

Výzkum vlivu změny teploty na parametry drsnosti při broušení

Jiří Mrlík

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří MRLÍK
Osobní číslo: T08632
Studijní program: B 3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Technologická zařízení

Téma práce: Výzkum vlivu změny teploty na parametry drsnosti při broušení

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše z oblasti kryogenního broušení, dokončovacích metod a hodnocení jakosti povrchu součástí
2. Broušení materiálů při různých teplotách
3. Měření určených parametrů drsnosti
4. Statistické vyhodnocení a porovnání obrábění při použitých teplotách

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Luboš Rokyta

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

13. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

25. května 2012

Ve Zlíně dne 8. února 2012



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno: Mrlík Jiří

Obor: Technologická zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 25.5.2012



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Předkládaná bakalářská práce pojednává o vlivu teploty materiálu a druhu chladiva při obrábění broušením na jakost konečného povrchu. Teoretická část obsahuje souhrn z oblasti dokončovacích metod, strojů používaných pro dokončovací metody, kryogenního broušení, využití řezných kapalin a hodnocení jakosti povrchu součástí. Praktická část práce obsahuje popis experimentu, jeho cenové zhodnocení a vyhodnocení výsledků experimentu.

Klíčová slova: kryogenní chlazení, dokončovací metody, jakost povrchu, broušení

ABSTRACT

This Bachelor thesis is about influence of variable temperature and kind of coolant to surface roughness parameters during grinding. The theoretical part includes summary of cutting finishing methods, machines to their use, cryogenic grinding, using of cutting liquids and evaluation of surface roughness parameters of components. The practical part includes description of experiment, its financial assessment and appraisal of experiment results.

Keywords: cryogenic cooling, cutting finishing methods, surface quality, grinding

PODĚKOVÁNÍ:

Tímto děkuji vedoucímu práce Ing. Luboši Rokytovi za rady při vypracování, poskytnutí podkladových materiálů a celkovou trpělivost. Dále děkuji Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Šálkovi za pomoc při uskutečnění praktické části práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 PŘEHLED DOKONČOVACÍCH METOD	13
1.1 ABRAZIVNÍ DOKONČOVACÍ METODY	13
1.1.1 Honování	13
1.1.2 Lapování.....	15
1.1.3 Superfinašování	17
1.1.4 Broušení	19
1.1.5 Leštění	22
1.2 BEZTRÍSKOVÉ DOKONČOVACÍ METODY	22
1.2.1 Válečkování.....	23
1.2.2 Kuličkování	24
1.2.3 Vyhlazování povrchu diamantem	25
2 ŘEZNÉ PROSTŘEDÍ	27
2.1 TECHNOLOGICKÉ POŽADAVKY NA ŘEZNÁ MÉDIA	27
2.2 ŘEZNÉ KAPALINY	28
2.2.1 Vodní roztoky.....	29
2.2.2 Emulzní kapaliny	29
2.2.3 Zušlechtné řezné oleje	29
2.2.4 Syntetické a polysyntetické kapaliny	30
2.3 PODCHLAZOVÁNÍ ŘEZNÉ KAPALINY	30
2.4 PLYNNÉ ŘEZNÉ PROSTŘEDÍ.....	30
3 KRYOGENNÍ OBRÁBĚNÍ	32
4 HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU SOUČÁSTI	33
4.1 STRUKTURA POVRCHU	33
4.1.1 Základní pojmy:	35
4.2 DEFINICE PARAMETRŮ PROFILU DRSNOSTI POVRCHU	37
4.2.1 Amplitudové parametry	37
4.2.2 Frekvenční parametry.....	40
II PRAKTICKÁ ČÁST	42
5 NÁVRH ZAŘÍZENÍ	43
5.1 CENOVÉ ZHODNOCENÍ.....	46
6 EXPERIMENT	47
6.1 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ.....	47
6.2 BROUŠENÍ	48
6.2.1 Vzorky	48
6.2.2 Řezné podmínky.....	49

6.3	PRŮBĚH EXPERIMENTU	49
6.4	MĚŘENÍ TEPLoty	50
6.5	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	50
ZÁVĚR	56	
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	57	
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	58	
SEZNAM OBRÁZKŮ	59	
SEZNAM TABULEK	61	

ÚVOD

Vývoj materiálů a jejich aplikací sahá až k dávným kořenům samotného lidského bytí. Člověk se snaží si ulehčit život a díky tomu vyvíjí stále nové a dokonalejší materiály. S rozvojem těchto materiálů roste i obtížnost jejich zpracování. Proto se neustále rozvíjí i technologie obrábění obtížně obrobitelných materiálů.

Předmětem této práce je zkoumání vlivu teploty během obrábění materiálu broušením na jakost výsledného povrchu obrobku. Výsledky dopomohou k určení, jakým technologickým směrem se dále ubírat k získání vyšší produktivity či stejných výsledků s menší spotřebou zdrojů.

Předkládaná studie je rozdělena do dvou částí: teoretické a praktické. Teoretická část obsahuje stručný souhrn základních dokončovacích metod s přehledem strojů k těmto metodám používaných. Následuje úvod k popisu rezného prostředí rozsahem a obsahem vztaženým k praktické části práce. Část teoretické části se věnuje obrábění v kryogenním prostředí.

V praktické části práce je provedena analýza drsnosti povrchu tří vzorků po broušení za různých podmínek. Experiment spočívá v obrábění vzorků broušením bez chlazení – tzv. suché obrábění, po té s chlazením pomocí plynného CO₂ a nakonec s chlazením reznou kapalinou. V konečné analýze porovnáme vhodnost a nákladnost jednotlivých druhů chlazení vzhledem k dosaženým výsledkům drsnosti povrchu vzorků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PŘEHLED DOKONČOVACÍCH METOD

Dokončovací metody slouží k dosažení:

- nejvyšší jakosti povrchu (až Ra 0,02)
- rozměrové přesnosti (až IT 2-3)
- geometrické přesnosti

Dokončovací metody dělíme na:

- abrazivní
 - honování
 - lapování
 - broušení
 - superfinišování
- beztrískové
 - válečkování
 - kuličkování
 - vyhlazování povrchu diamantem

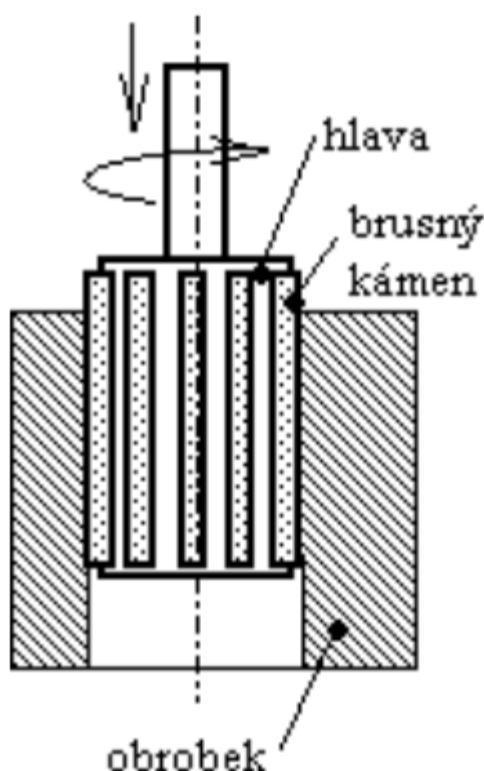
1.1 Abrazivní dokončovací metody

Abrazivní metody obrábění jsou charakterizovány použitím nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu a představují nejvíce využívané aplikace při obrábění strojírenských součástí, u kterých jsou požadovány vysoké parametry přesnosti obroběných ploch. [1]

1.1.1 Honování

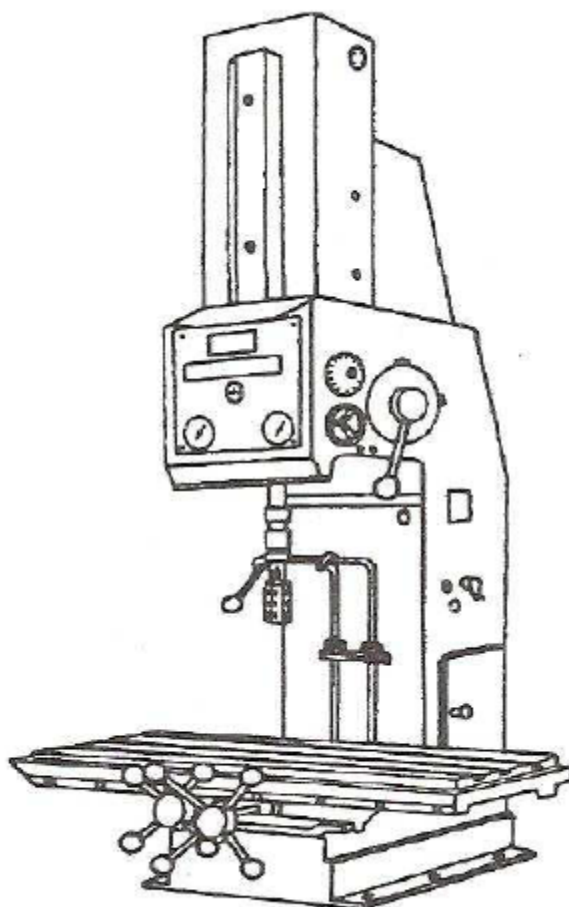
Honování je dokončovací metoda obrábění, při které se jakost obroběných povrchů zvyšuje řezným účinkem jemného brusiva. Nejčastěji se používá pro dokončování vnitřních válcových ploch (vnitřní honování). Honováním se dokončují hydraulické, pneumatické a brzdové válce, válce spalovacích motorů, bubny, pouzdra, ložiska vřeten apod. Honovat lze kalené i nekalené oceli, litiny, hliníkové slitiny, neželezné kovy, slinuté karbidy, tvrdé povlaky a další materiály. [1]

V podstatě jde o broušení malou rychlostí jemným brusivem, vázaným v honovacích kamenech (lištách) upevněných v honovací hlavě, při intenzivním použití řezných kapalin. Při vnitřním honování vykonávají honovací kameny v díře složený šroubovitý pohyb, který je tvořen kombinací rotačního pohybu honovací hlavy a posuvného vratného pohybu ve směru osy. Dráhy zrn brusiva se přitom překrývají a na honovaném povrchu se objevují charakteristické křížové stopy. [1]



Obr. 1 Princip honování

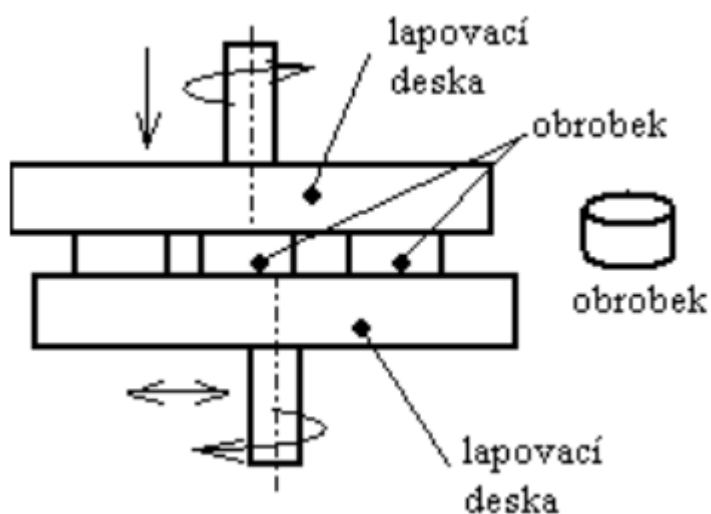
Honovat lze válcové díry průchozí i neprůchozí, s drážkami různých tvarů a velikostí s drážkami různých tvarů a velikostí v rozsahu průměrů 1 až 750 mm a délek až 24 m a s přídatným zařízením i kuželové díry. Předností honování je dosažení vysoké přesnosti geometrického tvaru. Lze jím v rozsahu přídatku odstranit kuželovitost, ovalitu, soudkovitost, nelze však změnit polohu osy díry. [1]



Obr. 2. Svislý jednovřetenový honovací stroj[1]

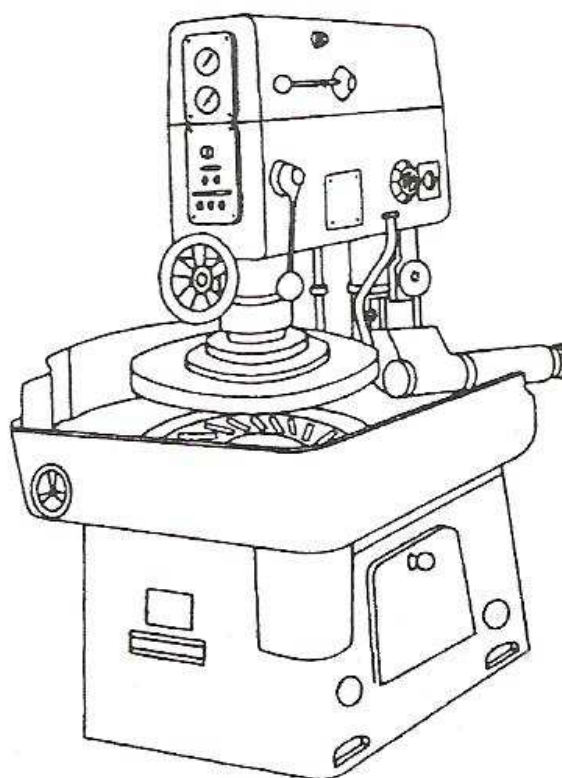
1.1.2 Lapování

Lapování je dokončovací metoda obrábění, kterou se dosahuje nejvyšší rozměrové přesnosti a nejmenší drsnosti povrchu. Používá se pro dokončování rovinných, válcových a tvarových vnějších i vnitřních ploch. Lapují se funkční plochy měřidel (koncové měrky, kalibry), důležitá závitová spojení, ozubeni, součásti motorů automobilů apod. Lapováním lze dokončovat měkké i tvrdé materiály ručně v kusové výrobě, strojně v sériové a hromadné výrobě. [1]



Obr. 3. Princip lapování

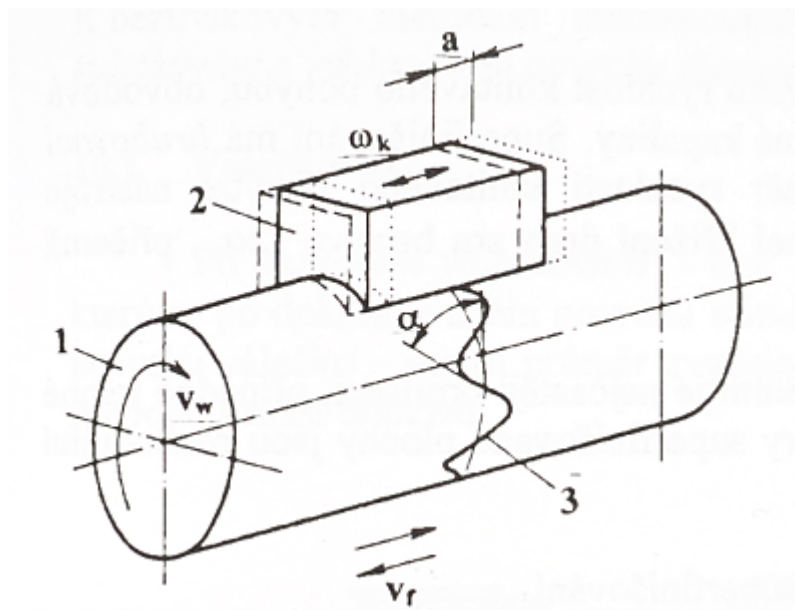
Lapování je zvláštní druh broušení, při němž k úběru materiálu dochází volným brusivem, které se přivádí mezi vzájemně se pohybující lapovací nástroj a obrobek (u měkkých lapovacích nástrojů mohou být zrna brusiva zamačkána nebo jinak upevněna v lapovacím nástroji). Lapováním lze dokončovat měkké i tvrdé materiály ručně v kusové výrobě, strojně v sériové a hromadné výrobě. Lapovací nástroje mají negativní tvar lapovaných ploch. Nevýhodou lapování je velká pracnost, malá produktivita a vysoké náklady na jednotku plochy v porovnání s ostatními dokončovacími metodami obrábění. Proto se lapování nahrazuje (kde to je možné z hlediska požadované přesnosti a drsnosti povrchu) honováním nebo superfinišováním. [1]



Obr. 4. Svislý lapovací stroj pro lapování vnějších válcových a rovinných ploch[2]

1.1.3 Superfinašování

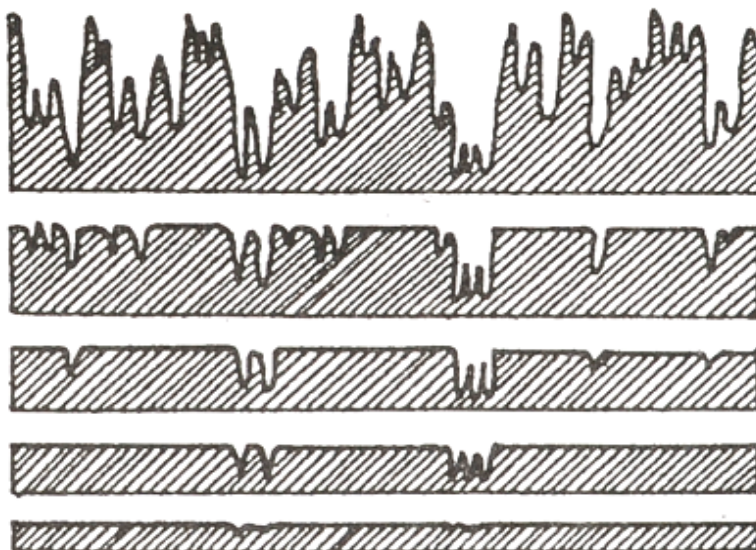
Superfinašování je vysoce produktivní metoda dokončovacího obrábění vnějších a vnitřních rotačních, tvarových a rovinných ploch. Nejvíce se uplatňuje při dokončování valivých ložisek a součástí v automobilovém průmyslu. Superfinašují se součásti z kalené i nekalené oceli, litiny, slitin těžkých kovů a plastů. [2]



Obr. 5 Kinematické schéma superfínování[1]

1-obrobek; 2-superfínovací kámen; 3-stopa po jednom zrně brusiva; v_w -rychlost otáčení obrobku; v_f -rychlost podélného posuvu obrobku; a -amplituda; ω_k -frekvence kmitavého pohybu; α -úhel sklonu stopy po jednom zrně brusiva

Superfínování je zvláštní druh broušení, při němž se z dokončovaného povrchu odřezávají vrcholky nerovnosti velmi jemnými zrní brusivého nástroje (superfínovacího kamene). Superfínování je charakterizováno kmitovým pohybem superfínovacího kamene, definovanou silou vyvolávající nízký tlak na obráběnou plochu a malými řeznými rychlostmi. [2]



Obr. 6 Průběh superfinišovacího procesu – zvětšování nosného podílu[1]

1.1.4 Broušení

Broušení se používá zejména pro obrábění součástí s vyššími požadavky na přesnost rozměrů a tvarů a jakost povrchu. Dále se broušení uplatňuje při obrábění materiálů, které není možné jinými obráběcími metodami obrobit, nebo je brousicí metoda hospodárnější než jiné. [1]

Broušení se od frézování odlišuje především různorodostí geometrického tvaru brousících zrn a jejich nepravidelným rozmístěním po ploše brousícího nástroje. Úhel čela zrn se mění a bývá vesměs záporný. Brousicí proces se uskutečňuje při vysokých řezných rychlostech (30 až 100 m.s^{-1}) a při malých průřezech třísky (10^{-3} až 10^{-5} mm^2). [1]

Od jiných způsobů obrábění se práce brousícího kotouče liší schopností tzv. samoostření. Tato vlastnost brousícího kotouče souvisí s poměrně málo pevným ukotvením brousícího zrna ve vazbě kotouče. V důsledku zvýšení řezných sil na otupených zrnech se tato vylomí a jejich funkci přebírají zrna neotupená. [1]

Podle tvaru obrobeného povrchu a způsobu jeho vytváření se rozliší:

- rovinné broušení (výsledkem je rovinná plocha),
- broušení do kulata (výsledkem je rotační povrch),
- broušení na otáčivém stole (broušení s rotačním posuvem),

- tvarovací broušení (broušení závitů, ozubených kol apod.),
- kopírovací broušení (broušení s řízenou změnou posuvu, NC stroje),
- broušení tvarovými broušícími kotouči (profil broušícího kotouče určuje konečný profil obrobku). [1]

Podle aktivní části broušícího kotouče se specifikuje:

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

Podle vzájemné polohy broušícího kotouče a obrobku se charakterizuje :

- vnější broušení (broušení vnějšího povrchu obrobku),
- vnitřní broušení (broušení vnitřního povrchu obrobku).

Podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k broušícímu kotouči (termínem „stůl“ se označuje pohyblivá část broušícího stroje vzhledem k jeho základu, na stůl brusky se upevňuje obrobek nebo broušící vřeteník) se definuje:

- axiální broušení (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s osou kotouče),
- tangenciální broušení (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě D),
- radiální broušení (hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě D je radiální vzhledem ke kotouči),
- obvodové zápichové broušení (posuv stolu je plynulý radiální),
- čelní zápichové broušení (posuv stolu je plynulý axiální). [1]

BROUŠENÍ OBVODOVÉ				
		radiální	tangenciální	axiální
Rovinné – pohyb stolu	přímočarý			
	otáčivý			
Do kulata	vnější			
	vnitřní			

Obr. 7 Vybrané způsoby obvodového broušení[1]

		BROUŠENÍ ČELNÍ		
		radiální	tangenciální	axiální
Rovinné – pohyb stolu	přímočarý			
	otáčivý			

Obr. 8 Vybrané způsoby čelního broušení[1]

n_s – frekvence otáčení broušicího kotouče

n_v – frekvence otáčení obrobku

v_{fa} – axiální rychlost posuvu stolu

v_{fr} – radiální rychlost posuvu stolu

v_{ft} – tangenciální rychlost posuvu stolu

1.1.5 Leštění

Používá se k docílení lesklého povrchu a to jak ručně, tak i strojově. Tato dokončovací metoda nezlepší tvarovou ani rozměrovou přesnost.

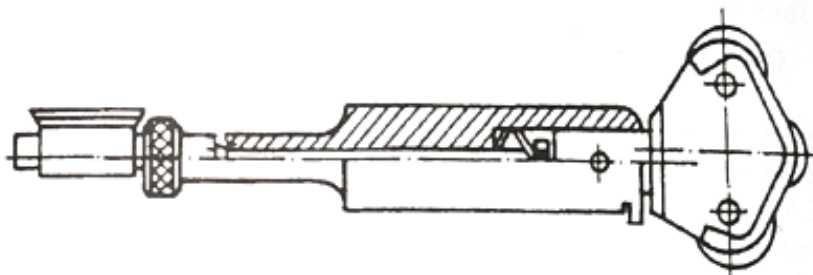
1.2 Beztržkové dokončovací metody

Beztržkové dokončování obrobených povrchů spočívá v plastické deformaci povrchové vrstvy. Tato deformace probíhá do hloubky několika setin až desetin milimetrů, čímž dochází ke zlepšování parametrů struktury povrchu a ke zvýšení pevnosti a tvrdosti. V povrchové vrstvě vzniknou tlaková napětí a zvýší se mez únavy, odolnost proti opotřebení a odolnost proti korozi. [2]

1.2.1 Válečkování

Statické válečkování

Při statickém válečkování působí na dokončovanou plochu váleček, který se po dokončovaném povrchu odvaluje. Výsledný efekt závisí na průměru aktivního povrchu válečku - menší průměr zvyšuje hloubku zpevnění, většími průměry se dosahuje povrchů s nižší drsností. [2]



Obr. 9 Válečkovácí hlava pro statické válečkování vnějších válcových ploch[2]

Válečkováním se změní rozměr součásti o 0,01 až 0,03 mm, dosahuje se rozměrové přesnosti IT6 až IT8 a drsnosti povrchu $R_a = 0,1$ až $0,4 \mu\text{m}$. [2]

Dynamické válečkování

Při dynamickém válečkování je silový impulz na váleček vyvozen rotujícím trnem nebo kroužkem s vačkovými plochami. [2]

Předností dynamického válečkování je získání kvalitní zpevněné vrstvy.

Drsnost povrchu je horší - dosahuje $R_a = 0,2$ až $0,8 \mu\text{m}$. [2]



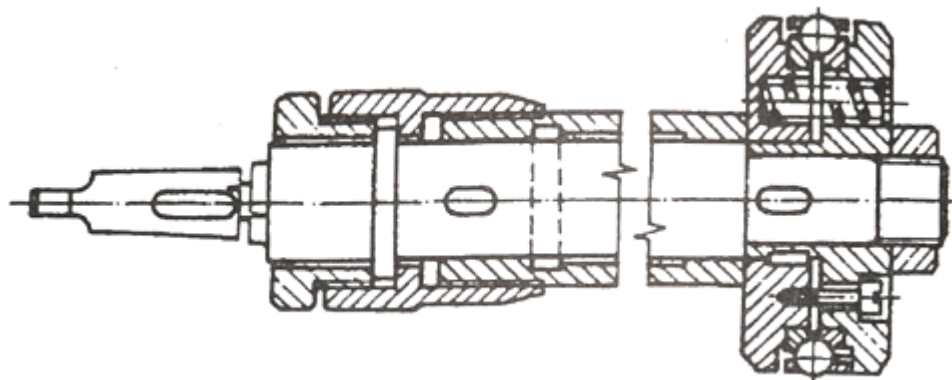
Obr. 10 Princip dynamického válečkování[2]

1.2.2 Kuličkování

Statické kuličkování

Statické kuličkování je podobné statickému válečkování, ale místo válečku je tvářecím nástrojem kulička uložená v držáku nebo na kroužku tak, aby se plynule odvalovala po povrchu. [1]

Kuličkováním se dokončují vnější a vnitřní rotační plochy, tvarové rotační plochy a rovinné plochy u součástí z tvárných materiálů s pevností do 1000 MPa a tažností minimálně 12%. Vzhledem k menší stykové ploše kuličky s dokončovaným povrchem je přítláčná síla menší, ale dochází ke kopírování nerovností povrchu. Dosahovaná rozměrová přesnost je IT6 až IT8 a výsledná drsnost povrchu $R_a = 0,1$ až $0,4\mu\text{m}$. [1]



Obr. 11 Kuličkovácí hlava pro statické kuličkování děr[1]

Dynamické kuličkování

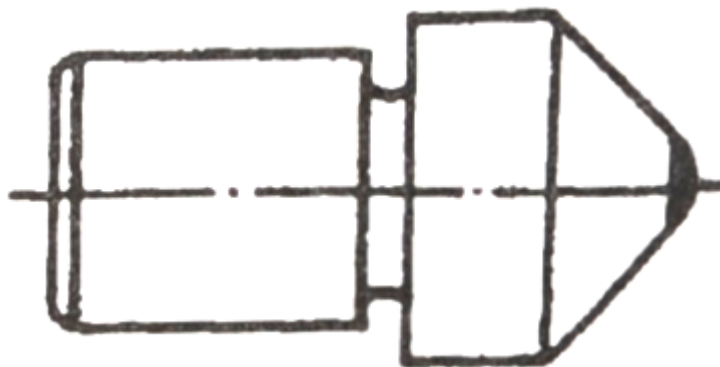
Dynamické kuličkování se používá pro zpevňování tvarově složitých součástí, při kterém se na dokončovaný povrch vrhá proud kuliček o průměru 0,3 až 3 mm z kalené oceli nebo bílé litiny rychlostí až $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dosahovaná drsnost povrchu $R_a = 0,8$ až $1,6 \mu\text{m}$. [1]

Vibrační kuličkování

Vibrační kuličkování se používá pro dokončování tvarově složitých součástí. Dokončování se realizuje nárazy kuliček na součásti umístěné v nádobě, které je udělován kmitavý pohyb ve třech směrech. [1]

1.2.3 Vyhlazování povrchu diamantem

Pro beztřískové dokončování tepelně zpracovaných ocelí se používá vyhlazování povrchu diamantem. V tomto případě nedochází k odvalování nástroje. Drsnost vyhlazené plochy dosahuje po jednom až třech průchodech až $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. [1]



Obr. 12 Diamantový vyhlazovací nástroj[1]

2 ŘEZNÉ PROSTŘEDÍ

Prostředí v zóně řezání má významný vliv na kvantitativní, kvalitativní a ekonomické parametry řezného procesu. Řezné prostředí je vytvářeno řeznými (procesními) médii, která jsou vyrobena a užívána tak, aby měla chladicí, mazací a čisticí účinek. A jsou to:

- pasty
- kapaliny
- mlhy
- plyny

2.1 Technologické požadavky na řezná média

Chladicí účinek - Chladicím účinkem se rozumí schopnost řezného média odvádět teplo z místa řezu. Tuto schopnost má každé médium smáčecí povrch, za předpokladu, že mezi povrchem obrobku a médiem existuje tepelný spád. Odvod tepla vzniklého při řezání se uskutečňuje tím, že řezné médium obklopuje nástroj, třísky i obrobek a přejímá část vzniklého tepla. Důsledkem chladicího účinku je snížení teploty řezání, což má příznivý vliv na opotřebení a trvanlivost nástroje i na jakost povrchové vrstvy obrobené plochy (nižší hodnoty zbytkových napětí).

Mazací účinek - Mazací účinek je umožněn tím, že médium vytváří na povrchu obrobku a nástroje vrstvu, která brání přímému styku povrchů a snižuje tření, ke kterému dochází mezi nástrojem a obrobkem. Mazací účinek znamená zmenšení řezných sil, zmenšení spotřeby energie a také zlepšení jakosti obrobeného povrchu. Mazací účinek řezného média se uplatní zejména u dokončovacích obráběcích operací, ale také při protahování, výrobě závitů nebo výrobě ozubení.

Čisticí účinek - Čisticí účinek řezného média spočívá zejména v odstraňování třísek z místa řezu. Čisticí účinek je významný zejména při broušení (zlepšení řezivosti broušícího kotouče v důsledku vyplavování zanesených pórů, zabránění slepování částic třísky a usnadnění jejich usazování), řezání závitů nebo vrtání hlubokých děr.

Provozní stálost - Měřítkem provozní stálosti řezného média je doba jeho výměny. Dlouhá doba mezi jednotlivými výměnami média je podmíněna tím, aby se jeho vlastnosti po ce-

lou tuto dobu neměnily. Stárnutí řezného média olejového typu se projevuje tvořením pryskyřičnatých usazenin, které mohou způsobit i poruchu stroje. Produkty stárnutí mají vliv i na zhoršování funkčních vlastností média, jeho rozklad, zmenšení mazacího účinku, ztrátu ochranných schopností, korozi a hnilobný rozklad.

Ochranný účinek - Ochranný účinek řezného média se projevuje tím, že nenapadá kovy a nepůsobuje korozi. Tento požadavek je důležitý proto, aby nebylo nutné výrobky mezi jednotlivými operacemi konzervovat a aby byl obráběcí stroje chráněny před korozi. Dalším důležitým požadavkem je, aby řezné médium nerozpouštělo nátěry obráběcích strojů a nebylo agresivní vůči gumovým těsněním.

Zdravotní nezávadnost - Požadavek na zdravotní nezávadnost řezného média vychází z toho, že při práci na obráběcích strojích s ním obsluhující pracovník přichází do přímého styku. Proto médium nesmí být zdraví škodlivé, nesmí obsahovat látky dráždící sliznici a pokožku, nesmí být jedovaté a nesmí zamořovat ovzduší nepříjemným zápachem.

Přiměřené provozní náklady - Přiměřené provozní náklady souvisí především se spotřebou řezného média. Při rozboru nákladů je nutné nejdříve posoudit jejich vliv na proces obrábění (průběh plastických deformací v zóně řezání, opotřebení, trvanlivost, ostření nebo výměna nástroje, změny struktury povrchu obrobené plochy, spotřeba energie). Po tomto rozboru musí následovat hodnocení řezného média s ohledem na jeho provozní stálost, spotřebu, výměnu a náklady na likvidaci. Jedině podrobný technicko-ekonomický rozbor může rozhodnout o vhodnosti určitého druhu řezného média. Hodnocení podle cenových rozdílů je sice jednoduché, ale zcela nedostačující, protože cena řezného média není tím hlavním parametrem, který by rozhodujícím způsobem ovlivňoval ekonomii obrábění. [6]

2.2 Řezné kapaliny

Řezné kapaliny lze členit na kapaliny s převažujícím chladicím účinkem a kapaliny s převažujícím mazacím účinkem. Toto rozdělení však přesně nevystihuje sortiment kapalin, které jsou v současné době na trhu. Stále více se totiž projevuje snaha zvyšovat mazací účinky i u řezných kapalin s převažujícím chladicím účinkem. Všechny moderní druhy řezných kapalin tento požadavek plní, čímž je prakticky rozdíl mezi oběma skupinami stírá.

Řezné kapaliny se rozdělují na vodní roztoky, emulzní kapaliny, mastné oleje, zušlechtěné řezné oleje, rostlinné oleje (ekologicky nezávadné) a syntetické kapaliny. Mezi druhy řezných (procesních) kapalin můžeme zařadit:

- vodní roztoky
- emulzní kapaliny
- zušlechtěné řezné oleje
- syntetické a polysyntetické oleje [6]

2.2.1 Vodní roztoky

Vodní roztoky jsou nejjednodušší a nejlevnější řezné kapaliny, neposkytují však žádné další výhody. Voda, která je jejich základem, vyžaduje řadu úprav - změkčování a přidávání přísad proti korozi (kalcinová soda trinatriumfosfát, triethanolamin), pro zlepšení smáčivosti a proti pěnivosti. Vodní roztoky mají velmi dobrý chladicí a čisticí účinek, ale téměř žádný mazací účinek.

2.2.2 Emulzní kapaliny

Emulzní kapaliny tvoří disperzní soustavu dvou vzájemně nerozpustných kapalin, z nichž jedna tvoří mikroskopické kapky, rozptýlené v kapalině druhé (olej ve vodě). Aby toto bylo umožněno, je třeba do této soustavy přidat ještě třetí složku, tzv. emulgátor zmenšující mezipovrchové napětí emulgovaných kapalin, stabilizující emulzi a zabraňující koagulaci jemně rozptýlených částic oleje ve vodě.

Emulzní kapaliny jsou nejčastěji používanými řeznými kapalinami, tvoří asi 80 % jejich celkového objemu.

2.2.3 Zušlechtěné řezné oleje

Jsou to kapaliny na bázi minerálních olejů. Přísady, které se používají (mastné látky, organické sloučeniny a pevná maziva), zvyšují jejich tlakovou únosnost a mazací vlastnosti. Mastné látky jsou zmýdelnitelné mastné oleje, mastné kapaliny nebo syntetické estery. Tyto přísady zvětšují přilnavost oleje ke kovu a zlepšují jeho mazací schopnosti, ne však za extrémních tlaků.

2.2.4 Syntetické a polysyntetické kapaliny

Tento druh řezných kapalin se vyznačuje velkou provozní stálostí. Většinou jsou rozpustné ve vodě a mají dobré chladicí, mazací a ochranné účinky.

Syntetické řezné kapaliny neobsahují minerální oleje, ale jsou složeny z rozpouštědel - glykolů, které ve vodě emulgují, nebo se rozpustí. Aplikace syntetických řezných kapalin má proti kapalinám na bázi oleje ekonomické

výhody a navíc zajišťuje rychlé odvádění tepla, dobrý čistící účinek a jednoduchou přípravu.

V syntetických řezných kapalinách je možné rovněž rozptýlit oleje, čímž vznikají polysyntetické řezné kapaliny, které mají příznivější mazací schopnosti[6]

2.3 Podchlazování řezné kapaliny

Podchlazování řezné kapaliny na teplotu nižší než je teplota okolí přispívá ke zvýšení trvanlivosti nástrojů. Běžné druhy řezných kapalin mohou být při zachování mazacích vlastností podchlazeny na $5\div 7$ °C, oleje potom na $15\div 20$ °C. Podchlazení na nižší teploty je omezeno stálostí řezné kapaliny u emulzí a houstnutím u řezných olejů. Snížení teploty řezné kapaliny pod bod mrazu může přinést další zvýšení výkonu obrábění, je však nutné použít řeznou kapalinu speciálního složení. [6]

2.4 Plynné řezné prostředí

Plynné látky se jako řezná média běžně nepoužívají, protože mají relativně nízký chladicí účinek, problematický čistící účinek a žádný mazací účinek. Některé obráběné materiály, případně nástrojové materiály se však chladí vzduchem, přiváděným pod tlakem do místa řezu. U prvních slinutých karbidů a řezných keramik bylo povoleno výhradně chlazení vzduchem, až na základě pozdějšího rozvoje technologie výroby umožnil výrobcům nástrojů doporučovat pro tyto materiály i použití řezných kapalin.

Jedním z účinných způsobů chlazení plynem je chlazení stlačeným CO₂ (tenký paprsek plynu se do místa řezu přivádí pod tlakem $0,5\div 7,0$ MPa), doporučováno např. pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Tato metoda má řadu nevýhod, k nimž patří především vysoké náklady na CO₂, jisté nebezpečí při jeho používání a nutnost dokonalého odsávání a větrání pracoviště.

Zvláštním případem aplikace plynného řezného prostředí je tzv. suché obrábění, kdy řezným prostředím je atmosférický vzduch. Rozšiřování tohoto způsobu obrábění souvisí s vývojem nových řezných materiálů, které nevyžadují chlazení a přesto jsou schopny výkonně a efektivně obrábět. Je ovšem otázkou, zda-li se to dá ve své podstatě považovat za chlazení. [6]

3 KRYOGENNÍ OBRÁBĚNÍ

Kryogenní technika je pracovní obor, který se zabývá tvořením a využíváním nízkých a velmi nízkých teplot. Oblast nízkých teplot začíná na 273,15 K a jeho dolní hranice je v současné době stanovena na cca 10^{-8} K. Vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně rozsáhlou teplotní oblast se vzájemně odlišnou problematikou a technologickými prostředky, je v daném případě účelné ji dělit na základní obory následujícím způsobem:

- teplotní oblast nad 120 K, dosažitelná konvenční chladicí technikou
- oblast nízkých teplot v intervalu 5 ÷ 120 K je hlavní doménou kryogenní techniky
- oblast velmi nízkých teplot (tzv. héliové teploty), pro teplotní oblast pod 5,2 K, která odpovídá kritické teplotě varu izotopu ^4He [7]

V minulosti se uskutečnilo mnoho prací empirické povahy s cílem optimalizovat používání chladících a řezných kapalin. V některých z nich byly použity chemicky aktivní chladicí látky s cílem ovlivnit kvalitu obrobeného povrchu při obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Např. Zorev uvádí vliv chemicky aktivních chladících kapalin na drsnost obrobeného povrchu při obrábění slitin na bázi molybdenu. Jako chladicí média byly použity : oxid uhličitý CO_2 , chlorid barnatý BaCl_2 , tetrachlor CCl_4 a chlorid draselný KCl 10%. Největší účinek na kvalitu obrobeného povrchu má BaCl_2 a CCl_4 a projevuje se vylučováním vlivu řezné rychlosti na výšku nerovností profilu obrobeného povrchu a ta se drží konstantní v rozsahu $v = 20 - 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. V důsledku silného toxického účinku jsou možnosti praktického využívání silně omezené.

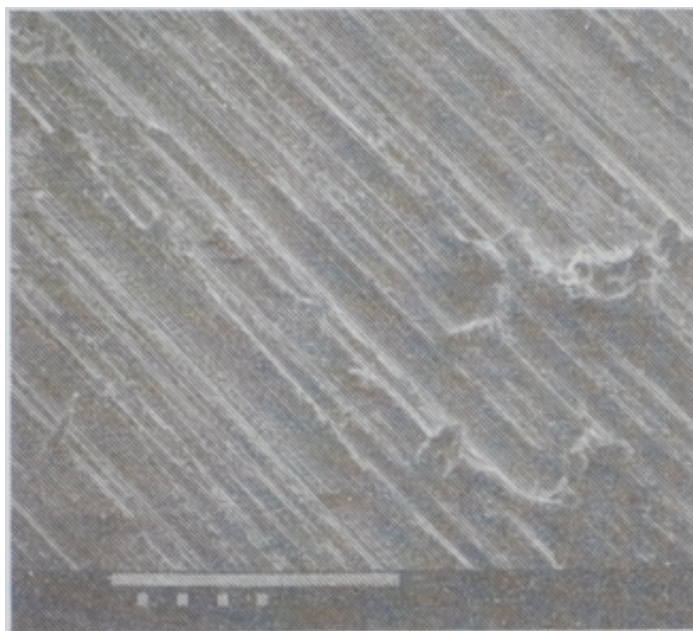
Trvanlivost řezné hrany nástroje se působením kryogenní kapaliny zvyšuje 5 až 6 krát.

Zóna řezání při obrábění v podmínkách chlazení obrobků do oblastí kryogenních teplot využívá jev náhlého poklesu vrubové houževnatosti materiálů při teplotách od -40°C až -196°C . Intenzivní lokální podchlazení vyvolává vratný stav křehkosti. Křehkolomové oddělování třísky je provázeno několika pozitivními účinky – např. zmenšení stlačení, usměrnění napěťových efektů do jednoho směru. Můžeme tedy očekávat snížení energetické náročnosti řezání. [8]

4 HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU SOUČÁSTI

4.1 Struktura povrchu

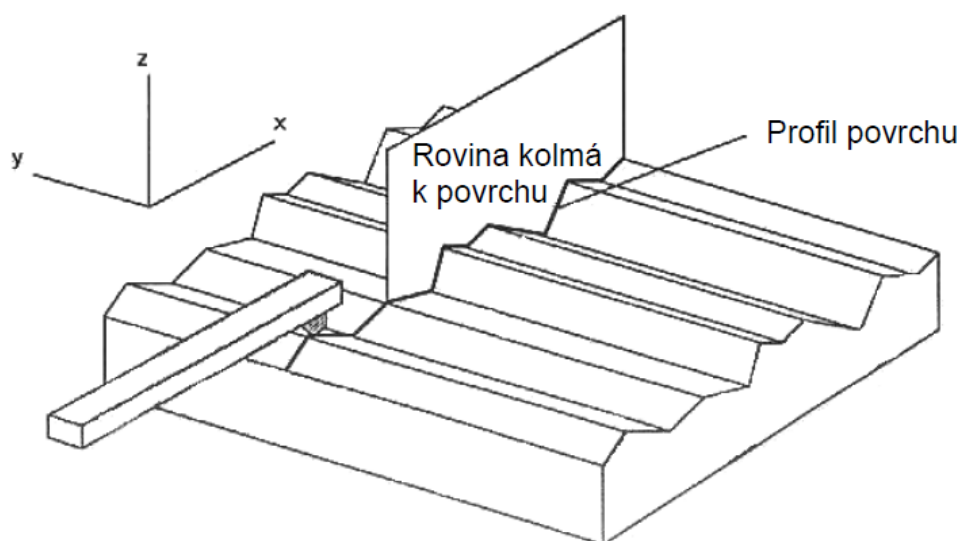
Strukturou povrchu, dříve též nazývanou drsností povrchu, se rozumí část geometrických úchylek skutečného povrchu s poměrně malou vzdáleností sousedních nerovností. [4]



Obr. 13 Pohled na broušený povrch, úsečka pod obrázkem značí 100 μ m[3]

Na strukturu povrchu působí o úchyly tvaru a polohy (přímosti, rovinnosti, kruhovitosti, válcovitosti, kolmosti), úchyly vlnitosti a drsnost.

Zjištění struktury povrchu součásti je řešeno redukcí do roviny řezu rovinou kolmou na povrchu součásti. V rovině řezu je tímto způsobem získán profil povrchu. [4]



Obr. 14 Profilu povrchu[5]

Povrch můžeme hodnotit z různých hledisek:

- úchylek tvaru a polohy
- makronerovností (vlnitost)
- mikronerovnosti (drsnost)
- nanostruktura (měřicí přístroje: AFM, tunelový mikroskop) [4]

Mikronerovnost - jemná nerovnost (*drsnost povrchu*) - je dána stopami, které zanechává řezný nástroj, případně brusivo[4]



Obr. 15 Znáznornění profilu mikronerovnosti[4]

Obr. 15.

Makronerovnost - rozlehlejší periodická nerovnost (*vlnitost povrchu*) - nejčastěji způsobují vibrace soustavy *Stroj - Nástroj - Obrobek – Prostředí*[4]



Obr. 16 Znáznornění profilu makronerovnosti[4]

U obrobených povrchů ploch se tyto nerovnosti navzájem překrývají. [4]

4.1.1 Základní pojmy:

- *Tvar*- obecný tvar povrchu při vyloučení drsnosti a vlnitosti (tyto úchytky mohou být způsobeny nedostatečnou tuhostí, špatnou přímostí vodících ploch, nebo teplem vzniklým během výrobního procesu, které může způsobit deformaci obrobené plochy)



Obr. 17 Znáznornění profilu tvaru povrchu[4]

- *Vlnitost*- je ta část textury, na které je nanášena (vytvořena) drsnost. To může být způsobeno chvěním, deformací obrobku a zpevněním materiálu (je spíše považována za vliv stroje, např. nevyváženosti brousícího kotouče, nepřesností vodících částí nebo malou tuhostí).



Obr. 18 Znáznornění profilu vlnitosti[4]

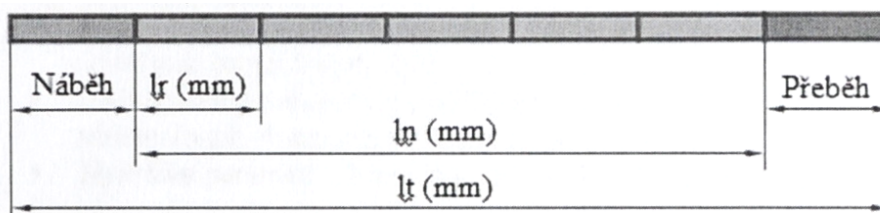
- *Drsnost*- jsou nepravidelnosti, které jsou výsledkem výrobního procesu (je výsledkem vzájemného relativního pohybu mezi nástrojem a obrobkem). Povrch je ale také ovlivněn mechanismem tvoření třísky, což se projevuje například vytrháváním částic materiálu a to ovlivňuje náhodný charakter povrchu. [4]



Obr. 19 Znárodnění profilu drsnosti[4]

Pro měření drsnosti povrchu je třeba stanovit správnou délku základní, tak vyhodnocací délku. Základní délka musí mít dostatečnou velikost, aby v její délce byly měřené parametry statisticky významné, ale zase ne tolik, aby zahrnovala vlivy vlnitosti úchylky tvaru.

- *Základní délka* - délka povrchu, na které jsou snímány parametry; není stejná jako délka zdvihu (posuvu).
- *Vyhodnocovaná délka* - délka, na které je provedeno měření. Tato délka může zahrnovat několik základních délek. Výsledek je potom průměr z celkové měřené délky.
- *Délka zdvihu (posuvu)* - tato délka bývá normálně větší než délka vyhodnocovaná, vzhledem k tomu, že je nutno uvažovat určitou délku náběhu a přeběhu měřícího snímače. [4]



- l_r (mm) - základní délka profilu drsnosti
- l_n (mm) - vyhodnocovaná délka profilu
- l_t (mm) - celková délka snímání
- n (-) - počet základních délek /1; 3; 5/

Obr. 20. Schéma dráhy snímače[4]

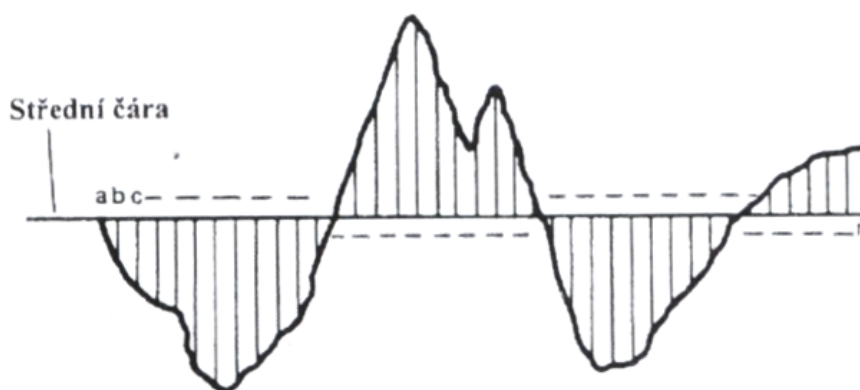
4.2 Definice parametrů profilu drsnosti povrchu

Parametry profilu nerovnosti se dělí do následujících skupin :

- Amplitudové (výškové) parametry, které určují pouze velikosti vrcholů nebo prohlubní, resp. obojí, bez ohledu na rozteč (R_a , R_t , R_p , R_v , R_z);
- Frekvenční parametry (v podélném směru), které se určují pouze při roztečích nepravidelností podél plochy (např. Průměrná šířka prvků profilu R_{sm});
- Hybridní parametry, které jsou určeny kombinací amplitudy a rozteče (např. střední vlnová délka). [4]

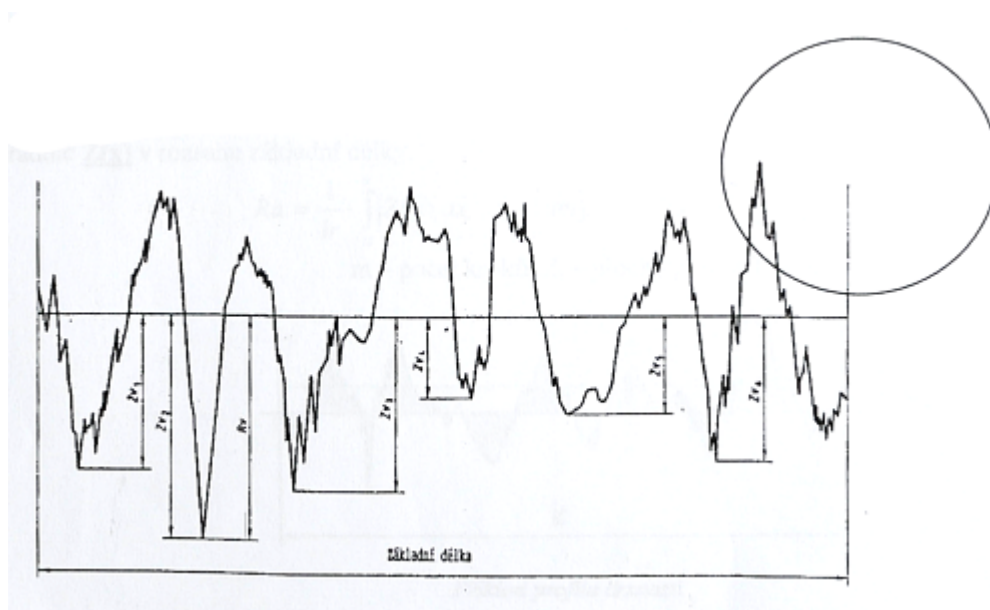
4.2.1 Amplitudové parametry

Střední čára profilu drsnosti - čára probíhající středem vrcholů a prohlubní, kdy součet ploch ohraničených profilem nerovnosti nad touto čarou je roven součtu ploch pod touto čarou. Pro přesnější určení střední čáry se používá výpočet pomocí metody nejmenších čtverců. Poloha vztažné čáry je určena tak, že součet čtverců úchylek této čáry je minimální; její poloha je jiná než poloha střední čáry podle plochy - je totiž jednoznačně určena. [4]



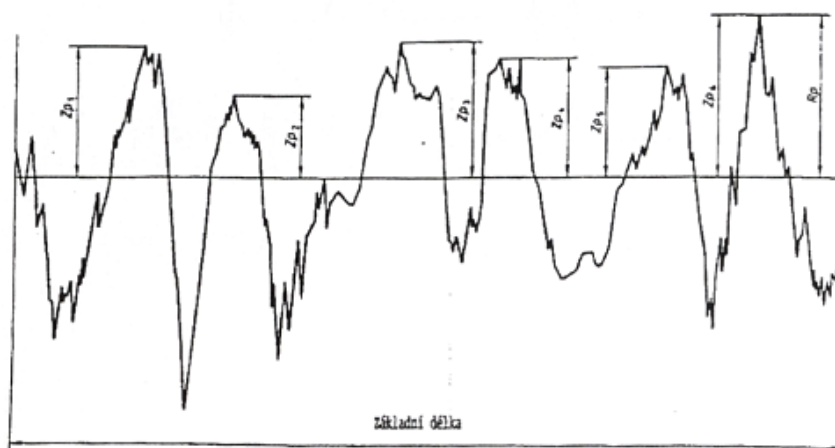
Obr. 21. Schéma dráhy snímače[4]

Prvek profilu – výstupek s přilehlou prohlubní (zakroužkováno)



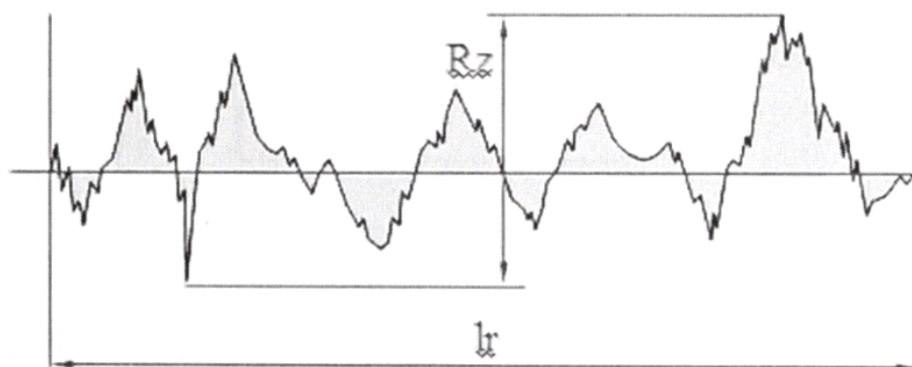
Obr. 22 Prvek profilu[4]

Největší výška výstupku profilu R_p - největší výška výstupku profilu v rozsahu základní délky na základní délce.



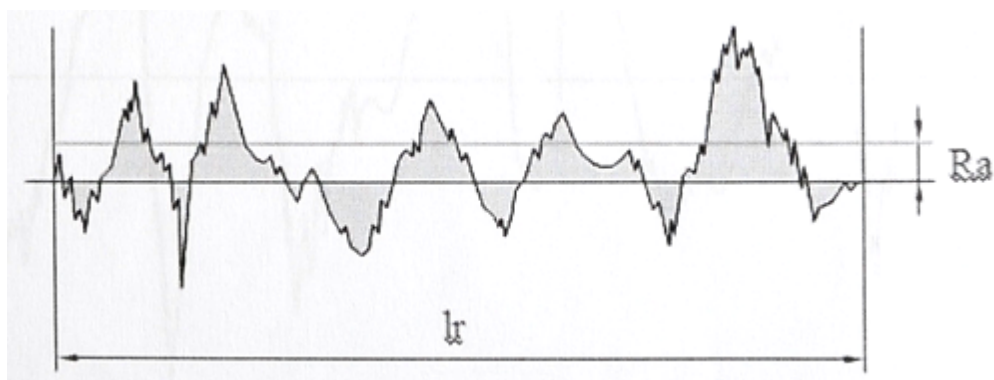
Obr. 23 Největší výška výstupku profilu R_p [4]

Největší výška profilu R_z - součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnížší prohlubně profilu v rozsahu základní délky. Druhý nejčastější parametr, který klient požaduje.



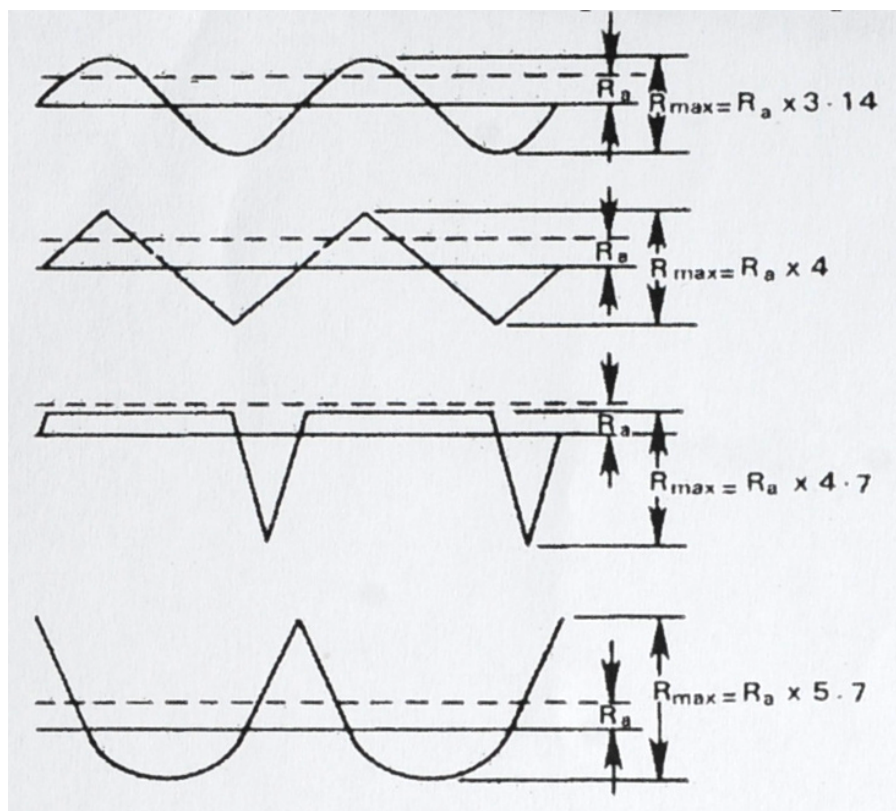
Obr. 24 Největší výška profilu R_z [4]

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a - aritmetický průměr absolutních hodnot sořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.



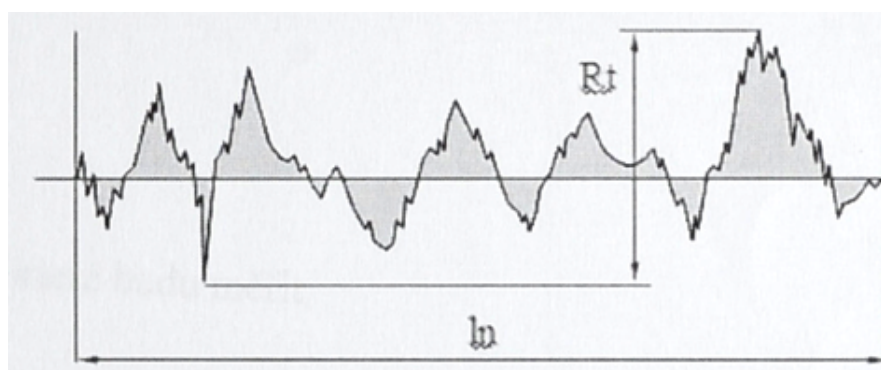
Obr. 25 Aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a [4]

Hodnota parametru R_a nepodává 100% informace o tvaru nepravidelností povrchu. [4]



Obr. 26 Příklady problematických profilů povrchu[4]

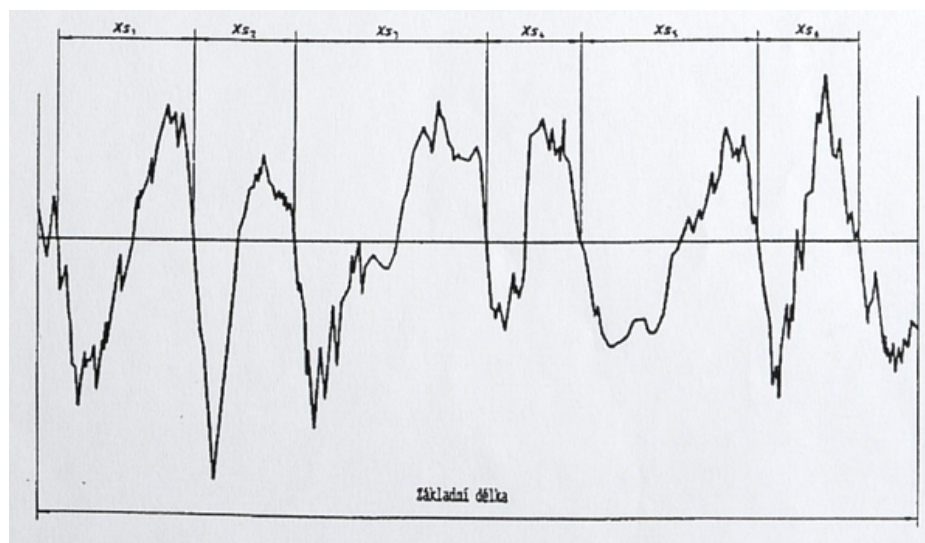
Celková výška profilu R_t - součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnížší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky.



Obr. 27 Celková výška profilu R_t [4]

4.2.2 Frekvenční parametry

Průměrná šířka prvků profilu R_{sm} - aritmetický průměr šířek X_s prvků profilu v rozsahu základní délky. Například při soustružení.



Obr. 28 Průměrná šířka prvků profilu $R_{sm}[4]$

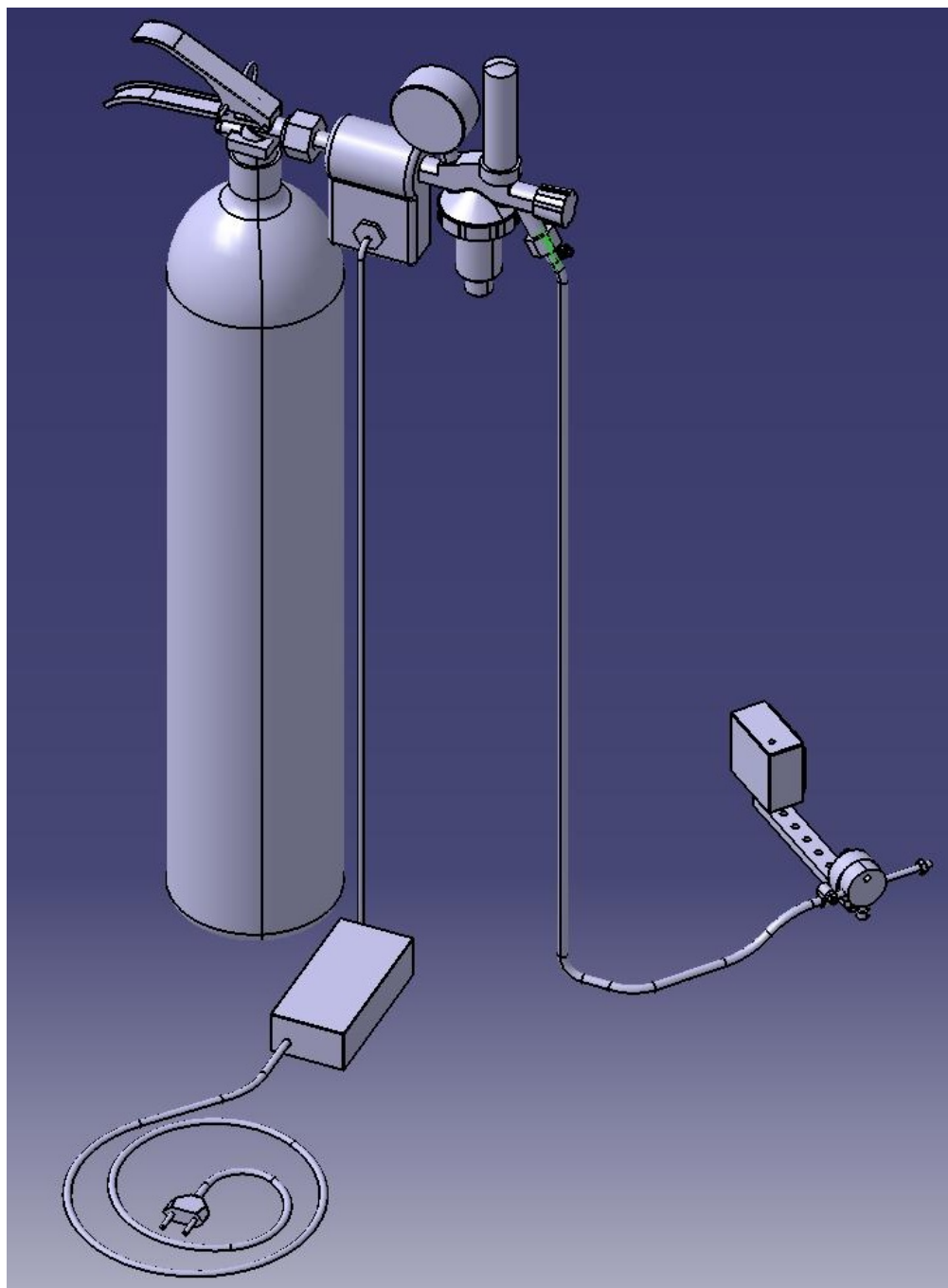
II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 NÁVRH ZAŘÍZENÍ

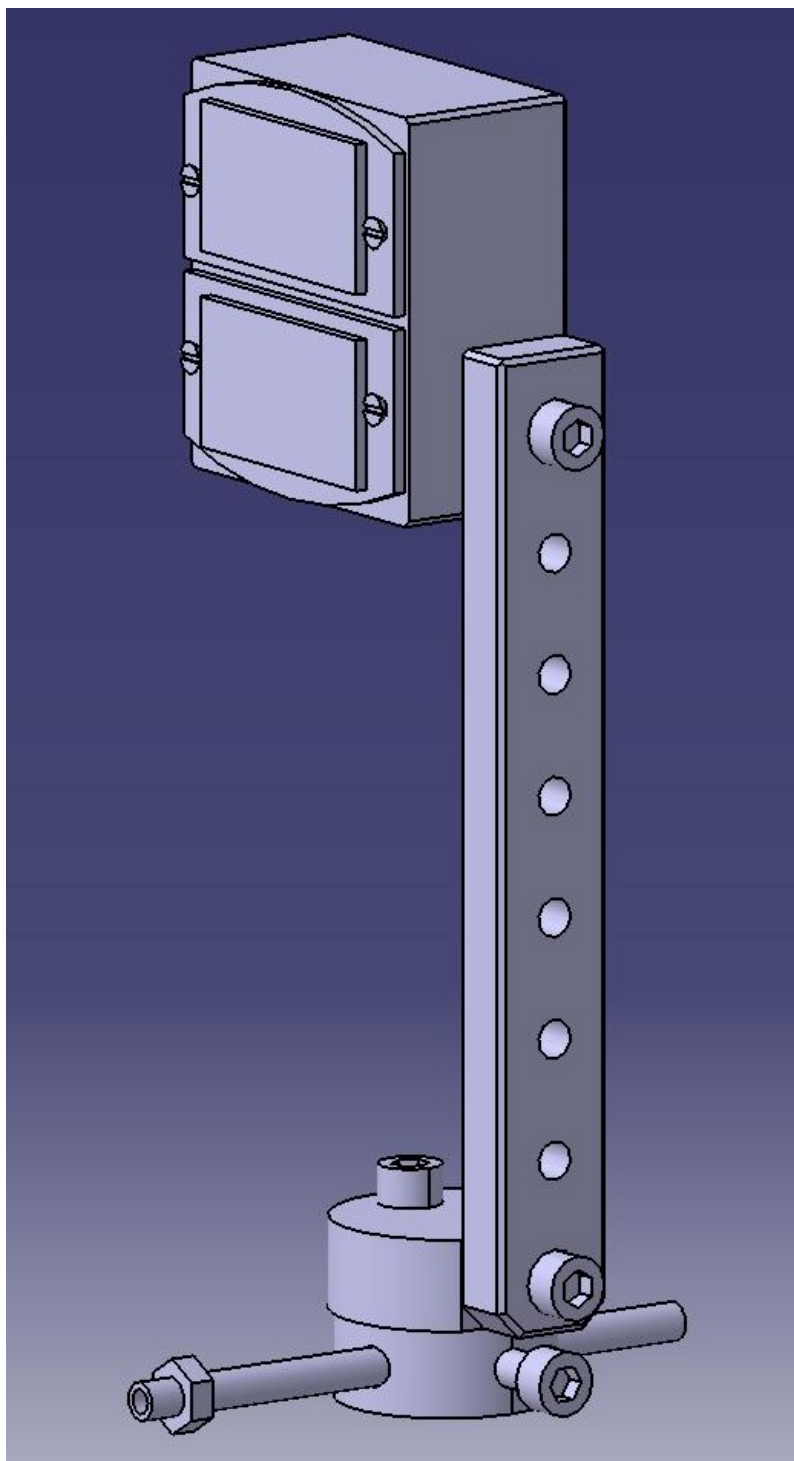
Navrhl jsem zařízení sloužící k chlazení vzorků při jejich broušení s přihlédnutím k dostupným materiálům, vybavení univerzity a co nejnižším nákladům na jeho pořízení. Připravil jsem 2 varianty návrhu. 1. varianta je maximálně podřízena jednoduchosti a nezávislosti. Jako zdroj CO₂ slouží hasičský přístroj typu S5Če, který je vybaven již z výroby vnějším závitem G 3/4", tudíž odpadá nutnost vyrábět jakoukoliv redukci pro připojení redukčního ventilu. Volil jsem redukční ventil CO₂ od výrobce GCE s 24V vyhříváním. Toto řešení zamezí zamrznutí samotného ventilu vlivem průtoku chladicího média, tak i praskání hadic. O 24V napájení se stará univerzální jednoduchý adaptér i-Tec. Jeho výkonné parametry pokrývají s malou rezervou potřeby ohřívače redukčního ventilu. Z redukčního ventilu putuje CO₂ hadicí o světlosti 6mm do velmi jednoduché trysky, která je vybavena vnějším závitem pro možnost nasazení rozdílných hubic. Tím se může docílit velmi rozdílného dopadu média na vzorek. Samotná tryska je umístěna v hliníkovém držáku. Držák a tryska jsou jediné součásti, které je potřeba zakázkově vyrobit. Držák dovoluje polohování trysky dle libosti. Při návrhu držáku jsem se snažil o maximální unifikaci polotovarů, proto k polohování trysky stačí pouze 1 rozměr klíče. Základna držáku je ze spodní strany vybavena dvojicí magnetů původem z harddisků. Ty jsem zvolil, protože jsou velice výkonné, mají předpřipravené díry pro uchycení na držáku a hlavně jsou k dispozici ze starých dosloužených PC, takže jsou vlastně zadarmo. Hadice je dle potřeby uchycena pomocí stahovacích plastových pásek. Hasicí přístroj je uchycen řetězem buď ke zdi nebo ke stroji.

2. varianta je určena k dlouhodobému použití. Většina částí zůstává stejných jako u 1. varianty. Zdroj 24V bude více dimenzován pro dlouhodobé a namáhavé užití, proto volím průmyslový typ. Jako zdroj CO₂ místo hasičského přístroje slouží klasická 15kg tlaková láhev od dodavatele technických plynů. Díky této změně lze výrazně ušetřit a taky uzávěr 15kg lahve je stavěný na opakované užití.

Graficky jsem zpracoval pravděpodobnější variantu určenou pro experiment, čili variantu č.1.



Obr. 29 Grafické zpracování varianty č.1



Obr. 30 Detail trysky a magnetického držáku

5.1 Cenové zhodnocení

Varianta 1:

Hasící přístroj S5Če	1700,- Kč
Redukční ventil CO2 GCE s ohřevem 24V	3550,- Kč
Zdroj 230V>24V i-Tec	750,- Kč
Hadice 2m	75,- Kč
Výroba trysky a držáku, včetně materiálu	750,- Kč
1m řetězu, hmoždinky a jiný spojovací materiál	150,- Kč
Spony hadic, stahovací spony	30,- Kč

Na základě uvedených cen bude 1. varianta orientačně stát 6805,- Kč.

Varianta 2 :

Dlouhodobý pronájem 15kg lahve	1000,- Kč
15kg náplň CO ₂	600,- Kč
Redukční ventil CO2 GCE s ohřevem 24V	3550,- Kč
Průmyslový zdroj 230V>24V	2000,- Kč
Hadice 2m	75,- Kč
Výroba trysky a držáku, včetně materiálu	750,- Kč
1m řetězu, hmoždinky a jiný spojovací materiál	150,- Kč
Spony hadic, stahovací spony	30,- Kč

2. varianta bude stát 8155,- Kč. Tato varianta platí pouze s uzavřením smlouvy o pronájmu tlakové lahve s dodavatelem technických plynů. Poměr cena/1kg CO₂ je u této varianty mnohem výhodnější než u předchozího návrhu. Zařízení je sestaveno i z kvalitnějších komponentů, proto lze očekávat několikanásobně větší životnost.

6 EXPERIMENT

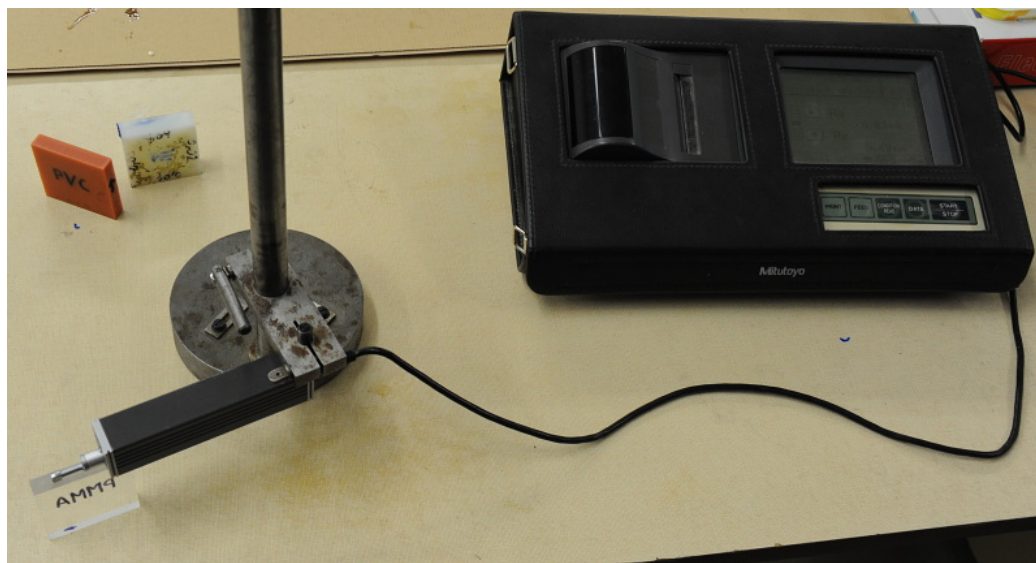
6.1 Použité zařízení

Vzhledem ke složitosti mnou navrhnutého chladicího zařízení a omezeným možnostem laboratoře jsme použili zjednodušenou variantu č.1. Vzorky jsme chladili přímo z hasicího přístroje. Pro chlazení kapalinou jsme použili vestavěný chladicí systém rovinné brusky. K měření teploty vzorků jsme použili bezkontaktní teploměr.

- bruska – BRH 20.03F
- přístroj pro měření drsnosti povrchu Mitutoyo SJ-301
- ruční bezkontaktní teploměr FLUKE 574 (-30°C ÷ 900°C)



Obr. 31 Bruska BRH 20.03F



Obr. 32 Přístroj pro měření drsnosti povrchu Mitutoyo SJ-301



Obr. 33 Ruční bezkontaktní teploměr FLUKE 574

6.2 Broušení

6.2.1 Vzorky

K broušení byly použity 3 vzorky ve tvaru kvádru vyrobené z různých polymerů:

- polyvinylchlorid (PVC)
- polyethylen (PE)

- polymethylmethakrylát (PMMA)

Broušená plocha měla rozměry 50x10mm (PE a PMMA) a 50x15mm (PVC)

6.2.2 Řezné podmínky

Vzorky byly broušeny plochým brousícím kotoučem 250 x 20 x 76 98A 60K 9V 01, jehož složení je umělý korund (Al_2O_3) světle růžový s keramickým pojivem. Jelikož kotouč nebyl nový, jeho skutečný průměr při broušení byl $\varnothing = 230$ mm.

Otáčky kotouče $n_s = 2550 \text{ min}^{-1}$

Hloubka záběru $a_e = 0,04$ mm

Rychlost posuvu $v_f = 14 \text{ m. min}^{-1}$

Jako řezná kapalina byl pro část experimentu zvolen vodou ředitelný biostabilní emulgační obráběcí olej Polybio 420.

Při broušení bez chlazení a s chlazením pomocí kapaliny byla hloubka záběru dodržena. Vlivem smrštění materiálu vzorků při chlazení CO_2 nebyla hloubka záběru dodržena a ani nebyla rovnoměrná.

6.3 Průběh experimentu

Před a bezprostředně po každém broušení jsme měřili a zaznamenávali teplotu povrchu vzorku ručním bezkontaktním teploměrem. Jelikož vzorek vyrobený z PMMA byl průhledný, museli jsme jej nejdříve upravit tak, aby bylo možné na něm měřit teplotu. Nejprve jsme na brusce postupně brousili všechny vzorky bez jakéhokoliv chlazení. Poté následovalo měření drsnosti povrchu vzorků. Dalším krokem bylo broušení s chlazením pomocí CO_2 . Vzorky jsme před broušením zchladili na požadovanou teplotu. Během broušení nebylo technicky možné vzorky chladit. Bohužel pro poslední vzorek (PE) nezbyl dostatek chladiwa a tak se nám ho nepodařilo zchladit na požadovanou hodnotu. Dále následovalo měření drsnosti nově vzniklého povrchu. Poslední broušení probíhalo za přítomnosti řezné kapaliny. Po očištění vzorků od zbytků řezné kapaliny následovalo poslední měření drsnosti povrchu.

6.4 Měření teploty

Teplotu vzorků jsem měřil pomocí ručního bezkontaktního teploměru FLUKE 574. Pro přesné měření jsem nastavil pro všechny vzorky emisivitu 0,95. Zajímal nás zejména rozdíl teplot před a po broušení. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce:

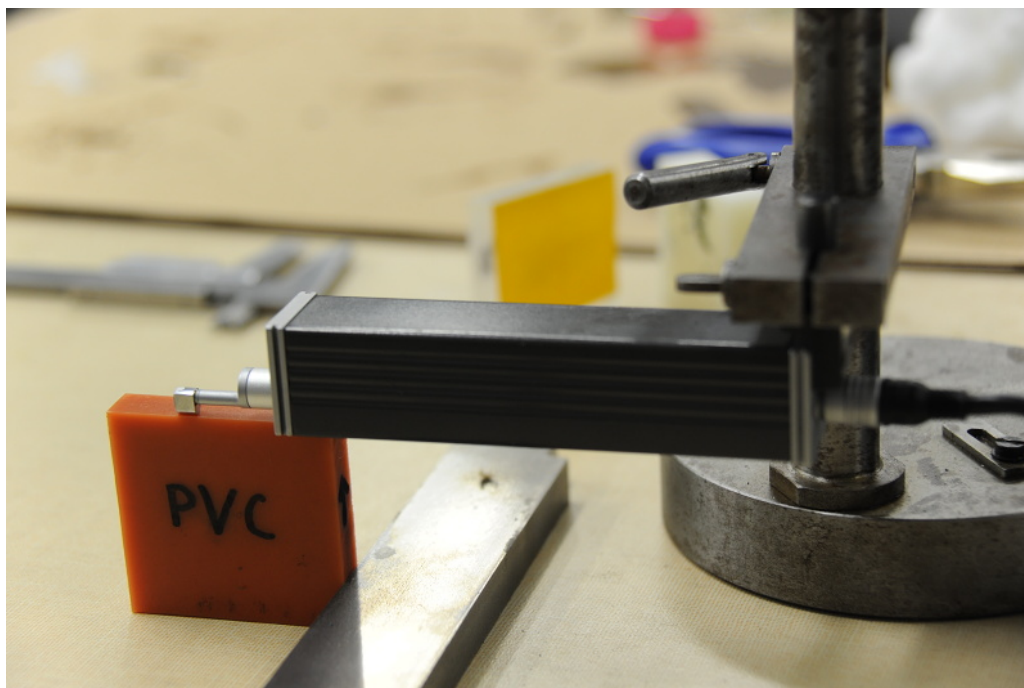
Tab. 1. Teploty vzorků

Materiál	Nechlazeno			Chlazeno CO ₂			Chlazeno kapalinou		
	T ₀ [°C]	T ₁ [°C]	ΔT [°C]	T ₀ [°C]	T ₁ [°C]	ΔT [°C]	T ₀ [°C]	T ₁ [°C]	ΔT [°C]
PE	35	42	12	5	20	15	37	28	9
PVC	30	32	2	-17	5	23	32	27	5
PMMA	44	50	6	-17	6	24	34	27	7

Z tabulky je zřejmé, že největší teplotní rozdíly jsou u vzorků chlazených pomocí CO₂. Při chlazení kapalinou je teplota po broušení u všech vzorků téměř stejná a nižší než před začátkem broušení. Je to dáno tím, že chlazení probíhalo i během broušení a chladicí kapalina měla teplotu okolí.

6.5 Měření drsnosti povrchu

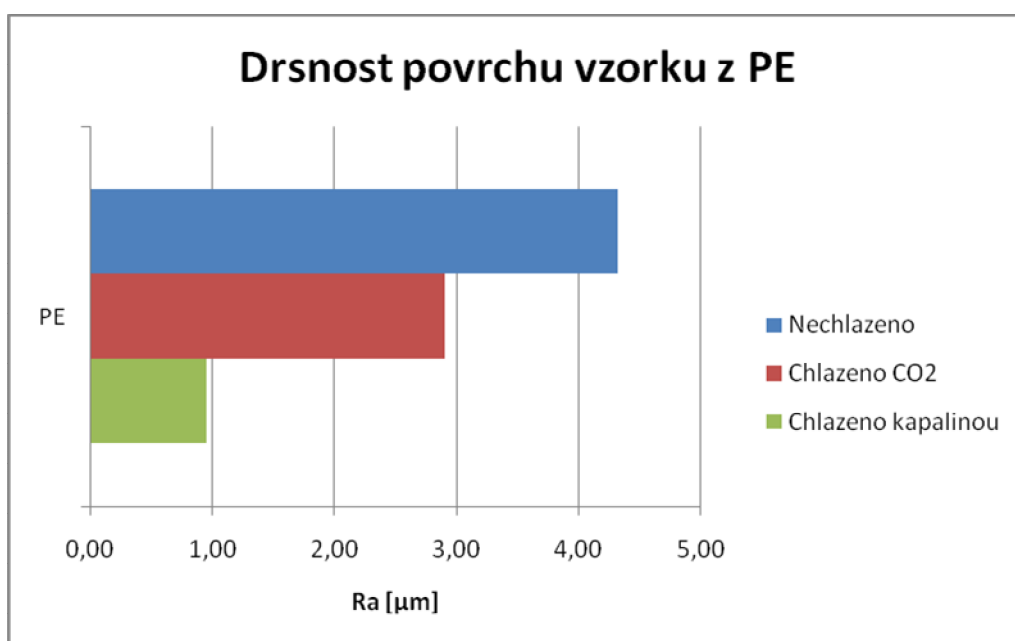
Drsnost povrchu vzorků jsem po každém broušení měřil přístrojem Mitutoyo SJ-301 a to pouze v podélném směru, protože tvar a orientace zrn brousícího kotouče je natolik náhodný, že nelze předpokládat, ve kterém směru budou hodnoty drsnosti povrchu horší. Nesměl jsem opomenout založení měřeného vzorku těžkou překážkou, protože měřicí přístroj měl tendence vzorky posouvat místo toho, aby po nich jezdil měřicí hlavou. Přístroj měřil podle normy ISO1997. Výsledky jsou uvedeny v následujících tabulkách a grafech.



Obr. 34 Měření drsnosti povrchu

Tab. 2. Drsnost povrchu vzorku z PE

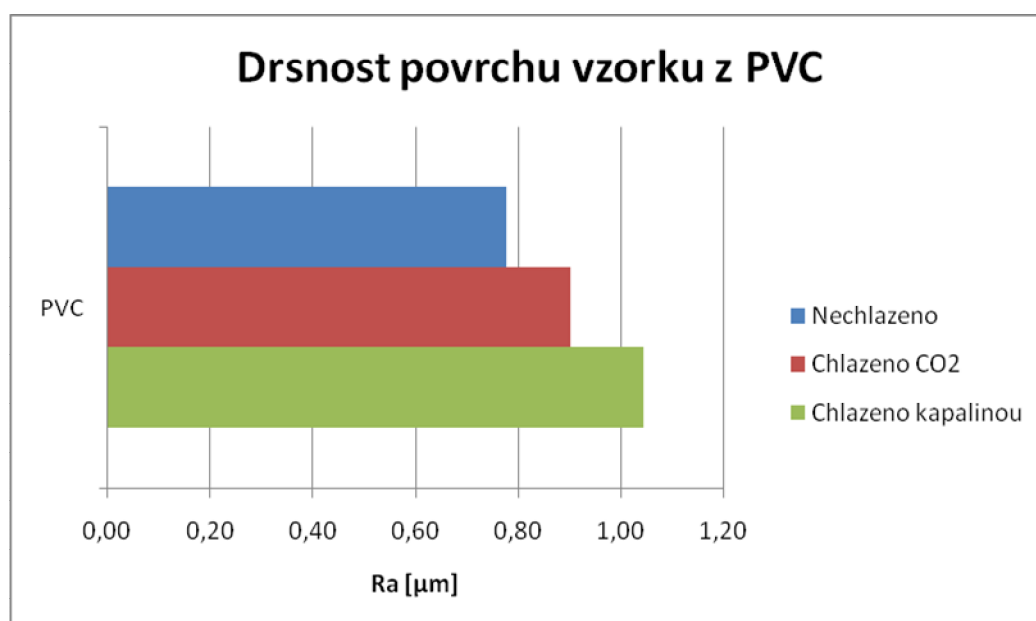
Č. měření	Nechlazeno		Chlazeno CO2		Chlazeno kapalinou	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	3,72	26,01	3,24	15,39	0,93	5,82
2	4,08	25,47	3,34	17,26	0,74	4,46
3	3,97	22,76	3,69	16,65	0,94	4,71
4	4,69	30,28	1,76	9,69	0,89	4,07
5	5,34	30,78	3,21	14,47	0,54	3,53
6	5,48	29,26	1,86	10,46	1,02	5,42
7	3,59	22,57	2,24	10,21	0,89	4,53
8	3,87	20,04	3,38	16,63	1,55	11,19
9	4,21	26,33	4,09	19,56	0,89	4,82
10	5,41	31,81	1,55	9,53	0,83	4,54
11	4,75	29,28	2,61	21,68	1,08	5,57
12	3,20	19,88	2,98	19,06	0,97	5,37
13	4,35	25,31	2,62	14,25	1,12	5,45
14	4,62	27,02	3,42	16,43	1,32	7,89
15	3,54	20,54	3,51	16,42	0,62	3,09
Průměrná hodnota	4,32	25,82	2,90	15,18	0,96	5,36
Směrodatná odchylka	0,6898	3,8539	0,7361	3,6390	0,2442	1,8922



Obr. 35 Graf drsnosti povrchu vzorku z PE

Tab. 3. Drsnost povrchu vzorku z PVC

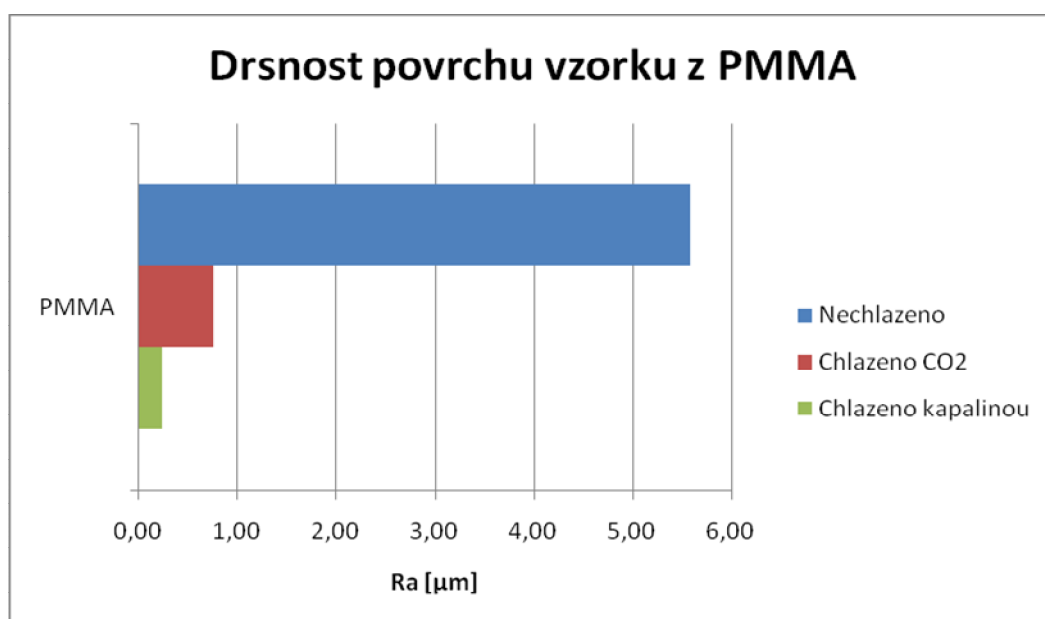
Č. měření	Nechlazeno		Chlazeno CO2		Chlazeno kapalinou	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	1,42	9,08	1,06	6,34	0,90	5,14
2	0,91	5,98	0,82	5,23	0,91	5,30
3	0,50	4,04	1,00	6,48	0,85	5,26
4	0,78	4,81	0,76	5,30	1,45	8,88
5	0,70	4,73	1,06	5,70	1,00	5,10
6	0,82	5,59	0,90	5,58	0,76	5,26
7	0,72	5,36	0,82	5,31	0,95	5,52
8	0,70	4,73	0,48	4,05	1,04	6,12
9	0,56	3,37	1,00	5,67	1,29	8,89
10	0,58	4,17	0,99	5,70	0,77	4,32
11	0,70	5,02	1,09	6,51	1,08	7,01
12	0,93	5,73	0,90	5,48	0,86	5,86
13	0,66	5,19	1,13	6,61	1,59	7,89
14	0,81	5,81	0,45	3,34	1,12	6,87
15	0,86	5,61	1,06	6,18	1,06	6,63
Průměrná hodnota	0,78	5,28	0,90	5,57	1,04	6,27
Směrodatná odchylka	0,2100	1,2368	0,2009	0,8698	0,2320	1,3545



Obr. 36 Graf drsnosti povrchu vzorku z PVC

Tab. 4. Drsnost povrchu vzorku z PMMA

Č. měření	Nechlazeno		Chlazeno CO2		Chlazeno kapalinou	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	4,15	24,46	0,79	5,03	0,25	2,32
2	4,64	30,12	0,82	5,15	0,25	2,03
3	6,57	37,22	0,86	5,65	0,21	2,02
4	5,18	29,05	0,82	5,31	0,22	1,89
5	6,72	38,57	0,70	4,14	0,22	1,93
6	6,64	38,87	0,59	4,70	0,37	3,88
7	4,06	27,57	0,75	4,78	0,31	2,41
8	6,74	39,36	0,71	4,49	0,24	1,88
9	5,48	28,84	0,59	4,28	0,10	0,72
10	6,38	35,25	0,77	5,27	0,23	2,35
11	5,22	32,19	0,88	5,55	0,22	1,87
12	5,81	32,84	0,77	4,98	0,22	1,97
13	5,75	32,81	0,63	3,84	0,21	1,60
14	5,07	29,78	0,76	4,64	0,18	1,72
15	5,39	34,57	0,83	5,49	0,20	2,10
Průměrná hodnota	5,59	32,77	0,75	4,89	0,23	2,05
Směrodatná odchylka	0,8681	4,3601	0,0885	0,5226	0,0568	0,6236



Obr. 37 Graf drsnosti povrchu vzorku z PMMA

Grafy zřetelně ukazují, že chlazení při broušení ať už v jakékoliv podobě není přínosem pro každý materiál. Výsledná drsnost povrchu PVC vzorku se v důsledku snížení teploty během broušení zhoršuje. Vliv teploty na tento materiál je ale v porovnání s ostatními materiály pouze zlomkový. Nelze říct, že jsou tyto změny zanedbatelné, jedná se o desetiny μm . Vzorky z PMMA a PE reagovaly na nižší teploty lépe než vzorek z PVC. Snížení teploty během broušení PMMA zajistí markantní zlepšení drsnosti povrchu v řádech jednotek μm .

Ve většině případů lze docílit nejlepší drsnosti povrchu za přítomnosti řezné kapaliny. Důvodů může být několik:

- jeho přítomnost během broušení, což nebylo možné zajistit při chlazení pomocí CO_2
- přestup tepla je intenzivnější mezi kapalinou a pevnou látkou než mezi plynem a pevnou látkou
- řezná kapalina obsahuje mazivo

Když porovnáme finanční a technickou náročnost celého chladicího zařízení na řeznou kapalinu a CO_2 s dosaženými výsledky, musíme dojít k závěru, že kde nehrozí negativní reakce obrobků s řeznou kapalinou, měli bychom jí dát přednost před chlazením pomocí CO_2 . Řeznou kapalinu lze opakovaně používat, kdežto chladicí médium CO_2 je po použití nenávratně pryč. Na podchlazení 1 vzorku jsme spotřebovali asi 1kg CO_2 . Jelikož na vzorky dopadá plyn, nedochází tak k dobrému přenosu tepla jako by mohlo docházet, pokud bychom použili k podchlazení např. tekutý dusík. Na 2. stranu s CO_2 je jednodušší manipulace a chladivo je méně nebezpečné pro obsluhu než tekutý dusík.

ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce jsem rozvedl problematiku obrábění broušením s různými chladícími médii. Celá tato část má úzkou návaznost na praktickou část bakalářské práce. V praktické části jsem navrhl a cenově zhodnotil zařízení pro chlazení pomocí CO₂. Dále jsem provedl pokus, při kterém jsem brousil vzorky nejprve bez chlazení, poté s chlazením pomocí CO₂ a nakonec s chlazením pomocí řezné kapaliny. Mezi broušením jsem měřil drsnosti povrchů vzorků a tyto data potom zanesl a vyhodnotil.

Praktická část ukázala, že ne všechny materiály je vhodné při broušení chladit např. PVC. Pro většinu materiálů je vhodnější chladit řeznými kapalinami než pomocí CO₂, které podle výsledků zaručuje druhé nejlepší výsledky, co se jakosti povrchu týče. Chlazení pomocí CO₂ lze doporučit u těch materiálů, u kterých by mohlo dojít k nechtěným reakcím s řeznou kapalinou. V jiných případech existují jednodušší, méně nákladné, bezpečnější a účinnější varianty chlazení.

Během experimentu jsem narazil na chyby, kterých by bylo vhodné se vyvarovat při navazujících pracích. Největší problém spatřuji v teplotním smrštění vzorků. Po ochlazení se vzorky nerovnoměrně smrští a tak není možné určit skutečnou hloubku záběru. Jako řešení mě napadá chladit vzorky neustále už i při seřizování brusky. To by ale vedlo k obrovské spotřebě chladícího média. Dále je potřeba zajistit přísun chladícího média i během broušení. Z výsledků je patrné, že plynné CO₂ je pro polymery naprosto dostačující chladící médium. Pokud by vzorky byly z kovu, obávám se, že CO₂ už by nebylo vhodné a doporučoval bych zvolit např. tekutý dusík, protože mezi jeho vlastnosti patří ještě nižší teplota a lepší přenos tepla. Dále by bylo vhodné zajistit vhodný nástavec pro ruční bezkontaktní teploměr, protože měří příliš velkou plochu tudíž zkresluje výsledky experimentu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOCMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2nd ed. Brno : Akademické nakladatelství cerm, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0
- [2] KOCMAN, K., *Technologické procesy obrábění*. 1st ed. Brno : Akademické nakladatelství cerm, 2011. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2
- [3] VASILKO, K., BOKUČAVA, G., *Brúsenie kovových materiálov*. 1st ed. Bratislava : Alfa, 1988. 235 s. 063-143-88 BKM
- [4] PATA V., Přednáškové materiály předmětu T6JM, 2011
- [5] ČSN EN ISO 4287:1997. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametrystruktury povrchu*. Praha : Český normalizační institut, 1999. 24 s.
- [6] KOCMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 272 s. ISBN 80-214-1996-2
- [7] JELÍNEK, Z., MÁLEK, J., *Kryogenní technika*. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1982. 354s. SNTL
- [8] BEŇO, J., *Príspevok k štúdiu javov tvorenia triesky pri obrábani v kryogénnom prostredí*, Košice : VŠT Košice Strojnícka fakulta, 1984. 140s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
Rsm	[μm]	Průměrná šířka prvků profilu
Rp	[μm]	Největší výška výstupku profilu
Ra	[μm]	Střední aritmetická úchylka profilu
Rz	[μm]	Největší výška profilu
Rt	[μm]	Celková výška profilu
lr	[mm]	Základní délka profilu
ln	[mm]	Vyhodnocovaná délka profilu
lt	[mm]	Celková délka snímání
n	[]	Počet základních délek
n_s	[min^{-1}]	Otáčky brousícího kotouče
ae	[mm]	Hloubka záběru
v_f	[m. min^{-1}]	Posuvová rychlost
T_0	[$^{\circ}\text{C}$]	Počáteční teplota
T_1	[$^{\circ}\text{C}$]	Konečná teplota
T_{Δ}	[$^{\circ}\text{C}$]	Rozdíl počáteční a konečné teploty
PVC	[]	Polyvinylchlorid
PE	[]	Polyethylen
PMMA	[]	Polymethylmethakrylát
CO_2	[]	Oxid uhličitý
v_w	[m. min^{-1}]	Obvodová rychlost obrobku
ω_k	[rad]	Frekvence kmitavého pohybu
α	[rad]	Úhel sklonu stopy po jednom zrně brusiva
n_s	[ot. min^{-1}]	Frekvence otáčení brousícího kotouče
v_{fa}	[mm. min^{-1}]	Axiální posuvová rychlost stolu
v_{fr}	[mm. min^{-1}]	Radiální posuvová rychlost stolu
v_{ft}	[mm. min^{-1}]	Tangenciální posuvová rychlost stolu

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Princip honování</i>	14
<i>Obr. 2. Svislý jednovřetenový honovací stroj[1]</i>	15
<i>Obr. 3. Princip lapování</i>	16
<i>Obr. 4. Svislý lapovací stroj pro lapování vnějších válcových a rovinných ploch[2]</i>	17
<i>Obr. 5 Kinematické schéma superfinišování[1]</i>	18
<i>Obr. 6 Průběh superfinišovacího procesu – zvětšování nosného podílu[1]</i>	19
<i>Obr. 7 Vybrané způsoby obvodového broušení[1]</i>	21
<i>Obr. 8 Vybrané způsoby čelního broušení[1]</i>	22
<i>Obr. 9 Válečkovací hlava pro statické válečkování vnějších válcových ploch[2]</i>	23
<i>Obr. 10 Princip dynamického válečkování[2]</i>	24
<i>Obr. 11 Kuličkovací hlava pro statické kuličkování děr[1]</i>	25
<i>Obr. 12 Diamantový vyhlazovací nástroj[1]</i>	26
<i>Obr. 13 Pohled na broušený povrch, úsečka pod obrázkem značí 100μm[3]</i>	33
<i>Obr. 14 Profilu povrchu[5]</i>	34
<i>Obr. 15 Znárodnění profilu mikronerovnosti[4]</i>	34
<i>Obr. 16 Znárodnění profilu makronerovnosti[4]</i>	35
<i>Obr. 17 Znárodnění profilu tvaru povrchu[4]</i>	35
<i>Obr. 18 Znárodnění profilu vlnitosti[4]</i>	35
<i>Obr. 19 Znárodnění profilu drsnosti[4]</i>	36
<i>Obr. 20. Schéma dráhy snímače[4]</i>	36
<i>Obr. 21. Schéma dráhy snímače[4]</i>	37
<i>Obr. 22 Prvek profilu[4]</i>	38
<i>Obr. 23 Největší výška výstupku profilu Rp[4]</i>	38
<i>Obr. 24 Největší výška profilu Rz[4]</i>	39
<i>Obr. 25 Aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra[4]</i>	39
<i>Obr. 26 Příklady problematických profilů povrchu[4]</i>	40
<i>Obr. 27 Celková výška profilu Rt[4]</i>	40
<i>Obr. 28 Průměrná šířka prvků profilu Rsm[4]</i>	41
<i>Obr. 29 Grafické zpracování varianty č.1</i>	44
<i>Obr. 30 Detail trysky a magnetického držáku</i>	45
<i>Obr. 31 Bruska BRH 20.03F</i>	47
<i>Obr. 32 Přístroj pro měření drsnosti povrchu Mitutoyo SJ-301</i>	48

<i>Obr. 33</i> Ruční bezkontaktní teploměr FLUKE 574.....	48
<i>Obr. 34</i> Měření drsnosti povrchu	51
<i>Obr. 35</i> Graf drsnosti povrchu vzorku z PE	52
<i>Obr. 36</i> Graf drsnosti povrchu vzorku z PVC.....	53
<i>Obr. 37</i> Graf drsnosti povrchu vzorku z PMMA.....	54

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Teploty vzorků.....</i>	50
<i>Tab. 2. Drsnost povrchu vzorku z PE</i>	52
<i>Tab. 3. Drsnost povrchu vzorku z PVC.....</i>	53
<i>Tab. 4. Drsnost povrchu vzorku z PMMA.....</i>	54