytován a mělo by být zajištěno odsávání aerosolových částic. [1]

Díky minimálnímu množství použité procesní kapaliny (optimálně 50 ml za hodinu) jsou podstatně snížena zdravotní rizika pro obsluhu a zároveň je proces šetrný k životnímu prostředí. Metoda je vhodná zejména pro vrtání, vystružování a řezání závitů do oceli, šedé litiny a slitin hliníku. [5]

1.1.4 Chlazení pomocí plynu

Plynné látky nemají žádný mazací účinek, mají nízký chladicí účinek a problematický čistící účinek, proto nejsou jako rezná média běžně využívány. Z plynů jsou jako vhodné rezné prostředí používány oxid uhličitý, dusík, argon a freon. [1]

Plyn pod vysokým tlakem přiváděný do místa řezu pomáhá odstraňovat třísky při obrábění těžkoobrobitelných materiálů. CO_2 má výhradně chladicí účinek a je přiváděn pod tlakem $0,5 - 7 \text{ MPa}$ (viz obr. 4). Expanzí je hluboce podchlazen, vzniká suchý led, který výrazně ochlazuje obrobek a snižuje teplotu řezání. Nevýhodou jsou vysoké náklady na CO_2 . Dusík a argon brání tvorbě oxidačních filmů, které především při vysokých teplotách zvyšují intenzitu abrazivního otěru nástroje. Nevýhodou N_2 a Ar je poměrně vysoká cena a určité nebezpečí a riziko při jejich používání v běžných výrobních podmínkách. Proto je nejběžnějším plynem využívaným k chlazení vzduch, jenž musí být zbaven vlhkosti. Nevýhodou chlazení pomocí plynu je jeho vysoká hlučnost. [1] [2]

Suché obrábění je zvláštním případem aplikace plynného prostředí při obrábění, rozšiřování tohoto způsobu obrábění souvisí s vývojem nových rezných materiálů. Rezným prostředím je v tomto případě pouze atmosférický vzduch. [2]



Obr. 4 Chlazení při obrábění pomocí paprsku CO_2 [6].

1.2 Klasifikace a charakteristika procesních kapalin

Procesní kapaliny lze dělit na kapaliny s převažujícím mazacím účinkem a převažujícím chladícím účinkem. Přičemž je v současnosti snaha o zvyšování mazacího účinku i u kapalin s chladícím účinkem, tím se rozdíl mezi oběma skupinami výrazně snižuje. Další rozdělení je na procesní kapaliny s vodou mísitelné a s vodou nemísitelné. Vodou mísitelné se dále dělí na ve vodě rozpustné a ve vodě emulgační. Vývojovým trendem je nahrazení látek s vodou nemísitelných (těžkých olejů) emulzemi, mikroemulzemi a vodou ředitelnými produkty, které umožňují použití vyšších řezných rychlostí a tím zvýšit produktivitu obrábění. [1] [7]

Podle dalších kritérií lze procesní kapaliny dělit na [7]:

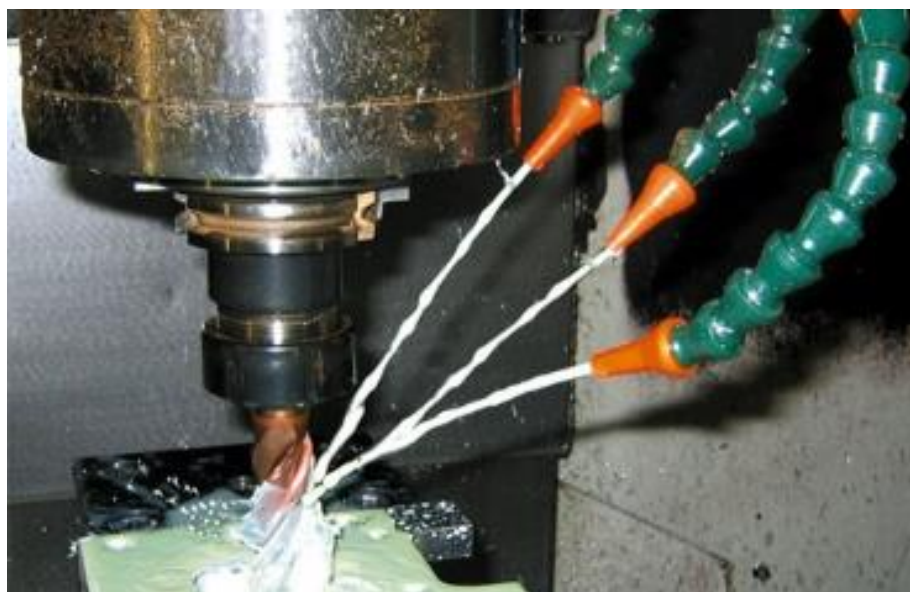
- vodné roztoky,
- emulzní kapaliny,
- řezné oleje,
- syntetické a polosyntetické kapaliny.

1.2.1 Vodné roztoky

Jedná se o nejjednodušší procesní kapaliny, které však mají relativně málo výhod. Využívaná voda vyžaduje mnoho úprav, např. její změkčování a přidávání různých přísad (proti pěnovosti, korozi a pro zlepšení smáčivosti). Vodné roztoky musí být vždy alkalické. Mají obecně velmi dobré chladící a čistící účinky, ale takřka žádný mazací účinek a jsou také náchylné k rozmnožování anaerobních bakterií, jež způsobují tvorbu kalů a zápach. [1] [7]

1.2.2 Emulzní kapaliny

Emulze (viz obr. 5) jsou velice často používané řezné kapaliny, jde o disperzní soustavy dvou vzájemně nerozpustných kapalin. Nejčastěji se jedná o vodu a olej, přičemž je nutné využít také tzv. emulgátory, zabraňující vzniku sraženin. Olejová fáze ve formě malých kapiček o velikosti 0,2 – 0,8 mm snižuje tření mezi materiálem obrobku a břitem nástroje. Vodní fáze odvádí z místa řezu vznikající teplo a zároveň odplavuje třísku. [1] [7]



Obr. 5 Chlazení emulzní kapalinou [8].

Výsledný chladicí účinek emulze je závislý na její koncentraci. Platí, že čím větší koncentrace oleje a emulgačního prostředku, tím nižší chladicí účinek. Voda bývá v emulzích obsažena nejčastěji v koncentraci 90 – 99%. Cena vody je mnohonásobně nižší, než v případě čistých řezných olejů. Ochrana obrobeného povrchu vůči korozi je závislá na hodnotě pH emulzní kapaliny, přičemž hodnota pH = 8 – 9 již poskytuje dostatečnou ochranu slitinám železa. Účinným opatřením pro delší životnost emulze je její provzdušňování. Tím je zamezeno přemnožení bakterií v emulzi a vytváření síranů, např. H₂S. Účinným opatřením pro delší životnost emulze je její provzdušňování. Tím je zamezeno přílišnému množení bakterií v emulzi a vytváření síranů, např. H₂S, které bývají příčinou nepříjemného zápachu. [7] [9] [10]

1.2.3 Řezné oleje

Jedná se o zušlechtěné minerální oleje (viz obr. 6). Mají řadu výhod, např. eliminace koroze, velmi dobrá mazací schopnost, je u nich také eliminován vznik bakterií, mají však nižší chladicí účinek než vodou mísitelné procesní kapaliny. Obsahující přísady pro zvýšení mazacích vlastností a tlakové únosnosti. [5] [7] Mazací schopnost zvyšují [7]:

- mastné látky,
- organické sloučeniny,
- pevná maziva.

Mastné látky zvětšují přilnavost oleje a kovu a zvyšují mazací schopnost (ne však za vysokých tlaků). Jde o zmydelnitelné mastné oleje, syntetické estery a mastné kapaliny. [7]

Organické sloučeniny, např. síry, chloru a fosforu. Vytváří na povrchu vrstvu kovových mýdel a tím zabraňují vzniku kovových svarů při pohybu třecích ploch za vysokých tlaků. [7]

Pevná maziva, využívána jako přísady řezných olejů, působí při obrábění mechanickým účinkem. Díky afinitě ke kovu vzniká mezní vrstva, která odolává tlakům a zvyšuje mazací vlastnosti. Používá se např. grafit a siričik molybdenu. V kapalinách se nerozpouští a musí být udržovány v rozptýleném stavu. [7]



Obr. 6 Chlazení prostřednictvím řezného oleje [10].
Chladicí účinek řezných olejů je výrazně nižší, než v případě vodných roztoků,

některé mohou dokonce při obrábění vyšší řeznou rychlostí vzplanout. Obecně oleje s nízkou viskozitou mají sklon k většímu rozprašování, vypařování i vzplanutí. Proti tomu oleje s vyšší viskozitou mají nízkou tekutost a tím i horší odvod tepla. Limitujícím faktorem použití řezných olejů při obrábění oceli je fakt, že již při řezné rychlosti nad $80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ se začíná vyvíjet dým, proto je jejich využití omezeno především pro lehké obrábění na automatech, pro práci na protahovacích strojích a při broušení. [1]

1.2.4 Syntetické a polosyntetické kapaliny

Syntetické řezné kapaliny se skládají z rozpouštědel tzv. glykolů. Glykoly se mohou ve vodě rozpouštět nebo vytvářejí emulze. Jsou průsvitné, což umožňuje sledovat proces obrábění. Mají velice dobré chladicí, mazací, čistící i ochranné účinky. Nejsou závislé na kvalitě vody a výsledné roztoky jsou velice stabilní. Aplikace těchto kapalin je ekonomicky výhodná. [1] [7]

Polosyntetické řezné kapaliny mají lepší mazací vlastnosti a vznikají smícháním oleje se syntetickou řeznou kapalinou. Olejové částice jsou zde mnohem menší než v případě emulzí. Za polosyntetickou kapalinu jsou označovány kapaliny s obsahem 5 – 30% minerálního oleje. Lze je snadno míchat, velmi dobře odvádějí teplo, mají dlouhou životnost, nehoří a nevytváří dým. [1] [7]

Syntetické a polosyntetické kapaliny jsou nejčastěji využívány pro operace s velkou řeznou rychlostí, např. broušení (viz obr. 7). Jsou poměrně příznivé k životnímu prostředí a vyznačují se stálostí proti působení bakterií. [5] [7]



Obr. 7 Syntetická řezná kapalina použitá při broušení [11].

1.3 Vlastnosti procesních kapalin

Požadavky na vlastnosti procesních kapalin [7]:

- chladicí účinek,
- mazací účinek,
- čistící účinek,
- ochranný účinek,
- provozní stálost,
- zdravotní nezávadnost,
- přiměřené náklady.

1.3.1 Chladicí účinek

Chladicí účinek je definován jako schopnost řezného prostředí odvádět z místa řezu teplo a je závislý na [7]:

- jeho smáčecí schopnosti,
- tepelné vodivosti,
- výparném teple,
- měrném teple,
- rychlosti vypařování,
- průtokovém množství.

Čím vyšší jsou tyto veličiny, tím je vyšší chladicí účinek řezného prostředí. Teplo je z místa řezu většinou odváděno proudem procesní kapaliny, která oplachuje nástroj, obrobek i třísku. Dochází k předávání vzniklého tepla do proudící procesní kapaliny a dochází zde také k částečnému odpaření kapaliny. V případě výparného tepla je však příliš velké odpařování na škodu a v některé případy je nutné řešit pomocí odsávání par. [5] [7]

1.3.2 Mazací účinek

Mazací účinek zabraňuje přímému styku povrchu kovů a tím snižuje tření mezi nástrojem a obrobkem. Je důležitý z pohledu zmenšení řezných sil, zlepšení drsnosti obrobeného povrchu a také zmenšení spotřeby energie. Jeho předpokladem však je, že procesní kapalina pronikne až do stykové plochy a vytvoří zde účinný mazací film. Jelikož v místě styku ploch působí značné tlaky (řádově 10^3 MPa) a vysoké teploty (300 – 1 000 °C), je možné tento předpoklad splnit jen do určité míry. [1]

Mazací schopnost řezného prostředí je dána pevností vytvořené vrstvy a viskozitou. Čím je však viskozita vyšší, tím horší je schopnost řezné kapaliny proniknout mezi třecí plochy a zároveň se snižuje její proudění a odvod tepla. Zvyšují se také ztráty způsobené ulpíváním kapaliny na odcházející třísece. Pevnost mazací vrstvy lze zvýšit pomocí přísad povrchově aktivních látek. [1]

1.3.3 Čistící účinek

Čistící účinek je možné popsat jako odstraňování třísky z místa řezu pomocí proudu řezné kapaliny. Velice významný je pro broušení (viz obr. 8), kde je nutné rychle odvádět třísku z místa řezu a je důležitý pro zlepšení drsnosti povrchu. Dále pro řezání závitů a vrtání hlubokých děr. Vysoký čistící účinek mají kapaliny s malou viskozitou a bez aktivních přísad. [5] [1]



Obr. 8 Chlazení při broušení [13].

1.3.4 Ochranný účinek

Ochranný účinek je žádoucí z důvodu odstranění operace konzervování mezi jednotlivými operacemi a také z důvodu ochrany stroje před korozí. Antikorozní účinek je v řezné kapalině vytvářen pomocí přísad, které pasivují kovy proti nežádoucím účinkům. Důležité je také to, aby řezné kapaliny nerozpouštěly nátěry a gumová těsnění. [1]

1.3.5 Provozní stálost

Provozní stálost je dána délkou intervalu výměny řezné kapaliny. Po dobu funkčnosti řezné kapaliny musí být zachovány všechny její vlastnosti. Provozní stálost je závislá na jeho fyzikálních a chemických vlastnostech a také na teplotě. Stárnutí řezných kapalin na bázi oleje se projevuje tvorbou pryskyřnatých usazenin, které zhoršují funkční vlastnosti kapalin a jejich rozklad, snižují mazací a ochranný účinek a mohou způsobovat hnilobný rozklad. [7] [12]

1.3.6 Zdravotní nezávadnost

Procesní kapaliny nesmí být zdraví škodlivé, nesmí dráždit pokožku ani sliznici a nesmí být jedovaté. Důvodem je fakt, že obsluha přichází často do přímého kontaktu s řeznou kapalinou. Rovněž nesmí zamořovat okolní prostředí nepříjemným zápachem. Zdravotní nezávadnost je také spjata s provozní stálostí a čistotou procesní kapaliny. V provozu musí být zajištěny základní hygienická opatření, např. větrání, umývání a preventivní ochrana pokožky. [1] [12]

1.3.7 Přiměřené náklady

Pro zvolení vhodné procesní kapaliny pro danou aplikaci je nutné brát v potaz nejenom cenu, ale je třeba zhodnotit mnoho dalších vlivů a provést komplexní technicko-ekonomický rozbor. V tomto rozboru posuzujeme vliv na [1]:

- trvanlivost nástroje,
- jakost povrchu obrobku,
- spotřebu elektrické energie,
- provozní stálost kapaliny,
- spotřebu a výměnu kapaliny,
- náklady na likvidaci použité kapaliny.

1.4 Opotřebení břitu a trvanlivost nástroje

1.4.1 Opotřebení břitu nástroje

V průběhu obrábění dochází k vývinu velkého množství tepla, značnému mechanickému namáhání břitu a ke vzniku chemických a abrazivních faktorů, které způsobují opotřebení břitu nástroje. Opotřebení nástroje je postupně probíhající proces, kdy dochází ke změnám geometrie a drsnosti plochy nástroje v místech styku s obráběným materiálem. Způsobuje ho otěr stykových ploch, plastická deformace povrchu břitu a narušení břitu křehkými lomy. [12] [14]

1.4.1.1 Mechanismy opotřebení

Abrazivní otěr

Abrazivní otěr je způsoben tvrdými mikročásticemi ve struktuře obráběného materiálu, které způsobují obrušování stykových ploch nástroje. Odolnost nástroje proti abrazivnímu otěru je dána jeho tvrdostí. Abrazivní otěr je významný především při nízkých řezných rychlostech, především při použití nástrojů z nástrojových a rychlořezných ocelí. [12] [14]

Adhezní otěr

Vyskytuje se především při nízkých teplotách na čele břitu. Vzniká při nízkých řezných rychlostech za působení vysokých lokálních tlaků vlivem nerovností pracovních ploch břitu nástroje. Tvoří se bodové mikrosvary, které jsou následně vytrhávány i s částmi břitu nebo slouží jako základ pro tvorbu dalších nárůstků. Adhezní otěr vzniká především při použití nástrojových a rychlořezných ocelí. [12] [14]

Difuzní otěr

Zásadními činiteli vzniku jsou chemické vlastnosti materiálu nástroje a jeho afinita k materiálu obrobku. Vzniká při dosažení teplot, kdy se struktura kovu rozpadá na atomy schopné difuze. Difundující atomy přechází do mřížky kovu nástroje a tvoří nové chemické vazby a tuhé roztoky. Nově vzniklá struktura má horší vlastnosti, než původní struktura a dochází ke stírání této vrstvy. [12] [14]

Oxidace

Vznik podporuje vysoká teplota řezného procesu a přístup vzduchu z okolí. Následkem je vznik chemických sloučenin (oxidů) na povrchu nástroje, jenž je umožněn přítomností kyslíku a oxidace v okolním prostředí. Vzniklé oxidy mají u různých materiálů různé vlastnosti, proto jsou některé nástrojové materiály náchylnější k oxidačnímu opotřebení, než jiné. [1] [12]

1.4.1.2 Formy opotřebení

Opotřebení je obvykle doprovázeno úbytkem materiálu nástroje na čele nebo na hřbetě. Hodnocení opotřebení lze provádět přímo a nepřímo. [1]

Přímé hodnocení [1]:

- pomocí změn opotřebovaných rozměrů břitu v závislosti na čase,
- měřením hmotnostního úbytku nástroje.

Nepřímé hodnocení [1]:

- pomocí změny velikosti působících sil při obrábění,
- pomocí nárůstu výkonu, potřebnému k obrábění,
- podle změny teploty obrobku nebo nástroje,
- podle změny teploty a barvy třísek,
- podle změny tvaru třísek,
- pomocí výskytu ostřin na obráběných hranách,
- podle zhoršení opracování obrobeného povrchu,
- pomocí změn rozměrů obráběného dílce,
- pomocí zvýšení hlučnosti při obrábění,
- pomocí rozboru kmitání a chvění.

Opotřebení hřbetu

Jedná se o obvyklý žádoucí typ opotřebení (viz obr. 9), které je předvídatelné a kontrolovatelné. Řadí se k abrazivním formám opotřebení a má za následek zhoršení jakosti opracování obráběného povrchu, rozměrovou nepřesnost a zvyšující se tření. Nežádoucí je příliš rychlé opotřebení hřbetu. [5] [12]
Zvláštním typem je opotřebení hřbetu ve tvaru vrubu. Může být způsobeno adhezním opotřebením nebo oxidačním opotřebením. Vruby vznikají v místě kontaktu hřbetu s bokem třísky. Toto opotřebení ovlivňuje utváření třísky a může vést až k lomu břítu. [12]



Obr. 9 Opotřebení hřbetu [15].

Opotřebení čela

Opotřebení ve tvaru žlábků je důsledkem působení mechanismů difuzního a abrazivního otěru (viz obr. 10). V počáteční fázi vzniku může paradoxně dojít ke zlepšení utváření třísky. Avšak velké opotřebení ve tvaru žlábků mění geometrii břítu a utváření třísky ovlivňuje negativně. Může změnit směr působení řezných sil a také zeslabuje břit, což může vést až k vydrolování ostří. Snížit tendenci ke vzniku tohoto opotřebení lze volbou materiálu břítu s tvrdostí za tepla a malou afinitou k materiálu obrobku. [12] [15]



Obr. 10 Opotřebení čela [15].

Plastická deformace

Vzniká za působení vysokých tlaků a vysokých teplot. Často při obrábění materiálů, které špatně vedou teplo. Toto teplo se hromadí v nástroji a spolu s vysokým tlakem způsobí plastický stav povrchové vrstvy břitu. Opotřebení je způsobeno plynulým přemísťováním plasticky deformované vrstvy materiálu nástroje (viz obr. 11). Plastická deformace se může vyskytnout při obrábění všemi nástrojovými materiály po překročení určité teploty v místě řezu. Lze jí zmenšit volbou správného zaoblení špičky a volbou vhodné geometrie břitu. [12] [14]



Obr. 11 Plastická deformace břitu [15].

Teplotní hřebenovité trhliny na ostří

Jedná se o formu únavového opotřebení, jenž je způsobeno tepelnými šoky. Trhliny jsou kolmé k ostří a výrazně zvyšují riziko náhlého lomu břitu (viz obr. 12). Tato forma opotřebení se často vyskytuje při frézování a přerušovaném soustružení, často u operací s nepravidelným přívodem chladicí kapaliny. [12] [15]



Obr. 12 Teplotní trhliny [15].

Vydrolování ostří

Nejčastěji vzniká při přerušovaných řezech, kdy špičky zatížení způsobují oddělování drobných částech z povrchu břitu, následkem čehož dochází k vydrolování břitu (viz obr. 13). Může být také způsobeno vibrací obrobku, nástroje nebo vřetena obráběcího stroje. [12] [15]



Obr. 13 Vydrolování břitu [15].

Únavový lom

Bývá způsoben velkými změnami velikosti řezných sil. Vzniká vlivem součtu neustále se měnících různých zatížení, kdy jednotlivá zatížení nejsou dostatečně velká, aby došlo ke křehkému lomu. Lomové plochy bývají paralelně s ostřím. [12]

Lom břitu

Lom břitu je náhlou poruchou a je třeba ho v každém případě považovat za konec trvanlivosti břitu (viz obr. 14). Totální lom je velmi nebezpečný a mělo by se mu za všech okolností zabránit. Vzniká při přerušovaném řezu, při tepelných rázech, při okamžitém zvýšení řezného odporu vlivem tvrdého vměstku v obráběném materiálu nebo při přetížení břitu v ohybu. Často je způsoben volbou nedostatečně houževnatého materiálu břitu. [12] [14] [16]



Obr. 14 Lom břitu [15].

1.4.1.3 Kvantifikace opotřebení

Kvantifikace opotřebení břitu je prováděna pomocí rozměrových charakteristik vztažených k postupnému opotřebování břitu nástroje. K měření opotřebení jsou nejčastěji využívány mikroskopické přístroje. Nejčastěji se opotřebení břitu prezentuje jako závislost velikosti opotřebení na čase. Typický příklad charakteristiky průběhu závislosti průměrného opotřebení hřbetu VB (viz obr. 15) na čase t obsahuje tři oblasti (viz obr. 16) [12]:

- oblast zrychleného záběhového opotřebení (A),
- oblast lineárního opotřebení (B),
- oblast zrychleného nadměrného opotřebení (C).

Oblast zrychleného záběhového opotřebení - A

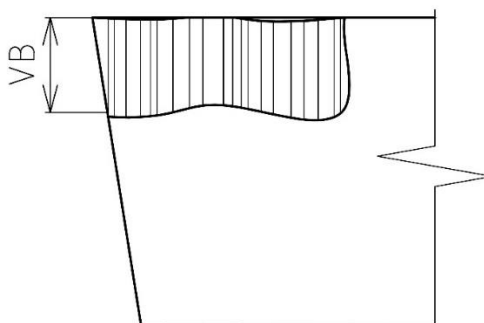
Obecně zrychlené opotřebení souvisí se záběhem nástroje, a bývá způsobeno vysokým měrným tlakem na vrcholcích mikronerovností na povrchu hřbetu nástroje [12].

Oblast lineárního opotřebení – B

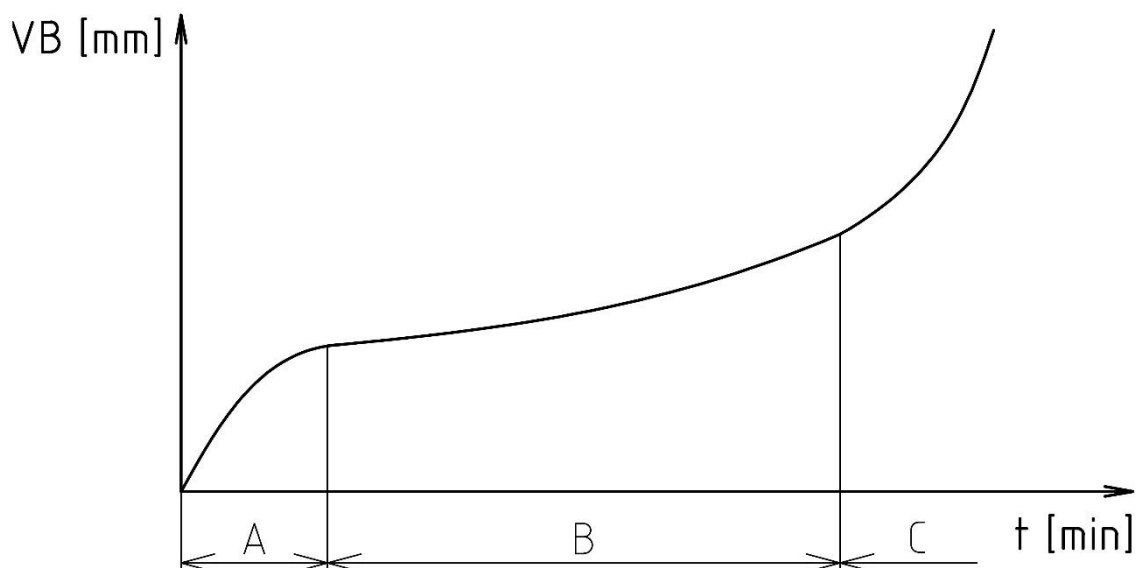
Zde dochází k lineárnímu nárůstu opotřebení, intenzita opotřebení je konstantní [12].

Oblast zrychleného nadměrného opotřebení – C

Počátek oblasti bývá spojován s limitní teplotou řezání a s výrazným poklesem tvrdosti řezného materiálu. Dochází zde ke zrychlenému opotřebení, tzv. lavinovému opotřebení [12].



Obr. 15 Průměrné opotřebení hřbetu VB [12].



Obr. 16 Charakteristika závislosti $VB = f(t)$ [12].

1.4.2 Trvanlivost a životnost nástroje

Trvanlivost nástroje je doba, po kterou je nástroj schopen efektivně plnit své požadované funkce. Překročení této doby se může projevit například výrazným zhoršením jakosti obrobené plochy, nestabilitou rozměrů obrobku, zhoršeným utvářením a odchodem třísky a v nejkrajnějším případě lomem břitu. V praxi se velice často trvanlivost vztahuje ke kritériu opotřebení břitu nástroje. Toto kritérium lze hodnotit z hlediska ekonomického a technologického. Ekonomické hledisko – je hodnoceno optimální otupení břitu z hlediska maximální životnosti nebo se vztahuje na podíl nákladů na nástroj k obrobení jednoho kusu. Technologické hledisko – břit je považován za otupený, pokud již nadále nedokáže obrábět danou plochu v požadované jakosti. [12]

Trvanlivost nástroje a jeho životnost mohou mít rozdílné hodnoty. Nástroje mohou být v některých případech obnovovány, např. přebroušením. Životnost takového nástroje je dána součtem trvanlivostí za celkovou dobu používání až k vyřazení nástroje. V případě neobnovovaných nástrojů je trvanlivost identická s životností nástroje. Trvanlivost i životnost jsou nejčastěji udávány jako čas řezného procesu v minutách nebo jako dráha řezu v metrech. [12] [16]

Trvanlivost břitu je značně závislá na používaných řezných podmínkách. Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti pro jinak konstantní podmínky lze popsat Taylorovým vztahem ve tvaru [12]:

$$T = C_T \cdot v_c^{-m} \quad (1.1)$$

přip.

$$v_c = C_v \cdot T^{-\frac{1}{m}} \quad (1.2)$$

kde

$$C_v = C_T^{\frac{1}{m}} \quad (1.3)$$

T – trvanlivost břítu [min]
 C_T – konstanta [-]
 v_c – řezná rychlost [m.min⁻¹]
 m – exponent [-]
 C_v – konstanta [-]

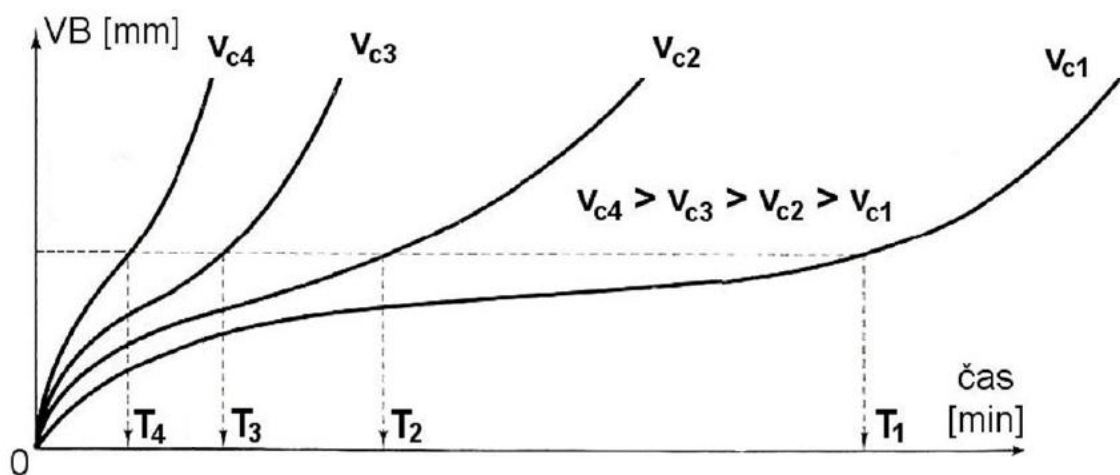
Konstanta C_T je závislá na materiálu nástroje a obrobku a může dosahovat hodnot $10^8 - 10^{12}$. [12]

Exponent m charakterizuje vlastnosti řezného nástroje a způsob obrábění, přičemž nabývá hodnot z tab. 1. [12]

Tab. 1 Hodnoty exponentu m pro různé řezné materiály [12].

Řezný materiál	Exponent m [-]
Nástrojové oceli	10 – 8
Rychlořezné oceli	8 – 5
Slinuté karbidy	5 – 2,5
Řezná keramika	2,5 – 1,5

Stanovení trvanlivosti břítu pro určité kritické opotřebení hřbetu VB je možné provést při zvolených řezných rychlostech. Nejjednodušší metodou je analýza křivek opotřebení (viz obr. 17). Tyto křivky lze využít nejen pro stanovení optimálních řezných podmínek, ale i pro stanovení dílčích účinků kvality břítu, řezného prostředí atd. na trvanlivost břítu. [1] [12]



Obr. 17 Závislost trvanlivosti břítu na velikosti řezné rychlosti [17].

1.5 Nanomateriály

Nanotechnologii lze definovat jako multidisciplinární a průřezovou technologii, jenž se zabývá praktickým využitím vlastností nanomateriálů pro konstrukci nových struktur, materiálů a zařízení. [18]

Nanověda může být definována jako studium hmoty na atomové a molekulové úrovni, kdy se vlastnosti výrazně liší od vlastností ve větších rozměrových škálách. [19]

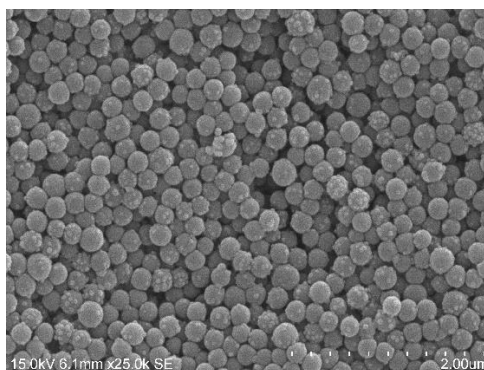
Nano je původem z řeckého slova nanos, což znamená v překladu trpaslík. Jako označení je užíváno písmeno n, které je zároveň i předponou v soustavě SI a odpovídá jedné miliardtině základní jednotky (10^{-9}). V nanotechnologiích jsou zásadní rozměry, které jsou udávány v nanometrech ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Velikost částic nebo struktur se pohybuje v intervalu 1 – 100 nm. Nazývají se nanostruktury a jsou základní stavební jednotkou nanomateriálů. [20]

1.5.1 Rozdělení nanoobjektů

Dle normy ISO lze třídit nanoobjekty podle počtů souřadnic, ve kterých má daná struktura rozměr 1 – 100 nm. [20]

0 dimenzionální nanoobjekty

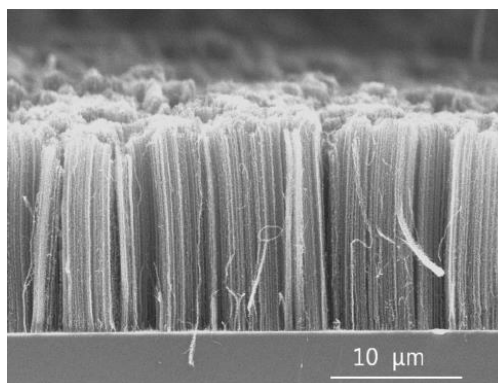
U těchto objektů jsou nanorozměry splněny ve všech třech osách souřadného systému. Obecně se jedná o nanočástice, např. nanočástice (viz obr. 18), nanopěny, kvantové tečky apod. [20]



Obr. 18 Nanočástice [21].

1 dimenziální nanoobjekty

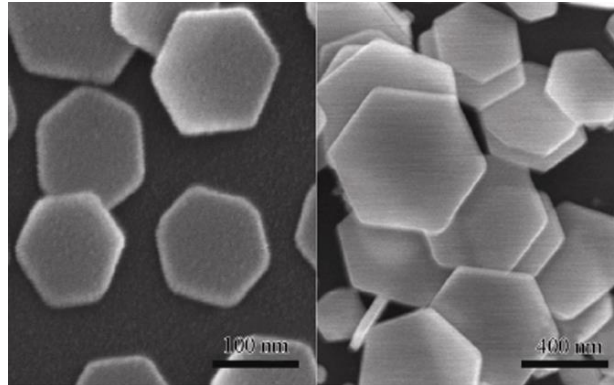
Zde jsou nanorozměry ve dvou osách souřadného systému. Obecně se jedná o nanovlákná, např. nanovlákná, nanopásky, nanotyče, nanotrubičky (viz obr. 19), kvantové drátky apod. [20]



Obr. 19 Nanotrubičky [22].

2 dimenziální nanoobjekty

Nanorozměry jsou v tomto případě pouze v jedné ose souřadného systému. Obecně se jedná o nanodesky (viz obr. 20), např. tenké vrstvy, nanostěny, kvantové jámy, deskové nanokrystaly apod. [20]



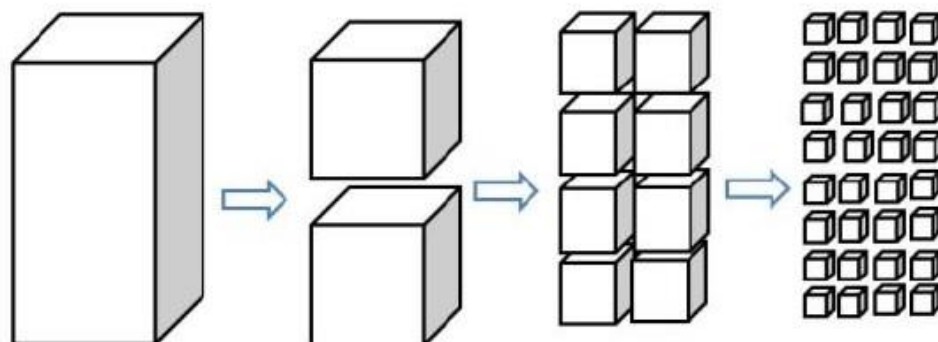
Obr. 20 Nanodesky [23].

Dále lze nanoobjekty třídit podle dalších kritérií. Například podle vzniku na úmyslně vyrobené a neúmyslně vyrobené nebo v případě materiálů, které obsahují nanoobjekty na nanokompozity a nanotekutiny. [20]

1.5.2 Vlastnosti nanomateriálů

Nanomateriály mohou mít velmi odlišné, či přímo opačné vlastnosti v porovnání se stejným materiálem v makorozměrech. Při dosažení nanorozměrů se mění vlastnosti jako elektrická vodivost, barva, pevnost. Není však možné stanovit univerzální velikost nanorozměrů, kdy k těmto změnám dochází, u každého materiálu je to individuální a každá z vlastností se navíc mění při dosažení jiných nanorozměrů. [20]

Fyzikální a chemické vlastnosti jsou velice závislé na vlastnostech povrchu materiálu. Povrch plní řadu funkcí, jako například umožnění toku látky přes rozhraní, vyvolání nebo utlumení chemických reakcí apod. V případě, že je materiál rozdělen na shluk jednotlivých nanočástic, tak jeho objem zůstane stejný, ale celkový povrch částic významně vzroste (viz obr. 21). [20]



Obr. 21 Změna velikosti plochy při zmenšujících se rozměrech [20].

1.5.3 Metody výroby nanomateriálů

Top-down metody

Nanoobjekty se vytváří zmenšováním struktury již existujícího materiálu. Metody často vychází z technologie pro výrobu polovodičových struktur na křemíkových a germaniových substrátech a společně jsou nazývány jako metody litografické. Principem těchto metod (viz obr. 21) je přenos obrazu z masky na připravený substrát. [20]

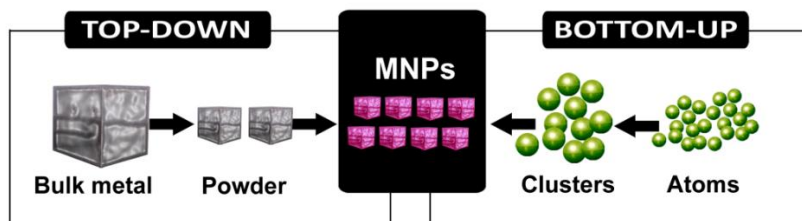
Litografický proces se skládá ze tří částí [20]:

1. substrát je pokryt citlivou polymerní vrstvou (tzv. rezist),
2. polymerní vrstva (rezist) je vystavena světelnému, elektronovému nebo iontovému svazku,
3. vyvolání rezistu, což je selektivní odstranění buď exponovaných, nebo neexponovaných oblastí rezistu.

Bottom-up metody

Nanoobjekty jsou postupně skládány z jednotlivých atomů (viz obr. 22). Tyto metody lze dělit na syntézy nanočástic z plynné fáze (syntéza v plazmě, chemická depozice CVD apod.) nebo z kapalně fáze (sol-gel procesy, samoorganizace apod.). Nanomateriál je vždy vytvářen pomocí řízeného výrobního postupu, jenž začíná od jednotlivých atomů či molekul. [20]

Veškeré přírodní materiály (organické i anorganické) jsou vytvářeny procesem samoorganizace, kdy se samostatné dílčí jednotky automaticky organizují do stabilních, přesně vymezených struktur pomocí nekovalentních interakcí. Proces je řízen informacemi, které jsou zakódovány přímo v dílčích jednotkách. Samoorganizace může probíhat buď spontánně (dosažením termodynamického stavu s minimální energií), nebo chemicky (podmíněné chemickými vazbami amfifilních organických molekul). Samoorganizace probíhá většinou v kapalném prostředí nebo na rovných površích substrátu. [20]



Obr. 22 Výrobní metody nanomateriálů [24].

1.5.4 Využití nanomateriálů

Nanomateriály lze úspěšně aplikovat v mnoha různých odvětvích. Častým využitím nanomateriálů jsou především nanočástice ve formě prášku, např. v kosmetice při výrobě krémů (ZrO_2 , TiO_2), rtěnek a líčidel (Fe_2O_3), dále při výrobě zatmavených skel (TiO_2). Díky katalytickým vlastnostem nanoprášku Fe_2O_3 je možnost využití v raketovém a vojenském průmyslu nebo v automobilovém průmyslu (výroba airbagů). Další využití je např. v lékařství při filtrování a detoxikaci tekutin nebo krve. [18] [19]

Nanočástice jsou také využívány pro leštění optických materiálů a elektronických substrátů (Si, GaAs). Nanočástice brusných materiálů (např. diamant, karbid bóru) lze použít při lapování součástí. [18]

Velice významné využití nanomateriálů je v oblasti informačních technologií, např. při výrobě tranzistorů a čtecích hlav harddisků. [18]

2 Shrnutí poznatků o kvalitě povrchu po obrábění. Definice pojmu drsnost povrchu, metody měření drsnosti povrchu

2.1 Integrita povrchu

Integritou povrchu je nazýván soubor vlastností povrchové vrstvy, jenž byla změněna některým technologickým procesem a má odlišné vlastnosti v porovnání se základním materiálem. Mezi tyto vlastnosti patří [25] [26]:

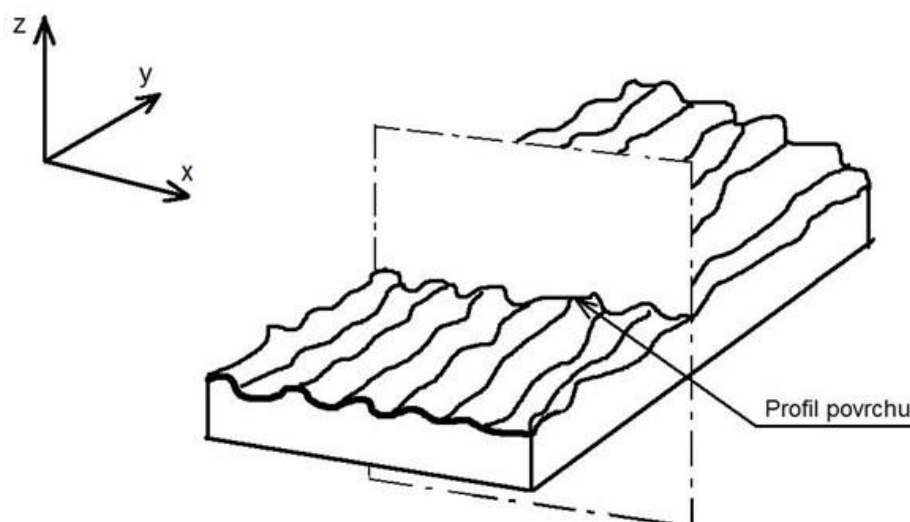
- plastické deformace,
- strukturní změny,
- zpevnění,
- zbytková napětí,
- tvrdost,
- přesnost,
- drsnost povrchu aj.

2.2 Struktura povrchu

Na drsnosti povrchu do určité míry závisí přesnost chodu některých strojních součástí, jejich hlučnost, elektrická vodivost, únavová pevnost, doba záběru a mnoho dalších vlastností. Pro vyhodnocování struktury povrchu jsou dle normy ČSN EN ISO 4287 vyhodnocovány tři základní geometrické parametry [25] [27]:

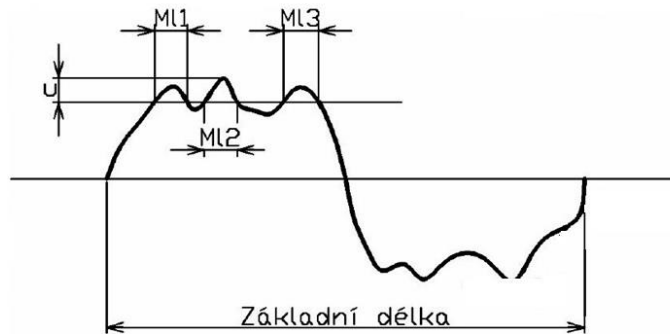
- R – parametr vypočítaný z drsnosti povrchu,
- W – parametr vypočítaný z profilu vlnitosti,
- P – parametr vypočítaný ze základního profilu.

Většina měřicí techniky neumožňuje vyhodnotit drsnost na celé ploše, ale pouze na řezu kolmém k základnímu povrchu (obr. 23). V rovině tohoto řezu je získán profil, jenž je základním zdrojem informací pro posuzování struktury povrchu. [25]



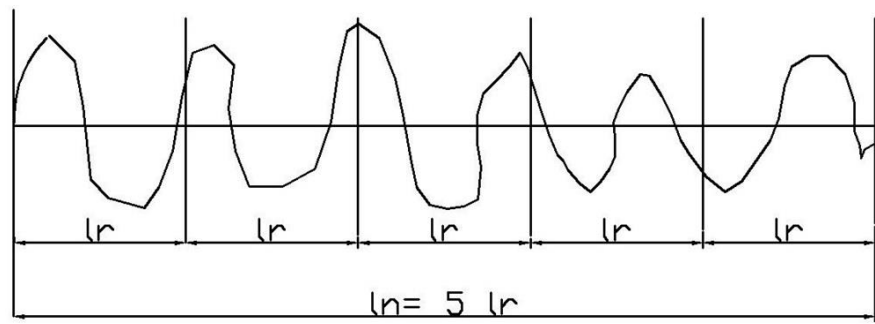
Obr. 23 Profil povrchu [28].

Základní délka l_r (viz obr. 24) je délka ve směru osy x , která je použita pro rozpoznání nerovnosti charakterizující vyhodnocovaný profil. [28]



Obr. 24 Základní délka [28].

Vyhodnocovaná délka l_n (viz obr. 25) je délka ve směru osy x používaná pro posouzení vyhodnocovaného profilu a může obsahovat jednu i více základních délek. Pro parametr drsnosti R obsahuje standardně pět základních délek l_r , pro případ jiného počtu se musí předepsat. [25] [28]

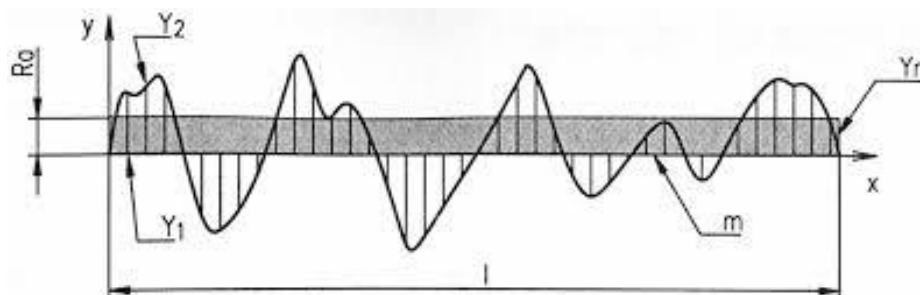


Obr. 25 Vyhodnocovaná délka [28].

Nejrůznějších parametrů drsnosti povrchu je velké množství. Následující parametry jsou předmětem experimentální části této práce.

2.2.1 Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a

Parametr drsnosti R_a (viz obr. 26) je definován jako aritmetický průměr absolutních hodnot $Y(x)$ v rozsahu základní délky. Výsledná hodnota (získána pomocí vztahu 2.1) nemá dostatečnou vypovídající hodnotu, jelikož parametr drsnosti R_a nedokáže citlivě reagovat na extrémní výšky a hloubky měřeného profilu. [2] [27]

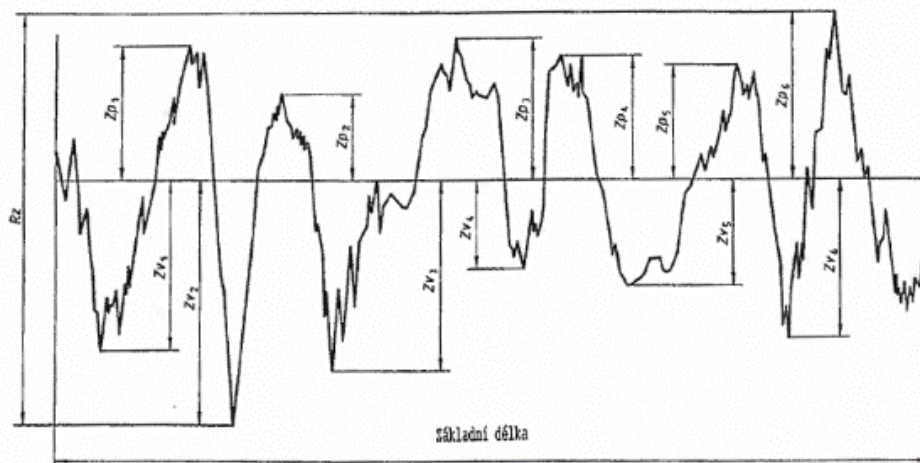


Obr. 26 Parametr drsnosti R_a [29].

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Y(x)| dx \quad (2.1)$$

2.2.2 Největší výška profilu Rz

Parametr drsnosti Rz (viz obr. 27) je definován jako součet největší výšky profilu Zp a největší hloubky profilu Zv v rozsahu základní délky. [27]

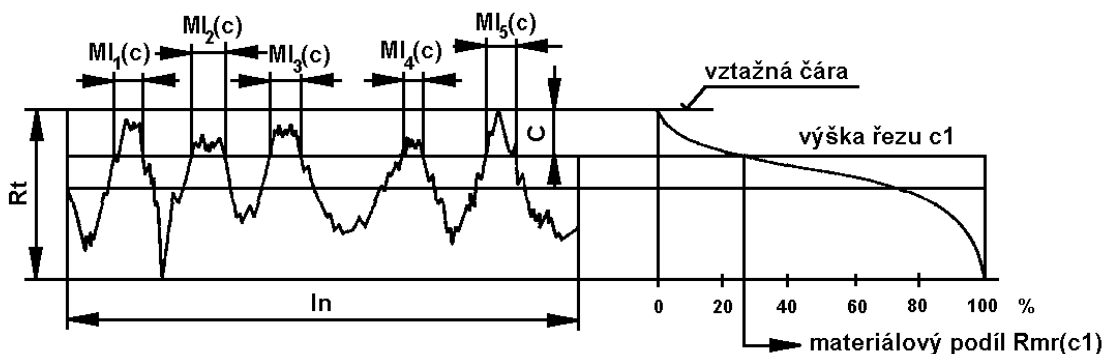


Obr. 27 Parametr drsnosti Rz [30].

2.2.3 Nosný podíl materiálu Rmr(c)

Parametr Rmr(c) (viz obr. 28) je definován jako procentuální podíl délky prvků MI(c) na dané úrovni c k vyhodnocované délce ln a lze ho zapsat vztahem 2.2. Křivka materiálového poměru (tzv. nosná křivka) představuje materiálový poměr profilu v závislosti na výšce úrovně. [25] [30]

$$Rmr(c) = \frac{100}{ln} \sum_{i=1}^m MI_i(c) = \frac{MI(c)}{ln} [\%] \quad (2.2)$$



Obr. 28 Nosný podíl materiálu Rmr(c) [31].

2.3 Metody měření drsnosti povrchu

Pro měření parametrů drsnosti lze využít několik různých metod.

2.3.1 Porovnání s etalony drsnosti

Přesnost této metody je velice nízká. Metoda porovnávání drsnosti povrchu obrobku s drsností etalonů (viz obr. 29) může být prováděna pouhým okem nebo pomocí mikroskopu či optického komparátoru. Je však nutné dodržet tyto podmínky [31]:

- materiál etalonu a obrobku by měl být pokud možno stejný (alespoň co se týče barvy),
- tvar etalonu a zkoumané součásti by měl být stejný (plochý, vydutý apod.),
- povrch etalonu i součásti musí být získán stejnou technologií obrábění (soustružení, frézování apod.),
- musí být dodrženy stejné podmínky pozorování (osvětlení).



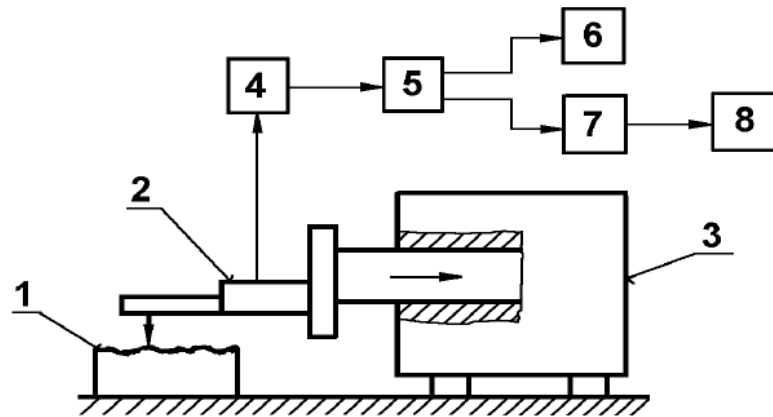
Obr. 29 Etalon pro porovnání drsnosti [32].

2.3.2 Dotykové profilometry

Dotyková metoda měření drsnosti umožňuje zjišťovat číselné hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti a lze ji využít k nejmodernějším statistickým a spektrálním hodnocením nerovností povrchů. [31]

Profilometr je složen z mechanické a elektronické části (viz obr. 30). V mechanické části je obsažen stolek pro umístění měřené součásti, rameno se snímacím hrotem. Hrot se pohybuje konstantní rychlostí po povrchu součásti a snímá nerovnosti. Pohyb ramena bývá nejčastěji zajištěn prostřednictvím elektromotoru. [31]

Elektronická část transformuje mechanický signál získaný pomocí snímacího hrotu na elektrický signál, jenž je dále zpracován na číselnou hodnotu příslušného parametru drsnosti, případně na grafický záznam nerovností na povrchu součásti. [31]

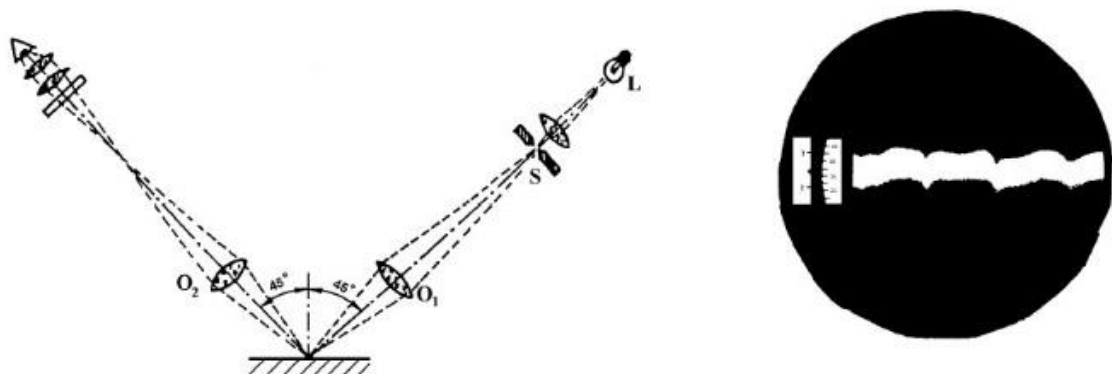


Obr. 30 Dotykový profilometr [31].

- 1 Měřená součást,
- 2 snímací hlavice s měřícím hrotem,
- 3 posuvový mechanismus,
- 4 zesilovač,
- 5 filtr,
- 6 registrační jednotka,
- 7 jednotka pro zpracování měřícího signálu,
- 8 zobrazovací jednotka.

2.3.3 Metoda světelného řezu

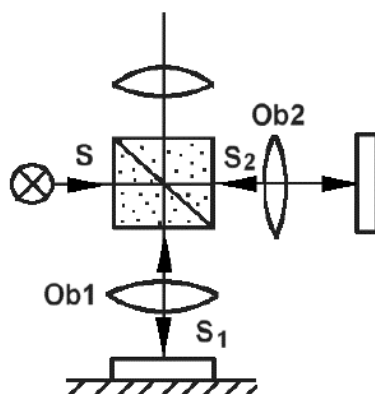
Pro měření touto metodou je nejčastěji využíván dvojitý mikroskop Schmalz. Rovnoběžný svazek paprsků, který je omezen štěrbinou ve tvaru velice tenké světelné roviny a je promítán pod úhlem 45° na měřený povrch. Nerovnostmi zkoumaného povrchu vznikne obraz profilu šikmého řezu nerovnosti plochy. Obraz má většinou tvar světlezelené stužky na tmavém pozadí mikroskopického obrazu (viz obr. 31). [31]



Obr. 31 Princip metody a výsledný mikroskopický obraz [31].

2.3.4 Metoda využití interference světla

K měření touto metodou je využíván klasický interferenční mikroskop. Princip metody je na obr. 32. [31]



Obr. 32 Měření drsnosti interferenčním mikroskopem [31].

Světelný paprsek S jde ze zdroje světla na polopropustné zrcadlo vytvořené ve skleněném hranolu, kde je rozdělen na dva dílčí paprsky. Paprsek S1 dopadne na povrch měřené součásti a odrazí se zpět, paprsek S2 jde na odrazné zrcadlo a také se odráží zpět. Odražené paprsky S1 a S2 se spojí (interferují) a jdou dále do okuláru mikroskopu, kde je možné sledovat vzniklé interferenční proužky. [31]

Pokud je povrch ideálně rovný, tak jsou viditelné stejnoměrné rovnoběžné proužky, pokud je však na povrchu rýha, projeví se na interferenčním obraze vychýlení proužků (viz obr. 33). [31]



Obr. 33 Interferenční obraz v okuláru mikroskopu [31].

Vzdálenost proužků odpovídá změně klínové vrstvy o $\lambda/2$ při kolmém dopadu světla a velice malém úhlu klínu. Pokud známe vychýlení proužků ΔL a vzdálenost interferenčních proužků L , pak je možné velikost nerovnosti vypočítat podle vztahu 2.3. [31]

$$R = \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2.3)$$

kde

R – parametr drsnosti [μm]

L – vzdálenost interferenčních proužků [μm]

ΔL – vychýlení interferenčních proužků [μm]

λ – změna klínové vrstvy [μm]

3 Navržení metodiky zkoumání trvanlivosti nástroje a drsnosti povrchu při soustružení v laboratoři KOM FS TUL

Cílem experimentu bylo zjištění vlivu nanočástic v procesních kapalinách na trvanlivost břitu nástroje a vliv na kvalitu obrobeného povrchu při soustružení antikorozi oceli 1.4404. Nástroje, obráběný materiál i čisté procesní kapaliny byly dodány zadavatelem. Experiment byl realizován v laboratoři třískových technologií a procesů na Fakultě strojní TU v Liberci.

Procesní kapaliny s nanočásticemi jsou v současnosti ve fázi vývoje. Vystává zde několik zásadních problémů, nejen s trvanlivostí břitu nástroje a vlivu na kvalitu obrobeného povrchu, ale také především s usazováním nanočástic na dno ve chvíli, kdy neprobíhá obrábění a je vypnuté čerpadlo chlazení. Proto byly v experimentu použity kromě standardních nanočástic SiO₂ také nanočástice SiO₂ s polymerizovaným obalem, které měly tento problém vyřešit.

3.1 Obráběný materiál

Obráběným materiálem použitým v experimentu byla antikorozi ocel 1.4404. Jde o Cr – Ni – Mo austenitickou antikorozi ocel, značky X2CrNiMo17-12-2. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou obsaženy v tab. 2 a tab. 3. Tento materiál byl zvolen a dodán zadavatelem experimentu. [33]

Pro potřeby experimentu bylo dodáno:

- 1 ks tyče o průměru 170 mm v délce 750 mm,
- 1 ks tyče o průměru 40 mm v délce 1 000 mm.

Tab. 2 Chemické složení oceli 1.4404 [hm. %] [33].

C	Si	Mn	P	S
max. 0,03	max. 1	max. 2	max. 0,045	max. 0,015
Cr	Ni	Mo	N	
16,5 – 18,5	10 - 13	2 – 2,5	max. 0,11	

Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli 1.4404 po rozpouštěcím žíhání [33].

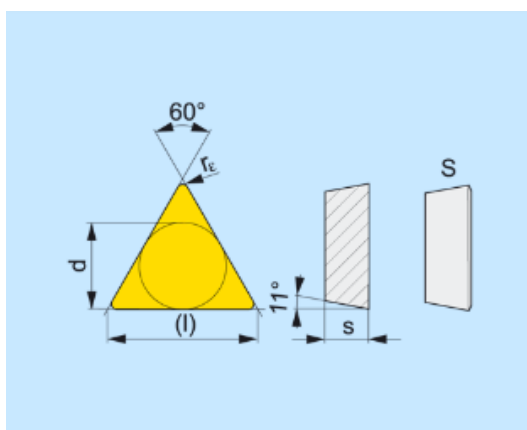
Rozměr [mm]	Mez pevnosti R _m [MPa]	Tažnost A [%]	Modul pružnosti E [MPa]
≤ 75	520 – 670	45	200
161 - 250	500 - 700	30	200

3.2 Použitý soustružnický nástroj

Jako nástroj byla v experimentu použita povlakovaná vyměnitelná břitová destička tvaru T se třemi břity, velikosti 16 (viz obr. 34). Tato destička byla osazena na držák stranového uběracího nože CTAPR 20x20 K16 (viz obr. 35). Nástrojový úhel nastavení odpovídá $\kappa_r = 90^\circ$. Doporučené řezné podmínky jsou obsaženy v tab. 4. Vyměnitelná břitová destička byla zvolena a dodána zadavatelem experimentu.

Pro potřeby experimentu bylo dodáno:

- 20 ks vyměnitelných břitových destiček Pramet TPUN 160304; 8230.



Obr. 34 Vyměnitelná břitová destička TPUN a její rozměry [34]:

$$\begin{aligned} d &= 9,525 \text{ mm} \\ s &= 3,18 \text{ mm} \\ (l) &= 16,5 \text{ mm} \\ r_\epsilon &= 0,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

Tab. 4 Doporučené řezné podmínky [34].

f [mm]	a_p [mm]	Startovní v_c [m.min ⁻¹]
0,1 – 0,6	0,4 – 17,5	200



Obr. 35 Držák Narex CTAPR [35].

3.3 Strojní vybavení

Při experimentu, kdy byl zjišťován vliv nanočástic v procesních kapalinách na trvanlivost nástroje byl využit CNC soustruh CHEVALIER FCL-2140F (viz obr. 36) s řídicím systémem FAGOR 8055.



Obr. 36 CNC soustruh CHEVALIER FCL-2140F

Pro experiment, jehož cílem bylo zjistit vliv nanočástic v procesních kapalinách na drsnost obroběných ploch, byl použit univerzální hrotový soustruh SU 50/1500 (viz obr. 37).



Obr. 37 Univerzální hrotový soustruh SU 50/1500.

3.4 Příprava procesních kapalin

Pro potřeby experimentů byly využity dva typy procesních kapalin, a to Vasco 6 000 a Blasocut BC 25MD a z nich bylo připraveno celkem šest různých variant procesních kapalin:

1. Vasco 6 000 bez nanočástic,
2. Vasco 6 000 + nanočástice SiO₂,
3. Vasco 6 000 + nanočástice SiO₂ a polymerizovaný obal PEG,
4. Blasocut BC 25MD bez nanočástic,
5. Blasocut BC 25MD + nanočástice SiO₂,
6. Blasocut BC 25MD + nanočástice SiO₂ a polymerizovaný obal PEG.

Dle pokynů zadavatele byly všechny procesní kapaliny namíchaný s vodou v koncentraci 10%. K namíchání posloužilo směšovací zařízení zapůjčené dodavatelem procesních kapalin (viz obr. 38). Pro kontrolu koncentrace byl využit refraktometr BRIX 0 – 18% ATC (viz obr. 39). Hodnota refraktometru byla vypočítána pomocí vztahu 3.1 s výsledkem 10 %.

$$r = \frac{c}{K} \quad (3.1)$$

K – refrakční faktor [-]
c – požadovaná koncentrace [%]
r – hodnota na refraktometru [%]

Refrakční faktor, udávaný výrobcem, je pro obě testované procesní kapaliny stejný a je roven hodnotě 1.

$$r = \frac{c}{K} = \frac{10}{1} = 10 \%$$



Obr. 38 Směšovací zařízení.

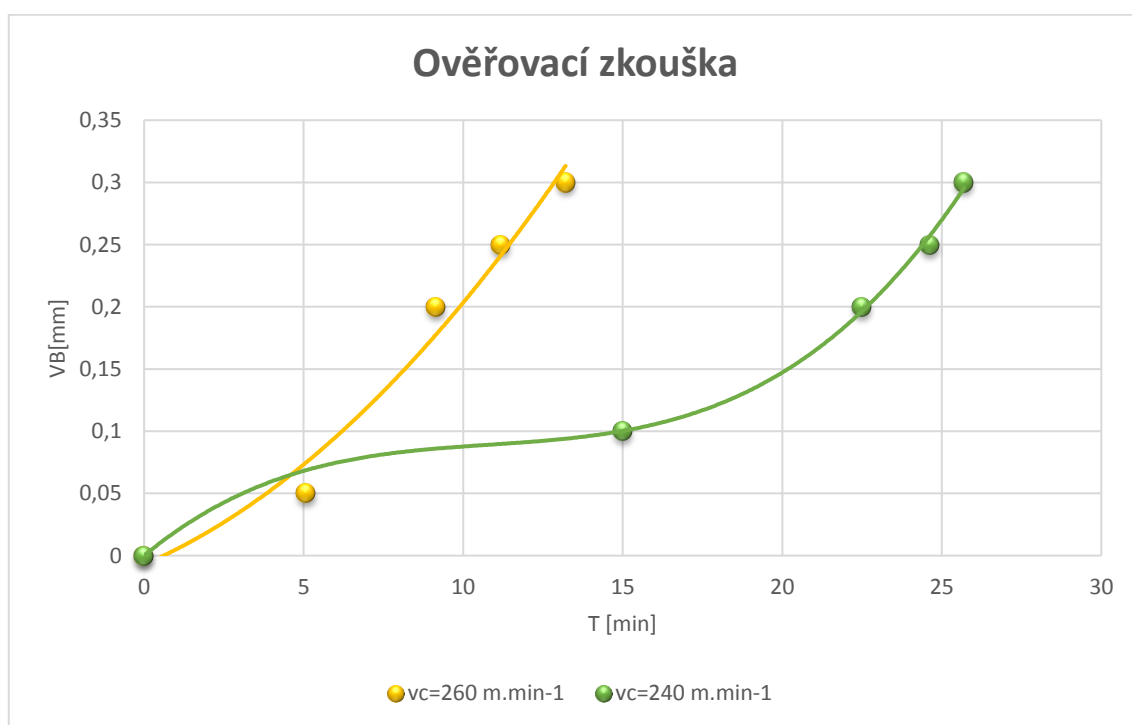


Obr. 39 Refraktometr BRIX 0 – 18% ATC [5].

3.5 Metoda zkoumání trvanlivosti nástroje

Pro experiment, jehož cílem bylo zjištění vlivu nanočástic v procesních kapalinách na trvanlivost nástroje byl použit CNC soustruh CHEVALIER FCL-2140F. Pro stanovení optimálních řezných podmínek bylo nutné provést ověřovací zkoušku trvanlivosti nástroje při podélném soustružení tyče z antikorozi oceli 1.4404. Cílem této zkoušky bylo především zjištění konkrétní řezné rychlosti, při níž bude trvanlivost nástroje pro potřeby experimentu dostatečná (viz graf 1) a zároveň bude možné jednoznačně stanovit rozdíly v trvanlivosti nástroje při využití jednotlivých procesních kapalin.

Pro realizaci experimentu byly po provedení ověřovacích zkoušek nastaveny řezné parametry obsažené v tab. 5.



Graf 1 Ověřovací zkoušky pro zjištění optimální řezné rychlosti.

Tab. 5 Řezné parametry použité pro zjištění trvanlivosti řezného nástroje.

Řezný parametr	Hodnota
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	240
Posuv na otáčku f [mm]	0,1
Hloubka záběru a_p [mm]	0,5

Při prvním testu trvanlivosti nástroje u každé varianty procesní kapaliny bylo experimentálně stanoveno počáteční opotřebení. Po dosažení počátečního opotřebení probíhalo hodnocení opotřebení břitu v intervalu obrábění 2 – 5 minut. K hodnocení šířky opotřebení na hřbetu VB každé vyměnitelné břitové destičky byla použita lupa Brinell (viz obr. 40). Kritériem opotřebení byla zvolena šířka opotřebení na hřbetu $VB_{KR} = 0,3$ mm.



Obr. 40 Brinellova lupa [5].

Soustružení při experimentu probíhalo za konstantních řezných podmínek. Případná tříška byla z prostoru obrábění odstraňována v délkových intervalech soustružení 50 mm, aby byl zajištěn maximální přístup řezných kapalin do místa řezu (viz obr. 41). Pro každou variantu procesní kapaliny bylo soustružení zopakováno celkem pětkrát. V případě zjištění extrémní odchylky trvanlivosti břitu nástroje nebyla tato hodnota dále použita a zkouška byla zopakována. Tím bylo zamezeno náhodnému výkyvu naměřených hodnot a ovlivnění výsledné průměrné trvanlivosti břitu nástroje. Naměřené hodnoty byly dále statisticky zpracovány.

Po ukončení zkoušky každé z variant procesní kapaliny byl stroj pečlivě vyčištěn a vypláchnut čistou vodou, aby nedošlo k ovlivnění zkoušky následující.



Obr. 41 Odstraňování třísky po jednom intervalu soustružení v délce 50 mm.

3.6 Metoda zkoumání drsnosti povrchu po soustružení

Pro experiment na zjištění vlivu nanočástic v procesních kapalinách na drsnost obrobenej plochy byl použit univerzální hrotový soustruh SU 50/1 500. Řezné parametry využitě v experimentu jsou obsaženy v tab. 6.

Tab. 6 Řezné parametry pro zkoumání drsnosti obrobenej plochy.

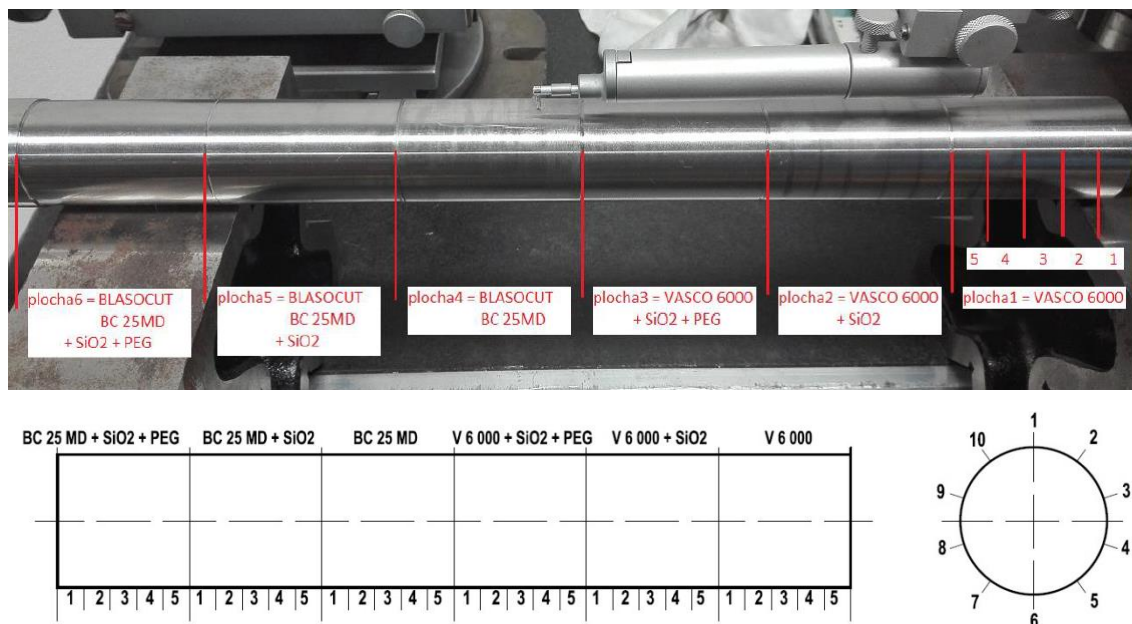
Řezný parametr	Hodnota
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	33,5
Posuv na otáčku f [mm]	0,1
Hloubka záběru a_p [mm]	0,5

Nízká řezná rychlost v experimentu byla zvolena záměrně z důvodu eliminace vlivu případného opotřebení vyměnitelné břitové destičky v průběhu soustružení. Pro každou variantu procesní kapaliny bylo provedeno soustružení plochy o délce 60 mm (viz obr. 42). Vždy, po změně procesní kapaliny, proběhla také výměna břitové destičky. Tím byly zaručeny stejné vstupní podmínky pro všech šest zkoušek.



Obr. 42 Soustružení vzorku na hrotovém soustruhu SU 50/1 500.

Každá z šesti ploch byla dále pomyslně rozdělena na pět stejně dlouhých úseků, na nichž bylo rovnoměrně po obvodu provedeno vždy celkem deset měření (viz obr. 43). Z toho vyplývá, že výsledný celkový počet měření pro každou z variant procesních kapalin je roven 50. Celkový počet měření pro všech šest variant procesních kapalin je roven počtu 300.



Obr. 43 Schéma měření drsnosti na vzorku z experimentu.

Pro měření byla využita dotyková metoda prostřednictvím hrotového laboratorního přístroje Mitutoyo Surftest 2 000 – SV s úhlem hrotu 90° a se zaoblením špičky 5 μm (viz obr. 44). Délka snímané plochy byla nastavena na 4,8 mm, přičemž délka vyhodnocované vzdálenosti byla 4 mm. Měření probíhalo za stálých laboratorních podmínek při teplotě 25°C, vlhkosti okolního vzduchu 32 % a atmosférickém tlaku 1027 hPA.

Vyhodnocovány byly celkem tři parametry drsnosti obrobené plochy, a to průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu Ra, největší výška profilu Rz a jeden nenormovaný parametr padesátiprocentní nosný podíl posuzovaného profilu CPT50. Parametr CPT50 odpovídá hloubce, kde je výsledný podíl materiálu a vzduchu 1:1.



Obr. 44 Laboratorní měřicí přístroj Mitutoyo Surftest 2 000 – SV.

4 Zjištění vlivu nanočástic v procesních kapalinách na trvanlivost nástroje a kvalitu povrchu při soustružení v laboratořích KOM FS TUL

4.1 Vliv nanočástic v PK na trvanlivost nástroje

Výsledné hodnoty dosažení kritéria šířky opotřebení hřbetu $VB = 0,3$ mm u použitých vyměnitelných břitových destiček vůči trvanlivosti nástroje pro jednotlivé varianty procesních kapalin jsou zobrazeny v grafech 2 - 7.

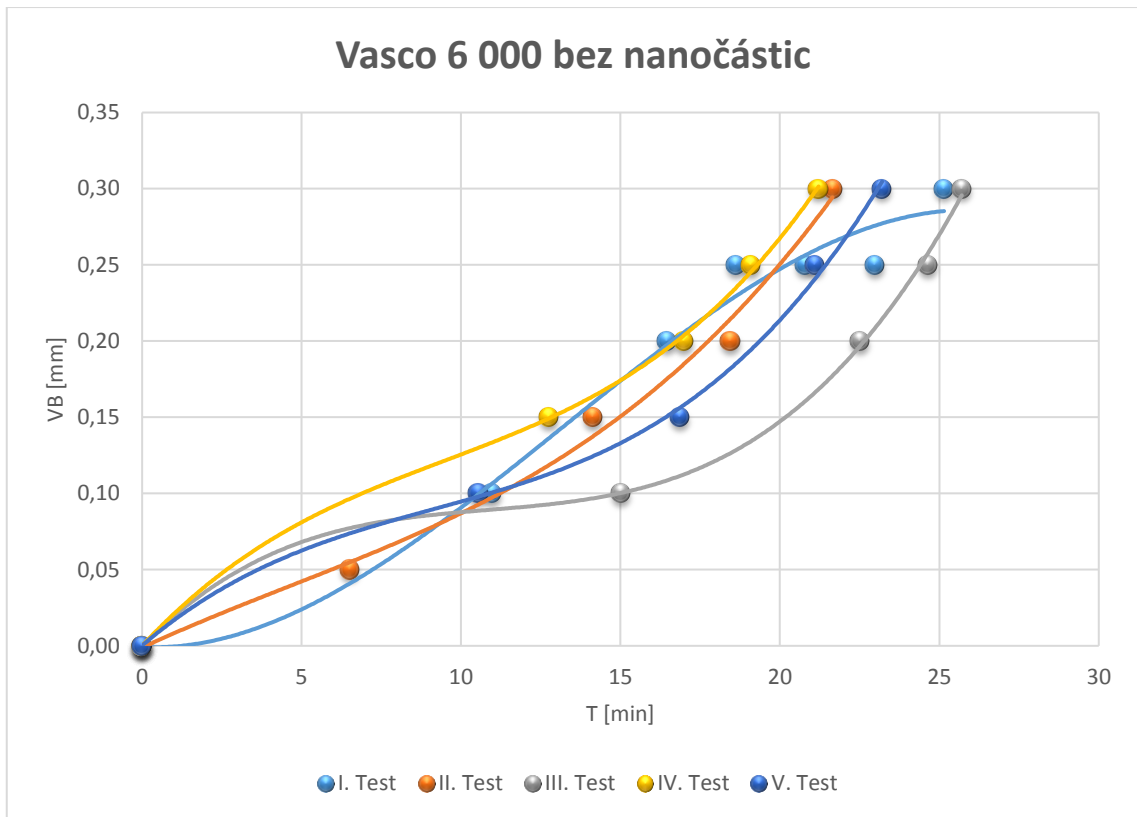
Výsledné naměřené průměrné hodnoty trvanlivosti břitu nástroje a délky soustružení pro procesní kapalinu Vasco 6 000 jsou obsaženy v tab. 7 a pro procesní kapalinu Blasocut BC 25MD v tab. 8.

Tab. 7 Naměřené hodnoty trvanlivosti břitu při použití Vasco 6000.

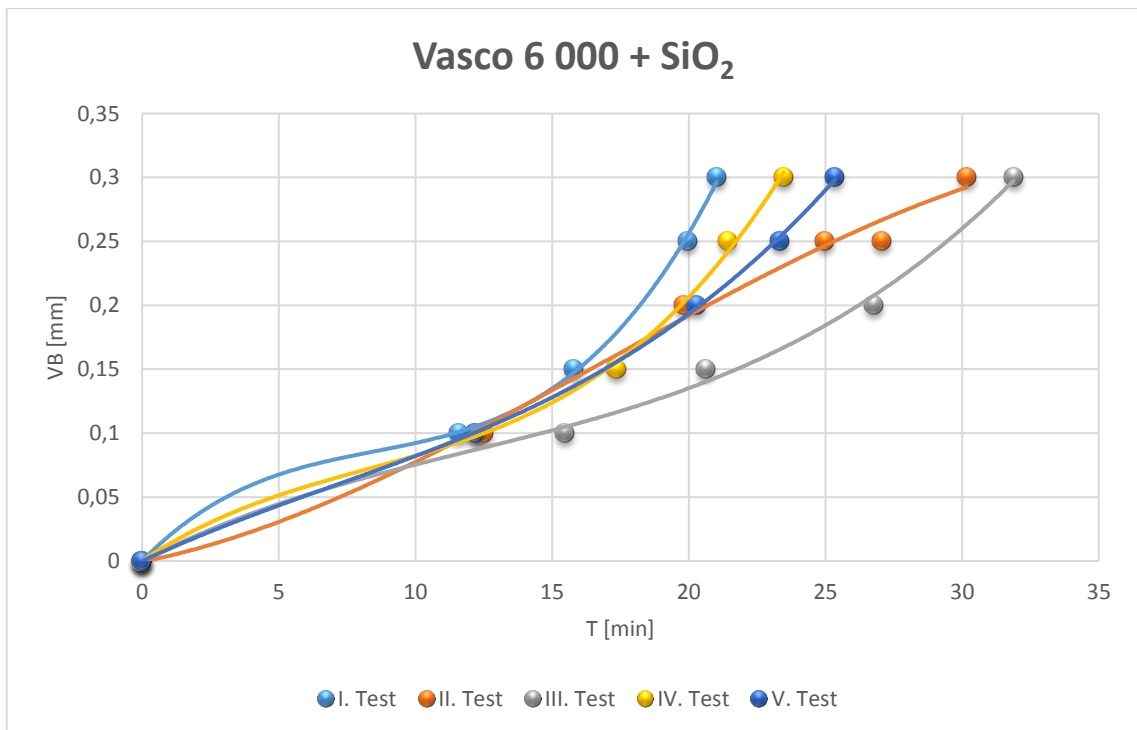
Měření	Vasco 6000 bez nanočástic		Vasco 6000 + SiO ₂		Vasco 6000 + SiO ₂ a PEG	
	L [mm]	T [min]	L [mm]	T [min]	L [mm]	T [min]
1	1 150	25,15	1 000	21,02	850	17,42
2	1 000	21,69	1 450	30,17	850	17,12
3	1 200	25,71	1 550	31,89	950	18,96
4	1 000	21,21	1 150	23,47	800	15,89
5	1 100	23,21	1 250	25,35	900	17,75
Průměr	1 090	23,4	1 280	26,4	870	17,4

Tab. 8 Naměřené hodnoty trvanlivosti břitu při použití Blasocut BC 25MD

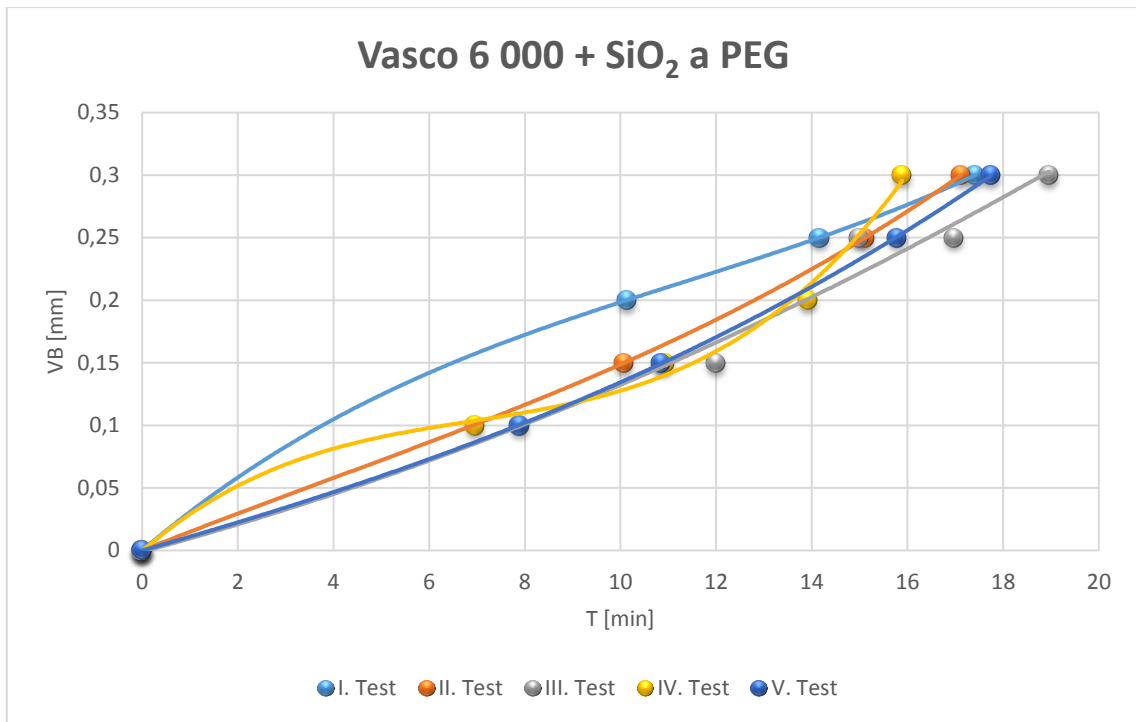
Měření	Blasocut BC 25MD bez nanočástic		Blasocut BC 25MD + SiO ₂		Blasocut BC 25MD + SiO ₂ a PEG	
	L [mm]	T [min]	L [mm]	T [min]	L [mm]	T [min]
1	950	18,63	1 150	21,51	1 150	20,19
2	800	15,53	1 250	23,08	850	14,85
3	950	18,30	1 500	27,38	750	12,92
4	1 000	19,08	1 000	18,1	750	12,82
5	900	16,98	1 200	21,36	850	14,53
Průměr	920	17,7	1 220	22,3	870	15,1



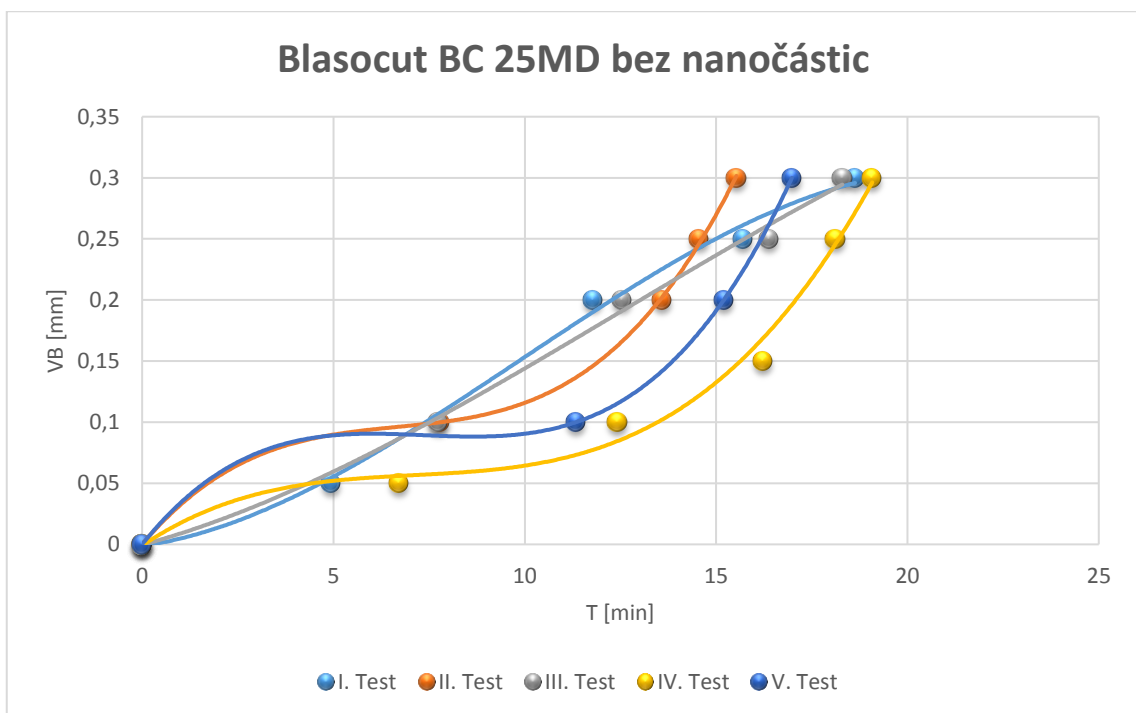
Graf 2 Varianta procesní kapaliny Vasco 6 000 bez nanočástic.



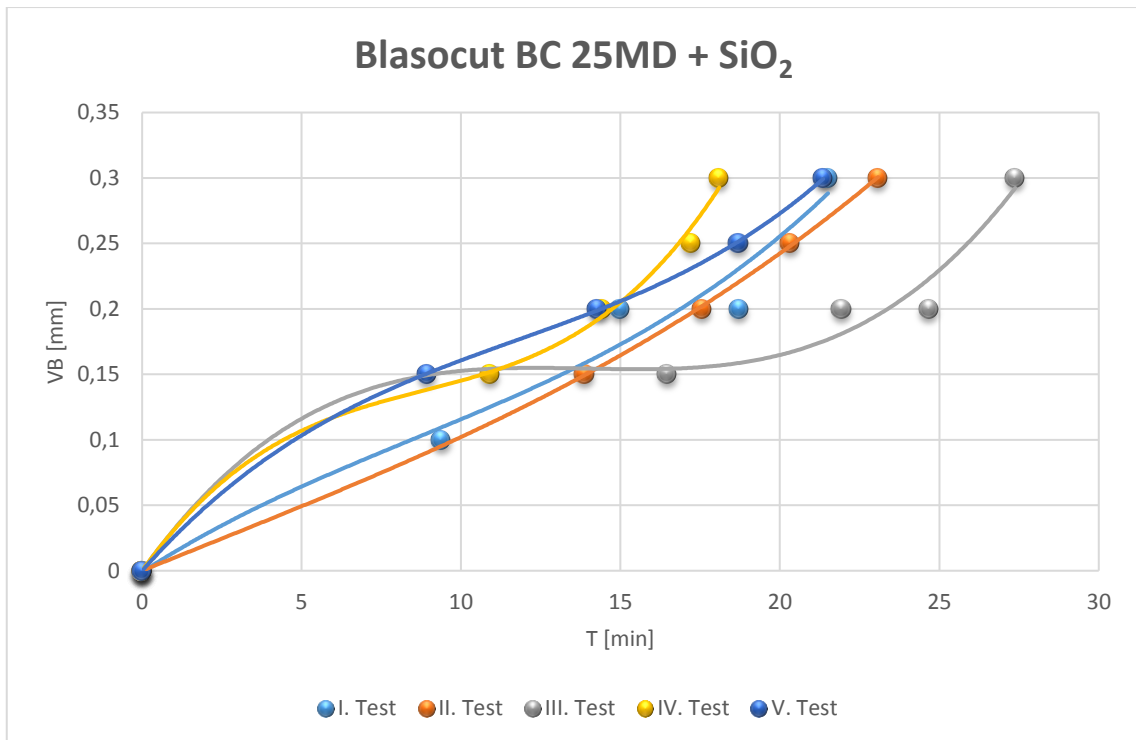
Graf 3 Varianta procesní kapaliny Vasco 6 000 + SiO₂.



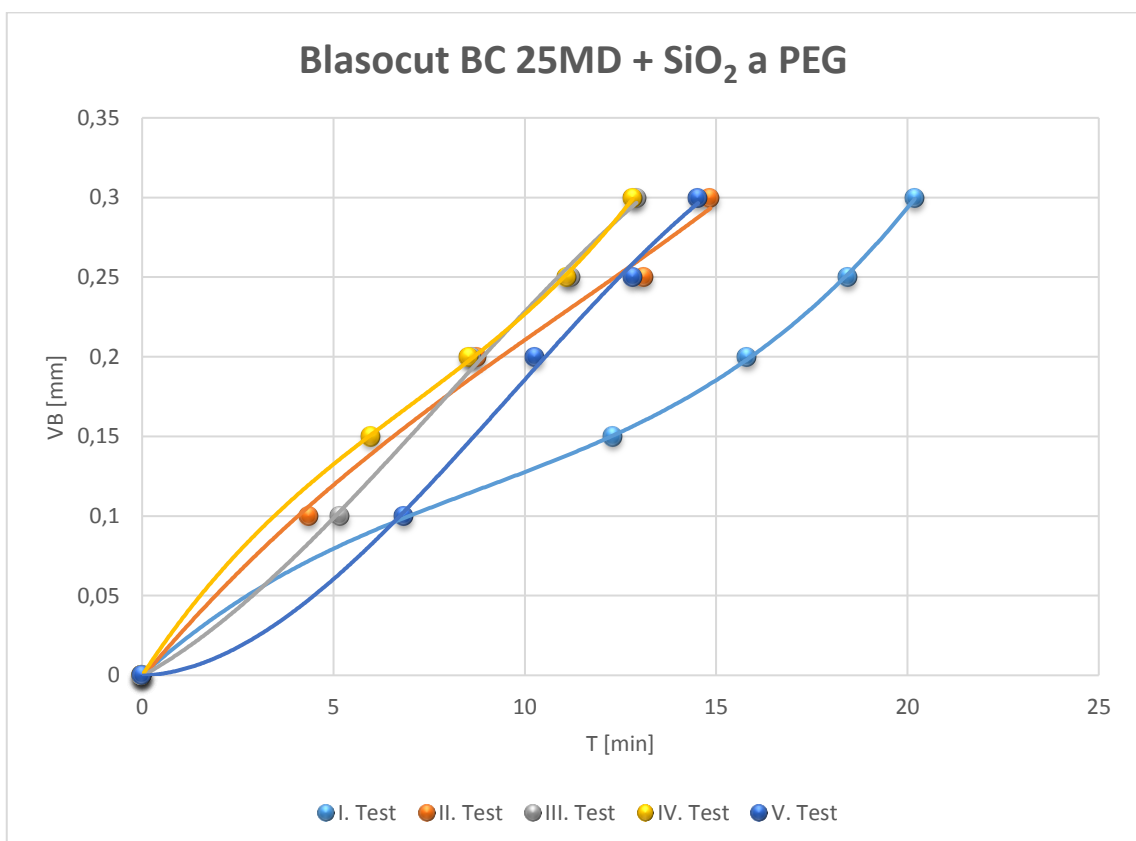
Graf 4 Varianta procesní kapaliny Vasco 6 000 + SiO₂ a PEG.



Graf 5 Varianta procesní kapaliny Blasocut 25 MD bez nanočástic.



Graf 6 Varianta procesní kapaliny Blasocut 25 MD + SiO₂.

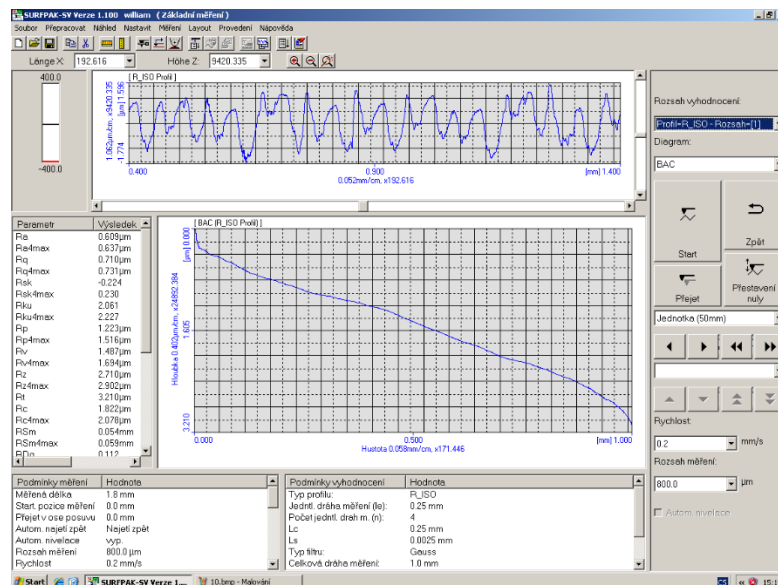


Graf 7 Varianta procesní kapaliny Blasocut 25 MD + SiO₂ a PEG.

4.2 Vliv nanočástic v PK na kvalitu obrobeneho povrchu

4.2.1 Procesní kapalina Vasco 6 000

Výsledné naměřené hodnoty všech tří parametrů drsnosti obrobene plochy (Ra, Rz, CPT50) pro jednotlivé varianty provozní kapaliny Vasco 6 000 jsou obsaženy v tab. 9 – 17. Příklad výsledné obrazovky při měření na přístroji Mitutoyo Surftest 2 000 – SV je na obr. 45. Průměrné hodnoty z deseti měření v pěti bodech pro každou procesní kapalinu jsou zobrazeny v grafech 8 - 10.



Obr. 45 Hodnoty naměřené na přístroji Mitutoyo Surftest 2 000 – SV.

Tab. 9 Naměřené hodnoty Ra pro procesní kapalinu Vasco 6 000 bez nanočástic.

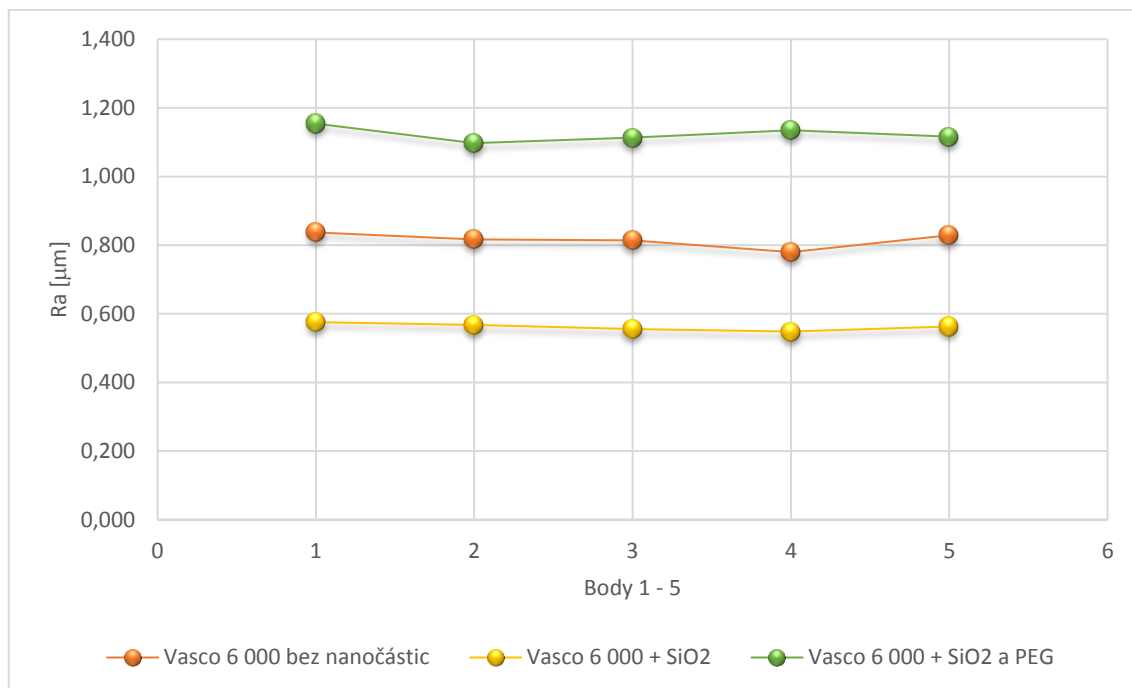
Vasco 6 000 bez nanočástic						
Měření	1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod	
Ra	1	0,865	0,828	0,793	0,794	0,807
	2	0,865	0,869	0,827	0,889	0,799
	3	0,864	0,816	0,840	0,936	0,828
	4	0,907	0,802	0,838	0,916	0,820
	5	0,903	0,798	0,845	0,856	0,763
	6	0,896	0,886	0,805	0,856	0,852
	7	0,895	0,801	0,869	0,860	0,789
	8	0,907	0,837	0,856	0,849	0,784
	9	0,880	0,848	0,838	0,846	0,798
	10	0,869	0,808	0,837	0,837	0,786
Průměr - body	0,885	0,829	0,835	0,864	0,803	
Průměr - celkový						0,843

Tab. 10 Naměřené hodnoty Ra pro procesní kapalinu Vasco 6 000 + SiO₂.

Vasco 6 000 + SiO ₂						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
Ra	1	0,720	0,773	0,841	0,830	0,780
	2	0,791	0,798	0,824	0,837	0,864
	3	0,767	0,818	0,820	0,885	0,806
	4	0,721	0,794	0,804	0,848	0,787
	5	0,784	0,813	0,839	0,803	0,849
	6	0,789	0,764	0,864	0,831	0,848
	7	0,806	0,774	0,839	0,570	0,761
	8	0,757	0,828	0,905	0,820	0,857
	9	0,746	0,770	0,830	0,833	0,833
	10	0,717	0,782	0,809	0,821	0,881
Průměr - body		0,760	0,791	0,838	0,808	0,827
Průměr - celkový		0,805				

 Tab. 11 Naměřené hodnoty Ra pro procesní kapalinu Vasco 6 000 + SiO₂ a PEG.

Vasco 6 000 + SiO ₂ a PEG						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
Ra	1	0,838	0,808	0,764	0,759	0,858
	2	0,809	0,825	0,821	0,777	0,820
	3	0,814	0,820	0,840	0,795	0,815
	4	0,836	0,817	0,837	0,767	0,834
	5	0,845	0,840	0,838	0,790	0,864
	6	0,846	0,817	0,786	0,770	0,847
	7	0,873	0,795	0,847	0,756	0,824
	8	0,852	0,814	0,780	0,756	0,805
	9	0,815	0,799	0,826	0,758	0,825
	10	0,843	0,835	0,802	0,870	0,795
Průměr - body		0,837	0,817	0,814	0,780	0,829
Průměr - celkový		0,815				



Graf 8 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu Ra.

Tab. 12 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu Rz pro procesní kapalinu Vasco 6 000 bez nanočástic.

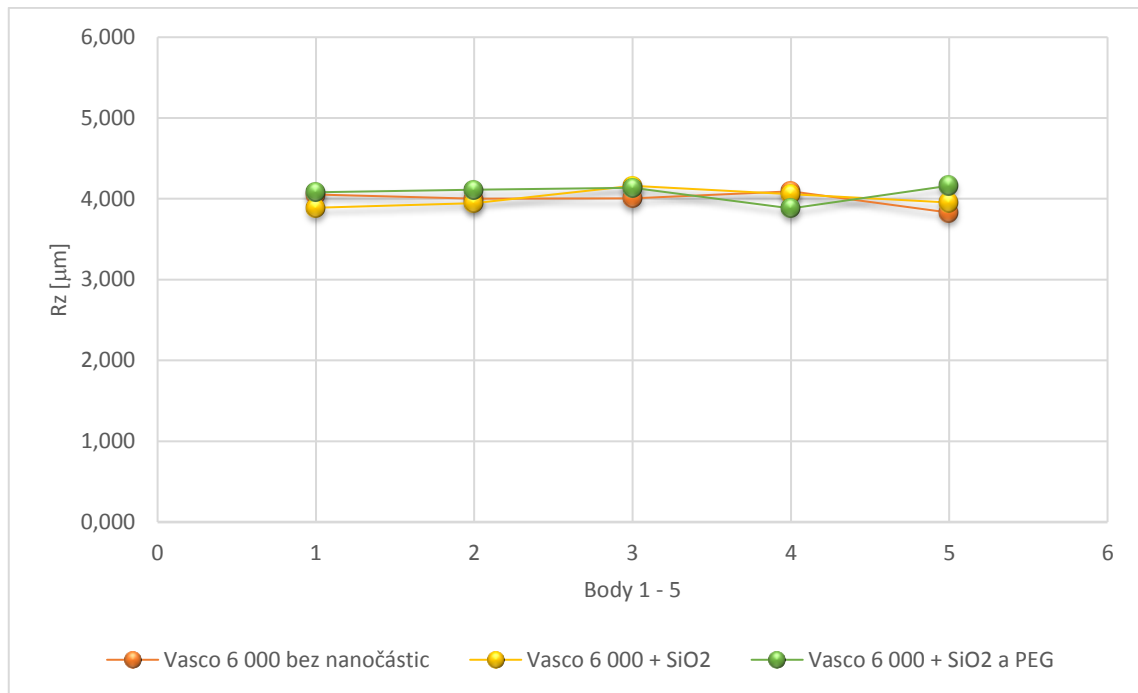
Vasco 6 000 bez nanočástic						
Měření	1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod	
Rz	1	4,113	4,021	3,716	3,782	3,828
	2	3,894	4,151	3,794	4,136	3,815
	3	3,944	3,983	4,119	4,445	3,639
	4	4,212	3,835	4,193	4,426	3,964
	5	4,118	3,764	3,885	4,225	3,707
	6	4,172	4,267	4,053	4,049	4,170
	7	4,185	3,930	4,094	4,113	3,924
	8	4,237	4,018	4,193	3,908	3,848
	9	3,813	4,017	4,198	4,143	3,686
	10	3,836	4,046	3,802	3,700	3,716
Průměr - body		4,052	4,003	4,005	4,093	3,830
Průměr - celkový		3,997				

Tab. 13 Naměřené hodnoty Rz pro procesní kapalinu Vasco 6 000 +SiO₂.

Vasco 6 000 + SiO₂						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
Rz	1	3,589	3,693	4,070	3,975	3,502
	2	3,720	4,222	4,178	4,435	4,134
	3	3,693	4,266	4,021	4,169	3,834
	4	3,327	3,814	3,924	3,911	3,788
	5	3,758	4,314	4,507	4,224	4,074
	6	3,863	3,724	4,334	3,851	4,110
	7	3,754	3,737	4,213	4,169	3,241
	8	4,090	4,210	4,720	4,041	4,228
	9	3,573	3,740	3,915	3,867	4,073
	10	5,531	3,737	3,728	3,914	4,551
Průměr - body		3,890	3,946	4,161	4,056	3,953
Průměr - celkový		4,001				

 Tab. 14 Naměřené hodnoty Rz pro procesní kapalinu Vasco 6 000 + SiO₂ a PEG.

Vasco 6 000 + SiO₂ a PEG						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
Rz	1	3,971	3,967	3,946	3,908	4,580
	2	3,935	4,004	4,095	4,054	3,989
	3	3,929	4,135	4,273	4,154	3,991
	4	4,162	4,441	4,205	3,888	4,236
	5	4,289	4,049	4,222	3,929	4,109
	6	4,200	4,146	3,944	3,942	4,318
	7	4,227	3,915	4,681	3,648	4,351
	8	4,026	4,141	4,087	3,833	3,998
	9	3,955	4,050	4,019	3,655	4,025
	10	4,133	4,271	3,902	3,805	4,032
Průměr - body		4,083	4,112	4,137	3,882	4,163
Průměr - celkový		4,075				



Graf 9 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu Rz.

Tab. 15 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu C_{PT50} pro procesní kapalinu Vasco 6 000 bez nanočástic.

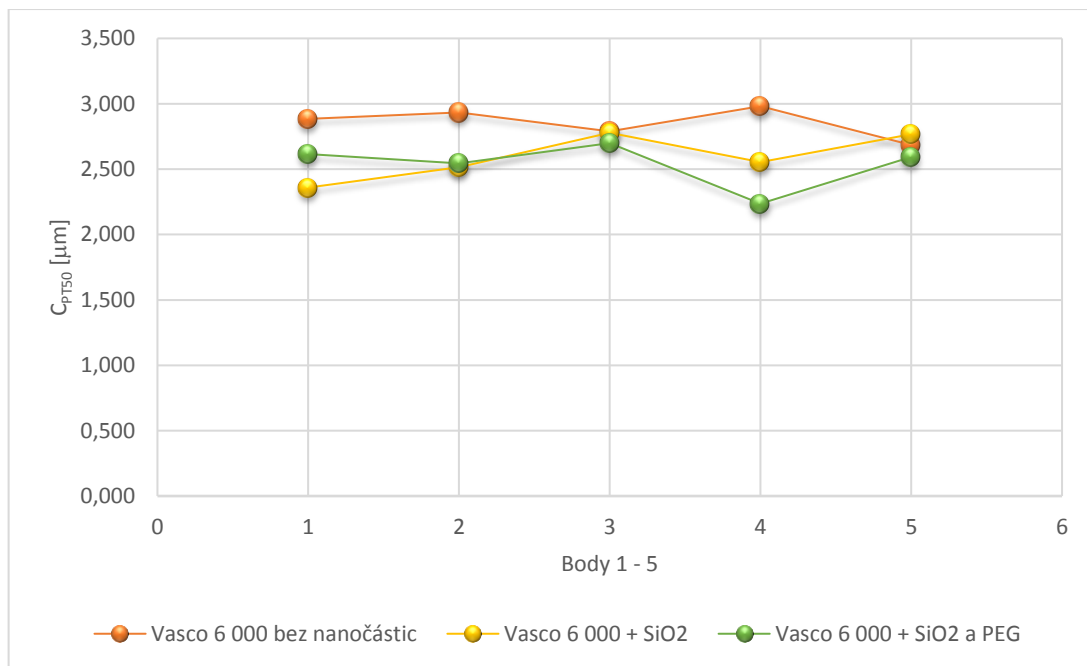
Vasco 6 000 bez nanočástic						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
C_{PT50}	1	2,973	2,621	2,638	2,864	2,552
	2	3,052	3,011	2,875	3,265	2,587
	3	2,803	3,233	2,603	3,457	2,829
	4	2,883	2,945	2,968	3,161	2,836
	5	2,845	2,725	2,774	2,978	2,474
	6	2,820	3,098	2,747	3,078	2,930
	7	2,889	3,018	2,814	3,028	2,504
	8	2,928	2,878	2,771	2,577	3,050
	9	2,766	3,068	2,919	2,758	2,613
	10	2,888	2,746	2,777	2,648	2,471
Průměr - body		2,885	2,934	2,789	2,981	2,685
Průměr - celkový		2,855				

Tab. 16 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu C_{PT50} pro procesní kapalinu Vasco 6 000 + SiO_2 .

Vasco 6 000 + SiO_2						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
C_{PT50}	1	2,395	2,295	2,868	2,702	2,397
	2	2,401	2,857	2,588	2,668	2,704
	3	2,437	2,516	2,727	2,681	2,668
	4	2,139	2,532	2,395	2,433	2,620
	5	2,394	2,979	2,769	2,385	2,468
	6	2,234	2,543	3,077	2,553	2,617
	7	2,613	2,270	2,802	2,718	2,066
	8	2,512	2,466	3,834	2,516	3,007
	9	2,056	2,285	2,447	2,446	2,742
	10	2,412	2,398	2,275	2,425	4,394
Průměr - body		2,359	2,514	2,778	2,553	2,768
Průměr - celkový		2,594				

 Tab. 17 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu C_{PT50} pro procesní kapalinu Vasco 6 000 + SiO_2 a PEG.

Vasco 6 000 + SiO_2 a PEG						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
C_{PT50}	1	2,446	2,606	2,368	2,304	2,888
	2	2,445	2,139	3,227	2,314	2,479
	3	2,538	2,477	2,880	2,283	2,217
	4	3,043	2,840	2,585	2,253	2,878
	5	2,445	2,531	2,679	2,149	2,543
	6	2,515	2,619	2,596	2,293	2,635
	7	2,721	2,485	2,972	2,126	2,832
	8	2,521	2,579	2,493	2,128	2,425
	9	2,691	2,565	2,573	2,184	2,457
	10	2,783	2,596	2,619	2,329	2,574
Průměr - body		2,615	2,544	2,699	2,236	2,593
Průměr - celkový		2,537				



Graf 10 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu C_{PT50}.

4.2.2 Procesní kapalina Blasocut BC 25MD

Výsledné naměřené hodnoty všech tří parametrů drsnosti obrobenej plochy (Ra, Rz, C_{PT50}) pro jednotlivé varianty provozní kapaliny Blasocut BC 25MD jsou obsaženy v tab. 18 – 26. Průměrné hodnoty z deseti měření v pěti bodech pro každou procesní kapalinu jsou zobrazeny v grafu 11 – 13.

Tab. 18 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu Ra pro procesní kapalinu Blasocut BC 25 MD bez nanočástic.

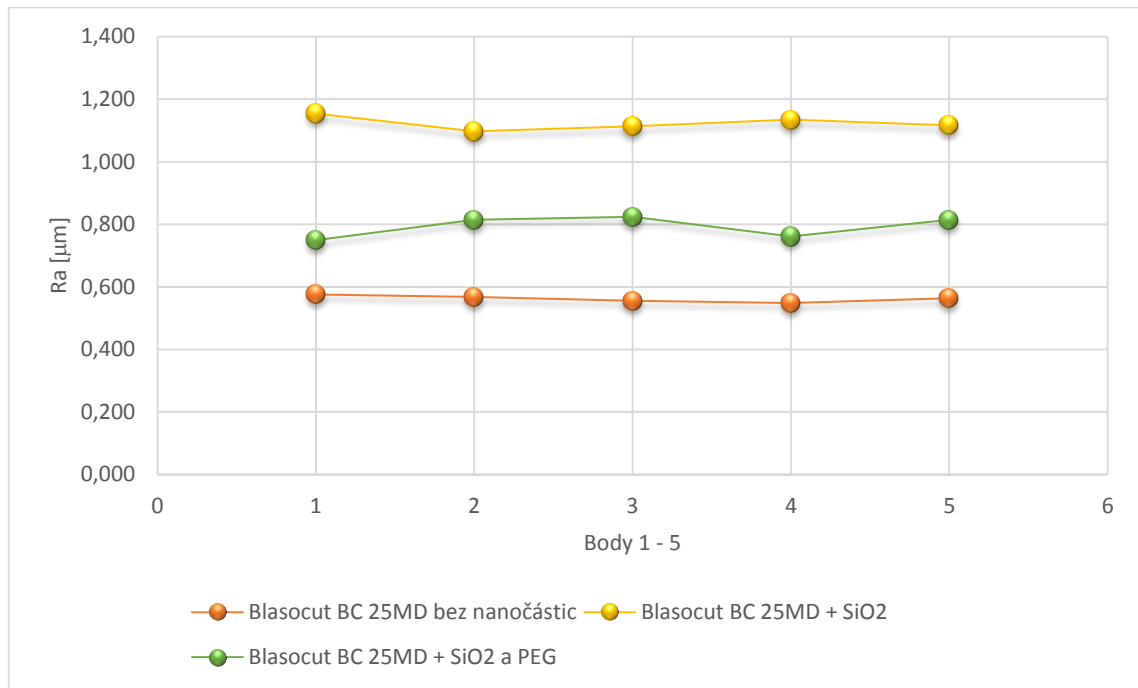
Blasocut BC 25 MD bez nanočástic						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
Ra	1	0,609	0,581	0,56	0,568	0,546
	2	0,557	0,57	0,56	0,547	0,592
	3	0,594	0,549	0,528	0,544	0,552
	4	0,633	0,609	0,569	0,529	0,587
	5	0,566	0,572	0,541	0,542	0,563
	6	0,571	0,548	0,548	0,546	0,533
	7	0,557	0,546	0,558	0,554	0,561
	8	0,532	0,553	0,541	0,558	0,558
	9	0,559	0,57	0,553	0,543	0,565
	10	0,579	0,58	0,597	0,553	0,579
Průměr - body		0,576	0,568	0,556	0,548	0,564
Průměr - celkový		0,562				

Tab. 19 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu Ra pro procesní kapalinu Blasocut BC 25 MD + SiO₂.

Blasocut BC 25 MD + SiO₂						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
Ra	1	1,2	1,083	1,094	1,176	1,131
	2	1,145	1,084	1,142	1,17	1,064
	3	1,169	1,098	1,129	1,124	1,141
	4	1,17	1,128	1,123	1,098	1,07
	5	1,163	1,118	1,11	1,104	1,052
	6	1,114	1,109	1,103	1,147	1,106
	7	1,133	1,098	1,125	1,138	1,115
	8	1,134	1,088	1,087	1,122	1,213
	9	1,159	1,069	1,111	1,143	1,135
	10	1,154	1,098	1,111	1,122	1,133
Průměr - body		1,154	1,097	1,114	1,134	1,116
Průměr - celkový		1,123				

 Tab. 20 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu Ra pro procesní kapalinu Blasocut BC 25 MD + SiO₂ a PEG.

Blasocut BC 25 MD + SiO₂ a PEG						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
Ra	1	0,761	0,816	0,836	0,772	0,815
	2	0,737	0,811	0,86	0,756	0,851
	3	0,761	0,846	0,798	0,766	0,831
	4	0,779	0,832	0,865	0,783	0,813
	5	0,744	0,805	0,835	0,757	0,802
	6	0,726	0,81	0,794	0,757	0,777
	7	0,796	0,794	0,801	0,738	0,802
	8	0,72	0,822	0,792	0,784	0,806
	9	0,732	0,794	0,845	0,762	0,767
	10	0,739	0,81	0,814	0,739	0,881
Průměr - body		0,750	0,814	0,824	0,761	0,815
Průměr - celkový		0,793				



Graf 11 Průměrné naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu Ra.

Tab. 21 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu Rz pro procesní kapalinu Blasocut BC 25 MD bez nanočástic.

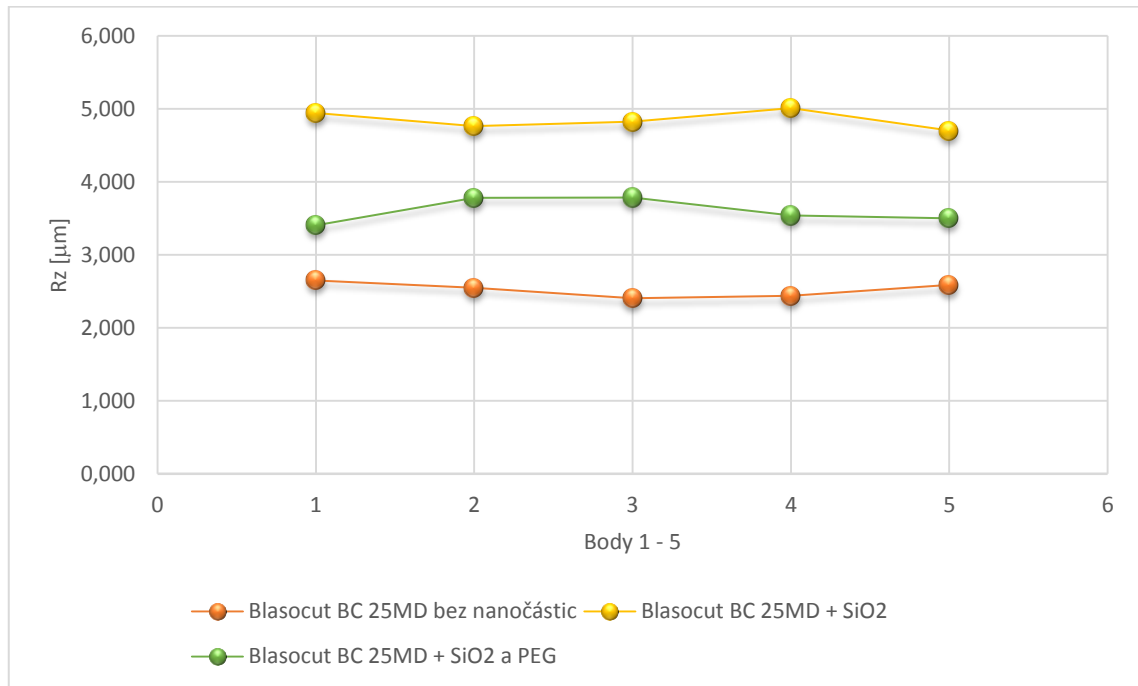
Blasocut BC 25 MD bez nanočástic						
Měření	1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod	
Rz	1	2,71	2,491	2,515	2,82	2,452
	2	2,458	2,391	2,583	2,428	2,831
	3	2,851	2,534	2,239	2,529	2,517
	4	3,371	2,863	2,477	2,279	2,701
	5	2,489	2,46	2,398	2,4	2,69
	6	2,775	2,598	2,218	2,325	2,449
	7	2,344	2,528	2,466	2,437	2,499
	8	2,441	2,485	2,279	2,333	2,784
	9	2,378	2,467	2,433	2,477	2,355
	10	2,671	2,681	2,448	2,355	2,599
Průměr - body		2,649	2,550	2,406	2,438	2,588
Průměr - celkový		2,526				

Tab. 22 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu Rz pro procesní kapalinu Blasocut BC 25 MD + SiO₂.

Blasocut BC 25 MD + SiO₂						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
Rz	1	5,035	4,799	4,612	5,454	4,816
	2	4,905	4,700	4,798	5,013	4,276
	3	4,942	4,858	4,844	5,096	4,714
	4	4,894	4,725	4,931	4,978	4,521
	5	4,856	4,640	4,831	4,582	4,496
	6	4,987	4,795	4,962	4,984	4,520
	7	4,959	4,771	4,790	5,036	4,754
	8	4,975	4,821	4,769	4,914	5,338
	9	5,054	4,766	4,806	5,002	4,767
	10	4,831	4,782	4,897	5,051	4,846
Průměr - body		4,944	4,766	4,824	5,011	4,705
Průměr - celkový		4,850				

 Tab. 23 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu Rz pro procesní kapalinu Blasocut BC 25 MD + SiO₂ a PEG.

Blasocut BC 25 MD + SiO₂ a PEG						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
Rz	1	3,428	3,813	3,821	3,660	3,477
	2	3,636	3,711	4,089	3,548	3,560
	3	3,549	4,089	3,575	3,538	3,448
	4	3,647	3,897	4,039	3,640	3,385
	5	3,268	3,914	3,865	3,431	3,739
	6	3,210	3,676	3,477	3,417	3,302
	7	3,476	3,494	3,602	3,366	3,420
	8	3,297	3,971	3,522	4,082	3,357
	9	3,192	3,573	4,184	3,422	3,283
	10	3,346	3,682	3,683	3,279	4,042
Průměr - body		3,405	3,782	3,786	3,538	3,501
Průměr - celkový		3,602				



Graf 12 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu Rz.

Tab. 24 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu C_{PT50} pro procesní kapalinu Blasocut BC 25 MD bez nanočástic.

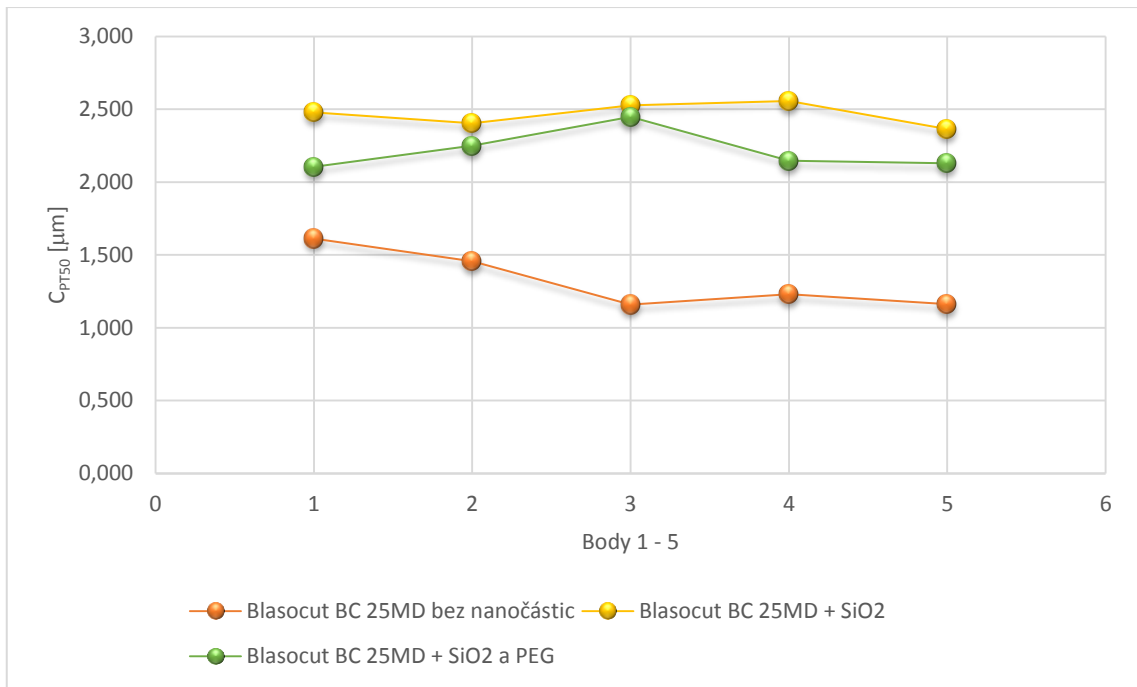
Blasocut BC 25 MD bez nanočástic						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
C_{PT50}	1	1,448	1,248	1,134	1,212	1,017
	2	1,520	1,801	1,124	1,338	1,235
	3	1,834	1,761	1,109	1,299	1,171
	4	3,224	1,328	1,255	1,171	1,200
	5	1,259	1,319	1,244	1,196	1,286
	6	1,593	2,232	1,149	1,065	0,871
	7	1,280	1,206	1,018	1,319	0,975
	8	1,409	1,169	1,229	1,101	1,812
	9	1,169	1,214	1,225	1,218	1,168
	10	1,385	1,295	1,103	1,373	0,893
Průměr - body		1,612	1,457	1,159	1,229	1,163
Průměr - celkový		1,324				

Tab. 25 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu C_{PT50} pro procesní kapalinu Blasocut BC 25 MD + SiO_2 .

Blasocut BC 25 MD + SiO_2						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
C_{PT50}	1	2,630	2,428	2,335	2,561	2,383
	2	2,438	2,430	2,479	2,510	2,199
	3	2,361	2,300	2,433	3,045	2,605
	4	2,712	2,608	2,486	2,450	2,184
	5	2,274	2,349	2,592	2,462	2,193
	6	2,452	2,429	2,604	2,435	2,217
	7	2,477	2,476	2,548	2,466	2,299
	8	2,449	2,333	2,603	2,642	2,988
	9	2,556	2,282	2,554	2,433	2,323
	10	2,441	2,402	2,638	2,564	2,245
Průměr - body		2,479	2,404	2,527	2,557	2,364
Průměr - celkový		2,466				

 Tab. 26 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu C_{PT50} pro procesní kapalinu Blasocut BC 25 MD + SiO_2 a PEG.

Blasocut BC 25 MD + SiO_2 a PEG						
Měření		1 bod	2 bod	3 bod	4 bod	5 bod
C_{PT50}	1	2,291	2,298	2,331	2,235	2,045
	2	2,077	2,305	2,251	2,255	2,097
	3	2,271	2,335	2,374	2,113	2,139
	4	2,050	2,281	2,416	2,339	1,974
	5	1,973	2,273	2,284	2,117	3,072
	6	1,949	2,256	2,276	2,095	1,705
	7	2,180	2,194	2,378	1,948	2,175
	8	2,053	2,282	2,266	2,156	1,918
	9	2,079	2,190	3,648	2,077	2,024
	10	2,126	2,095	2,253	2,129	2,147
Průměr - body		2,105	2,251	2,448	2,146	2,130
Průměr - celkový		2,216				



Graf 13 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu C_{PT50} .

5 Analýza laboratorních výsledků; vyvození závěrů

5.1 Vyhodnocení trvanlivosti nástroje

Procentuální porovnání výsledných průměrných trvanlivostí nástroje je obsaženo v tab. 27 pro procesní kapalinu Vasco 6 000 a v tab. 28 pro procesní kapalinu Blasocut BC 25MD.

Tab. 27 Průměrné hodnoty trvanlivosti břitu a procentuální rozdíl pro procesní kapalinu Vasco 6 000.

Procesní kapalina	Průměrná trvanlivost břitu T [min]	Vyjádřeno v procentech [%]	Procentuální rozdíl [%]
Vasco 6 000 bez nanočástic	23,4	100	0
Vasco 6 000 + SiO ₂	26,4	112,8	12,8
Vasco 6 000 + SiO ₂ a PEG	17,4	74,4	-25,6

Tab. 28 Průměrné hodnoty trvanlivosti břitu a procentuální rozdíl pro procesní kapalinu Blasocut BC 25 MD.

Procesní kapalina	Průměrná trvanlivost břitu T [min]	Vyjádřeno v procentech [%]	Procentuální rozdíl [%]
BC 25MD bez nanočástic	17,7	100	0
BC 25MD + SiO ₂	22,3	126	26
BC 25MD + SiO ₂ a PEG	15,1	85,3	-14,7

Při vyhodnocování vlivu všech variant procesních kapalin na trvanlivost nástroje, byla vždy zjištěna hodnota pro variantu kapaliny bez nanočástic a tato hodnota byla brána jako referenční. Hodnocení probíhalo vzájemným porovnáním ostatních výsledků s touto hodnotou.

Pro kapalinu Vasco 6 000 z výsledných hodnot obsažených v tab. 27 vyplývá, že nejlepšího výsledku trvanlivosti nástroje bylo dosaženo v případě použití nanočástic SiO₂. V tomto případě bylo dosaženo zvýšení trvanlivosti oproti kapalině bez nanočástic o téměř 13 %.

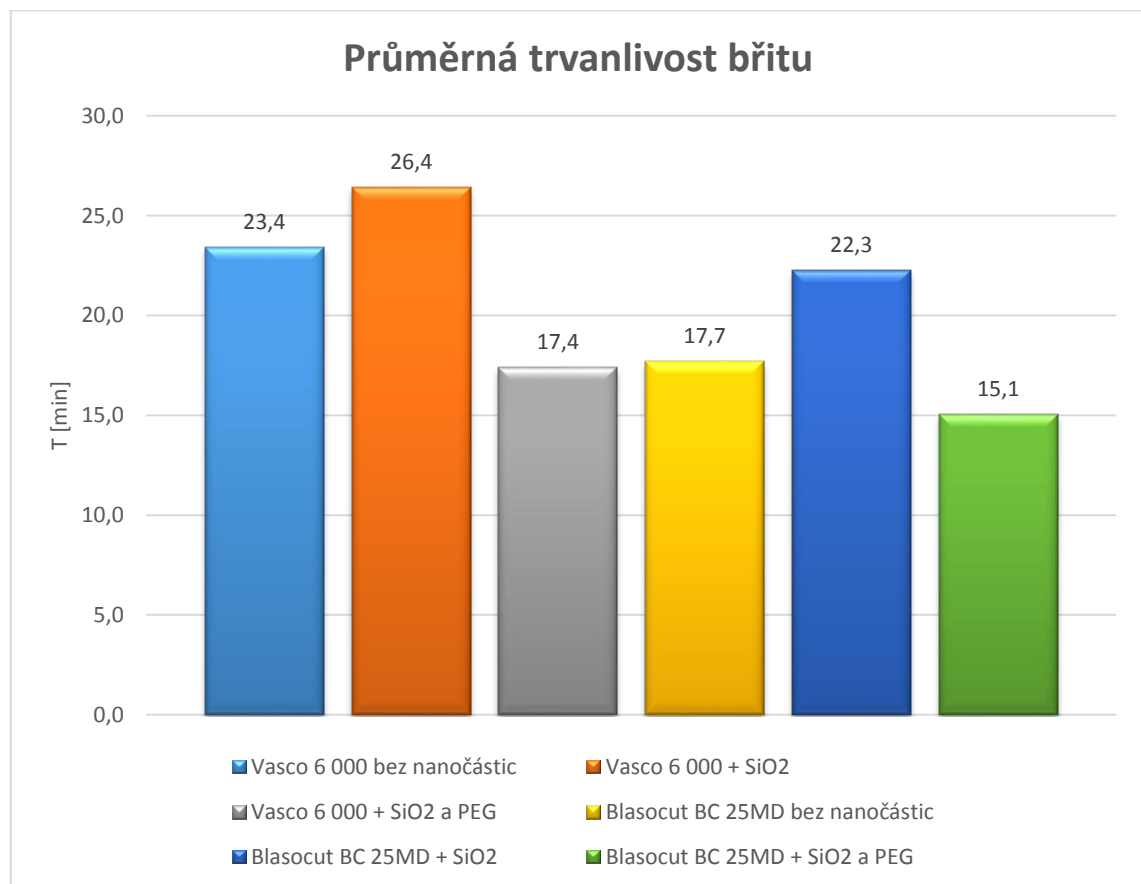
Nejhoršího výsledku bylo naopak dosaženo při použití nanočástic SiO₂ s polymerizovaným obalem (PEG), kde výsledná trvanlivost nástroje klesla o téměř 26 % v porovnání s kapalinou bez nanočástic.

Pro kapalinu Blasocut BC 25MD byla situace s trvanlivostí nástroje obdobná. Kdy dle výsledků v tab. 28 bylo nejlepšího výsledku dosaženo v případě použití

nanočástic SiO_2 . V tomto případě bylo dosaženo zvýšení trvanlivosti oproti kapalině bez nanočástic o 26 %.

Nejhoršího výsledku bylo opět dosaženo při použití nanočástic SiO_2 s polymerizovaným obalem (PEG), kde výsledná trvanlivost nástroje klesla o téměř 15 % v porovnání s kapalinou bez nanočástic.

Vizuální vzájemné porovnání průměrných hodnot trvanlivosti bříty nástroje jsou dále zobrazeny v grafu 14.



Graf 14 Porovnání průměrných trvanlivostí bříty.

Shrnutí výsledků experimentu pro zjištění trvanlivosti nástroje

Při experimentu soustružení antikorozi oceli 1.4404 bylo v případě procesní kapaliny Vasco 6 000 i Blasocut BC 25MD jednoznačně prokázáno zvýšení trvanlivosti nástroje při aplikaci nanočástic SiO_2 a zároveň výrazné snížení trvanlivosti bříty při aplikaci nanočástic SiO_2 s polymerizovaným obalem (PEG).

5.2 Vyhodnocení drsnosti obrobeného povrchu

Pro průměrné naměřené hodnoty parametrů drsnosti obrobené plochy byly spočítány nejistoty měření pomocí vzorce 5.1 pro výběrovou směrodatnou odchylku. K výpočtu byl použit software MS Excel 2013 a vypočítané hodnoty byly zaneseny pro kapalinu Vasco 6 000 do tab. 29 a pro kapalinu Blasocut BC 25MD do tab. 30. [36]

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.1)$$

Kde výběrový průměr \bar{x} odpovídá [36]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.2)$$

Tab. 29 Výsledné průměrné hodnoty drsnosti povrchu včetně vypočítaných nejistot pro procesní kapalinu Vasco 6 000.

Procesní kapalina	Vasco 6 000 bez nanočástic		Vasco 6 000 + SiO ₂		Vasco 6 000 + SiO ₂ a PEG	
	Průměrná hodnota [μm]	Nejistota měření U _A [μm]	Průměrná hodnota [μm]	Nejistota měření U _A [μm]	Průměrná hodnota [μm]	Nejistota měření U _A [μm]
Ra	0,843	±0,040	0,805	±0,054	0,815	±0,031
Rz	3,997	±0,198	4,001	±0,374	4,075	±0,199
C_{PT50}	2,855	±0,210	2,594	±0,389	2,537	±0,245

Tab. 30 Výsledné průměrné hodnoty drsnosti povrchu včetně vypočítaných nejistot pro procesní kapalinu Blasocut BC 25MD.

Procesní kapalina	Blasocut BC 25MD bez nanočástic		Blasocut BC 25MD + SiO ₂		Blasocut BC 25MD + SiO ₂ a PEG	
	Průměrná hodnota [μm]	Nejistota měření U _A [μm]	Průměrná hodnota [μm]	Nejistota měření U _A [μm]	Průměrná hodnota [μm]	Nejistota měření U _A [μm]
Ra	0,562	±0,022	1,123	±0,034	0,793	±0,039
Rz	2,526	±0,203	4,850	±0,199	3,602	±0,259
C_{PT50}	1,324	±0,372	2,466	±0,172	2,216	±0,281

Procentuální porovnání vlivu všech variant procesních kapalin na vybrané parametry drsnosti obrobeného povrchu je obsaženo v tab. 31 pro kapalinu

Vasco 6 000 a tab. 32 pro kapalinu Blasocut BC 25MD.

Tab. 31 Vyhodnocení parametrů drsnosti pro procesní kapalinu Vasco 6 000.

Parametr drsnosti Ra	Průměrná hodnota [μm]	Vyjádřeno v procentech [%]	Procentuální rozdíl [%]
Vasco 6 000 bez nanočástic	0,843	100	0
Vasco 6 000 + SiO ₂	0,805	95,5	-4,5
Vasco 6 000 + SiO ₂ a PEG	0,815	96,7	-3,3
Parametr drsnosti Rz	Průměrná hodnota [μm]	Vyjádřeno v procentech [%]	Procentuální rozdíl [%]
Vasco 6 000 bez nanočástic	3,997	100	0
Vasco 6 000 + SiO ₂	4,001	100,1	0,1
Vasco 6 000 + SiO ₂ a PEG	4,075	102	2
Parametr drsnosti C_{PT50}	Průměrná hodnota [μm]	Vyjádřeno v procentech [%]	Procentuální rozdíl [%]
Vasco 6 000 bez nanočástic	2,855	100	0
Vasco 6 000 + SiO ₂	2,594	90,9	-9,1
Vasco 6 000 + SiO ₂ a PEG	2,537	88,9	-11,1

Pro vyhodnocování vlivu všech variant procesních kapalin na drsnost obrobené plochy, byla vždy zjištěna hodnota pro variantu kapaliny bez nanočástic a tato hodnota byla brána jako referenční. Hodnocení probíhalo vzájemným porovnáním ostatních výsledků s touto hodnotou.

Při využití kapaliny Vasco 6 000 z výsledných hodnot obsažených v tab. 31 vyplývá, že nejlepšího výsledku parametru Ra drsnosti obrobeného povrchu bylo dosaženo v případě použití nanočástic SiO₂. V tomto případě bylo dosaženo zvýšení trvanlivosti oproti kapalině bez nanočástic o 4,5 %. Nejhoršího výsledku bylo dosaženo při použití kapaliny bez nanočástic.

Nejlepšího výsledku u parametru drsnosti Rz bylo dosaženo při použití kapaliny bez nanočástic. Naopak nejhorší výsledek způsobila aplikace nanočástic SiO₂ s polymerizovaným obalem (PEG), kdy došlo k zanedbatelnému zhoršení o 2 %.

Parametr drsnosti C_{PT50} vyšel opět nejlépe při použití procesní kapaliny bez nanočástic. Nejhoršího výsledku bylo znovu dosaženo při aplikaci nanočástic SiO₂ s polymerizovaným obalem (PEG), kdy došlo k výraznému zhoršení o 11 %.

Tab. 32 Vyhodnocení parametrů drsnosti pro procesní kapalinu Blasocut BC 25MD.

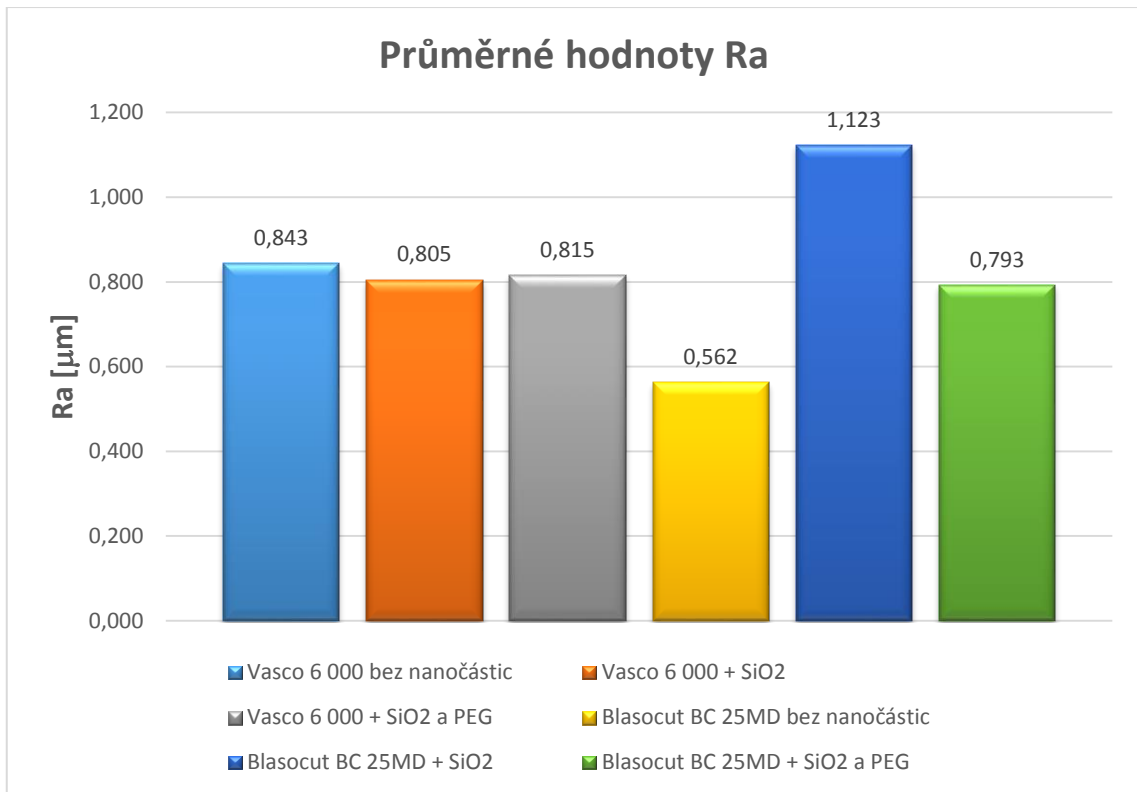
Parametr drsnosti Ra	Průměrná hodnota [μm]	Vyjádřeno v procentech [%]	Procentuální rozdíl [%]
BC 25MD bez nanočástic	0,562	100	0
BC 25MD + SiO ₂	1,123	199,8	99,8
BC 25MD + SiO ₂ a PEG	0,793	141,1	41,1
Parametr drsnosti Rz	Průměrná hodnota [μm]	Vyjádřeno v procentech [%]	Procentuální rozdíl [%]
BC 25MD bez nanočástic	2,526	100	0
BC 25MD + SiO ₂	4,85	192	92
BC 25MD + SiO ₂ a PEG	3,602	142,6	42,6
Parametr drsnosti C_{PT50}	Průměrná hodnota [μm]	Vyjádřeno v procentech [%]	Procentuální rozdíl [%]
BC 25MD bez nanočástic	1,324	100	0
BC 25MD + SiO ₂	2,466	186,3	86,3
BC 25MD + SiO ₂ a PEG	2,216	167,4	67,4

Při využití kapaliny Blasocut BC 25MD z výsledných hodnot obsažených v tab. 32 vyplývá, že nejlepšího výsledku parametru Ra drsnosti obrobeného povrchu bylo dosaženo v případě použití kapaliny bez nanočástic. Nejhoršího výsledku bylo dosaženo při použití nanočástic SiO₂, kdy došlo k razantnímu zhoršení o téměř 100 %.

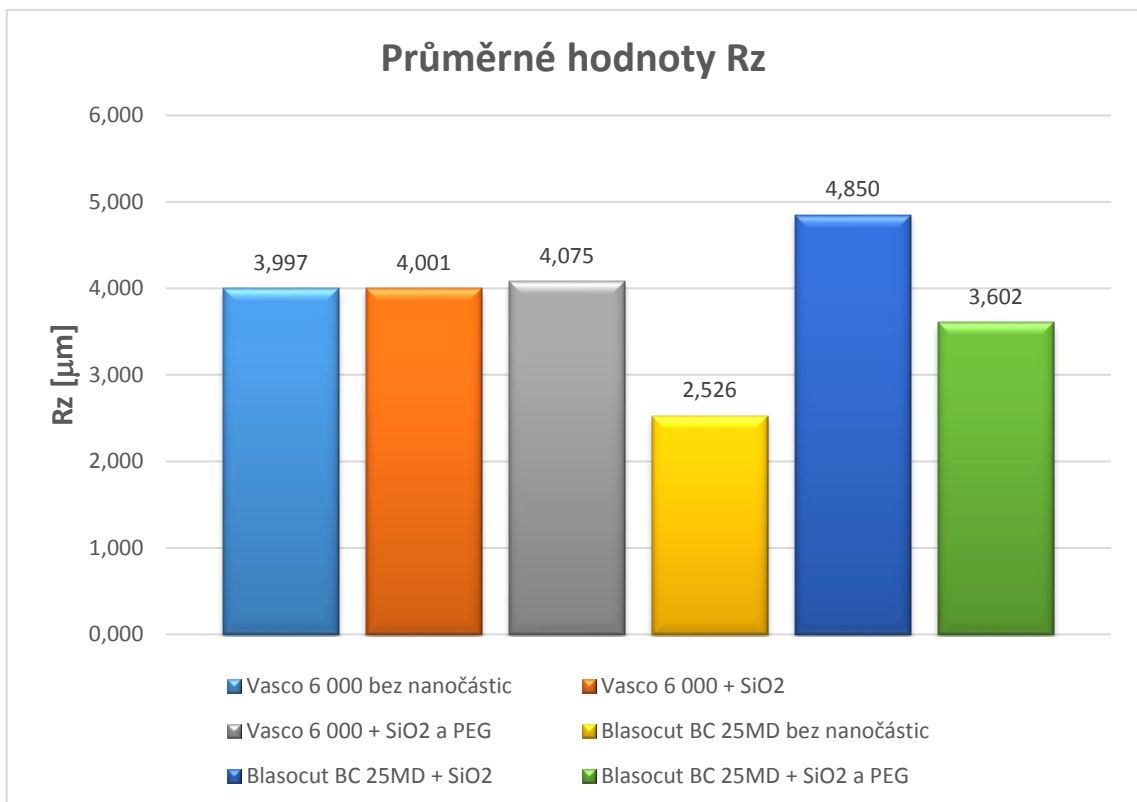
Obdobná situace nastala i pro parametr drsnosti Rz, kde bylo opět dosaženo při použití kapaliny bez nanočástic nejlepšího výsledku. Naopak nejhorší výsledek způsobila znovu aplikace nanočástic SiO₂, kdy došlo k výraznému zhoršení o 92 %.

Parametr drsnosti C_{PT50} vyšel také nejlépe při použití procesní kapaliny bez nanočástic. Nejhoršího výsledku bylo dosaženo při aplikaci nanočástic SiO₂, kdy došlo opět k výraznému zhoršení o 86 %.

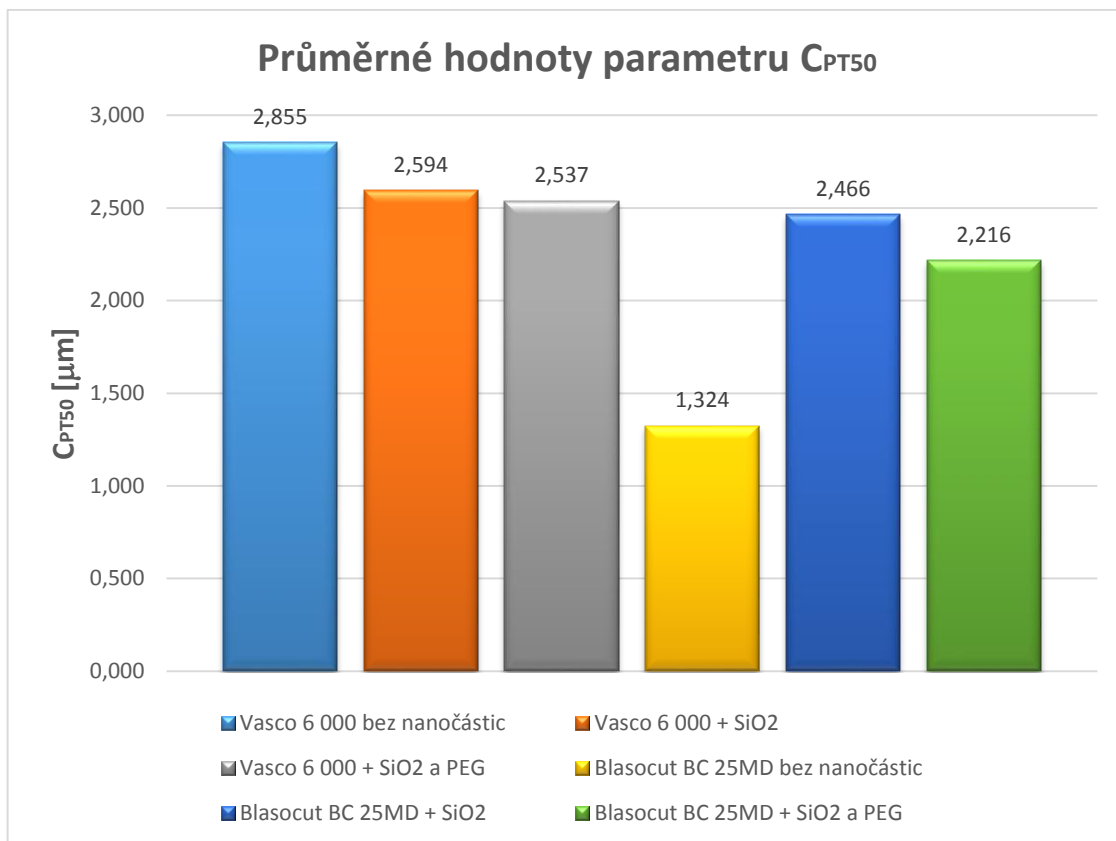
Vizuální porovnání průměrných hodnot všech měřených parametrů drsnosti obrobeného povrchu pro všechny využití varianty procesních kapalin je zobrazeno v grafech 15 – 17.



Graf 15 Porovnání jednotlivých variant procesních kapalin z hlediska průměrných naměřených hodnot parametru drsnosti obrobeneé plochy Ra.



Graf 16 Porovnání jednotlivých variant procesních kapalin z hlediska průměrných naměřených hodnot parametru drsnosti obrobeneé plochy Rz.



Graf 17 Porovnání jednotlivých variant procesních kapalin z hlediska průměrných naměřených hodnot parametru drsnosti obrobene plochy C_{PT50} .

Shrnutí výsledků experimentu pro zjištění vlivu na drsnost povrchu

Při experimentu soustružení antikorozi oceli 1.4404 nebyl, v případě procesní kapaliny Vasco 6 000 a kapaliny Blasocut BC 25MD, jednoznačně prokázán pozitivní účinek nanočástic SiO₂ a SiO₂ s polymerizovaným obalem (PEG) přimíchaných v procesních kapalinách na zlepšení drsnosti obrobene plochy. Naopak bylo jednoznačně prokázáno, že v případě nanočástic SiO₂ s polymerizovaným obalem dochází k výraznému zhoršení drsnosti obrobeneho povrchu.

ZÁVĚRY

Při experimentu této diplomové práce byly využity celkem dva typy procesních kapalin, do kterých byly postupně přimíchány dva typy nanočástic. Celkově vzniklo šest zkoumaných variant procesních kapalin. Pro všechny varianty byla zadavatelem experimentu zvolena koncentrace kapaliny 10 %. Zkoumán byl vliv na trvanlivost břitu a kvalitu obrobeného povrchu při soustružení antikorozní austenitické oceli 1.4404.

Pro trvanlivost břitu bylo pomocí experimentu zjištěno, že:

- přidáním nanočástic SiO_2 do procesní kapaliny je možné zvýšit průměrnou trvanlivost nástroje, pro kapalinu Vasco 6 000 o 13 % a pro kapalinu Blasocut BC 25MD o 26 %,
- přidáním nanočástic SiO_2 s polymerizovaným obalem do procesních kapalin dojde ke snížení trvanlivosti nástroje, pro kapalinu Vasco 6 000 o 26 % a pro kapalinu Blasocut BC 25MD o 15 %.

Pro kvalitu obrobeného povrchu bylo při použití kapaliny Vasco 6 000 v experimentu zjištěno, že:

- v případě parametrů drsnosti R_a a R_z došlo po přidání obou typů nanočástic pouze k minimálnímu rozdílu – do 5 %,
- pro parametr drsnosti C_{PT50} došlo po přidání obou typů nanočástic k přibližně 10 % zhoršení.

Pro kvalitu obrobeného povrchu bylo při použití kapaliny Blasocut BC 25MD v experimentu zjištěno, že:

- hodnoty parametrů drsnosti R_a , R_z i C_{PT50} vyšly vždy nejlépe při použití procesních kapalin bez nanočástic,
- po přidání nanočástic SiO_2 do procesních kapalin došlo k výraznému zhoršení všech parametrů v rozmezí od 86 % až po 100 %,
- po přidání nanočástic SiO_2 s polymerizovaným obalem do procesních kapalin došlo ke zhoršení všech parametrů drsnosti od 41 % až po 67 %.

Ačkoliv byl v experimentu po přidání nanočástic SiO_2 do procesních kapalin prokázán pozitivní vliv na zvýšení trvanlivosti nástroje, není v současné době možné nasazení těchto kapalin do běžného provozu. Problémem zůstává usazování nanočástic na dně olejové vany stroje při jeho zastavení.

Procesní kapaliny s nanočásticemi SiO_2 s polymerizovaným obalem měly tento problém eliminovat, ale i zde docházelo k poměrně rychlé sedimentaci nanočástic na dně olejové vany při odstávce stroje. Zároveň u těchto kapalin došlo k jednoznačnému snížení trvanlivosti nástroje a také k výraznému zhoršení parametrů drsnosti obrobeného povrchu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. 226s. ISBN 80-214-2374-9.
2. BRYCHTA, Josef et al. *Technologie II: 1. díl*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola Báňská - Technická univerzita, 2007. 119s. ISBN 978-80-248-1641-8.
3. FEHRPLAY. Mazací chladicí kapalina (chladiivo): klasifikace, použití [online]. [vid. 2019-04-17]. Dostupné z: <http://www.iscarthailand.com/Products.aspx/CountryId/6/ProductId/10169>
4. ISCAR. *Vysokotlaké chlazení (JHP) pro upichovací systémy* [online]. [vid. 2019-04-17]. Dostupné z: <http://www.iscarthailand.com/Products.aspx/CountryId/6/ProductId/10169>
5. JERSÁK, Jan et al. *Ekologické obráběcí kapaliny nové generace*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. 88s. ISBN 978-80-7494-142-9.
6. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Hospodárné čištění dílů po obrábění* [online]. 2017 roč. 2017, č. 5 [vid. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/hospodarne-cisteni-dilu-po-obrabeni.html>.
7. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270s. ISBN 80-214-1996-2.
8. TECHNICKÁ LEPIDLA. *Mannol emulsion – minerální emulze do soustruhů a pil* [online]. [vid. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://www.technikalepidla.cz/index.php/e-shop/chladici-emulze/mannol-emulsion-mineralni-emulze-do-soustruhu-a-pil-detail>.
9. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Prodloužení životnosti řezných kapalin* [online]. 2002 roč. 2002, č. 11 [vid. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prodlouzeni-zivotnosti-reznych-kapalin.html>.

10. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Současné trendy v oblasti kapalin pro obrábění* [online]. 2007 roč. 2007, č. 5 [vid. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-v-oblasti-kapalin-pro-obrabeni.html>.
11. DOALL. *Grinding* [online]. [vid. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://doall.nl/en/products/9-grinding/>.
12. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. 332s. ISBN 978-80-7204-722-2.
13. WASHINA. Broušení kovů [online]. [vid. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://www.washina.cz/obsah/nabidka/brouseni>.
14. HLUCHÝ, Miroslav a Václav HANĚK. *Strojírenská technologie 2 - 2. díl: Koroze, základy obrábění, výrobní postupy*. 2. upravené vyd. Praha: Scientia, 2001. 176s. ISBN 80-7183-245-6.
15. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Příručka pro technology – Opotřebení se nevyhneme!* [online]. 2012 roč. 2012, č. 6 [vid. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>.
16. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. 857s. Přeloženo z: *Modern Metal Culling – A Practical Handbook*. ISBN 91-972299-4-6.
17. COPTEL INTERNETOVÝ PORTÁL. *Trvanlivost bříty* [online]. [vid. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=32871&revision=-1&instance=2>.
18. KUBÍNEK, Roman a Vendula STRÁNSKÁ. *Úvod do problematiky nanotechnologií* [online]. [vid. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://exfyz.upol.cz/didaktika/oprlz/nanotechnologie.pdf>.
19. PRNKA Tasio a Karel Šperlink. *Šestý rámcový program evropského výzkumu a technického rozvoje - Nanotechnologie*. 1. vyd. Ostrava: Repronis, 2004. 70s. [vid. 2019-04-10]. ISBN 80-7329-070-7. Dostupné z: <http://www.nanotechnologie.cz/storage/nanotechnologie6.pdf>.

20. KOLÁŘOVÁ, Lucie. *Úvod do nanovědy a nanotechnologií*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, 2014. 46s. [vid. 2019-04-10]. ISBN 978-80-244-4179-5. Dostupné z: <http://mofychem.upol.cz/KA4/Nanotechnologie.pdf>.
21. DEUTSCHES TEXTILFORSCHUNGSZENTRUM NORD-WEST. *Nanoparticles/Nanoparticle's Synthesis* [online]. [vid. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.dtnw.de/en/research-projects/research-areas/nanoparticles-nanoparticle-s-synthesis/>.
22. FUEL CELL STORE. *Carbon Nanotubes* [online]. [vid. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/carbon-nanotubes>.
23. SPRINGER LINK. Selective synthesis of hexagonal Ag nanoplates in a solution-phase chemical reduction proces [online]. [vid. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12274-010-0055-z>.
24. NANOGRAFI. Metallic Nanoparticles, part II (Top- Down and Bottom-Up) [online]. [vid. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://nanografi.com/blog/metallic-nanoparticles-part-ii-top-down-and-bottomup/>.
25. TICHÁ, Šárka a Jaromír ADAMEC. *Návody do cvičení z předmětu strojírenská metrologie*. Ostrava. VŠB – TU Ostrava, 2008. [vid. 2019-04-10]. ISBN 978-80-248-1916-7. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/346/cs/studium/studijni-literatura/NAVODY-DO-CVICENI-Z-PREDMETU-strojirenska-metrologie.pdf>.
26. HOLEŠOVSKÝ, F. et al. *Terminologie obrábění a montáže*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 2004. 208s. ISBN 80-7044-616-1.
27. ČECH, Jaroslav, PERNIKÁŘ, Jiří a Karel PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. 5. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4010-4.
28. ELUC. *Kontrola drsnosti povrchu* [online]. [vid. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1102>.

29. ELUC. *Měření drsnosti* [online]. [vid. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1571>.
30. ČSN EN ISO 4287 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 24s. Třídící znak 01 4450.
31. TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie: část 1*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2004. [vid. 2019-04-10]. ISBN 80-248-0672-X. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>.
32. PROINEX INSTRUMENTS. *ISO komparátor - etalon drsnosti* [online]. [vid. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/cs/76-iso-komparator-etalon-drsnosti.html>.
33. VERLAG DASHÖFER. Lexikon kovů se zahraničními ekvivalenty 2.1 [software]. [přístup 12. dubna 2019]. Dostupné z: <https://www.dashofer.cz/software-lexikon-kovu-se-zahranicnimi-ekvivalenty-product/kv/>. Požadavky na systém: PC Windows 2 000, XP, Vista, 7, 8, 10; 32 MB RAM; 500 MB místa na disku.
34. PRAMET. *VBD – TPUN: Technické informace* [online]. [vid. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://ecat.pramet.com/insertsGrid.aspx>.
35. SBAZAR. *Nůž soustružnický CTAPR 1616 s vyměnitelnými bř.* [online]. [vid. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.sbazar.cz/consulta/detail/14972977-nuz-soustruznicky-ctapr-1616-s-vymenitelnymi-br>.
36. DVOŘÁČKOVÁ, Štěpánka a Jiří KARÁSEK. *Strojírenská metrologie I. Díl*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. 80s. ISBN 978-80-7494-129-0.

SEZNAM PŘÍLOH

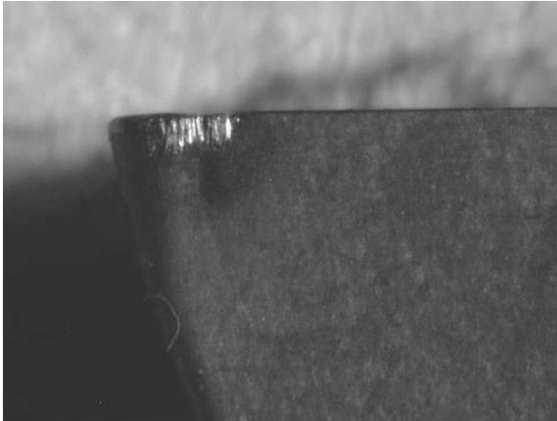
Příloha 1	Materiálový list oceli 1.4404
Příloha 2	Fotografie opotřebovaných VBD
Příloha 3	Měření provedená na přístroji Mitutoyo Surftest 2 000 – SV

Příloha 1
Materiálový list oceli 1.4404 [33]

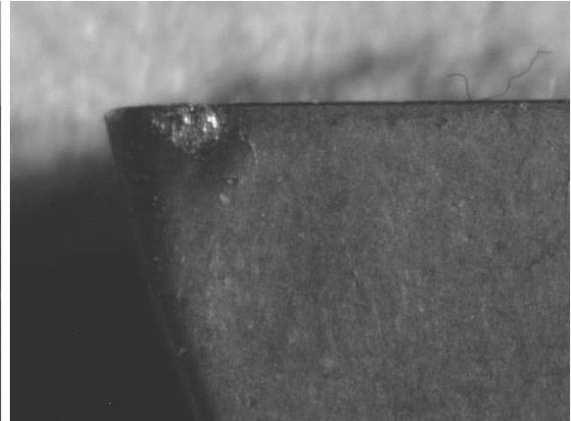
WNr. (číslo materiálu) 1.4404		Cr-Ni-Mo austenitická korozivzdorná ocel					OCEL Kurzname (značka) X2CrNiMo17-12-2/ X2CrNiMo17-13-2		
Chemické složení [hm. %]									
C	Si	Mn	P	S ¹⁾	Cr	Ni ²⁾	Mo	N	
max 0,030	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	16,5–18,5	10,0–13,0	2,00–2,50	max 0,11	
Normy DIN									
DIN EN 10088 /1-3-95 korozivzdorné oceli									
DIN EN 10028/7-97 ploché výrobky z ocelí na tlakové nádoby; korozivzdorné oceli									
DIN EN 10222/5-00 výkovky z ocelí na tlakové nádoby; martenzitické, austenitické a austeniticko-feritické korozivzdorné oceli									
DIN EN 10250/4-00 volné výkovky z oceli pro všeobecné použití; korozivzdorné oceli									
DIN EN 10269-99 oceli a niklové slitiny na upevňovací části pro zvýšené a/nebo snížené teploty									
DIN 17440-96 korozivzdorné oceli; plech, pás válcovaný za tepla a válcované tyče na tlakové nádoby, tažený drát a výkovky									
DIN 17441-97 korozivzdorné oceli; pás válcovaný za studena na tlakové nádoby									
DIN 17455-99 svařované trubky z korozivzdorných ocelí pro všeobecné požadavky									
DIN 17456-99 bezešvé trubky z korozivzdorných ocelí pro všeobecné požadavky									
Mechanické vlastnosti									
Rozměr t, d [mm]		≤ 6 ³⁾	≤ 12 ⁴⁾	≤ 75 ⁵⁾	≤ 160 ⁶⁾	161–250 ⁶⁾			
Stav		po rozpouštěcím žhání							
Mez kluzu R _p 0,2 [MPa] min		240 ⁷⁾	220 ⁷⁾			200 ⁸⁾			
Mez kluzu R _p 1,0 [MPa]		270 ⁷⁾	260 ⁷⁾			235 ⁸⁾			
Mez pevnosti R _m [MPa]		530–680		520–670		500–700			
Tažnost A [%] min		40 ⁷⁾		45 ⁷⁾		40 ⁸⁾	30 ⁷⁾		
Kontrakce Z [%]									
Nárazová práce KV [J]	podél min	90			100 ⁸⁾		–		
	napříč min	60			–		60 ⁸⁾		
Tvrdość HB max							215 ⁸⁾		
Modul pružnosti E [GPa]		200							
Rozměr t, d [mm]		≤ 35 ¹⁰⁾				≤ 25 ¹⁰⁾			
Stav		zpevněný C700				zpevněný C800			
Mez kluzu R _p 0,2 [MPa] min		350				500			
Mez pevnosti R _m [MPa]		700–850				800–1000			
Tažnost A [%] napříč min		20				12			
Kontrakce Z [%]		–				–			
Nárazová práce	KV [J] podél min	80				80			
	KV ⁻¹⁹⁶ podél min	50				–			
Modul pružnosti E [GPa]		200							

Min. hodnoty meze kluzu R_p 0,2 a R_p 1,0 a meze pevnosti R_m při zvýšených teplotách (stav po rozpouštěcím žhání)											
Teplota [°C]		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
Mezi kluzu [MPa]	R_p 0,2	165	150	137	127	119	113	108	103	100	98
	R_p 1,0	200	180	165	153	145	139	135	130	128	127
Mez pevnosti R_m [MPa]		430	410	390	385	380	380	380	–	360	–
Hodnoty modulu pružnosti E při zvýšených teplotách											
Teplota [°C]		100		200		300		400		500	
Modul pružnosti E [GPa]		194		186		179		172		165	
Fyzikální vlastnosti											
Hustota ρ [kg . m ⁻³]		Měrná tepelná kapacita c_p [J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]		Teplotní součinitel roztažnosti α [K ⁻¹]		Tepelná vodivost λ_t [W . m ⁻¹ K ⁻¹]		Rezistivita [Ω . mm ² . m ⁻¹]			
8 000		500		16,0.10 ⁻⁶		15		0,75			
Odolnost proti degradačním procesům											
ODOLNOST PROTI MEZIKRYSTALOVÉ KOROZI											
– v dodávaném stavu: ano											
– po zcitlivění: ano											
Technologické údaje											
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ											
rozpouštěcí žhání		1030–1110 °C		ochlazovat ve vodě nebo na vzduchu ¹¹⁾							
TVARĪTELNOST											
teploty tváření		1200–900 °C		ochlazovat na vzduchu							
SVAŘITELNOST											
svařitelná všemi obvyklými postupy.											
Použití											
Části přístrojů a zařízení v chemickém průmyslu, při výrobě celulózy, barev, olejů, mýdel a textilu, dále v mlékárnách a v pivovarech.											
Ostatní vlastnosti											
magnetovatelnost: ne											

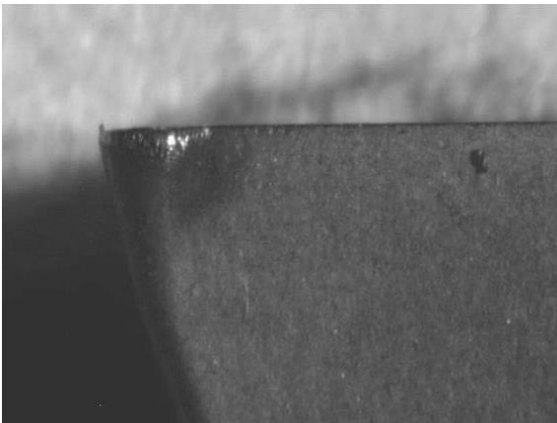
Příloha 2 Fotografie opotřeбенých VBD



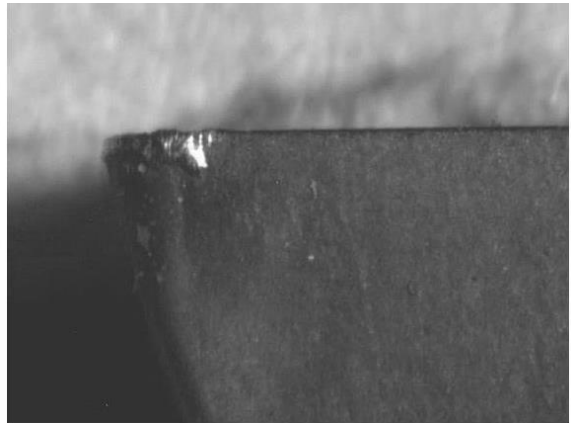
Vasco 6 000 bez nanočastic



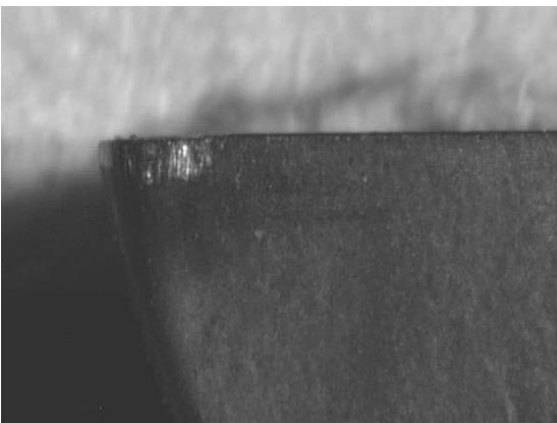
Vasco 6 000 + SiO₂



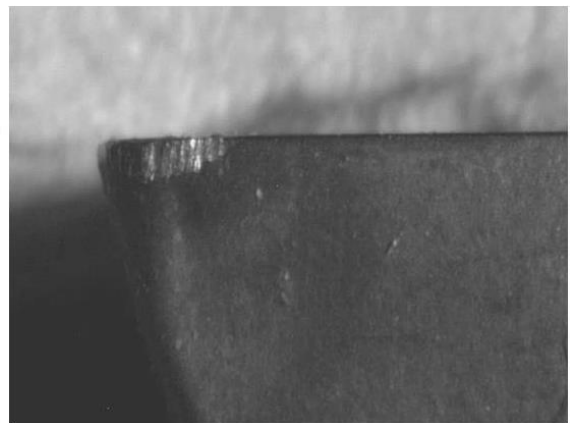
Vasco 6 000 + SiO₂ a PEG



Blasocut BC 25 MD bez nanočastic



Blasocut BC 25MD + SiO₂



Blasocut BC 25 MD + SiO₂ a PEG

Příloha 3 Měření provedená na přístroji Mitutoyo Surftest 2 000 – SV

Příloha 3 je vzhledem ke svému značnému rozsahu nahrána na přiloženém CD.