



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# MODERNÍ DOKONČOVACÍ METODY OBRÁBĚNÍ VNĚJŠÍCH POVRCHŮ

MODERN CUTTING FINISHING METHODS OF OUTER SURFACES

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Lubomír LAŇKA

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Lubomír Laňka

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Moderní dokončovací metody obrábění vnějších povrchů**

v anglickém jazyce:

### **Modern cutting finishing methods of outer surfaces**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Moderní dokončovací metody obrábění vnějších povrchů - přehled, popis, výběr technologie a experimentální ověření, rozbor výsledků.

Cíle diplomové práce:

1. Úvod
2. Základní rozbor dokončovacích technologií obrábění vnějších ploch
3. Návrh experimentálního ověření vybrané technologie, její verifikace
4. Technologicko-ekonomické vyhodnocení dosažených výsledků, diskuze
5. Závěr

Seznam odborné literatury:

WALKER, J.R. Machining Fundamentals. The Goodheart-Wilcox Company, Inc., Tinleze Park, Illinois, 7th ed., 2004, pp. 640, ISBN 1-59070-249-2.

SHAW, M.C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005, pp. 651, ISBN 0-19-514206-3

Asm Handbook: Surface Engineering (Asm Handbook) by ASM International ISBN 13: 9780871703842, Publisher: ASM International, s.1056, 1994□

<http://www.engineershandbook.com/MfgMethods/spraypainting.htm>

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na moderní dokončovací metody obrábění vnějších povrchů. Úvodem je proveden základní rozbor dokončovacích technologií obrábění vnějších ploch, na který navazuje popis moderních dokončovacích metod od jemného obrábění až po nano-obrábění. Experimentální část zahrnuje analýzu drsnosti povrchu při čelním soustružení duralového disku a studii velikosti sil při jeho podélném soustružení. Práce obsahuje technologicko-ekonomické vyhodnocení dosažených výsledků.

### Klíčová slova

broušení, lapování, superfinišování, nano-obrábění, drsnost povrchu

## ABSTRACT

This master's thesis is focused on modern cutting finishing methods of outer surfaces. In the first part the cutting finishing technologies of outer surfaces are analysed, which is followed by a description of modern finishing methods from the fine machining up-to the nano-machining. The experimental part includes the analysis of surface roughness during front turning of a dural disc and the study of magnitudes of forces during its longitudinal turning. The thesis contains technological-economic evaluation of the achieved results.

### Key words

grinding, lapping, superfinishing, nano-machining, surface roughness

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LAŇKA, Lubomír. *Moderní dokončovací metody obrábění vnějších povrchů*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 100 s., 0 příloh. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Moderní dokončovací metody obrábění vnějších povrchů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

29. 5. 2014

-----  
Datum

-----  
Bc. Lubomír Laňka

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Miroslavovi Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval panu Milanovi Rusiňákovi a Jiřímu Čechovi za pomoc při vypracování experimentální části.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
<b>1 ZÁKLADNÍ ROZBOR DOKONČOVACÍCH TECHNOLOGIÍ OBRÁBĚNÍ VNĚJŠÍCH PLOCH .....</b>	<b>10</b>
<b>2 METODY S ÚBĚREM MATERIÁLU .....</b>	<b>13</b>
2.1 Jemné obrábění - hlazení.....	13
2.1.1 Destičky se stěračem (dále označováno jako „wiper“).....	14
2.1.2 Hladicí geometrie řezných břitů .....	14
2.2 Broušení .....	16
2.2.1 Názvosloví běžných broušicích způsobů.....	17
2.2.2 Kinematika broušení .....	18
2.2.3 Jemné broušení .....	19
2.2.4 Broušicí nástroj .....	19
2.2.5 Broušicí stroje - brusky .....	20
2.2.6 Ultra-přesné broušení.....	22
2.3 Honování .....	26
2.3.1 Honovací nástroje .....	27
2.3.2 Honovací stroje.....	29
2.4 Lapování.....	31
2.4.1 Lapovací nástroje.....	32
2.4.2 Lapovací stroje.....	33
2.4.3 Aero Lap .....	34
2.5 Superfinašování .....	37
2.5.1 Superfinašovací nástroje.....	40
2.5.2 Superfinašovací stroje .....	41
2.5.3 Přídavné superfinašovací zařízení .....	41
2.6 Leštění .....	44
2.7 Tryskání.....	46
2.7.1 Tryskání zvlhčeným abrazivem .....	47
2.8 Omílání.....	48
2.8.1 Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů .....	50
2.9 Mikro-obrábění .....	52

2.10 Nano-oblábění .....	54
3 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO OVĚŘENÍ VYBRANÉ TECHNOLOGIE, JEJÍ VERIFIKACE.....	59
3.1 Stanovení závislosti velikosti posuvu na drsnosti povrchu při čelním soustružení duralu .....	62
3.2 Stanovení velikosti sil a měrných řezných sil při podélném soustružení duralu ..	70
4 TECHNOLOGICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	84
5 DISKUZE .....	89
ZÁVĚR .....	92
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	93
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	98



## ÚVOD

Ve strojírenské výrobě můžeme najít velké množství dokončovacích metod od jemného obrábění přes broušení, superfinišování až po nano-obrábění. Pomocí dokončovacích metod se dosahuje finálních parametrů povrchu obráběné součásti, proto jsou zařazeny jako poslední výrobní operace.

Při výrobě součástí jsou kladeny vysoké požadavky na jakost povrchu a rozměrovou přesnost a to je příčinou rozvoje nových dokončovacích metod obrábění. Tyto metody napomáhají ke zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností povrchu jako je pevnost, tvrdost, odolnost proti korozi, mez únavy a další. Dále při použití dokončovacích metod dochází ke zlepšení vizuální stránky povrchu, povrch je lesklejší. Všechny tyto aspekty jsou velmi důležitou součástí. Ovšem někdy není možné, aby jedna metoda splňovala všechny výše uvedené požadavky, proto je potřeba občas zvolit vhodnou kombinaci metod.

Jsou dva základní principy dokončování. U prvního principu je odebrán přídavek na dokončování a ve druhém je použita plastické deformace. Nicméně v poslední době se začaly ve velké míře rozvíjet nekonvenční technologie, které mají oproti ostatním metodám mnoho výhod. Jelikož jsou neustále vyvíjeny kvalitnější materiály, které disponují vyšší pevností, tvrdostí a dalšími vlastnostmi, je potřeba k obrábění použít metody jako jsou například obrábění laserem, plazmou atd.

Pokud se ovšem zaměříme na metody s úběrem materiálu, stále více se směřuje k miniaturizaci při obrábění. Mikro-obrábění a nano-obrábění je velmi složitý proces, kdy odstraňování materiálu probíhá pouze v několika atomových vrstvách. Důležité parametry jsou rádius břítu ostří, velikosti řezné rychlosti, minimální hloubka řezu a mnoho dalších parametrů.

Mimo dosahované kvality povrchu a přesnosti obrábění při dokončovacích metodách je také důležitým parametrem cena, za kterou je potřebná kvalita dosažena. Současný ekonomický stav klade důraz na snižování výrobních nákladů, proto je vždy důležité vybrat správnou dokončovací metodu. Vhodnou volbou dokončovací metody lze ovlivnit poměr výsledných parametrů kvality povrchu k ceně, za kterou lze tyto parametry splnit. Ne vždy je možné udělat určitý kompromis, protože řada výrobků musí splňovat stanovená bezpečnostní kritéria (např. maximální velikost Ra, životnost, jakost povrchové vrstvy, apod.).

## 1 ZÁKLADNÍ ROZBOR DOKONČOVACÍCH TECHNOLOGIÍ OBRÁBĚNÍ VNĚJŠÍCH PLOCH

Dokončovacími metodami jsou míněny poslední operace při obrábění výrobku, kterými lze dosáhnout [1]:

- konečné přesnosti tvarů, rozměrů a polohy (IT, rovinnost, kolmost, ...),
- mikrogeometrie povrchu (jedná se o různé parametry vlnitosti a drsnosti povrchu),
- výslednou kvalitu povrchové vrstvy (struktura, zbytkové pnutí, poruchy, vady,...),
- vlastností povrchové vrstvy – fyzikálních a mechanických jako jsou tvrdost, únavové vlastnosti, zpevnění, odolnost proti otěru a korozi, přestup tepla, ...),
- vzhled povrchu – morfologie (matný reliéf, lesk,...).

Ani jedna z metod, které jsou uvedeny dále, nesplňuje všechny požadavky v plné míře. Proto se musí volit taková metoda nebo kombinace metod, která dokáže ovlivnit povrchovou vrstvu z hlediska provozní spolehlivosti a předpokládané funkce součásti [1].

Pro dosažení předem stanovené kvality povrchové vrstvy lze použít dva základní principy nebo jejich vhodnou kombinaci. Základní principy [1]:

- a) odebrání přídavku na dokončovací operaci,
- b) plastická deformace (přetváření materiálu povrchové vrstvy).

### Ad. a) Metody s úběrem materiálu

Při použití metod s úběrem materiálu se předpokládá dostatečný přídavek na dokončování. Ten je odebrán jemnými podmínkami, a to s co nejmenším tepelným ovlivněním povrchové vrstvy, která tímto vzniká. Přídavek musí zajistit odebrání vrstvy, která byla narušena předchozími technologickými procesy (změna struktury, trhlinky, tahová zbytková pnutí, vady, rozměrová a tvarová nepřesnost – deformace vznikající po konečném tepelném zpracování, chemickými reakcemi s prostředím, řeznými a upínacími silami atd.). Výkon těchto operací není posuzován odebraným objemem materiálu, ale obrobenou plochou s předem stanovenou kvalitou, která je vytvořena za jednotku času [1].

Metody s úběrem materiálu je možno rozdělit [1, 2]:

- jemné obrábění,
- broušení,
- honování,
- lapování,
- superfinišování,
- leštění,

- omílání,
- tryskání.

Abrazivní metody obrábění jsou charakteristické používáním nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu. Tyto metody tvoří nejvíce využívané aplikace při obrábění strojírenských součástí. Jedná se o součásti, u kterých jsou požadovány vysoké nároky na přesnost tvaru, rozměrů a drsnost povrchu obrobených ploch. Hodnoty dosahovaných parametrů jsou uvedeny v tab. 1 [3].

Tab. 1 Dosahované parametry přesnosti obrobených ploch pro abrazivní metody obrábění [2].

Obráběné plochy	Metoda obrábění	Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]		
		střední	rozsah	střední	rozsah	
Vnější rotační	Broušení	Hrubovací	10	9 ÷ 11	1,6	0,8 ÷ 3,2
		Dokončovací	5	5 ÷ 6	0,4	0,2 ÷ 0,6
		Jemné	4	3 ÷ 5	0,2	0,05 ÷ 0,4
	Lapování	Dokončovací	4	3 ÷ 4	0,1	0,05 ÷ 0,2
		Jemné	2	1 ÷ 2	0,05	0,012 ÷ 0,05
	Superfinašování	Dokončovací	4	3 ÷ 5	0,2	0,05 ÷ 0,4
	Jemné	3	2 ÷ 4	0,1	0,025 ÷ 0,1	
Rovinné	Broušení	Hrubovací	10	9 ÷ 11	1,6	1,6 ÷ 3,2
		Dokončovací	7	5 ÷ 7	0,8	0,4 ÷ 1,6
		Jemné	5	3 ÷ 6	0,2	0,05 ÷ 0,4
	Lapování	Dokončovací	4	3 ÷ 5	0,2	0,1 ÷ 0,4
		Jemné	3	1 ÷ 3	0,05	0,012 ÷ 0,05

#### Ad. b) Beztržiskové metody dokončování obrobených povrchů

Dokončování obrobených povrchů, kdy není odebrána tříska, spočívá v plastické deformaci povrchové vrstvy. Deformace probíhá v hloubce od několika setin až do desetin milimetrů, přičemž se zlepšují parametry struktury povrchu a zvyšuje se tvrdost a pevnost. V povrchové vrstvě vznikají tlaková napětí a zvyšuje se mez únavy, odolnost proti korozi a odolnost proti opotřebení [2].

Při plastické deformaci probíhající za studena dochází ke zpevnění, vytvoření a následné vyvolání tlakových zbytkových pnutí. Někdy může nastat i zlepšení drsnosti povrchu zamáčknutím vrcholků nerovností. Zlepší se funkční vlastnosti, a to především mechanické. U součásti se zvýší únavová pevnost, odolnost proti korozi a oteru, tvrdost apod. Tuto součást můžeme klasifikovat, jako by byla vyrobena z kvalitnějšího materiálu, který má delší životnost. Naprosto diametrální účinek je při plastické deformaci za tepla, což může být například závěrečná fáze leštění bez brusiva. Pokud se ohřeje povrchová vrstva, lépe se dosáhne lesklého povrchu a usnadní se rozleštění vrcholků nerovností. Vyvoláním tahových pnutí nebo změnami ve struktuře v povrchové vrstvě dojde ke vzrůstu pravděpodobnosti vzniku trhlin či snížení životnosti součásti [1].

Rozdělení metod bez úběru materiálu [1, 2]:

- válečkování,
- kuličkování,
- vyhlazování povrchu diamantem,
- kalibrování,
- tryskání,
- vibrační zpevňování.

### **Nekonvenční metody**

Zvětšující se rozsah používání nekonvenčních metod obrábění – NMO – je dán vývojem a užíváním materiálů s vysokou pevností, houževnatostí, tvrdostí, materiálů odolných proti opotřebení apod., které lze hospodárně obrábět standardními metodami jen velmi těžce [2].

Jedná se o metody, které převážně nevyužívají mechanickou práci k úběru materiálu. Využívají se některé fyzikální, chemické nebo fyzikálně-chemické principy. U některých obrobků jsou jedinou možnou metodou, jak vyrobit součást [1].

Charakteristické vlastnosti NMO jsou [2]:

- nezávislost rychlosti, možnostech a výkonnosti obrábění na mechanických vlastnostech obráběného materiálu,
- není potřeba, aby obráběný materiál byl měkčí než materiál nástroje,
- možnost provádět složité technologické operace,
- NMO umožní zavést plnou mechanizaci a automatizaci,
- NMO umožňují navýšení technologičnosti konstrukce a také sériovosti výroby, současně se omezí výroba zmetků a sníží se pracnost existujících operací,
- s výrobou tvaru u některých NMO dochází k programované změně vlastností povrchové vrstvy, především zvýšení odolnosti proti korozi.

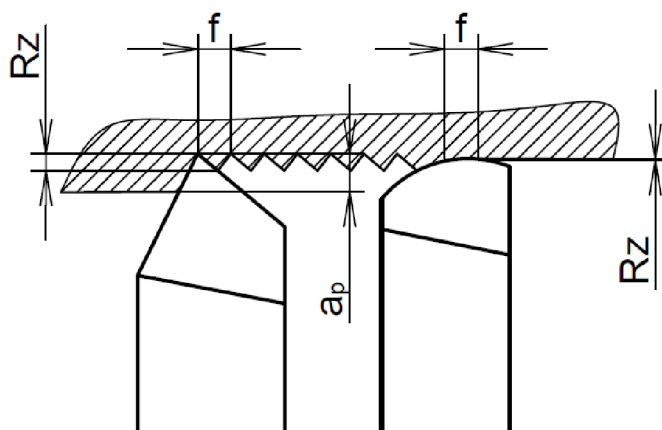
Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [2]:

- elektroerosivní obrábění,
- obrábění paprskem plazmy,
- obrábění paprskem laseru,
- obrábění paprskem elektronů,
- elektrochemické obrábění,
- chemické obrábění,
- ultrazvukové obrábění,
- obrábění vodním paprskem.

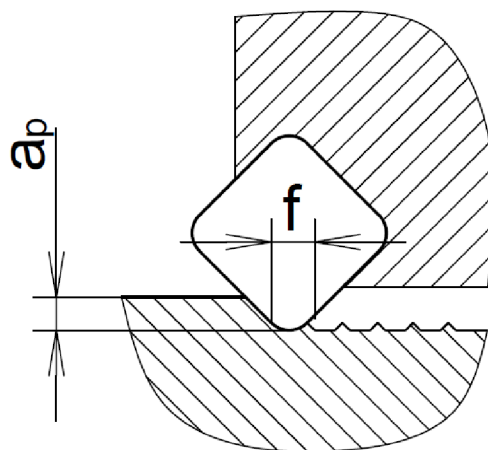
## 2 METODY S ÚBĚREM MATERIÁLU

### 2.1 Jemné obrábění - hlazení

Pro obvykle požadované hodnoty přesnosti a drsnosti ( $R_a = 0,4 - 0,8 \mu\text{m}$ , IT 5 – 6) je postačující (u všech základních metod) úběr poslední vrstvy malými průřezy třísek nebo nástroji na hlazení s malými úhly nastavení vedlejšího ostří ( $1^\circ$  až  $2^\circ$ ), eventuelně s velkým poloměrem špičky (50 mm až 200 mm nebo i více) a kvalitním břitem ( $r_n$ ) [1].



Obr. 1 Dva nože za sebou [1].



Obr. 2 Použití hladicí destičky [1].

Výrobní a následná dokončovací operace se může provádět najednou. Jedna z možností je, že při soustružení jsou dva nože za sebou (obr. 1), dále se může u fréz použít hladicí destička či zub (obr. 2), zub výstružníku, široký hladicí nůž na hoblování, kalibrovací zuby protahováku, výsledné vyjiskřování u broušení, aplikace jemnozrného brousícího kotouče při usilovném chlazení atd. [1].

### 2.1.1 Destičky se stěračem (dále označováno jako „wiper“)

Dalším možným způsobem řešení je použití geometrie řezného nástroje wiper. Destičky s wiper geometrií (obr. 3) mají malé koncové ostří těsně za rádiusem špičky, kterým jsou zatlačovány vrcholky úzkých mikrodrážek na povrchu a vytváří se tak kvalitnější povrch oproti klasické břitové destičce. Použití zmíněné wiper geometrie však s sebou přináší zvýšení řezného odporu a není tak vhodné pro všechny aplikace. Nejvhodnější použití wiper geometrie je na rovných plochách a není účinná pro tvarové dílce [4].



Obr. 3 Wiper destička W-MF4 Duratomic [5].

### 2.1.2 Hladicí geometrie řezných břitů

#### *Hladicí vyměnitelné CBN a keramické destičky*

Použitím klasických soustružnických ISO destiček a víceúčelových Grip destiček s CBN špičkami a úpravou WG (Wiper Geometry) se výrazně usnadňuje obrábění kalených a tvrdých ocelí a litin. Je dosahována vynikající kvalita povrchu a současně jsou podstatně snižovány výrobní náklady. K tomuto ekonomickému efektu dochází především proto, že je možno často obráběním destičkami s hladicí úpravou břitu nahradit operaci dokončovacího broušení. Úspěšná aplikace hladicího břitu při obrábění tvrdých materiálů je potvrzena mnoha příklady použití této geometrie břitu v automobilovém průmyslu, při soustružení ložisek, různých hydraulických součástí, případně soustružení či frézování zápustek a šablon [6].

Počáteční drsnost obrobeného povrchu touto destičkou se pohybuje okolo  $R_a = 0,5 \mu\text{m}$  za podmínek obrábění za sucha, řeznou rychlostí 100 m/min, posuvem 0,2 mm/ot. a hloubkou řezu  $a_p = 0,2 \text{ mm}$ . Dokonce ještě po 16 minutách podélného soustružení nepřevyšuje drsnost obrobené plochy hodnotu  $R_a = 1 \mu\text{m}$ . Snížením posuvu na hodnotu 0,15 mm/ot. přináší další zlepšení počáteční drsnosti povrchu na  $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ . Srovnáním výsledků dosažených touto technologií s výsledky získanými při obrábění standardní destičkou shodného tvaru, rozměrů i řezného materiálu, ale bez geometrie WG řezného břitu, jsou patrné výrazné kvalitativní rozdíly obou obrobených ploch. Počáteční drsnost dosažená standardní destičkou je okolo hodnoty  $R_a = 2 \mu\text{m}$ , po 16 minutách dalšího soustružení je dosaženo hodnoty horší než  $2,5 \mu\text{m}$  [6].

### *Koncepce hladicí geometrie*

Koncepce obrábění povrchů soustružnickými destičkami s úpravou hladicí geometrie WG rohového břitu zmenšuje závislost velikosti rádiusu i posuvu na drsnost povrchu. Konstrukce hladicí geometrie břitu v kombinaci s optimalizovaným utvářečem třísky zabezpečují dokonalý odchod třísky a vysokou stabilitu obrábění v celém rozsahu velikosti zvolených posuvů [6].

### *Produktivita při dokončovacích operacích*

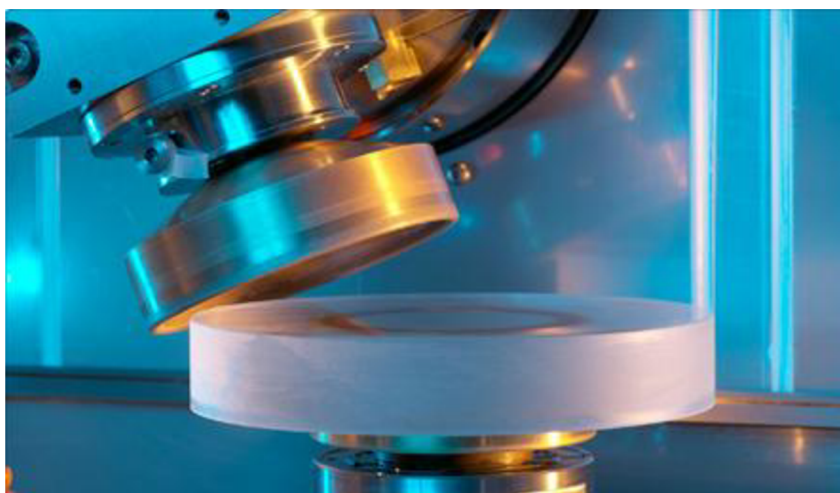
Aplikací hladicí geometrie břitu se zlepšuje nejen výkon obrábění, ale také přináší i významné ekonomické úspory snížením celkového času obrábění. Je to dáno možností dosažení vynikající kvality obrobeneho povrchu při poměrně velkých posuvech u všech typů destiček s hladicí geometrií WG (WNMG, CNMG, DNMG, CCMT) [6].

## 2.2 Broušení

Broušení je možné charakterizovat jako obrábění mnohabřitým nástrojem, který je vytvořený ze zrn brusiva spojená pojivem. Broušení patří historicky mezi nejstarší metody obrábění materiálů. Člověk využíval broušení již v prehistorických dobách, a to k výrobě nebo úpravě životně důležitých pomůcek - ostření pracovních nástrojů a zbraní [3].

Zrna brousícího nástroje jsou malé břity nepravidelně rozložené v celém objemu brusného nástroje nebo s různým převýšením po jeho povrchu. Geometrii řezných břitů není možno přesně definovat. Průřezy třísek, odebírané jedním zrnem, jsou velmi malé, ale je jich značný počet, což s většinou velkým úhlem řezu a vysokou řeznou rychlostí (20 – 200 m/s) je příčinou značných teplot (300 – 1000 °C) a vysokých hodnot měrného řezného odporu (30 000 – 60 000 MPa) [1].

Broušení se používá většinou pro obrábění částí s vyššími nároky na přesnost rozměrů a tvarů a kvalitu povrchu. Dále se broušení používá při opracování materiálů, které se jinak obrobít nedají nebo je toto opracování hospodárnější než jiné (obr. 4). S rozvojem kvalitních a výkonných brousících nástrojů a moderních strojů se použití broušení rozšiřuje z původní etapy dokončovacích operací také na produkční obrábění [2].



Obr. 4 Přesné broušení skla [7].

V současné době je broušení často používáno jako základní metoda finálního obrábění ve strojírenské výrobě (např. v automobilové výrobě tvoří brusky a jejich modifikace 25 % a ve výrobě valivých ložisek až 60 % všech obráběcích strojů) [3].

Brousící proces má základní charakteristiky podobné jako jiné obráběcí procesy, ale při broušení dochází ke kvantitativním i kvalitativním odlišnostem, které souvisí zejména s vlastnostmi brousícího kotouče a řeznými podmínkami. Broušení se tak od ostatních metod odlišuje především různorodostí geometrického tvaru brousících zrn a jejich nepravidelným rozmístěním v tělese brousícího nástroje. Další odlišností od jiných způsobů obrábění se činnost brousícího nástroje liší schopností tzv. samoostření. Tato vlastnost brousícího nástroje souvisí s volnějším zakotvením brousícího zrna



ve struktuře kotouče. Z tohoto důvodu zvýšení řezných sil na otupených zrnech dochází k jejich vylomení a jejich funkci přebírají zrna neotupená [2].

Broušením lze obrábět plochy různých tvarů (rotační vnější i vnitřní, tvarové či rovinné). Nástroj může být broušící pás, broušící kotouč celistvý nebo složený (ze segmentů nejrozličnějších tvarů a provedení). Rotující broušící kotouč konající hlavní pohyb odebrává materiál buď obvodem, čelem kotouče nebo oběma plochami současně. Způsob úběru při broušení může být zapichovací, radiální, tangenciální, podélný, oscilační, planetový, integrovaný [1].

Použití řezných kapalin výrazně ovlivňuje kvalitu broušeného povrchu a trvanlivost kotouče. Jejich hlavní účinek je především chladičí (vysoké teploty v místě styku – teplotní roztažnost – rozměrová přesnost + strukturní změny, zbytkové pnutí, nebezpečí vznícení třísek u Ti a Mg slitin) a čistící (ohřáté třísky zanášejí póry nástroje) [1].

### 2.2.1 Názvosloví běžných broušících způsobů

Podle způsobu vytváření a výsledného tvaru obrobeného povrchu se charakterizuje [2]:

- 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,
- kopírovací broušení – broušení s řízenou změnou posuvu, NC a CNC stroje,
- broušení tvarovými broušícími kotouči – profil broušícího kotouče určuje konečný profil obrobku.

Podle aktivní části broušícího kotouče se definuje [2]:

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

Podle vzájemné polohy broušícího kotouče a obrobku se specifikuje [2]:

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

Podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k broušícímu kotouči se rozlišuje [2]:

- axiální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s osou kotouče,
- tangenciální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě,
- radiální broušení – hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě je radiální vzhledem k broušícímu kotouči,
- obvodové zapichovací broušení – posuv stolu je plynulý radiální,
- čelní zapichovací broušení – posuv stolu je plynulý axiální.

### 2.2.2 Kinematika broušení

Pohyby a rychlosti při broušení se definují na základě charakteristik jednotlivých způsobů broušení, například obvodové vnější broušení do kulata axiálním nebo radiálním způsobem [3].

Řezná rychlost je dána závislostí [2] :

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (1)$$

kde:  $v_c$  [m.s<sup>-1</sup>] - řezná rychlost,  
 $d_s$  [mm] - průměr brousícího kotouče,  
 $n_s$  [min<sup>-1</sup>] - frekvence otáčení brousícího kotouče.

Řezná rychlost nabývá při běžném broušení hodnot 30 – 35 m.s<sup>-1</sup>. Při rychlostním broušení je potřeba použít kotouče se speciálním druhem pojiva. Řezná rychlost je zpravidla vyšší než 80 m.s<sup>-1</sup>, ve zvláštních případech může dosáhnout až k hodnotě 180 m.s<sup>-1</sup> [2].

Obvodovou rychlost obrobku lze vyjádřit vztahem [2]:

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} \quad (2)$$

kde:  $v_w$  [m.min<sup>-1</sup>] - obvodová rychlost,  
 $d_w$  [mm] - průměr obrobku,  
 $n_w$  [min<sup>-1</sup>] - frekvence otáčení obrobku.

Poměrem mezi řeznou rychlostí a posuvovou rychlostí získáme poměr rychlostí  $q$ . Pro broušení do kulata se stanoví podle vztahu [2]:

$$q = \frac{60 \cdot v_c}{v_w} \quad (3)$$

a pro rovinné broušení podle vztahu [2]:

$$q = \frac{60 \cdot v_c}{v_{ft}} \quad (4)$$

kde:  $q$  [-] - poměr rychlostí,  
 $v_c$  [m.s<sup>-1</sup>] - řezná rychlost,  
 $v_w$  [m.min<sup>-1</sup>] - obvodová rychlost obrobku,  
 $v_{ft}$  [m.min<sup>-1</sup>] - tangenciální rychlost posuvu stolu brusky.

### 2.2.3 Jemné broušení

Při jemném broušení na strojích Peter Wolters je obráběný dílec vkládán do planetového kola, kterým je dílec unášen odvalovacím způsobem mezi dvěma brousicími kotouči. Výsledek broušení je možno regulovat otáčkami a směrem otáčení brousicího kotouče a korunového kola [8].

Základním znakem strojů Peter Wolters a zároveň nutnou podmínkou pro dosažení vysoce přesného opracování je přesně regulovaná teplota během procesu broušení. Brousicí kotouče jsou při broušení na strojích Peter Wolters ochlazovány pomocí patentovaného labyrintu v brusném kotouči. Celým brusným kotoučem protéká dvěma protiběžnými labyrinty chladicí kapalina, kterou je udržován brusný kotouč na stejné teplotě [8].

Nová technologie jemného broušení, která byla nedávno vyvinuta výzkumným oddělením firmy Peter Wolters, spojuje vysokou přesnost  $\pm 1 \mu\text{m}$  se stejnou velikostí úběru jako dříve při broušení na plocho nebo brusným pásem. Vysoké úběry při broušení umožňují sloučení operace hrubovacího broušení do jediné operace s jemným broušením. Tím je dosahováno velmi kvalitních povrchů s malými investičními náklady [8].

#### *Jemné broušení při obrábění keramiky předčí lapování*

Při dokončovacích procesech obrábění nabývá stále většího významu jemné broušení před lapováním. Pomocí obou metod je dosaženo vysoké rozměrové a tvarové přesnosti. Protože je však při jemném broušení brusné zrnó vázáno v nástroji, je možné náklady na odpad a čištění podstatně zredukovat [9].

Nové procesy jemného broušení, které využívají jako brusiva diamant nebo kubický nitrid boru, mají převahu nad dokončovacím obráběním se ztraceným brusivem nejen pro jejich snášenlivost k životnímu prostředí, ale i pro jejich mnohostrannost a výkon při odběru materiálu. Dokládají to srovnání výsledků obrábění, jakých bylo dosaženo při jemném broušení a při lapování keramických kotoučových těsnění firmou Wolters [9].

### 2.2.4 Brousicí nástroj

Nástroje pro broušení jsou tvořeny zrny z tvrdých materiálů (brusiva -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC, diamant, kubický nitrid boru), která jsou pevně vázána v tuhých či pružných tělesech různých velikostí a tvarů - brousicí, drážkovací a řezací kotouče, brousicí tělíska, brousicí a orovnávací kameny. Z těchto typů brousicích nástrojů jsou nejčastěji používány brousicí kotouče (obr. 5) [3].

#### *Standardní brousicí kotouče*

Nejčastěji se pro výrobu standardních brousicích kotoučů používá oxid hlinitý -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (umělý korund, elektrit) a karbid křemíku - SiC (karborundum). Označování a identifikace vlastností brousicích kotoučů jsou shodné - typ (1), rozměry (2), materiál (3) a velikost brousicích zrn (4), tvrdost (5) a sloh (6), pojivo (7), maximální obvodová rychlost (8) podle ČSN ISO 525 (22 4503) [3].

Tab. 2 Označování a identifikace vlastností brousícího kotouče [3].

1	2	3	4	5	6	7	8
1	300x50x76	A	36	L	5	V	35 m.s <sup>-1</sup>
Rozměry (2): vnější průměr – 300 mm, šířka – 50 mm, průměr upínací díry – 76mm							



Obr. 5 Brousící kotouče firmy LUGA ABRASIV [10].

## 2.2.5 Brousící stroje - brusky

### *Hrotové brusky*

Hrotové brusky se používají k broušení rotačních ploch na obrobcích, které jsou upnuty mezi hroty. Nejčastější provedení jsou univerzální hrotové brusky (obr. 6), používané pro broušení válcových, kuželových a čelních ploch. Brousící vřeteník je uložen otočně na zadní části stojanu a umožňuje broušení strmých kuželů. Na stojanu je naproti vřeteníku umístěno lože. Po jeho vedení se pohybuje stůl v podélném směru s pracovním vřeteníkem a koníkem. S horní částí stolu se může natáčet, což lze využít při broušení táhlých kuželů [2].



Obr. 6 Hrotová bruska univerzální [11].

### *Bezhruté brusky*

U bezhrutých brusek nejsou vyžadována žádná zařízení pro upínání obrobku. Nejčastěji jsou konstruovány pro vnější broušení, ale občas také pro vnitřní broušení rotačních ploch. Bezhruté brusky (obr. 7) pro vnější broušení rotačních ploch umožňují průběžné a zápichové broušení. Bruska obsahuje dva vřeteníky. Jeden je brousící vřeteník, na jehož vřetenu je brousící kotouč a druhý je vřeteník podávacího kotouče, který má menší průměr. Oba vřeteníky mají vlastní náhon - brousící vřeteno má konstantní otáčky, vřeteno podávacího kotouče má otáčky měnitelné. Podávací vřeteník je možno přestavovat po vedení lože a lze ho tak nastavit na požadovaný průměr broušení. Bezhruté brusky se nejčastěji používají v sériové výrobě, kde pracují v automatickém pracovním cyklu [2].



Obr. 7 Bezhrutá bruska [12].

### *Vodorovné rovinné brusky*

Používají se pro broušení rovinných ploch a jsou charakteristické vodorovnou osou brousícího vřetena. Nejčastěji bývají obrobky upínány na elektromagnetickou desku, která je umístěna na pracovním stole. Pracovní stůl koná přímočarý vratný nebo otáčivý pohyb. Bývají využívány v kusové a malosériové výrobě kde jsou kladeny vyšší požadavky na přesnost broušených ploch. Brousící vřeteník lze svisle přestavovat. Vedení pro příčné saně se nachází na stojanu stroje. V podélném směru se po saních pohybuje stůl, jehož rychlost lze plynule měnit. Velikost stroje je určena šířkou pracovního stolu [2].

### *Svislé rovinné brusky*

Brusky jsou charakteristické svislou osou brousícího vřetena a vysokými výkony broušení. Ve srovnání s vodorovnými rovinnými bruskami mají ovšem horší parametry přesnosti a drsnosti obrobkové plochy. Typickým představitelem je bruska s přímočarým vratným pohybem stolu. Brousící vřeteník se posouvá po stojanu. Pracovní stůl koná pouze přímočarý vratný pohyb, proto musí být průměr brousícího kotouče větší než šířka broušené plochy. Brousící kotouč se obvykle skládá z jednotlivých segmentů, což umožňuje větší úběry než prstencový kotouč. Obrobky se upínají na magnetickou desku, která je umístěna na pracovním stole [2, 3].

### *Speciální brusky*

Mezi speciální se zařazují brusky s určitým speciálním technologickým zaměřením. Řadí se sem brusky na ostření nástrojů, brusky na broušení ozubení, brusky pro broušení závitů, brusky pro broušení klikových hřídelí, brusky na broušení vačkových hřídelí [2].

#### **2.2.6 Ultra-přesné broušení**

Během posledních desetiletí se poptávka po vysoce přesných dílech silně zvýšila. Tyto díly zastupují širokou škálu aplikací v optickém, automobilovém a komunikačním průmyslu, stejně jako v lékařství a přírodních vědách. Ultra-přesného obrábění neželezných kovů může být spolehlivě dosaženo přesnými řezacími procesy. Naopak, tvrdé a křehké materiály, jako je keramika, karbidy, sklo, kalené oceli, nebo polovodičové materiály musí být obrobena brusnými procesy [13].

Ultra-přesné broušení se používá především k výrobě vysoce kvalitních a funkčních dílů vyrobených obvykle z tvrdých a těžko obrobitelných materiálů. Cílem ultra-přesného broušení je generovat díly s vysokou povrchovou úpravou, vysokou přesností tvaru a integrity povrchu pro elektronický a optický průmysl. Tyto procesy se používají například pro výrobu forem pro replikaci optických prvků (obr. 8). U obrábění optických forem je prvně aplikováno jemné broušení, čímž se dosáhne přijatelné přesnosti formy, ale nedostatečné drsnosti. Také může dojít ke vzniku mikrotrhlin, které snižují integritu povrchu. Proto se musí následně použít leštění. Leštění poskytuje vysokou povrchovou integritu, ale je časově náročné a nákladné. Snižování času a nákladů na kvalitu povrchu, kterých lze dosáhnout přesným broušením, se stává ještě důležitější [13].



Obr. 8 Broušení optických prvků [13].

Není snadné vytvořit soubor kritérií, která by jednoznačně definovala ultra-přesné broušení. Důvodem je, že ultra-přesné broušení je dynamický obor výzkumu, kde jsou prozkoumány různé metody a technologické koncepty. Všeobecná smlouva na kvalitu povrchu a integritu podpovrchové vrstvy dosažitelnou ultra-přesným broušením dosud neexistuje [13].

Vzhledem k tomu, že existují různé přístupy ultra-přesného broušení, stojí za to připomenout, jaké základní rysy procesu broušení jsou. Tedy ultra-přesné broušení je proces odstraňování materiálu [13]:

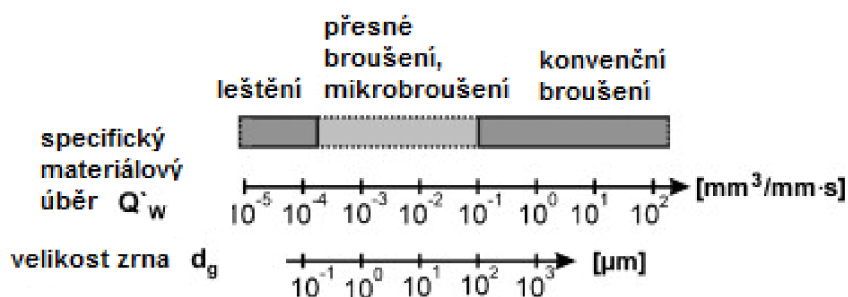
- s *pevným abrazivem* (aby ji odlišil od lapování a leštění),
- které jsou v *přerušovaném kontaktu* s povrchem obrobku (aby ji odlišil od honování).

Navíc, což je implicitní, ale důležitý požadavek, ultra-přesné broušení (stejně jako ostatní ultra-přesné obrábění) by mělo být deterministické [13]:

- tolerance tvaru, drsnosti a poškození by mělo být dosaženo v *jednom kroku obrábění* (aby se zabránilo opakování nebo dalšímu obrábění a testování).

Tato poslední podmínka je největší výzvou pro ultra-přesné broušení, protože může být realizováno pouze pomocí speciálních obráběcích strojů s vysokou tuhostí a speciálních brusných nástrojů [13].

Miyashita používá navržený specifický materiálový úběr  $Q'_w$  a velikost zrna  $d_g$  pro stanovení mezery mezi leštěním a konvenčním broušením jako přesné nebo mikro broušení (obr. 9) [13].



Obr. 9 Klasifikace přesného a mikro broušení s ohledem na leštění a konvenční broušení na základě úběrového výkonu a velikosti zrna [13].

Obecně platí, že "ultra-přesné broušení" se používá v literatuře jako broušení pro výrobu dílů s nízkou drsností povrchu, vysokou přesností tvaru a vysokou povrchovou integritou. Tento proces je založen na mechanismu odstranění materiálu, který je na hranici mezi křehkým a tvárným [13].

Obvykle broušení tvrdých a křehkých materiálů způsobuje mikrotrhliny, které zhoršují kvalitu povrchu. To znamená, že přechod z křehkého do tažného stavu materiálu je považován za velmi důležitý pro ultra-přesné broušení. Nejdůležitějším parametrem v odstraňování třísek pro přechod z křehkého do tvárného chování jsou napěťové

podmínky kolem břitu v materiálu obrobku. Z teorie plasticity a lomové mechaniky je známo, že stupeň plastické deformace závisí na teplotě, rychlosti deformace a tahovém napětí v obrobku [13].

### *Stroje pro ultra-přesné broušení*

Soustružení diamantem asférické kovové optiky a krystalických materiálů (např. germania) s drsností 3 – 5 nm a s tolerancí přesnosti tvaru 100 nm na díly o průměru 100 mm je spolehlivě dosaženo diamantovými soustružnickými systémy. Přidáním brousícího vřetena ke strojům na soustružení diamantem bylo provedeno rozšíření ultra-přesného broušení na obrábění skleněných materiálů, které nemohly být efektivně obráběny pomocí soustružení diamantem [13].

Na sektor mikroelektroniky je kladeno mnoho výrobních požadavků, přičemž snížení nebo odstranění leštění se považuje za klíčové pro zlepšení výrobní kapacity a kvality výrobků. Všechny mikroelektronické aplikace vyžadují brousící proces, který produkuje velmi přesné povrchy s nízkým poškozením podpovrchové vrstvy. Vývoj ultra-přesných brousících strojů byl také motivován požadavky z jiných odvětví prostřednictvím přijetí pokročilých keramických prvků [13].

Aby bylo možné provést ultra-přesné broušení o vysoké kvalitě, existuje celá řada požadavků na ultra-přesný obráběcí stroj (obr. 10) [13]:

- přesné pohyby bez vibrací a zpětných rázů,
- malý počet synchronních a asynchronních chyb vřetena,
- vysoká statická/dynamická tuhost,
- dlouhodobá teplotní rozměrová stálost.



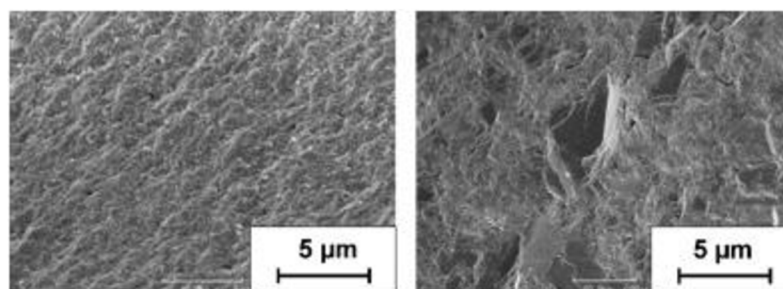
Obr. 10 Brousící stroj Tetraform C vyvinutý v NPL Tetraform [13].

### *Nástroje pro ultra-přesné broušení*

Diamant a kubický nitrid boru (CBN) jsou dva nejčastěji používané typy brusiva pro ultra-přesné broušení. Existují dva typy diamantových brusiv - přírodní a syntetické - oba sdílejí vysokou odolnost proti opotřebení, tepelnou vodivost, tvrdost a nízký koeficient tření. Alternativně mohou být diamantová zrna potažena vhodnými materiály. Například při potažení diamantů bylo zjištěno, že se zvýšil poměr broušení a snížilo se vylamování diamantových zrn během procesu broušení [13].



Kubický nitrid boru (CBN) má vynikající termo-chemickou stabilitu ve srovnání s diamantem. Ultra-krystalický CBN (CBN-U) je zvláštní druh CBN, který má brousicí poměr osmkrát vyšší a má vyšší odolnost proti opotřebení než běžné CBN (obr. 11). Pro broušení železných dílů a dalších materiálů, které reagují s diamantem, je kubický nitrid bóru tou nejlepší volbou [13].



Obr. 11 Lomová plocha CBN zrna: CBN-U (vlevo) vs CBN [13].

Zvláštním typem abraziva jsou křemičité EPD (elektroforetická depozice) pelety, které jsou vázány na mosazný disk a tvoří hrncový typ brusného kotouče. Tento typ brusného kotouče se používá v zrcadlovém broušení křemíkových destiček. Pelety se skládají z alginátu sodného jako pojivo a jemného práškového oxidu křemičitého jako brusivo [13].

#### ***Brousicí nástroj „mikro-tužka“***

Brousicí nástroje „mikro-tužka“ se používají pro generování mikrostruktur (obr. 12). Tyto nástroje jsou vyráběny různými způsoby, např. galvanicky z polotovarů karbidu wolframu s CBN nebo diamantovými zrný. Mohou být realizovány i na průměry 5 µm. Dalším typem brousicího nástroje „mikro-tužka“ je slinutý nástroj, kde jsou zrna vázána ve vrstvě slinutého bronzu vrstvě na polotovaru karbidu wolframu. Typicky mají slinuté nástroje průměr asi 200 µm. Třetí typ brousicího nástroje „mikro-tužka“ je s CVD povlakem. Minimální průměr nástroje, kterého lze dosáhnout je 50 µm. Tyto brusné nástroje jsou často používány k výrobě složitých trojrozměrných mikrostruktur. Běžné aplikace jsou pro tvarové broušení. Tato metoda umožňuje strukturování tvrdých a křehkých materiálů, které jsou odolné zejména proti opotřebení a proti chemikáliím, pro fluidní reaktory nebo zdravotnické prostředky [13].



Obr. 12 Brousicí nástroj „mikro-tužka“: CVD povlak, slinutý nástroj a galvanický povlak (zleva doprava) [13].

### 2.3 Honování

Při této dokončovací metodě je obráběný materiál odebirán abrazivním účinkem brusiva pomocí honovacích kamenů a lišt nebo kartáčků, které jsou upevněny v honovací hlavě, eventuelně tělísek nebo vláken, ty jsou nesený tenkou válcovou stopkou. Nejčastější užití honování je pro dokončování vnitřních válcových ploch. Vnější válcové plochy se nehonují tak často [3].

Honování lze považovat za broušení malou rychlostí, kdy brusivo je pevně vázáno v honovacích kamenech. Tlak o velikosti 0,2 MPa až 1,5 MPa přitlačuje kameny k dokončované ploše. Přítlak může být vyvozován hydraulicky nebo mechanicky. Velikost přítlaku, řezná kapalina, rychlosti pohybů, druh a zrnitost brusiva se volí dle požadované kvality a obráběného materiálu. Pohyb kamenů se skládá z rotace a vratného posuvu. Obrobek může u vnějšího honování vykonávat buď jenom posuv, nebo posuv a rotaci. Výsledné dráhy mají tvar překrývajících se šroubovic. Úhel křížení stop se stanoví z poměru rychlosti posuvového pohybu a řezné rychlosti [1].

Doporučený rozsah úhlu  $\alpha$  leží mezi  $20^\circ$  a  $55^\circ$ . Při větším úhlu  $\alpha$  se výsledná drsnost povrchu obrobené plochy snižuje. Úhel je dán poměrem posuvové rychlosti  $v_f$  a řezné rychlosti  $v_c$ , přičemž platí [3]:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_f}{v_c} \quad (5)$$

kde:  $2\alpha$  [°] - úhel křížení drah,  
 $v_f$  [m.min<sup>-1</sup>] - rychlost posuvového pohybu,  
 $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] - řezná rychlost.

Délka zdvihu musí být taková, aby honovací kameny v obou úvratích přebíhaly o 1/3 své délky okraje otvoru. Pokud přeběh není stejný, vzniká kuželovitost. Při malém přeběhu vzniká konvexní a při velkém konkávní odchylka válcovitosti. Honováním můžeme opravit kuželovitost, ovalitu a osovou křivost děr. Kameny bývají upevněny v nastavitelných ocelových lištách. Lze je nastavit na požadovaný rozměr mechanicky například přestavováním polohy kuželů [1].

Honováním jsou dokončovány pneumatické, hydraulické a brzdové válce, kliková ložiska motorových bloků a ojnic, válce spalovacích motorů, ozubená kola, bubny, ložiska vřeten, pouzdra, apod. Honovat je možné kalené i nekalené oceli, slinuté karbidy, hliníkové slitiny, neželezné kovy, litiny, tvrdé povlaky a jiné materiály [2].

Dle požadované přesnosti konečného povrchu po honování se rozlišuje [2]:

- jednostupňové honování – společný nástroj pro hrubování i dokončování, u dokončování se může snížit tlak  $p_k$  nebo úhel  $2\alpha$ ,
- dvoustupňové honování – jeden nástroj pro hrubování s hrubší zrnitostí, jeden jemnozrný nástroj pro dokončování.

Řezné podmínky jsou závislé na několika faktorech. Jedná se zejména o obráběný materiál, výchozí a požadované parametry drsnosti povrchu a přesnosti tvaru, použité brusivo a přídavek na honování. Honováním lze získat velmi vysokou jakost povrchu obrobené plochy, především jde o nízké hodnoty parametrů drsnosti ( $R_a$ ,  $R_z$ ), nosný podíl až 90 % nebo vysoká přesnost geometrického tvaru (válcovitost, kruhovitost, kuželovitost) [3].

Řezné kapaliny jsou důležité nejen kvůli produktivitě procesu, ale i pro dosahovanou jakost obrobené plochy. Odebírají teplo vzniklé při honování, redukují řezné síly a odpory, ale hlavně udržují řezivost tím, že vyplachují oblast řezání a odvádějí částičky třísky, brusiva i pojiva. Kapaliny s menší viskozitou se používají pro dosažení vysokého úběru, pro lepší drsnost povrchu obrobené plochy se volí kapaliny s větší viskozitou. Doporučené řezné kapaliny pro jednotlivé obráběné materiály [3]:

- litiny a kalené oceli – petrolej nebo petrolej s přídavkem 10% až 20% strojního oleje,
- měkké oceli – petrolej nebo petrolej s přídavkem 2% až 25% oleinu (olejové kyseliny) nebo vřetenového oleje,
- bronzы – voda nebo 5% až 10% emulze,
- hliníkové slitiny – organické oleje.

**Elektrolytické honování** se používá pro zvýšení úběru, při kterém je řezná kapalina nahrazena vhodným elektrolytem. Pouze 10 % přídavku na honování je odstraňováno abrazivním účinkem honovacích kamenů a zbylých 90 % přídavku je odebíráno elektrolytickým rozpouštěním [3].

**Vibrační honování** probíhá za takových podmínek, kdy se na rotační nebo posuvový pohyb nástroje superponuje kmitavý pohyb s amplitudou 1 – 10 mm a frekvencí až 1500 Hz. Při tomto způsobu honování získáme vyšší jakost obrobeného povrchu [3].

Mezi netradiční metody patří **honování pomocí laserového paprsku**, kterou uvádí firma Gehring na své internetové stránce [3].

### 2.3.1 Honovací nástroje

Honovací kameny (obr. 13) se vyrábějí z SiC pro obrábění měkkých ocelí, litin, slitin Cu a Al, nebo se vyrábějí z  $Al_2O_3$  pro honování oceli. Pojivo honovacích kamenů je buď keramické, nebo bakelitové pro velmi jemné honování. Pro vysoké požadavky na kvalitu honovaných děr se používají kameny ze syntetického diamantu a kubického nitridu boru. Pojivo diamantových kamenů bývá nejčastěji kovové [2].

Při jejich použití se dosahuje vyšší trvanlivosti kamenů, a to při několikanásobně větší produktivitě a lepší přesnosti rozměrů i drsnosti povrchu [1].



Obr. 13 Honovací kameny [14].

Typická honovací hlava obsahuje sadu radiálně stavitelných honovacích kamenů. Kameny jsou rozloženy v rovnoměrných roztečích po jejím obvodu následovně [3]:

- do průměru hlavy  $D = 50 \text{ mm}$  – 2 až 3 kameny,
- $D = 100 \text{ mm}$  až  $300 \text{ mm}$  – 6 až 10 kamenů,
- nad průměr hlavy  $D = 300 \text{ mm}$  – 12 kamenů.

Celková šířka kamenů dosahuje 0,15 až 0,35 obvodu hlavy [3].

Honovat lze jednou hlavou či postupně více hlavami s menší zrnitostí kamenů. Drsnost povrchu obrobené plochy je závislá na zrnitosti honovacích kamenů a na době honování. Pro hrubování se používají kameny se zrnitostí 80 až 160, pro dokončování 280 až 500. Hodnota velikosti úběru se pohybuje v rozmezí od 0,5 do  $10 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Na průměru obrobku se odebere 0,006 – 0,06 mm/min při hrubování, 0,001 – 0,002 mm/min při dokončování [1]. Honovací hlavy jsou zobrazeny na obr. 14 a 15 a dosahovaná přesnost při honování je uvedena v tab. 3.



Obr. 14 Honovací hlava [15].

Tab. 3 Dosahovaná přesnost při honování [1].

Honování	Přesnost rozměrů IT	Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Hrubovací	5 ÷ 6	0,2 ÷ 0,5
Dvoufázové honování	4 ÷ 5	0,1 ÷ 0,2
Velmi jemné	3 ÷ 4	0,025 ÷ 0,1



Obr. 15 Honovací hlava [16].

Uložení honovací hlavy a obrobku musí zabezpečit částečnou nebo úplnou vazbu mezi polohou obráběného povrchu a aktivním povrchem kamenů hlavy. K dispozici máme dva nebo čtyři stupně volnosti upnutí nástroje nebo obrobku. Když je hlava pevně upnutá ve vřetenu stroje, obrobek má dva stupně volnosti [3].

### 2.3.2 Honovací stroje

Stroje pro honování se vyrábějí ve velkém rozsahu provedení a rozměrů, podle velikosti a počtu honovaných součástí. Dělí se [2]:

Podle polohy vřeten:

- svislé,
- vodorovné.

Podle počtu vřeten:

- jednovřetenové,
- vícevřetenové.

Nejčastěji se používají stroje svislé jednovřetenové (obr. 16). Vyznačují se různým stupněm automatizace pracovního cyklu. Stroj je při použití automatického řízení pracovního cyklu vybaven systémem aktivní kontroly [2].

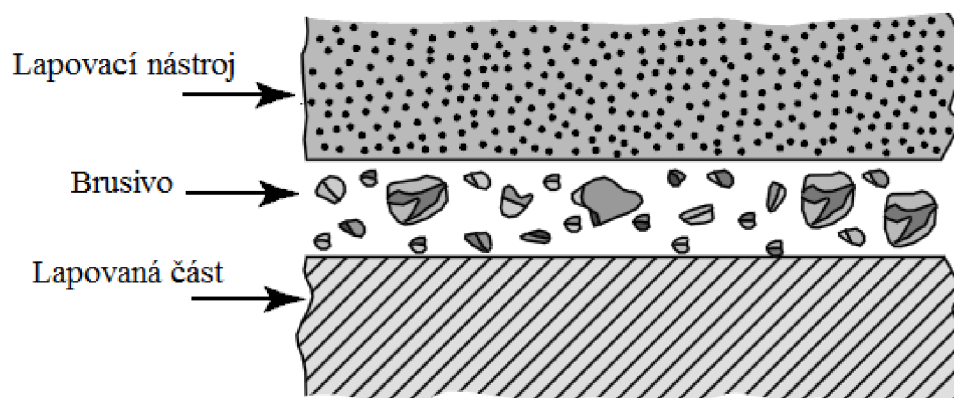
U automatických strojů je potřeba třídit obrobky tak, aby tolerance výchozího rozměru byla  $\pm 0,005$  mm. Čas honování je většinou kratší než 3 min. V kusové výrobě se mohou místo speciálního honovacího stroje použít i vrtačky [1].



Obr. 16 Honovací stroj [17].

## 2.4 Lapování

Dokončovací metoda obrábění, při které lze dosáhnout nejvyšší rozměrové přesnosti a nejmenší drsnosti povrchu obrobené plochy. Využívá se pro dokončování válcových, rovinných a tvarových ploch. Lapováním jsou dokončovány funkční plochy měřidel (např. koncové měrky, kalibry), ozubení, důležitá závitová spojení, součásti motorů automobilů atd. Lapovat lze měkké i tvrdé materiály, v kusové výrobě ručně nebo v sériové a hromadné výrobě strojově [2]. Schéma řezného procesu lapování je uvedeno na obr. 17.



Obr. 17 Schéma řezného procesu lapování [18].

Lapování se od ostatních dokončovacích operací liší tím, že k úběru materiálu dochází převážně účinkem zrn volného brusiva, které je přiváděno měkkou pastou nebo kapalinou mezi nástroj a obrobek. Odřezáváním mikronerovností brousícími zrnky se zlepšuje drsnost a do jisté míry i geometrický tvar obrobených ploch. Také plastická deformace malých nerovností, která vzniká tlakem pohybujících se brusných zrn, vede ke zlepšení kvality povrchu [1]. Dosahovaná přesnost při lapování je uvedena v tab. 4.

Rozlišujeme hrubovací, jemné a velmi jemné lapování. U hrubování dochází velkým počtem zrn brusiva k odřezávání nerovností a výstupků obráběného povrchu. K plastické deformaci povrchové vrstvy lapované plochy dochází při velmi jemném lapování [2].

Tab. 4 Dosahovaná přesnost lapování rovinných a vnitřních rotačních ploch [3].

Lapování	Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
	střední	rozsah	střední	Rozsah
<b>Hrubovací</b>	4	3 ÷ 5	0,2	0,16 ÷ 0,40
<b>Jemné</b>	2	1 ÷ 3	0,1	0,08 ÷ 0,16
<b>Velmi jemné</b>			0,03	0,01 ÷ 0,04

V porovnání s dalšími dokončovacími metodami mezi nevýhody lapování patří velká pracnost, malá produktivita a vysoké náklady na jednotku plochy. Proto lapování lze nahradit honováním nebo superfinišováním. Ovšem pouze tam, kde to je možné z hlediska požadované přesnosti a drsnosti povrchu [2].

Broušení bývá obvykle operací před lapováním. Po broušení se ponechávají přídavky pro lapování. Velikost těchto přídavků se většinou pohybuje v rozmezí 0,005 mm až 0,03 mm. Pokud jsou přídavky větší a požadované kvalitativní parametry vysoké, je výhodnější použít vícestupňové lapování, u něhož se postupně zmenšuje zrnitost brusiva, pracovní rychlost a přítlačný tlak. Při lapování je nosný podíl mnohem větší než při jemném broušení. Například  $R_a = 0,16 \mu\text{m}$  - při jemném broušení je nosný podíl 30 %, po lapování na stejnou drsnost je nosný podíl kolem 80 % [1].

Základní faktory řídicí proces lapování [1]:

- přítlak  $p$  [MPa] – tlak v místě styku lapovacího nástroje s obrobkem,
- rychlost pracovního pohybu  $v_1$  [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ],
- doba lapování  $t$  [min].

#### 2.4.1 Lapovací nástroje

Nástroje pro lapování mají negativní tvar lapovaných ploch. Lapovací nástroje se vyrábí z jemnozrnné feritické nebo perlitické litiny, z olova, mědi, měkké oceli a plastických hmot. Nástroje z kalené oceli nebo tvrdě chromované nástroje se používají pro velmi jemné lapování. Při ručním lapování se pro lapování rovinných ploch používají lapovací desky a pro lapování vnějších válcových ploch se používají lapovací prstence. Při strojním lapování rovinných ploch se používají lapovací kotouče litinové nebo brousící kotouče s vázaným brusivem a keramickou vazbou (obr. 18). Při lapování vnějších rotačních ploch se používá bezhrotý zapichovací nebo průběžný způsob - nástrojem je kotouč s brusivem v keramické vazbě [2].



Obr. 18 Lapovací kotouče [19].



Nosným médiem pro brusivo je buď kapalina, nebo pasta. Pro jemné lapování litiny lze občas použít benzín, naftu, pro vysoký lesk kalené oceli se použije líh s vídeňským vápnem. Složení lapovacích past je různé. Obsahují nejen brousící zrna, ale také živočišné tuky nebo oleje, petrolej či některé druhy kyselin. Kyselina usnadňuje obroušení, protože narušuje mikroskopické vrstvy lapované plochy [1, 3].

Zrnitost brusiva se vybírá podle výchozí, konečné drsnosti a dle přídavku na lapování. Tvar brusiva je také velmi důležitý. Zrna musí mít velkou rovnoměrnost granulometrického složení a musí být izometrická. Pro velmi jemné lapování se používá oxid chromu ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), železa ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) nebo vídeňské vápno ( $\text{CaMgCO}_3$ ) [1]. Doporučená brusiva pro lapování jsou uvedena v tab. 5.

Tab. 5 Brusiva pro lapování [2].

Lapovaný materiál	Brusivo
Ocel	Umělý korund
Litina, keramika, sklo	Karbid křemíku
Zvlášť tvrdé materiály (SK, RO)	Karbid bóru, kubický nitrid bóru, diamant
Měkké materiály	Oxid železitý $\text{Fe}_2\text{O}_3$ Oxid chromitý $\text{Cr}_2\text{O}_3$ Vídeňské vápno $\text{CaMgCO}_3$ Hydroxid železitý $\text{Fe}(\text{OH})_3$

#### 2.4.2 Lapovací stroje

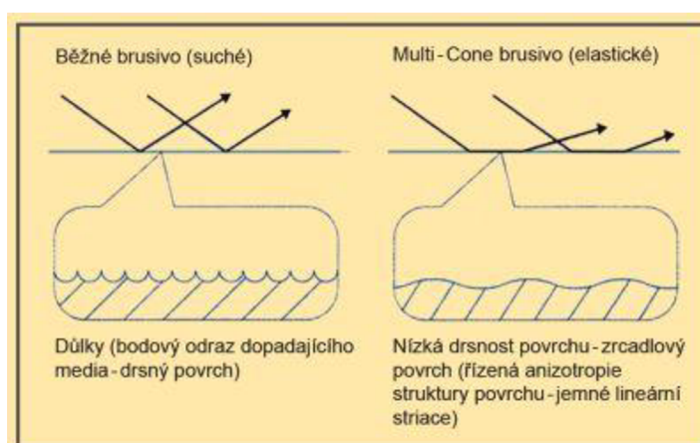
Pro lapování rovinných i válcových ploch se používají univerzální lapovací stroje, pro lapování určitého druhu ploch jako například boky zubů kol, čepy klikových hřídelí, valivá tělíska valivých ložisek se používají speciální lapovací stroje (obr. 19). Dvoukotoučové lapovací stroje se svislými osami lapovacích kotoučů jsou využívány pro lapování vnějších válcových a rovinných ploch. Mezi kotouče se vkládá unášecí deska, která má otvory přizpůsobené tvaru lapovaných součástí. Výstředník pohybuje unášecí deskou tak, aby se součásti pohybovaly po drahách, které pokryjí celý povrch lapovacího kotouče. Díky tomu je jeho opotřebení rovnoměrné [2].



Obr. 19 Lapovací stroj [20].

### 2.4.3 Aero Lap

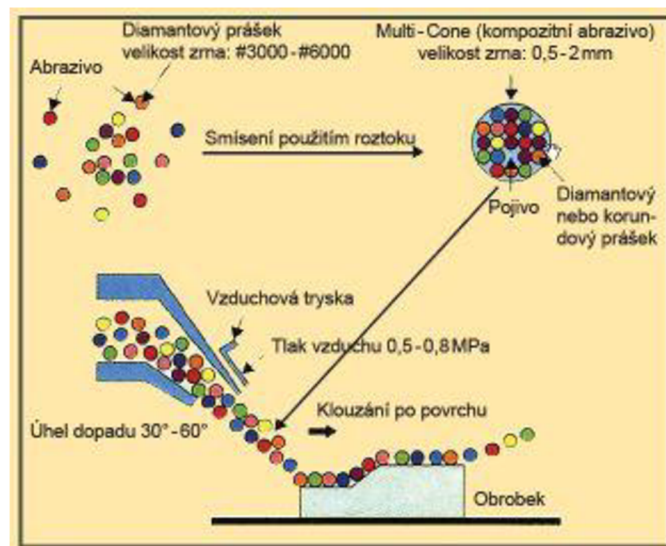
Dokončovací metoda obrábění, která dovoluje automatizovaně dokončovat funkční nebo pohledové plochy součástí do zrcadlového lesku (obr. 20). Tuto speciální technologii lze použít zejména při dokončování tvarových ploch zápustek, raznic, forem a řezných nástrojů. To znamená u operací, které byly doposud vykonávány téměř výhradně na ručních pracovištích [21].



Obr. 20 Drsnost povrchu při použití běžného brusiva a brusiva Multi-Cone [21].

### *Mechanismus Multi - Cone*

Kompozitní elastické částice s abrazivem dopadají vysokou rychlostí a kloužou po obráběném povrchu, tím dochází k leštění a jemnému broušení plochy. Při použití speciálního pojiva se dosahuje pružnosti a adheze pojiva k abrazivu [21]. Znázornění mechanismu Multi-Cone je na obr. 21.



Obr. 21 Mechanismus Multi-Cone [21].

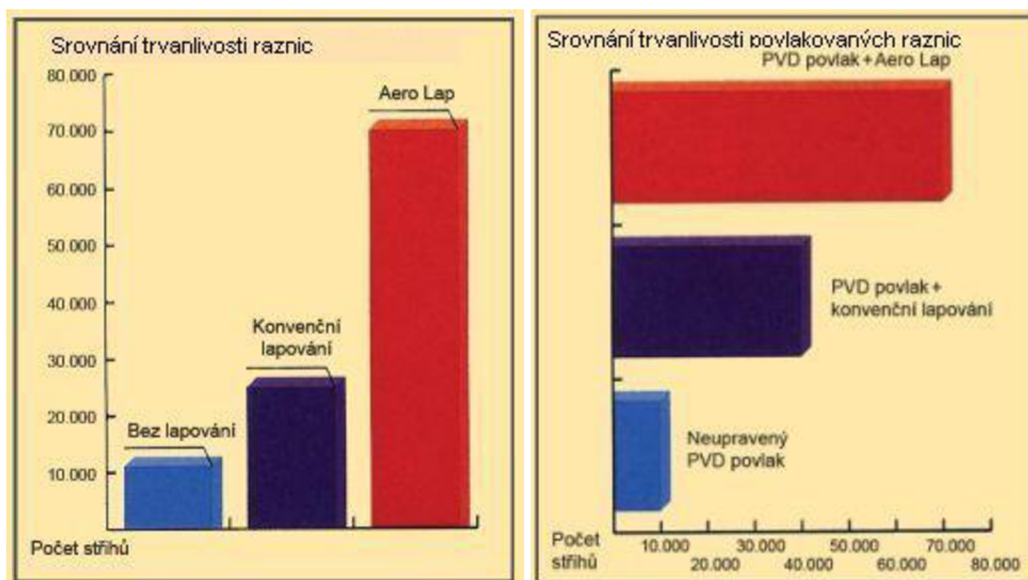
### *Charakteristika [21]:*

- snadné lapování různých ploch (bez složité přípravy nástrojů),
- homogenita struktury povrchu a podstatné snížení počtu poškozených a vadných dílců,
- zvýšení trvanlivosti a prodloužení životnosti forem a zápusťek (zejména při tváření zastudena),
- prodloužení životnosti PVD/CVD povlaku (oproti jemnému lapování),
- nevytváří se prach a nadměrný hluk.

Použití elastických částic s abrazivem navíc umožňuje [21]:

- vysokou produktivitu lapování – vysoká efektivnost lapování bez nadměrných ztrát,
- čisté lapování – čisté pracovní prostředí bez brusného prachu, snadná údržba,
- využití abraziv s rozdílnou zrnitostí pro různé účely – hrubší, jemnější dokončování,
- snížení provozních nákladů – abraziva mají značnou životnost (lze je recyklovat).

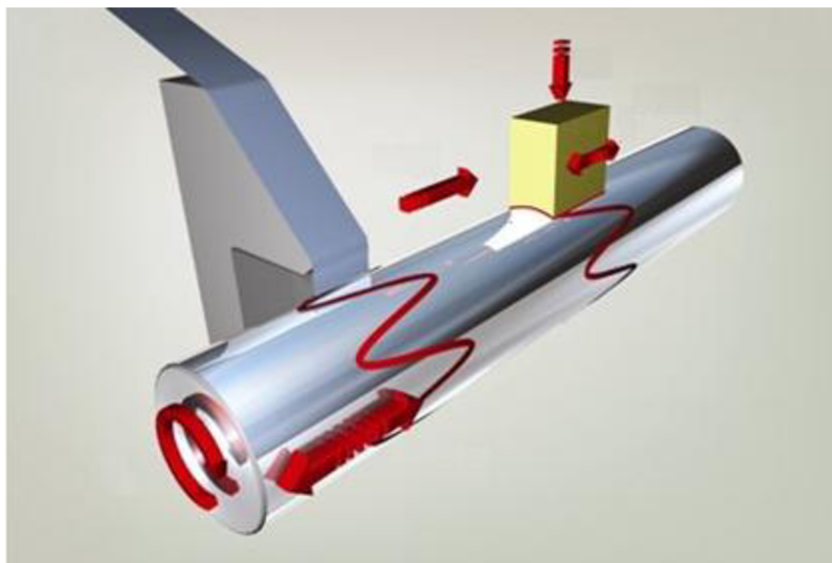
Metodou Aero Lap je možno pomocí vrhání elastických částic s abrazivem vytvořit zrcadlově lesklý povrch na nepravidelně tvarované ploše mnohem efektivněji než pomocí technologií konvenčního lapování [21]. Srovnání trvanlivosti raznic je na obr. 22.



Obr. 22 Srovnání trvanlivosti raznic [21].

## 2.5 Superfinašování

Vysoce produktivní dokončovací metoda obrábění vnějších a vnitřních rotačních, rovinných a tvarových ploch vyznačující se vysokou přesností a nízkou drsností povrchu. Nejvíce bývá uplatňováno pro dokončování valivých ložisek nebo součástí v odvětví automobilového průmyslu. Superfinašovat je možné součásti z kalených i nekalených ocelí, litin, slitin těžkých kovů a plastů [3].



Obr. 23 Princip superfinašování [22].

Superfinašování je bráno jako zvláštní druh broušení, při kterém jsou z dokončovaného povrchu odřezávány vrcholky nerovností velmi jemnými zrny brousícího nástroje - superfinašovacího kamene. Pro superfinašování je charakteristický kmitavý pohyb superfinašovacího kamene, malé řezné rychlosti a definovaná síla  $F$  vyvolávající nízký tlak  $p_k$  na obráběnou plochu (obr. 23) [2].

Řezný pohyb vzniká skládáním rotačního pohybu součásti s obvodovou rychlostí  $v_w$  10 – 80  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  a dále kmitavého přímočarého posuvového pohybu superfinašovacího nástroje, který je zpravidla kolmý na směr rotačního pohybu součásti, o frekvenci  $\omega_k$  500 – 3000  $\text{min}^{-1}$ . Amplituda zdvihu superfinašovacího nástroje  $H$  leží v rozsahu 0,1 – 10 mm. Rychlost posuvového pohybu  $v_f$  se určuje dle vztahu (6) a volí se v rozsahu 2 – 15  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  [3].

$$v_f = \frac{H \cdot \omega_k}{1000} \quad (6)$$

kde:  $v_f$  [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ] - rychlost posuvového pohybu,

$\omega_k$  [ $\text{min}^{-1}$ ] - frekvence,

$H$  [mm] - amplituda zdvihu nástroje.

Počet superfinišovacích kamenů se pohybuje mezi 1 až 4 a jsou přitlačovány tlakem  $p_k = 0,1$  MPa až 0,4 MPa na obráběnou plochu. Díky zvětšující se hodnotě nosného podílu povrchu obrobené plochy během superfinišování tlak stále klesá až natolik, že superfinišovací kameny začnou „plavat“ na vrstvě procesní kapaliny, následně se řezný proces v určitém okamžiku automaticky zastaví. Pokud obrobený povrch nedosáhl požadovaných parametrů, superfinišování může pokračovat. Je ovšem nutné navýšení přitlačné síly  $F$ , aby se tlak  $p_k$  zvýšil na hodnotu, při které jsou zrna brusiva opět schopna odebírat třísky z obráběného materiálu [3]. Dosahované přesnosti při superfinišování vnějších rotačních ploch jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6 Dosahovaná přesnost superfinišování vnějších rotačních ploch [3].

Superfinašování	Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
	Střední	rozsah	střední	rozsah
<b>Dokončovací</b>	4	3 ÷ 5	0,2	0,05 ÷ 0,40
<b>Jemné</b>	3	2 ÷ 4	0,05	0,025 ÷ 0,10

Největšího úběru je dosaženo při  $\alpha = 40^\circ$  až  $60^\circ$ , avšak obrobený povrch je matný. Při úhlech  $\alpha$  menších než  $40^\circ$  se snižuje řezivost kamenů a povrch tak získává vysoký lesk. Procesní kapalinou bývá nejčastěji petrolej, směs petroleje s 10 % až 15 % minerálního oleje případně různé oleje s aditivy. Pokud chceme dosáhnout vysokého lesku (jemné superfinišování) nebo používáme měkčí materiály, je vhodná kapalina s vyšší viskozitou - olej. Pro větší úběry je naopak vhodnější kapalina s nižší viskozitou - petrolej [2].

Průběh procesu superfinišování je ovlivňován rychlostí posuvového pohybu  $v_f$ , obvodovou rychlostí obrobku  $v_w$ , velikostí tlaku  $p_k$  a viskozitou procesní kapaliny. Superfinašování má dvě fáze, hrubovací a leštící. Pro obě fáze je důležitý poměr rychlosti posuvového pohybu nástroje a obvodové rychlosti obrobku. Ten určuje úhel křížení drah zrn brusiva  $2\alpha$  a lze jej vypočítat z následujícího vztahu [3]:

$$tg\alpha = \frac{v_f}{v_w} \quad (7)$$

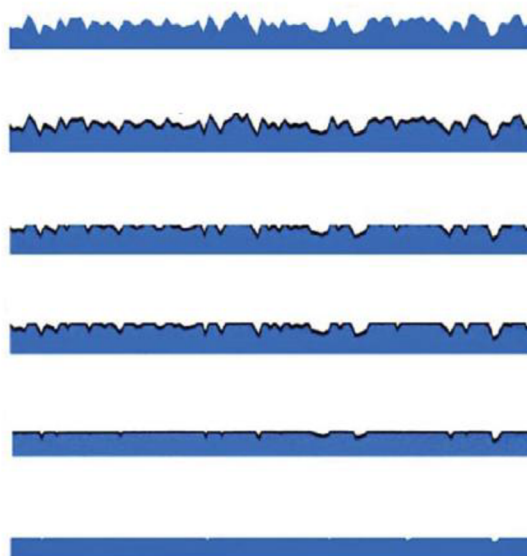
kde:  $2\alpha$  [ $^\circ$ ] - úhel křížení drah,  
 $v_f$  [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ] - rychlost posuvového pohybu,  
 $v_w$  [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ] - obvodová rychlost obrobku.

Operace předcházející superfinišování bývá nejčastěji broušení, popřípadě jemné soustružení nebo vyvrtávání. Výchozí parametry plochy pro superfinašování jsou rozhodující pro volbu řezných podmínek (tab. 7) [2].

Tab. 7 Řezné podmínky a přídavky pro superfinišování [2].

Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]		Přídavek	Operace	Úhel křížení	Poměr
požadovaná	výchozí	[ $\mu\text{m}$ ]		stop $2\alpha$ [ $^\circ$ ]	$v_w/v_f$
0,16	1,6	10 ÷ 12	1	80 ÷ 110	0,8 ÷ 1,2
0,08	0,8	5 ÷ 8	2	40 ÷ 70	1,5 ÷ 2,5
0,04	0,4	4 ÷ 5	3	20 ÷ 40	3 ÷ 12
0,02	0,2	2 ÷ 3	4	méně než 20	12 ÷ 28

Operace: 1,2 – hrubovací fáze superfinišování, 3,4 – jemné superfinišování.



Obr. 24 Průběh superfinišovacího procesu [23].

Průběh superfinišovacího procesu je znázorněn na obr. 24. Při superfinišování se vytváří povrch vyznačující se malou drsností a charakteristickými plochami. Z toho plyne, že povrch má vysoký podíl nosného materiálu, který působí na snížení opotřebení a v kombinaci s množstvím maziva i na optimální vlastnosti chodu. Na základě překrývajících se pohybů se vytváří křížová struktura s výbornými tribologickými vlastnostmi [22].

Díky dosahované kvalitě povrchu (tab. 8) je superfinišování jen stěží možné nahradit jiným druhem obrábění. Na základě dosahovaných parametrů obrobků může být dosaženo významných pokroků v ekonomice provozu, to je zvyšování energetické účinnosti, zvyšování účinnosti systémů, snižování ztrát třením, ochrana životního prostředí díky snížení škodlivých látek a hluku a snižování TCO zvýšením životnosti jednotlivých dílů [22].

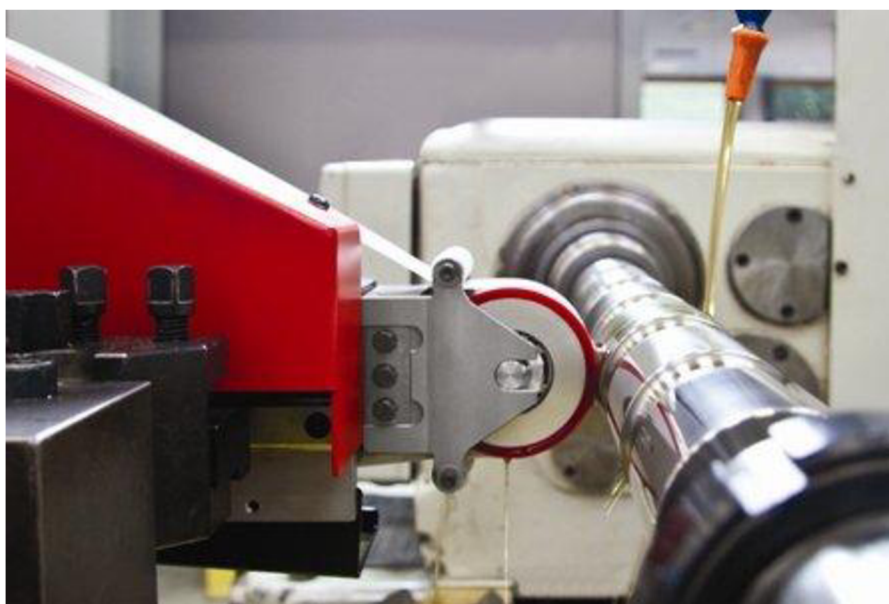
Tab. 8 Kvalitativní parametry dosažené superfinišováním [22].

Kvalitativní parametry dosažené superfinišováním	
<b>Kruhovitost</b>	0,2 – 5 $\mu\text{m}$
<b>Přímost</b>	0,2 – 5 $\mu\text{m}$
<b>Válcovitost</b>	1 – 7 $\mu\text{m}$

<b>Ra – střední aritmetická uchylna profilu</b>	0,015 – 0,2 $\mu\text{m}$
<b>Rz – maximální výška profilu</b>	0,15 – 2,0 $\mu\text{m}$
<b>Rpk – redukována výška špiček</b>	0,015 – 0,2 $\mu\text{m}$
<b>Rk – výška jádra profilu</b>	0,04 – 0,4 $\mu\text{m}$
<b>Rvk – redukována hloubka rýh</b>	0,02 – 0,5 $\mu\text{m}$
<b>Rmk – podíl nosného prvrchu</b>	80 – 100 %

### 2.5.1 Superfinašovací nástroje

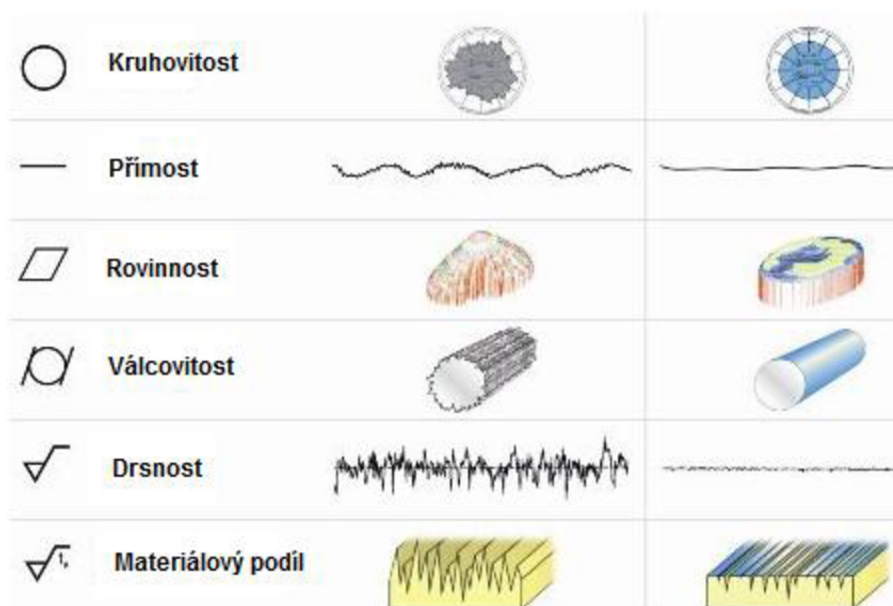
Superfinašovací nástroje - kameny - jsou vyráběny z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  s keramickou a bakelitovou vazbou z elektrokorundu pro obrábění oceli, z karborunda „SiC“ pro obrábění litiny, nezelezných kovů, slitin a oceli nižších pevností. Kubický nitrid boru v keramické vazbě se používá pro superfinašování vysoce legovaných nástrojových a konstrukčních ocelí. Diamantový prášek v organické vazbě se používá pro velmi tvrdé materiály - slinuté karbidy. Zrnitost se pohybuje od 180 do 600 i jemnější, záleží na výchozí a požadované drsnosti povrchu. Tvrdost nástroje se vybírá v závislosti na tvrdosti superfinašovaného materiálu. Kameny jsou do superfinašovacích hlav upevňovány mechanicky nebo se mohou lepit na ocelové podložky [1, 2].



Obr. 25 Superfinašování superfinašovacím pásem s přitlačnou kladkou [22].

Používané nástroje lze rozdělit v zásadě do dvou kategorií - na nástroje s flexibilním podkladem a na nástroje pevné. Nástroje na flexibilním podkladu, nazývané také superfinašovací pásy nebo filmy, se sestávají z podložky (z polyesteru, tkaniny, papíru), řezného zrna a pojiva. Pásy jsou přitlačovány na obrobek pomocí přitlačného válečku nebo přitlačné kladky (obr. 25). Pevné nástroje jsou superfinašovací kameny a kotouče. Kameny se skládají podobně jako brusné kotouče z řezného zrna (oxid hlinitý, karbid křemíku, sintrovaný korund, CBN, diamant), pojiva (keramika nebo umělá pryskyřice), popřípadě impregnace (síra, vosk) [22]. Zlepšení tvarů povrchu superfinašováním je znázorněno na obr. 26.





Obr. 26 Zlepšení tvarů povrchu superfinišováním [22].

### 2.5.2 Superfinišovací stroje

Superfinišovací stroje mohou být vyráběny jako jednovřetenové nebo vícevřetenové. Jejich hlavní využití je pro dokončování součástí valivých ložisek (válečky, kroužky), dříků ventilů, pístních čepů a dalších součástí hromadné výroby. V malosériové a kusové výrobě se často používají speciální přídavná zařízení se samostatným, nezávislým pohonem, který umožňuje přímočarý oscilační pohyb nástroje. Tato zařízení se upínají na suporty hrotových soustruhů nebo na hrotové brusky [2].

U superfinišovacích strojů je značně velká rozmanitost konstrukcí. Konstrukce jsou přizpůsobeny širokému sortimentu tvarů a velikostí obráběných součástí [1].

### 2.5.3 Přídavné superfinišovací zařízení

Vysoké jakosti, jakou lze očekávat od broušení nebo leštění povrchu, lze dosáhnout i na starých univerzálních soustruzích. Pokud je u převodkových hřídelí, pístních čepů nebo pracovních válců požadována tato kvalita povrchu (až do  $Rz\ 0,1\ \mu\text{m}$ ), pak ji lze v procesu výroby bezpečně dosáhnout pomocí přídavného superfinišovacího zařízení. Přídavné superfinišovací zařízení lze jednoduchým způsobem upnout do nožového držáku na soustruhu a ovládá se stlačeným vzduchem přivedeným k zařízení. Po nastavení potřebných pracovních parametrů na soustruhu lze prostřednictvím technologie superfiniše vyrobit uložení ložiska, těsnící sedlo nebo leštěné povrchy. Ovládání zařízení je jednoduché a lze ho instalovat s minimálními náklady [24].

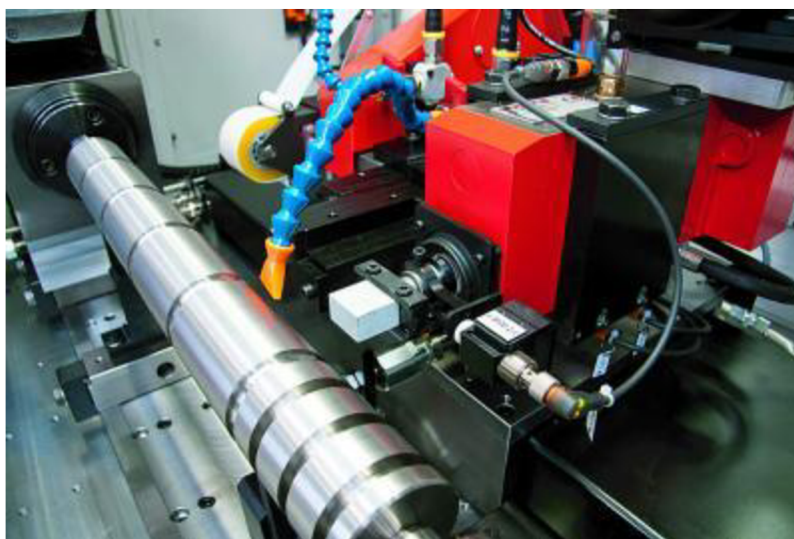
### *Stavebnicový systém pro superfinišování*

Stroj LeanCostMachine (obr. 27, 28) představuje firma Supfina jako flexibilní a hospodárné řešení pro obrábění superfinišováním v malých a středních sériích. Stroj je konstruován jako modulární stavebnicový systém pro superfinišování a je vybaven moderní technologií, která splňuje vysoké požadavky na kvalitu a spolehlivost výrobního procesu, obzvláště v oblastech automobilového průmyslu a jeho dodavatelů, výrobců hydrauliky a medicínské techniky [25].



Obr. 27 Superfinišovací stroj Supfina LeanCostMachine [25].

V provozu může být nasazeno současně až šest vestavných zařízení pro obrábění pásem, kamenem nebo pro kartáčování či leštění. Díly pro obrábění se zakládají ručně nebo strojově, shora, zepředu nebo ze strany stroje. Filtrační nádoby s objemem až 150 l se umísťují pod stroj, čímž se dosáhne maximální flexibility a s minimální potřebou místa [25].



Obr. 28 Modulární systém obrábění [25].

Technické parametry

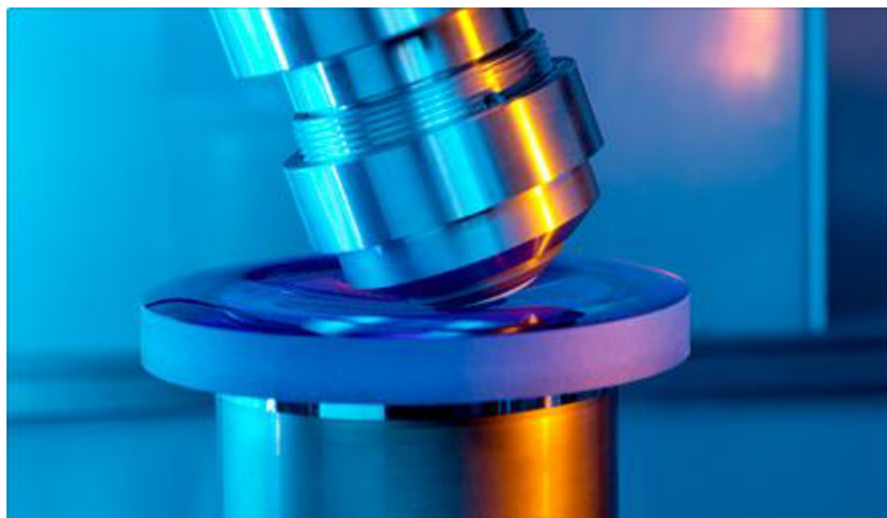
Užití superfinišovacího stroje Supfina LeanCostMachine je pro obrobky o průměru do 160 mm a délce do 800 mm a mezi jeho přednosti patří [25]:

- možnost použití všech vestavných zařízení Supfina,
- integrace až 6 zařízení (dle typu),
- vybavení až 3 NC osami,
- možnost automatického zakládání obrobků ze všech stran i shora,
- flexibilní přestavba na jiný typ obrobků (i automaticky),
- komplexní automatizace pro začlenění do výrobní linky.

## 2.6 Leštění

Leštění, které se skládá z nejrůznějších druhů dokončovacích operací, se používá pro získání lesklého povrchu s nižšími nároky na přesnost rozměru (obr. 29). Jedná se o úpravy povrchu z velké části z důvodu jejich vzhledu. Minimalizuje se úběr materiálu, pouze se odstraňují stopy po předcházejícím obrábění, které určuje přesnost rozměrů a tvarů a leštěním se již nezlepší. Z povrchu jsou mimo mikronerovnosti odstraňovány také nečistoty, vrstvičky oxidů a dalších chemických sloučenin. Obvykle se odstraňování vrcholků nerovností provádí ve třech následujících krocích [1]:

- a) hrubování – pomocí brousících zrn, která jsou pevně vázána na textilní podklad (brousící plátna, kotouče, pásy),
- b) jemné leštění – prostřednictvím volně rozptýlených zrn v kapalině nebo leštící pastě nanášené na textilní kotouče nebo pásy,
- c) dolešťování – bez použití brusiva, přitlakem textilního kotouče nebo pásu; při vyšších rychlostech dochází díky tření k zahřátí a také k plastické deformaci vrcholků nerovností neboli rozleštění.



Obr. 29 Leštící proces [26].

Leštící nástroje jsou nejrůznějšího provedení, a to v závislosti na tvaru upravované plochy [1]:

Kotouče:

- lamelové, pásy vyrobené z tkanin o různé tuhosti pro dobrý kontakt s upravovanou plochou; lamely mohou být orientovány radiálně (leští obvodem) nebo šikmo (leští i bokem kotouče),
- vrstvené (textilní tkaniny nebo plstěné),
- kombinace vláken a lamel,
- speciální – tuhé (dřevo, guma, kov) potažené plstí.

Textilní pásy:

- nekonečný pás, který je přitlačován volným povrchem nebo tvarovou opěrkou,
- brousící pásy jsou nalepené na kmitajícím tvarovém kameni; lepší orientace brousících zrn zvyšuje řezivost, pružnost podkladového materiálu dovoluje použít vyšší rychlost a větší přitlačné síly.

Brousící zrna jsou používána s ohledem na materiál a žádaný účinek procesu z různých brousících materiálů a zrnitostech 80 – 600 [1]. Leštění válcové plochy pomocí leštícího kotouče je znázorněno na obr. 30.



Obr. 30 Leštění válcové plochy pomocí leštícího kotouče [27].

## 2.7 Tryskání

Díky volným částicím abrazivního materiálu dochází k úběru obráběného materiálu. Částice dopadají vysokou rychlostí na obráběnou plochu, zlepšuje se její vzhled a také drsnost povrchu. Nosné médium bývá většinou kapalina nebo stlačený vzduch. Těmito médii se dopravují abrazivní částice pomocí stavitelných trysek přímo k obrobku [1].

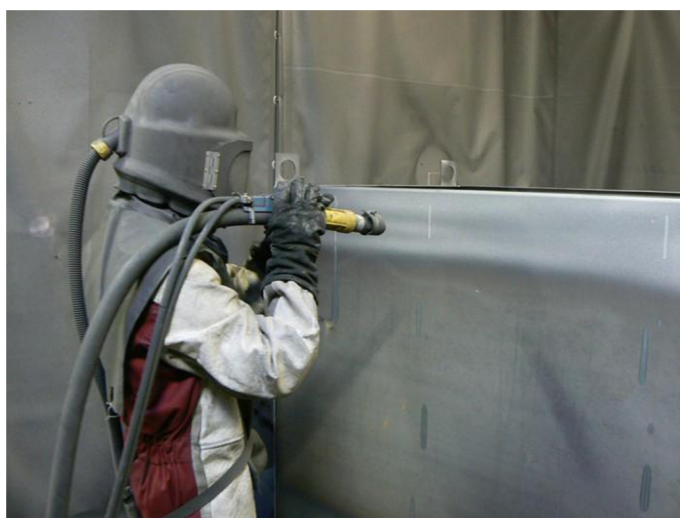
Výslednou drsnost povrchu a množství odebraného materiálu ovlivňuje [1]:

- druh a zrnitost brusiva (80 – 600),
- tlak nosného média (0,1 – 1 MPa),
- vzdálenost trysky od povrchu (20 – 100 mm),
- úhel sklonu trysky (0 – 45°),
- vzájemná rychlost pohybu součásti a trysky (doba působení),
- počet průchodů (1 – 10),
- překrytí stop (řádkování – kmitání nebo rotace trysky, příčný posuv),
- přetryskání jemnějším brusivem kolmo na předchozí směr.

Používaná abraziva jsou [1]:

- tříděný křemičitý písek – pro nejhrubší operace (čištění odlitků a výkovků – pískování),
- tříděná zrna brousících materiálů – lapování proudem brusiva, broušení,
- kovové částice (ocelová dř, litinová zrna, jemné třísky apod.).

Proces tryskání probíhá bez tepelného působení a dochází u něj i k částečnému zpevnění povrchu. Drsnost povrchu, kterou lze tryskáním dosáhnout je  $R_a = 0,1 - 0,8 \mu\text{m}$ , záleží na zrnitosti brusiva, které bylo použito naposled. Přesnost se tryskáním nezlepší, je totiž daná předcházející výrobní operací [1]. Příklad tryskání v praxi je uveden na obr. 31.



Obr. 31 Příklad tryskání v praxi [28].

### 2.7.1 Tryskání zvlhčeným abrazivem

Výrobou přístrojů pro tryskání zvlhčeným abrazivem se zabývá německá firma Torbo Engineering Keizers. Tlaková nádoba je naplněna směsí abraziva (písku) a vody namíchaná v poměru 80 : 20 (80 % písku a 20 % vody). Tato pracovní směs je tlačena proudem stlačeného vzduchu na otryskávanou plochu. Díky podílu vody se dosahuje snížení prašnosti (ve srovnání s tryskáním suchým pískem) o 95 % při jeho plné náhradě, proto je možno použít tuto technologii při tryskání na volném prostranství, aniž by se musely budovat konstrukce zabraňující úletu prachu nebo v interiérech [29].

Otryskání je umožněno kinetickou energií zrníček písku – při plném provozu kompresoru a při použití správného průměru tryskacích hadic a koncové trysky je dosahováno rychlosti písku až 300 m.s<sup>-1</sup> [29].

Torbo stroje mají ještě další přednosti: Možnost seřadit stroj na šetrné až velmi šetrné tryskání povrchů, jako je například travertin, dřevo, hliník nebo sklo. Dále také mobilnost a nezávislost na přítomnosti rozvodů médií na konkrétním pracovišti. Při použití pro pískování ocelových konstrukcí je také možno použít nadstandardní výbavy – dávkovače pasivačního roztoku, který zabraňuje povrchové korozi. Další výhodou je hospodárnost jejich provozu [29].

## 2.8 Omílání

Omílání je nejproduktivnější metoda korekce povrchu nebo vzhledu velkého množství menších předmětů, kde nejsou kladeny nároky na přesnost. Základní princip metody spočívá v úběru materiálu z povrchu součásti abrazivními částicemi, kdy konají vzájemný pohyb v prostoru omítacího bubnu (obr. 32). Abrazivní účinek, rychlost a dráhy jsou závislé na několika faktorech. Především na tvaru a pohybu bubnu, dále na tvaru, materiálu a pohybu částic, vlastnostech materiálu, tvaru ploch a rozměrech obrobku. Omítací buben může být 1 – 10 m dlouhý, kruhového průřezu 0,5 – 3 m, šesti či osmihranného průřezu apod., hranolu, zvonu, tvaru válce komolého kužele, části kulové plochy nebo složený z podobných ploch. Uvnitř bubnu mohou být umístěny různé přepážky, upínací přípravky a závěsy. Základní pohyb při omílání je rotační (0,5 – 2 m/s), vodorovný, osový, šikmý, excentrický, sférický. Dále může být pohyb plynulý, vratný, přerušovaný nebo se případně může doplnit rázy a kmity [1].

Omílání může probíhat s kapalinou nebo za sucha, postupně, přerušovaně či kontinuálně v automatickém cyklu. Vzájemný pohyb lze regulovat otvory ve vnějším povrchu bubnu nebo nastavitelnými tryskami ve vnitřním prostoru přívodem tlakového vzduchu nebo kapaliny. Při použití kapalin se přidávají aditiva, která urychlují úběr materiálu a napomáhají k ochraně proti korozi. Doba trvání procesu bývá i několik hodin (1 až 4). Náplň bubnu činí 50 % až 80 % objemu bubnu a tvoří ji pracovní částice, obrobky, pomocné prostředky a kapalina. Pokud má obrobek vhodný tvar jako například malé matice nebo podložky, není zapotřebí abrazivních částic. Obrobek může být pevně upnutý, volný nebo zavěšený. Obrobek umístěný v závěsech usnadňuje výměnu, případně třídění a čištění po ukončení procesu [1].



Obr. 32 Tlakové omílání [30].



Omílání probíhá ve více fázích. Může se jednat o změnu částic (zrnitost, velikost) nebo bubnu (prostoru při kontinuálním omílání) [1]:

- čistění – nejhrubší částice (hrudky),
- broušení – střední zrnitost brusiva (60 – 120),
- leštění – jemné brusivo (240 – 500),
- doleštění – nazýváno také „měkký proces“, při kterém nejjemnější částice brusiva (oxidy kovů, plavená křída, vápno) setrvávají na povrchu pomocných prostředků (kuličky z umělé hmoty, dřevěné piliny, korková drť) a tímto způsobem vytvořené částice dolešťují povrch,
- zpevnění – „tvrdý proces“ – jedná se o kovová tělíska, která mají hrany zaoblené omíláním nebo kuličky.

V závislosti požadavků na upravovanou plochu a její výchozí stav je možno vynechat některé fáze [1]. Příklad omílání v omílacím bubnu je uveden na obr. 33.



Obr. 33 Proces omílání v omílacím bubnu [31].

### 2.8.1 Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů

Pomocí omílání lze řešit celou škálu technologických potřeb, jako je odstraňování otřepů a zaoblování hran, vyhlazování povrchu a jeho leštění, odmašťování a čištění, moření, odstraňování okují či rzi. Stanovení strojního zařízení vychází z velikosti součástí, které se mají omílat, jejich tvaru a z požadované intenzity omílání. Kupříkladu pro nejčastější technologický požadavek odstraňování otřepů lze použít zařízení ve formě od nejjednoduššího kruhového vibrátoru přes odstředivé omílací zařízení až po ucelené výrobní linky, jejichž hlavní součástí jsou průběžná vibrační (lineární nebo spirálová) omílací zařízení. U spousty obrobků je požadován hladký povrch. U dekorativních prvků je to lepší design, u kulových čepů nižší tření, u turbínových lopatek tryskových motorů nižší odpor vzduchu, u nábytkového kování tenčí vrstva kovu při následné galvanické úpravě, u šnekových převodů nižší otěr, nižší hlučnost u ložisek atd. [32].

Omílání se uplatňuje i při výrobě galanterního zboží, dekorativních prvků, armatur a fitinků, komponentů hudebních nástrojů, ale i zdravotnických výrobků (kostní implantáty, zpevňovací šrouby) a kupříkladu také lodních šroubů pro sportovní čluny. Speciální procedury na bázi základní technologie omílání umožňují nahradit drahou ruční práci při leštění, a to při stejné nebo mnohdy i lepší technické kvalitě [32].

#### *Broušení a leštění současně*

Při metodě Trowapast se provádí operace broušení a leštění současně, resp. bezprostředně po sobě jako jeden technologický úkon. Ve vibračním omílacím stroji dochází ke kontinuálnímu vzájemnému pohybu obrobků a masy leštících omílacích tělísek (nejčastěji porcelánové válečky průměru 3 až 6 mm) s hmotou tvořenou speciálními brusnými a leštícími minerálními přísadami. V první fázi omílání dojde nejprve k vyhlazení drsného povrchu. Přitom se minerálie samy rozmělní a přemění na jemný leštící prášek. Přísun vody do omílacího stroje je v této fázi minimální a nahrazuje jen ztráty vzniklé odparem. Pokud je dosaženo stanovené hladkosti povrchu, jsou minerálie ze stroje odplaveny a proces pokračuje dále s leštícími tělísky za kontinuálního přidávání účinné látky a vody [32].

#### *Odmašťování omíláním*

Při lisování, obrábění, tváření atd. jsou používána mazadla, většinou na bázi minerálních olejů. Často se provádí odmašťování současně s jinými operacemi, např. s odjehlováním nebo zaoblováním hran. Vhodné pro odmašťování omíláním jsou velké série dílců. Omíláním lze i odstraňovat z povrchu vrstvy rzi, okují anebo nežádoucí zabarvení po předchozích tepelných úpravách. Tradičními (pH-neutrálními) sloučeninami nelze často požadovaných cílů dosáhnout, je nutné použít speciální kyselé nebo zásadité. Obrobky omílané s použitím kyselých sloučenin musí být po skončení moření tak dlouho proplachovány čistou vodou, až vzorky z oplachu reagují neutrálně. Po neutralizaci se provádí pasivace - ocelové dílce se chrání proti korozi, dílce z barevných kovů proti ztmavnutí a zašlosti. S použitím některých speciálních sloučenin je možno moření a pasivaci vhodně spojit do jedné operace, neboť látky mají vícenásobný účinek. Při moření a odstraňování zabarvení po tepelné úpravě je možno současně a bez nutnosti

další technologické operace provádět leštění, pokud je místo brousicích omílacích tělísek použito leštících tělísek nebo nerezových kuliček [32].

Nejčastěji se při omílání uplatňují kruhové vibrátory. Zařízení je tvořeno podstavcem, na němž je na rovnoměrně rozložených vinutých pružinách uložena ocelová pracovní nádoba, k níž je připojen vibrační pohon. Vibrace způsobují excentricky umístěná závaží. Přestavováním závaží je možno měnit amplitudu kmitů a tím i intenzitu vibrací a agresivitu omílání. Moderní vibrační omílací stroje se vybavují vibračními elektromotory s trvalou mazací náplní, proto po dobu plánované životnosti motoru (20 000 h) není nutné sledovat mazací intervaly [32].

### *Agresivní odjehlování*

Odstředivé omílací stroje mají pevný plášť a rotující dno. Toto rotující unášecí dno pracovního prostoru (obvyklý rozsah otáček 60 – 250 ot./min) uvádí do pohybu masu omílacích tělísek a obrobků. Působení odstředivé síly způsobuje, že masa tělísek vystupuje vzhůru podél stěny pracovního prostoru až do bodu, kde má nulovou kinetickou energii. Na masu zde opět začíná působit gravitace a ta způsobí její návrat zpět na unášecí talíř [32].

Použitím odstředivých omílacích strojů při omílání je umožněno nejen agresivní odjehlování nebo zaoblování hran u nenáročných masových dílců, ale i ohleduplné vyhlazování povrchu a leštění u speciálních výrobků. Příkladem výrobků omílaných v odstředivých omílacích zařízeních jsou např. švýcarské vojenské nože, destičky a čepy řetězů moto-velo, klipsy propisovacích tužek, různá pouzdra a zejména mince. Jsou však i případy omílání lamel pro textilní stroje o tloušťce menší než 0,3 mm v těchto omílacích zařízeních [32].

### *Čištění a recyklace kapaliny*

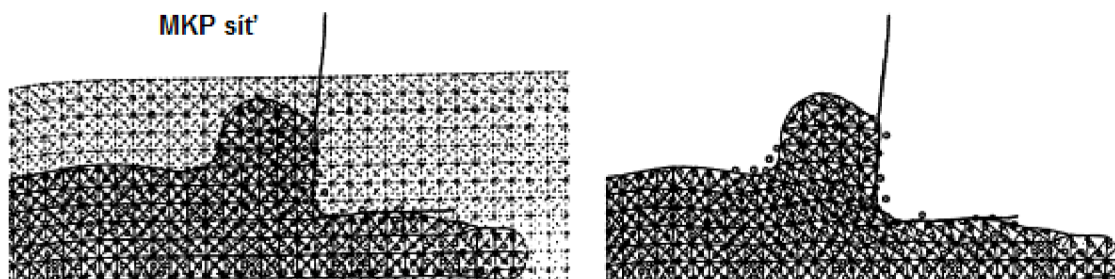
K omílacím technologickým linkám patří i další strojní zařízení, jako sušičky a zařízení pro úpravu nebo recyklaci procesní kapaliny znečištěné omíláním. Kapaliny po omílání obsahuje otěr z omílacích tělísek a z kovových součástí, často také olej a rozpuštěné kovy. Proto je nutné kapalinu před vypuštěním do vodních toků nebo před jejím opětovným použitím v omílacím zařízení vyčistit [32].

Při recyklaci kapaliny jsou pevné částice odděleny od vody odstředováním. Vyčištěná procesní kapalina se vrací zpět do omílacího procesu. Olej nebo pevné částice menší než 1  $\mu\text{m}$  mohou být z kapaliny odstraněny přidáním práškového nebo kapalného flokulantu před odstředováním [32].

Omílací tělíska se vyrábí v široké škále geometrických tvarů a velikostí. Keramická omílací tělíska se vyznačují větší intenzitou omílání a schopností vytvářet světlé a lesklé povrchy. Plastová omílací tělíska jsou používána pro omílání zejména měkkých materiálů (např. tlakové odlitky). Jejich výhodou je, že na rozdíl od keramických tělísek se neodštěpují a i po rozsáhlém opotřebení si zachovávají svůj tvar [32].

## 2.9 Mikro-obrábění

Výzkumem bylo zjištěno, že je obtížné aplikovat analýzu metodou konečných prvků na mikro-obráběcí procesy kolem 1 nm (obr. 34). Úspěšnějším přístupem je použití simulace molekulové dynamiky, kde je postavení každého atomu vyřešeno pomocí newtonovské dynamiky. Tyto simulace předpokládají, že tupé nástroje generují velké smykové plochy, vyšší řezné rychlosti produkují tenčí třísky a ostré nástroje pracující při vysokých řezných rychlostech předávají nástroji malé síly. Při posuzování oblasti řezu když se nástroj stává tupým, síly generované tupým nástrojem jsou při vysoké rychlosti významně vyšší, než síly produkované tupým nebo ostrým nástrojem při nízkých rychlostech. Proto k využívání výhod mikro-řezání a simulaci molekulové dynamiky na třísky musí být řezný nástroj ostrý a řezné rychlosti musí být vysoké [33].



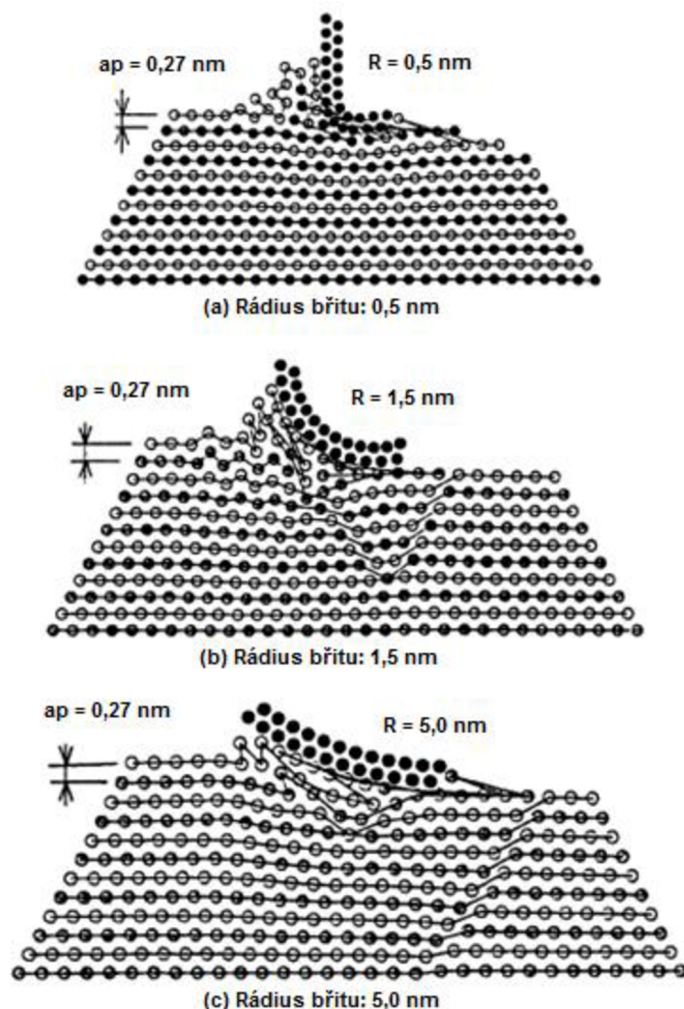
Obr. 34 Síť konečných prvků pro simulaci mikroobrábění [33].

Rozhodující je minimální hloubka řezu, pod kterou se třísky netvoří. Analýza uvádí, že utváření třísky není možné v případě, že hloubka řezu je menší než 20 % až 40 % poloměru břitu. Mikro-obrábění při 80 000 otáčkách za minutu produkuje třísky podobné těm, které se vytvoří při obrábění v makro-měřítku. V případě, že posuv je příliš nízký, tříska nemusí být nutně vytvořena každou otáčkou nástroje. Posuv nebo stopy po obrábění jsou od sebe odděleny vzdáleností, která se rovná maximální nezkrácené tloušťce třísky. Otáčení pracovního nástroje bez tvorby třísky je díky kombinovanému účinku mezi poměrem rádiusu břitu k posuvu na zub a nedostatečné tuhosti nástroje [33].

Hloubka řezu a rádius břitu jsou kritické parametry, které určují tvorbu třísky (obr. 35). Pokud je napětí působící na obrobek nástrojem dostatečně velké, dislokace mohou být generovány. Jak se nástroj posune, vytvoří se více dislokací na rozhraní nástroj-tříska a je-li dostatečně spojen s primární smykovou zónou, pak se vytvoří tříska. Poté, co nástroj dokončí řezání, dislokace které pronikly do obrobku, se posouvají směrem k povrchu. Tento jev je možné pozorovat na povrchu v krocích o velikosti atomu, což představuje nejlepší možnou drsnost povrchu [33].

Při makro-obrábění jsou na břitu nástroje vidět souhrnné vlastnosti obrobku, ale v mikro-obrábění jsou na břitu nástroje vidět vlastnosti matrice materiálu, jako jsou například hranice zrn. Pro simulaci této interakce se používají molekulární dynamické modely. Simulace běžící při řezné rychlosti 2 000 m/s ukazují, že kinetická energie na obrobku je mnohem větší, než kohézní energie obrobku. Byly provedeny simulace, které pomáhají zvýraznit rozdíly mezi makro a mikro-řezáním, například je pozorována

změna objemu při obrábění křemíku. Tlakem vyvolaná změna fáze modifikuje strukturu z kubické na tetragonální což má za následek o 23 % hustší třísku [33].



Obr. 35 Tvorba třísky ve vztahu k hloubce řezu a řezné hrany poloměru [33].

### *Budoucí aplikace*

Problém, který se vyskytuje v mikro-měřítku je ohýbání řezného nástroje a neschopnost řezat třísky při nízkých rychlostech. Proto musí být přikládána zvláštní pozornost na konstrukci tužších nástrojů, aby se zabránilo zaoblení břitu nástroje, když je nástroj původně rovný. To lze překonat potažením malých řezných nástrojů nanokrystalickým diamantem, který má mnoho řezných bodů, které jsou v kontaktu s obrobkem, i když dochází k ohýbání nástroje. Neslučitelnost mezi diamantem a železnými materiály lze překonat potažením nanokrystalickým diamantem s tenkou vrstvou sloučeniny, která má nejmenší termodynamický potenciál pro rozpuštění. Tento směr povede k použití vícevrstevných povlaků, které mají užitečné přednosti, jako je odvod tepla z oblasti řezání a snížení vzniku třecího tepla pomocí měkké vrstvy mazacího povlaku na bázi uhlíku [33].

## 2.10 Nano-obrábění

Obrábění kovů v nano-měřítku je složitý proces, proto je pochopení základního mechanismu, jak je materiál postupně odstraňován z obrobku za vzniku přesné nano-obráběné součásti, důležitým aspektem. Zpracování a vytváření reálného tvaru v nano- měřítku vyžaduje změny pouze v několika atomových vrstvách povrchu. Drážky v nano- měřítku, jako jsou nano-kanály a nano-slots, mají mnoho aplikací ve stále rostoucím polovodičovém a biomedicínském průmyslu, a musí splňovat zvyšující se požadavky nanotechnologie. Vždy, když se používá nano-obrábění pro výrobu drážky v nano-měřítku na povrchu kovu, dochází k abrazivnímu opotřebení. Režim abrazivního opotřebení obrábění v mikro-měřítku lze vyjádřit jako součet tří procesů: řezání, lomové porušení a hlazení [34].

K abrazivnímu opotřebení obvykle dochází v důsledku tření mezi dvěma kovovými povrchy během obrábění. Koeficient tření poskytuje významný pohled na třecí chování ve styku dvou povrchů. Dále má koeficient tření větší význam při ortogonálním nano-obrábění. Nicméně, vliv koeficientu tření na deformačním chování materiálu v nano-měřítku a související mechanismus abrazivního opotřebení v nano-obrábění není zcela objasněn. Po obráběcí operaci si uchovává obrobek povrch napětí. Zbytkové napětí po obrábění ovlivňuje kvalitu součástí prostřednictvím parametrů, jako je mez únavy a tribologické vlastnosti. Druh zbytkových napětí, zda je tahové nebo tlakové, závisí na použitých parametrech obrábění. Z tohoto důvodu je důležité charakterizovat vliv obráběcího procesu na profilu zbytkového napětí tak, že obráběcí parametry mohou být vybrány optimálně pro zvýšení meze únavy obráběné součásti vyvoláním příznivého zbytkového napětí. Měření zbytkových napětí při obrábění v nano-měřítku je nákladné a obtížné, proto bylo provedeno numerické modelování pro stanovení zbytkového napětí a rozložení napětí změnou obráběcích parametrů [34].

Bylo provedeno modelování řezání v nano-měřítku pomocí metody konečných prvků (MKP) a metody molekulární dynamiky (MD). Při použití metody MD, může být výpočtový model velmi velký pro modelování v inženýrském rozsahu. V takových případech může mít velké množství molekul (částic) ve výpočetní oblasti za následek velmi dlouhé a často nereálné časy simulace. Použitím metod kontinua se lze potenciálně takovým potížím vyhnout. Metoda konečných prvků (MKP) je nejčastěji používaná metoda kontinua pro modelování obráběcích procesů v nano-měřítku. I když částečná substituce atomistického modelu pro řešení kontinua umožňuje rychlejší zpracování, nano-obrábění zahrnuje ve velkém měřítku nespojitě deformace, které mohou vyvolávat narušení mřížky, což má za následek špatnou přesnost a nestabilitu [34].

### *Modelování vlivu poloměru břítu na kontaktní zóně při nanoobrábění*

Nano-obrábění neželezných kovů nástrojem s jedním krystalem diamantu se stává stále důležitější pro výrobu mikro a nano kovových komponent se složitými strukturami. Geometrie břítu má významný vliv na téměř všechny nano-řezací parametry, jako jsou řezné síly, životnost nástroje, povrchová úprava a zbytková napětí. Proto je velmi důležité pochopení vlivu různých úprav ostří a jejich predikce [35].

Na rozdíl od konvenčního řezání s jemnou hloubkou řezu jsou vlastnosti obrábění ovlivněny rádiusem břítu nástroje „R“, zejména když je nedeformovaná tloušťka třísky „a“ srovnatelně malá. Pro jednotlivé krystaly diamantového nástroje se „R“ řídí

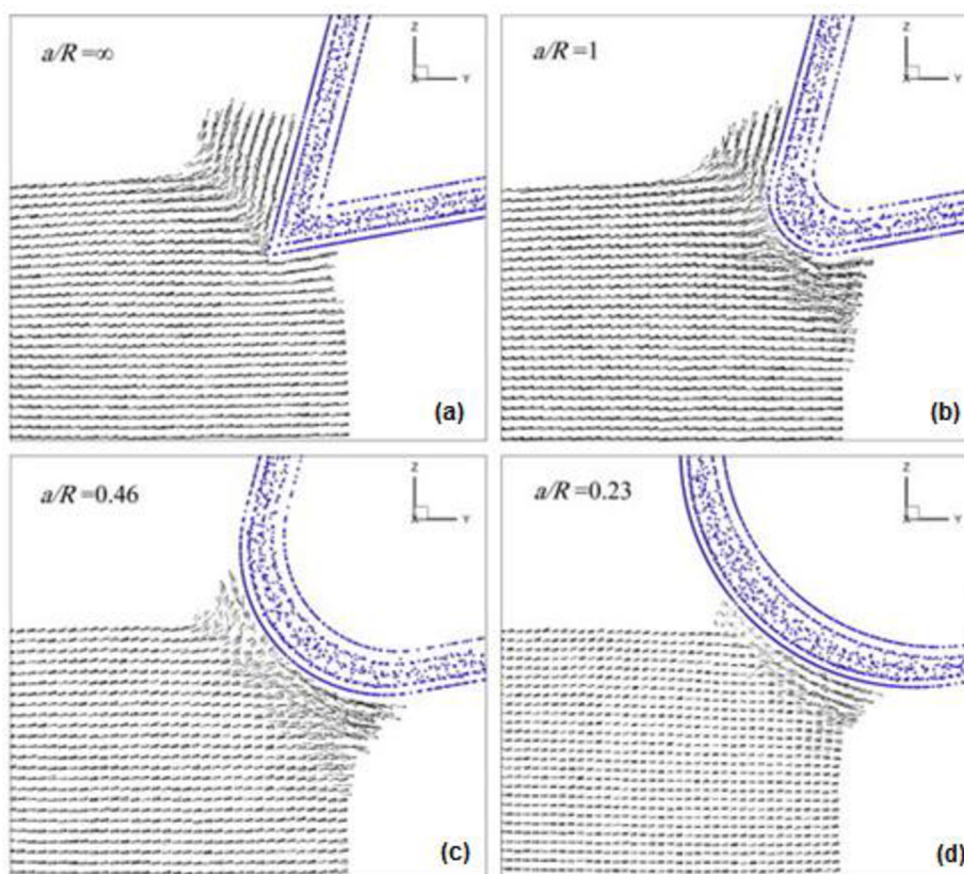
technologickými omezeními, kde je výroba dokonale ostrých nožů prakticky nemožná. I v případě, že řezání začíná ostrým nástrojem, se špička nástroje opotřebí nebo ulomí a obrábění bude pokračovat s opotřebovanou hranou. Geometrie nástroje je obvykle opomíjena při modelování konvenčního obrábění, jako například na proslulý model roviny stříhu, který je založen na předpokladu dokonale ostrých nástrojů. Za rozhodující předpoklad v modelování konvenčního obrábění je přijatelný ten, že nedeformovaná tloušťka třísky je mnohem větší než poloměr břitu [35].

Ikawa a kolektiv provedli analytický rozbor nano-metrického řezání pro zjištění minimální tloušťky třísky řezu pro daný poloměr břitu. Dospěli k závěru, že i když je minimální tloušťka do určité míry ovlivněna interakcí materiálu pracovního nástroje, především je to silně ovlivněno ostroží břitu. Shimada a kolektiv pracovali na molekulární dynamické simulaci k vyzkoumání nejvyšší přesnosti, kterou lze získat v ultra přesném obrábění hliníku a mědi pomocí hypoteticky dokonalého obráběcího nástroje. Očekávali minimální tloušťku řezu asi 1 nm nebo méně. Dále také odhadovali maximální drsnost a hloubku deformované vrstvy obrobeného povrchu 0,5 – 5 nm. Yuan a kolektiv experimentálně studovali vliv ostroží diamantového nástroje na minimální tloušťce řezání a integritě řezného povrchu v ultra přesném obrábění. Jejich výsledky ukázaly, že drsnost povrchu, mikrotvrдость, zbytkové napětí a hustota dislokací obrobeného povrchu se mění s rádiusem břitu. Komanduri a kolektiv studovali vliv geometrie nástroje v nano-metrickém řezání, pokud jde o úhel čela a rádius břitu nástroje, pomocí párové Morse potenciální funkce. Zjistili, že negativní úhel čela a velký rádius břitu způsobují vysoký hydrostatický tlak pod nástrojem, potřebný pro vytvoření malé plastické deformační zóny bezprostředně pod nástrojem. Komanduri a kolektiv rovněž zkoumali účinek různých úhlů čela nástroje na nano-řezání monokrystalickým křemíkem s dokonale ostrým břitem nástroje [35].

Lucca a kolektiv zkoumali vliv nástrojů s jedním krystalem diamantu s negativními úhly čela na silách nástroje pro germanium. Také geometrie břitu nástroje a nové obráběné plochy byly charakterizovány pomocí mikroskopie atomárních sil. Pozorovali výrazné zvýšení řezné síly při snížení hloubky řezu a při zvýšení negativního úhlu čela. Cheng a kolektiv simulovali opotřebení nástroje v nano-metrickém řezání křemíkového obrobku. Zkoumali mechanismus opotřebení výpočtem teploty a napětí v diamantovém nástroji. Ve skutečnosti analyzovali vztah mezi teplotou a sublimací energie diamantu a atomů obrobku. Han a kolektiv studovali vliv geometrie nástroje na atomovém posunutí v nano-obrábění křemíku s různými rádiusy břitu nástroje. Zjistili, že v případě nano-metrického řezání, rádius břitu nemůže být ignorován ve srovnání s hloubkou řezu. Cai a kolektiv používají metody molekulární dynamiky k simulaci vzniku trhlin v režimu tvárný-křehký pro řezání křemíkového materiálu pro hloubky řezu v rozmezí od menšího než rádius břitu nástroje k většímu. Zjistili, že když nedeformovaná tloušťka třísky bude větší, než je rádius břitu nástroje, mohou být vyvolány trhliny vzhledem nejvyššímu bodu deformace. Vzhledem k tomu, že nedeformovaná tloušťka třísky je menší než rádius břitu, neexistuje žádný vrchol v oblasti tvorby třísky, a proto neexistuje žádná zóna vzniku trhlin v nedeformovaném materiálu obrobku. Han a Hu zkoumali vliv úhlu čela na tvorbě otřepů. Výsledky ukázaly, že u tvárných materiálů se praskliny šíří souběžně se směrem řezání a tvoří pozitivní otřepy, při řezání křehkých materiálů se trhliny šíří do obrobku a tvoří negativní otřepy [35].

### *Mechanismus tvorby třísky*

Atomové posunutí na obr. 36 ilustruje vznik třísky a deformaci materiálu pro různé  $a/R$  v počáteční fázi řezání (vzdálenost řezání = 1,2 nm). Blízko špičky ostrého nástroje ( $a/R = \infty$ ) byly atomy obrobku rozděleny do dvou odlišných oblastí: oblast, která se přeměnila na třísku a zbývající část, která vytváří nový obrobený povrch. Jak je znázorněno na obr. 36, tříska byla nejprve vytvořena na čele řezných nástrojů [35].



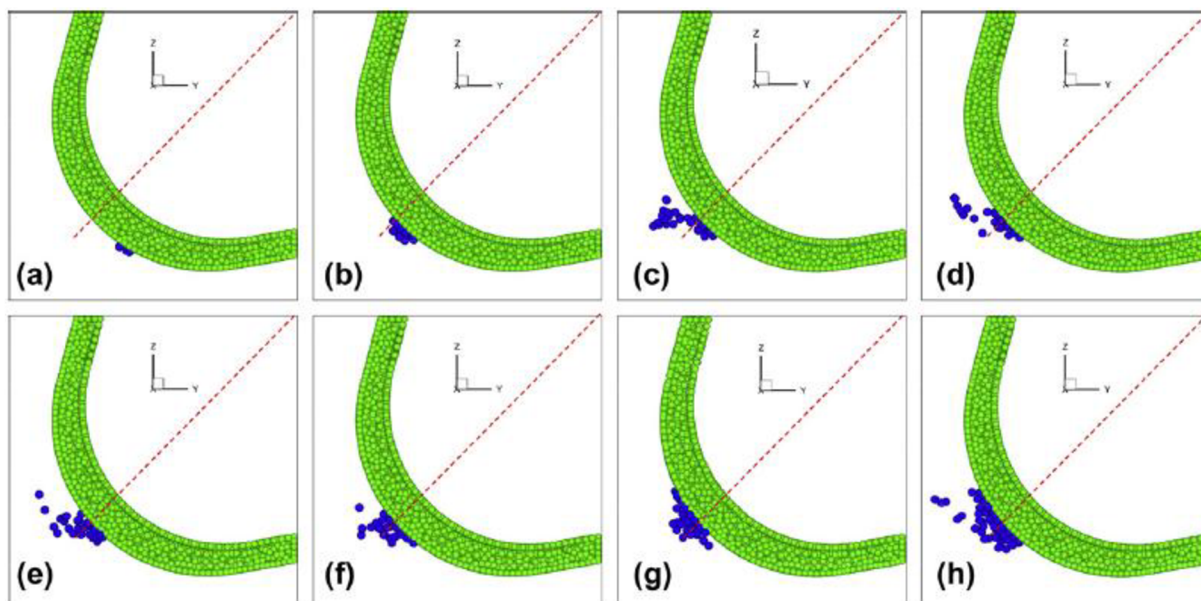
Obr. 36 Počáteční fáze tvorby třísky při (a)  $a/R = \infty$ , (b)  $a/R = 1$ , (c)  $a/R = 0,46$ , (d)  $a/R = 0,23$  [35].

Pomocí zaobleného břitu nástroje byly atomy obrobku rozděleny do tří zón. První oblast byla před břitem nástroje, ve kterém bylo posunutí atomů nulové. Druhá zóna byla pokryta horními atomy, které byly převedeny na třísku. Atomy ve třetí pásnu byly stlačeny břitem nástroje a vytvořil se nový obrobený povrch. U  $a/R = 1$  se podílí na tvorbě třísky jak zaoblení břitu nástroje, tak čelo břitu (obr. 36b). V případě většího rádiu nástroje ( $a/R = 0,46$ ) se malá část atomů oddělí jako tříska a velká část projde pod břitem nástroje, jak je znázorněno na obr. 36c. U  $a/R = 0,23$  bylo chování deformace materiálu podobné jako u  $a/R = 0,46$ , ale tok materiálu kolem břitu nástroje byl pozvolnější. Kromě toho by vrstvy třísky nemohly dosáhnout pozitivního sklonu ostří vzhledem k velkému rádiu břitu a malé hloubce řezu (obr. 36d) [35].



### Kritická hloubka řezu

Obr. 37 znázorňuje polohu bodu zóny stagnace nástroje s poloměrem břitu 4,9 nm modřými atomy pro různé hloubky řezu  $a = 0,36 - 2,9$  nm. S výjimkou velmi nízkého poměru  $a/R$  ( $a = 0,36, 0,72$  nm), byla pozice zóny stagnace v ostatních případech přibližně konstantní. To znamená, že nedeformovaná tloušťka třísky nemá žádný vliv na pozici zóny stagnace [35].

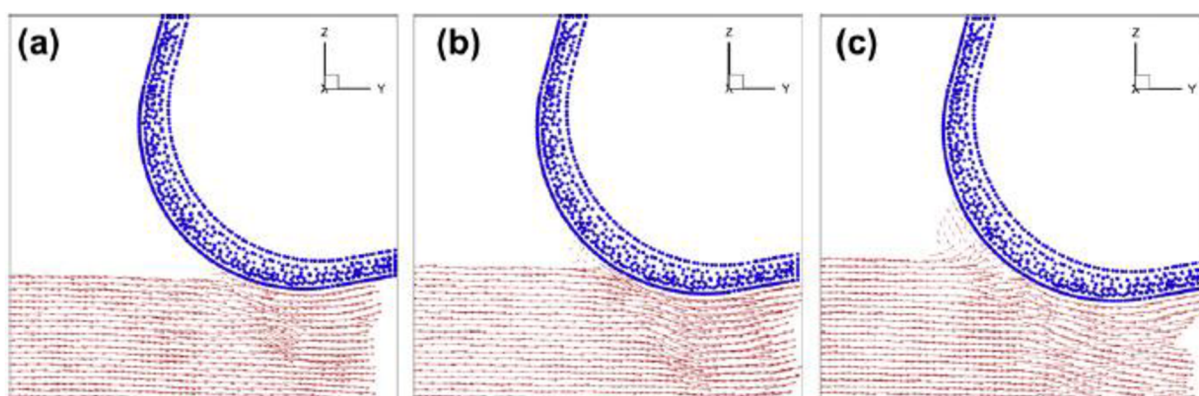


Obr. 37 Konstantní vrcholový úhel stagnace pro nedeformovanou tloušťku třísky: (a) 0,36 nm, (b) 0,72 nm, (c) 1,09 nm, (d) 1,45 nm, (e) 1,81 nm, (f) 2,17 nm, (g) 2,53 nm a (h), 2,90 nm [35].

Obr. 38 ukazuje přechod od klouzání po řezání v malých hloubkách řezu pro nástroje s poloměrem břitu  $R = 4,9$  nm. Při  $a = 0,36$  nm není hloubka řezu dost velká, aby se nástroj se zaobleným břitem zařizl do obrobku, jak je uvedeno na obr. 38a. To znamená, že při  $a/R = 0,07$ , což je nástroj s velkým negativním úhlem čela, je obráběný materiál pouze stlačen a nástroj se sklouzne po jeho povrchu. Takže nebyla vytvořena žádná třísky, ale zůstaly pouze stopy po pohybu nástroje na povrchu obrobku. Vzhledem k tomu, že výška bodu stagnace pro tento poloměru břitu je 0,9 nm (tab. 9), dosáhlo stagnace bodu při  $a = 0,72$  nm pouze malé množství atomů. Ale k nano-metrickému řezání v tomto případě nedošlo. Nicméně lze v této hloubce řezu nalézt přechod z klouzání na řezání. S rostoucí hloubkou řezu až po 1,09 nm, která byla více než kritická hloubka řezu, proběhl vznik nano-třísky velmi dobře (obr. 38c) [35].

Tab. 9 Výška stagnace oblasti, ze spodní části nástroje [35].

Poloměr břitu nástroje (nm)	$R = 0$	$R = 1,1$	$R = 2,5$	$R = 4,7$
Výška (nm)	-	0,40	0,53	0,90



Obr. 38 Přechodový mechanismus od klouzáni k řezání pro nástroj s poloměrem bříty 4,7 nm v malých hloubkách řezu, (a) 0,36 nm, (b) 0,72 nm, a (c) 1,09 nm [35].

### 3 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO OVĚŘENÍ VYBRANÉ TECHNOLOGIE, JEJÍ VERIFIKACE

Experiment je rozdělen do dvou částí. V první části se stanovují závislosti velikosti posuvu na drsnosti povrchu při čelním soustružení disku z hliníkové slitiny v druhé části se vyhodnocují velikosti sil při podélném soustružení disku z hliníkové slitiny. Polotovar, na kterém probíhal experiment, byl disk z hliníkové slitiny o průměru 200 mm a šířce 9 mm s označením AlCu4Mg (Obr. 39). Při obou částech experimentu byly použity tři vyměnitelné břitové destičky od firmy SANDVIK Coromant. Konkrétně se jednalo o destičky s označením DCGX11T308-Al 1810, DCGX11T308-Al H10 a DCMW11T308FP CD10. K těmto destičkám byl použit příslušný držák s označením SDJCR 2525M11.

#### *Slitina hliníku AlCu4Mg (dural)*

ČSN 42 4201

Konstrukční materiál se střední pevností, dobře třískově obrobitelný, málo chemicky odolný, citlivý k mezikrystalické korozi, náchylný k tvorbě trhlin při svařování. Tvařitelnost je dobrá za tepla, vyhovující po žíhání a rozpouštěcím žíhání (kalení), snižená ve vytvrzeném stavu. Vytvrzením za studena se významně zvýší pevnost slitiny. Materiál vhodný pro součástky a konstrukční prvky letadel, kolejových vozidel, automobilů a jiných dopravních prostředků, zejména konstrukcí nýtovaných a šroubovaných. Chemické složení a pevnostní charakteristiky jsou uvedeny v tab. 10 a tab. 11 [36, 37].

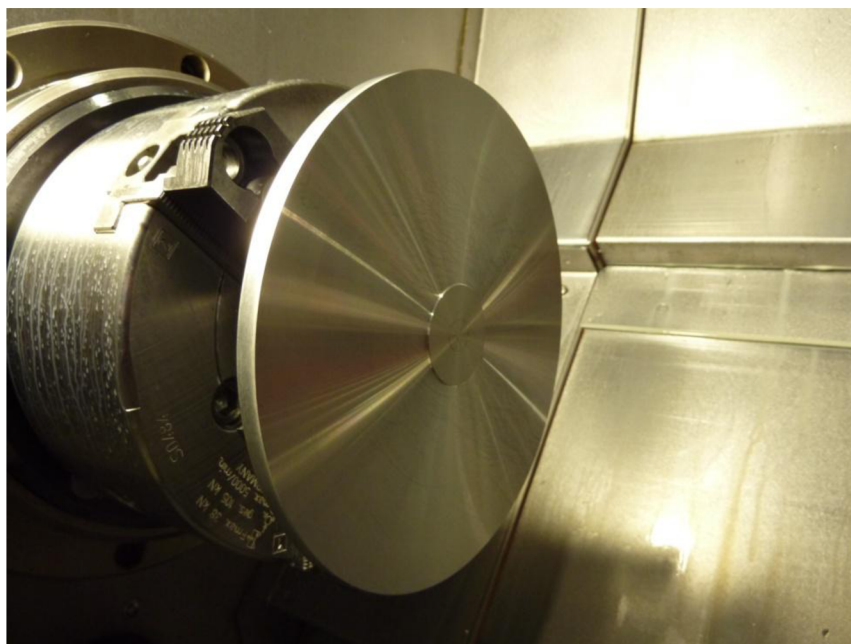
Tab. 10 Chemické složení AlCu4Mg v hm. % [36].

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ni	Al
<b>min.</b>			3,80	0,40	0,40				zbyt
<b>max.</b>	0,70	0,70	4,80	0,80	0,80		0,30	0,10	

Tab. 11 Pevnostní charakteristiky [37, 38].

Stav materiálu	Rm [MPa]	Rp [MPa]	HB	Tažnost A [%]
<b>.62 *</b>	min. 370	235 - 255	90 - 125	min. 10%

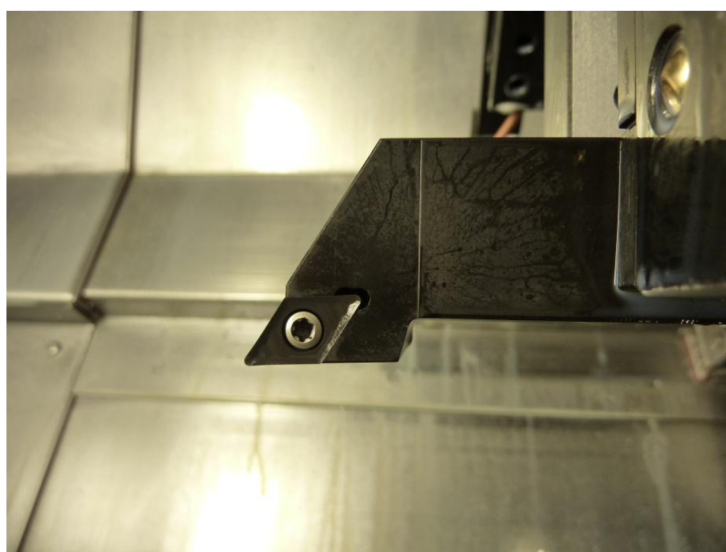
\* .62 – rozpouštěcí žíhání + stabil.



Obr. 39 Disk z hliníkové slitiny AlCu4Mg.

***DCGX11T308-Al 1810 (dále označováno CD1810)***

Destička CD1810 (obr. 40) je potažena diamantem metodou CVD na základě speciálně upraveného substrátu. Extrémně odolná vrstva povlaku proti opotřebení (6–8  $\mu\text{m}$ ) a vysoká čistota diamantu poskytuje vynikající vlastnosti pro obrábění neželezných slitin [39].



Obr. 40 Vyměnitelná břitová destička DCGX11T308-Al 1810.

***DCGX11T308-AI H10 (dále označováno H10)***

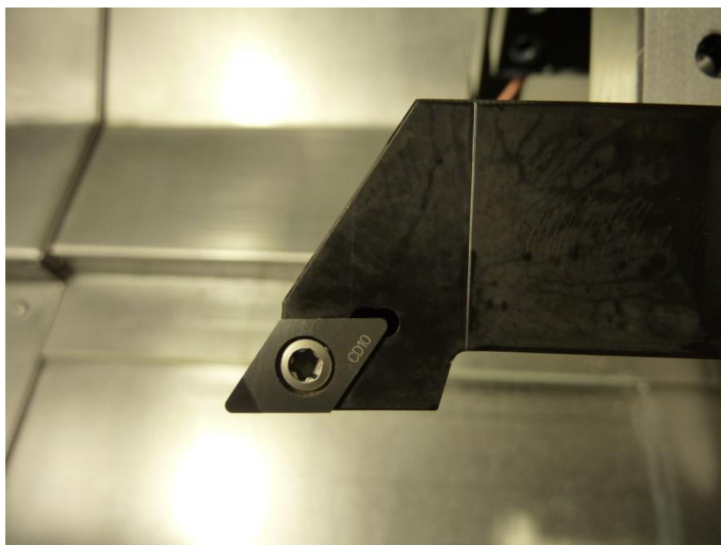
Destička H10 (obr. 41) je jemnozrnný karbid bez povlaku. Kombinuje vynikající odolnost proti abrazivnímu opotřebení a ostrost břitů. Vhodná pro hrubovací i dokončovací soustružení hliníkových slitin. Vhodná také pro dokončovací soustružení žáruvzdorných slitin a slitin titanu [39].



Obr. 41 Vyměnitelná břitová destička DCGX11T308-AI H10.

***DCMW11T308FP CD10 (dále označováno CD10)***

VBD třídy CD10 (obr. 42) s hrotem z polykrystalického diamantu (PCD) se doporučují pro dokončování za stabilních podmínek. CD10 lépe odolává tvorbě nárůstků na břitu než karbidové třídy. Umožňuje dosažení lepší výsledné kvality povrchu a delší trvanlivosti nástroje. Doporučuje se pro dokončování a polo-dokončování neželezných a nekovových materiálů [39, 40].



Obr. 42 Vyměnitelná břitová destička DCMW11T308FP CD10.

### 3.1 Stanovení závislosti velikosti posuvu na drsnosti povrchu při čelním soustružení duralu

Experiment spočíval v postupném zvyšování velikosti posuvu za stálého snižování průměru při čelním soustružení. Proces probíhal za konstantní řezné rychlosti  $v_c = 150$  m/min. Hloubka záběru ostří byla  $a_p = 0,5$  mm. Proces probíhal tak, že se začalo soustružit z největšího průměru 200 mm a postupně se zvyšovala velikost posuvu směrem ke středu duralového disku. Experiment probíhal na CNC soustruhu SP 280 SY od firmy KOVOSVIT MAS (obr. 43).



Obr. 43 CNS soustruh SP 280 SY.

Pro čelní soustružení s proměnlivou velikostí posuvu a konstantní řeznou rychlostí byl vytvořen následující CNC program (dílenky orientované programování):

N5	Dural222	Pos. poč. 1 G54	
N10	Soustruž.	T=SANDVIK	V1=150m
N15	RYCHL X205 Y0		
N20	RYCHL Z0		
N25	F0.04 X180		
N30	F0.04 X160		
N35	F0.06 X140		

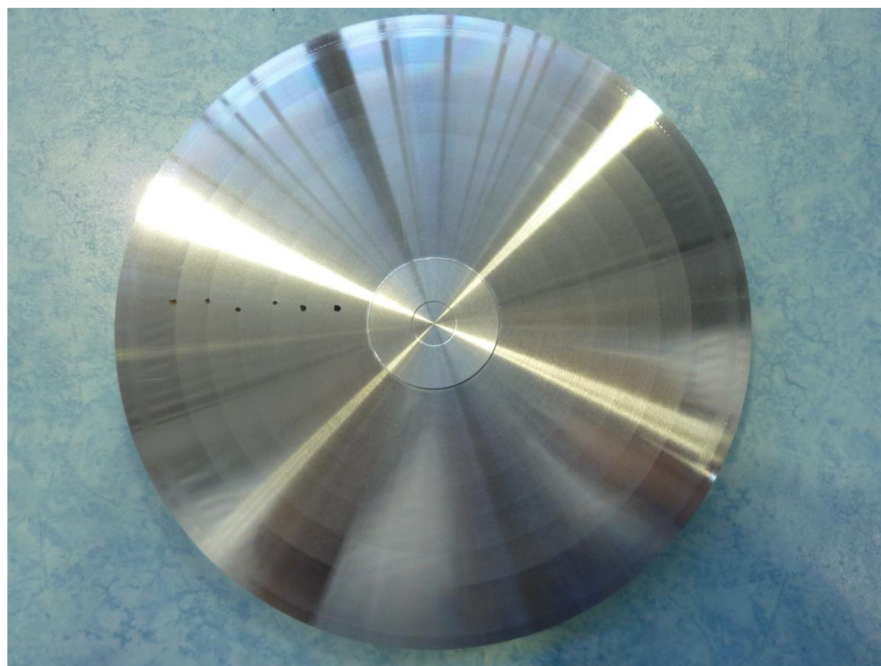
N40 F0.08 X120  
N45 F0.1 X100  
N50 F0.12 X80  
N55 F0.14 X60  
N60 F0.16 X40  
N70 RYCHL Z100  
N75 T=SANDVIK S1=0  
Konec programu N=1

První destička, kterou se obrábělo, byla vyměnitelná břitová destička s označením H10. Po obrobení první břitovou destičkou se vyhodnotila drsnost povrchu na přístroji Form Talysurf Intra od firmy Taylor Hobson (obr. 44) a pomocí speciálního programu byly zapsány dva parametry drsnosti povrchu. Jednalo se o průměrnou aritmetickou úchylku profilu Ra a nejvyšší výšku profilu Rz. Následovala výměna destičky za CD1810 a opět čelní soustružení, po kterém se znovu vyhodnocovala drsnost povrchu. Stejný postup probíhal i pro třetí vyměnitelnou břitovou destičku CD10.



Obr. 44 Přístroj pro vyhodnocování povrchu Form Talysurf Intra.

Na obr. 45 jsou viditelné stopy, které vznikly při čelním soustružení při konstantní řezné rychlosti 150 m/min s proměnnou velikostí posuvu. Na obrázku je možné vidět, že na vnějším průměru duralového disku je povrch nejlesklejší a směrem ke středu disku se lesklost povrchu snižuje.



Obr. 45 Znárodnění jednotlivých stop při změně velikosti posuvu.

V následující tabulce (tab. 12) jsou uvedeny naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro jednotlivé vyměnitelné břitové destičky.

Tab. 12 Naměřené hodnoty průměrné aritmetické úchytky profilu Ra a nejvyšší výšky profilu Rz.

Typ destičky		H10		CD1810		CD10	
Průměr D [mm]	Posuv na otáčku [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
∅ 200 ÷ 160	0,04	0,1314	0,9536	0,3217	1,8935	0,1550	0,9663
∅ 160 ÷ 140	0,06	0,1298	0,9088	0,3407	1,8448	0,1783	0,9379
∅ 140 ÷ 120	0,08	0,2253	1,6961	0,3710	2,2606	0,2485	1,2245
∅ 120 ÷ 100	0,10	0,3472	1,6796	0,4793	2,7654	0,3890	1,8838
∅ 100 ÷ 80	0,12	0,4456	1,8586	0,6791	3,5351	0,5946	2,5877
∅ 80 ÷ 60	0,14	0,5548	2,5508	0,8658	4,2637	0,8244	3,2496
∅ 60 ÷ 40	0,16	0,6668	3,1368	1,0339	4,6966	1,0758	4,3689



**Výpočet teoretických hodnot parametrů  $Ra$  a  $Rz$  [41]**

$$Rz_t = fce(r_\varepsilon, f) = \left( r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - 0,25 \cdot f^2} \right) \cdot 10^3 \quad (7)$$

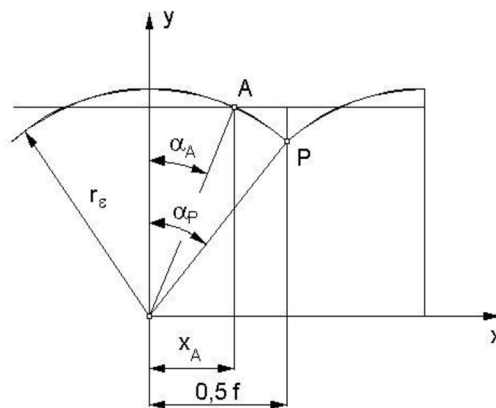
kde:  $Rz_t$  [ $\mu\text{m}$ ] - teoretická hodnota největší výšky profilu,  
 $r_\varepsilon$  [mm] - poloměr špičky,  
 $f$  [mm] - posuv na otáčku.

$$Ra_t = \frac{10^3 \cdot r_\varepsilon^2 \cdot (2 \cdot \alpha_A - \sin 2 \cdot \alpha_A)}{f} \quad (8)$$

kde:  $Ra_t$  [ $\mu\text{m}$ ] - teoretická hodnota průměrné aritmetické úchylny profilu,  
 $r_\varepsilon$  [mm] - poloměr špičky,  
 $f$  [mm] - posuv na otáčku,  
 $\alpha_A$  [rad] - úhel.

$$\alpha_A = \arccos \left[ \frac{r_\varepsilon}{f} \cdot \left( \arcsin \frac{f}{2 \cdot r_\varepsilon} + \frac{f}{4 \cdot r_\varepsilon^2} \cdot \sqrt{4 \cdot r_\varepsilon^2 - f^2} \right) \right] \quad (9)$$

kde:  $\alpha_A$  [rad] - úhel,  
 $r_\varepsilon$  [mm] - poloměr špičky,  
 $f$  [mm] - posuv na otáčku.



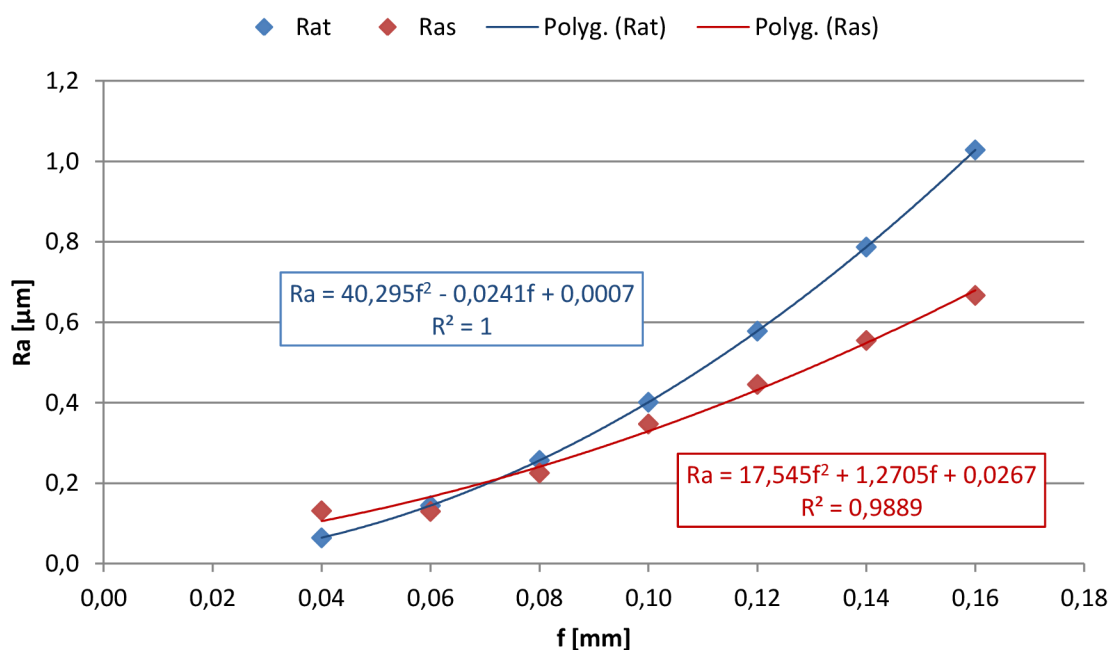
Obr. 46 Znárodnění úhlu  $\alpha_A$  [41].

Na obr. 46 je znázorněn úhel  $\alpha_A$ , který je potřebný pro výpočet teoretické hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu. Vzhledem k tomu, že u všech tří destiček je poloměr špičky stejný  $r_\varepsilon = 0,8$  mm, jsou i teoretické hodnoty pro všechny destičky stejné. Teoretické hodnoty  $R_a$  a  $R_z$  jsou uvedeny v tab. 13.

Tab. 13 Vypočtené teoretické hodnoty  $R_{a_t}$  a  $R_{z_t}$  a úhel  $\alpha_A$ .

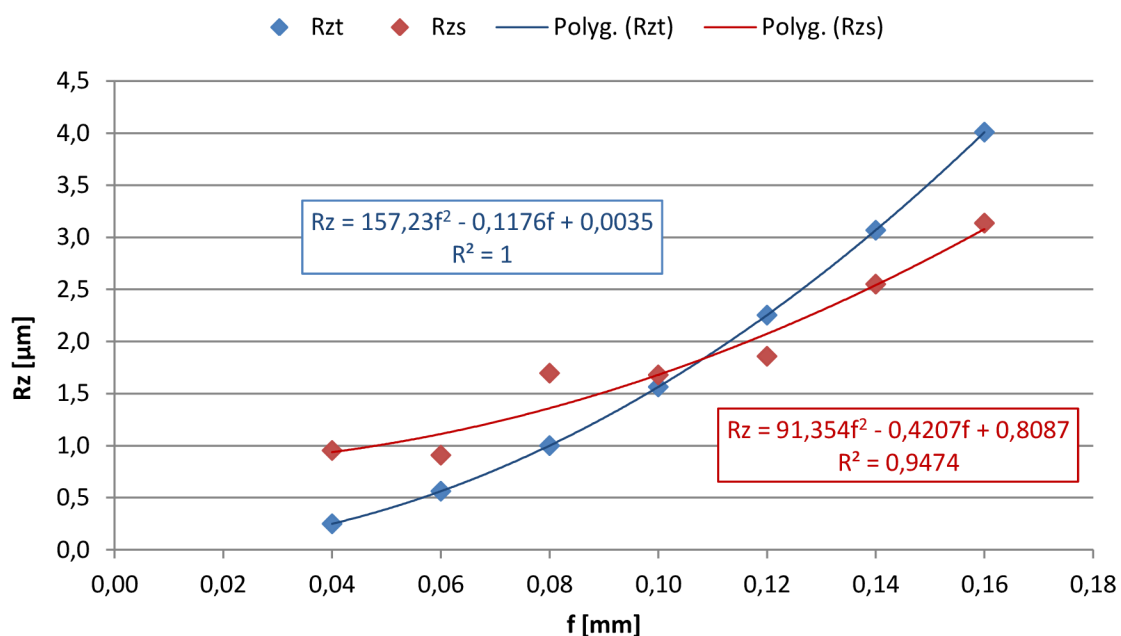
Průměr D [mm]	Posuv na otáčku [mm]	$R_{a_t}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{z_t}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\alpha_A$ [rad]
$\varnothing 200 \div 160$	0,04	0,0642	0,2500	0,0144
$\varnothing 160 \div 140$	0,06	0,1444	0,5627	0,0217
$\varnothing 140 \div 120$	0,08	0,2567	1,0006	0,0289
$\varnothing 120 \div 100$	0,10	0,4013	1,5640	0,0361
$\varnothing 100 \div 80$	0,12	0,5780	2,2532	0,0433
$\varnothing 80 \div 60$	0,14	0,7870	3,0684	0,0506
$\varnothing 60 \div 40$	0,16	1,0285	4,0101	0,0578

Při porovnávání teoretických a skutečných hodnot  $R_a$  pro destičku H10 (obr. 47) se nejvíce tyto hodnoty přibližují při velikosti posuvu 0,06 mm a 0,08 mm. Následně se s nárůstem posuvu zvyšuje teoretická hodnota průměrné aritmetické úchylky profilu  $R_{a_t}$ . Naměřené průměrné aritmetické úchylky profilu  $R_a$  jsou nižší než teoretické, při posuvu 0,16 mm je rozdíl 0,36  $\mu\text{m}$ .



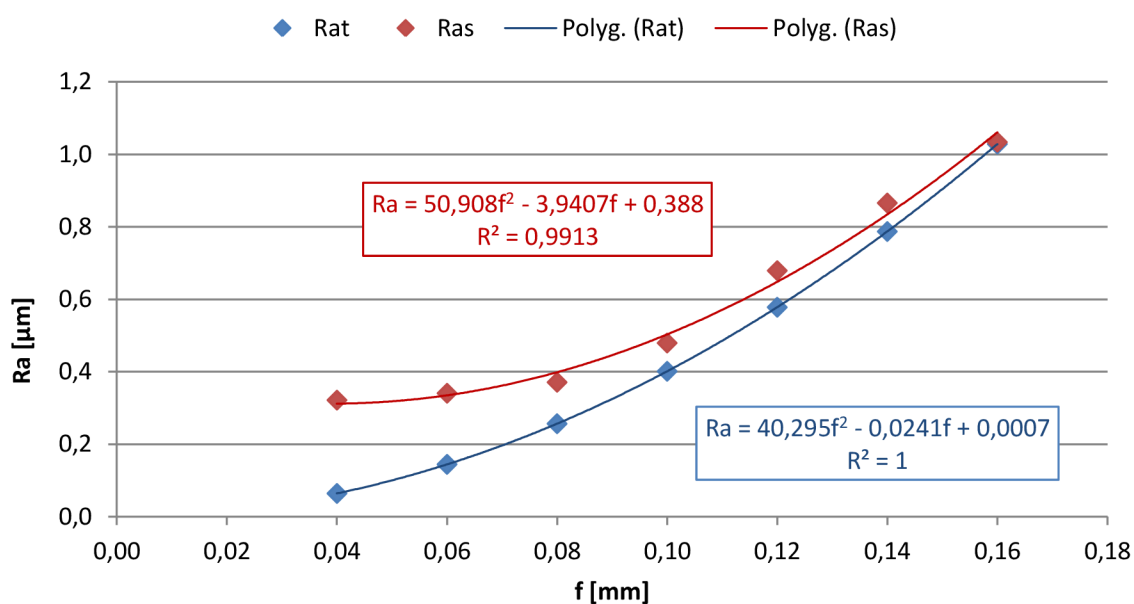
Obr. 47 Porovnání teoretických a skutečných hodnot  $R_a$  pro destičku H10.

Stejný jev lze pozorovat i na obr. 48, kde se nejvíce přiblíží teoretická a naměřená hodnota největší výšky profilu při posuvu o velikosti 0,1 mm. Naměřené hodnoty jsou opět při posuvu vyšším než 0,1 mm nižší, než hodnoty teoretické.

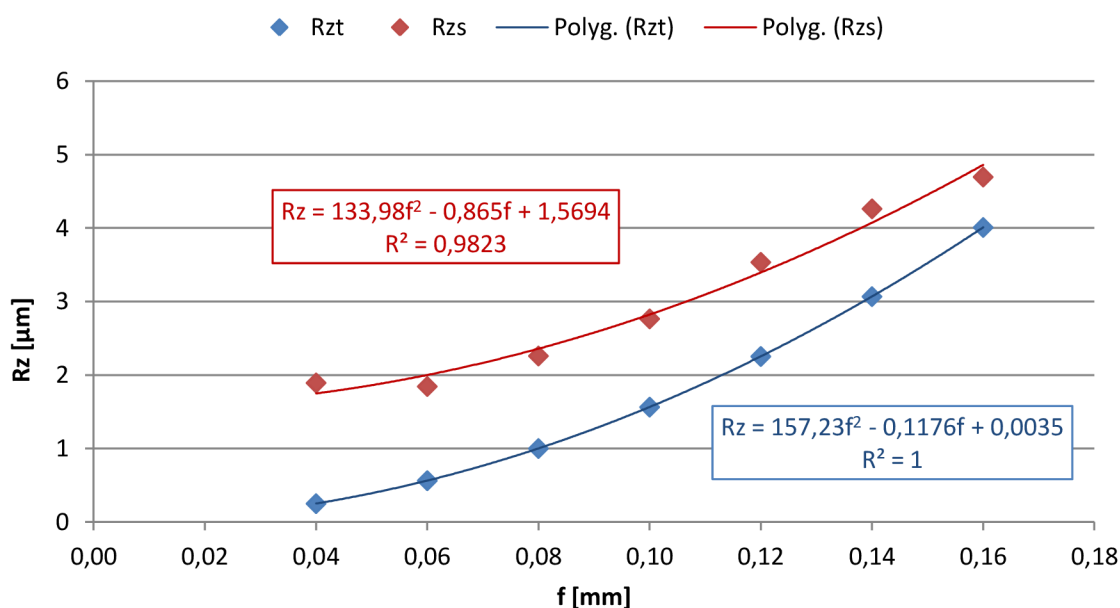


Obr. 48 Porovnání teoretických a skutečných hodnot Rz pro destičku H10.

Na obr. 49 je zřejmé, že u destičky CD1810 se postupně se zvyšující se hodnotou posuvu velikost teoretické hodnoty průměrné aritmetické úchyly profilu  $Ra_t$  a naměřené průměrné aritmetické úchyly profilu  $Ra$  přibližují až téměř na identickou hodnotu. Tento stejný jev je možné pozorovat u této destičky i pro teoretickou hodnotu největší výšky profilu  $Rz_t$  a naměřenou hodnotu největší výšky profilu  $Rz$  (obr. 50), ovšem zde nedochází k tak velkému přiblížení jako u průměrné aritmetické úchyly profilu.

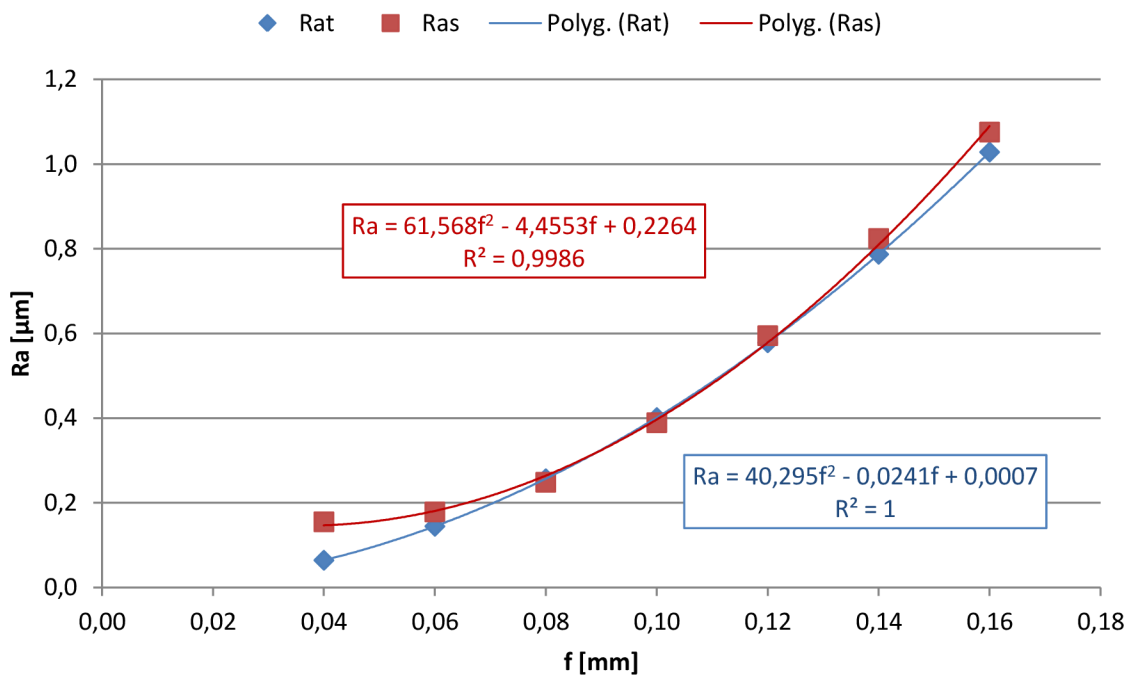


Obr. 49 Porovnání teoretických a skutečných hodnot Ra pro destičku CD1810.

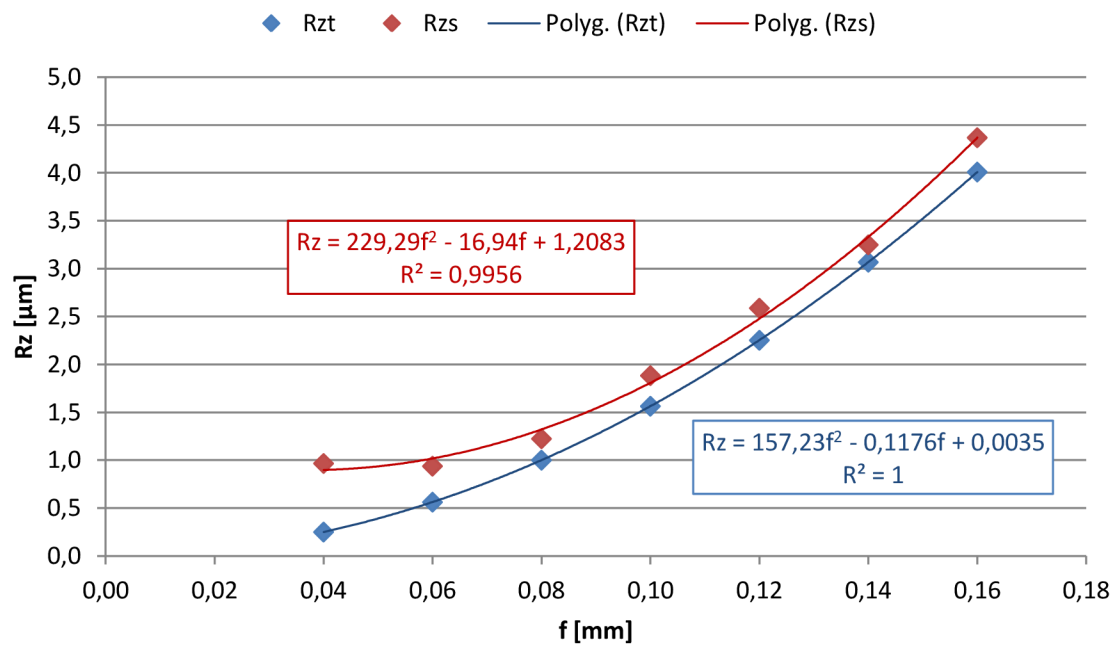


Obr. 50 Porovnání teoretických a skutečných hodnot Rz pro destičku CD1810.

Destička CD10 vykazuje nejmenší rozdíly v teoretických a naměřených hodnotách průměrné aritmetické úchyly profilu i největší výšky profilu (obr. 51). U posuvu 0,08 mm až 0,12 mm jsou to pro průměrnou aritmetickou úchyly profilu minimální rozdíly o velikostech několika setin  $\mu\text{m}$ . Při posuzování teoretických a naměřených hodnot nejvyšší výšky profilu je rozdíl v průměru 0,35  $\mu\text{m}$  (obr. 52) a průběh teoretických a naměřených hodnot je téměř identický.



Obr. 51 Porovnání teoretických a skutečných hodnot Ra pro destičku CD10.



Obr. 52 Porovnání teoretických a skutečných hodnot Rz pro destičku CD10.

### 3.2 Stanovení velikosti sil a měrných řezných sil při podélném soustružení duralu

Tato část experimentu spočívala ve vyhodnocování sil při podélném soustružení duralového disku a následném zjištění měrných řezných sil. Experiment probíhal na soustruhu s označením SU 50 (obr. 53). Z duralového disku se každým úběrem odebírala tříška v hloubce  $a_p = 0,5$  mm při konstantních řezných rychlostech. Jelikož se v předchozí části experimentu odebírala tříška v hloubce  $a_p = 0,5$  mm při čelním soustružení, tloušťka duralového disku byla pro podélné soustružení 7,5 mm. Opět se používaly stejné břitové destičky jako při čelním soustružení (DCGX11T308-A1 1810, DCGX11T308-A1 H10 a DCMW11T308FP CD10). Po každém průjezdu se měnila velikost posuvu na otáčku z 0,04 mm až na 0,16 mm. Tento proces se opakoval při řezných rychlostech 100, 150 a 200 m/min pro každou z destiček. Při soustružení byla použita řezná kapalina s označením CIMSTAR 597 (vodou mísitelný koncentrát řezné kapaliny pro obrábění).

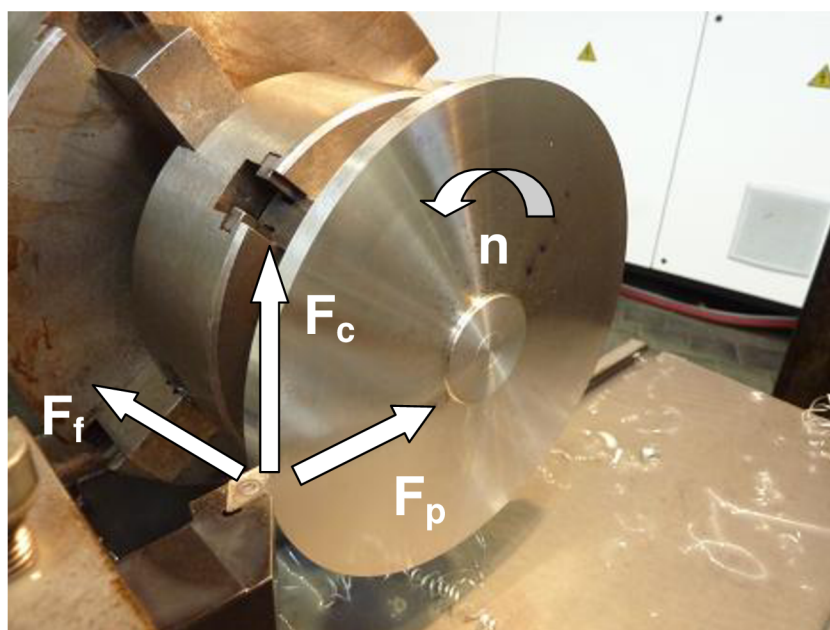


Obr. 53 Soustruh SU 50.

Veškeré hodnoty velikosti sil z podélného soustružení duralového disku se zapisovaly do počítače pomocí diagnostické techniky KISTLER 5070A (obr. 54). Součástí tohoto přístroje je počítačový program DynoWare. Hodnoty z tohoto programu byly následně převedeny do statistického programu Minitab, kde z nich byly zjištěny střední hodnoty velikosti sil. Tyto střední hodnoty velikosti sil jsou uvedeny pro řezné rychlosti 100, 150 a 200 m/min v tab. 14, 15 a 16. Jedná se o síly, kdy byla destička v záběru. Na obr. 55 jsou znázorněny směry sil společně s otáčkami obrobku při podélném soustružení.



Obr. 54 Diagnostická technika KISTLER 5070A.



Obr. 55 Znárodnění směru sil při podélném soustružení.

Tab. 14 Naměřené síly při řezné rychlosti 100 m/min.

Posuv na otáčku [mm]	H10			CD1810			CD10		
	$F_f$ [N]	$F_p$ [N]	$F_c$ [N]	$F_f$ [N]	$F_p$ [N]	$F_c$ [N]	$F_f$ [N]	$F_p$ [N]	$F_c$ [N]
<b>0,04</b>	8,015	9,677	25,022	6,065	8,019	22,785	4,750	6,597	20,115
<b>0,055</b>	8,886	11,071	28,207	6,065	8,210	25,881	5,249	7,226	24,350
<b>0,08</b>	10,452	13,332	37,858	6,403	9,509	33,029	7,517	10,005	35,230
<b>0,1</b>	10,806	14,346	45,125	6,487	10,061	40,038	8,925	12,239	42,739
<b>0,121</b>	11,314	16,365	50,324	8,135	11,999	56,086	10,013	13,874	51,067
<b>0,15</b>	13,217	18,750	63,687	8,086	12,747	61,395	12,354	17,803	61,957
<b>0,16</b>	11,001	18,768	60,993	8,264	12,494	60,117	12,181	17,199	64,535

Tab. 15 Naměřené síly při řezné rychlosti 150 m/min.

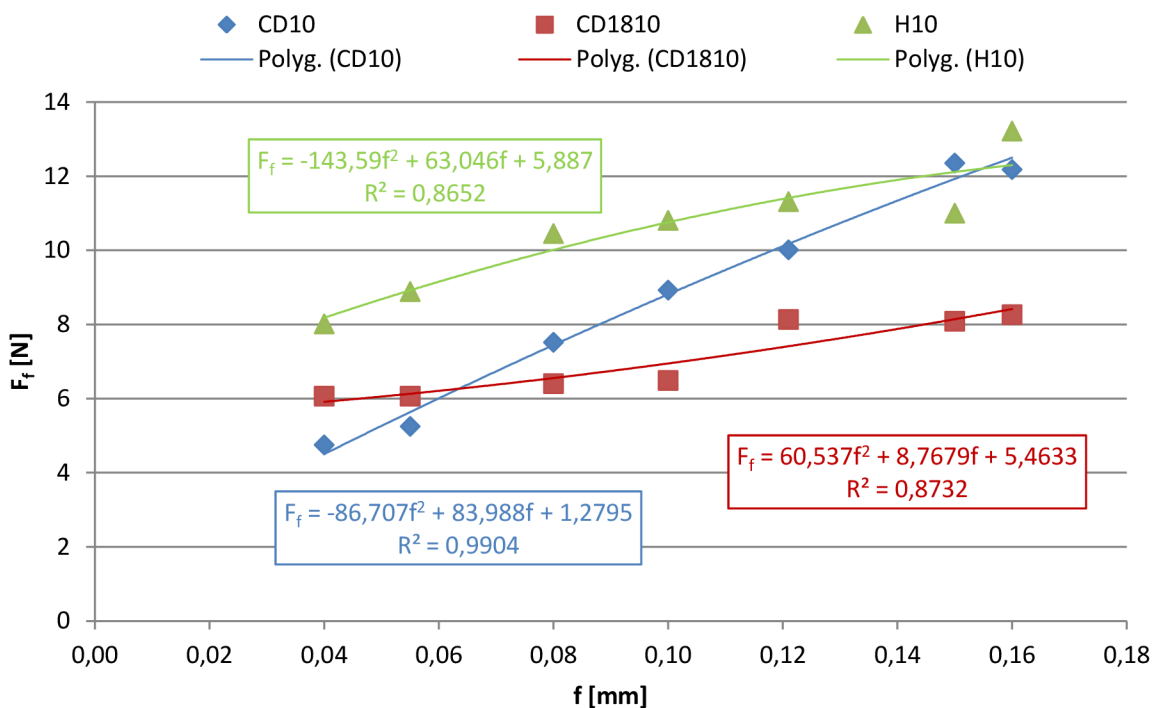
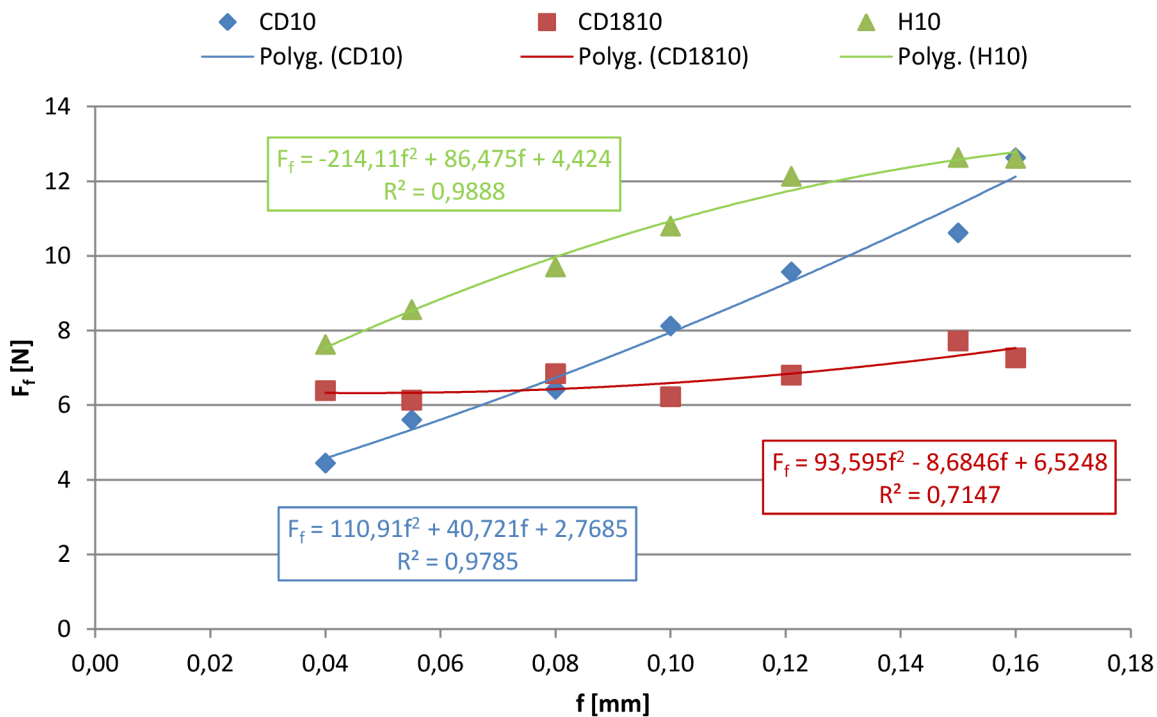
Posuv na otáčku [mm]	H10			CD1810			CD10		
	$F_f$ [N]	$F_p$ [N]	$F_c$ [N]	$F_f$ [N]	$F_p$ [N]	$F_c$ [N]	$F_f$ [N]	$F_p$ [N]	$F_c$ [N]
<b>0,04</b>	7,628	9,060	24,336	6,387	8,190	23,022	4,447	5,964	20,172
<b>0,055</b>	8,562	11,077	28,524	6,134	8,302	24,723	5,608	6,853	25,074
<b>0,08</b>	9,706	12,570	37,243	6,842	9,237	33,965	6,423	9,254	33,157
<b>0,1</b>	10,800	14,566	44,399	6,226	9,308	39,787	8,123	10,458	41,386
<b>0,121</b>	12,134	16,122	52,204	6,804	9,976	45,706	9,571	14,279	49,993
<b>0,15</b>	12,639	18,852	61,426	7,721	11,116	54,646	10,618	16,146	58,853
<b>0,16</b>	12,615	19,968	65,600	7,268	12,056	58,040	12,630	17,687	65,056

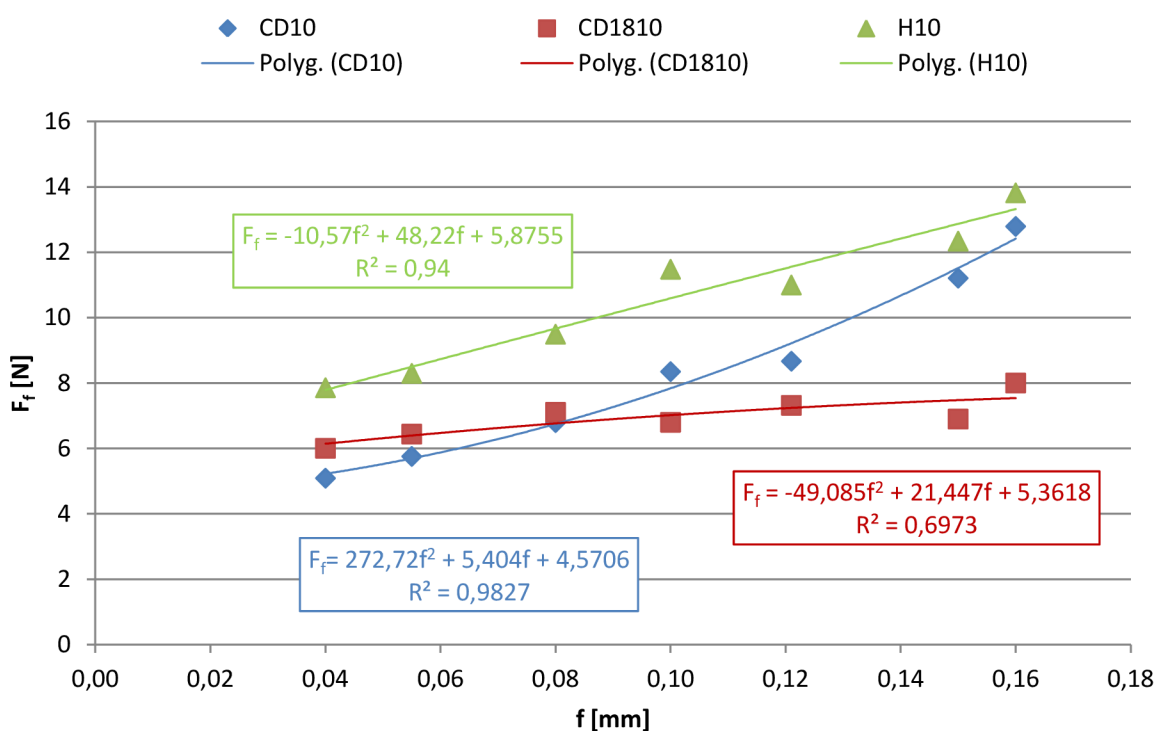
Tab. 16 Naměřené síly při řezné rychlosti 200 m/min.

Posuv na otáčku [mm]	H10			CD1810			CD10		
	$F_f$ [N]	$F_p$ [N]	$F_c$ [N]	$F_f$ [N]	$F_p$ [N]	$F_c$ [N]	$F_f$ [N]	$F_p$ [N]	$F_c$ [N]
<b>0,04</b>	7,857	9,610	24,648	6,004	7,429	21,502	5,089	6,552	20,741
<b>0,055</b>	8,295	9,580	28,663	6,438	7,862	25,198	5,756	6,390	23,387
<b>0,08</b>	9,494	13,007	37,118	7,106	8,532	33,969	6,791	10,009	34,081
<b>0,1</b>	11,481	13,226	45,968	6,799	9,565	39,051	8,350	11,406	41,466
<b>0,121</b>	11,000	14,795	51,911	7,317	10,114	47,607	8,667	13,289	48,239
<b>0,15</b>	12,341	17,599	62,865	6,897	11,011	52,349	11,209	15,671	57,805
<b>0,16</b>	13,818	20,234	68,933	8,001	11,659	58,890	12,793	17,531	64,790

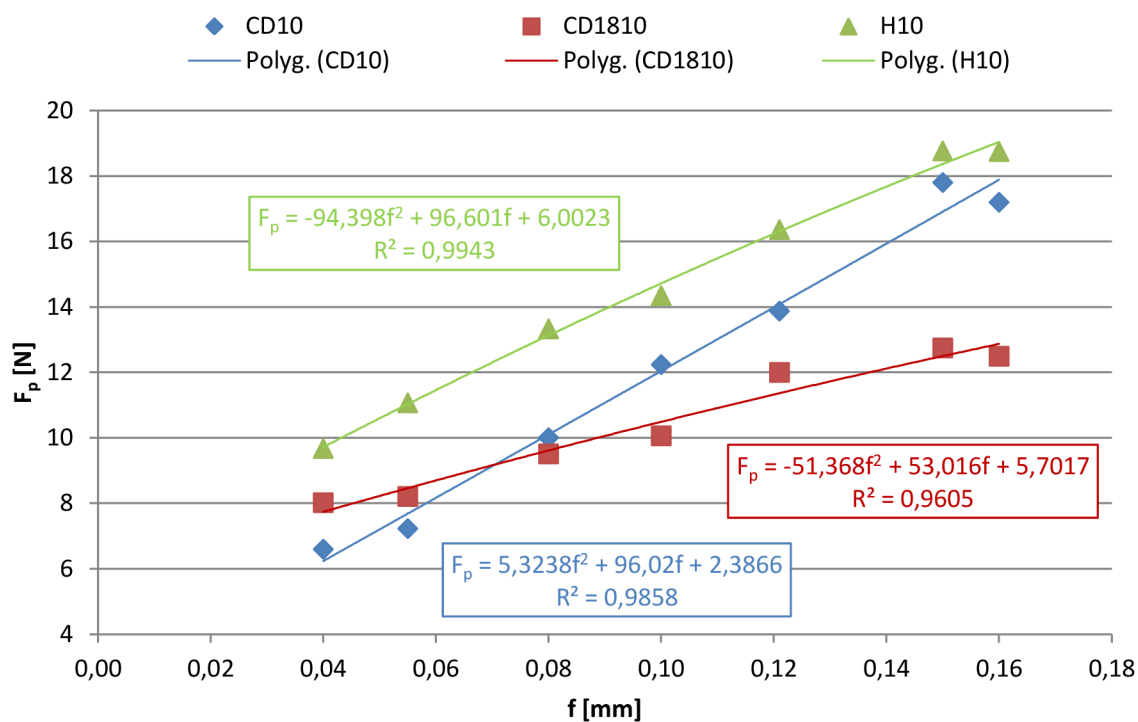
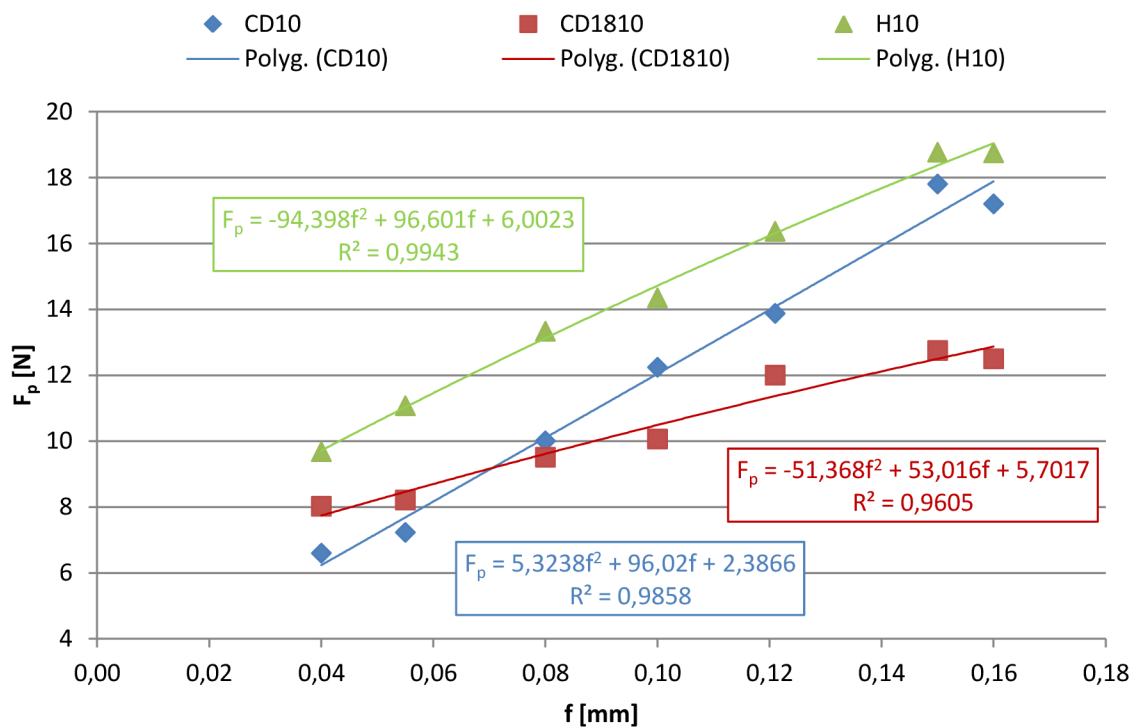
Pro řeznou rychlost 100 m/min byl nejlepší průběh posuvových sil (největší spolehlivost) pro destičku CD10, ovšem nejnižší naměřené síly byly u destičky CD1810 (obr. 56). Velmi podobný průběh byl i pro řeznou rychlost 150 m/min (obr. 57) a 200 m/min (obr. 58), kde byly zaznamenány přibližně stejné hodnoty velikosti posuvových sil. Pouze u destičky H10 byl zaznamenán nárůst o 1 N při navýšení řezné rychlosti na 150 m/min a následně o další 1 N při rychlosti 200 m/min. Rozsah posuvových sil byl od 4,5 N do 13,8 N.

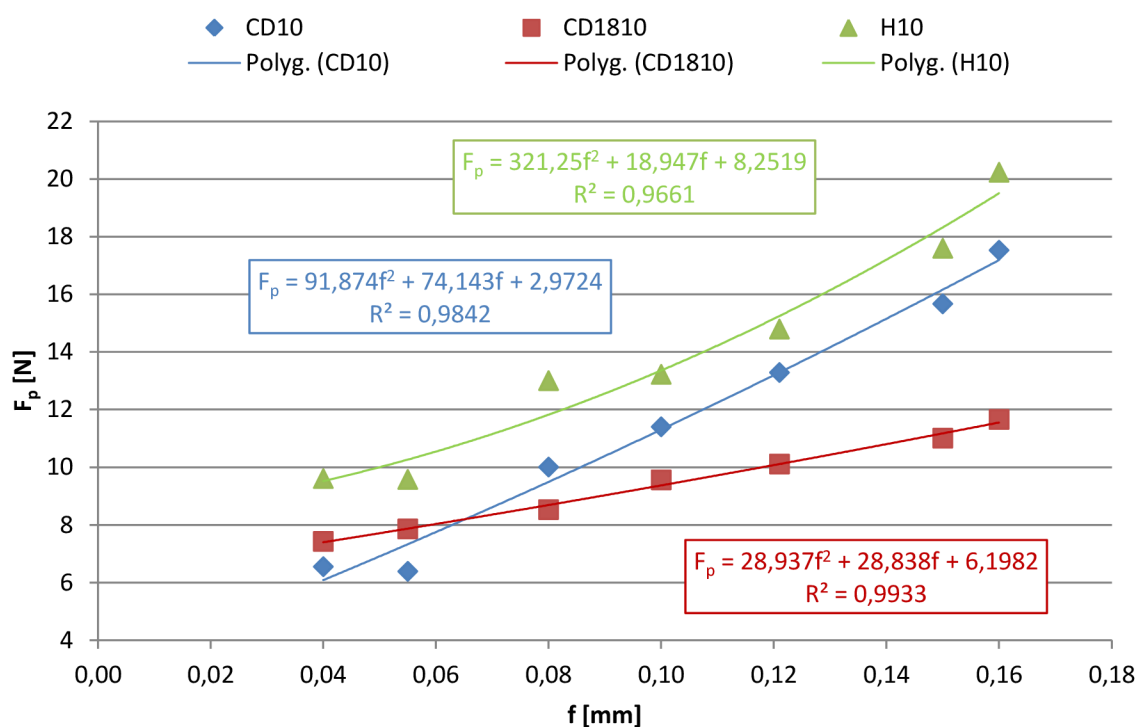


Obr. 56 Posuvové síly  $F_f$  při řezné rychlosti 100 m/min.Obr. 57 Posuvové síly  $F_f$  při řezné rychlosti 150 m/min.

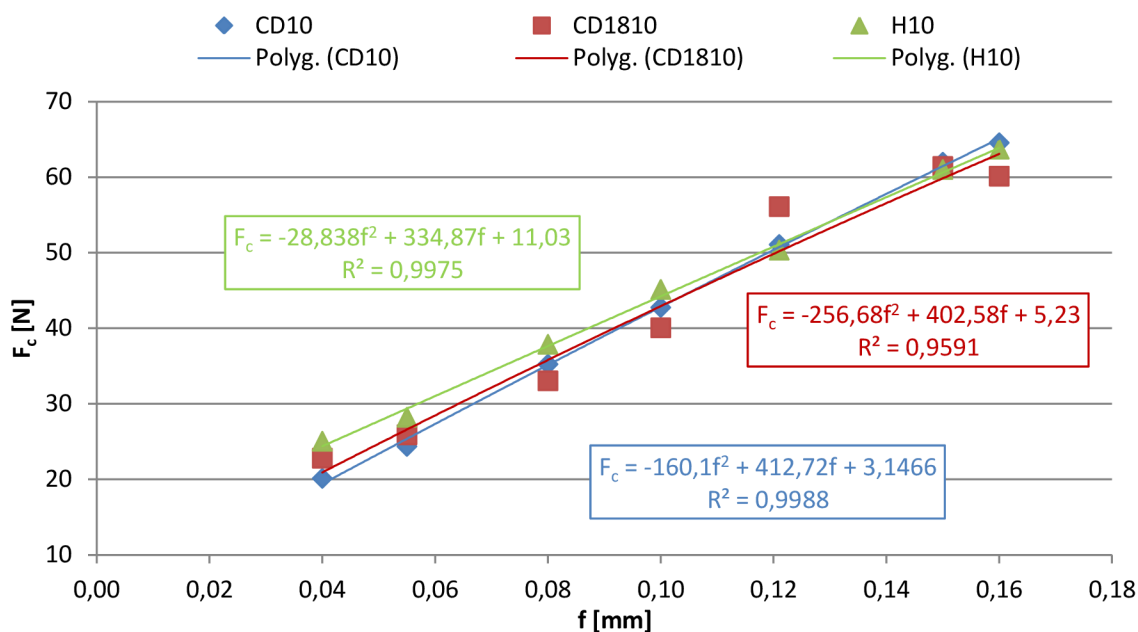
Obr. 58 Posuvové síly  $F_f$  při řezné rychlosti 200 m/min.

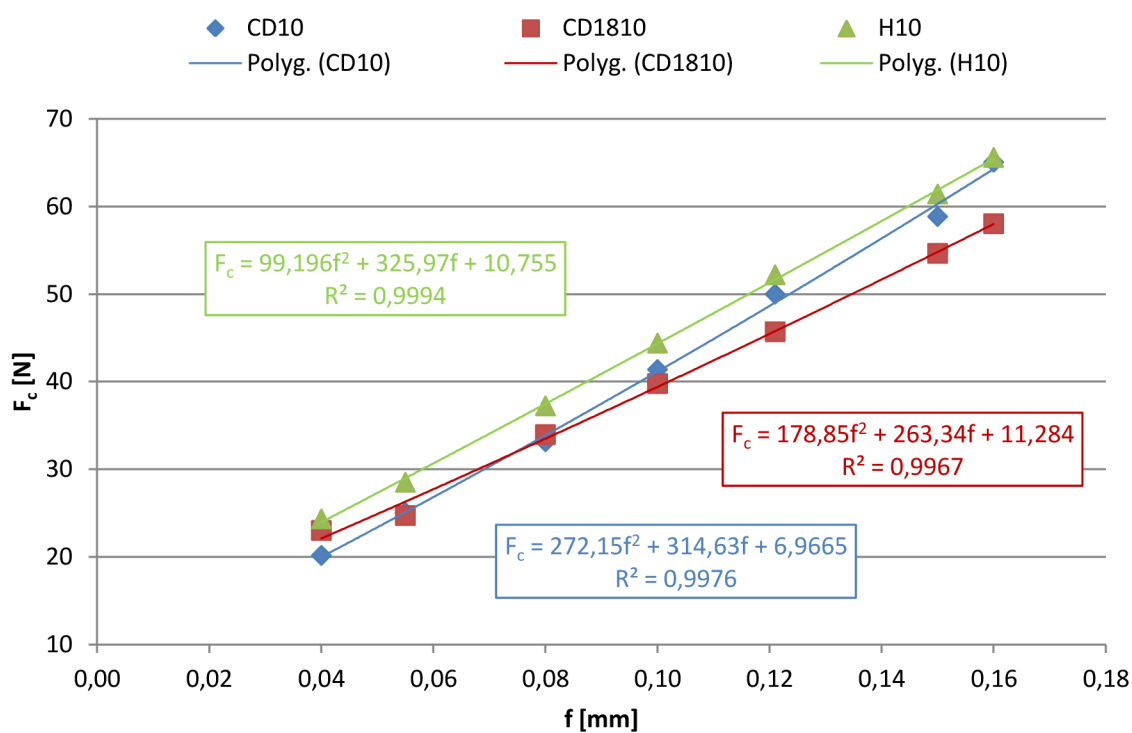
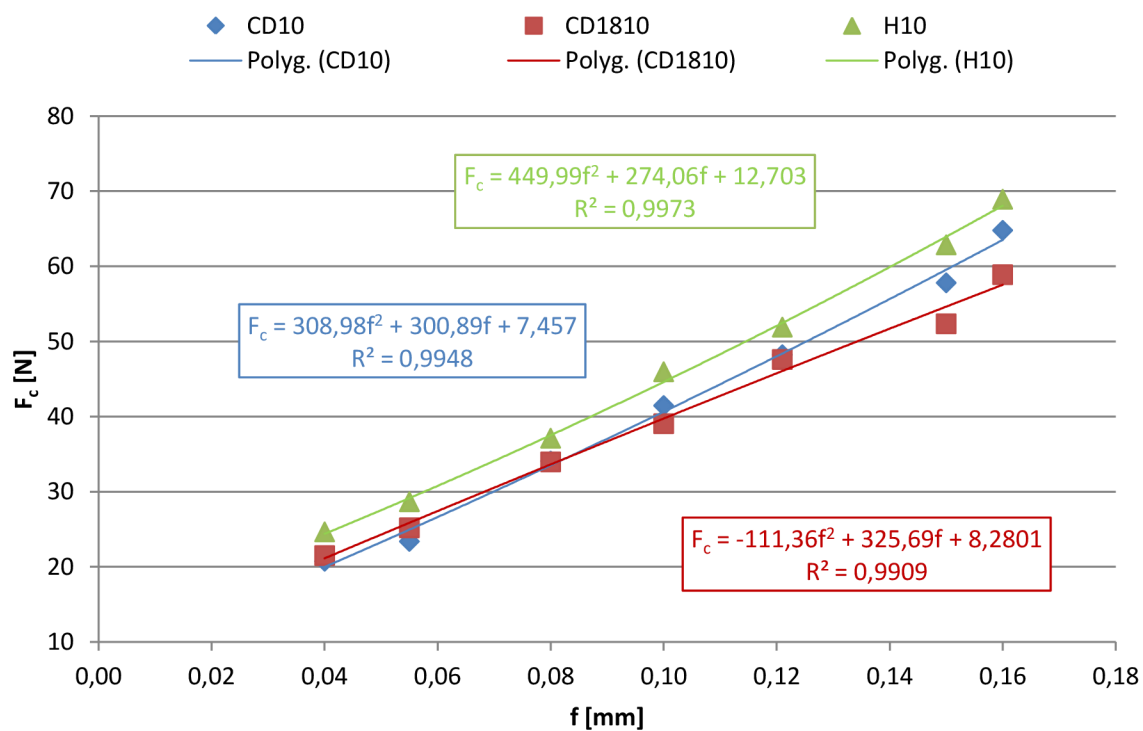
Pro řezné rychlosti 100, 150 i 200 m/min byl průběh pasivních sil velmi podobný průběhu posuvových sil (obr. 59, 60, 61). Ovšem zde byl rozsah sil od 6 N do 20 N. To znamená, že pasivní síly byly vyšší než posuvové. Nejlepší průběh pasivních sil je u destičky CD10, kde je spolehlivost u všech rychlostí vyšší než 0,98. Nejnižší síly jsou naměřeny u destičky CD1810, kde střední hodnota velikosti sil nepřesahuje velikost 12,5 N. Naopak nejvyšší naměřené síly jsou u destičky H10, kde hodnota dosahuje k 20N.

Obr. 59 Pasivní síly  $F_p$  při řezné rychlosti 100 m/min.Obr. 60 Pasivní síly  $F_p$  při řezné rychlosti 150 m/min.

Obr. 61 Pasivní síly  $F_p$  při řezné rychlosti 200 m/min.

Při vyhodnocování řezných sil (obr. 62, 63, 64) se rozsah sil pohybuje od 20 N do 69 N. Spolehlivost u všech destiček pro všechny rychlosti je minimálně 0,95 a průběh je velmi podobný.

Obr. 62 Řezné síly  $F_c$  při řezné rychlosti 100 m/min.

Obr. 63 Řezné síly  $F_c$  při řezné rychlosti 150 m/min.Obr. 64 Řezné síly  $F_c$  při řezné rychlosti 200 m/min.

***Celková síla [41]***

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad (10)$$

kde: F [N] - celková síla,  
 F<sub>c</sub> [N] - řezná síla,  
 F<sub>p</sub> [N] - pasivná síla,  
 F<sub>f</sub> [N] - posuvová síla.

Tab. 17 Vypočítané velikosti celkových sil pro řeznou rychlost 100 m/min.

Posuv na otáčku [mm]	H10	CD1810	CD10
	F [N]	F [N]	F [N]
<b>0,04</b>	28,000	24,905	21,695
<b>0,055</b>	31,578	27,821	25,936
<b>0,08</b>	41,475	34,962	37,387
<b>0,1</b>	48,568	41,789	45,344
<b>0,121</b>	54,114	57,929	53,857
<b>0,15</b>	67,693	63,224	65,637
<b>0,16</b>	64,757	61,955	67,889

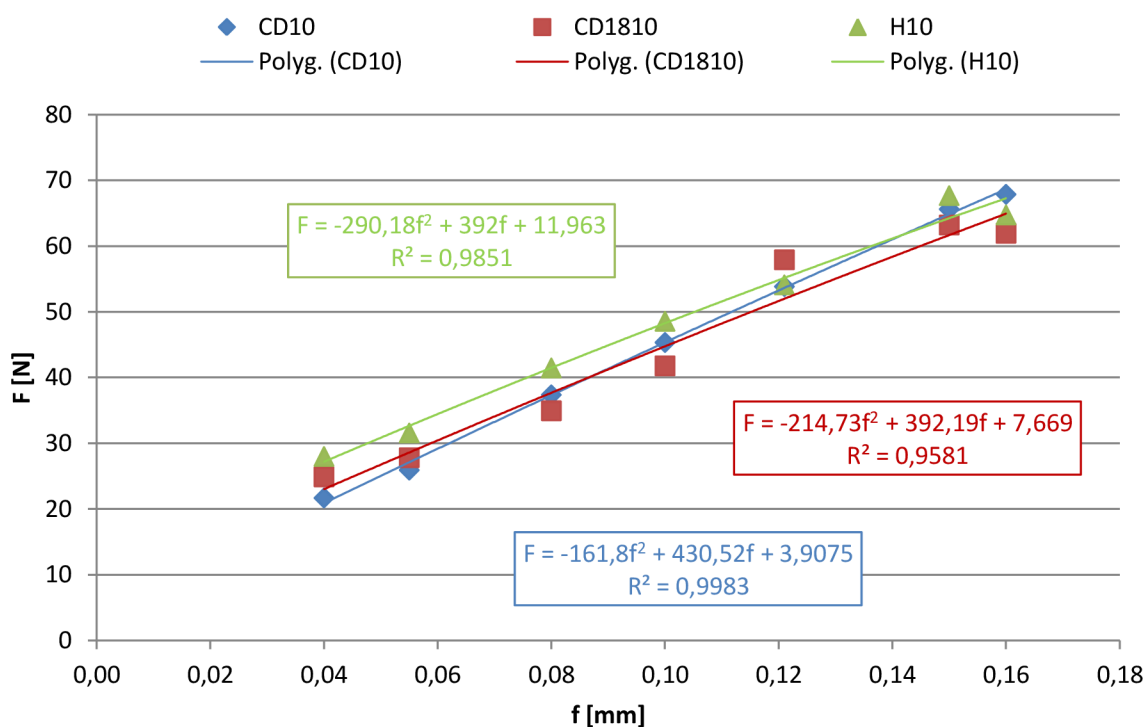
Tab. 18 Vypočítané velikosti celkových sil pro řeznou rychlost 150 m/min.

Posuv na otáčku [mm]	H10	CD1810	CD10
	F [N]	F [N]	F [N]
<b>0,04</b>	27,065	25,256	21,500
<b>0,055</b>	31,775	26,791	26,592
<b>0,08</b>	40,488	35,858	35,018
<b>0,1</b>	47,959	41,333	43,453
<b>0,121</b>	55,968	47,274	52,866
<b>0,15</b>	65,485	56,297	61,944
<b>0,16</b>	69,722	59,723	68,590

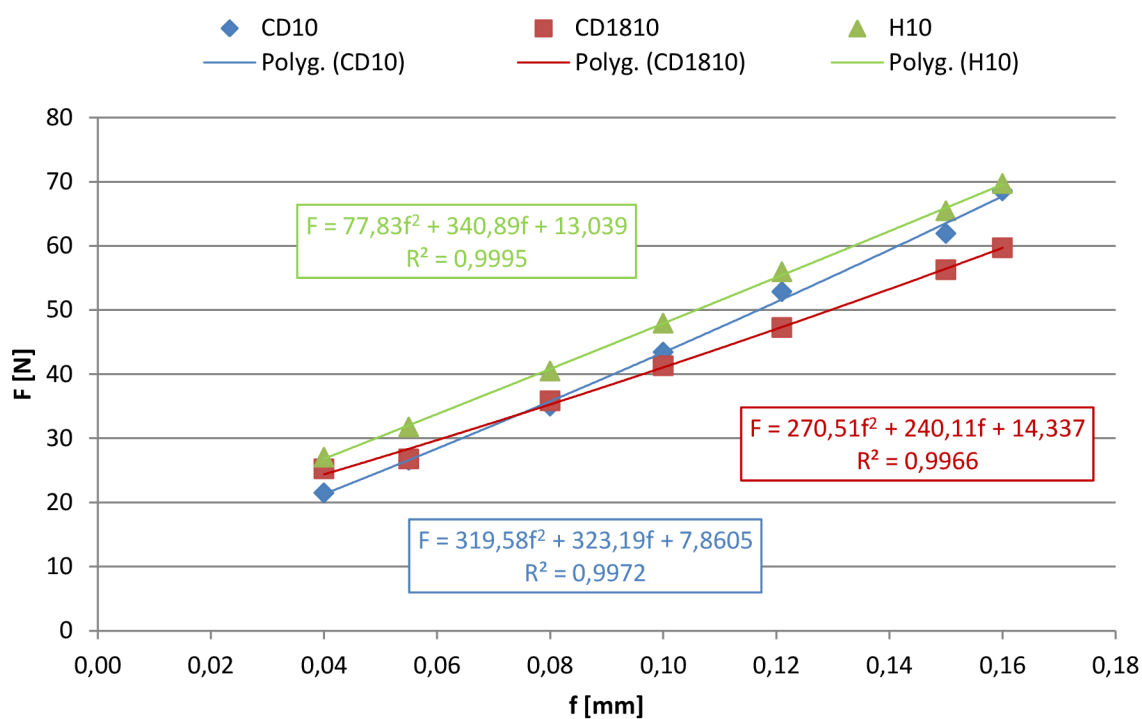
Tab. 19 Vypočítané velikosti celkových sil pro řeznou rychlost 200 m/min.

Posuv na otáčku [mm]	H10	CD1810	CD10
	F [N]	F [N]	F [N]
<b>0,04</b>	27,597	23,528	22,339
<b>0,055</b>	31,339	27,170	24,918
<b>0,08</b>	40,461	35,738	36,164
<b>0,1</b>	49,191	40,776	43,809
<b>0,121</b>	55,088	49,216	50,781
<b>0,15</b>	66,438	53,937	60,931
<b>0,16</b>	73,158	60,564	68,328

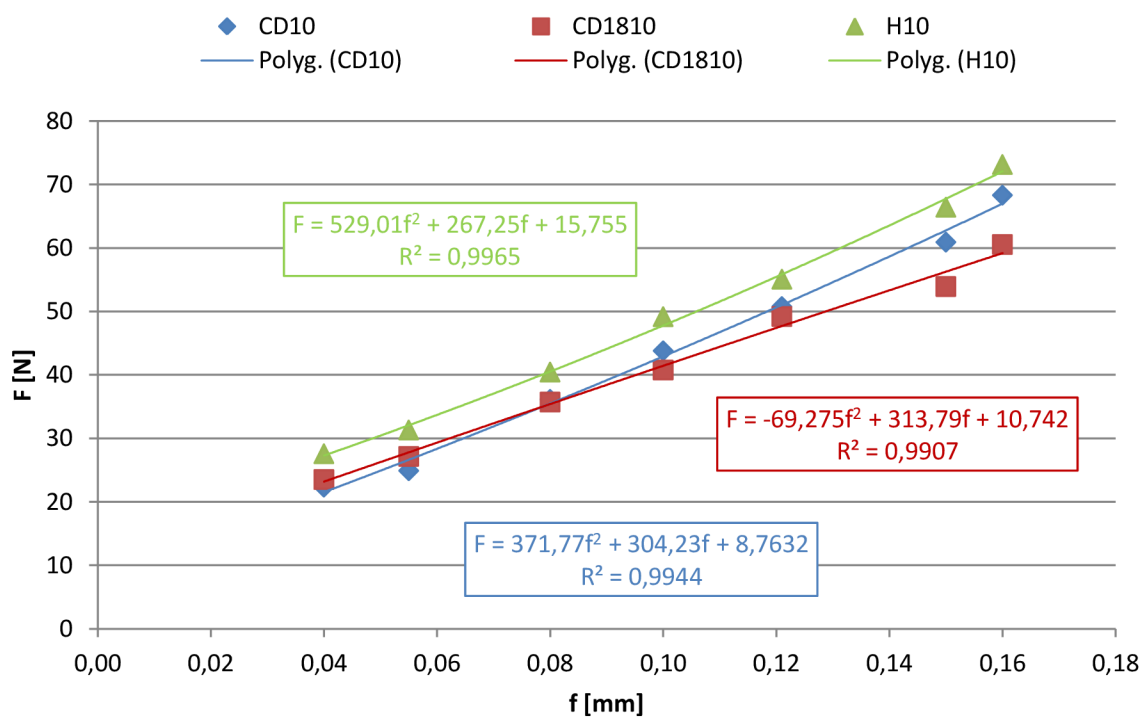
Vypočítané velikosti celkových sil jsou uvedeny v tab. 17, 18 a 19. Jejich grafické znázornění je vyobrazeno na obr. 65, 66, 67. Z těchto obrázků je zřejmé, že s rostoucím posuvem roste také celková síla. Rozsah velikostí sil je od 21,5 N až do 73 N. Pro řezné rychlosti 100, 150 i 200 m/min je průběh celkových sil přibližně stejný. Pouze u destičky H10 je nárůst síly při zvýšení řezné rychlosti na 150 m/min o 5 N a při zvýšení na 200 m/min o dalších 3,5 N.



Obr. 65 Celkové síly pro řeznou rychlost 100 m/min.



Obr. 66 Celkové síly pro řeznou rychlost 150 m/min.



Obr. 67 Celkové síly pro řeznou rychlost 200 m/min.



**Měrná řezná síla [41]**

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (11)$$

kde:  $k_c$  [N.mm<sup>-2</sup> = MPa] - měrná řezná síla,  
 $F_c$  [N] - řezná síla,  
 $A_D$  [mm<sup>2</sup>] - jmenovitý průřez třísky.

$$A_D = a_p \cdot f \quad (12)$$

kde:  $A_D$  [mm<sup>2</sup>] - jmenovitý průřez třísky,  
 $a_p$  [mm] - šířka záběru ostří,  
 $f$  [mm] - posuv na otáčku.

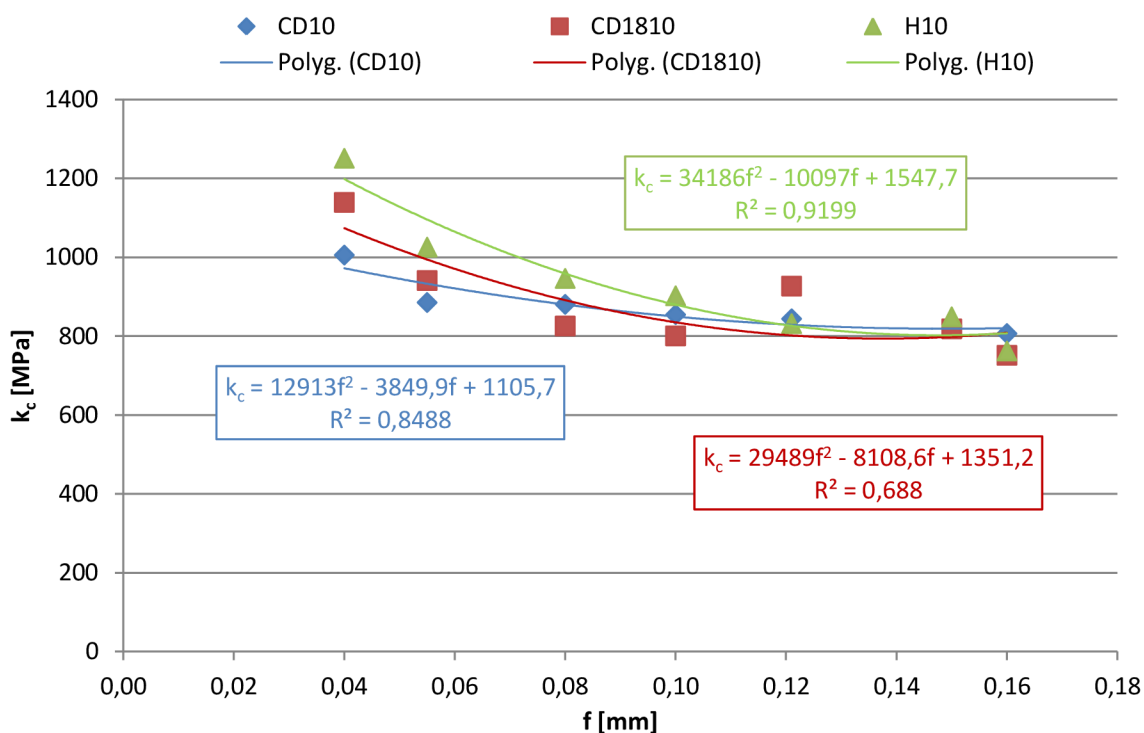
Tab. 20 Velikost jmenovitého průřezu třísky pro jednotlivé posuvy.

f [mm]	0,04	0,055	0,08	0,1	0,121	0,15	0,16
$A_D$ [mm <sup>2</sup> ]	0,02	0,0275	0,04	0,05	0,0605	0,075	0,08

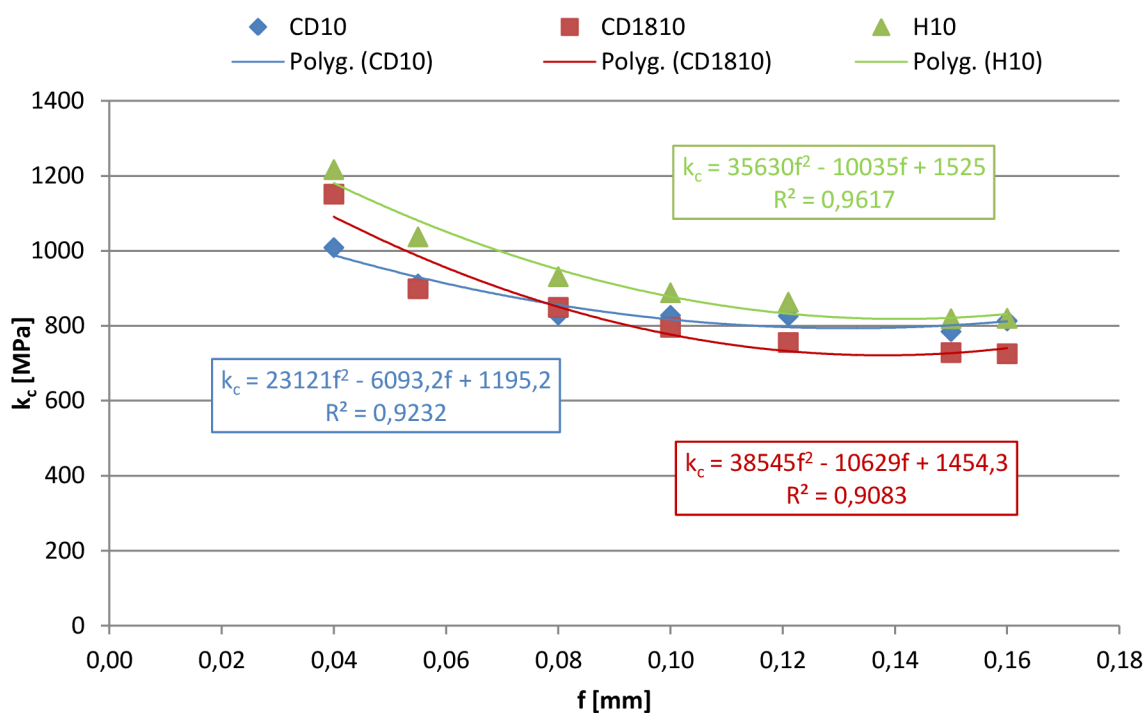
Tab. 21 Vypočítané velikosti měrných řezných sil.

Posuv na otáčku [mm]	H10			CD1810			CD10		
	100 m/min	150 m/min	200 m/min	100 m/min	150 m/min	200 m/min	100 m/min	150 m/min	200 m/min
	$k_c$ [MPa]								
<b>0,04</b>	1251,1	1216,8	1232,4	1139,3	1151,1	1075,1	1005,8	1008,6	1037,1
<b>0,055</b>	1025,7	1037,2	1042,3	941,1	899,0	916,3	885,5	911,8	850,4
<b>0,08</b>	946,5	931,1	928,0	825,7	849,1	849,2	880,8	828,9	852,0
<b>0,1</b>	902,5	888,0	919,4	800,8	795,7	781,0	854,8	827,7	829,3
<b>0,121</b>	831,8	862,9	858,0	927,0	755,5	786,9	844,1	826,3	797,3
<b>0,15</b>	849,2	819,0	838,2	818,6	728,6	698,0	826,1	784,7	770,7
<b>0,16</b>	762,4	820,0	861,7	751,5	725,5	736,1	806,7	813,2	809,9

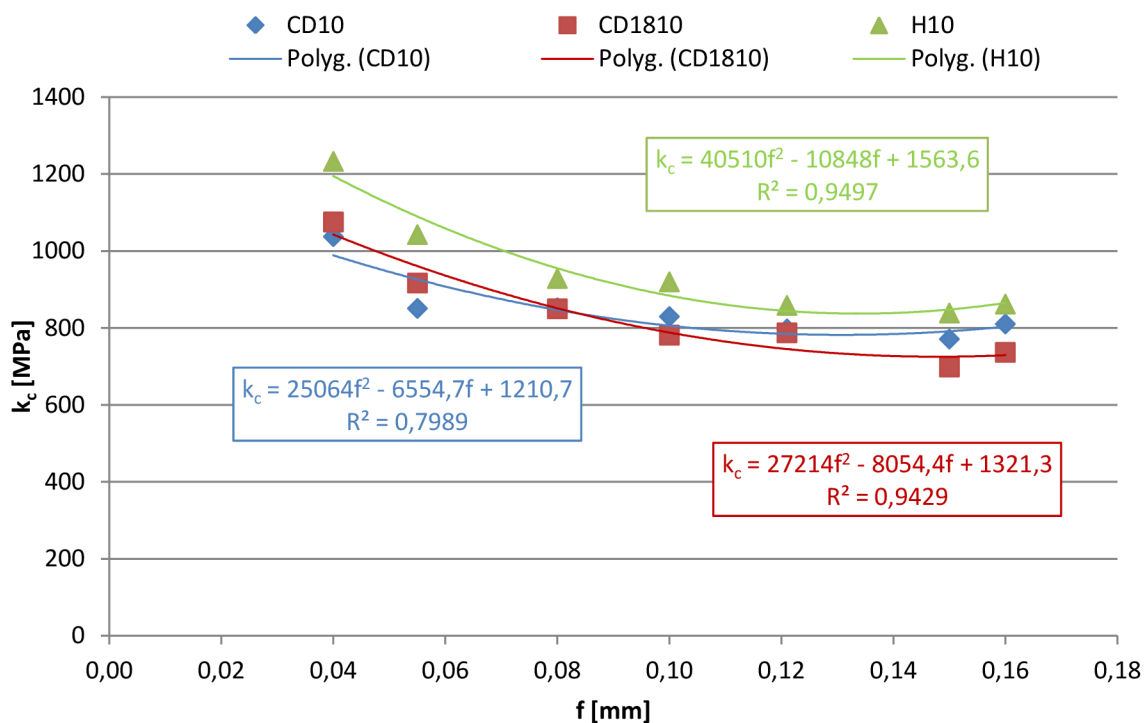
Velikosti průřezu třísky pro jednotlivé posuvy jsou uvedeny v tab. 20 a z toho vypočítané velikosti měrných řezných sil jsou uvedeny v tab. 21. Při zvyšování velikosti posuvu na otáčku se měrné řezné síly snižují. Při nejnižším posuvu 0,04 mm a řezné rychlosti 100 m/min dosahují velikosti měrné řezné síly 1000 MPa pro destičku CD10 až 1250 MPa pro destičku H10 (obr. 68). Pro řeznou rychlost 150 a 200 m/min je průběh měrných řezných sil podobný (obr. 69,70). Nejvyšší hodnoty  $k_c$  při všech rychlostech byly naměřeny pro destičku H10.



Obr. 68 Měrné řezné síly pro řeznou rychlost 100 m/min.



Obr. 69 Měrné řezné síly pro řeznou rychlost 150 m/min.



Obr. 70 Měrné řezné síly pro řeznou rychlost 200 m/min.

#### 4 TECHNOLOGICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Technologicko-ekonomické vyhodnocení dosažených výsledků se bude počítat a následně vyhodnocovat pro čelní soustružení duralového disku při konstantní řezné rychlosti 150 m/min.

*Strojní čas pro čelní soustružení při konstantní řezné rychlosti [42]*

$$t_{AS} = \frac{\pi \cdot [(D_{max} + 2 \cdot l_n)^2 - (D_{min} + 2 \cdot l_p)^2]}{4 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \quad (13)$$

- kde:  $t_{AS}$  [min] - strojní čas při konstantní řezné rychlosti,  
 $D_{max}$  [mm] - vnější průměr,  
 $D_{min}$  [mm] - vnitřní průměr,  
 $l_n$  [mm] - délka náběhu,  
 $l_p$  [mm] - délka přeběhu,  
 $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] - řezná rychlost,  
 $f$  [mm] - posuv na otáčku.

Délku náběhu lze brát v úvahu pouze u prvního mezikruží, kdy byl náběh 5 mm. Délka přeběhu je nulová, jelikož nástroj vždy při změně posuvu pokračoval na stejném průměru, kde skončil při předchozím posuvu a při průměru 40 mm opustil pracovní prostor bez přeběhu. Při součtu jednotlivých strojních časů z tab. 22 vyplývá, že celkový strojní čas byl 3,8431 minuty.

Tab. 22 Výpočet strojního času při konstantní řezné rychlosti 150 m/min.

Průměr $D_{max} - D_{min}$ [mm]	Posuv na otáčku [mm]	Strojní čas [min]
200 – 160	0,04	2,4216
160 – 140	0,06	0,5236
140 – 120	0,08	0,3403
120 – 100	0,1	0,2304
100 – 80	0,12	0,1571
80 – 60	0,14	0,1047
60 – 40	0,16	0,0654
<b>Součet strojních časů:</b>		<b>3,8431</b>

**Náklady na strojní práci [43]**

$$N_s = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} \quad (14)$$

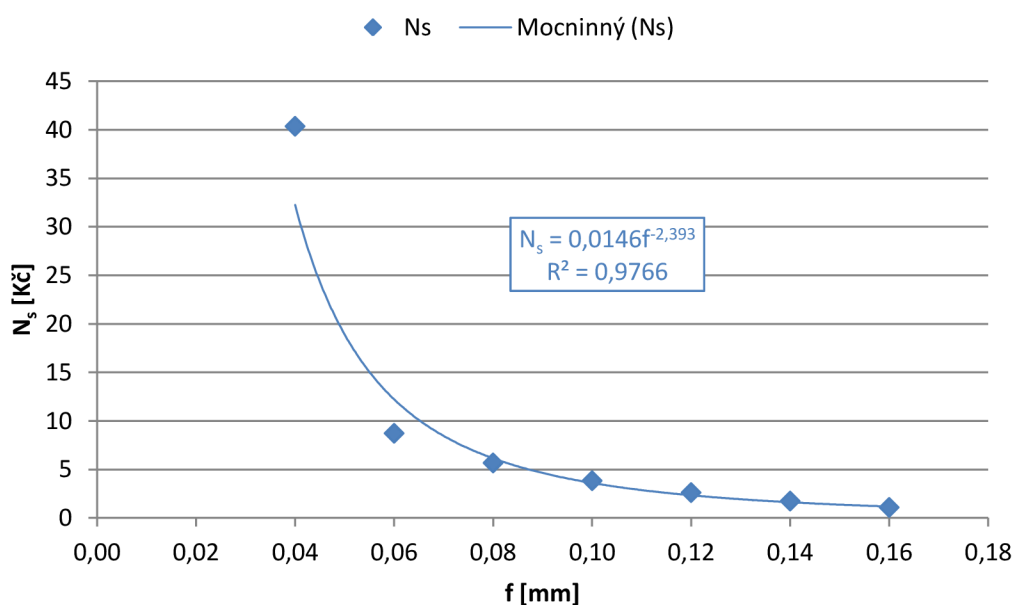
kde:  $N_s$  [Kč] - náklady na strojní práci,  
 $t_{AS}$  [min] - jednotkový strojní čas,  
 $N_{sn}$  [Kč] - náklady na hodinu strojní práce.

Dle interních sazeb ÚST byly zvoleny náklady na hodinu provozu stroje 800 Kč/hod a náklady na mzdu obsluhy 200 Kč/hod. Celkové náklady na strojní práci jsou 1000 Kč/hod. Pro všechny destičky jsou strojní čas a náklady na strojní práci stejné.

Tab. 23 Výpočet nákladů na strojní práci.

Posuv na otáčku [mm]	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16
Strojní čas [min]	2,4216	0,5236	0,3403	0,2304	0,1571	0,1047	0,0654
Náklady na strojní práci [Kč]	40,3600	8,7267	5,6717	3,8400	2,6183	1,7450	1,0900

$$N_s = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = 3,8431 \cdot \frac{1000}{60} = 64,0517 \doteq \mathbf{64 \text{ Kč}}$$



Obr. 71 Průběh závislosti operačních strojních nákladů na posuvu na otáčku.

Na obr. 71 je vidět, že průběh závislosti strojních nákladů na posuvu na otáčku je se spolehlivostí větší než 0,97. Celkové náklady na strojní práci pro čelní soustružení činí 64 Kč.

#### *Náklady na vedlejší práci [43]*

$$N_v = t_{AV} \cdot \frac{D_v}{60} \quad (15)$$

- kde:  $N_v$  [Kč] - náklady na vedlejší práci,  
 $t_{AV}$  [min] - jednotkový vedlejší čas,  
 $D_v$  [Kč] - náklady na hodinu vedlejší práce.

Náklady na hodinu vedlejší práce  $D_v$  jsou nižší než náklady na hodinu strojní práce  $D_s$ , protože stroj není v chodu, rozdíl však není veliký, proto byly zvoleny náklady na hodinu vedlejší práce 800 Kč/hod. Jednotkový vedlejší čas byl stanoven na 10 minut pro obrábění jednou břitovou destičkou. Pro všechny destičky jsou náklady na vedlejší práci stejné.

$$N_v = t_{AV} \cdot \frac{D_v}{60} = 10 \cdot \frac{800}{60} = 133,33 \doteq \mathbf{133 \text{ Kč}}$$

#### *Náklady na nástroj a jeho výměnu [43]*

$$N_n = \frac{N_T}{Q_T} = \frac{\frac{N_1}{n_B} + \frac{N_2}{z} + N_3}{\frac{T}{\lambda \cdot t_{AS}}} \quad (16)$$

- kde:  $N_n$  [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu,  
 $N_T$  [Kč] - náklady na nástroj,  
 $Q_T$  [-] - počet obrobených kusů během trvanlivosti břitu,  
 $N_1$  [Kč] - cena VBD,  
 $n_B$  [-] - počet břitů,  
 $N_2$  [Kč] - cena držáku,  
 $z$  [min] - životnost držáku,  
 $N_3$  [Kč] - náklady na upnutí, případně seřízení VBD,  
 $T$  [min] - trvanlivost,  
 $\lambda \cdot t_{AS}$  [min] - čistý čas řezání.

**Ceny jednotlivých destiček a držáku [44, 45]**

DCGX11T308-AI 1810 (CD1810)	1 234 Kč s DPH
DCGX11T308-AI H10 (H10)	350,9 Kč s DPH
DCMW11T308FP CD10 (CD10)	3 684,4 Kč s DPH
držák SDJCR 2525M11	1 425 Kč s DPH

Smluvní dohodou byly stanoveny trvanlivosti pro jednotlivé destičky. Pro destičky CD1810 a CD10 byla stanovena trvanlivost 100 minut a pro destičku H10 byla stanovena trvanlivost 15 minut. Náklady na upnutí, případně seřízení VBD byly stanoveny na 17 Kč a životnost držáku byla stanovena na 500 garantovaných přepnutí.

$$N_{nCD1810} = \frac{\frac{N_1}{n_B} + \frac{N_2}{z} + N_3}{\frac{T}{\lambda \cdot t_{AS}}} = \frac{\frac{1234}{2} + \frac{1425}{500} + 17}{\frac{100}{\frac{80}{85} \cdot 3,8431}} = 23,035 \doteq \mathbf{23 \text{ Kč}}$$

$$N_{nH10} = \frac{\frac{N_1}{n_B} + \frac{N_2}{z} + N_3}{\frac{T}{\lambda \cdot t_{AS}}} = \frac{\frac{350,9}{2} + \frac{1425}{500} + 17}{\frac{15}{\frac{80}{85} \cdot 3,8431}} = 47,0938 \doteq \mathbf{47 \text{ Kč}}$$

$$N_{nCD10} = \frac{\frac{N_1}{n_B} + \frac{N_2}{z} + N_3}{\frac{T}{\lambda \cdot t_{AS}}} = \frac{\frac{3684,4}{1} + \frac{1425}{500} + 17}{\frac{100}{\frac{80}{85} \cdot 3,8431}} = 133,9840 \doteq \mathbf{134 \text{ Kč}}$$

**Celkové operační výrobní náklady [43]**

$$N_c = N_s + N_v + N_n \quad (17)$$

- kde:  $N_c$  [Kč] - celkové operační výrobní náklady,  
 $N_s$  [Kč] - náklady na strojní práci,  
 $N_v$  [Kč] - náklady na vedlejší práci,  
 $N_n$  [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu.

$$N_{cCD1810} = N_s + N_v + N_{nCD1810} = 64 + 133 + 23 = \mathbf{220Kč}$$

$$N_{cH10} = N_s + N_v + N_{nH10} = 64 + 133 + 47 = \mathbf{244Kč}$$

$$N_{cCD10} = N_s + N_v + N_{nCD10} = 64 + 133 + 134 = \mathbf{331Kč}$$

$$N_c = N_{cCD1810} + N_{cH10} + N_{cCD10} = 220 + 244 + 331 = \mathbf{795 Kč}$$

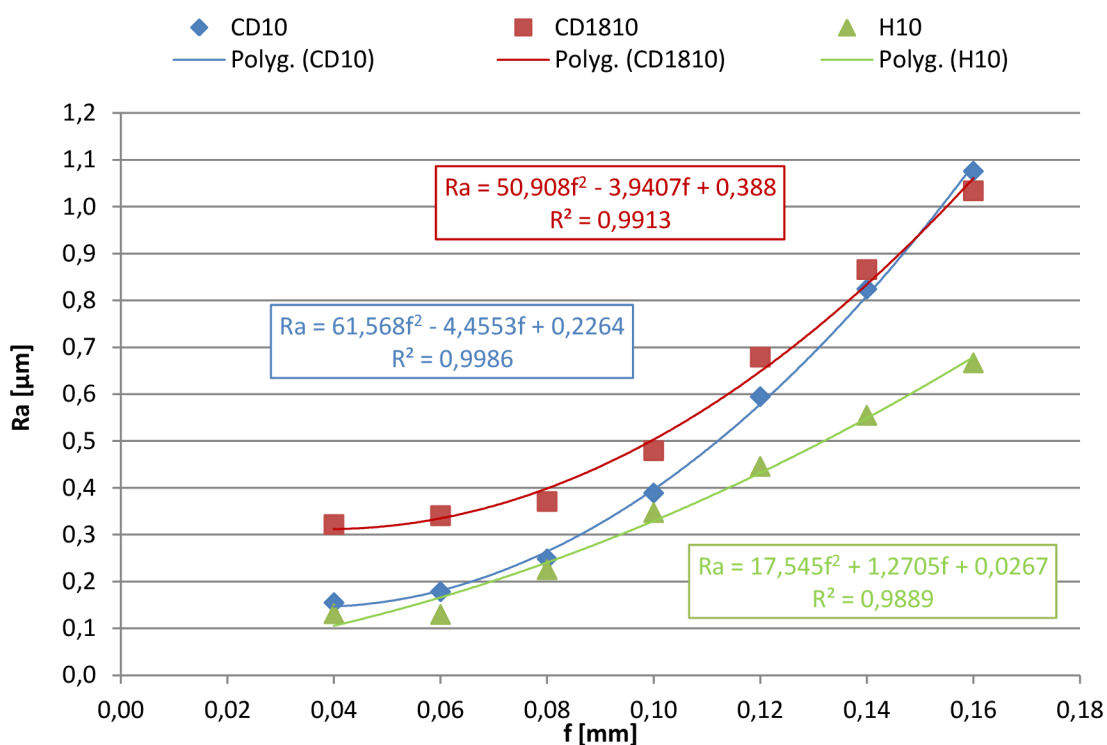
Náklady na strojní práci a na vedlejší práci jsou pro všechny použité destičky stejné, činí 197 Kč. Náklady na nástroj a jeho výměnu se budou lišit dle trvanlivosti jednotlivých nástrojů. Celkové náklady pro čelní soustružení duralového disku při použití tří destiček činí 795 Kč.



## 5 DISKUZE

### Vyhodnocení drsnosti povrchu

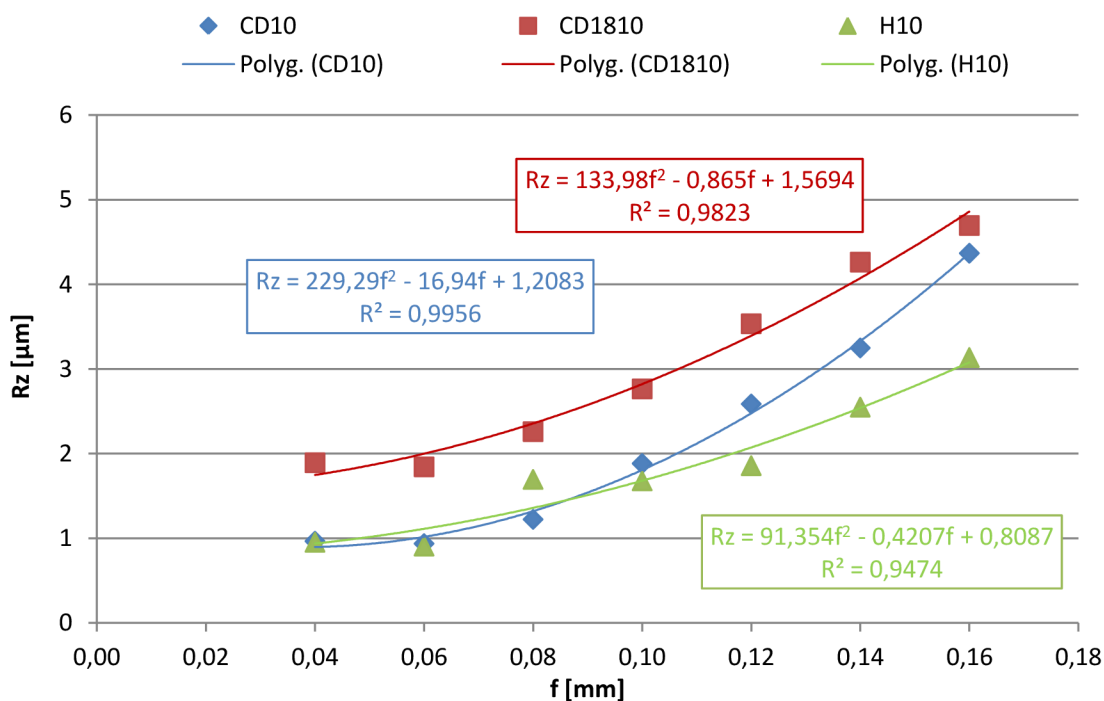
Z obr. 72 je zřejmé, že spolehlivost u všech destiček přesahuje 0,98, z čehož vyplývá, že průměrná aritmetická úchylka profilu  $R_a$  je silně závislá na posuvu na otáčku pro tyto použité destičky. Nejnižší drsnost byla naměřena pro destičku H10. Při posuvu na otáčku 0,04 mm je hodnota  $R_a$  u destičky CD10 vyšší o 18 % než u destičky H10 a pro destičku CD1810 je nárůst o 145 % oproti destičce H10. Při nejvyšším posuvu 0,16 mm je hodnota  $R_a$  oproti destičce H10 vyšší o 62 % u destičky CD10 a o 55 % u destičky CD1810.



Obr. 72 Závislost průměrné aritmetické úchylky profilu na posuvu na otáčku.

Průběhy parametru nejvyšší výšky profilu  $R_z$  jsou velmi podobné průběhům průměrné aritmetické úchylky profilu  $R_a$  (obr. 73). Závislost mezi nejvyšší výškou profilu a posuvem na otáčku je opět silná. Při posuvu na otáčku 0,04 mm se hodnota  $R_z$  u destičky CD10 téměř shoduje s destičkou H10 (rozdíl 1,3 %) a pro destičku CD1810 je nárůst o 100 % oproti destičkám H10 a CD10. Při nejvyšším posuvu 0,16 mm je hodnota  $R_z$  oproti destičce H10 vyšší o 39 % u destičky CD10 a o 50 % u destičky CD1810.

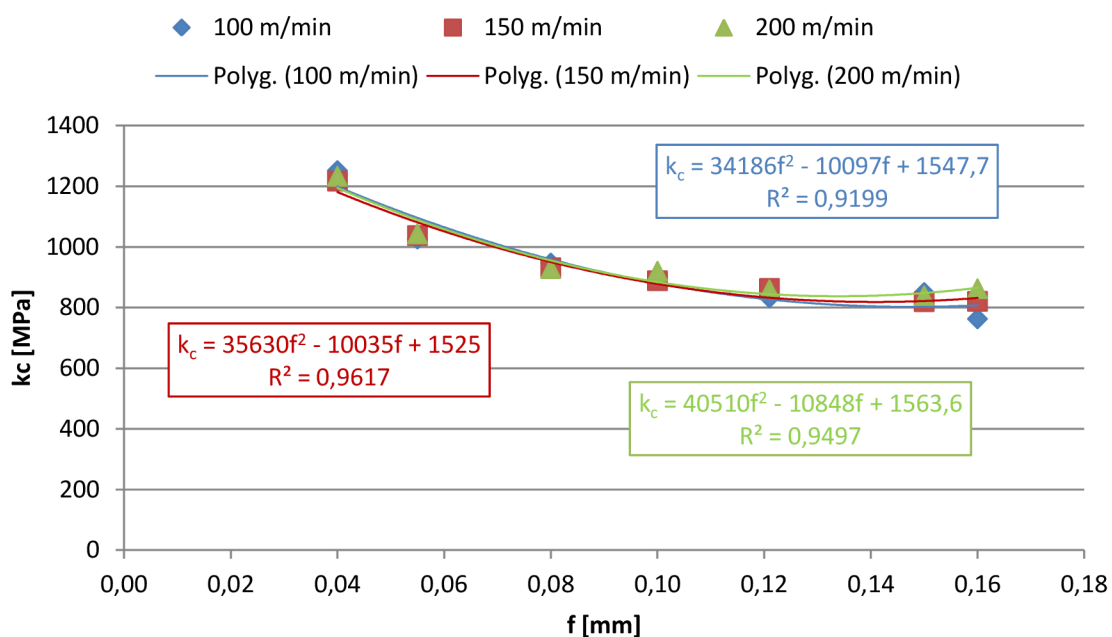
Z obr. 72 a 73 tedy vyplývá, že pro čelní soustružení duralového disku při řezné rychlosti 150 m/min a v rozmezí velikostech posuvu na otáčku 0,04 – 0,16 mm je nejvhodnější vyměnitelná břitová destička H10. Naopak nejméně vhodná je destička CD1810.



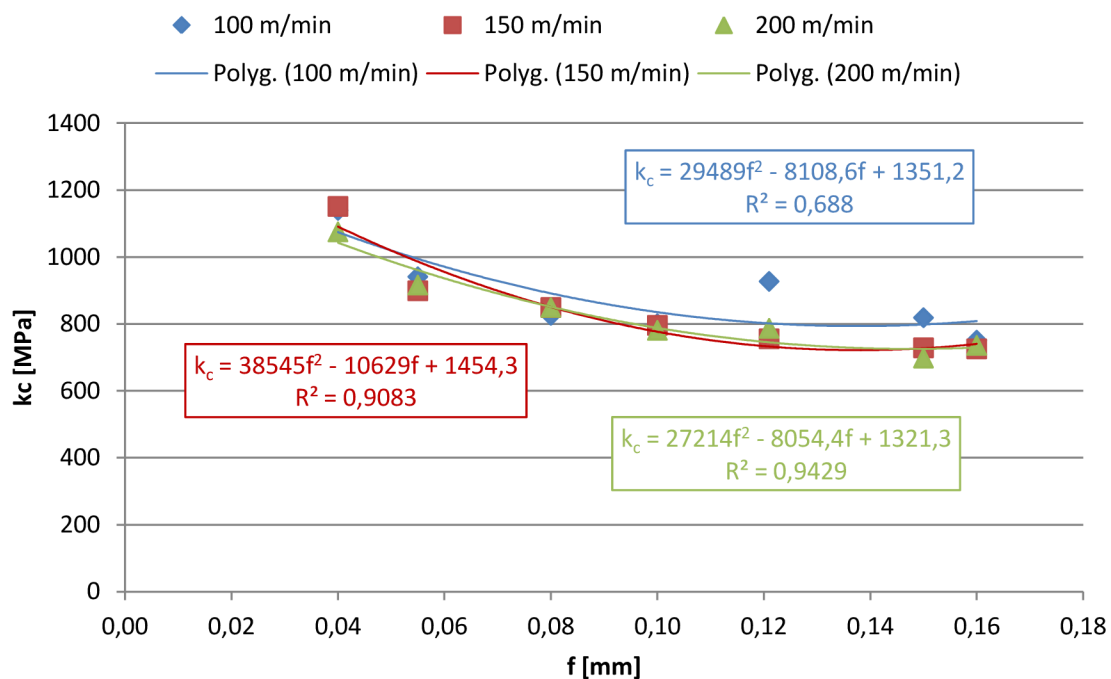
Obr. 73 Závislost nejvyšší výšky profilu na posuvu na otáčku.

### Vyhodnocení měrných řezných sil

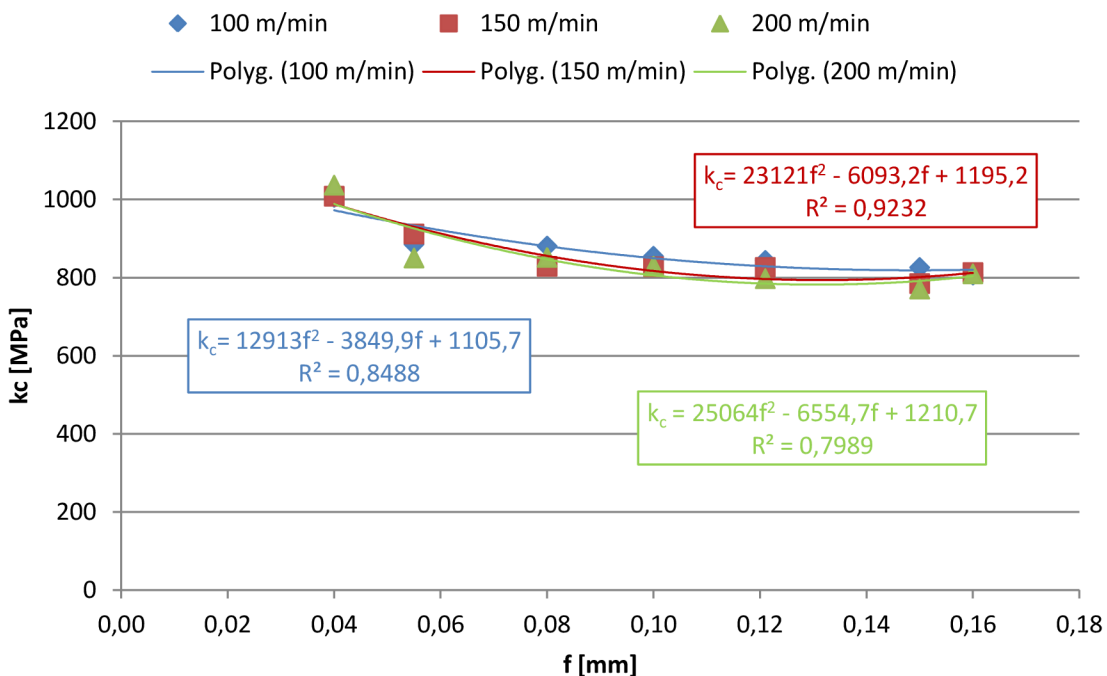
Z obr. 74, 75 a 76 je zřejmé že u všech destiček nemá navýšení řezné rychlosti o 50 % i následně o 100 % žádný významný vliv na velikost měrných řezných sil. Pouze u destičky CD1810 při posuvu 0,12 mm a řezné rychlosti 100 m/min je hodnota  $k_c$  o 100 MPa vyšší než okolní hodnoty, což může být zapříčiněno chybou měření.



Obr. 74 Závislost měrných řezných sil na posuvu na otáčku pro destičku H10.



Obr. 75 Závislost měrných řezných sil na posuvu na otáčku pro destičku CD1810.



Obr. 76 Závislost měrných řezných sil na posuvu na otáčku pro destičku CD10.

## ZÁVĚR

Tato práce je zaměřena na moderní dokončovací metody obrábění vnějších povrchů, konkrétně na metody s úběrem materiálu. Jsou zde popsány jednotlivé metody od jemného obrábění až po nano-obrábění.

Součástí práce je experiment rozdělený do dvou částí. V první části se stanovovaly závislosti velikostí posuvu na otáčku na drsnosti povrchu při čelním soustružení disku z hliníkové slitiny a v druhé části se stanovovaly velikosti sil a měrných řezných sil při podélném soustružení disku z hliníkové slitiny.

Výsledky pro první část experimentu jsou následující:

- statisticky významná závislost (spolehlivost více než 0,95) průměrné aritmetické úchytky profilu  $R_a$  a nejvyšší výšky profilu  $R_z$  na posuvu na otáčku (0,04 – 0,16 mm) pro řeznou rychlost 150 m/min,
- nejnižší naměřená hodnota  $R_a$  a  $R_z$  byla shledána pro vyměnitelnou břitovou destičku DCGX11T308-AIH10:  $R_a = 0,1314 \mu\text{m}$ ,  $R_z = 0,9536 \mu\text{m}$  – při řezných podmínkách  $f = 0,04 \text{ mm}$ ,  $v_c = 150 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0,5 \text{ mm}$ ,
- téměř identický průběh teoretických a naměřených hodnot průměrné aritmetické úchytky profilu u destičky DCMW11T308FP CD10,
- velikost naměřených hodnot  $R_a$  v rozmezí 0,1314 – 1,0758  $\mu\text{m}$ ,
- velikost naměřených hodnot  $R_z$  v rozmezí 0,9536 – 4,6966  $\mu\text{m}$ ,
- pro čelní soustružení duralového disku při řezné rychlosti 150 m/min a v rozmezí velikostech posuvu na otáčku 0,04 – 0,16 mm je z použitých destiček vzhledem k dosahovaným hodnotám drsnosti povrchu nejvhodnější vyměnitelná břitová destička DCGX11T308-AI H10.

Závěry pro druhou část experimentu jsou následující:

- velikost celkových sil v rozmezí 22 – 73 N,
- téměř identický průběh celkových sil pro všechny tři destičky při rychlostech 100, 150 i 200 m/min,
- velikost měrných řezných sil v rozmezí 725 – 1250 MPa,
- s rostoucím posuvem se měrné řezné síly postupně snižují,
- u všech destiček nemá navýšení řezné rychlosti o 50 % (ze 100 m/min na 150 m/min) i následně o 100 % (na 200 m/min) žádný významný vliv na velikost měrných řezných sil.

Při technologicko-ekonomickém vyhodnocení byly vypočítány náklady na strojní práci a na vedlejší práci. Pro všechny použité destičky jsou stejné a činí 197 Kč pro jednu destičku. Náklady na nástroj a jeho výměnu se mění s cenou, počtem břitů a trvanlivostí použitých destiček. Celkové náklady pro čelní soustružení duralového disku při použití 3 destiček činí 795 Kč.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MÁDL, J., AJ. *Technologie obrábění - 1., 2., 3. díl*. Praha. Vydavatelství ČVUT 2000. 3. sv. 246 s. ISBN 80-01-02091-6.
2. KOČMAN, Karel a PROKOP Jaroslav. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. ISBN 80-214-3068-0.
3. HUMÁR, A. *Technologie obrábění – 3. část*. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2005 [online]. [vid. 2014-03-01]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)
4. KARKOŠ, Michal. Dokončovací soustružení s použitím cermetových materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2010, č. 12 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/dokoncovaci-soustruzeni-s-pouzitim-cermetovych-materialu.html>
5. TEJKALOVÁ, Alena. Novinky v nástrojích pro rok 2014. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2014, č. 1 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/novinky-v-nastrojich-pro-rok-2014.html>
6. Hladicí geometrie řezných břitů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2001, č. 12 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/hladici-geometrie-reznych-britu.html>
7. SPM/SPS-140. *Satisloh* [online]. 2012 [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: [http://www.satisloh.com/uploads/media/Info\\_SPM\\_SPS-140\\_en.pdf](http://www.satisloh.com/uploads/media/Info_SPM_SPS-140_en.pdf)
8. Hrubovací broušení a broušení plochých dílců na čisto. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2003, č. 12 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/hrubovaci-brouseni-a-brouseni-plochych-dilcu-na-cisto.html>
9. Jemné broušení při obrábění keramiky předčí lapování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2002, č. 12 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/jemne-brouseni-pri-obrabeni-keramiky-predci-lapovani.html>

10. Brusné nástroje z keramického pojiva. *LUGAABRASIV-CZ s.r.o.* [online]. 2009 [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://lugaabrasiv.cz/brusne-nastroje-z-keramickeho-pojiva.htm>
11. BRUSKY HROTOVÉ UNIVERZÁLNÍ. *Strojimport a.s.* [online]. [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.strojimport.cz/brusky/hrotove-univerzalni/>
12. KRATOCHVÍL, David. Stroje pro broušení ve všech podobách. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2009, č. 9 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/stroje-pro-brouseni-ve-vsech-podobach.html>
13. BRINKSMEIER, E., Y. MUTLUGÜNES, F. KLOCKE, J.C. AURICH, P. SHORE a H. OHMORI. Ultra-precision grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2010, vol. 59, issue 2, s. 652-671 [vid. 2014-03-12]. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850610001885>
14. Bates technologies. *Direct industry* [online]. 2014 [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/bates-technologies/cbn-honing-stones-38489-380725.html>
15. KADIA Production. *Direct industry* [online]. 2014 [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/kadia-production/honing-tools-27734-428577.html>
16. SCHMIDT, Josef. Kvalitu spalovacích motorů určují dokončovací operace. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2012, č. 4 [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/kvalitu-spalovacich-motoru-urcuji-dokoncovaci-operace.html>
17. Rottler HP6A Honing Machine. *Rottler Manufacturing* [online]. 2014 [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.rottermf.com/engine-building-machine.php?model=HP6A>
18. SCHNEIDER, G. *Cutting Tools Applications*. George Schneider, Jr. Farmington Hills. Michigan. USA. ISBN 0-615-12191-8. 243 pp.
19. Hyprez Composite Lapping Plates. *Engis* [online]. 2014 [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.engis.com/composite-lapping-plates.php>

20. Lapmaster International. *Direct industry* [online]. 2014 [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/lapmaster-international/lapping-machines-7172-562323.html>
21. Aero Lap - Dokončování funkčních ploch do ZRCADLOVÉHO LESKU. *Misan s.r.o. Obráběcí stroje a nástroje* [online]. 2014 [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.misan.cz/okamoto/katalog-detail/aerolap-aero-lap---dokoncovani-funkcnich-ploch--do--zrcadloveho-lesku/>
22. DVOŘÁK, Luděk. Zlepšení povrchu a tvaru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2013, č. 5 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zlepseni-povrchu-a-tvaru.html>
23. Gearsolution: Superfinishing applicated for the refurbishing of wind turbine gears. *Dailye - Notiziario tecnico di energia* [online]. 2013 [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.dailyenmoveme.com/en/renewable/gearsolution-superfinishing-applicated-refurbishing-wind-turbine-gears>
24. Novinky v technologii superfinišování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2005, č. 9 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/novinky-v-technologie-superfinisovani.html>
25. DVOŘÁK, Luděk. Stavebnicový systém pro superfinišování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2010, č. 3 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/stavebnicovy-system-pro-superfinisovani.html>
26. Flexible and efficient polishing. *Satisloh* [online]. [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.satisloh.com/home/precision-optics/polishing/sps-140/>
27. Used beer keg restoration process. *PILSENA* [online]. 2013 [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.used-kegs.com/>
28. Tryskání. *Vitam s.r.o.* [online]. 2009 [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://vitam.cz/kovovyroba-povrchova-uprava-fotovoltaika-tryskani>
29. JANČA, Ladislav. Tryskání zvlhčeným abrazivem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2009, č. 4 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/tryskani-zvlhcnym-abrazivem-2.html>

30. Tlakové omýláni. *SOFIKO s.r.o.* [online]. [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.sofiko.cz/grafika/omylani/big/01.JPG>
31. Technologie. *DUP - družstvo Pelhřimov* [online]. 2012 [vid. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.dup.cz/cz/kovovyroba/technologie/>
32. Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2002, č. 5 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/omilani-jako-univerzalni-metoda-pro-upravu-povrchu.html>
33. ROBINSON, G.M. a M.J. JACKSON. A review of micro and nanomachining from a materials perspective. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2005, vol. 167, 2-3, s. 316-337 [vid. 2014-03-12]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.016. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013605005996>
34. ISLAM, Sumaiya, Raafat IBRAHIM, Raj DAS a Tim FAGAN. Novel approach for modelling of nanomachining using a mesh-less method. *Applied Mathematical Modelling* [online]. 2012, vol. 36, issue 11, s. 5589-5602 [vid. 2014-03-23]. DOI: 10.1016/j.apm.2012.01.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0307904X12000200>
35. HOSSEINI, Seyed Vahid a Mehrdad VAHDATI. Modeling the effect of tool edge radius on contact zone in nanomachining. *Computational Materials Science* [online]. 2012, vol. 65, s. 29-36 [vid. 2014-03-23]. DOI: 10.1016/j.commatsci.2012.06.037. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927025612004089>
36. Hliník AlCu4Mg. *PROAL - Hliníkové profily* [online]. 2009 [vid. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424201.htm>
37. Hliník a jeho slitiny. *PRONTON* [online]. [vid. 2014-04-30]. Dostupné z: [http://pronton.cz/?page\\_id=202](http://pronton.cz/?page_id=202)
38. Slitiny hliníku - Základní technické informace. In: *Hliníkové profily, hliníkové plechy* [online]. 2014 [vid. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.ehlinik.cz/prilohy/zakladni-technicke-informace.pdf>



39. Cutting materials: General information - coated carbide. *Sandvik Coromant* [online]. [vid. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/smallparts/catalogue/P127-132.pdf>
40. Všeobecné soustružení. *Sandvik Coromant* [online]. [vid. 2014-04-15]. Dostupné z: [http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/MTG\\_A.pdf](http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/MTG_A.pdf)
41. PROKOP, Jaroslav. *Aplikovaná teorie obrábění*. Přednáška. Brno: VUT, 8.4.2014.
42. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie výroby II: Řešené příklady*. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2002 [online]. [vid. 2014-05-15]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby\\_II.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby_II.pdf)
43. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
44. VBD. *Kvalitní-nástroje* [online]. [vid. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.kvalitni-nastroje.cz/3-vbd>
45. Držáky destiček. *OMICRON Svářecí stroje s.r.o.* [online]. 2014 [vid. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.gamasvar.cz/53785-drzaky-nozove-akko/104930-nuz-sdjcr-2525-m11-akko-/?run=0&pg=10&fev=340>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
<b>CBN</b>	[-]	Kubický nitrid bóru
<b>CBN-U</b>	[-]	Ultra-krystalický kubický nitrid bóru
<b>CNC</b>	[-]	Číslicové řízení pomocí počítače (computer numerical control)
<b>CVD</b>	[-]	Chemical Vapor Deposition
<b>EPD</b>	[-]	Elektroforetická depozice
<b>ISO</b>	[-]	Mezinárodní organizace pro normalizaci
<b>IT</b>	[-]	Stupeň přesnosti
<b>MD</b>	[-]	Molekulární dynamika
<b>MKP</b>	[-]	Metoda konečných prvků
<b>NC</b>	[-]	Číslicově řízený (numerice control)
<b>NMO</b>	[-]	Nekonvenční metody obrábění
<b>PCD</b>	[-]	Polykrystalický diamant
<b>PVD</b>	[-]	Physical Vapor Deposition
<b>TCO</b>	[-]	Total cost of ownership
<b>ÚST</b>	[-]	Ústav strojírenské technologie
<b>VBD</b>	[-]	Vyměnitelná břitová destička
<b>WG</b>	[-]	Wiper Geometry

Symbol	Jednotka	Popis
<b>A</b>	[%]	Tažnost
<b>A<sub>D</sub></b>	[mm <sup>2</sup> ]	Jmenovitý průřez třísky
<b>D</b>	[mm]	Průměr obrobku
<b>D<sub>max</sub></b>	[mm]	Vnější průměr
<b>D<sub>min</sub></b>	[mm]	Vnitřní průměr
<b>D<sub>v</sub></b>	[Kč]	Náklady na hodinu vedlejší práce
<b>F</b>	[N]	Celková síla
<b>F<sub>c</sub></b>	[N]	Řezná síla
<b>F<sub>f</sub></b>	[N]	Posuvová síla

<b>F<sub>p</sub></b>	[N]	Pasivní síla
<b>H</b>	[mm]	Amplituda zdvihu nástroje
<b>HB</b>	[HB]	Tvrдость dle Brinella
<b>N<sub>1</sub></b>	[Kč]	Cena VBD
<b>N<sub>2</sub></b>	[Kč]	Cena držáku
<b>N<sub>3</sub></b>	[Kč]	Náklady na upnutí, případně seřízení VBD
<b>N<sub>c</sub></b>	[Kč]	Celkové operační výrobní náklady
<b>N<sub>n</sub></b>	[Kč]	Náklady na nástroj a jeho výměnu
<b>N<sub>s</sub></b>	[Kč]	Náklady na strojní práci
<b>N<sub>sn</sub></b>	[Kč]	Náklady na hodinu strojní práce
<b>N<sub>T</sub></b>	[Kč]	Náklady na nástroj
<b>N<sub>v</sub></b>	[Kč]	Náklady na vedlejší práci
<b>Q'<sub>w</sub></b>	[mm <sup>3</sup> /mm.s]	Specifický materiálový úběr
<b>Q<sub>T</sub></b>	[-]	Počet obrobekých kusů během trvanlivosti břítu
<b>R</b>	[nm]	Rádus břítu nástroje
<b>R<sub>a</sub></b>	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu
<b>R<sub>a<sub>t</sub></sub></b>	[μm]	Teoretická hodnota průměrné aritmetické úchylky profilu
<b>R<sub>m</sub></b>	[MPa]	Mez pevnosti
<b>R<sub>p</sub></b>	[MPa]	Mez kluzu
<b>R<sub>z</sub></b>	[μm]	Největší výška profilu
<b>R<sub>z<sub>t</sub></sub></b>	[μm]	Teoretická hodnota největší výšky profilu
<b>T</b>	[min]	Trvanlivost
<b>a</b>	[nm]	Nedeformovaná tloušťka třísky
<b>a<sub>p</sub></b>	[mm]	Šířka záběru ostří
<b>d<sub>g</sub></b>	[μm]	Velikost zrna
<b>d<sub>s</sub></b>	[mm]	Průměr brousícího kotouče
<b>d<sub>w</sub></b>	[mm]	Průměr obrobku
<b>f</b>	[mm]	Posuv na otáčku
<b>k<sub>c</sub></b>	[MPa]	Měrná řezná síla

$l_n$	[mm]	Délka náběhu
$l_p$	[mm]	Délka přeběhu
$n_B$	[-]	Počet břitů
$n_s$	[min <sup>-1</sup> ]	Frekvence otáčení brousícího kotouče
$n_w$	[min <sup>-1</sup> ]	Frekvence otáčení obrobku
$p_k$	[MPa]	Přítlak
$q$	[-]	Poměr rychlosti
$r_n$	[μm]	Poloměr zaoblení ostří
$r_\varepsilon$	[μm]	Poloměr špičky
$t$	[min]	Doba lapování
$t_{AS}$	[min]	Strojní čas
$v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	Řezná rychlost
$v_f$	[m.min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvového pohybu
$v_{ft}$	[m.min <sup>-1</sup> ]	Tangenciální rychlost posuvu stolu brusky
$v_l$	[m.min <sup>-1</sup> ]	Rychlost pracovního pohybu
$v_w$	[m.min <sup>-1</sup> ]	Obvodová rychlost
$z$	[min]	Životnost držáku
$\alpha_A$	[°]	Úhel
$2\alpha$	[°]	Úhel křížení drah
$\lambda \cdot t_{AS}$	[min]	Čistý čas řezání
$\omega_k$	[min <sup>-1</sup> ]	Frekvence