

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301R016 Strojírenská technologie – technologie  
obrábění

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Úprava a měření mikrogeometrie břitu nástroje

Autor: **Josef MALÝ**

Vedoucí práce: **Ing. Ivana ČESÁKOVÁ**

Akademický rok 2011/2012

## **Zadání bakalářské práce**

### **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

### **Autorská práva**

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákon o vysokých školách č. 111/1998 Sb. Je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Malý	Jméno Josef	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Strojírenská technologie - technologie obrábění		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Česáková	Jméno Ivana	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST – KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLŮMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Úprava a měření mikrogeometrie břitu nástroje		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	58	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	58	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	<p>Bakalářská práce na téma „Úprava a měření mikrogeometrie břitu nástroje“ se nejprve zabývá pojmem mikrogeometrie břitu a jejím vlivem na řezný proces. Poté popisuje technologie úpravy břitu a porovnává je mezi sebou. Další důležitý bod je schopnost vyhodnotit parametry mikrogeometrie břitu (zaoblení a drsnost břitu) pomocí dotykových a bezdotykových metod měření a jejich vzájemné porovnání. V závěru je obsažen technicko-ekonomický přínos úpravy mikrogeometrie břitu a celkové zhodnocení mikrogeometrie břitu ve spojitosti s životním cyklem řezného nástroje.</p>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	<p>Mikrogeometrie břitu, řezný nástroj, úprava a měření břitu, zaoblení a drsnost řezné hrany, dotykové a bezdotykové metody měření.</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Malý	<b>Name</b> Josef	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Manufacturing Processes - Technology of Metal Cutting		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Česáková	<b>Name</b> Ivana	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST – KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Preparation and Measurement of the Cutting Edge Microgeometry		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2012
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	58	<b>TEXT PART</b>	58	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	My bachelor thesis deals with Preparation and Measurement of the Cutting Edge Microgeometry. At first, that describes a concept of the cutting edge microgeometry and its influence on the cutting process. Next technologies of the cutting edge preparation are concerned with as well as their comparison. Another point is an ability to evaluate the cutting edge microgeometry parameters (radius and roughness of the cutting edge) using contact and contactless methods along with their comparison. The conclusion contains benefits of the cutting edge microgeometry preparation and overall evaluation of the cutting edge microgeometry in connection with the life cycle of the cutting tool.
<b>KEY WORDS</b>	Microgeometry of the cutting edge, cutting tool, preparation and measurement of the cutting edge, radius and roughness of the cutting edge, contact and contactless methods of measurement

## OBSAH

<b>PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>1 ÚVOD [10, 22] .....</b>	<b>9</b>
1.1 Cíle bakalářské práce .....	9
<b>2 ZPŮSOBY ÚPRAVY MIKROGEOMETRIE ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ .....</b>	<b>10</b>
2.1 Zhodnocení současného stavu [22] .....	10
2.1.1 Geometrie nástroje obecně [29, 12, 36] .....	10
2.1.2 Vliv mikrogeometrie na řezný proces [7, 8, 28, 35] .....	11
2.2 Mikro - otryskávání proudem abraziva [3, 23, 34] .....	14
2.3 Omílání v granulátech [5, 12, 28, 34] .....	17
2.4 Kombinace kartáčování - leštění [3, 28] .....	19
2.5 Kartáčování s nylonovými brusnými vlákny [3, 28] .....	21
2.6 Magnetické dokončování [12, 19, 20] .....	23
2.7 Obrábění laserovým paprskem [15, 17, 27, 31] .....	25
2.8 Porovnání technologií úprav řezné hrany nástroje [5] .....	28
<b>3 MĚŘENÍ MIKROGEOMETRIE BŘITU [14, 37] .....</b>	<b>30</b>
3.1 Vývoj měřicí techniky [30, 37] .....	30
3.2 Hodnocení kvalitativních parametrů nástroje [29, 30, 36] .....	32
<b>4 DOTYKOVÉ MĚŘÍCÍ METODY [14] .....</b>	<b>34</b>
4.1 Mahr - Marsurf LD 120 [14, 21] .....	34
4.2 Zeiss – Surfcom 5000 [33] .....	36
4.3 Jenoptik - Hommel–Etamic T8000 RC [1, 9, 13] .....	38
4.4 Taylor Hobson - Form Talysurf Series 2 [4, 5, 30] .....	39
<b>5 BEZDOTYKOVÉ MĚŘÍCÍ METODY [14] .....</b>	<b>41</b>
5.1 Alicona – IF Edge Master [11, 26, 36] .....	41
5.2 GFM – MikroCAD <sup>premium</sup> [6, 24, 25, 26] .....	42
5.3 Walter – Helicheck Plus [7, 8, 32] .....	44
5.4 Olympus – Lext OLS4000 [16, 18, 36] .....	46

<b>6</b>	<b>POROVNÁNÍ MĚŘENÍ DOTYKOVOU A BEZDOTYKOVOU METODOU.....</b>	<b>48</b>
6.1	Srovnání dotykových metod měření.....	48
6.2	Srovnání bezdotykových metod měření.....	49
6.3	Porovnání dotykových a bezdotykových metod měření .....	51
6.3.1	Měření mikro drsnosti a ploch [18] .....	51
6.3.2	Měření měkkých a adhezních ploch [18].....	51
6.3.3	Profilová drsnost vs plošná drsnost .....	52
6.3.4	Porovnání naměřených hodnot obou variant [34].....	52
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>54</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>56</b>

## PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid hlinitý = korund (druh brusiva)
ASME	Americké sdružení inženýrů pro normalizaci
CBN	kubický nitrid boru (druh brusiva)
CNC	číslicově řízené počítačem
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
JIS	Japonská organizace pro normalizaci
LED	dioda emitující světlo
Nd	neodym
PCD	polykrystalický diamant (druh brusiva)
PVD	fyzikální metoda nanášení tenké vrstvy
RO	rychlořezná ocel
SiC	karbid křemíku (druh brusiva)
SK	slinutý karbid
S-N-O	soustava <b>S</b> roj – <b>N</b> ástroj - <b>O</b> brobek
UV	ultrafialové záření
VBD	vyměnitelná <b>b</b> řitová <b>d</b> estička
YAG	Yttrium Aluminium Granátu (Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )
μm	mikrometr = 10 <sup>-6</sup> m (jednotka délky)
nm	nanometr = 10 <sup>-9</sup> m (jednotka délky)
mm	milimetr = 10 <sup>-3</sup> m (jednotka délky)
mm/s	milimetrů za vteřinu (jednotka rychlosti)
mN	miliNewton = 0,001 N (jednotka síly)



# 1 ÚVOD [10, 22]

Ve strojírenském průmyslu, strojírenské technologii, a proto i v oblasti technologie obrábění, dochází k neustálému zvyšování produktivity s cíleným snižováním celkových výrobních nákladů s ohledem na životní prostředí. Obrábění je již dlouhou dobu celosvětově důležitá technologie, která zahrnuje několik vědních odvětví, uspokojuje i nejvyšší nároky na přesnost a jakost výrobků a zahrnuje finální procesy, kterými dostávají součástky svůj konečný požadovaný tvar, vzájemnou polohu ploch, přesnost a jakost povrchu. Technologie obrábění se neustále zdokonaluje, vyvíjí se konstrukční materiály, řezné nástroje i nové, hospodárnější a méně složité technologie.

Význam řezných nástrojů v našem hospodářství i jinde ve světě je všeobecně uznáván, protože má širokou škálu uplatnění. Všeobecně je známo, že objem výroby nástrojů je větší než objem výroby obráběcích strojů, což znamená, že každé zdokonalení řezného nástroje má také značný vliv na ekonomiku výroby i hospodaření podniku. Vývoj dokonalejších řezných nástrojů je souběžný a neoddelitelný od vývoje řezných materiálů a zároveň s tím i obráběcích strojů, které ale v některých případech umožňují obrábět s vysokými řeznými rychlostmi, pro které však ještě nejsou vhodné obráběcí nástroje. V těchto vývojových oblastech je stále ještě co zdokonalovat a to v celé soustavě stroj – nástroj – obrobek – přípravek.

Tato bakalářská práce bude zaměřena především na řezný nástroj a to konkrétně na úpravu a měření mikromeetrie břitů. V dnešní době je velká pozornost soustředěna právě na mikromeetrii nástroje, která ovlivňuje nejen řezný proces, ale i kvalitu přilnutí tenké vrstvy na nástroj. Technologie ovlivnění mikromeetrie břitů je většinou vlastním know-how výrobců řezných nástrojů a jsou zřídka kdy zveřejňovány. Je však dokázáno, že ovlivnění mikromeetrie břitů nástrojů má zásadní vliv jak na životnost nástroje, tak i na způsob otěru a řezné síly vznikající při obrábění. Je patrné, že výběr vhodné technologie úpravy břitů nástrojů souvisí jak s objemem nástrojů, tak i s jejich rozmanitostí. Konkrétní výběr také velmi ovlivňuje i konečná cena zaváděné technologie. Každý výrobce si musí sám zvážit všechny výhody a nevýhody dostupných technologií úprav a po zvážení všech hledisek se rozhodnout pro tu neoptimálnější technologii.

## 1.1 Cíle bakalářské práce

- Zjištění základních informací o mikromeetrii břitů a jaký má její úprava vliv na řezný proces, jelikož použití úprav mikromeetrie břitů se v dnešní době neustále rozšiřuje a je stále častější.
- Zjištění doposud používaných metod úprav mikromeetrie břitů a jejich srovnání.
- Zjištění možnosti měření mikromeetrie břitů a jejich porovnání.
- Zjištění konkurenceschopnosti použití úpravy mikromeetrie v praxi. Důležitou otázkou každé firmy zabývající se obráběním je, zda se jí investice vložené do úprav a měření mikromeetrie nástroje vrátí v podobě zvýšení trvanlivosti břitů, a tím pádem snížení nákladů na přeostření břitů nástroje a zda bude cenově konkurenceschopná v nabízení svých služeb.

## 2 ZPŮSOBY ÚPRAVY MIKROGEOMETRIE ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

### 2.1 Zhodnocení současného stavu [22]

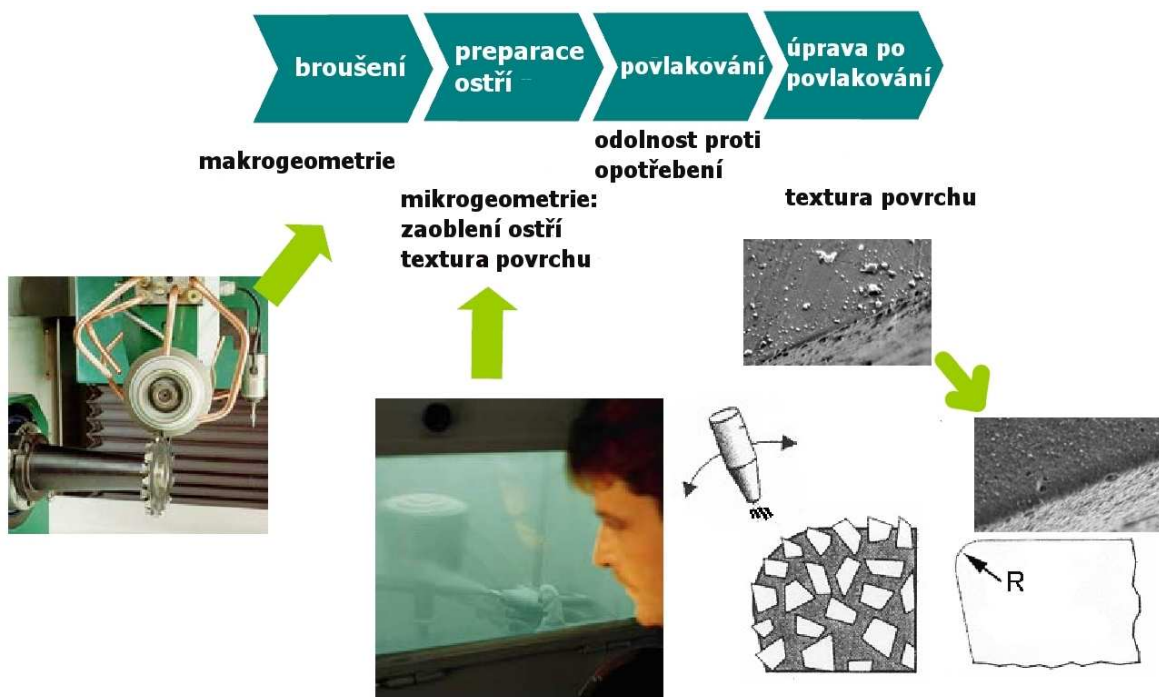
Mezi základní parametry řezného procesu, které je nutné brát v úvahu, patří vedle stavu stroje, obráběného materiálu, typu obrábění a řezných podmínek i vlastnosti řezného nástroje. Zejména při obrábění pomocí moderních počítačově řízených strojů CNC za vyšších řezných podmínek se zásadně projeví rozdíly mezi jednotlivými nástroji. V případě stejného řezného procesu a identických řezných podmínek je životnost nástrojů ovlivňována vlastnostmi materiálu nástroje, makro a mikrogeometrií a v neposlední řadě i typem a vlastnostmi povlaku.

#### 2.1.1 Geometrie nástroje obecně [29, 12, 36]

Geometrie nástroje je dělena z hlediska velikosti na makrogeometrii a mikrogeometrii. V případě makrogeometrie se jedná především o výchozí profil břitu nástroje vzniklý broušením, vycházející z technologické operace, pro kterou bude nástroj použit, o nástrojové úhly, které jsou definovány na základě obráběného materiálu, použitého řezného materiálu a řezného prostředí. Pod pojmem mikrogeometrie břitu nástroje si lze představit útvary, vyskytující se přímo na břitu, o velikosti v řádech mikrometrů. Jedná se především o zakřivenost povrchu břitu vlivem drsnosti po broušení a o defekty vzniklé po broušení. U dnešních materiálů, používaných na výrobu řezných nástrojů, nelze nikdy vybrousit dokonale ostrou hranu. Vzniklé nepřesnosti, které se dají měřit pouze pomocí speciálních přístrojů, a to buď dotykovými, nebo bezdotykovými metodami, mají velký vliv na řezivost nástroje.

Řezivost je souhrn vlastností nástrojového materiálu, které ovlivňují jeho vhodnost k obrábění. Mezi tyto vlastnosti patří tvrdost, odolnost proti opotřebení při vysokých teplotách, vyhovující ohybová a tlaková pevnost a vyhovující tepelná vodivost. Dále podmínky, v nichž se nachází břit nástroje při obrábění, určují požadavky na mechanické, fyzikální i chemické vlastnosti řezných materiálů. Vzhledem k těmto podmínkám je třeba volit vždy nástrojový materiál přiměřených řezných vlastností.

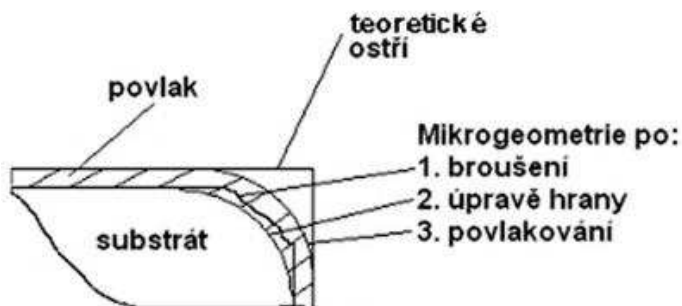
Při určování geometrie břitu řezných nástrojů je nutno vycházet z předpokladu, že jak u nástrojů jednobřitých, tak i vícebřitých je vlastní břit nejdůležitější částí řezného nástroje. Je v přímém styku s obrobkem, vytváří třísku a ovlivňuje v plném rozsahu nejen kvalitu, ale i kvantitu celé výroby. Příklad procesu výroby řezného nástroje je ukázán na obr. 2-1. Ne vždy je věnována volbě a úpravě břitu potřebná péče, kterou si s ohledem na výše uvedená kritéria zaslouží. Nejdůležitější prací konstruktéra řezných nástrojů je právě volba geometrie břitu.



*Obr. 2-1 Příklad výrobního procesu řezného nástroje [2]*

### 2.1.2 Vliv mikrogeometrie na řezný proces [7, 8, 28, 35]

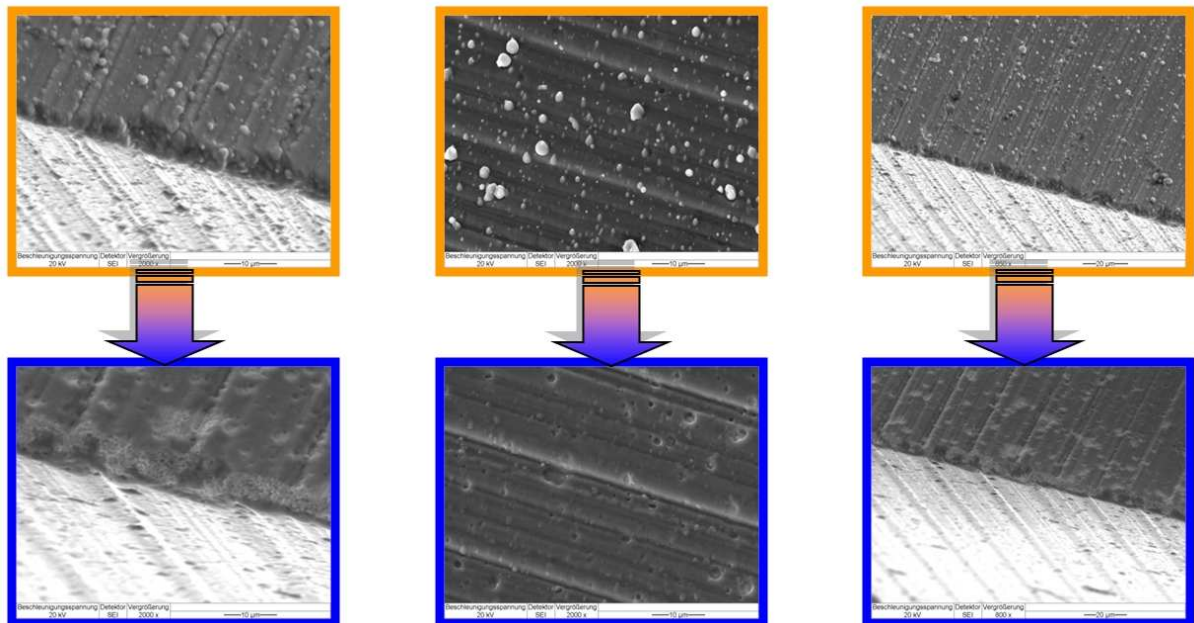
Řezivost nástroje je ovlivněna mnoha faktory. Především řezný materiál, povlak a řezná geometrie mají zásluhu na výsledných funkčních vlastnostech nástroje. Na všechny tři prvky je nutné nahlížet ve vzájemném kontextu a nelze je od sebe oddělit. Tvar břitu je volen podle typu a použití řezného nástroje. Se stále rostoucími požadavky na homogenitu a opakovatelnost výroby břitu je zřejmý trend používání malého zaoblení či fazetky na ostří. Na obr 2-2 jsou zobrazeny základní tvary ostří vzniklé po broušení, úpravě řezné hrany a povlakování.



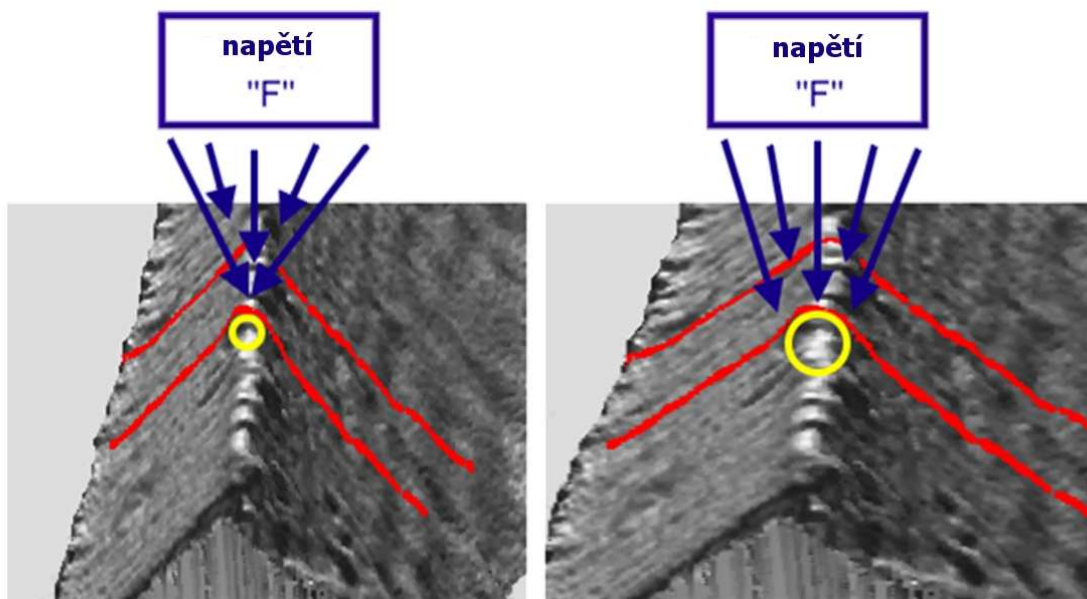
*Obr. 2-2 Schéma břitu nástroje [33]*

Z výše uvedených požadavků plyne zřejmá potřeba přidat operaci na preparaci řezné hrany. Tvorba břitu nástroje je navíc výsledkem několika na sebe navazujících kroků při výrobě nástroje. Například se jedná o broušení a depozici tenké vrstvy, při které je třeba dát do kontextu, že nanesením vrstvy povlaku, obzvláště větších tloušťek, se změní poloměr zaoblení ostří. Dále na povrchu povlaku mohou vznikat mikronečistoty, které mají negativní vliv na výslednou kvalitu povlaku. Větší drsnost povrchu, způsobená vyloučenými nečistotami, zvyšuje řezné síly, a to přispívá ke zvýšenému tepelnému a mechanickému namáhání řezných hran nástrojů. Částice působí jako kameny v korytu řeky a zpomalují odvod třísek, což je v případě vrtání velice nepříznivé. Avšak odchází-li tříska plynule a s

malým třením, dochází k sníženému přenosu tepla do nástroje, protože čas kontaktu mezi třískou a nástrojem klesá. Tento negativní jev se snaží většina výrobců minimalizovat úpravou samotné metody deposice tenké vrstvy nebo úpravou povrchu nástrojů po deposici. Neočištěný a očištěný povrch po deposici tenké vrstvy je zobrazen na obr. 2-3.



Obr. 2-3 Povrchy s tenkou vrstvou před a po očištění mikronečistot [28]

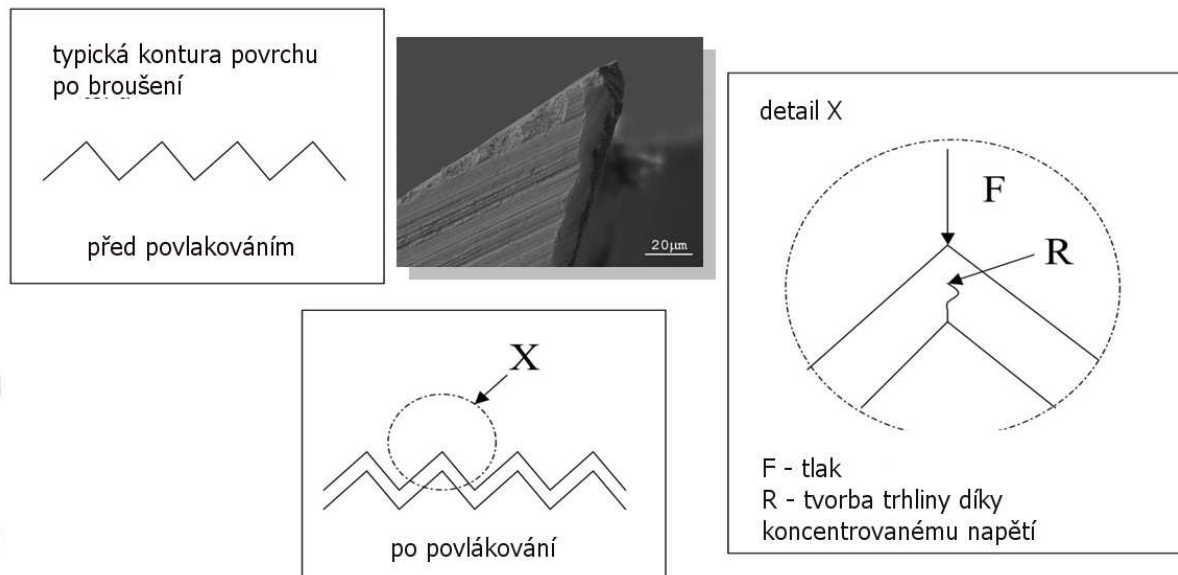


**větší zaoblení -> menší koncentrace napětí -> menší riziko vylamování ostří**

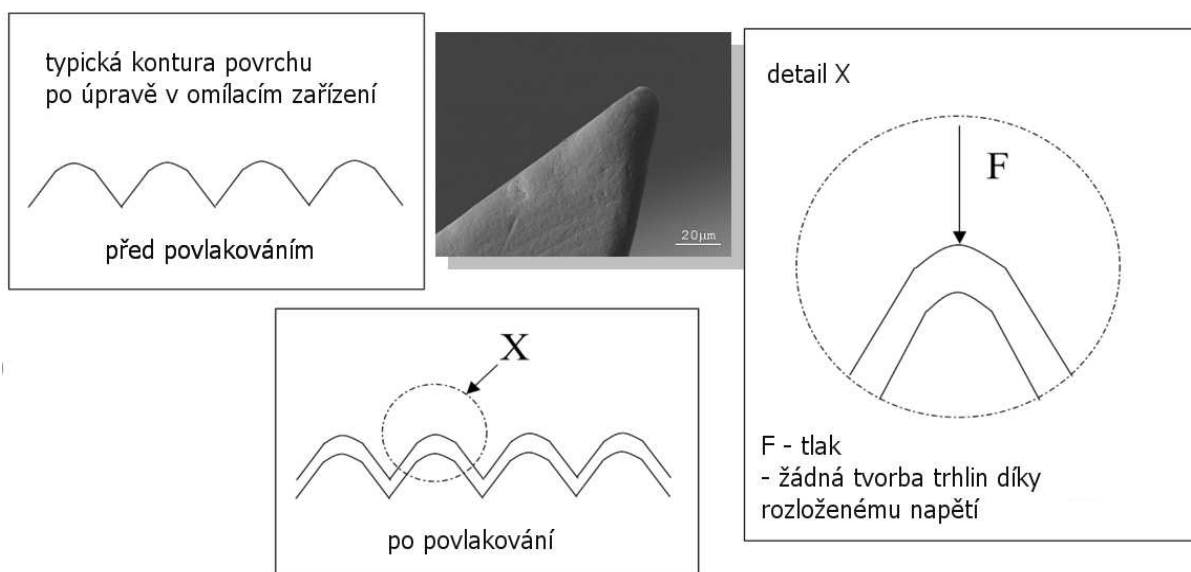
Obr. 2-4 Vliv rozložení napětí na řeznou hranu [28]

Do jisté míry je mikrogeometrie nástroje ovlivněna použitým řezným materiálem v tom smyslu, jak dobře jde tento materiál vybrousit k tzv. dokonalé ostrosti, tak i nanesenou otěru vzdornou vrstvou povlaku, který přesně opisuje povrch nástroje a přímo má vliv na výslednou drsnost povrchu. Při nanášení tenké vrstvy na tzv. dokonalě ostrou hranu může docházet k jejímu odlupování vlivem velkého napětí působícího do malé plochy. Podstatné je především

zamezit odlupování povlaku na ostří, kde jeho přítomnost je nejdůležitější. Porovnání ostří po broušení a po úpravě je ilustrováno na obr. 2-5 a 2-6. Problém ostrého břitu může nastat i na vlastním ostří nástroje z SK, kde vznikají velmi ostré hrany po broušení v důsledku vytrhání tvrdých karbidů z pojiva. Většina výrobců se proto snaží tomuto efektu zamezit a před vlastní depozicí se používají různé technologie preparace břitu.



**Obr. 2-5** Kontura povrchu bez úpravy řezné hrany [28]



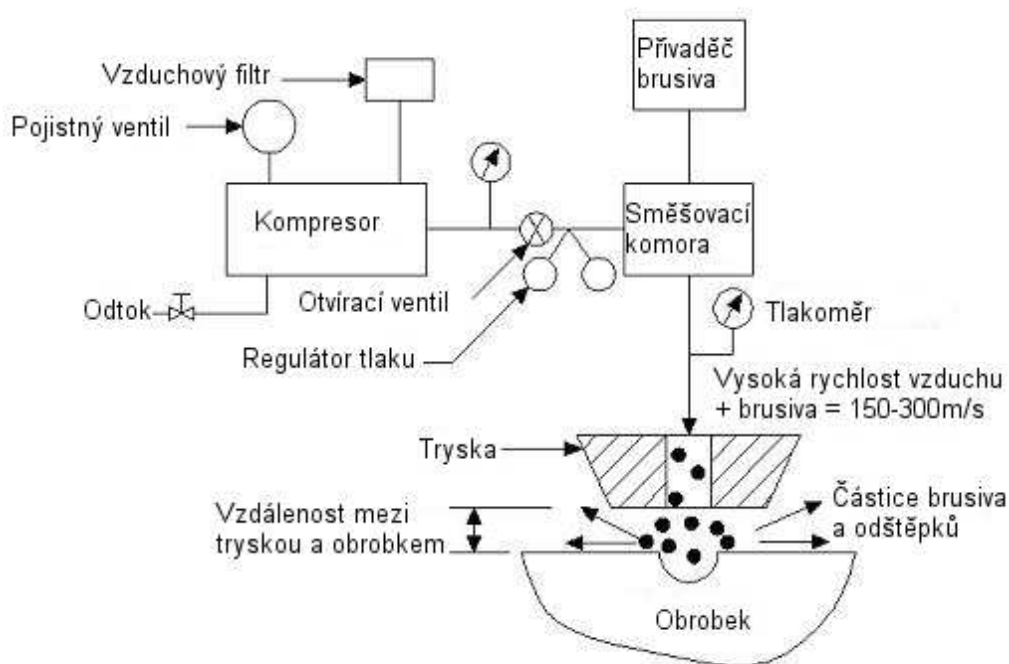
**Obr. 2-6** Kontura povrchu po úpravě řezné hrany [28]

Patří k nim především pískování, omílání, kartáčování, lapování, magnetické leštění nebo úprava laserovým paprskem. Zmíněné technologie způsobí odstranění vzniklých nepřesností, dojde k zaoblení řezné hrany a drsnost ploch v okolí funkčních ploch ostří se zmenší. To má vliv na řezivost nástroje, jeho tepelné a silové namáhání, tvorbu třísky a kvalitu a přesnost obrobeneho povrchu. Jeden z testů dokázal pozitivní vliv úprav povrchu na snížení osové síly a krouticího momentu hlavně u monolitních nástrojů ze slinutého karbidu, který byl opatřen otěru vzdorným povlakem. Podstatou většiny mechanických metod je působení abrazivních částic, jejichž účinek na obrobek je zprostředkován vhodným médiem (vzduch, pasta, pojivo,

vlákno, magnet). Rychlostí a dobou pohybu abraziva nebo obrobku se vytvoří požadované zaoblení hran. Vlastní zaoblení řezné hrany je závislé na použité metodě a jeho velikost a tvar závisí na použitém médiu. Z hlediska řezného procesu je ale velmi důležité umět popsat a změřit zaoblení a drsnost ostří, aby řezný proces mohl splňovat základní podmínky záběru.

## 2.2 Mikro - otryskávání proudem abraziva [3, 23, 34]

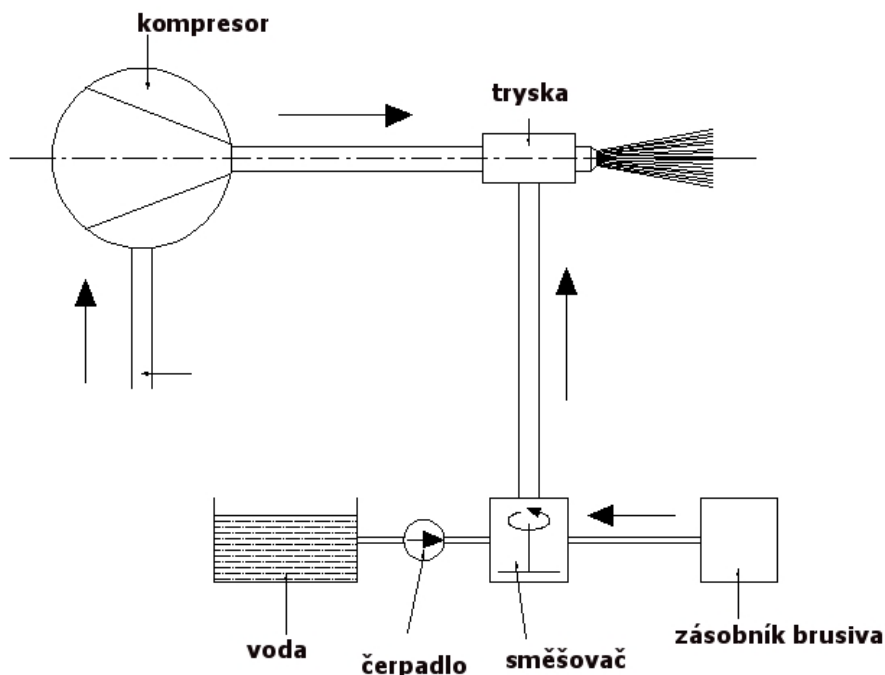
Resp. mikropískování je možná úprava řezné hrany, která spadá do okruhu mechanických úprav nástrojů. Mikro-otryskávání proudem abraziva (dále jen MOPA) odstraňuje materiál pomocí mechanického účinku soustředěného proudu brusiva nabraného plynem, který dopadá na nástroj. (vidět na obr. 2-7). Aplikovaný na preparaci řezné hrany, proud brusiva je vytvořen, když brusné částice o průměru 10 až 50 mikrometrů jsou strhovány netečným plynem a poháněny přes malou trysku (průměru 0,4 až 1,2 mm) při tlacích 6 barů a vyšších. Výsledný proud brusných částic putuje rychlostí přibližně 150 až 300 m/s na obrobek. Odstraněný materiál se vytváří jako výsledek vylamování třísky. Dopad jednotlivých pevných částic je základním výsledkem v odstranění materiálu proudem brusiva. Nejběžněji užívaná brusiva jsou korund ( $Al_2O_3$ ) a karbid křemíku (SiC). Trysky jsou vyrobeny z karbidu wolframu či safíru. Významnější procesní proměnné ovlivňující MOPA v rychlosti odstraňování jsou typ a velikost brusiva, vzdálenost mezi tryskou a obrobkem, tlak plynu a rychlost toku brusiva.



**Obr. 2-7** Typický systém pro mikro-otryskávání proudem abraziva [3]

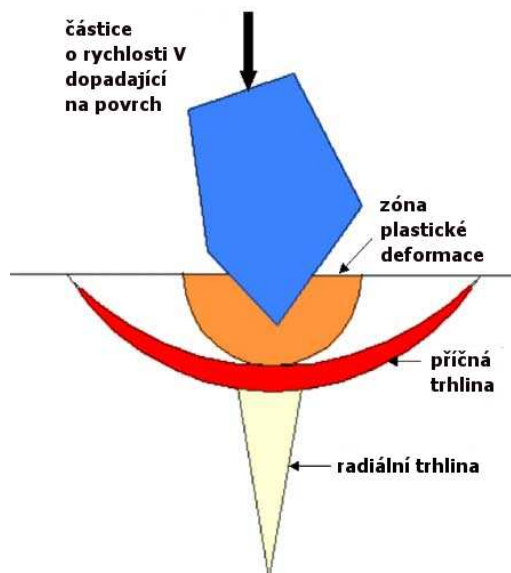
Jiná varianta MOPA v závislosti na dopravní tekutině je nazývána mikro-abrazivní otryskávání vodním paprskem (dále jen MAOVP) nebo dohlazování proudem vody. V důsledku zahrnuje vlastně vodu jako dopravní tekutinu pro brusné částice s poměrem objemů (objem tekutiny: objem brusiva) od 7:1 do 10:1, a to jsou možné technologické varianty. Na obr. 2-8 jsou ukázány hlavní části MAOVP. Materiál je odstraňován díky účinku eroze způsobené dopadem proudu abraziva o vysoké rychlosti na povrch obrobku.





**Obr. 2-8** Typický systém pro mikro-abrazivní otryskávání vodním paprskem [3]

Odlíšné mechanismy odstranění materiálu jsou navrženy pro houževnaté a křehké materiály. V případě houževnatých materiálů je materiál odstraněn plastickou deformací a pracovním opotřebením nebo plastickým namáháním a deformačním opotřebením. V případě křehkých materiálů se to může konat kvůli rozrušení povrchu, pružné plastické deformaci, kritickému plastickému namáhání, radiálnímu tvoření trhlin a šíření energie povrchem. Díky tomu jsou navrhovány rozdílné analytické modely, aby určily odstraňování materiálu pro MOPA.

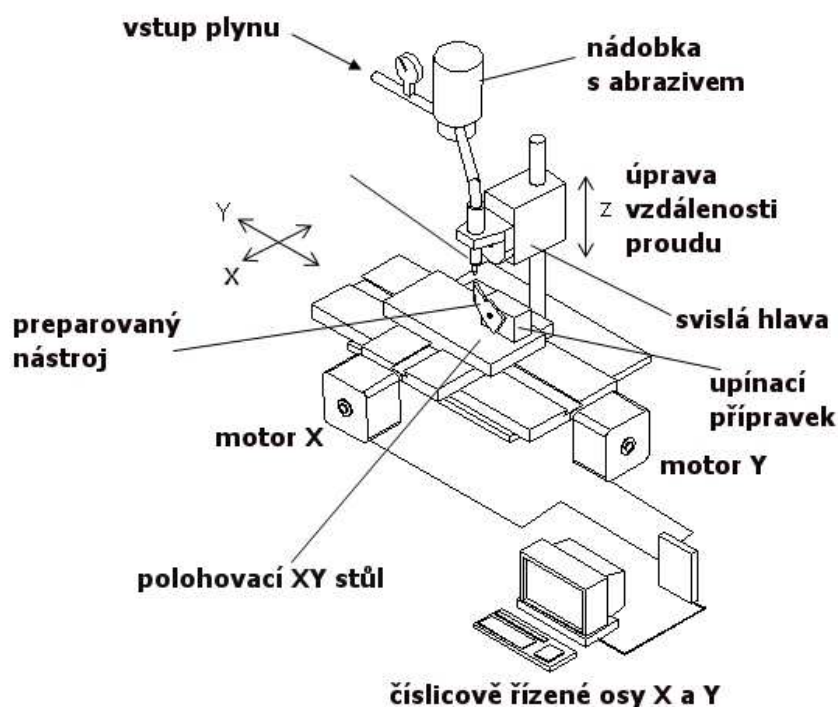


**Obr. 2-9** Šíření trhliny při procesu MOPA [23]

Technologie MOPA musí vždy respektovat charakter nástroje, jeho funkční břity a plochy. Proto i volba parametrů MOPA a řešení automatizace procesu jsou záležitostí do značné míry empirickou. Bez dlouhodobých seriózních experimentů nelze zabránit případným negativním vlivům, mezi které patří nevhodně zaoblená hrana, odstranění měkčích fází u

pájených nástrojů nebo zmatnění zrcadlových dekorativních či upínacích ploch. Tento proces je závislý zejména na zkušenosti obsluhy.

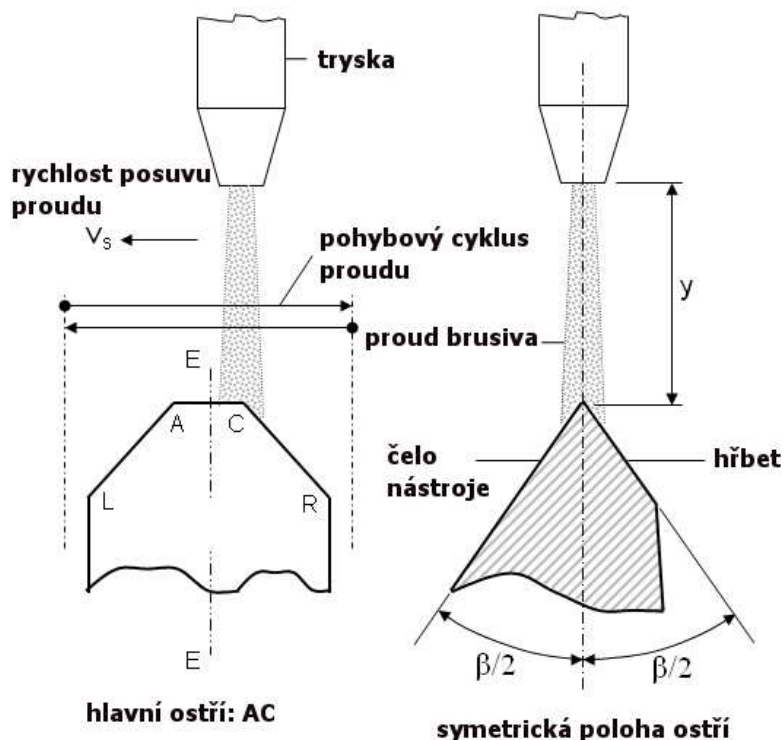
Uspořádání vybavení pro úpravu řezné hrany MOPA je zobrazené na obr. 2-10. Řezný nástroj, který má být upravený, je upevněn a umístěn přes pevnou součást přimontovanou k polohovacímu stolu. Pohyb stolu je řízen číslicově ve směrech X a Y. Tryska je upevněna a umístěna přes vertikální hlavu, která dovoluje úpravu vertikální vzdálenosti mezi tryskou a ostřím, které má být upravené. Dodatečně lze vertikální hlavou nastavit sklon osy trysky vzhledem k horizontální rovině XY. Brusivo je uloženo v nádobě, která má v spodní části ventil, který dovoluje dopravu brusiva zvýšeným tlakem vzduchu. Tok vzduchu je aktivován ventilem, aby mohl generovat proud brusiva, pouze když je to požadované během procesu. Dodatečně do ukazovaného systému je umístěno ochranné víko polohovacího stolu a kinematického systému a systém vývodu používaného brusiva.



**Obr. 2-10** Uspořádání vybavení pro MOPA [3]

Obr. 2-11 ukazuje vzájemné umístění mezi proudem abraziva a ostřím, které má být upravené. Schéma ilustruje souměrnou úpravu ostří k tomu, aby získalo souměrnou geometrii obrysu hrany, uvážíme-li, že osa trysky a osa souměrnosti úhlu bříty jsou shodné. Úprava vzdálenosti mezi tryskou a ostřím je také ukázána. Preparace ostří je vytvořená vzájemným pohybovým cyklem mezi proudem abraziva a ostřím a je dosahováno zaoblení bříty 5 až 20  $\mu\text{m}$ .

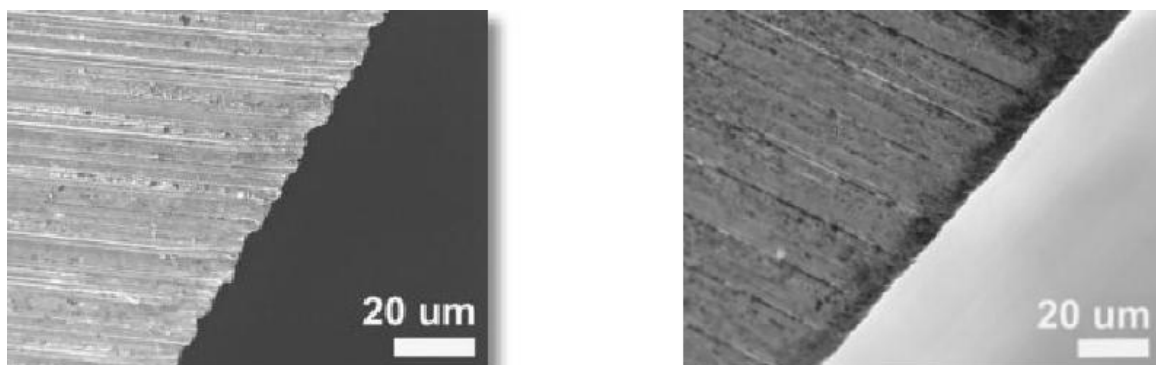




*Obr. 2-11* Vzájemné umístění mezi proudem brusiva a řezným nástrojem [3]

### 2.3 Omílání v granulátech [5, 12, 28, 34]

Jedná se o mikroúpravu břitů, která spadá do okruhu mechanických úprav nástrojů. Prakticky se jedná o standardní metodu používanou v strojírenství, která se nepoužívá pouze pro preparaci řezné hrany nástroje. Například z pohledu depozice má však mikroúprava břitů zásadní vliv na dobrou adhezi nanášených vrstev na ostří nástroje. Po vybroušení nástrojů ze slinitých karbidů jsou břity většinou nerovnoměrné a přibližně v měřítku použitých brusných zrn. V důsledku fluktuací v geometrii broušení, kvality substrátů nástrojů, kvality obsluhy CNC brusek a brusných kotoučů mohou nerovnoměrnosti na břitech působit vážné znehodnocení řezného výkonu nástroje. To platí i o nástrojích vyrobených renomovanými výrobci, protože broušením se dosáhne kvality řezné hrany jen do jisté míry.



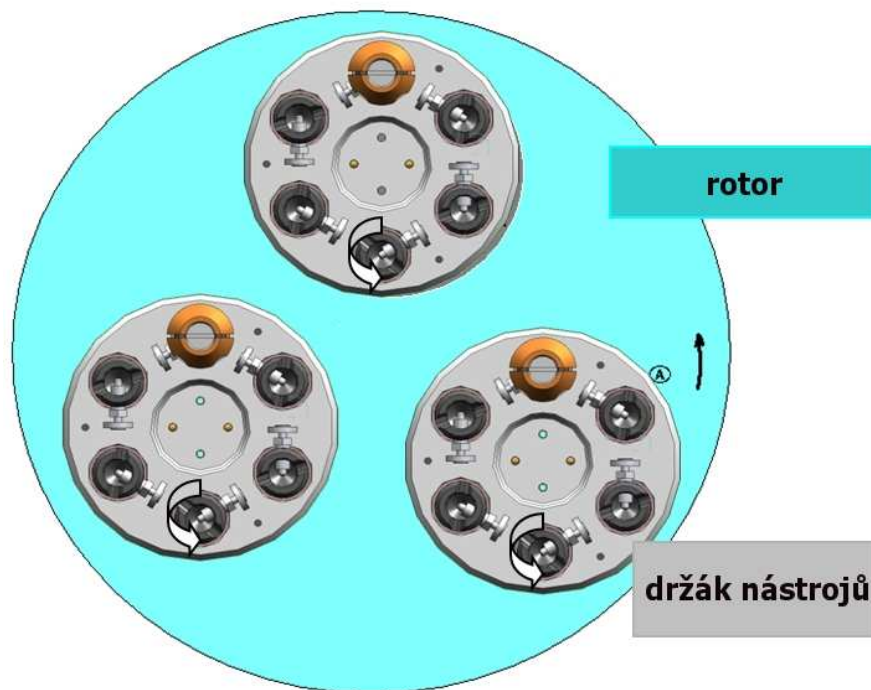
*Obr. 2-12* Řezná hrana před o po úpravě omílání [34]

V případě následné aplikace PVD povlaku může být situace zhoršena, protože se povlak na ostrých přerušovaných hranách může odlupovat. Tomu velmi účinně zabrání právě omílání v různě koncipovaných omílacích zařízeních s vhodně voleným typem a velikostí granulátu a

abraziva. Zařízení na omílání s planetovým pohybem jsou vhodná pro axiální typy nástrojů. Speciálně u stupňovitých vrtáků nástroj neztrácí rozměr během výkonu.



Obr. 2-13 Pohled do zařízení na omílání v granulátech [28]



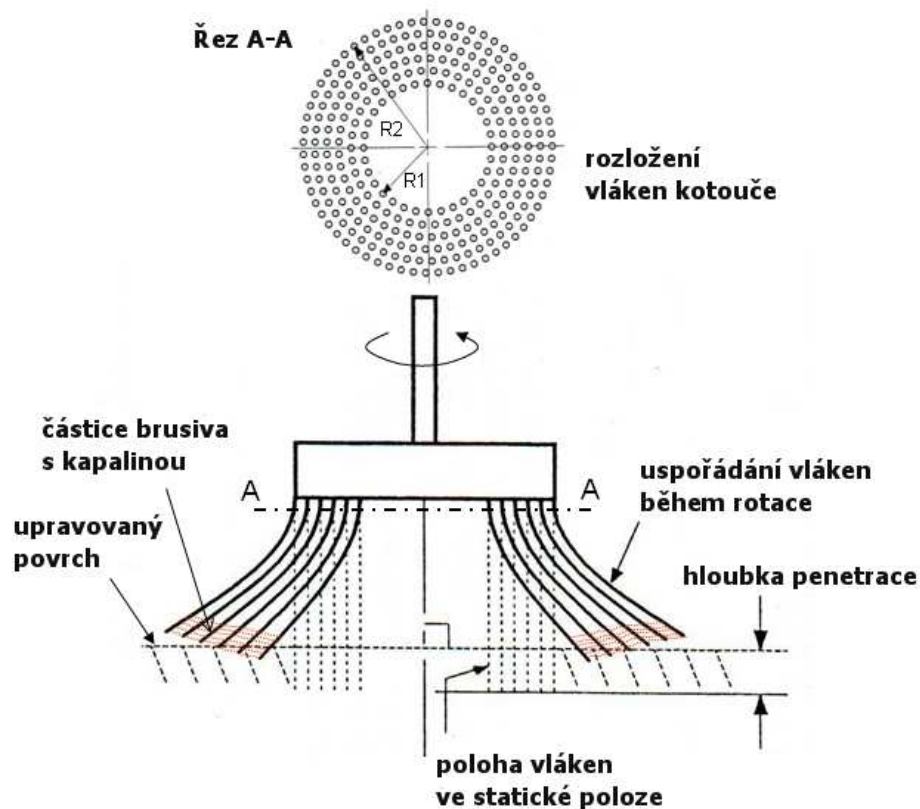
Obr. 2-14 Hlava rotoru umožňující planetový pohyb nástrojů při úpravě [28]

Metodu preparace řezné hrany je možné provádět i po aplikaci PVD vrstvy. Při této následné úpravě jsou odstraňovány makročástice z povlaku a snižuje se drsnost. Je však třeba pečlivě volit jak dobu úpravy, tak i typ abraziva. Výsledný efekt této mechanické úpravy se projeví jak v dobré adhezi PVD vrstvy na břitech nástroje, tak i ve výsledném řezném výkonu či snížením řezných sil a tím dosažení menších teplot při obrábění. Dále vylamování řezné hrany je redukováno a je získán hladší a homogenní břit se zaoblením menším než 150  $\mu\text{m}$ . Všechny uvedené aspekty mají pozitivní vliv na životnost nástroje, která může být zvýšena touto úpravou až o 1300%.

## 2.4 Kombinace kartáčování - leštění [3, 28]

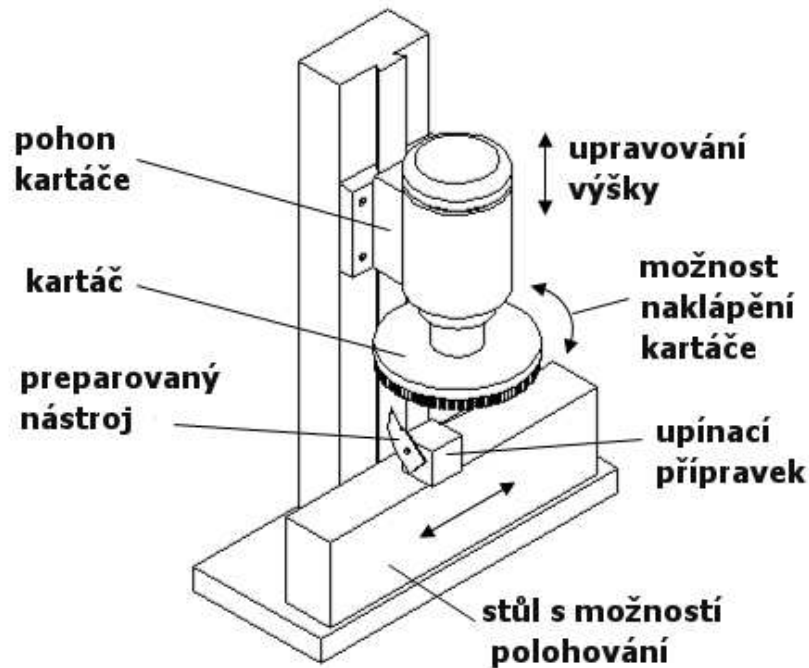
Jedná se o mechanickou úpravu řezné hrany. Proces úpravy využívá měkký kartáč s přírodními či polymerickými vlákny, které utvářejí leštící kotouč. Jako brusivo se používá diamantová pasta, která je složena z jílové kaše s částicemi diamantů, nebo brusná zrna v rozmezí velikostí 5 až 8 mikrometrů z pevné fáze. Preparace řezné hrany je vytvářena pomocí vzájemného pohybu mezi leštícím kotoučem, brusné pasty a řezné hrany.

Proces může být popsán jako čtyř komponentní systém a mechanismy spojené s kartáčováním-leštěním mohou být napoprvé pochopeny vzájemnými vztahy mezi těmito komponenty: obrobkem, řeznou kapalinou, brusnými zrny a leštícím kotoučem. Kotouč vyvolává vzájemný pohyb mezi brusnými zrny a obrobkem, působí na jílovou kaši a brusivo připravuje skrz kontakt. Procesová kombinace kartáčování-leštění může být považována jako zvláštní případ leštění, se zvláštností související s kotoučem na kartáčování. Obr. 2-15 ukazuje princip kartáčování-leštění na obráběný povrch. Drsnost povrchu se zvyšuje zvýšením velikosti zrn a tvrdosti leštícího kotouče a také styčný tlak má malý účinek na drsnost.



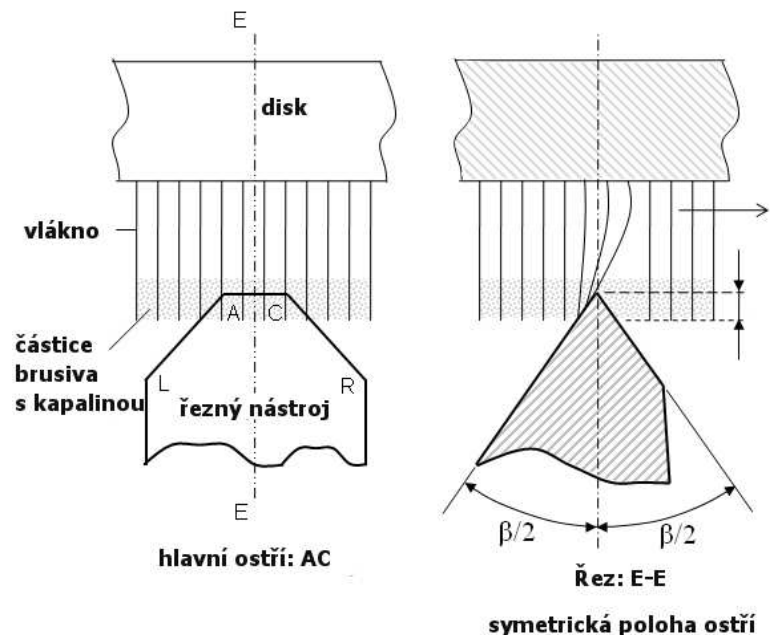
Obr. 2-15 Princip kartáčování-leštění [3]

Obr. 2-16 ilustruje uspořádání vybavení užívané pro úpravu ostří. Řezný nástroj, který má být upravený, je pevně upnutý ke stolu s alternativním pohybem. Hlava přimontovaná k hlavnímu sloupu dovoluje vertikální úpravu hloubky proniknutí mezi přírodními vlákny a ostřím, které má být upravené. K hlavě je přimontovaný hlavní motor a leštící kartáč v horizontální poloze. Rotační pohyb leštícího kartáče může být přizpůsobený v jednom směru či oboustranně.



Obr. 2-16 Uspořádání vybavení na kartáčování-leštění [3]

Obr. 2-17 ukazuje vzájemné umístění mezi leštícím kartáčem a ostřím, které má být upravené. Schéma ilustruje souměrnou úpravu ostří k tomu, aby získalo souměrnou geometrii obrysu hrany, je-li uvažován obousměrný oběh leštícího kotouče během procesového cyklu. Úprava hloubky proniknutí vláken je také ukázána. Vzájemný pohyb je kombinací obousměrného lineárního pohybu stolu a obousměrné rotace leštícího kotouče.



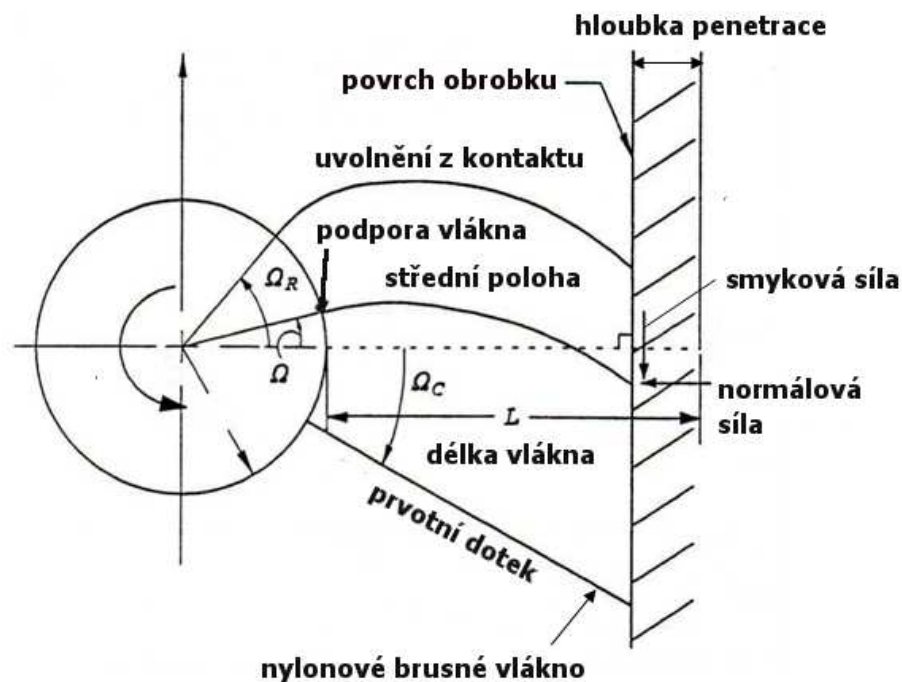
Obr. 2-17 Vzájemné umístění leštícího kotouče a řezného nástroje [3]

Celý mechanismus kartáčování může být zkatologizovaný pomocí vzájemných vlivů čtyř aspektů: druh obrobku, řezné kapaliny, brusných zrn a leštícího kotouče.

## 2.5 Kartáčování s nylonovými brusnými vlákny [3, 28]

Jedná se o mechanickou úpravu řezné hrany. Tento druh kartáčování může být dělán s dvěma hlavními druhy vláken a to s nylonovými brusnými vlákny (dále jen NBV) a vlákny z ocelového drátu. Preparace řezné hrany je vyvinutá přes vzájemný pohyb mezi NBV a ostřím a je dosahováno zaoblení ostří 30  $\mu\text{m}$  a menší. Kartáčování s NBV je používáno v aplikacích zaměřených na specifické požadavky ohledně zaoblení ostří a zlepšení kvality povrchu. Protože NBV jsou přírodní vlákna, nemají funkci jako brusné kotouče nebo produkty pokryté brusivem. Během procesu jsou stále odkrývána nová ostrá brusná zrna, jak se nylonová vlákna opotřebovávají o povrch obrobku. Toto poskytuje konzistentní otírající účinek během životnosti kartáče. NBV kartáče odstraní pouze malá množství materiálu alepší kvalitu povrchu.

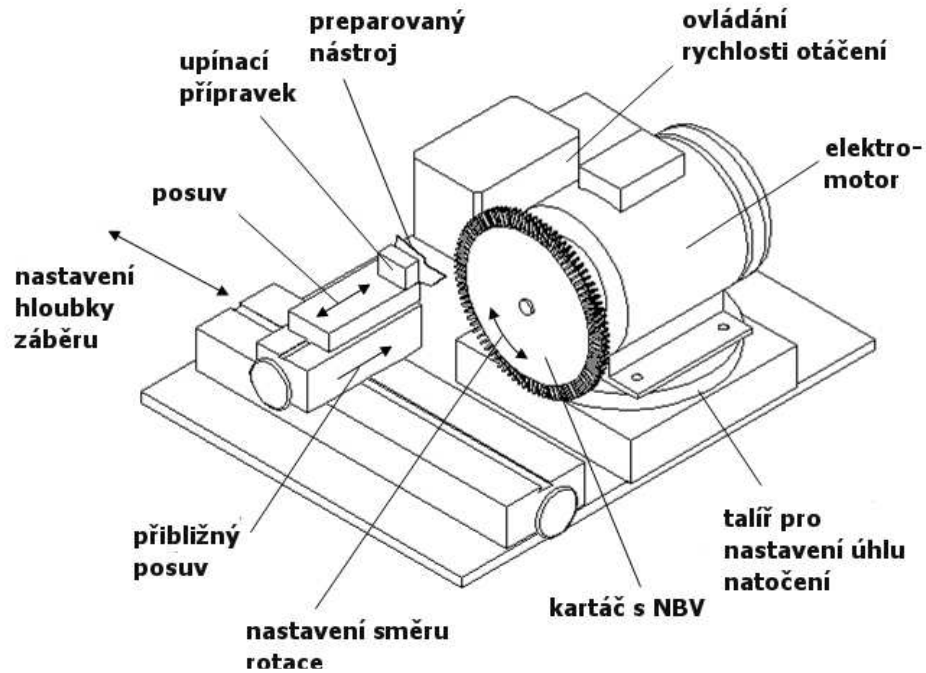
Pružnost vláken a způsob, kterými jsou brusná zrna držena v nylonu, určuje jejich odstranění z materiálu a povrchové dokončovací schopnosti. NBV kartáče mohou být použity jak manuálně tak i na strojích jako stojanové brusky, sloupové vrtačky, či automatizované CNC obráběcí centra, roboty a automatizovaná pracoviště. Brusná zrna obvykle používaná v nylonových vláknech jsou karbid křemíku (SiC) a oxid hliníku ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Jiné alternativy jsou kubický nitrid boru (CBN) a polykrystalický diamant (PCD). Tyto plnidla jsou určena k tomu, aby odstranila přebytečný materiál obroušením. Obr. 2-18 ukazuje princip kartáčování s NBV.



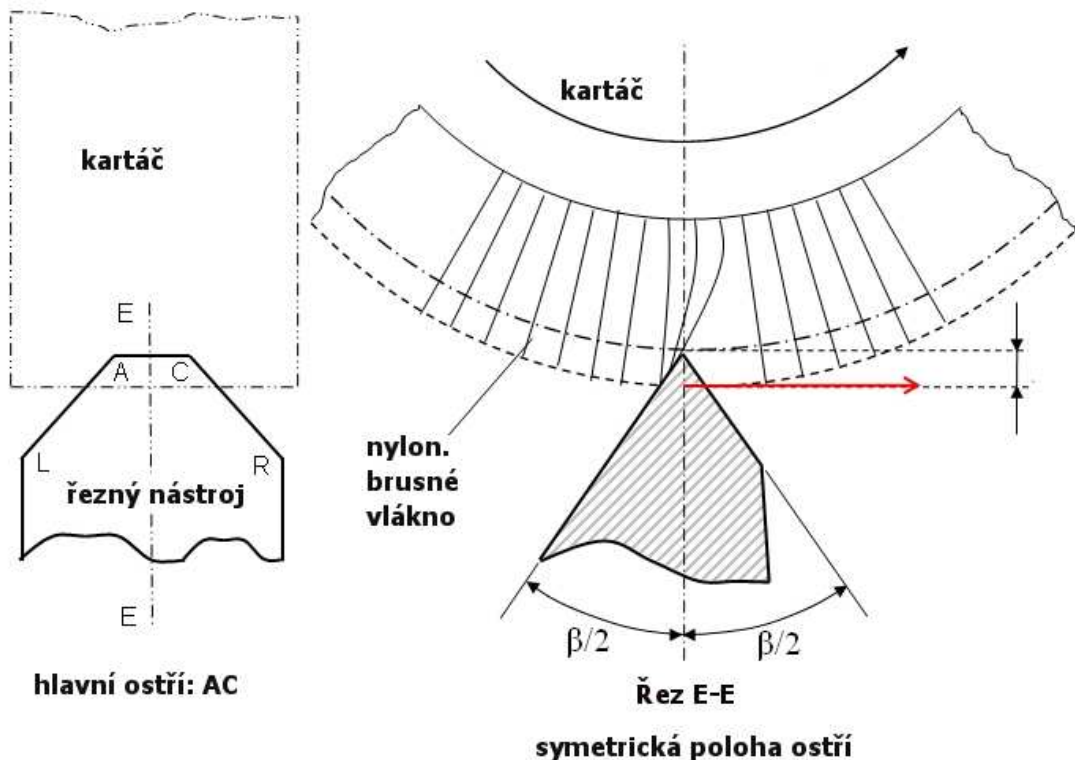
**Obr. 2-18** Princip kartáčování s NBV [3]

Uspořádání vybavení pro úpravu řezné hrany je ukázané na obr. 2-19. Řezný nástroj, který má být upravený, je přimontovaný k pevné části na stole, který má pohyb ve dvou ortogonálních vodorovných směrech. Jeden k nastavení hloubky proniknutí vláken a druhý k tomu, aby se řezný nástroj přiblížil ke kartáči před aplikací obousměrného posuvu stolu. Kartáč je přimontovaný s hřídelí v horizontální poloze připojené k elektromotoru s řízenou úhlovou rychlostí a s možností změny rotace během procesu.





Obr. 2-19 Uspořádání vybavení pro kartáčování s NBV [3]



Obr. 2-20 Vzájemné umístění kotouče s NBV a řezného nástroje [3]

Obr. 2-20 ukazuje vzájemné umístění mezi kartáčem a ostřím, které má být upravené. Schéma ilustruje souměrnou úpravu ostří určenou k tomu, aby získalo souměrnou geometrii obrysu hrany, je-li uvažován obousměrný oběh kartáče během procesového cyklu. Dále je ukázána úprava hloubky proniknutí vláken. Vzájemný pohyb je vytvořený obousměrným oběhem kartáče a přísunem obrobku.

Úprava mikrogeometrie nástroje pomocí technologie kartáčování s NBV je poměrně rozšířená. Při ní se rotací kartáčů s vhodným brusivem zabudovaným přímo v jednotlivých vláknech docílí dobré reprodukovatelnosti v poměrně krátkém čase. Vedle spousty výhod je zde ovšem velmi podstatná nevýhoda spočívající v nalepování materiálu vláken na břity nástrojů. Nylon je běžnými způsoby čištění obtížně odstranitelný. Z tohoto důvodu je vyloučeno používání tohoto kartáčování jako technologie upravující břity nástrojů před depozicí.

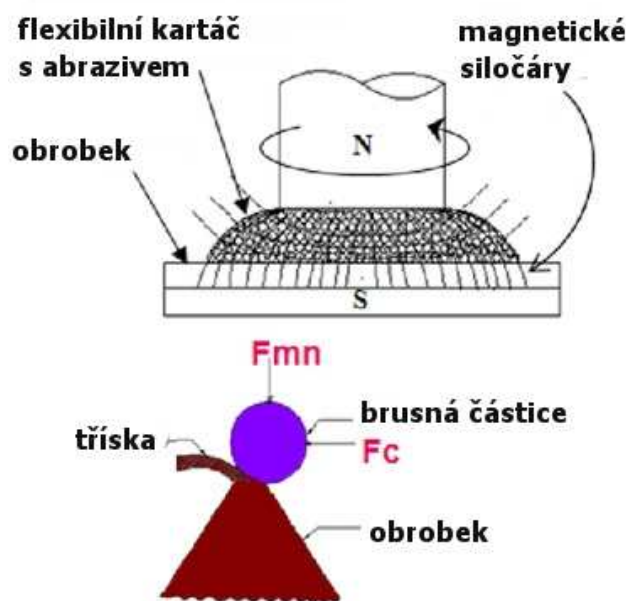


Obr. 2-21 Příklad kartáčování polotovarů VBD [2]

Tuto metodu lze použít i pro odstraňování mikronečistot a leštění. Tvar a velikost zaoblení břitu je ovlivňováno druhem kartáče, délkou a hustotou vláken, brusivem obsaženým ve vláknech, úhlem natočení kotouče vůči nástroji, rychlostí otáčení kartáče a délkou styku vláken s řezným nástrojem.

## 2.6 Magnetické dokončování [12, 19, 20]

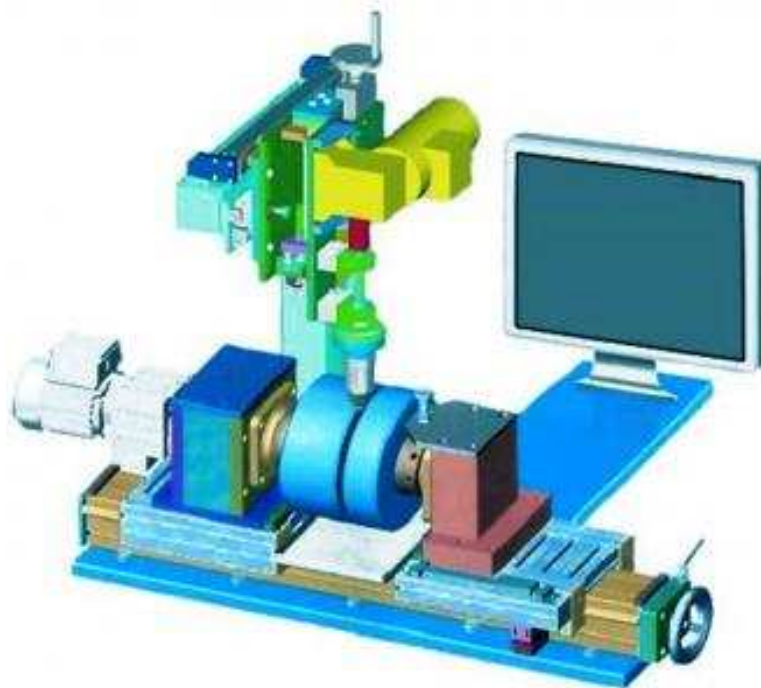
Tato metoda se řadí mezi mechanické úpravy řezné hrany. V tomto procesu síla působící na povrchu obrobku skrze brusná zrna je ovládána změnou intenzity magnetického toku a je schopný přesného dokončení obráběných kusů z těžko obrobitelných materiálů. Užívá se k zaoblení hrany (3-50  $\mu\text{m}$ ) jak u magnetických (RO), slabě magnetických (SK), tak i nemagnetických materiálů (hliník). V tomto procesu obvykle feromagnetické částičky jsou slinované s brusnými zrny z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC, CBN, či diamantu a takové částičky jsou nazývané feromagnetickými brusnými zrny nebo brusnými magnetickými zrny (dále jen FBZ).



Obr. 2-22 Příklad kartáčování polotovarů VBD [19]

Obr. 2-22 ukazuje schéma procesu magnetického dokončování v rovině, v kterém dokončování je řízeno aplikací magnetického pole přes obráběcí mezeru mezi obráběným povrchem a čelem rotující elektromagnetické tyče. Magnetické pole vystupuje jako spojovací prvek a udržuje feromagnetická brusná zrna v obráběcí mezeře. Normálová složka síly ( $F_{nm}$ ) magnetu díky magnetickému poli je zodpovědná za stykové tření brusiva s obráběným povrchem zatímco rotace feromagnetického brusného kartáče má za následek tangenciální sílu ( $F_t$ , nezobrazenou v obrázku). Součet síly  $F_t$  a tangenciální složky síly magnetu ( $F_{mt}$ ) vzniká výsledná síla ( $F_c$ ), která je zodpovědná za odstranění materiálu ve formě malých třísek z obrobku. FBZ se spojí magneticky navzájem díky dipólové interakci mezi magnetickými póly podél hranice magnetických sil a to vytvoří manipulovatelný magnetický brusný kartáč (dále jen MBK) obvykle 1–3 mm silný.

V případě neslinovaných magnetických a brusných zrn (rovnoměrně smíchaný prášek), brusná zrna se zapletou mezi sítě a v sítích uspořádané feromagnetické částičky. Magnetické dokončování užívá tento MBK pro dokončení povrchu a řezné hrany. MBK má mnohonásobné ostří a to se chová jako mnohobodový řezný nástroj odstraňující materiál z obráběného kusu ve formě malých třísek. Velikost obráběcí síly způsobené magnetickým polem je velmi nízká ale říditelná. Hodnota drsnosti v řádu nanometrů je dosažena na dokončovaném povrchu. Magnetické dokončování může být také užíváno pro operace jako leštění a odstranění tenkého oxidového filmu z vysokorychlostních hřídelů.

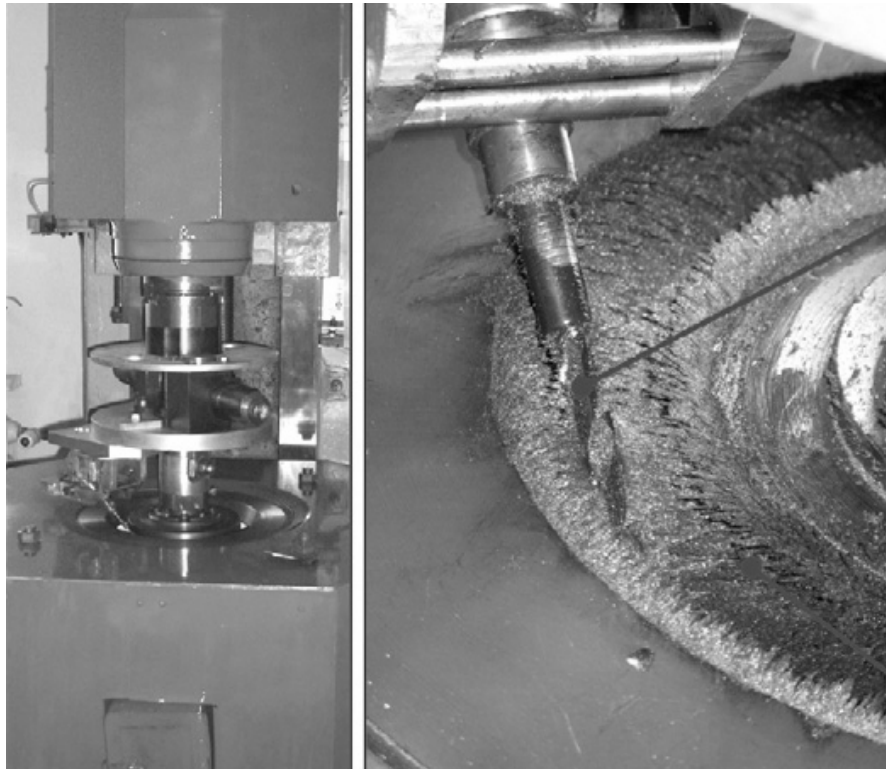


**Obr. 2-23** Příklad uspořádání zařízení pro magnetické dokončování vrtáku [35]

Výzkumníci použili magnetické dokončování k dokončení vnějších a vnitřních povrchů válcových obrobků. Nehledě na rotační pohyb válcového obrobku, axiální kmitavý pohyb je také uvedený v magnetickém poli oscilačním pohybem magnetických pólů nebo obráběného kusu k tomu, aby dokončil povrchy ostří v rychlejším tempu a s lepší kvalitou. Konkrétně pro obrábění rotačních nástrojů se používají dvě magnetické hlavy. Proces je vysoce výkonný a rychlost odstranění materiálu a dokončení závisí na obvodové rychlosti obrobku, hustotě magnetického toku, pracovní mezeře, vlastnostech materiálu obrobku a velikosti, typu a objemu tření abraziva. Procesový výkon je také ovlivněn přítomností či nepřítomností



štěrbiny v magnetu. Magnetickým dokončováním jsou získány velké přesnosti a malé hodnoty drsnosti u obrobku a díky tomu dochází pouze zřídka k defektům na povrchu.

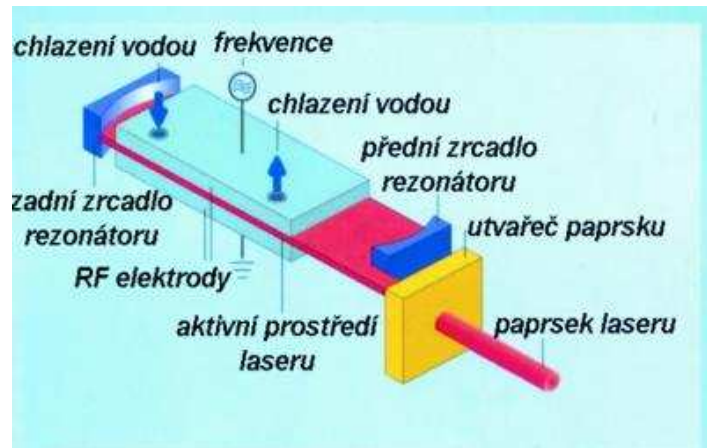


*Obr. 2-24 Další příklad uspořádání zařízení pro magnetické leštění vrtáku [20]*

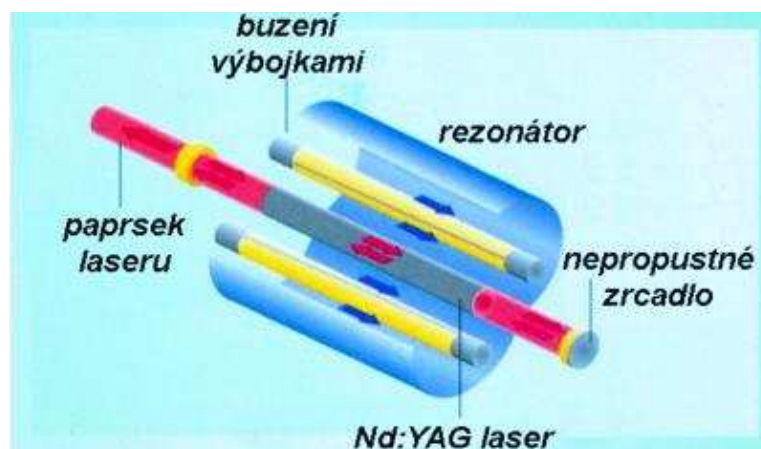
## **2.7 Obrábění laserovým paprskem [15, 17, 27, 31]**

Obrábění laserovým paprskem (dále jen OLP) je jedním z široce používaných tepelně založených, bezkontaktních typů obráběcích procesů, který může být použit pro téměř celou řadu materiálů. Laserový paprsek je zaostřován pro tavení a následné vypařování nechtěného materiálu z obrobku. To se hodí pro vytvoření geometricky komplexního profilu řezu a čištění obrobků od nečistot. Odebírání materiálu je bez natavenin, otřepů a v materiálu nedochází k tepelným přeměnám. Velikost a tvar zaoblení lze ovlivnit polohou a výkonem laseru. V posledních letech výzkum prozkoumal řadu způsobů, jak zlepšit u OLP procesový výkon analýzou různých faktorů, které ovlivňují znaky kvality. Hnací silou je vyšší přesnost za rozumnou cenu. Experimentální a teoretické studie ukazují, že procesový výkon může být značně zlepšen správným výběrem parametrů laseru, materiálu a provozních parametrů.

Mezi různými typy laserů užívanými pro obrábění v průmyslovém odvětví jsou plynový CO<sub>2</sub> a pevnolátkový Nd:YAG laser nejvíce zaváděné. CO<sub>2</sub> lasery mají vlnovou délku 10 μm v infračervené oblasti, takže má průměrně vysoký výkon paprsku, lepší efektivitu a dobrou kvalitu paprsku. Hodí se pro řezání tabulového plechu vysokou rychlostí. Nd:YAG lasery mají nízký výkon paprsku, ale při operování v impulzovém režimu nejvyšších výkonů mu to umožní zpracovávat dokonce i silnější materiály. Kratší šířka impulzu se hodí pro obrábění tenkých materiálů. Kvůli kratší vlnové délce (1 μm) může být absorbován vysoce reflektivními materiály, které jsou obtížně zpracovávány CO<sub>2</sub> lasery.

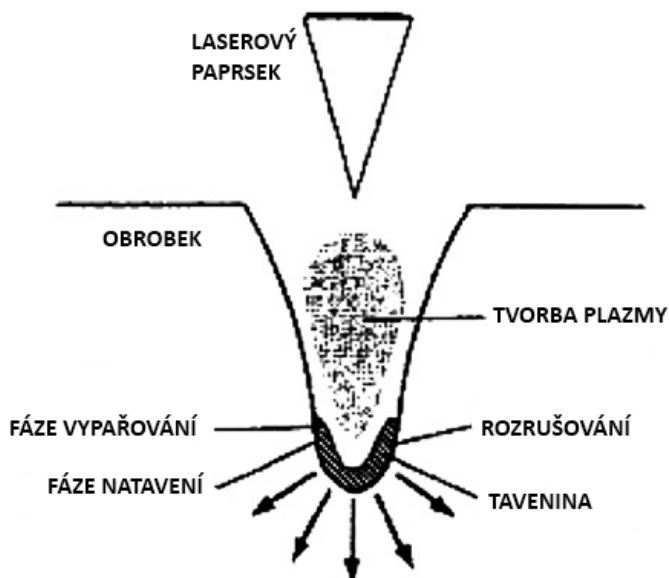


Obr. 2-25 Konstrukce CO<sub>2</sub> laseru [17]



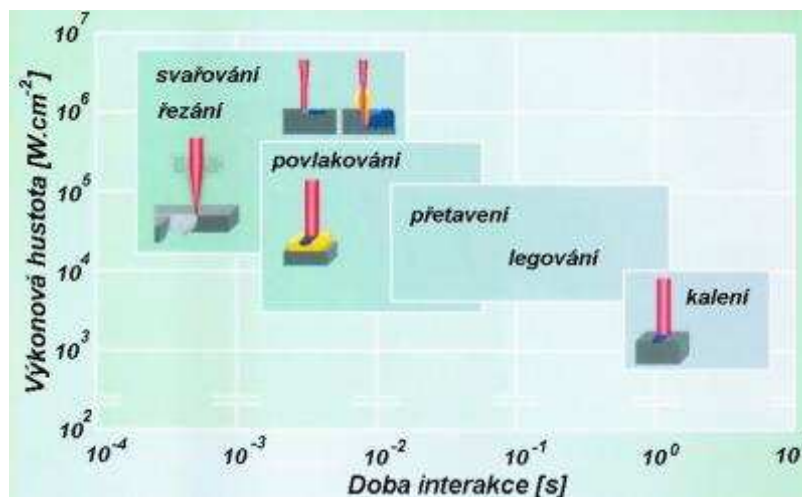
Obr. 2-26 Konstrukce Nd:YAG laseru [17]

Mechanismus materiálního vyjmutí během OLP zahrnuje odlišné stupně jako tavení, vypařování a chemické degradace (chemické vazby jsou porušeny, což způsobuje, aby materiály degradovaly). Když laserový paprsek o vysoké energii je zaostřován na povrch obrobku, je absorbována tepelná energie, která ohřeje a transformuje pracovní prostor do roztaveného, vypařujícího se či chemicky změněného stavu, který může být snadno odstraněn proudem plynu o vysokém tlaku (urychluje transformovaný materiál a vylučuje ho z prostoru úpravy). Schematický OLP je ukázaný na obr. 2-27.



Obr. 2-27 Schéma principu obrábění laserem [15]

OLP je termický proces. Efektivita tohoto procesu závisí na teplotních vlastnostech a do jisté míry spíše na optických než mechanických vlastnostech materiálu, který má být obrobek. Proto materiály, které se prokazují vysokou křehkostí či tvrdostí a mají příznivé teplotní vlastnosti jako nízká teplotní vodivost, jsou zvláště vhodné pro obrábění laserem. Přenos energie mezi laserem a materiálem vzniká skrze záření, žádné řezné síly nejsou vygenerované laserem, to vede k nepřítomnosti mechanicky indukovaných věcných škod, opotřebení nástrojů a vibrace stroje. Navíc, materiální poměr vyjmutí materiálu pro OLP není omezený omezeními jako maximální řezná síla, nabalování řezné hrany či chvění nástroje. OLP je flexibilní proces, kdy v kombinaci s robotem a různými polohovacími systémy může být použit pro vrtání, řezání, drážkování, svařování a tepelné zpracování na jednotlivém stroji.



Obr. 2-28 Oblasti pracovních parametrů laserů [27]

Určitě čištění povrchu materiálů laserem je vhodná náhrada čistících metod založených na použití rozpouštědel, mechanických metod (např. kartáčování a tryskání). Oproti mechanickým úpravám nedochází při čištění laserem k poškození povrchu čistěného materiálu a výhodou laserové úpravy je také odstranění nepříznivého působení na životní prostředí (nejsou nutné další chemikálie, nevznikají kapalné nebo plynné odpady). Nevýhodou úpravy laserem zůstávají prozatím hlavně náklady na pořízení vhodného laseru.

V budoucnu lze očekávat, že dojde masově k rozšíření této technologie a tím poklesnou i pořizovací náklady a dostupnost díky tomu vzroste.

## 2.8 Porovnání technologií úprav řezné hrany nástroje [5]

<i>Stupně hodnocení: nízká, střední, vysoká</i>	<b>Kartáčování -leštění</b>	<b>Kartáčování s brusnými vlákny</b>	<b>Omílání v granulátech s brusivem</b>
<b>Kvalita:</b>	vysoká	střední	vysoká
<b>Opakovatelnost:</b>	střední	střední	vysoká
<b>Flexibilita:</b>	vysoká	střední	střední
<b>Produktivita:</b>	střední	střední	střední
<b>Cena:</b>	nízká	nízká	střední
<b>Ostatní:</b>	netřeba speciálního zařízení, ručně nebo strojně	netřeba speciálního zařízení, nevhodné pro depozici	planetový pohyb, axiální nástroje i po depozici

<i>Stupně hodnocení: nízká, střední, vysoká</i>	<b>Otryskávání proudem abraziva</b>	<b>Magnetické dokončování</b>	<b>Laserový paprsek</b>
<b>Kvalita:</b>	střední	vysoká	vysoká
<b>Opakovatelnost:</b>	nízká	vysoká	vysoká
<b>Flexibilita:</b>	nízká	vysoká	střední
<b>Produktivita:</b>	vysoká	střední	vysoká
<b>Cena:</b>	střední	vysoká	vysoká
<b>Ostatní:</b>	zkušená obsluha, univerzální metoda, suché i mokré otryskávání	odstranění tenkých filmů oxidů, nutnost odmagnetizování	vyšší pořizovací cena, všestranná metoda, budoucnost vývoje

**Tab. 2-1** Tabulka metod úprav řezné hrany nástrojů [22]

Uvedená tabulka (**tab. 2-1**) ukazuje porovnání běžných a méně běžných metod úpravy mikrogeometrie břitu, které jsou používány. Při výběru vhodné technologie závisí na dané produkci společnosti v tom smyslu, jaké druhy nástrojů, v jakém množství a z jakých materiálů vyrábí. Samozřejmě velice důležité hledisko je, kolik je schopna investovat do pořízení a provozování příslušných zařízení, které umožňují úpravu řezné hrany. Slovo investovat je použito záměrně, jelikož při správné volbě a správném využití metod je návratnost vynaložených nákladů zajištěna v podobě zvýšené produkce a životnosti nástrojů apod., jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách.

Obě zmíněné metody kartáčování jsou levné na pořízení zejména proto, že není zapotřebí žádné speciální zařízení či vybavení. Stačí pouze přimontovat kartáč ke vřetenu stroje poháněného elektromotorem a upnout nástroj pomocí vhodného přípravku ke stolu stroje, což je vše možné na lehce upraveném obráběcím stroji. Kombinaci s leštěním můžeme použít i manuálně a tím se zvýší flexibilita této metody, ale na úkor přesnosti a produktivity. Již zmíněná nevýhoda u kartáčování s nylonovými vlákny je, že dochází k nalepování se materiálu z vláken na břit a to znemožňuje případnou depozici tenké vrstvy, protože nylon je běžnými způsoby čištění špatně odstranitelný.

U metod omílání v granulátech a otryskávání proudem abraziva může být břit upraven nerovnoměrně v závislosti na špatně použitém brusivu a nedostatečně kvalifikované obsluze,

kteřá výsledek těchto metod ovlivňuje. Takový břit pak může výrazně zhoršit řezný výkon nástroje a po nanesení tenké vrstvy způsobit její odlupování v nerovnoměrnostech, kde dochází ke koncentraci napětí při obrábění. Naopak při správně zvolených všech aspektech technologií se získá požadovaně upravený břit, který je vhodný pro aplikaci tenké vrstvy (dobrá adheze). Obě technologie dosahují dobrých výsledků s velmi dobrou produktivitou a dají se použít pro větší série nástrojů. Ještě je nutno zmínit u otryskávání vodním paprskem, že je potřebná odolnost upravovaného nástroje vůči korozi.

Poslední dvojice úprav magnetické leštění a obrábění laserovým paprskem jsou méně běžné metody, protože se řadí i mezi novější, ale docilují vysoké produktivity, opakovatelnosti, flexibility a výsledků s vysokou kvalitou. Dají se použít pro většinu materiálů (RO, SK, hliníkové slitiny). Podstatnou nevýhodou jsou vyšší pořizovací a provozní náklady. Jejich spektrum využití je ovšem větší, používají se i k čištění povrchu obecně. Hlavně obrábění laserem nabízí velmi širokou škálu využití nejen ve strojírenství a lze u něj očekávat vývoj v budoucnu, především jeho rozšíření, aby mohl být dostupný i menším společnostem.

Vzhledem k dostupnosti, dosahované kvalitě a vhodnosti použití pro široké spektrum nástrojů se nabízí jako výhodně zvolená úprava omílání v granulátech, ale nejvhodnější výběr technologie je vždy závislý na konkrétní situaci a požadavcích zákazníka.

### 3 MĚŘENÍ MIKROGEOMETRIE BŘITU [14, 37]

V poslední třetině minulého století se velice změnil pohled na vybavení výrobních procesů měřicí technikou i samostatně na vlastní měřicí techniku. Před tímto zlomovým bodem bylo běžné v mnoha strojírenských podnicích, že technická kontrola mohla pouze velice složitou cestou kontrolovat, zda jsou plněny požadavky konstruktérů na kvalitu výroby, ale situace se již podstatně změnila. K dispozici jsou nyní měřicí zařízení, která umožňují kontrolu různých parametrů a charakteristik a ovlivňují kvalitu výrobků, jejich funkci a spolehlivost.

Svět výroby je stále více určován faktorem řízení kvality. Čím důležitější je automatická opakovatelnost a přesnost, tím větší význam pro konečný výsledek má měřicí technika. Většina světových výrobců měřicí techniky se snaží zajistit, aby výsledky byly opravdu a vždy správné. Poskytují vhodnou měřicí techniku pro nejrozmanitější požadavky. Jejich sortiment sahá od posuvek až po špičkové měřicí systémy přizpůsobené potřebám zákazníka. V úzkém kontaktu se zákazníky a v analýze jejich potřeb hlavně spočívá tajemství inovačního potenciálu.

Účinnost měřicích, popř. kontrolních operací závisí na vybavení průmyslových organizací měřicí technikou a na kvalifikaci technických kontrolorů, popř. metrologů. Dalším předpokladem jsou i znalosti a zkušenosti pracovníků technického úseku, pokud jde o strukturu povrchu a její vliv na funkci produktů. Na základě přímého propojení a komunikace s výrobou, výzkumem a vývojem vznikají koncepce pro budoucí měření. Díky tomu se původní vize stávají měřitelnými. A jaké úlohy je možno očekávat v dalších desetiletích? Existuje celá řada úvah a hypotéz. Třeba koncepce nanotechnologie vyžaduje součásti, které do sebe přesně zapadají na molekulární bázi. Povrch umělých vláken dnes musí splňovat požadavky, které byly ještě před pár lety považovány za nemožné. Průmyslové výrobě se musí věnovat stále větší pozornost a péče, aby se zajistila potřebná stálost a životnost produktů. Ve všech těchto oblastech má výrobní měřicí technika rozhodující význam, již dnes se uvažuje o nových formách měření. Rozhodující bude vlastní vize zákazníka budoucnosti.

#### 3.1 Vývoj měřicí techniky [30, 37]

Od poslední třetiny minulého století došlo k prudkému rozmachu měřicí techniky a měřicích, popř. kontrolních zařízení. Číslicová měřicí zařízení a optické s elektronickými prvky umožňovaly podstatně zvyšovat účinnost, přesnost a provozní charakteristiky nových měřicích zařízení. Zejména šlo o tyto vývojové trendy:

- Měřicí rozsahy kontrolních zařízení se zvětšily až desetinásobně.
- Množství zpracovávaných informací pro stanovení měřených hodnot a vyhodnocování výsledků měření se v tomto období zvýšilo téměř desettisíckrát.
- Produktivita měřicích operací, jejich přesnost a rychlost měření se zvýšily až stokrát, rovněž tak se zvýšila spolehlivost měřicích zařízení.

Požadavky, které vyplývají z norem pro řízení kvality na měřicí techniku, hlavně nároky na produktivitu měřicích operací a snaha identifikovat neshodný produkt co nejdříve po jeho vzniku, vedly k tomu, že se měřicí přístroje začaly umisťovat přímo do výrobních hal a výrobních linek. Zvyšování přesnosti měřicích operací vede k zájmu pracovníků výrobního procesu o kalibraci a metrologickou kontrolu měřicích zařízení.

Měřicí technika se začala vyvíjet od konvenčních měřidel k digitální měřicí technice a ke komplexním měřicím systémům v tomto zmiňovaném období. Vývojové směry byly zřetelné

zejména v automobilovém průmyslu a v obdobných rozsáhlých výroбах. Zatímco přibližně čtvrtina geometrických parametrů se doteď měří ručními měřidly nebo více rozměrovými měřicími přípravky orientovanými na určitý výrobek, převážná většina měření se přesunuje na souřadnicové měřicí stroje a optické měřicí systémy, které jsou flexibilnější a podstatně přesnější. Prostorovou analýzou povrchu se otevírají nové možnosti hodnocení struktury, které byly dvourozměrným měřením nedosažitelné. Přínosným se ukazuje tento detailní prostorový popis povrchu především při posuzování jeho funkčních vlastností, jako je např. opotřebení, tření, mazání, únavové vlastnosti, těsnění stykových ploch, vhodnost povrchu pro depozici tenké vrstvy apod.

Vývoj měření a hodnocení struktury povrchu vychází především z technických požadavků rozvíjející se strojírenské výroby a probíhá v souladu s výsledky normalizačního procesu v daném oboru. Současně se ve vývoji uplatňují i technické a ekonomické aspekty uživatelského prostředí. Snahou výrobců je tedy připravit a nabídnout ucelený měřicí systém, který bude zároveň splňovat jak požadavky na technickou úroveň (hodnocené parametry, přesnost atd.), tak i praktické požadavky uživatelů.

Tak tedy vývoj a výroba měřicí techniky je zaměřena na řešení následujících problémů měření a hodnocení struktury povrchu a současná nabídka trhu to prakticky potvrzuje:

- *Přesnost a rozsah měření* - přístroje jsou z tohoto hlediska jednoznačně tříděny na jednoduché (provozní), měřící jen některé parametry (např.  $R_a$ ,  $R_z$ ), a měřicí systémy umožňující vyhodnocení několika desítek parametrů struktury s vysokou přesností. Zřetelná je snaha o zvyšování rozsahu měření, zvětšování délky měření při malém rozlišení (tedy vysoké přesnosti měření). Současně je sledováno i dosažení přiměřené opakovatelné přesnosti měření, důležité z hlediska charakteru většiny obrobeneých povrchů.
- *Rozsah použití měřicího zařízení* - na rozdíl od dřívějších jednoduchých profilometrů určených jen k měření drsnosti jsou nyní připravovány přístroje umožňující měření a hodnocení nejen drsnosti, ale i tvaru povrchu. V návaznosti na využití většího rozsahu měření (s použitím více posuvových jednotek a snímačů) a programového hodnocení výsledků měření se tak podstatně rozšiřují možnosti kontroly povrchu.
- *Jednoduchost obsluhy přístroje a hodnocení* - objektivita výsledků měření drsnosti předpokládá dodržení určitých pravidel měření (nastavení snímače, rozsahu měření atd.). Pozornost se soustřeďuje na taková konstrukční provedení a programová vybavení, která zajistí minimální vliv obsluhy na výsledek měření. Zjednodušení přípravy přístroje i vlastního provedení měření omezí nároky na kvalifikaci obsluhy a umožní rozšíření provozního nasazení měřicích přístrojů.
- *Softwarové zabezpečení hodnocení struktury povrchu* - příprava programů pro hodnocení struktury spolu se spojením měřicích přístrojů s počítači se ukázaly jako mimořádně přínosné z hlediska technického i ekonomického. Proto je této oblasti věnována velká pozornost. Programové vyhodnocení struktury zajišťuje zatím nejkomplexnější charakteristiku povrchu, včetně tvarového a frekvenčního hodnocení, parametrů nosné křivky a funkce hustoty pravděpodobnosti souřadnic profilu. Rozšiřuje hodnocení struktury povrchu o řadu nových parametrů a doplňuje běžné dvourozměrné měření profilu povrchu prostorovou analýzou kontrolovaného povrchu. Lze konstatovat, že příprava programů pro zpracování dat z měřených povrchů zajistila kvalitativní změnu v hodnocení jejich struktury.
- *Automatizace procesu kontroly a vyhodnocení výsledků měření struktury povrchu* - v souladu s tendencemi automatizování operací výroby a dokončování součástí se



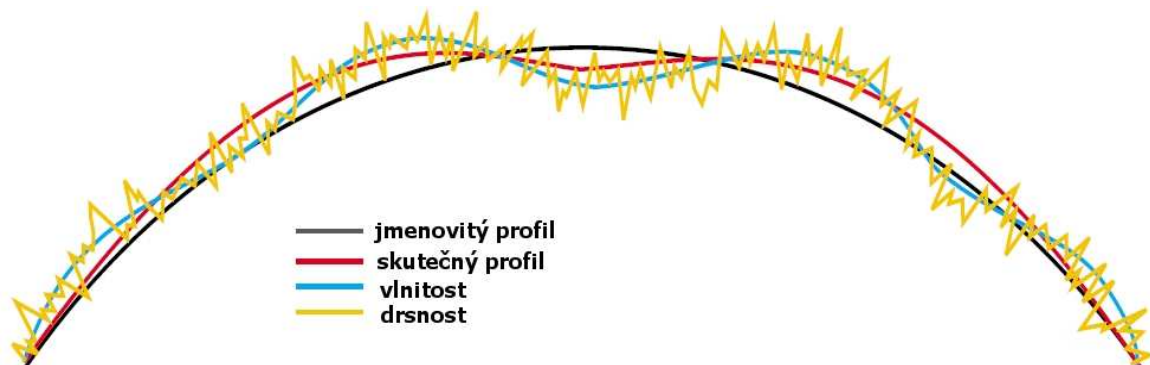
přistupuje i k automatizaci kontroly struktury. Současné přístrojové systémy již umožňují, aby kontrolovaný povrch byl přímo srovnáván se zadaným vzorovým tvarem (při současném zobrazení obou povrchů a kvantifikaci jejich vzájemné polohy). Výsledek porovnání může být výchozím údajem pro případná následná technologická opatření (výměna řezného nástroje, seřízení obráběcího stroje apod.), která by zajistila požadovanou kvalitu povrchu. Cílovým řešením problému v plně automatizované výrobě bude případ, kdy se bude výsledek měření struktury, po srovnání s etalonem, vracet do řídicího systému výroby jako regulační prvek pro zajištění předepsané kvality výroby.

### 3.2 Hodnocení kvalitativních parametrů nástroje [29, 30, 36]

Zvyšování životnosti a funkční spolehlivosti součástí je podmíněno vysokou kvalitou jejich funkčních ploch, tj. rozměrovou i tvarovou přesností a drsností povrchu.

Požadované zvyšování jakosti, při stále větším využití progresivních konstrukčních materiálů (s vesměs zhoršenou obrobiteľností), rozvoji řezných materiálů a obráběcích strojů, vyžaduje mimo jiné i vývoj měřicí techniky a hodnoticích metod.

Charakteristika struktury povrchu, včetně definice parametrů a jejich měření, je součástí norem Geometrické požadavky na výrobky (GPS). Normovaný popis struktury povrchu zahrnuje drsnost, vlnitost a základní profil. Je tedy zřejmé, že profil drsnosti a jeho parametry jsou jen částí charakteristiky struktury povrchu.



*Obr. 3-1 Parametry struktury povrchu [5]*

V současné době stále zůstává základem hodnocení struktury povrchu profilová metoda. Profil drsnosti povrchu je většinou snímán dotykovým měřicím přístrojem - profilometrem. Získaný digitalizovaný profil povrchu, představující jeden "řez" kontrolovaným povrchem, je následně zpracováván a vyhodnocován formou řady normalizovaných i nenormalizovaných výškových, délkových a tvarových parametrů. Zpracování naměřených dat je prováděno buď přímo ve vyhodnocovací části profilometru, nebo s využitím dodávaného softwaru v připojeném počítači. Programové vybavení vesměs umožňuje získat podstatně rozsáhlejší a podrobnější charakteristiku struktury povrchu. Ve standardním provedení předních výrobců měřicích přístrojů jsou vyhodnocovány geometrické parametry výpočtem ze základního profilu (parametry P), z profilu drsnosti (parametry R) a z profilu vlnitosti (parametry W).



Měření a hodnocení struktury povrchu představuje specifickou samostatnou část metrologie, zabezpečenou jednoúčelovými měřicími přístroji. S touto výlučností je spojena i důležitá skutečnost, že se výrobci měřicí techniky výrazným způsobem podílí jak na přípravě metodiky hodnocení struktury povrchu, včetně normalizace parametrů drsnosti a podmínek hodnocení, tak i na přípravě softwaru pro praktické vyhodnocování kontrolovaného profilu povrchu.

Kvalita povrchu je souhrn geometrických, fyzikálních a chemických vlastností skutečného povrchu posuzované plochy, tj. povrchu, který odděluje těleso od okolního prostředí. Závisí na ní mnohé funkční vlastnosti strojů, životnost, popř. pevnost jednotlivých součástí, vzhled i výrobní náklady. Další parametry, které na ní závisí, jsou např. hlučnost, doba záběhu, ztráty třením, elektrická vodivost, přestup tepla, odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi apod.

Kvalitu i funkci povrchu je možné hodnotit dle prostorového uspořádání povrchu, kde se jedná o texturu a morfologii, a kde toto uspořádání je vyjádřeno především jeho drsností. Dále je možné hodnotit fyzikální a chemické vlastnosti povrchové vrstvy současně, kdy můžeme problematiku vyjádřit pojmem integrita povrchu. Z pohledu řezného nástroje a jako uživatele nás však zajímá kvalita povrchu řezného nástroje pouze z pohledu geometrického, kdy bereme v úvahu pouze základní geometrické parametry nástroje, a poté z pohledu mikrogeometrie nástroje, která má výrazný vliv na kvalitu resp. adhezi vrstvy k substrátu a samozřejmě na změnu namáhání soustavy S-N-O.

Pro hodnocení poloměru zaoblení a drsnosti bříty je nutné mít k dispozici vhodná měřicí zařízení. Základní metody, kterými lze měřit zaoblení a drsnost povrchu, lze rozdělit na dotykové a bezdotykové. Nejpoužívanější z nich jsou asi běžné optické mikroskopy, kterými lze vhodným nastavením nebo přiložením šablony určit poloměr zaoblení bříty v kolmém řezu. Pomocí optického 3D měření lze také vytvořit model řezné hrany a zjistit zaoblení v libovolném počtu řezů. Využít lze také mechanických metod založených na snímání pomocí dotykového hrotu, který kopíruje hranu, a ze získané křivky se pak vypočtou požadované hodnoty.

## 4 DOTYKOVÉ MĚŘÍCÍ METODY [14]

Všude tam, kde struktura povrchu ovlivňuje funkci, opracování či vzhled konstrukčních dílců nebo výrobků, má velký význam pečlivá kontrola. Ale jak se dají kontrolovat povrchy? Na začátku 20. století byli ještě odborníci odkázáni pouze na svůj zrak a hmat. Cvičené oko rozezná parametry v řádu  $\mu\text{m}$  a také zkouška odolnosti proti oděru prováděná nehtem poskytovala celkem spolehlivé výsledky. Dnes v epoše kompatibility, lícování a internacionalizace však takové subjektivní zkoušky nepostačují. Počítačově podporovaná měřicí zařízení nyní poskytují objektivní data, enormně vzrostl komfort měření a vyhodnocení. Při měření kvality povrchu je rozhodující souhra snímacího elementu, pohonu a měřicí sestavy. To představuje hlavní know-how firem, o čemž svědčí početné inovace a patentovaná řešení. Dotyková metoda, která se mezitím rozšířila po celém světě, byla přivedena k dokonalosti.

Pro měření kvality povrchu jsou k dispozici přenosné přístroje, stacionární přístroje do výrobního úseku i přístroje na bázi PC. Přístroje využívající počítačovou techniku představují absolutní špičku v technologii měřicí a vyhodnocovací techniky pro měření kvality povrchu. Splňují veškeré požadavky kladené na moderní počítačem řízený měřicí a vyhodnocovací systém: podpora mezinárodních norem, všestranné metody vyhodnocení, rozsáhlá dokumentace, velká kapacita počítačové paměti, export a import dat, síťové propojení s jinými systémy. Vysoká kvalita a stabilita používaného softwaru a hardwaru zaručuje optimální řízení kvality. Stacionární přístroje na měření drsnosti povrchu určené do výroby jsou vyznačovány vysokým výkonem a velmi snadným ovládním. Díky flexibilnímu vyhodnocení a dokumentaci zvládají stále náročnější úlohy. Standardizované parametry drsnosti, vlnitosti a profilu jsou vyhodnocovány podle mezinárodních norem ISO, JIS a ASME. Absolutní systém snímání s použitím snadno vyměnitelných snímacích hrotů umožňuje rychlé přizpůsobení často se měnícím měřicím úlohám.

### 4.1 Mahr - Marsurf LD 120 [14, 21]

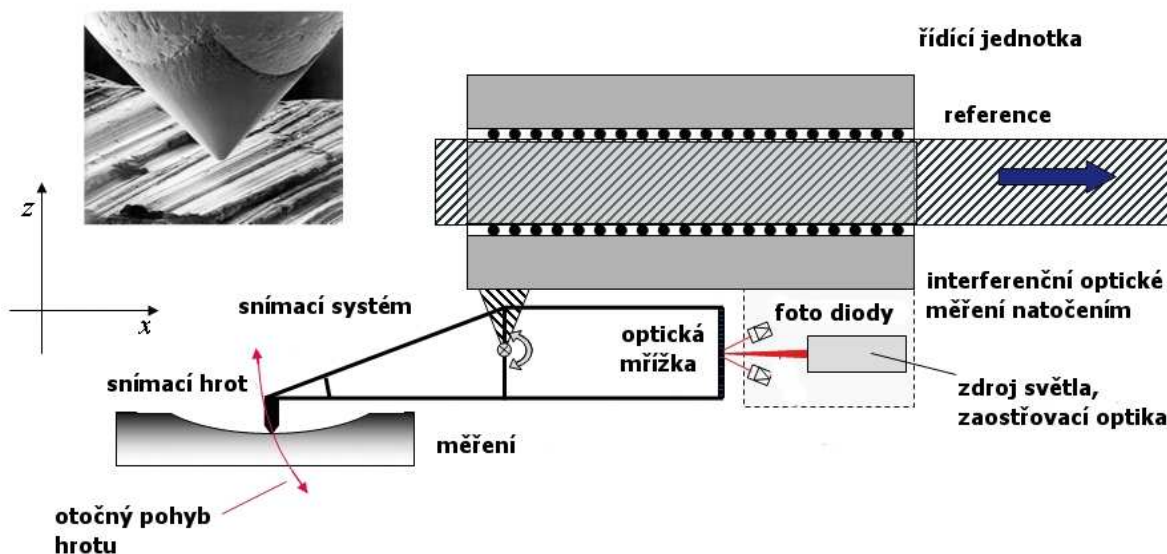
Je špičkové pracoviště na vysoce přesné měření kontur a drsnosti s integrovaným optickým systémem. Vyhodnocení drsnosti i kontury se získává z jediného snímání řezu profilu. Zvládnutí obou měřicích úloh v jediném měření vyžaduje vysoce přesný měřicí systém, který realizuje jak relativně velký zdvih pro konturu u rádiusů, na úkosech nebo na obecných tvarových plochách, tak i rozlišení v řádu nm pro měření drsnosti. Měřicí bodová vzdálenost  $0,05 \mu\text{m}$  umožňuje přesné měření mikro-kontur, zkosení a zaoblení hran ostří.



*Obr. 4-1 Měřicí systém Marsurf LD120 [14]*

Magnetický upínač umožňuje flexibilní použití různých snímačů, jejich spolehlivou výměnu a dlouhou životnost. Kulový doraz zajišťuje, že rameno dosedne přesně na  $\mu\text{m}$ . Dále výměna snímacího ramene je umožněna bez opakované kalibrace díky uložení údajů o kalibraci pro každé snímací rameno a magnetický upínač a tím je zaručena vysoká opakovatelnost. Speciální kalibrační metoda zajišťuje maximální přesnost a spolehlivé výsledky. Podle vlastností materiálu měřeného objektu a podle vybraného snímače je nastavena optimální měřící síla. Měřící síly je možno zvolit v rozsahu od 0,5 mN do 30 mN a jsou konstantní v celém měřícím zdvihu, což zajišťuje flexibilitu i stabilitu. Řídící jednotka podporuje délku pojezdu od 0,1 mm až do 120 mm s posuvovou rychlostí mezi 0,1 mm/s a 2 mm/s. Automatické nastavení polohy je možné v X-směru zásluhou skleněné stupnice. Rámová konstrukce snímacího ramene zajišťuje vysokou tuhost a to vede k vysokému stupni přesnosti a spolehlivosti. Pro různé měřící úlohy, různá snímací ramena a hroty jsou dostupné. Podle typu měřící úlohy je možné použít diamantový hrot se zaoblením 2  $\mu\text{m}$  pro měření drsnosti, karbidový hrot se zaoblením 25  $\mu\text{m}$  pro snímání kontury tak dobře jako rubínovou kuličku. Prostřednictvím adekvátního výběru snímacích hrotů mohou být krátkovlnné i dlouhovlnné profily zaznamenány a vyhodnoceny v jednom měření.

Uživatelsky přívětivá MarWin softwarová platforma přináší mnoho různých měřících a vyhodnocovacích kritérií. Standardizované ikony, identické pracovní postupy v každé z aplikací a jednoznačné přidělení uživatelských práv jsou jen několik málo z mnoha rysů dělání snadnějšího přístupu pro uživatele. MarSurf LD120 je možné rozšířit na CNC měřící stanici MarSurf XP 20 s integrovaným rotačním stolem a automatickým výměníkem snímacího ramene, který dovoluje CNC měření bez přerušení a tím je uspořen čas.



*Obr. 4-2 Schéma principu snímání [21]*

Snímací princip je založen na vahadlovém systému se snímacím hrotem na jedné straně a optickou mřížkou na opačné straně ose rotace. Světelné záření z diod je soustředěno na optickou mřížku ukazující interferenční obraz. Pohybem optické mřížky nahoru či dolů je dosaženo měření se interference na straně čidla, která je registrována foto diodami. Díky tomu elektronický vyhodnocovací obvod určuje pozici mřížky a následně snímacího hrotu.

## 4.2 Zeiss – Surfcom 5000 [33]

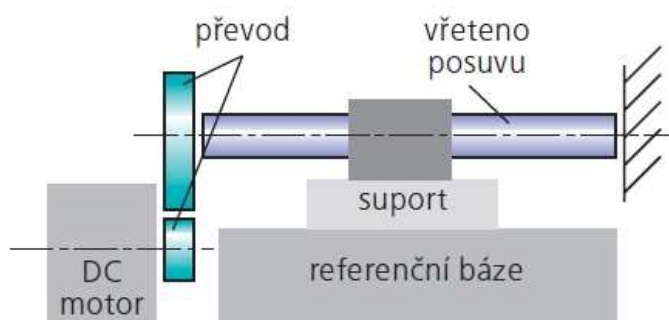
Špičkový přístroj na měření kontury a struktury povrchu v jedné pracovní operaci. Plně zakrytá DX verze obsahuje integrovaný antivibrační stůl a ochranný kryt a celé konstrukční řešení je ergonomické, což v kombinaci se softwarovou koncepcí TIMS usnadňuje uživateli ovládání přístroje v měrovém středisku nebo ve výrobě. Integrovaná softwarová koncepce pro tvar, konturu a kvalitu povrchu umožňuje výměnu měřených hodnot, např. z analýzy odchylek tvaru nebo drsnosti přímo pro analýzu profilu, aby bylo možné vyhodnotit mikro-kontury podle speciálních požadavků. V programu TIMS se dají snadno a rychle vyhodnotit typické parametry analýzy profilu jako výpočet zaoblení, úhlů a vzdáleností. Pomocí funkcí připisování mohou být pro srovnání skutečné hodnoty optimálně vyrovnány k jmenovitým hodnotám. Samozřejmostí je normalizované vyhodnocení profilu, drsnosti a vlnitosti a všechny používané normy, filtry, křivky a parametry.

Jako měřícího principu je využíváno laser-interferometrického snímacího systému s rozlišovací schopností 0,31 nm při rozsahu měření 13 mm a patentované technologie lineárního motoru se skleněným měřítkem bez tření pro posuvovou jednotku. Rychlost měření je pro drsnost 0,03-3 mm/s a konturu 0,03-20mm/s a rychlost pojezdu činí 0,03-60 mm/s ve směru X a 200 mm/s sloupku ve směru Z. Maximální počet měřených bodů je sto padesát tisíc. Snímací rameno využívá diamantového snímacího hrotu se zaoblením 2  $\mu\text{m}$  a o vrcholovém úhlu 60°. Zdvih snímacího ramene je automatický a měřící síla je rovna 0,75mN. Díky stavebnicovému systému s různými stolními moduly je možná automatizace CNC průběhu měření všech parametrů a to přináší vyšší produktivitu.

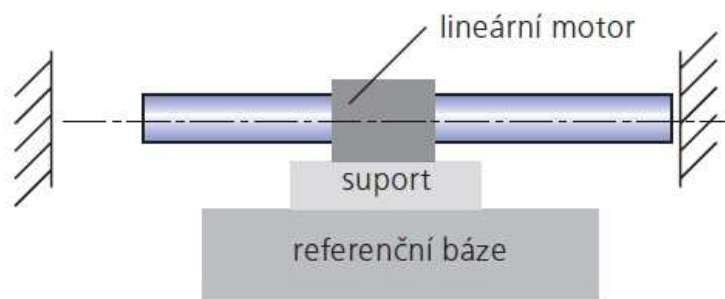


**Obr. 4-3** Měřicí systém Surfcom 5000 DX [33]

#### Konvenční pohon



#### Lineární motor



**Obr. 4-4** Schéma lineárního motoru a konvenčního pohonu [33]

### 4.3 Jenoptik - Hommel–Etamic T8000 RC [1, 9, 13]

Universálně použitelný měřicí systém, který umožňuje měření drsnosti a kontury součástí. Optimální kombinace pro měření drsnosti a kontury je zajištěna díky inteligentnímu uspořádání obou snímacích ramen. Drsnost a kontura jsou měřeny dvěma odlišnými snímacími systémy. Umístění snímacího systému pro měření drsnosti je možné i v měřicích pozicích s obtížným přístupem. Snímač kontury je jednoduché vyměnit a může být obsluhovaný souběžně se snímačem drsnosti, pokud je to nezbytné. Pojízdňá jednotka s vysokou vodící přesností a digitálním měřítkem společně s masivním a pevným motorizovaným měřicím sloupem umožňují automatické nastavení polohy s přesnými výsledky. Software se systémem T8000 je k dispozici v různých konfiguracích podle povahy prováděných měření. Standardní možnosti jsou Turbo Rauheit, Turbo Contour, Turbo Wave a Hommel Map. Software Turbo Rauheit je vhodný pro snadné provádění komplexních měření drsnosti povrchu. Tento software umožňuje obsluhu změřit všechny běžné parametry drsnosti a vlnitosti. Umožňuje přesné nastavení polohy posuvové jednotky v manuálním či počítačem řízeném režimu a zobrazuje polohu snímání vůči obrobku. Snímací signály jsou zobrazeny graficky i číselně. Turbo Contour je uživatelsky příjemný software řízený pomocí ikon, který umožňuje provádění přesného měření profilů a jeho rychlé a efektivní vyhodnocování. Měřené vlastnosti jako vzdálenosti, úhly či poloměry jsou zobrazeny přímo na obrazovce a lze snadno určit jejich odchylku pomocí norem z nákresů. Výsledky měření pomocí programu Turbo Contour mohou být odeslány v různých formátech pro zpracování v programu Excel nebo v souborech programů SPC. Za účelem srovnání jsou rovněž k dispozici funkce překrytí profilů ve formátu DXF. Turbo Wave je nejnovější softwarové řešení T8000. Kombinuje funkce programů Turbo Rauheit a Turbo Contour a umožňuje vyhodnocení drsnosti povrchu a profilu pomocí jednoho měřicího pracoviště. Naměřené hodnoty jsou vyhodnoceny a na obrazovce přehledně zobrazeny v jednom diagramu.



**Obr. 4-5** Měřicí systém Hommel-Etamic T8000 RC [13]

Krokový lineární měřicí systém pro drsnost dosahuje rozlišovací schopnosti 1 nm při měřicím rozsahu  $\pm 300 \mu\text{m}$  a u kontury 50 nm při rozsahu 60 mm. Rychlost měření je 0,1-3 mm/s a rychlost pojezdu činí max. 3 mm/s ve směru X a 0,1-12 mm/s sloupku ve směru Z.



Snímací rameno drsnosti využívá diamantového snímacího hrotu se zaoblením 2  $\mu\text{m}$  a o vrcholovém úhlu 60° a kontura je snímána rubínovou kuličkou o průměru 1 mm. Zdvih snímacího ramene je automatický a měřicí síla je rovna 1,6 mN u měření drsnosti a nastavitelná měřicí síla 0-20 mN pro konturu. Opakovatelnost najetí do stejné polohy je s přesností 50  $\mu\text{m}$  a vyšší a je možná funkce automatického najetí do výchozí nuly ve směru Z.

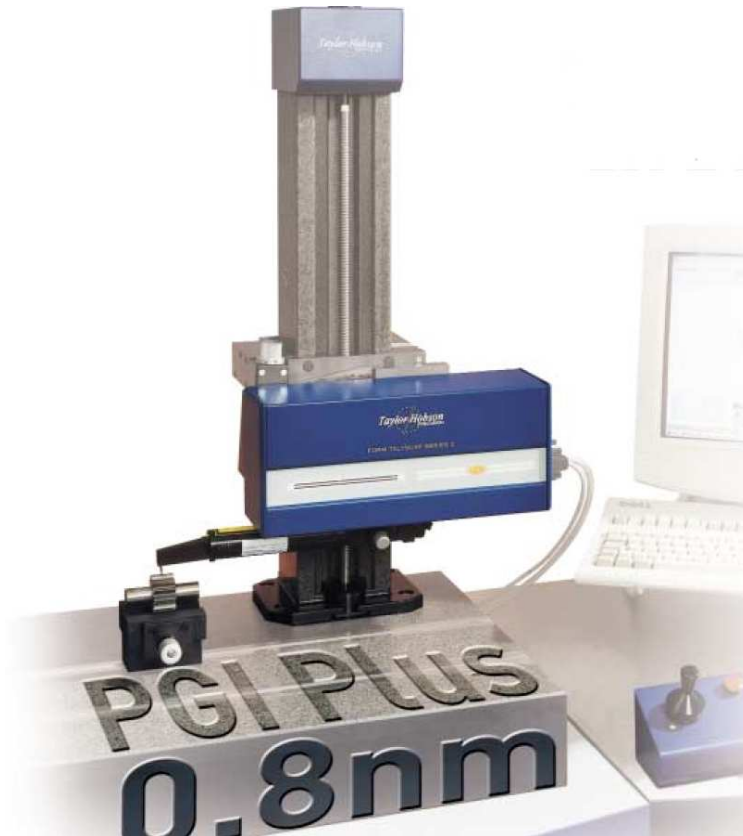
#### 4.4 Taylor Hobson - Form Talysurf Series 2 [4, 5, 30]

Měřicí systém Form Talysurf Series 2 (dále jen FTS2) je určený k měření a analýze drsnosti a kontury povrchu. Konstrukční provedení měřidla spolu s rozsáhlým příslušenstvím a programovým vybavením umožňuje měření prakticky všech součástí bez ohledu na jejich velikost i složitost tvaru, a to jak v laboratorních podmínkách, tak i provozní měření většího množství součástí. Standardní sestava měřicího systému FTS2 obsahuje posuvovou jednotku se snímačem, elektronickou měřicí jednotku, granitovou základní desku se sloupem opatřeným vertikálním motorickým posuvem, počítač se softwarem pro analýzu struktury i tvaru povrchu a tiskárnu. Široké možnosti měření jsou z hlediska rozsahu a přesnosti prakticky zabezpečeny následujícími měřicími systémy.

Specializovaný interferometrický snímač PGI (Phase Grating Interferometr) umožní současně přesné měření s následnou analýzou drsnosti a kontury povrchu. Současné měření mikrogeometrie a kontury umožňuje velký měřicí rozsah snímače PGI Plus (10 mm) s rozlišením 0,8 nm. Nová konstrukce snímacího hrotu (snap off) zajišťuje jeho uvolnění v případě velké zatěžující síly, což zabraňuje poškození měřidla. Snímač PGI je spojen s posuvovou jednotkou 120 mm, která může pracovat v normální nebo převrácené poloze (inverzní měření). Nanometrické rozlišení v rozsahu měření přístroje 10 mm umožňuje široké technické využití PGI měřicího systému.

Dále indukční snímače jsou určeny pro všestranná měření s vysokou přesností (při rozsahu měření 1 mm s rozlišením 16 nm; u rozsahu 0,04 mm s rozlišením 0,6 nm). Mimo standardní snímače jsou k dispozici i snímače široko-rozsahové (u max. rozsahu 28 mm zaznamenají úchylku tvaru menší než 15  $\mu\text{m}$ ), s výměnnými rameny různých délek. Snímače jsou podle charakteru kontroly použitelné na posuvových jednotkách 50 mm nebo 120 mm.

Měřicí systém FTS2 používá u ekonomičtějšího provedení posuvovou jednotku 50 mm, a to buď samostatně, nebo připevněnou na sloup. V případě měření drsnosti na delší dráze nebo měření kontury je používána posuvová jednotka 120 mm. Konstrukce sloupu nabízí buď ruční výškové seřízení polohy posuvové jednotky, nebo motorizovaným vertikálním posuvem v rozsahu 450 mm nebo 750 mm. Sloup s motorickým posuvem umožní i automatické nastavení měřicí polohy snímacího hrotu na kontrolovaný povrch, zhruba do středu měřicího rozsahu.



*Obr. 4-6 Měřicí systém Form Talysurf Series 2 [5]*

Zpracování a hodnocení výsledků měření i jejich vizuální a hodnotová prezentace jsou prováděny připojeným počítačem. Pro analýzu jednotlivých úloh je připravena řada softwarových modulů. K měřicímu systému PGI je standardně dodáván program k analýze tvaru (úchytky tvaru, poloměry, úhly, rozměry). Rozsáhlé hodnocení mikrogeometrie povrchu doplňuje program, kterým je změřený tvar součásti přímo porovnáván s vloženým tvarem etalonu. Oba tvary a jejich případné odchylky jsou současně zobrazeny na monitoru. Progresivním prvkem programového vybavení je modul Talymap 3D Topography, který zpracovává prostorovou charakteristiku struktury povrchu.

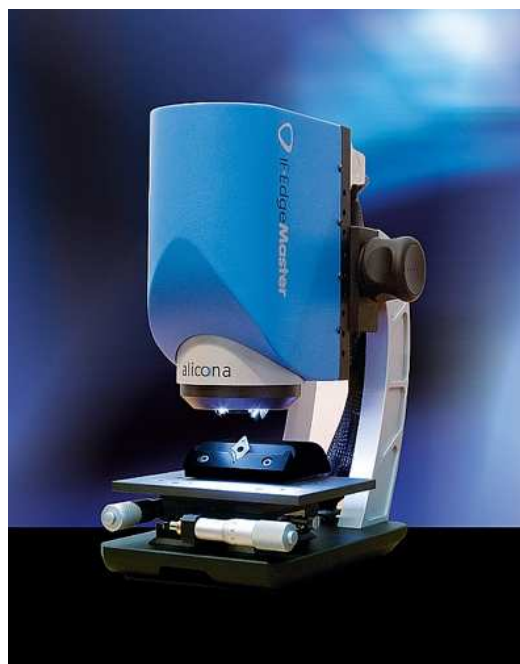


## 5 BEZDOTYKOVÉ MĚŘÍCÍ METODY [14]

Vysoká přesnost při výrobě a kontrole kvality je důležitým předpokladem pro dosažení úspěchu podniku. Nabízené optické souřadnicové a multi-senzorické měřicí přístroje umožňují rychlé a spolehlivé řešení různých 2D a 3D měření nejenom řezného nástroje, ale i přesných produktů průmyslu, lékařské techniky nebo miniaturizovaných elektronických komponentů. Nahrazují dotykové snímání při měření povrchů citlivých na mechanické poškození, měkkých materiálů apod.. Kontrolovaný povrch je sledován zaostřenou měřicí hlavou. Velice vysoká přesnost měřících přístrojů, výkonné algoritmy pro zpracování obrazu, specializovaný vyhodnocovací software a dlouholeté zkušenosti v oblasti optického měření zaručují splnění nároků zákazníka. Modulární konstrukce optických souřadnicových měřících přístrojů umožňuje variabilní konfigurování hardwarových a softwarových komponentů a jejich přizpůsobení specifickým potřebám uživatele. Využití souřadnicové měřicí techniky sahá od kompletního měření přesných řezných nástrojů a rotačně symetrických součástí až po nástroje na broušení diamantů.

### 5.1 Alicona – IF Edge Master [11, 26, 36]

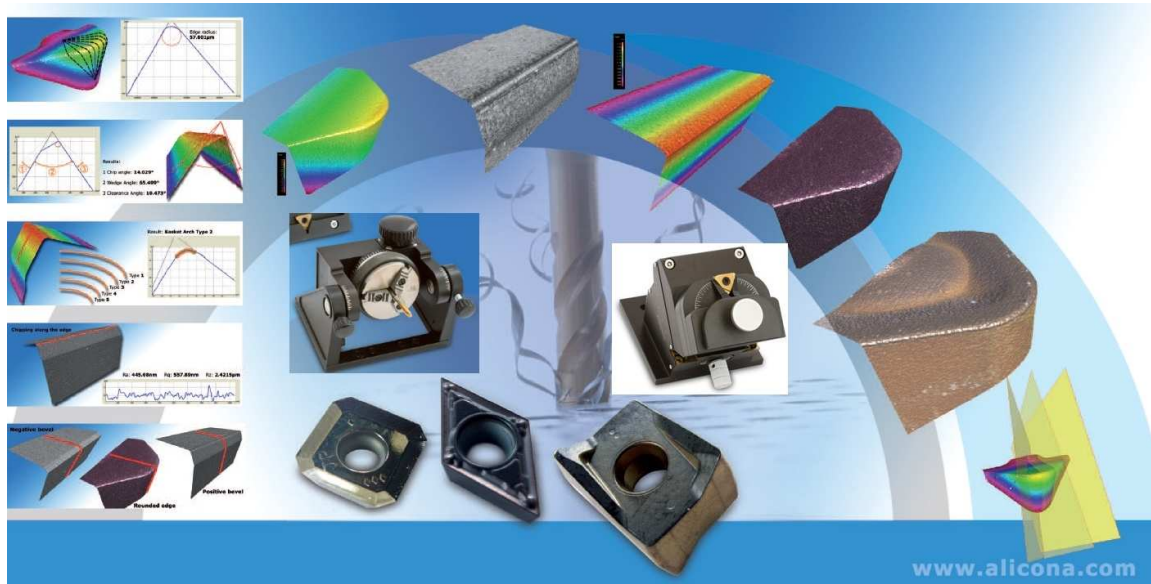
Automatický optický 3D měřicí přístroj EdgeMaster rakouské firmy Alicona, který je navržen pro práci přímo ve výrobním procesu. Pracuje na principu změny ohniskové vzdálenosti optické soustavy, při každém měření je vyhodnocováno více než 1 milion 3D měřících bodů. Nevyžaduje žádnou předchozí přípravu měřené destičky s výjimkou jejího vložení do pracovního držáku. Nejmenší měřený rádius je 1  $\mu\text{m}$ , nejlepší vertikální rozlišení 60 nm, které závisí na aplikaci a také na snímací rychlosti a je nezávislé na teplotě a vibracích, vodorovné rozlišení 0,4  $\mu\text{m}$ , měřená kvalita povrchu je větší než 15 nm; měří úhly v různých rovinách (úhel břitu, čela, hřbetu), drsnost řezné hrany včetně jejího zaoblení a může proměřit tvar utvařeče třísky. Parametr zaoblení a drsnost řezné hrany je nutné měřit zvlášť.



*Obr. 5-1 Měřicí systém IF EdgeMaster [11]*

Zařízení není citlivé na pracovní prostředí, nepotřebuje speciální stínění cizího světla. Měřicí cyklus trvá 30 sekund a výstupem může být grafika na obrazovce, automaticky tištěný

protokol nebo dvojkový signál, který lze využít řídicím systémem výrobní linky pro její nastavení. Zaznamenává se informace o poloze a tím je zajištěna vysoká opakovatelnost. EdgeMaster je hlavně používán pro zabezpečování kvality VBD, ale umožňuje měření ostří vrtáků, fréz a závitníků. Všechny nástroje jsou měřeny bez ohledu na typ, materiál, úpravu povrchu ostří a depozici tenké vrstvy. Různé druhy upínacích přípravků dovolují upnout do správné polohy jak VBD, tak i rotační nástroje. Díky plně automatickému měření, přehlednému uživatelskému prostředí s minimálními požadavky na obsluhu a mnoha dalším přednostem je toto měřicí zařízení velice efektivní a hospodárné.



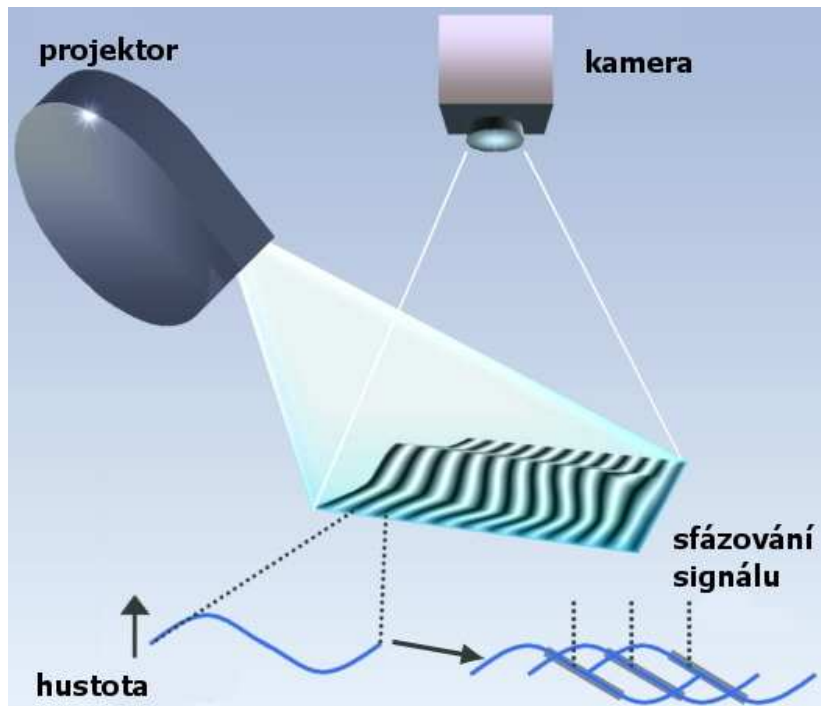
Obr. 5-2 Snímky a upínače měřícího systému IF EdgeMaster [11]

## 5.2 GFM – MikroCAD<sup>premium</sup> [6, 24, 25, 26]

Pro kontrolu mikrogeometrie řezné hrany a její drsnosti a zaoblení se užívá optický 3D měřicí přístroj MikroCAD. Ten porovnává emitovaný světelný paprsek s paprskem odraženým a rozdíl vyhodnocuje měřicí CCD čip. Jmenovaný přístroj je určen pro práci v měrovém středisku a je vhodný pro kontrolu již vyrobené dávky resp. seřízení parametrů výrobních zařízení. Měřená destička se umístí na XY stůl. Rychlý mód náhledu poskytne přehled celé snímané oblasti, která je pak snímána v jednom nebo více styčných měřicích polích. Mezi 300 tisíci a 5 milióny pixelů je získáno v jednom měření a současně je zachycen velký výškový rozsah. Měření typické VBD o rozměrech 25x25 mm zabere okolo 5 minut při rozlišení 3  $\mu\text{m}$ . Modrý polovodičový světelný zdroj (LED) zvyšuje ostrost, toleranci odrazu a odolnost vůči okolnímu světelnému záření.

S dvěma milióny naměřených bodů během 2 vteřin je softwarový systém schopný vyhodnotit bez problémů plošné profily ve vysokém rozlišení. Nejvyšší rozlišení ve směru Z je 0,2  $\mu\text{m}$  a ve směrech X-Y činí 3  $\mu\text{m}$ . To dovoluje analyzování velmi malých detailů struktury i celý profil součástí. MikroCAD je zvláště vhodný pro měření zaoblení břitu od 2  $\mu\text{m}$ , umožňuje rychlou, přesnou a ekonomickou kontrolu zaoblení ostří. Automaticky analyzuje kompletně ostří a poskytuje spolehlivé, na obsluze nezávislé výsledky díky vypočítání 400 přímkových řezů během 2 vteřin. Software ODSCAD provádí široké spektrum vyhodnocení naměřených dat jako je automatická kalkulace zaoblení, statistické vyhodnocení struktury, srovnání tvaru kontury, určení úhlů popisujících geometrii nástroje atd. UV světelný zdroj umožňuje měření i velmi obtížných povrchů jako např. velmi lesklé, opticky konkávní a příkré plochy. Shrnutí, je to systém pro rychlé a přesné měření, snadno říditelný a

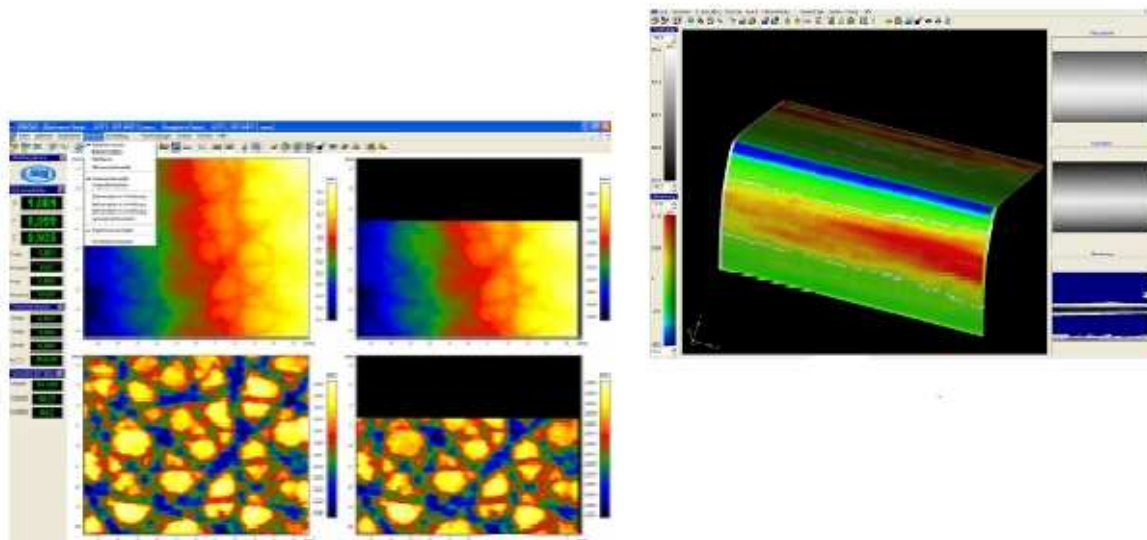
ovladatelný, který je nezávislý na okolním prostředí (výrobní podmínky, vibrace, světlo okolí). To všechno jsou rozhodující kritéria pro volbu této technologie.



Obr. 5-3 Měřící princip měřícího systému MicroCAD [24]



Obr. 5-4 Měřící systém MicroCAD s protokolem o měření [24]



*Obr. 5-5 Srovnávání struktury povrchu a tvaru pomocí softwaru ODS CAD [23]*

### 5.3 Walter – Helicheck Plus [7, 8, 32]

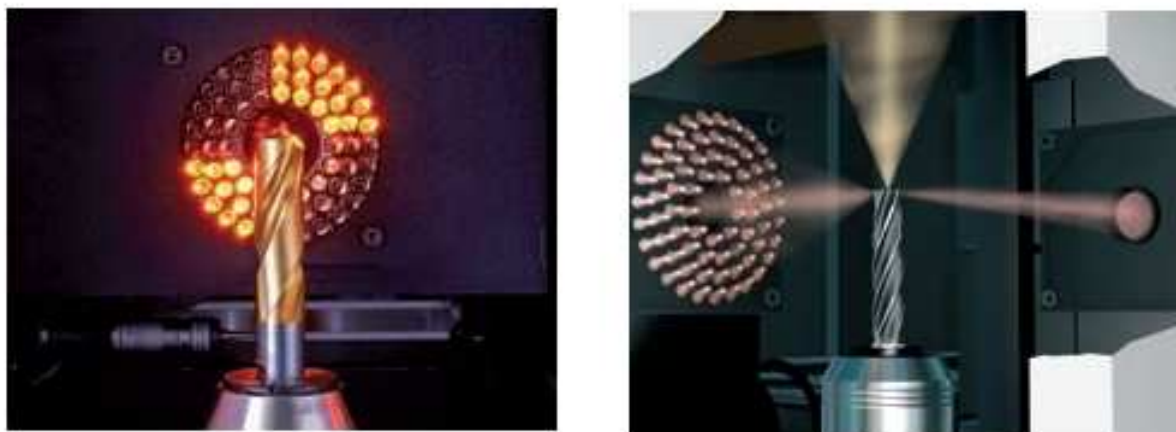
Bezkontaktní 4-osý CNC měřicí stroj se čtyřmi permanentně instalovanými CCD kamerami je vysoce výkonný a přesný měřicí systém pro bezdotykové komplexní měření rotačně symetrických nástrojů a výrobních součástí stejně jako brusných kotoučů. Všechny důležité parametry nástroje jsou automaticky měřeny díky technologii rozmístění a osvětlení kamer. Jakmile jsou jedny hodnoty vygenerovány, obvyklá měření mohou být opakována tak často, jak je požadováno. Věrohodné výsledky měření jsou absolutně garantovány a jsou nezávislé na obsluze stroje. To šetří čas i peníze.



*Obr. 5-6 Měřicí stroj Helicheck Plus [32]*

Díky novému senzoru zaoblení ostří je nyní možné přesně na mikrometry změřit čelní břit a zaoblení obvodového břitu na řezných nástrojích. Přesné měření zaoblení hran je výchozím bodem pro další optimalizaci nástrojů s ohledem na jejich životnost a řezný výkon. Zaoblení hran se přitom stále zmenšuje a stává se částečně asymetrickým. Přesně změřit zaoblení ostří bylo doposud velmi obtížné.

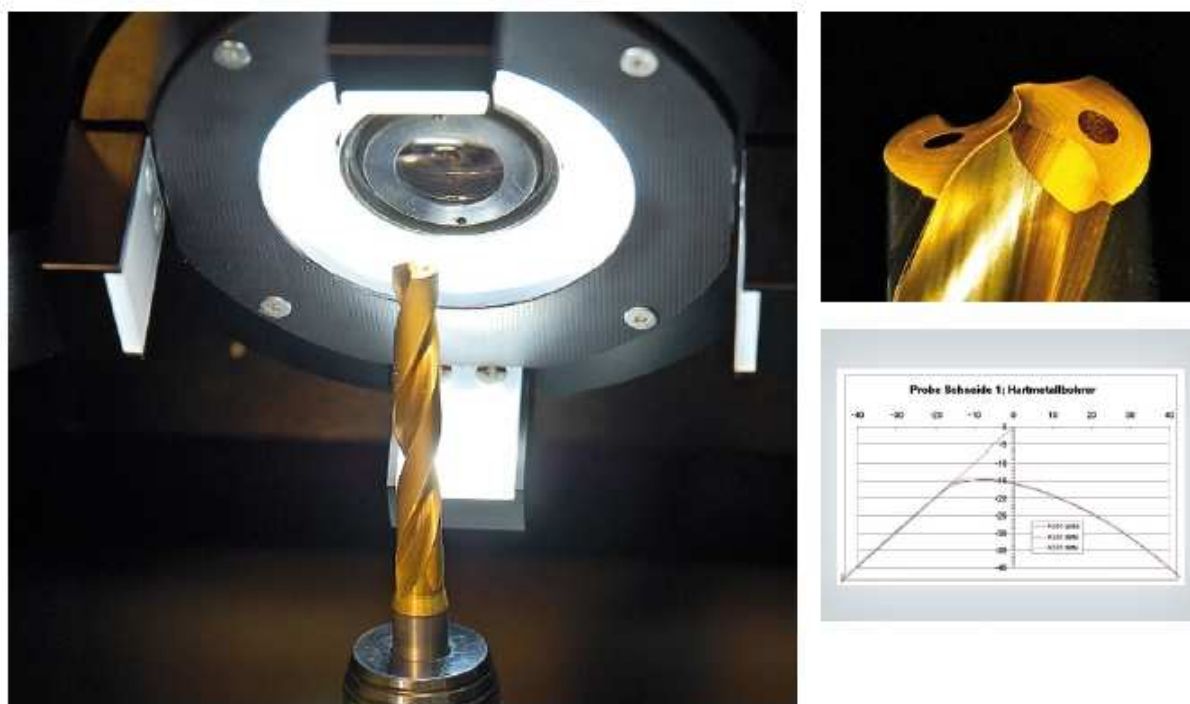




**Obr. 5-7 LED osvětlení a 3D snímání bez natáčení kamer [7]**

Senzor zaoblení ostří je k dispozici jako opce pro měřicí stroje Helicheck Pro/Plus. Pracuje bezdotykově po automatickém proměření nástroje. Pro měření mikrogeometrie ostří je k dispozici CNC řízená přesná otočná osa pracující v rozsahu úhlů 0 až 90° s rozlišením pozic po 0,001° a tisícinásobně zvětšující přesná optika. Systém může být používán pro měření zaoblení hran od 3 do 50  $\mu\text{m}$ . Velikost rádiusů vyžaduje speciální postup měření. Senzor zaoblení ostří rovněž umožňuje změření kompletní mikrogeometrie ostří a všech ostatních parametrů na mikronástrojích. Kombinace více kamer umožňuje jednodušší orientaci na nástroji a odpadá tak časově náročné přenastavování polohy. Měření trvá méně než jednu minutu podle složitosti.

Je použitelný také pro standardní úkoly, jako je měření úhlu hřbetu nebo čela, když se normální senzor dostane na hranici svých možností. Rozlišení polohy založené na korespondující řídicí jednotce je 0,004  $\mu\text{m}$  a segmentové LED osvětlení zachytí všechny geometrie do sebemenšího detailu. Díky tomu je k dispozici komplexní systém pro všechny měřicí úlohy na nástroji.



**Obr. 5-8 Měření tvaru a rozměrů zaoblení řezné hrany [7]**

## 5.4 Olympus – Lext OLS4000 [16, 18, 36]

Je zvláště vhodný pro nově vznikající aplikace v mikro- a nano-technologických odvětvích, která kladou stále vyšší nároky na nestandardní způsoby měření a kontrolu materiálů, miniaturních součástek a také na kontrolu drsnosti s přesností lepší než mikrometr. Lext OLS 4000 je konfokální laserový rastrovací mikroskop, umožňující zobrazení povrchů materiálů a součástí od přehledového, složeného z více zorných polí, až po submikronové s nestandardní rozlišovací schopností zobrazení 1 nm, se schopností velmi přesného 3D měření 0,8 nm a rozsahu zvětšení 108x až 17 280x, který uspokojí požadavky velmi náročných zákazníků. Navíc na rozdíl od elektronových mikroskopů se mohou vzorky umisťovat přímo na mikroskopický stolek bez použití vakuové komory. Pozorování vzorku probíhá v reálném čase. Mikroskop využívá polovodičového laseru o vlnové délce 405 nm s optickými prvky uzpůsobenými pro tuto krátkou vlnovou délku tak, aby se optimalizovala kvalita zobrazení a omezily se případné odchylky. Je schopen snímat i plochy pod úhlem 85°, což na předešlých verzích nebylo doposud možné. Motorizovaná otočná hlavice předchází dotyku se vzorkem a automaticky nastavuje optimální osvětlení. Hybridní tlumící mechanismus, složený ze spirálové pružiny a tlumící pryže, zajišťuje stabilní měřicí prostředí. Ovládací software poskytuje jednoduché, uživatelsky velmi příjemné rozhraní s pokročilou analýzou obrazu, funkce průvodce pro nováčky a přehledné snadno pochopitelné zprávy o měření.

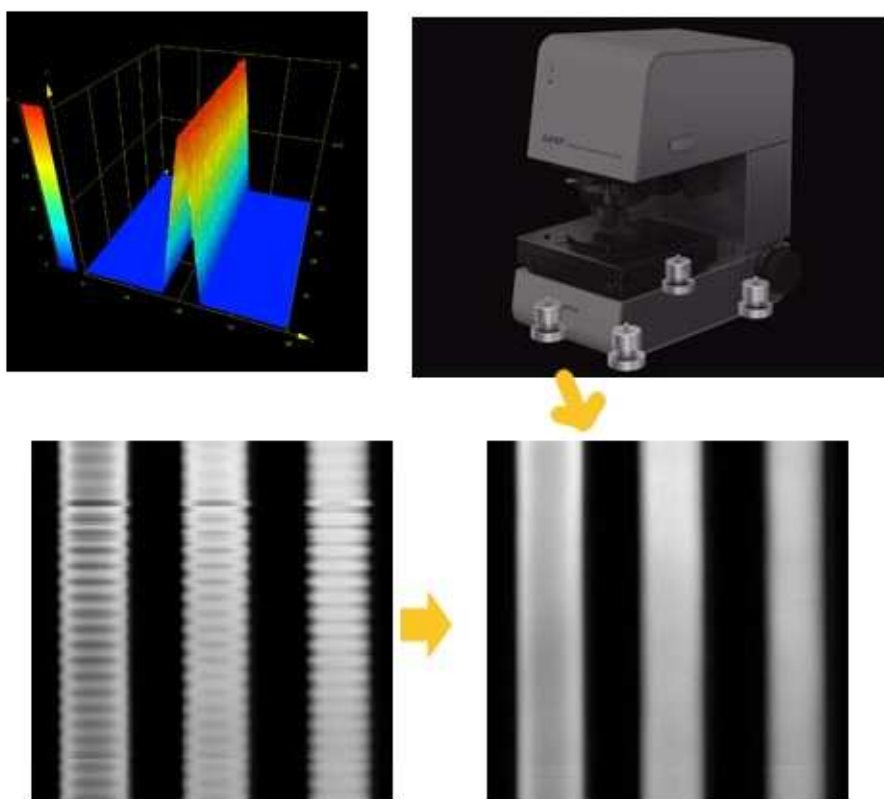
Základním principem konfokálního mikroskopu je to, že netvoří obraz najednou, ale bod po bodu řádkováním. Konfokální obrazy jsou vždy zaostřené a představují jednotlivé optické řezy vzorkem. Složení trojrozměrných obrazů vychází z možnosti postupného snímání desítek až stovek optických řezů v ose Z.



*Obr. 5-9 Duální konfokální mikroskop Lext OLS4000 [18]*

Další velkou výhodou takového zařízení je možnost využití laserového svazku společně s tradičními mikroskopovacími technikami (pozorování ve světlém/temném poli, polarizované světlo a D.I.C. interferenční kontrast). Tento nový konfokální laserový D.I.C. režim je zvláště užitečný pro zvýraznění jemných texturových změn při analýze povrchu. Umožňuje tak získat současně zobrazení vzorků ve třech rozměrech a ve skutečných barvách tím, že kombinuje laserové 3D zobrazení s plnobarevným zobrazením ve světlém poli, což je užitečné zejména při pozorování barevného vzorku.

Mikroskop se výborně uplatňuje při kontrole výroby komponentů s velmi malou tolerancí přesnosti výroby, lomových ploch, vodivých i nevodivých materiálů. Pro řízení kvality nabízí měření skutečných vzdáleností, objemů, ploch a průmětů, měření drsnosti povrchů, měření kontury a mnoho dalších funkcí přímo v 3D zobrazení. Konfokální laserový měřicí mikroskop Lext OLS 4000 nabízí nejen v metrologii nové možnosti kontroly materiálů, povlaků, elektrotechnických vzorků a součástek s vysokou přesností měření v 3D, ale hodí se zejména pro nově vznikající aplikace nano-technologickém odvětví.



*Obr. 5-10 Snímání strmého povrchu a hybridní tlumící mechanismus [18]*



## 6 POROVNÁNÍ MĚŘENÍ DOTYKOVOU A BEZDOTYKOVOU METODOU

Oba typy měření mají svoje výhody a nevýhody oproti druhé metodě, kterými se vzájemně odlišují. Již zřejmá zásadní odlišnost je ve způsobu snímání, jak už z názvu vyplývá. Určitě i možnosti všeobecného využití jsou mnohdy odlišné, ale mají společné to, že jsou všechny schopny vyhodnotit mikrogeometrii břitu nástroje. V následném textu budou nejprve samostatně srovnány parametry měření již zmíněných dotkových a následně bezdotkových metod a nakonec porovnány vzájemně výhody a nevýhody obou druhů metod.

### 6.1 Srovnání dotkových metod měření

	Marsurf LD120	Surfcom 5000	Hommel-Etamic T8000 RC	Form Talysurf Series 2
<b>Snímací systém (SS):</b>	optický	optický, laserinterferometrický	indukční	optický, interferometrický
<b>Rozlišení SS:</b>	2 nm	0,31 nm	1 nm	0,8 nm
<b>Měřicí rozsah SS:</b>	10 mm	13 mm	±300 μm	10 mm
<b>Rychlost měření posuvové jednotky (PJ):</b>	0,1-4 mm/s	0,03-3 mm/s	0,1-3 mm/s	0,5-10mm/s
<b>Rozlišení PJ:</b>	-	0,54 nm	0,1 μm	-
<b>Max. počet měřených bodů:</b>	bodová vzdálenost (0,05-1 μm)	150 000	-	120 000
<b>Měřicí síla:</b>	0,5-30 mN	0,75 mN	1,6 mN	1 mN
<b>Snímací hrot:</b>	diamant, 2 μm/90°	diamant, 2 μm/60°	diamant, 2 μm/60°	diamant, 2 μm/90°
<b>Rozšíření na 3D měření:</b>	verze XR20	ano	ano	ano
<b>Normalizované parametry:</b>	ano	ano	ano	ano
<b>Současné měření kontury a drsnosti:</b>	ano	ano	ne	ano
<b>Ostatní:</b>	magnetický upínač	technologie lineární motoru	uspořádání snímačů	systém PGI Plus

*Tab. 6-1 Porovnání dotkových metod měření*

Uvedená tabulka (**tab. 6-1**) zobrazuje čtyři typy dotkových metod měření, které byly podrobněji popsány výše. Vybrané parametry, jako druh snímacího systému, jeho rozlišení, rozsah měření, rychlost měření atd., mají za cíl udělat si představu o tom, která dotková metoda je neoptimálnější pro měření mikrogeometrie břitu nástroje. Všechna měřicí zařízení kombinují měření jak kontury povrchu, tak i jsou schopna vyhodnotit drsnost povrchu, a to dokonce v jedné pracovní operaci pomocí jednoho snímače kromě přístroje Hommel-Etamic, který měří každý z parametrů pomocí odlišného snímače, i když výrobce udává, že je možno využít oba snímače najednou. Možné to může být, ale každopádně každý snímač vyhodnocuje jiný povrch vzorku. Většinu metod lze také rozšířit na měření 3D topografie povrchu součásti a její vyhodnocení, ale oproti bezdotkovým metodám je takové měření náročné na čas a tím neproduktivní.

Postup měření je téměř stejný pro všechny metody. Po ustavení měřeného nástroje dojde k snímání jeho povrchu pomocí snímacího hrotu, který ho kopíruje a snímání profil je následně vyhodnocován pomocí softwaru příslušného zařízení a poté vyobrazen na monitoru. Obsluha si může na naměřeném profilu vyhodnotit jak samotné zaoblení a drsnost břitu, tak

také další parametry nástroje včetně těch normalizovaných (parametry P, R, W apod.). Všechno potřebné je přehledně vyobrazeno na automaticky vygenerovaném protokolu o měření. Kvalita snímku závisí na druhu snímacího elementu, systému a jeho rozlišení, rychlosti snímání a hustotě měřených bodů. Přesnější měřicí systém je optický na principu interferometru oproti indukčnímu vyhodnocování. Vysoké rozlišení snímacích systémů umožňuje velmi přesné a detailní měření kontury a drsnosti. Měřicí síly snímacího hrotu jsou natolik malé, že nepoškozují povrch a přesně ho kopírují a většinou jsou nastavitelné v určitém rozmezí.

Ze všech těchto podmínek a parametrů měření se zdá být nejlepší volba Surfcom 5000 od společnosti Zeiss, který má nejpřesnější vyhodnocovací systém, nabízí největší rozsah měření drsnosti s nejnižší rychlostí pojezdu díky patentované technologii lineárního motoru, je plně zakrytovaný a tím jsou nejvíce eliminovány vlivy okolního prostředí na průběh měření. Důležité je podotknout, že volba měřicího zařízení také hlavně závisí na pořizovací ceně, provozních nákladech, které zde nejsou hodnoceny z důvodu jejich nezveřejnění, a také na dalších specifických požadavcích zákazníka.

## 6.2 Srovnání bezdotykových metod měření

	IF EdgeMaster	MicroCAD <sup>premium</sup>	Helicheck Plus	Lext OLS4000
<b>Snímací systém:</b>	optický 3D	optický 3D	optický 4xCCD kamera	Optický, duální konfokální laserový
<b>Rozlišení vertikální:</b>	60 nm	0,2 μm	0,25 μm	1 nm
<b>Pracovní vzdálenost:</b>	3,5 mm/100x	-	-	0,35 mm/17 280x
<b>Rychlost skenování:</b>	10 μm/s	60 obrazů/s	-	-
<b>Vertikální opakovatelnost:</b>	25nm	-	4 nm	12 nm
<b>Max. počet měřených bodů:</b>	1x10 <sup>6</sup>	2x10 <sup>6</sup>	-	-
<b>Zvětšení:</b>	10-100x	-	1000x	108-17280x
<b>Min. měřený rádius:</b>	1 μm	2 μm	3 μm	-
<b>Doba vyhodnocení měření:</b>	30 s	6 s	závislé na počtu snímků	závislé na počtu snímků
<b>Rozměry [mm]:</b>	150x250x320	měřicí prostor 2,4x1,8x1,2	1682x1462x1775	276x358x405
<b>Normalizované parametry:</b>	ano	ano	ano	ano
<b>Osvětlení:</b>	LED	blue LED	LED	white LED
<b>Ostatní:</b>	Uzpůsobený přímo pro měření břitu nástroje	UV světlo	CNC rotační osa s přesností 0,0025°	tlumení vibrací, všestranné použití

**Tab. 6-2** Porovnání bezdotykových metod měření

Uvedená tabulka (**tab. 6-2**) zobrazuje čtyři typy bezdotykových metod měření, které byly podrobněji popsány výše. Vybrané parametry, jako druh snímacího systému, vertikální rozlišení, zvětšení, rychlost skenování atd., mají za úkol udělat si představu o tom, která metoda je neoptimálnější pro měření mikrogeometrie břitu nástroje. Jedná se o měřicí systémy, které snímají povrch nástroje pomocí velmi sofistikované optiky jako je CCD kamera, která transformuje 3D scénu na 2D obraz a přitom dochází ke ztrátě důležité informace o jedné souřadnici. Ztracenou informaci získáme použitím více snímacích kamer,

kteřé znají přesné vzájemné polohy oproti ostatním, nebo např. optickou interferometrií. Velmi propracované softwary poté automaticky vyhodnocují jednotlivé snímky a poté vyobrazí snímaný povrch na monitoru, kde může být dále upravován a vyhodnocován pomocí specifických softwarových modulů pro různé typy měřených parametrů.

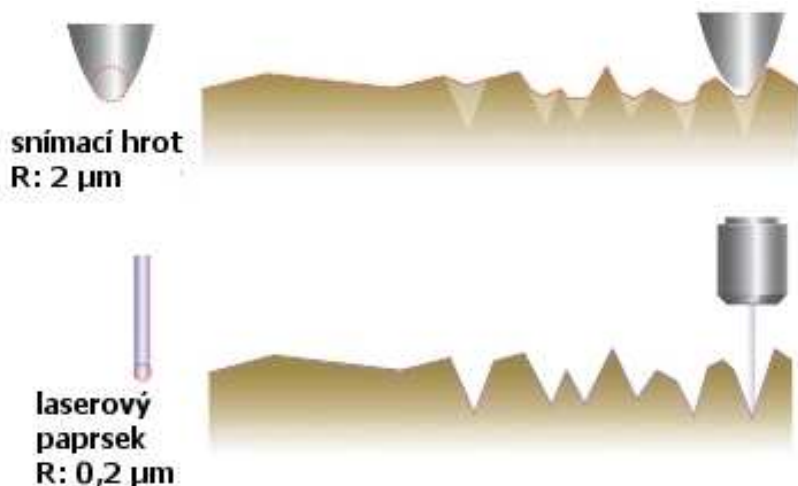
Všechny uvedené metody jsou schopny vyhodnotit zaoblení a drsnost povrchu břitu a další parametry (nástrojové úhly, normalizované P, R, W atd.) nejenom řezného nástroje. Všechny nástroje jsou měřeny bez ohledu na typ, materiál, úpravu povrchu ostří a depozici tenké vrstvy. Významnější odlišnost je v prostředí, ve kterém mohou pracovat a být nasazovány, a v jejich specifickém konstrukčním provedení pro specifické měřicí úlohy. Systém EdgeMaster je určený přímo do výroby pro kontinuální vyhodnocování parametrů břitu nástroje, na rozdíl od konfokálního mikroskopu Lext, který má nejširší spektrum využití z popsaných měřicích systémů. Výhoda Helicheck Plus je ta, že naměřená data mohou být odeslána pro statistickou procesní kontrolu v jakékoliv databázi nebo mohou být využita dalšími výrobními stroji nástrojů. Například přesné měření brusného kotouče z Helichecku může uspořit až polovinu času na nastavení brusky. U bezdotykových metod je velmi důležité precizní osvětlení snímané součásti, které je u všech metod zajištěno LED osvětlením. Dále je nutné, aby zařízení byla co nejméně citlivá na vliv okolního prostředí (vibrace, okolní světlo, teplota, prach). Nejlepší zařízení odolné proti okolním vlivům je zakrytovaný Helicheck, ale toho je dosaženo na úkor jeho rozměrů, které jsou oproti ostatním systémům mnohem větší. Nejlepšího vertikálního rozlišení (1 nm) a zvětšení (až 17280x) dosáhne samozřejmě konfokální mikroskop Lext a dokonce s velkou rezervou a ještě je schopen snímat strmé stěny (až pod 85°).

Ze všech těchto dostupných informací o parametrech jednotlivých měřicích systémů se zdá být nejlepší volba Helicheck Plus od výrobce řezných nástrojů Walter, který snímá 3D objekty pomocí čtyř CCD kamer speciálně rozmístěných, aby poskytovaly přesné a kvalitní snímky. Výrobce vyvinul speciální sestavu pro měření zaoblení řezné hrany a její drsnosti, která obsahuje speciální kameru se zvětšením 1000x, která je přimontována na vlastní CNC osu rotace s přesností natočení 0,0025°, a segmentové LED osvětlení. Dále propojení s ostatními stroji na výrobu nástrojů zkracuje jejich nastavení. Opět je nutné podotknout, že volba měřicího systému také hlavně závisí na pořizovací ceně, provozních nákladech, které nejsou zohledněny z důvodu jejich nezveřejnění, a na konkrétních požadavcích zákazníka.

## 6.3 Porovnání dotykových a bezdotykových metod měření

### 6.3.1 Měření mikro drsnosti a ploch [18]

Dotykové měřicí přístroje na měření drsnosti povrchu nejsou schopny snímat mikro nerovnosti povrchu menší než průměr špičky snímacího hrotu. Laserový mikroskop toto dovoluje ve vysokém rozlišení díky malému průměru laserového paprsku. Tato nevýhoda dotykových metod je vyobrazena na obr. 6-1.

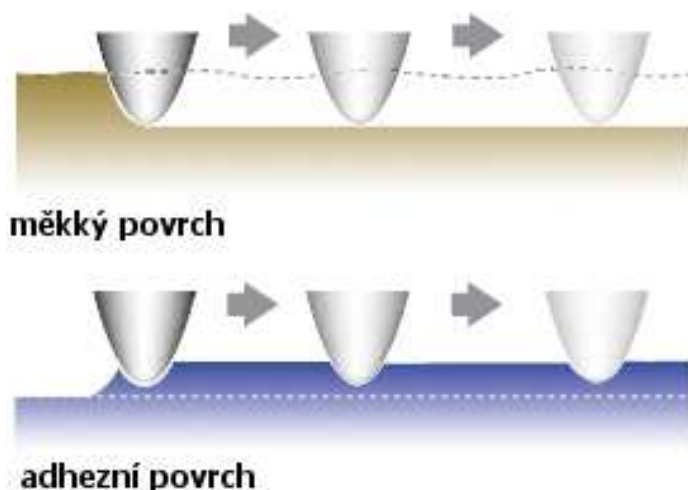


*Obr. 6-1 Porovnání snímání hrotem a laserovým paprskem [18]*

Dále dotykovými metodami nelze měřit mikro plochy, protože snímací hrot není schopen dosáhnout těchto ploch. Laserový mikroskop může správně identifikovat měřicí pozici a lehce provést měření drsnosti v požadované mikro oblasti.

### 6.3.2 Měření měkkých a adhezních ploch [18]

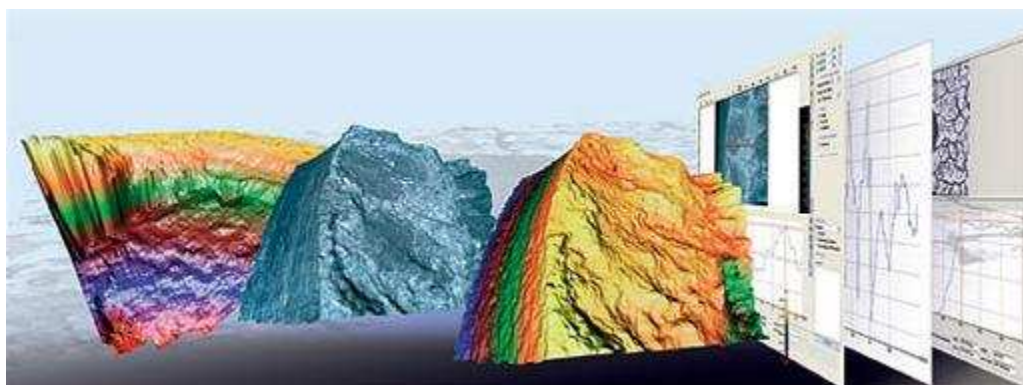
Jelikož dotykové metody používají tvrdý snímací hrot, ten může poškrábat měkký povrch měřené součásti nebo ho poškodit či zdeformovat. Na druhou stranu u adhezních povrchů by se mohl snímací hrot přichytit k snímané součásti a mohl by být poškozen po ukončení snímání. Díky tomu je nemožné získat správné hodnoty měření. Zdeformování povrchu měkkého povrchu a snímání adhezního povrchu je ilustrováno na obr. 6-2.



*Obr. 6-2 Snímání hrotem měkkého a adhezního povrchu [18]*

### 6.3.3 Profilová drsnost vs plošná drsnost

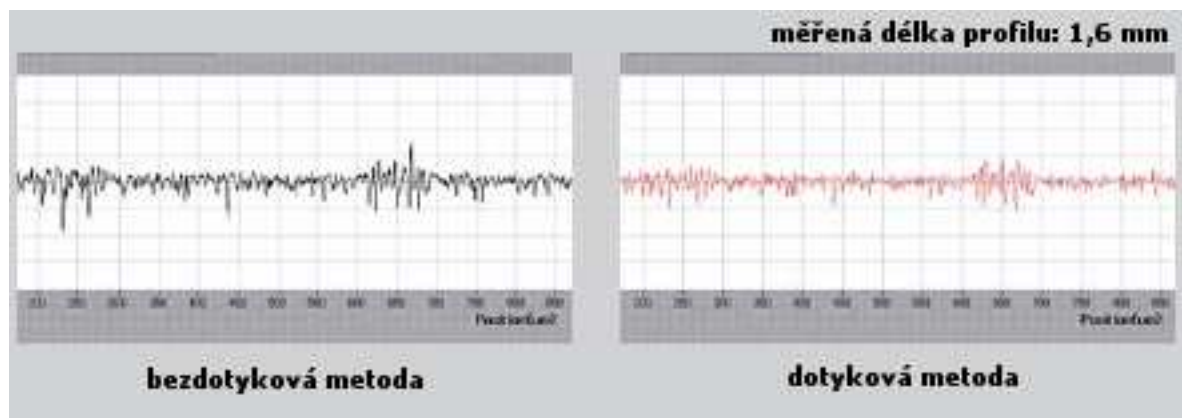
3D snímáním je získána tzv. plošná drsnost na rozdíl od metod dotykových, kde se získá pouze drsnost snímaného profilu. Když se snímanou plochou vede kolmý řez, tak se získá drsnost profilu daného vybraného řezu, která se také získá z dotykové měřicí metody. Díky několika stovkám takových řezů je získána komplexní informace o průběhu drsnosti a zaoblení po celé řezné hraně a to je velice užitečné pro další úpravy bříty nástroje apod.. Dotykovou měřicí metodou je možno provést měření na více místech řezné hrany, ale proti bezdotykové metodě je to velice zdlouhavé a pracné. Zefektivnit měřicí proces pro tento případ a získat 3D informace o snímaném povrchu pomocí dotykové metody je možné rozšířením měřicího zařízení o 3D vyhodnocování topografie povrchu.



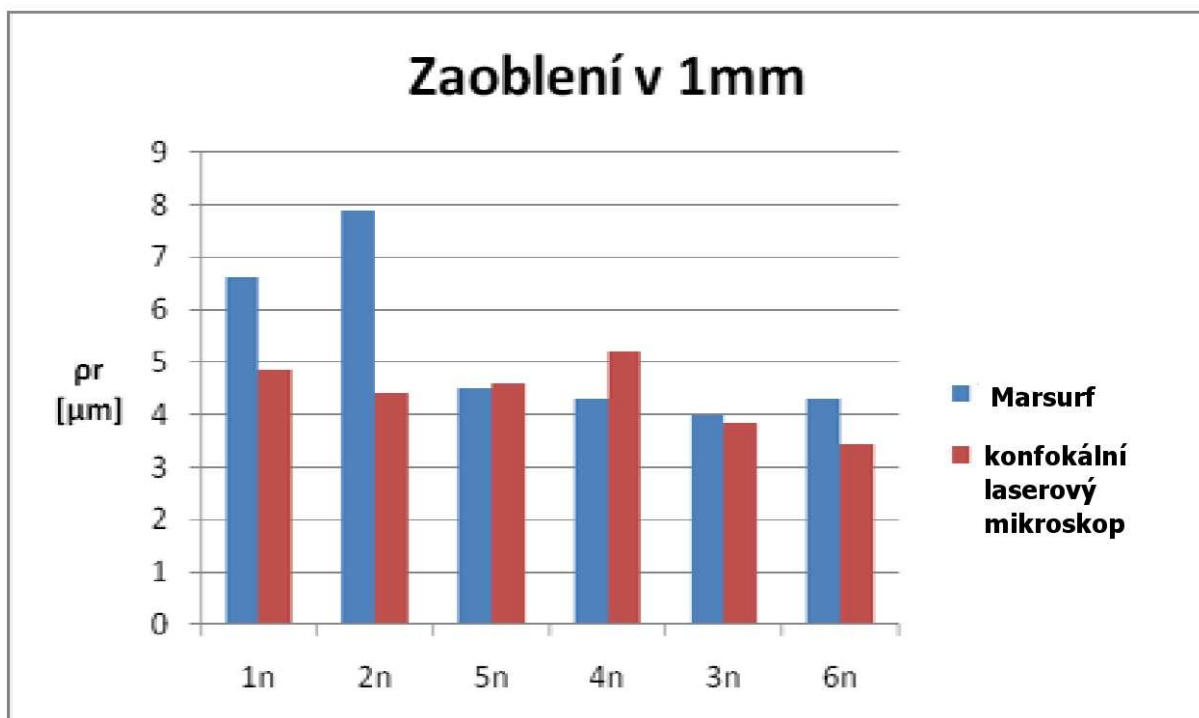
Obr. 6-3 Snímky povrchů z 3D optického bezdotykového systému [11]

### 6.3.4 Porovnání naměřených hodnot obou variant [34]

Snímáním stejného vzorku bezdotykovou a dotykovou metodou bylo zjištěno, že je možno drsnost povrchu vzorku změřit oběma použitými přístroji, ale nelze mezi sebou hodnoty porovnat, protože drsnost povrchu sledovaná konfokálním laserovým mikroskopem byla měřena ve vzdálenosti 100  $\mu\text{m}$  od řezné hrany, avšak u dotykového přístroje Marsurf bylo nutné proměřit drsnost povrchu dále od ostří z důvodu použití snímacího hrotu, který snímá drsnost po určité dráze a při nastavení hrotu blíže řezné hraně, která je např. ve šroubovici, by mohlo dojít k tzv. sjetí z čelní plochy přes ostří bříty a tím by došlo k znehodnocení výsledků.



Obr. 6-4 Porovnání profilu drsnosti měřeného dotykovou a bezdotykovou metodou [18]



**Obr. 6-5** Porovnání hodnot zaoblení měřených dotykovou a bezdotykovou metodou na šesti stejných nástrojích [36]

Dále bezdotykové metody umožňují měření i složitějších nástrojů jako jsou různé druhy fréz, vrtáků, nástrojů na závity, u kterých by bylo měření dotykovými metodami nepřesné a velice náročné jak na čas, tak praxi obsluhy nebo dokonce nemožné s dnešními dotykovými měřicími systémy. Z porovnání obou základních měřících metod je možno vyčíst, že bezdotykové metody měření jsou vhodnější pro detailnější popis mikro struktur povrchu a lze je použít tam, kam už možnosti dotykových metod nesahají. Poskytují rychlé a přesné snímání povrchu i ve 3D. Optický snímací systém společně s vyhodnocovacím softwarem umožňuje spoustu specifických módů snímání a vyhodnocení zákazníkem požadovaných parametrů. Všechny tyto výhody jsou ale vykoupeny ve většině případů pořizovací cenou a vyššími provozními náklady ve většině případů.



## 7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce měla za úkol zjistit základní informace týkající se mikrogeometrie břitu, jaký má vliv její úprava na řezný proces. Dále v návaznosti na to vyhledat informace o některých úpravách mikrogeometrie břitu nástroje, které mohou být používány a jejich porovnání. Aby se provedená preparace ostří mohla zkoumat a hodnotit, tak je zapotřebí umět změřit důležité parametry, které jsou samotnou preparací upravovány. Sledované parametry po úpravě jsou zaoblení břitu řezné hrany a její drsnost povrchu, a proto další cíl byl zjistit možné používané metody měření zmíněných parametrů. Poslední cíl, který souvisí s ekonomicko-technickými přínosy mikrogeometrie, byl zjistit možnou konkurenceschopnost úpravy a následné vyhodnocování mikrogeometrie v praxi, protože každá firma by se měla zajímat o to, zda se jí vložené investice do úprav a měření mikrogeometrie břitu do budoucna vyplatí a navrátí.

K základním parametrům řezného procesu patří typ a výkon stroje, obráběný materiál, typ obrábění, řezných podmínek a také vlastnosti řezného nástroje. Jedna z důležitých vlastností je geometrie nástroje, která se dělí z hlediska velikosti zkoumaných parametrů na makrogeometrii a právě v této práci řešenou mikrogeometrii. Mikrogeometrie se zabývá pouze řeznou hranou, která je nejdůležitější částí nástroje, a konkrétně útvary v řádech mikrometrů. Vyhodnocuje se již zmíněná drsnost a zaoblení ostří. Při správně volbě a následné úpravě těchto parametrů byl zaznamenán pozitivní vliv na řezný proces a depozici tenké vrstvy: na jedné straně zvýšení přilnavosti tenké vrstvy, odolnost proti jejímu odlupování, rovnoměrnosti nanášené vrstvy, tvorby a odchodu třísek, životnosti nástroje, přesnosti řezného procesu a na druhé straně snížení řezných sil, napětí a teplotního namáhání při stejných podmínkách procesu, opotřebení břitu nástroje, drsnosti povrchu, možnosti vylamování ostří a dalších defektů na řezné hraně. Navíc nástroj neztrácí náhle rozměr po najetí do řezu díky vylamování zrn na ostří. Z výše uvedených pozitivních vlivů úpravy mikrogeometrie břitu plyne jasná volba na preparaci ostří.

Úpravu mikrogeometrie břitu nástroje, jak bylo zjištěno, můžeme rozdělit podle typu úběru materiálu na mechanické, tepelné a chemické. Tato práce se zabývala převážně mechanickými metodami a jednou tepelnou úpravou (obrábění laserovým paprskem). Podstatou většiny mechanických metod je působení abrazivních částic, jejichž účinek na obrobek je zprostředkován vhodným médiem (vzduch, pasta, vlákno, magnet atd.), a tím dochází k úběru materiálu. Požadovaná preparace ostří je vytvořena rychlostí a dobou pohybu abraziva nebo obrobku. Vlastní zaoblení řezné hrany je závislé na použité metodě a jeho velikost a tvar závisí na použitém médiu. Většinu metod lze použít i k očištění povrchu od mikročástic vznikajících např. po depozici. Po porovnání všech zmíněných metod úprav vzhledem k dostupnosti, dosahované kvalitě a vhodnosti pro široké spektrum nástrojů byla zvolena jako nejoptimálnější volba mechanická úprava omílání v granulátech.

Po provedené úpravě je podstatné umět změřit parametry břitu nástroje, aby bylo možné dále vyhodnotit nejlepší volbu zaoblení a drsnosti povrchu břitu nástroje pro konkrétní typ řezných nástrojů. Pro měření obou parametrů je možné použít dvě základní metody, a to dotykové a bezdotykové měření. Dotykové měření spočívá ve snímání povrchu pomocí snímacího hrotu, který kopíruje tvar povrchu měřené součásti. Bezdotykové měření snímá povrch pomocí optických snímacích systémů (CCD kamery) a na principu interferometrie. Bezdotykové oproti dotykovým metodám jsou schopny snímat povrch ve 3D mnohem produktivněji a poskytují komplexnější informace o měřeném povrchu. Všechny bezdotykové metody jsou schopny vyhodnotit zaoblení a drsnost povrchu břitu a další parametry řezného nástroje bez ohledu na jeho typ, materiál, úpravu povrchu ostří a depozici tenké vrstvy. Ze



všech dostupných informací o parametrech jednotlivých měřících systémů byla vybrána jako nejlepší volba bezdotykový měřící systém Helicheck Plus od výrobce řezných nástrojů Walter, který snímá 3D objekty pomocí čtyř CCD kamer speciálně rozmístěných, aby poskytovaly přesné a kvalitní snímky. Výrobce vyvinul speciální sestavu pro měření zaoblení řezné hrany a její drsnosti, která obsahuje speciální kameru se zvětšením 1000x, která je přimontována na vlastní CNC osu rotace s přesností natočení  $0,0025^\circ$ , a segmentové LED osvětlení. Dále propojení s ostatními stroji na výrobu řezných nástrojů zkracuje jejich nastavení.

Jako poslední cíl bylo zjistit přínosy úprav mikrogeometrie a její konkurenceschopnost v praxi. Otázka přínosů byla již z velké části zodpovězena o pár odstavců výše a vyplývá z pozitivních vlivů úpravy břitu nástroje nejenom na řezný proces, ale i proces depozice tenké vrstvy. Jelikož preparovaný povrch má lepší adhezi a rovnoměrnost nanášené tenké vrstvy, tak díky tomu nedochází k snadnému odlupování tenké vrstvy během řezného procesu a nástroj má několikanásobně zvýšenou životnost při stejných řezných podmínkách oproti nepreparovanému nástroji. Další výhodou spočívá, že stejný nástroj je schopen obrábět za vyšších řezných podmínek, protože je sníženo napětí na břit, lépe se utváří a odvádí tříska a tím je břit méně tepelně namáhán, a proces obrábění je mnohem více produktivní. Z uvedeného vyplývá, že jsou ušetřeny náklady na přebroušování a výměnu nástrojů během procesu. Dále je spotřebováno méně řezných nástrojů a obrobena více obrobků za stejnou dobu v porovnání s neupraveným řezným nástrojem. Aby všechny tyto ušetřené náklady byly vyšší než investice do pořízených technologií úpravy, musí být zvolena správná metoda úpravy a správné parametry zaoblení břitu nástroje touto metodou vytvořené. Každý podnik musí pečlivě zvážit podle jeho velikosti, finančních výnosů, rozmanitosti výroby apod., jaká metoda úpravy a měření mikrogeometrie je pro něj nejoptimálnější. Například menší výrobní podnik při pořízení technologie úpravy obrábění laserovým paprskem a konfokálního laserového mikroskopu na měření není ani schopen využít produktivitu a všechny funkce zařízení, aby návratnost pořizovacích nákladů byla vůbec reálná. Takové neuvážené rozhodnutí by mohlo být pro podnik naopak ztrátové a nevýhodné.

Při neustálém vývoji technologií a zvyšujících se požadavcích zákazníka se současně s tím zvyšují i požadavky na řezné nástroje, které mají být spolehlivé s co nejdelší životností a za přijatelnou cenu. Aby výrobci řezných nástrojů mohli udržet krok s tímto trendem, je nezbytné se zabývat i otázkami mikrogeometrie břitu, protože je to stále otázka dalšího vývoje v budoucnosti. Bez nadsázky řečeno, mikrogeometrie břitu je již v současnosti neodmyslitelně spjata s výrobním a životním cyklem řezného nástroje, tudíž i s technologií obrábění.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Combined roughness and contour measurement. *Jenoptik* [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.jenoptik.com/en-combined-roughness-and-contour-measurement>
- [2] Cutting Edge Preparation and Surface Issue. *International high speed steel research forum*[online]. 2005 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: [http://www.hssforum.com/Aachen/07\\_Rech.pdf](http://www.hssforum.com/Aachen/07_Rech.pdf)
- [3] Cutting Edge Preparation of Precision Cutting Tools by Applying Micro-abrasive Jet Machining and Brushing. *Universität Kassel* [online]. 2009 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-712-8.volltext.frei.pdf>
- [4] Form Talysurf INTRA. *IMECO TH* [online]. 2004 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: [http://www.imeco-th.cz/Download/Prospekty/INTRA\(CZ\).pdf](http://www.imeco-th.cz/Download/Prospekty/INTRA(CZ).pdf)
- [5] Form Talysurf Series 2. *Ilusionideas.com* [online]. 2002 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.ilusionideasweb.com.ar/vaccaro/pdfs/Form-Talysurf-Series-2.pdf>
- [6] GFM Optical 3D measurement of Forming Dies. *GFMesstechnik* [online]. 2011 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: [http://www.gfm3d.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=190:praegeste-mpel&catid=43&Itemid=56&lang=en](http://www.gfm3d.com/index.php?option=com_content&view=article&id=190:praegeste-mpel&catid=43&Itemid=56&lang=en)
- [7] Helicheck Optical CNC measuring machines. *Grinding.com* [online]. 2011 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: [http://www.grinding.com/pages\\_blocks\\_v3/images/links/Walter\\_Measuring\\_Machines\\_2009.pdf](http://www.grinding.com/pages_blocks_v3/images/links/Walter_Measuring_Machines_2009.pdf)
- [8] Helicheck Plus - 4-axes CNC measuring machine. *Walter Machines* [online]. 2011 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.walter-machines.com/en/products/measuring/helicheck-plus.html>
- [9] HOMMEL-ETAMIC T8000 RC. *Jenoptik* [online]. 2009 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: [http://www.jenoptik.com/Internet\\_EN\\_HOMMEL-ETAMIC\\_T8000\\_RC](http://www.jenoptik.com/Internet_EN_HOMMEL-ETAMIC_T8000_RC)
- [10] CHLADIL, Josef. *Přípravky a nástroje: Část - Obrábění*. Vyd. 3. VUT Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992. 157 s.
- [11] IF - EdgeMaster Automatic Cutting Edge Measurement. *Alicona* [online]. 2011 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.alicon.com/home/products/Cutting-edge-measurement-in-production-IF-EdgeMaster-Alicona.pdf>
- [12] KADLEC, Pavel. *Účinek zaoblení břitu na dynamiku řezného procesu při frézování monolitní frézou z SK*. Plzeň, 2009. Diplomová práce. ZČU, FST, KTO.
- [13] Katalog měřících přístroj. *HOMMEL CS s.r.o.* [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://hommel-etamic.cz/sites/default/files/download/Hommel-katalog-2011.pdf>
- [14] KATALOG VÝROBNÍ MĚŘICÍ TECHNIKA. *Mahr Metrology* [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.mahr.cz/scripts/relocateFile.php?ContentID=10456&NodeID=13723&FileID=11024&ContentDataID=39579&save=0>
- [15] Laser beam machining—A review. *ScienceDirect.com* [online]. 2007 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695507002325>

- [16] Laserový konfokální řádkovací mikroskop. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2007, č. 070443 [cit. 2012-05-22]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserovy-konfokalni-radkovaci-mikroskop.html>
- [17] Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, č. 060732 [cit. 2012-05-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
- [18] LEXT OLS4000 Laser Confocal Microscopes. *Olympus* [online]. 2011 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/en/metrology/ols4000/>
- [19] Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing. *ScienceDirect.com* [online]. 2009 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013609003057>
- [20] Magneto-abrasive machining for the mechanical preparation of high-speed steel twist drills. *ScienceDirect.com* [online]. 2009 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785060900095X>
- [21] MarSurf UD/LD120. *Mahr Metrology* [online]. 2011 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.mahr.cz/index.php?NodeID=3162>
- [22] Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, č. 070438 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mechanicka-uprava-monolitnich-nastroju-pred-pvd-povlaky.html>
- [23] Micro-grooving of glass using micro-abrasive jet machining. *ScienceDirect.com* [online]. 2003 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603010185>
- [24] MikroCAD 3D surface measurement. *GF Messtechnik* [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: [http://www.gfm3d.com/images/stories/i\\_produkthinformationen/GFM-MikroCAD-Brochure-Apr-2011.pdf](http://www.gfm3d.com/images/stories/i_produkthinformationen/GFM-MikroCAD-Brochure-Apr-2011.pdf)
- [25] MikroCAD premium. *GF Messtechnik* [online]. 2011 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: [http://www.gfm3d.com/images/stories/i\\_produkthinformationen/MikroCADpremium\\_cutting%20edge\\_en.pdf](http://www.gfm3d.com/images/stories/i_produkthinformationen/MikroCADpremium_cutting%20edge_en.pdf)
- [26] Nástroje a nástrojové soustavy. *Společnost pro obráběcí stroje* [online]. 2009 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: [http://www.czspos.cz/akce/20100225.emo2009/25\\_nastroje\\_a\\_nastrojove\\_soustavy.pdf](http://www.czspos.cz/akce/20100225.emo2009/25_nastroje_a_nastrojove_soustavy.pdf)
- [27] Nekonenční metody obrábění – 4. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2008, č. 080304 [cit. 2012-05-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- [28] OTEC The Importance of Cutting Edge Preparation. *Ebookbrowse.com* [online]. 2006 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://ebookbrowse.com/otec-the-importance-of-cutting-edge-preparation-for-customers-12-06-ppt-d144163136>
- [29] PILEČKOVÁ, Zuzana. *Vliv kvality břitvy čelní válcové frézy na trvanlivost při obrábění nástrojové oceli*. Plzeň, 2009. Diplomová práce. ZČU, FST, KTO.
- [30] Pokrok v měření a hodnocení struktury povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2001, č. 010408 [cit. 2012-05-21]. ISSN 1212-2572.

Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pokrok-v-mereni-a-hodnoceni-struktury-povrchu.html>

- [31] Povrchová úprava materiálů pomocí laseru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2005, č. 050440 [cit. 2012-05-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/povrchova-uprava-materialu-pomoci-laseru.html>
- [32] Přesné měření zaoblení ostří. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2011, č. 111021 [cit. 2012-05-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/presne-mereni-zaobleni-ostri.html>
- [33] Přístroje na měření kontur a jakosti povrchu. *Merici-pristroje.cz* [online]. 2005 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: [http://www.merici-pristroje.cz/fileadmin/user\\_upload/Zeiss\\_TSK/Konturografy\\_a\\_drnomery\\_cz.pdf](http://www.merici-pristroje.cz/fileadmin/user_upload/Zeiss_TSK/Konturografy_a_drnomery_cz.pdf)
- [34] Technologie úprav nástrojů před a po povlakování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2005, č. 050929 [cit. 2012-05-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-uprav-nastroju-pred-a-po-povlakovani.html>
- [35] Úpravy břitů a povrchů řezných nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, č. 070601 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/upravy-britu-a-povrchu-reznych-nastroju.html>
- [36] VLIV TVARU ŘEZNÉ HRANY NÁSTROJE NA PRŮBĚH ŘEZNÉHO PROCES. In: *Technická Univerzita v Košiciach* [online]. 2009 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/15-2009/pdf/147-150.pdf>
- [37] Vývoj strojírenské měřicí techniky. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003, č. 030655 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyvoj-strojirenske-merici-techniky.html>