

# Testování kvality PVD povlaků na řezných nástrojích

Bc. Petr Král

---

Diplomová práce  
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Král**  
Osobní číslo: **T12504**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Řízení jakosti**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Testování kvality PVD povlaků na řezných nástrojích**

Zásady pro vypracování:

1. Teorie obrábění
2. Teorie řezné geometrie nástrojů vrtáků
3. Metody povlakování
4. Hodnocení kvality povlaků
5. Zpracování a vyhodnocení výsledků měření

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího diplomové práce**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Josef Hrdina**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**10. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce:

**12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



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

Příjmení a jméno: KRAL PETR.....

Obor: R.3.....

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 28.4.2014.....

  
.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá metodami obrábění, problematikou tvrdých, otěruvzdorných povlaků nanesených technologií PVD na vrtací řezné nástroje. Hodnotí se drsnost vrtaných děr, opotřebení na řezné části nástroje, tloušťka a tvrdost nanášených vrstev.

Klíčová slova: povlakování, metoda PVD, měření kvality povlaků, šroubový vrták, teorie vrtání, obrábění.

## **ABSTRACT**

This dissertation addresses various metalworking machining methods and examines the effects of hard abrasion-resistant coatings applied onto drilling tools by a PVD technology. It evaluates roughness of drilled holes, wear of the tools' cutting part and thickness and firmness of the coating layers applied onto the tool.

Keywords: Coating process, PVD method, coating quality control, twist drill, theory of drilling, machining

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří se podíleli na této diplomové práci. Firmě Vasmu s.r.o za poskytnutí realizace mé diplomové práce, firmě Ionbond CzechCoating s.r.o. za poskytnutí povlaků na nástroje, firmě M&V, spol. s.r.o Divize POSTIMZET PLUS za poskytnuté odborné konzultace při vrtacích zkouškách. V neposlední řadě bych také svoje díky věnoval panu Ing. Hrdinovi za vedení celé práce.

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

VE ZLÍNĚ

.....

PODPIS

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ZÁKLADY OBRÁBĚNÍ</b> .....	<b>11</b>
1.1 KONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ (TRÍSKOVÉ) .....	11
1.1.1 Metoda soustružení .....	11
1.1.1.1 Technologická charakteristika .....	12
1.1.1.2 Nástroje .....	13
1.1.1.3 Upínání nástrojů a obrobků.....	13
1.1.1.4 Stroje .....	14
1.1.2 Metoda frézování .....	14
1.1.2.1 Technologická charakteristika .....	14
Válcové frézování .....	15
Čelní frézování.....	16
Okružní frézování .....	16
Planetové frézování.....	17
1.1.2.2 Nástroje .....	17
1.1.2.3 Upínání nástrojů a obrobků.....	18
1.1.2.4 Stroje .....	18
1.1.3 Metoda broušení.....	19
1.1.3.1 Základní metody broušení .....	19
1.1.3.2 Brousící nástroje .....	22
1.1.3.3 Stroje .....	22
1.1.4 Metody na obrábění válcových děr .....	23
1.1.4.1 Vrtání a vyvrtávání .....	23
1.1.4.2 Vyhrubování, vystružování a zahlubování .....	24
1.1.5 Další metody obrábění .....	24
1.1.5.1 Hoblování a obrážení .....	24
1.1.5.2 Protahování a protlačování .....	25
1.2 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ.....	26
1.2.1 Elektroerozivní obrábění .....	27
1.2.2 Obrábění paprskem plazmy.....	29
1.2.3 Obrábění laserem .....	30
1.2.4 Obrábění paprskem elektronů .....	31
1.2.5 Obrábění iontovým paprskem .....	32
1.2.6 Elektrochemické obrábění.....	32
1.2.7 Chemické obrábění.....	34
1.2.8 Obrábění vodním paprskem .....	34
1.2.9 Ultrazvukové obrábění .....	35
<b>2 OBRÁBĚNÍ VRTÁNÍM</b> .....	<b>37</b>
2.1 KINEMATICKÁ CHARAKTERISTIKA PŘI VRTÁNÍ .....	38
2.2 ZÁKLADNÍ VZTAHY A VELIČINY VRTÁNÍ.....	38
2.3 PRŮŘEZ TRÍSKY .....	39
2.4 ŘEZNÉ SÍLY .....	40
<b>3 POVLAKOVÁNÍ NÁSTROJŮ</b> .....	<b>42</b>



3.1	ROZDĚLENÍ POVLAKŮ.....	43
3.1.1	Metoda CVD .....	44
3.1.2	Metoda PVD.....	46
3.1.2.1	Napařování.....	47
3.1.2.2	Naprašování .....	48
3.1.2.3	Magnetronové naprašování.....	49
3.1.2.4	Nejčastěji používané PVD povlaky .....	49
<b>4</b>	<b>MĚŘENÍ KVALITY POVLAKŮ .....</b>	<b>51</b>
4.1	MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	51
4.1.1	Měření mikrotvrdomosti .....	51
4.2	MĚŘENÍ ADHEZE A KOHEZE .....	52
4.2.1	Vnikací metoda (Mercedes test).....	52
4.2.2	Vrypová metoda ( Scratch test).....	52
4.3	MĚŘENÍ TLOUŠTKY POVLAKŮ.....	53
4.3.1	Kalotest .....	53
4.4	DALŠÍ METODY MĚŘENÍ POVLAKŮ .....	54
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>NÁVRH EXPERIMENTU .....</b>	<b>57</b>
5.1	ZKUŠEBNÍ STROJ.....	57
5.2	NÁSTROJE NA OTVORY .....	58
5.3	OBRÁBĚNÝ MATERIÁL.....	59
5.4	OPOTŘEBENÍ OSTRÍ.....	60
5.4.1	Průběh opotřebení .....	61
5.5	DRSNOST OBROBENÉ PLOCHY.....	63
5.6	TLOUŠŤKA VRSTVY .....	65
5.7	TVRDOST POVLAKU .....	65
<b>6</b>	<b>VÝSLEDKY ZKOUŠEK A JEJICH VYHODNOCENÍ.....</b>	<b>67</b>
6.1	VELIKOST OPOTŘEBENÍ .....	67
6.2	HODNOTY DRSNOSTI .....	72
6.3	TLOUŠŤKY VRSTVY POVLAKŮ .....	80
6.4	TVRDOST VRSTVY POVLAKU .....	81
6.5	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	84
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>86</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>88</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>93</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>96</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>97</b>

## ÚVOD

V době, ve které žijeme, jde strojírenský průmysl technologicky rychle dopředu. V oblasti vývoje obráběcích strojů, tak hlavně v oblasti vývoje výkonných řezných nástrojů, a tím spojené jejich povrchové úpravy.

V diplomové práci na téma „Testování kvality PVD povlaků na řezných nástrojích“, jsou objasněny některé záležitosti v oblasti povlakování metodou PVD. Diplomová práce se dělí na 2 hlavní části. Teoretickou a praktickou část.

V teoretické části jsou uvedeny a popsány základní metody třískového obrábění. U metody obrábění vrtáním jsou vysvětleny doprovodné jevy a veličiny, které vznikají při této metodě. Teoretická část dále rozděluje a popisuje nekonvenční metody obrábění. V poslední části se práce zabývá rozbohem a přehledem povlakovacích metod. Jejich rozdělení a způsoby nanášení na řezné nástroje. Popsány jsou zde nejběžnější používané povlaky a jejich měření, které se potom využili v praktické části.

Praktická část je zaměřena na měření vrtáků s různými druhy povlaků. Vrtáky jsou povlakovány jednovrstvou a dvouvrstvou. V prvé řadě se bude měřit tloušťka a tvrdost jednotlivých povlaků. Druhé měření je zaměřeno na opotřebení hlavního břitu vrtáku, za kolik vrtaných děr bude nutno vrták přebrousit a znovu napovlakovat a kolik děr jsme schopni vyvrtat maximálně. V neposlední řadě se bude měřit drsnost odvrtných děr. Výsledky práce pak budou zpracovány v programu Microsoft Excel.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ZÁKLADY OBRÁBĚNÍ

Obrábění jako vědní obor studuje, zkoumá a analyzuje vzájemné souvislosti a faktory obráběcího procesu jako integrální složky výrobního procesu strojírenských součástí. Obráběcí proces se realizuje v obráběcím systému, který lze obecně členit na subsystemy obráběcích strojů, řezných nástrojů, manipulačních prostředků a obráběcího prostředí. Objektem obráběcího procesu je obrobek a základním výstupem obráběcího systému jsou příslušné hodnoty. [1]

Metody obrábění lze rozdělit podle různých hledisek, např. podle charakteru práce existují ruční (pilování, sekání, zaškrabávání, atd.) a strojní metody obrábění, podle charakteristických znaků se metody obrábění dělí následovně:

- Metody obrábění pomocí nástrojů s definovanou geometrií (soustružení, frézování, vrtání, vystružování, zahlubování, vyvrtávání, obrážení, hoblování, protahování, atd.) neboli „Konvenční metody obrábění (třískové)“.
- Metody pomocí nástrojů s nedefinovanou geometrií (dokončovací metody - broušení, honování, lapování superfinišování, atd.)
- Nekonvenční metody obrábění (elektroerozivní obrábění, chemické obrábění, obrábění ultrazvukem, obrábění elektronovým paprskem, obrábění vodním paprskem, atd.)
- Úpravy obrobených ploch (válečkování, hlazení, brokování, bationování, leštění atd.) [2,3]

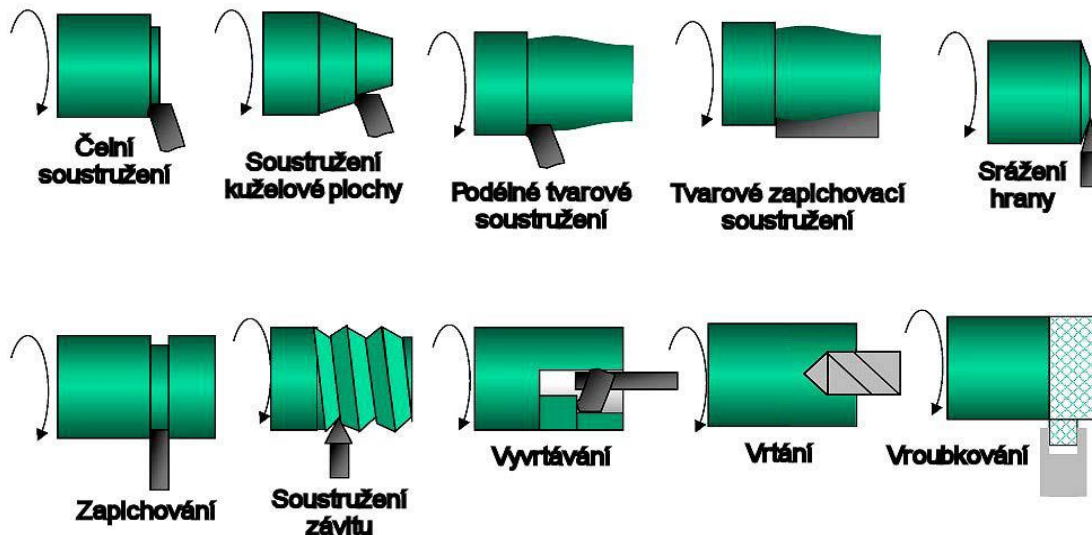
### 1.1 Konvenční metody obrábění (třískové)

Jedná se o metody, při kterých polotovar dostává požadovaný tvar a rozměr finální strojní součástky úběrem materiálu z povrchové vrstvy.

#### 1.1.1 Metoda soustružení

Soustružení je obráběcí metoda používaná pro zhotovení součástí rotačních tvarů, při nichž se většinou používají jednobřité nástroje různého provedení. Z mnoha hledisek představuje soustružení nejjednodušší způsob obrábění a také velmi frekventovanou metodu využívanou ve strojírenství.

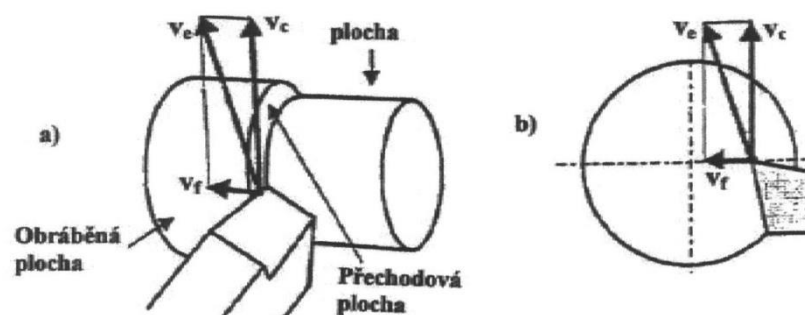
Soustružením lze obrábět vnější a vnitřní válcové, kuželové i tvarové plochy, rovinné čelní plochy a zápichy (Obr. 1). Na soustruzích lze dále vrtat, vyvrtávat, vystružovat, řezat závit, vroubkovat, válečkovat, hladit, leštit, vyrábět hřbetní plochy tvarových fréz podsoustružováním apod. [1,3]



Obr. 1. Základní práce na soustruhu [3]

### 1.1.1.1 Technologická charakteristika

Hlavním pohybem při soustružení je rotační pohyb obrobku, přičemž rychlost hlavního pohybu je současně řeznou rychlostí  $v_c$ . Nástroj koná vedlejší pohyby  $v_f$ , tj. podélný posuv, rovnoběžný s osou otáčení obrobku, a příčný posuv, kolmý k ose obrobku. Výsledkem podélného posuvu (Obr. 2a) je válcová plocha a výsledný řezný pohyb  $v_e$  má tvar šroubovice, výsledkem čelního posuvu (Obr. 2b) je čelní rovinná plocha. [1,4,5]



Obr. 2. Druhy soustružení [2]

a) podélné b) čelní

### 1.1.1.2 Nástroje

Nejpoužívanějšími nástroji pro obrábění jsou soustružnické nože. Jedná se o jednobřité nástroje jednoduchých tvarů. Základními prvky soustružnických nástrojů jsou:

- tvar řezného klínu,
- materiál řezné části,
- průřez tělesa nástroje.

Z technologického hlediska rozdělujeme nože:

- Radiální nože – nejčastěji používané. Lze je rozdělit podle konstrukce (celistvé, s pájenými břitovými destičkami, s vyměnitelnými břitovými destičkami), směru posuvového pohybu (pravé, levé), podle směru obrábění (obrábění vnějších nebo vnitřních ploch), podle tvaru nože (přímé, ohnuté).
- Prizmatické nože
- Kotoučové
- Tangenciální

### 1.1.1.3 Upínání nástrojů a obrobků

Upínání soustružnických nožů do univerzálních soustruhů by mělo být jednoznačné a spolehlivé s minimálním vynaložením. Mělo by být lehce výškově přestavitelné. Nože se upínají do různých otočných hlav (až 4 nože současně) nebo upínek.

U revolverových a speciálních soustruhů se nože upínají do speciálních držáků umístěných v zásobníku. Ty jsou řešeny tak, že se seřizování provádí mimo pracovní prostor. Odsud se pak automaticky přesouvají do obráběcího procesu. [2]

Upnutí obrobků má být spolehlivé, jednoduché, rychlé, vykazovat dostatečnou tuhost a zajistit jednoznačnou polohu obrobku vůči nástroji. Mezi nejběžnější upínání obrobků patří:

- Upnutí mezi hroty – nejpřesnější.
- Upnutí do univerzálního sklíčidla – Sklíčidla jsou tří nebo čtyřčelist'ová. Pohyb jednotlivých čelistí může vzájemně vázaný.
- Upínání do kleštin – pro výrobky kruhového a šestihranného průřezu

- Na upínací lící desku

#### **1.1.1.4 Stroje**

Soustružnické stroje představují největší podíl strojírenské obráběcí techniky. V obráběcích provozech strojírenských podniků se vyskytují ve velkém počtu typů a vykazují různý stupeň automatizace.

Z konstrukčně technologického hlediska se rozlišují:

- Hrotové
- Revolverové
- Svislé
- Speciální

Podle stupně automatizace:

- Ručně ovládané
- Poloautomatické
- Automatické

#### **1.1.2 Metoda frézování**

Frézování je obráběcí metoda, při které se materiál obrobku odebrává břity otáčejícího se nástroje. Posuv nejčastěji koná součást, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, vícené CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky.

##### **1.1.2.1 Technologická charakteristika**

Z technologického hlediska se v závislosti na aplikovaném nástroji rozliší frézování válcové (frézování obvodem) (Obr. 3) a frézování čelní (frézování čelem nástroje) (Obr. 4). Od těchto základních způsobů se odvozují některé další způsoby, jako jsou frézování okružní (Obr. 5) a planetové (Obr. 6).

### *Válcové frézování*

Převážně se uplatňuje při práci s válcovými a tvarovými frézami. Zuby jsou pouze po obvodu nástroje, hloubka řezu se nastavuje v rovině kolmé na osu frézy a na směr posuvu. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení nástroje. V závislosti na smyslu otáčení nástroje rozlišujeme dva druhy válcového frézování.

- **Nesousledné** (Obr. 3a) – Smysl rotace nástroje je proti směru posuvu obrobku. Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální.

**Výhody** – trvanlivost nástroje nezávisí na okujích, písčitém povrchu obrobku;

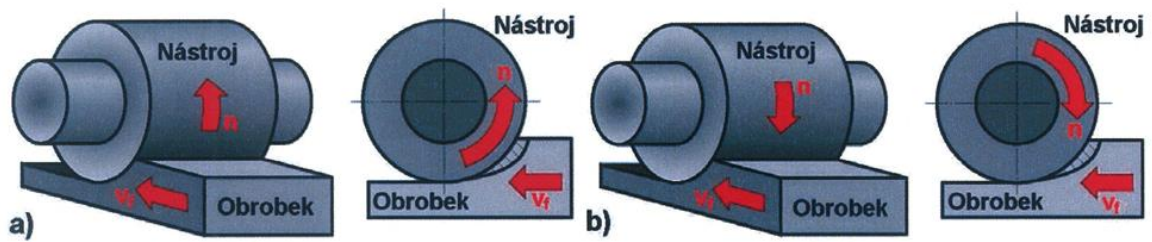
- není zapotřebí vymezování vůle mezi posuvovým šroubem a maticí stolu stroje;
- menší opotřebení šroubu a matice,
- záběr zubů frézy při jejich vřezávání nezávisí na hloubce řezu

- **Sousledné** (Obr. 3b) – Smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka třísky vzniká při vnikání zubu frézy do obrobku. Obrobená plocha se vytváří, když zub vychází ze záběru. Tloušťka třísky se postupně mění z maximální hodnoty na nulovou.

**Výhody** – vyšší trvanlivost břitů, což umožňuje použití vyšších řezných rychlostí a posuvů;

- menší potřebný výkon;
- řezná síla přitlačuje obrobek ke stolu, takže lze použít jednodušší upínacích přípravků;
- menší sklon ke chvění;
- obvykle menší sklon k tvoření nárůstku;
- menší drsnost obrobeného povrchu

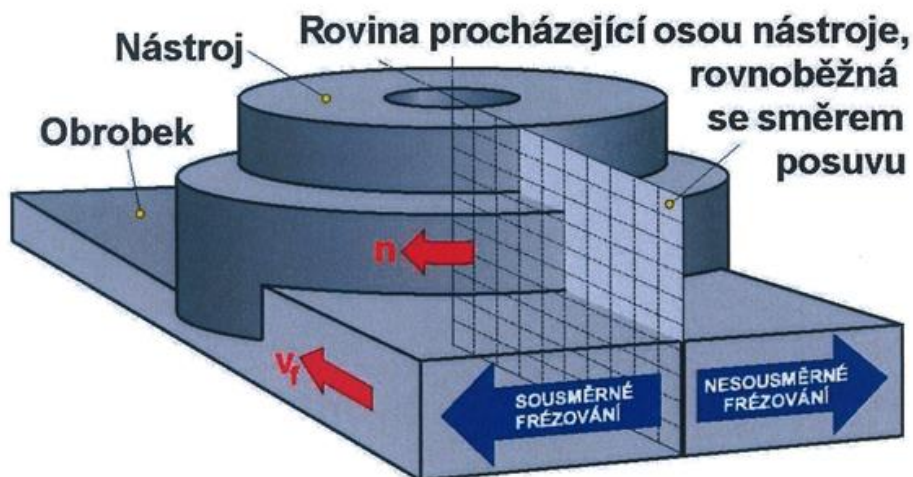




Obr. 3. Válcové frézování a) nesousledné b) sousledné [3]

### Čelní frézování

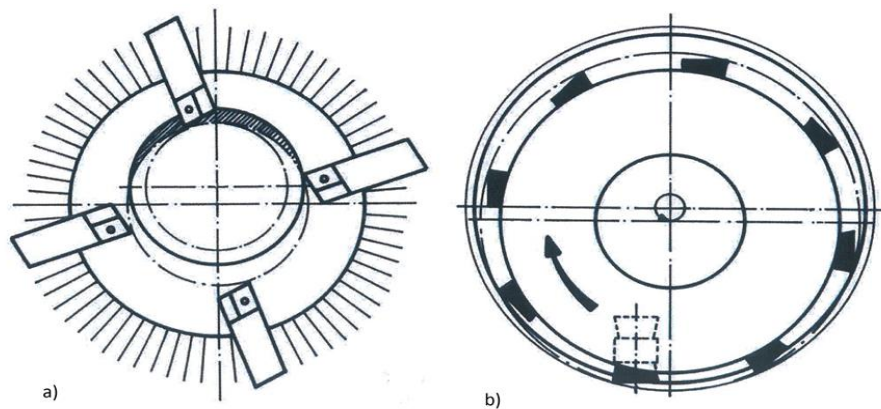
Uplatňuje se při práci s čelními frézami, kdy břity jsou vytvořeny na obvodu i čele nástroje. Podle polohy osy frézy vzhledem k frézované ploše se rozlišuje symetrické (osa nástroje prochází středem frézované plochy) a nesymetrické (osa nástroje je mimo střed frézované plochy). U čelního frézování pracuje fréza současně sousledně i nesousledně. (Obr. 4).



Obr. 4. Čelní frézování [3]

### Okružní frézování

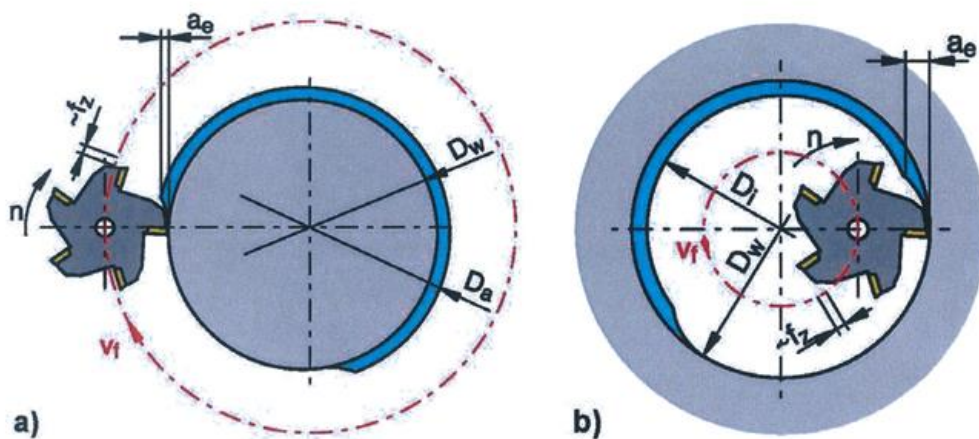
Používá se při obrábění dlouhých válcových tyčí a při výrobě závitů. Jako nástroj slouží frézovací hlava osazená několika noži. Při obrábění tyčí koná hlava většinou rotační a posuvný pohyb, při řezání závitů pouze rotační pohyb (Obr. 5).



Obr. 5. Kružní frézování a) vnější b) vnitřní [3]

### Planetové frézování

Uplatňuje se u číslicově řízených center vybavených kruhovou interpolací. Pohyb frézy může být řízen u těchto strojů po kružnici, takže lze obrábět části nebo i celé plochy. Frézování může být vnitřní nebo vnější (Obr. 6). [1,2,5]



Obr. 6. Planetové frézování a) vnější b) vnitřní [3]

#### 1.1.2.2 Nástroje

Frézy lze třídit do jednotlivých skupin z různých hledisek.

- Podle nástrojového materiálu břitu – frézy z rychlořezné oceli, slinutých karbidů, řezné keramiky kubického nitridu bóru nebo diamantu.
- Podle tvaru zubů – s frézovanými zuby nebo se zuby podsoustruženými.

- Podle konstrukčního uspořádání – celistvé frézy nebo se vkládanými řeznými destičkami z RO nebo ze SK.
- Podle geometrického tvaru – se dělí frézy na válcové nástrčné nebo se stopkou [1,4]

### **1.1.2.3 Upínání nástrojů a obrobků**

Pro upnutí nástrčných fréz na frézkách se používá frézovací trny. Frézovací trn je zakončený upínacím kuželem, který může být buď metrický, nebo Morse kužel.

Metrický a Morse kužel jsou samosvorné a mohou přenést krouticí moment z vřetena na frézovací trn. Krouticí moment z upínacího trnu na frézu se přenáší perem nebo kameny.

Frézy s válcovou stopkou se upínají do sklíčidla s upínací kleštinou. Frézy s kuželovou stopkou ISO se upínají buď přímo, nebo s redukcí do vřetene frézky. Upnutí je jištěno šroubem.

Současným záběrem několika zubů vznikají při frézování velké řezné síly, takže obrobek musí být řádně upnut. Je důležité, aby obrobek nebyl při upnutí deformován a aby byla obráběná i upínací plocha co nejbližší vřetenu.

Menší obrobky se obvykle upínají do běžných strojních svěráků, otočných a sklopných svěráků. K upnutí větších obrobků se používá rozličných upínacích pomůcek (upínky, opěrky, podpěrky). [4,5]

### **1.1.2.4 Stroje**

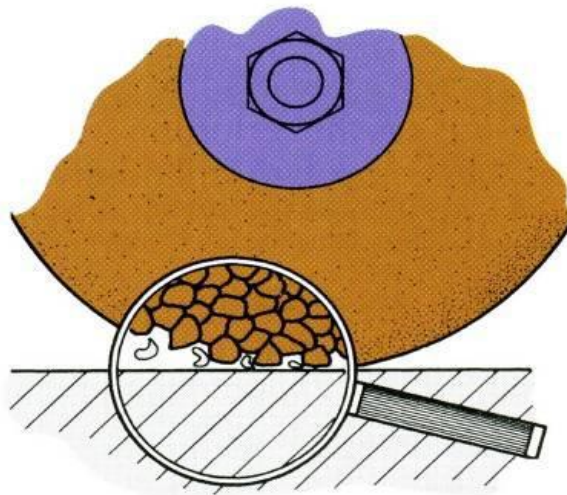
Frézky se vyskytují ve velkém počtu různých modifikací. Zpravidla se člení do 4 základních skupin – konzolové, stolové, rovinné a speciální. Z hlediska řízení pracovního cyklu se rozlišují frézky ovládané ručně a řízené programově (tvrdá automatizace, pružná automatizace).

Velikost frézky určuje šířka upínací plochy stolu a velikost kužele ve vřetenu pro upnutí nástroje. Dalšími důležitými technickými parametry jsou maximální délky pohybu pracovního stolu nebo vřeteníku, rozsah otáček, rozsah otáček vřetena a posuvů. Výkon elektromotoru pro otáčení vřetena.

### 1.1.3 Metoda broušení

Metoda broušení patří mezi abrazivní obrábění, které jsou charakterizovány použitím nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu.

Broušení je dokončovací operace, která se vyznačuje velkou přesností, správností geometrického tvaru, zpravidla velmi dobrou jakostí povrchu a patří k nejvýznamnější části technologií výroby dnešní doby. Operace broušení umožňuje vyšší tvarovou a rozměrovou kvalitu a v technologickém procesu je známa jako vysoce přesná dokončovací operace. Pro broušení je charakteristické rozložení zrn brousícího kotouče, která jsou rozložena nepravidelně na celém povrchu a odebírají velké množství malých nepravidelných třísek (Obr. 7). Třísky mají malý průřez (asi  $10^{-3}$  mm). Při broušení dochází v důsledku velkých plastických deformací a tření třísky k takovým vysokým teplotám (až  $1500^{\circ}\text{C}$ ), že se některé třísky roztaví a shoří (jiskření). [1,2]



Obr. 7. Nepravidelný úběr třísky [2]

Od jiných způsobů obrábění se práce brousícího kotouče liší schopností tzv. samoostření. Tato vlastnost brousícího kotouče s poměrně málo pevným zakotvením brousícího zrna ve vazbě kotouče. V důsledku zvýšení řezných sil na otupených zrnech se tato vylomí a jejich funkci přebírají zrna neotupená. [5]

#### 1.1.3.1 Základní metody broušení

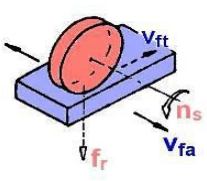
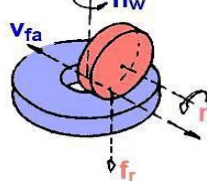
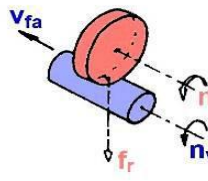
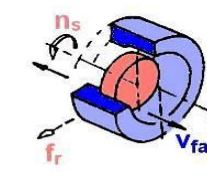
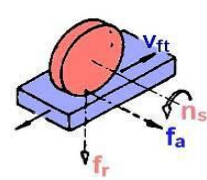
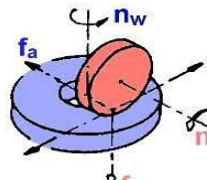
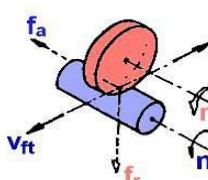
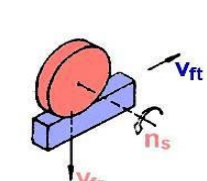
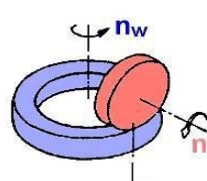
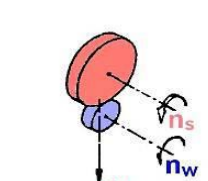
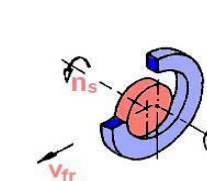
Brousící proces se uskutečňuje různými metodami, které se definují pro vhodná kritéria. Příslušné technologické charakteristiky se k těmto metodám vztahují.

Podle tvaru obrobeného povrchu a způsobu jeho vytváření se rozlišují: [5]

- Rovinné broušení – výsledkem je rovinná plocha,
- Broušení do kulata – výsledkem je rotační plocha,
- Broušení na otáčivém stole – broušení s rotačním posuvem,
- Tvarové broušení – broušení závitů, ozubených kol apod.
- Kopírovací broušení – broušení s řízenou změnou posuvu, NC stroje,
- Broušení tvarovými brousícími kotouči – profil brousícího kotouče určuje konečný profil obrobku.

Podle aktivní části brousícího kotouče se specifikuje: [5]

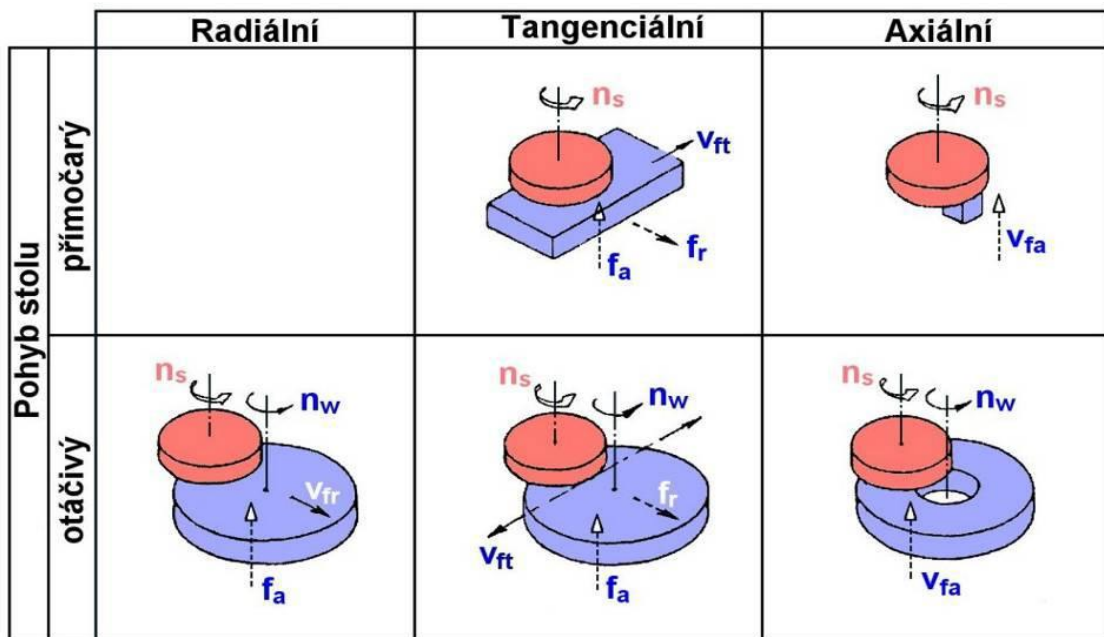
- Obvodové broušení – broušení obvodem kotouče (Obr. 8)

		Rovinné broušení - pohyb stolu		Broušení do kulata	
		přímočarý	otáčivý	Vnější plochy	Vnitřní plochy
Axiální					
Tangenciální					
Radiální					

$n_s$  - frekvence otáčení brousícího kotouče,  $n_w$  - frekvence otáčení obrobku,  
 $v_{fa}$  - axiální rychlost posuvu stolu,  $v_{ft}$  - tangenciální rychlost posuvu stolu,  
 $v_{fr}$  - radiální rychlost posuvu kotouče,  
 $f_a$  - axiální posuv stolu,  $f_r$  - radiální posuv kotouče

Obr. 8. Vybrané způsoby obvodového broušení [2]

- Čelní broušení – broušení čelem kotouče kolmým k jeho ose (Obr. 9)



$n_s$  - frekvence otáčení brousícího kotouče,  $n_w$  - frekvence otáčení obrobku,  
 $v_{fa}$  - axiální rychlost posuvu stolu,  $v_{ft}$  - tangenciální rychlost posuvu stolu,  
 $v_{fr}$  - radiální rychlost posuvu stolu,  
 $f_a$  - axiální posuv stolu,  $f_r$  - radiální posuv stolu

Obr. 9. Vybrané způsoby čelního broušení [2]

Podle vzájemné polohy brousícího kotouče a obrobku se charakterizuje [5]

- Vnější broušení – broušení vnějšího povrchu obrobku,
- Vnitřní broušení – broušení vnitřního povrchu obrobku.

Podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k brousícímu kotouči se definuje: [5]

- Axiální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s osou kotouče,
- Tangenciální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě  $D$ ,
- Radiální broušení – hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě  $D$  je radiální vzhledem ke kotouči,
- Obvodové zápichové broušení – posuv stolu je plynulý radiální,
- Čelní zápichové broušení – posuv stolu je plynulý axiální.

### **1.1.3.2 Brousící nástroje**

Brousící nástroj se skládá z brusných zrn, pojiva a pórů. Brusná zrna tvoří řezné klíny, póry mají funkci mezer, ve kterých se hromadí třísky a pojivo spojuje brusná zrna dohromady, čímž tvoří pevné těleso různých tvarů a velikostí. Podle geometrického tvaru rozdělujeme brousící nástroje na:

- kotouče (nejčastěji používané),
- segmenty,
- kameny.

Brusné nástroje posuzujeme podle:

- druhu brusného materiálu,
- zrnitosti brusiva,
- tvrdosti nástroje,
- struktury nástroje,
- druhu pojiva.

Brusné materiály se podle způsobu výroby rozdělují na přírodní a syntetické. [2]

### **1.1.3.3 Stroje**

Brousící stroje jsou vyráběny a dodávány v širokém sortimentu druhů a použití:

- Hrotové brusky – s posuvným stolem,  
– s posuvným vřeteníkem.
- Na díry
- Bezhruté brusky – pro vnější broušení,  
– pro vnitřní broušení.
- rovinné brusky – vodorovné,  
– svislé.
- Speciální – na jemné broušení,  
– na závity,

- na ozubení,
- na klikové hřídele atd. [2]

#### 1.1.4 Metody na obrábění válcových děr

Charakteristickým znakem těchto metod je rozměrový nástroj, který svým tvarem a dalšími technologickými vlastnostmi výrazně ovlivňuje parametry obrobené díry. V převážné většině případů se využívají vícebřité nástroje. Mezi metody obrábění válcových děr můžeme brát vrtání, vyvrtávání, vystružování, vyhrubování a zahlubování.

##### 1.1.4.1 Vrtání a vyvrtávání

Vrtání je výrobní metoda, kterou se zhotovují nebo zvětšují již předvrtané díry. [1] Podrobnější popis této metody je popsán v kapitole č. 2 „Obrábění vrtáním“.

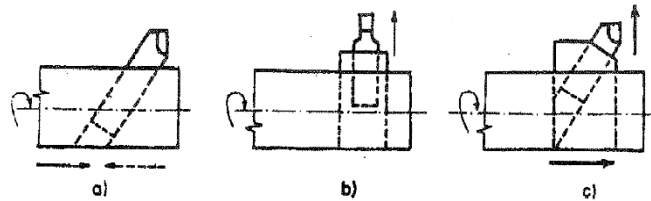
Vyvrtávání je metoda obrábění, při níž se rozšiřují předlité, předkované, předlisované, předvrtané nebo jinými způsoby předhotovené díry na požadovaný rozměr nebo tvar. Tato metoda se používá jak pro hrubování tak pro práci na čisto.

Při vyvrtávání se obrábí vyvrtávacími noži upevněnými ve vyvrtávacích tyčích nebo hlavách. Obráběné rotační plochy mají geometrický tvar válce, kužele, čelního mezikruží nebo rotační tvarové plochy. U složitějších obrobků mohou být tyto tygové prvky kombinovány v různém uspořádání na jedné, nebo více osách rozložených v rovině nebo prostoru.

Kinematika vyvrtávání může být identifikována několika způsoby (Obr. 10)

- Nástroj koná hlavní pohyb, vyvrtávací nůž je pevně uložen ve vyvrtávací tyči nebo na hlavě a obrobek koná podélný posuv do řezu (Obr. 10a).
- Nástroj koná hlavní pohyb, nůž se vysouvá z vyvrtávací tyče nebo hlavy plynule po přítržích radiálním posuvem v příčném směru (Obr. 10b).
- Nástroj nebo obrobek koná hlavní pohyb i podélný posuv, přičemž se nůž z tyče nebo hlavy plynule nebo po přítržích vysouvá v příčném směru radiálním posuvem (Obr. 10c).





Obr. 10. Kinematika vyvrtávání [5]

*a – podélný posuv nástroje; b – příčný posuv nástroje;*

*c – podélný a příčný posuv nástroje*

Při vyvrtávání se používají jako nástroje převážně vyvrtávací tyče a vyvrtávací hlavy, které se upínají do vyvrtávacích hlav.

Pro vyvrtávání se využívají především vodorovné vyvrtávačky, jemné vyvrtávačky a souřadnicové vyvrtávačky. [5]

#### **1.1.4.2 Vyhrubování, vystružování a zahlubování**

Při vyšších požadavcích na parametry přesnosti díry se tyto dokončují výhrubníky a výstružníky. Díry do průměru 10 se pouze vystružují, větší díry se vyhrubují a pak vystružují. Přídavky pro vyhrubování a vystružování závisí zejména na požadované přesnosti a drsnosti povrchu obrobené díry, ale i na druhu obráběného a nástrojového materiálu, konstrukci nástroje a dalších činitelích. [5]

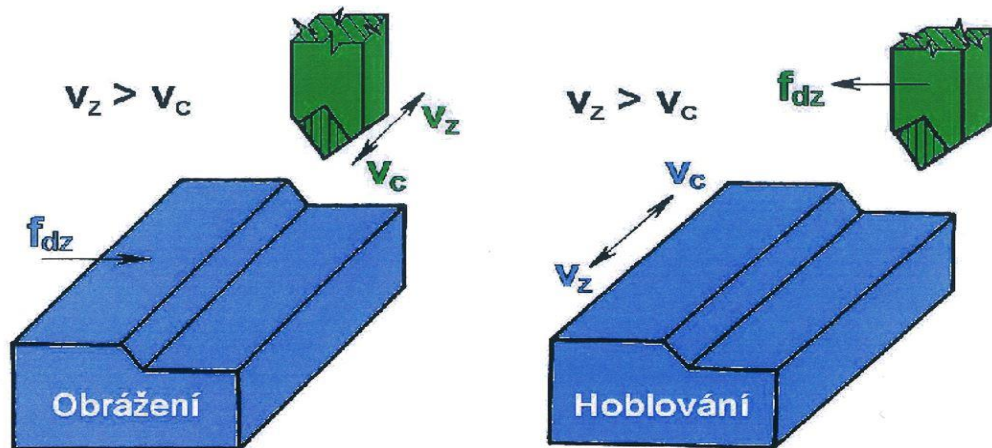
Zahlubování slouží k obrábění děr pro hlavy zapuštěných šroubů a k obrobení sousého válcového nebo kuželového zahloubení, popř. zarovnání čelní plochy. [2]

#### **1.1.5 Další metody obrábění**

Mezi další metody obrábění, které nejsou tak známe, ale jsou velice produktivní při obrábění, můžeme zmínit např. hoblování, obrážení, protahování, protlačování.

##### **1.1.5.1 Hoblování a obrážení**

Hoblování a obrážení se používá při obrábění plochých povrchů jednobřitým nástrojem. Kinematika řezného procesu je vyznačena na (Obr. 11). Hlavní pohyb je přímočarý vratný; při hoblování jej vykonává obrobek, při obrážení nástroj.



Obr. 11. Obrážení a hoblování [2]

Posuvný pohyb je přerušovaný, probíhá vždy na konci pracovního dvojzdvihu a je kolmý na směr hlavního pohybu.

#### Technologická specifika hoblovacího a obrážecího procesu:

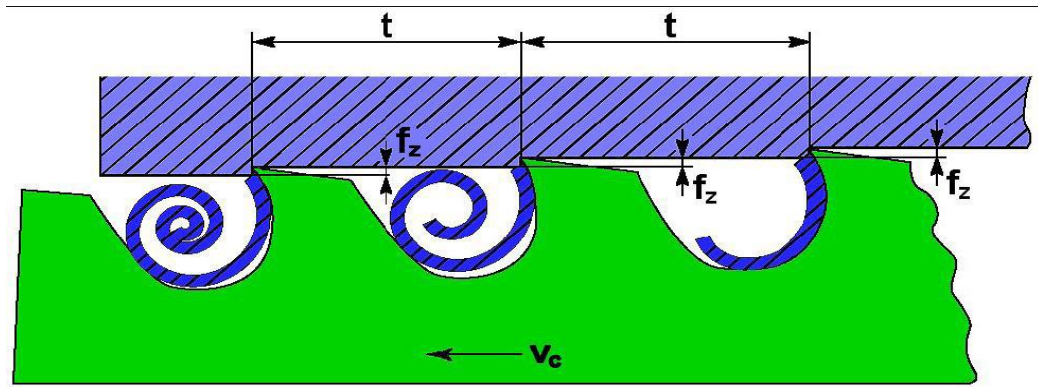
- při „vstupu“ nástroje do materiálu obrobku dochází k nárazům;
- jeden zdvih obrobku resp. nástroje probíhá „naprázdno“;
- při zpětném zdvihu obrobku resp. nástroje se provede oddálení nástroje od obrobkové plochy;
- rychlost zpětného zdvihu je vyšší než při pracovním zdvihu. [1]

#### 1.1.5.2 Protahování a protlačování

Protahování a protlačování je dokončovací obráběcí proces, při němž se vysoce produktivním způsobem obrábí tvarové díry (protahování a protlačování vnitřní) nebo vnější, převážně tvarové plochy (protahování a protlačování vnější).

Protahování a protlačování se od sebe liší jen konstrukcí nástroje, způsobem jeho upnutí a velikostí úběru materiálu, který je možné na jeden pracovní zdvih odebrat.

Podstatou protahování je postupný záběr jednotlivých po sobě následujících zubů protahovacího trnu do obráběného materiálu, a to při relativním pohybu nástroje vůči obrobku (Obr. 12).



Obr. 12. Protahování a protlačování [2]

Při protahování obrobek zpravidla stojí a nástroj se pohybuje řeznou rychlostí  $v_c$ ; přitom je záběru vždy současně tolik zubů protahovacího trnu, kolikrát se jejich rozteč  $t$  opakuje na délku obráběné plochy  $L$ .

## 1.2 Nekonvenční metody obrábění

Rostoucí rozsah využívání nekonvenčních metod obrábění je vyvolán vývojem a používáním materiálu s vysokou pevností, tvrdostí, houževnatostí, materiálu odolných proti opotřebení apod., které nelze standardními metodami hospodárně obrábět.

U těchto metod se nepoužívá standardní řezný nástroj, k úběru materiálu dochází účinky tepelnými, chemickými, nebo abrazivními, případně jejich kombinací. [1,7]

### Charakteristika nekonvenčních technologií:

- rychlost a výkonnost nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu;
- materiál nástroje nemusí být tvrdší a pevnější než obráběný materiál;
- možnost obrábění složitých tvarů;
- možnost zavedení plné automatizace;
- možnost zvýšení technologičnosti konstrukce, sériovost výroby a snížení pracnosti výroby;
- současně s výrobou dochází někdy k cílené změně vlastností povrchové vrstvy (odolnost proti korozi, pevnost apod.)

Podle převládajících účinků oddělování materiálu se NMO dělí na:

*a) Oddělování materiálu tepelným účinkem:*

- elektroerozivní obrábění (Elektro Discharge Machining – EDM),
- obrábění paprskem plazmy (Plasma Beam Machining – PBM),
- obrábění paprskem laseru (Laser Beam Machining – LBM),
- obrábění paprskem elektronů (Elektron Beam Machining – EBM),
- obráběním iontovým paprskem.

*b) Oddělování materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem:*

- elektrochemické obrábění (Elektro Chemical Machining – ECM),
- chemické obrábění (Chemical Machining – CM, CHM).

*c) Oddělování materiálu mechanickým účinkem:*

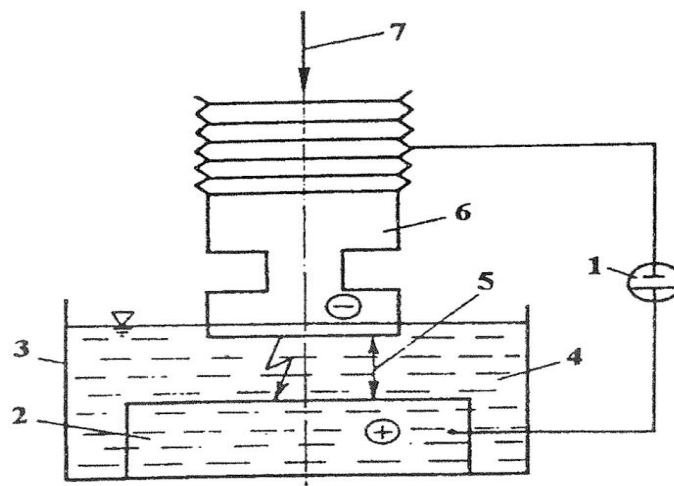
- ultrazvukové obrábění (Ultrasonic Machining – USM),
- obrábění paprskem vody (Water Jet Machining – WJM),
- vodní paprsek s proudem brusiva (Abrasive Water Jet Machining – AWJM)

Pro tyto technologie se používají CNC řízené stroje, které výrazně rozšiřují možnosti aplikace [1,6,7]

### **1.2.1 Elektroerozivní obrábění**

Elektroerozivní obrábění zahrnuje řadu metod, které mají jeden společný znak, úběr materiálu je vyvolán periodicky se opakujícími elektrickými, popř. obloukovými výboji.

Obrábění probíhá mezi dvěma elektrodami (katoda - nejčastěji ji tvoří obrobek a anoda - nejčastěji ji tvoří nástrojová elektroda) ponořenými do kapalného media, která se nazývá dielektrikum. Výboj mezi elektrodami vzniká v místě nejsilnějšího elektrického napětíového pole, které vytváří vodivý kanál umožňující přechod jiskry mezi nástrojem a obrobkem (Obr. 13)



Obr. 13. Princip elektroerozivního obrábění [1]

1- generátor; 2 – obrobek; 3 – pracovní vana; 4 - pracovní kapalina; 5 – pracovní mezera; 6 - nástrojová elektroda; 7 – posuvné nástrojové elektrody

Každá jiskra produkuje teplo dostatečné k roztavení nebo odpaření malého množství materiálu. Na povrchu zůstávají mikroskopické krátery.

Celkový proces odebrání materiálu se pak skládá ze střídajících se impulzních výbojů. Výboje jsou vyvolány stejnosměrným proudem, posuvový a vibrační je obvykle vyvozen střídavým proudem. Jako dielektrikum mohou být použity lehké strojní nebo transformátorové oleje či petrolej.

### ***Nástrojové elektrody***

Při řešení nástrojové elektrody je třeba vzít v úvahu její materiál, výrobu a opotřebování během daného procesu. Materiál elektrody má mít vysokou elektrickou vodivost, dobrou obrobitelnost, vysoký bod tavení apod. Jako materiál se nejčastěji používá grafit, měď, mosaz, wolfram.

Na opotřebení elektrody má největší vliv teplota tavení použitého materiálu. Nástrojové elektrody se zhotovují obráběním, lisováním, litím, práškovou metalurgií, stříkání kovů. [1,6]

### ***Technologické modifikace elektroerozivního obrábění***

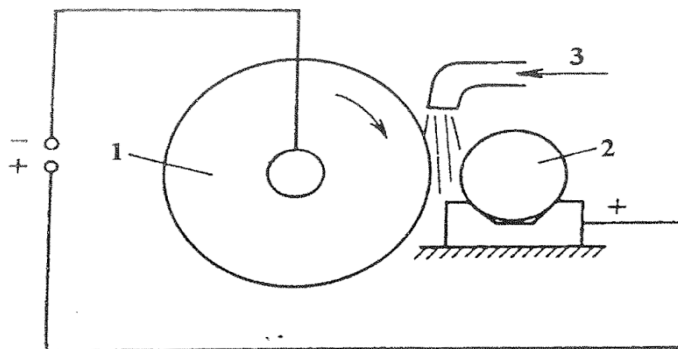
Elektroerozivní obrábění je možné v závislosti na fyzikálních podmínkách úběru materiálu rozčlenit na několik způsobů, z nichž nejznámější je elektrojiskrové a anodomechanické obrábění.

- **Elektrojiskrové obrábění**

Elektrojiskrové obrábění představuje základní typ elektroerozivních metod. Uplatňuje se při výrobě tvářecích zápusťek, forem pro lití, střížných nástrojů, obrábění SK, nástrojů pro lisování plastů apod. Při tomto způsobu se využívá elektrické jiskry mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem.

- **Anodomechanické obrábění**

Z hlediska odebrání materiálu je anodomechanické obrábění na rozhraní mezi elektroerozivním a elektrochemickým obráběním. Závisí na energetických parametrech. Vyšší napětí a větší proudové hodnoty znamenají elektroerozivní metodu a naopak. Proces probíhá při vysokých teplotách, přičemž roztavený kov je z místa obrábění odstraňován otáčejícím nástrojem. Pracovní prostor je zaplaven kapalinou, která plní funkci izolátoru s chladícím účinkem. Výboj nastává v místě, kde nástroj svým otáčivým pohybem naruší izolační vrstvu. [1]

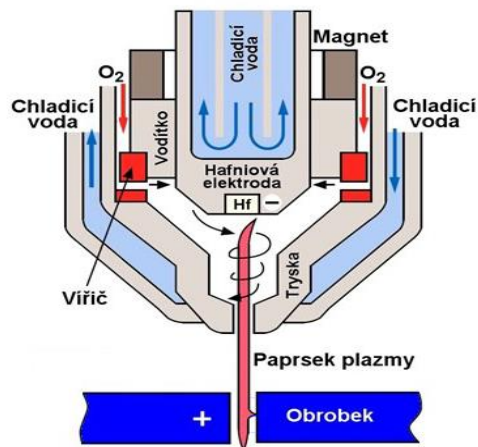


*Obr. 14. Principiální schéma anodomechanického obrábění [2]*

1 – nástroj; 2 – obrobek; 3 – přívod pracovní kapaliny

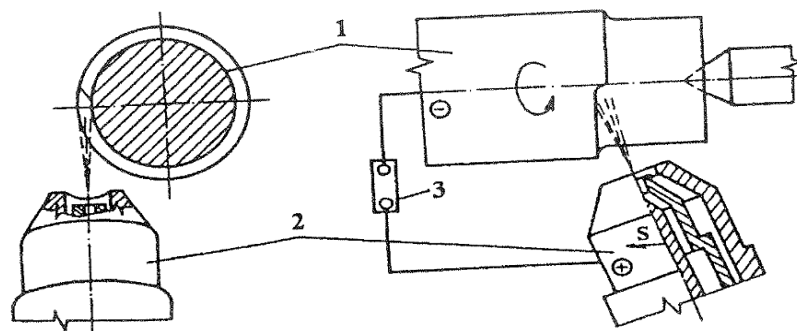
### 1.2.2 Obrábění paprskem plazmy

Při obrábění paprskem plazmy je obráběný materiál postupně odtavován a odpařován paprskem plazmy, vystupující vysokou rychlostí z plazmového hořáku (Obr. 15).



Obr.15. Schéma plazmového hořáku [7]

Plasma je vodivý stav plynu, který obsahuje směs volných elektronů a má vysokou teplotu, až 30 000°C. Jako pracovní plyn se používá vzduch, argon, vodík, dusík a jejich směsi. Proces obrábění je tak intenzivní, že hloubka tepelně ovlivněné vrstvy nepřevyšuje 1 mm. Vzhledem k vysokým rychlostem obrábění je povrch relativně jemný a rozměrová přesnost odpovídá hrubovacím operacím. Základní částí plazmy je plazmový hořák. Plazma se nejčastěji používá pro rozřezávání těžkoobrobitelných ocelí a slitin neželezných kovů, ale uplatňuje se rovněž při obrábění rotačních ploch. [1,7]



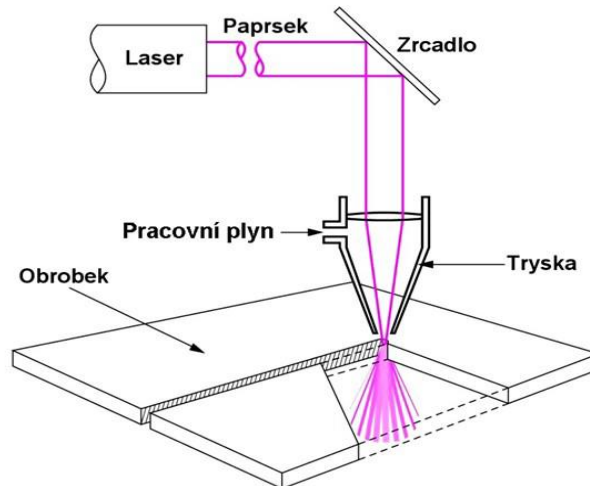
Obr. 16. Schéma obrábění rotačních ploch plazmou [1]

1 – obrobek; 2 – plazmový hořák; 3 – zdroj stejnosměrného napětí

### 1.2.3 Obrábění laserem

Při obrábění dochází k úběru materiálu účinkem silného paprsku monochromatického světla na velmi malou plochu. Působením laserového paprsku dochází k místnímu ohřevu na velmi vysokou teplotu až 10 000°C, která způsobí jeho roztavení. Mohou se obrábět různé

materiály od dřeva přes plasty až po těžkoobrobitelné materiály. K typickým aplikacím patří: výroba průvlaků u diamantu, spékáním karbidů pro tažení tenkých drátů, součástky mikroelektroniky. Výhodou je vysoká přesnost a úzké řezy (Obr. 17). [7]



Obr. 17. Schéma obrábění laserem [7]

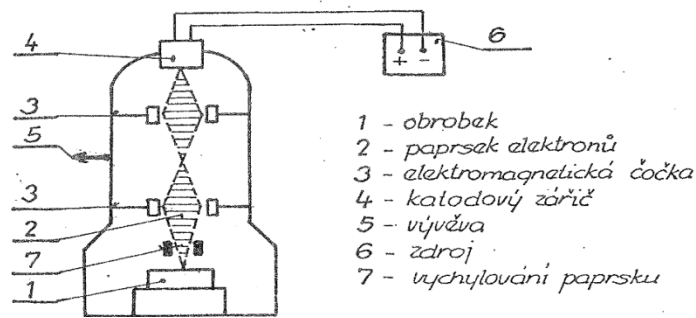
#### 1.2.4 Obrábění paprskem elektronů

Obrábění elektronovým paprskem má vysoce speciální charakter a je zejména využíváno v leteckém a kosmickém průmyslu a v oblasti technologie výroby polovodičů a mikroelektronických prvků. Zjednodušený princip je znázorněn na obr. 18.

Podstatou zařízení je elektronové dělo, které složí ke generaci, urychlení a zaostření svazku elektronů. Pro zachování parametrů elektronového paprsku při průchodu pracovní komorou je nutno v zařízení vytvořit vakuum. Urychlený svazek elektronů předá svoji kinetickou energii při dopadu na obráběný materiál ve formě tepla. Dochází k lokálnímu přehřátí, natavení a případně i k odpaření materiálu.

Obrábění tímto způsobem se provádí u tenkých materiálů s hloubkou obrábění 0,5 - 1mm. Lze obrábět kovy jako jsou titan, molybden SK, Wolfram, dále nejtvrďší elektricky nevodivé materiály, jako je keramika, křemen, bez zřetele na jejich mech. vlastností. [7]

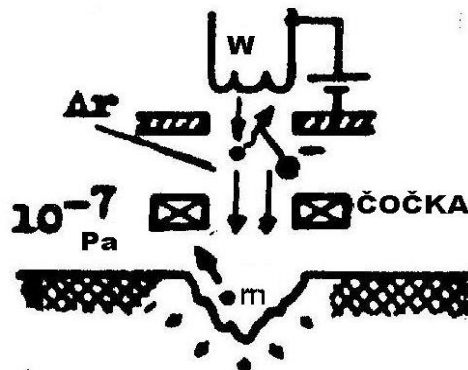




Obr. 18. Schéma obrábění paprskem elektronů [8]

### 1.2.5 Obrábění iontovým paprskem

Obrábění iontovým paprskem je založeno na účinku kinetické energie iontů působící ve vakuu na opracovaný materiál (Obr. 19). Velikost úběru materiálu je závislá na hustotě proudu iontů. Ionty působí na povrch obrobku a vytlačí atomy materiálu pružnou srážkou částic. Při obrábění iontovým paprskem se nevytváří teplo a nevzniká mechanická deformace povrchové vrstvy.



Obr. 19. Schéma obrábění  
iontovým paprskem [3]

Metoda iontového obrábění se využívá pro přípravu matric při čištění a hlazení povrchu. Pomocí speciální masky se může provádět gravírování ve výrobě integrovaných obvodů a plazmové reaktivní leptání v oblasti výroby polovodičů. Lze obrábět prakticky všechny materiály včetně optického skla diamantu. [6]

### 1.2.6 Elektrochemické obrábění

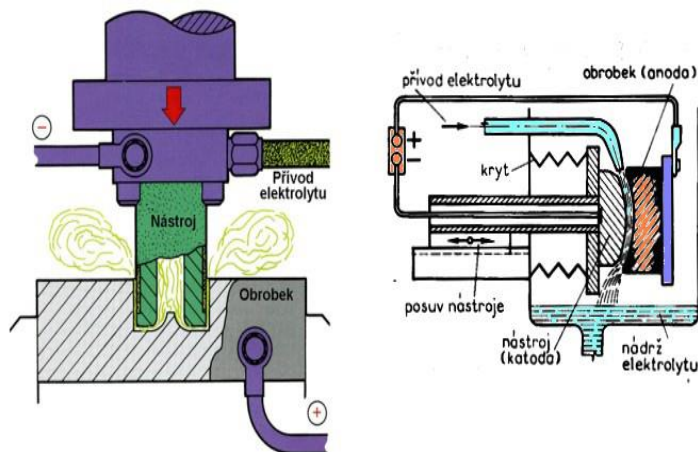
Jedná se o řízený proces oddělování materiálu prostřednictvím anodického rozpuštění v elektrolytu, který proudí mezerou mezi elektrodami, kdy stejnosměrný proud o nízkém napětí rozpouští materiál na obrobku. Anoda je obrobek a katoda je nástroj.

Vyrábí se tvarově složité součásti (zápustky, lisovací formy apod.). Obrábět se můžou tvrdé materiály jako je kalená ocel žárovečné slitiny. Nástroj má tvar negativu vyráběné součásti.

K základním elektrochemickým metodám obrábění patří obrábění v proudícím elektrolytu (Obr. 20) a obrábění rotující elektrodou (Obr. 21).

### Obrábění v proudícím elektrolytu

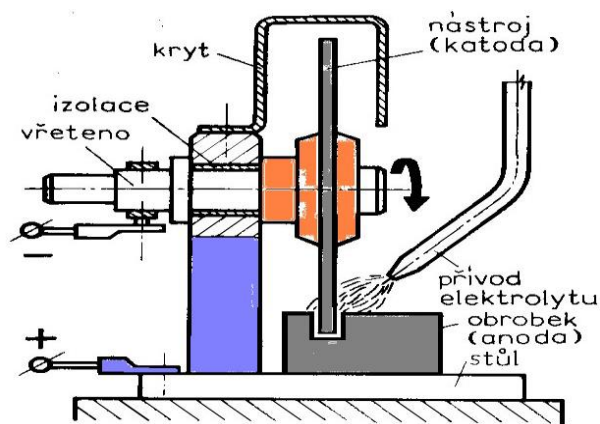
- používá se převážně pro tvarové obrábění;
- k obrábění je využito vysoké hustoty proudu;
- k odstranění pasivní vrstvy používáme elektrolyt proudící mezi elektrodami;
- při obrábění se součástka nezahřívá (jen 100°C), nevzniká nebezpečí změny struktury obráběného materiálu.



Obr. 20. Elektrochemické obrábění [7]

### Obrábění otáčející elektrodou

Pasivní vrstva z obrobku (anody) se soustavně odstraňuje otáčejícím se nástrojem (diamantový brusný kotouč), mezi nějž se přivádí proud elektrolytu s rozptýleným brusivem.

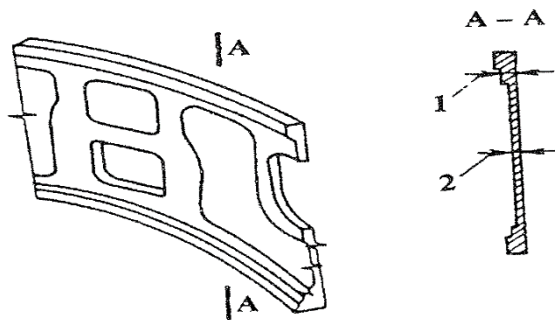


Obr. 21. Obrábění otáčející elektrodou [7]

Tato metoda se používá při broušení nástrojů ze slinitých karbidů, materiálu vysoké tvrdosti, křehkých materiálu.

### 1.2.7 Chemické obrábění

Chemické obrábění (Obr. 22) můžeme definovat jako řízené odleptávání vrstev materiálu o tloušťce od několika setin milimetru až do několika milimetrů. Je založeno na chemické reakci obráběného materiálu s pracovním prostředím (kyselina, hydroxid). Místa, která nemají být obráběná, jsou chráněna speciálním povlakem.



Obr. 22. Chemické obrábění [1]

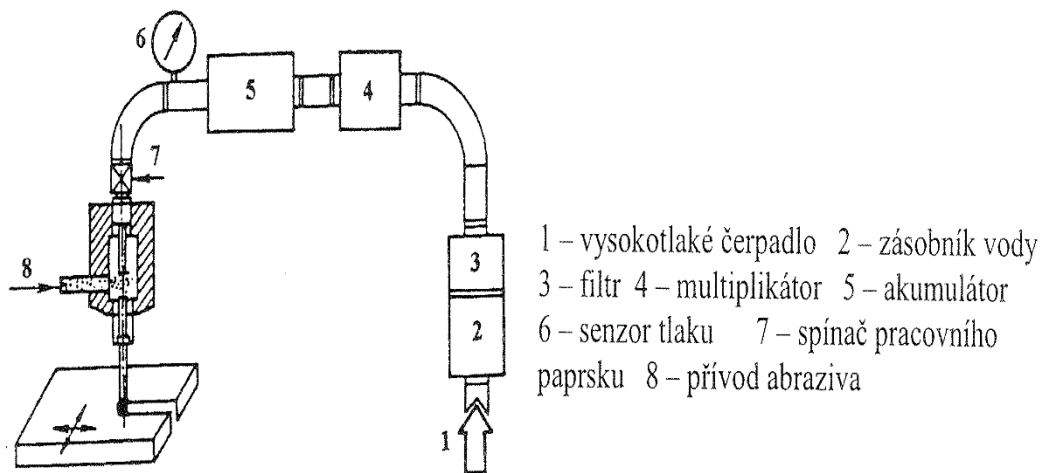
1- rozměr před leptáním (4 mm)

2- rozměr po leptání (2 mm)

Ekonomicky výhodná metoda u plošných obrobků s potřebou malého úbytku tloušťky.

### 1.2.8 Obrábění vodním paprskem

Obrábění vodním paprskem je oddělování materiálu pomocí kinetické energie vodního paprsku o vysokém tlaku a rychlosti. V praxi se využívá řezání s čistým vodním paprskem a řezání vodním paprskem s abrazivní směsí (Obr. 23).



Obr. 23. Schéma zařízení pro řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí [1]

Při metodě obrábění vodním paprskem nedochází k ohřevu materiálu a následnému zpevnění. Při řezání se netvoří prach. Není nutné provádět předem vyvrtání díry před opracováním tvaru. Další výhodou je snížená cena za nástroj.

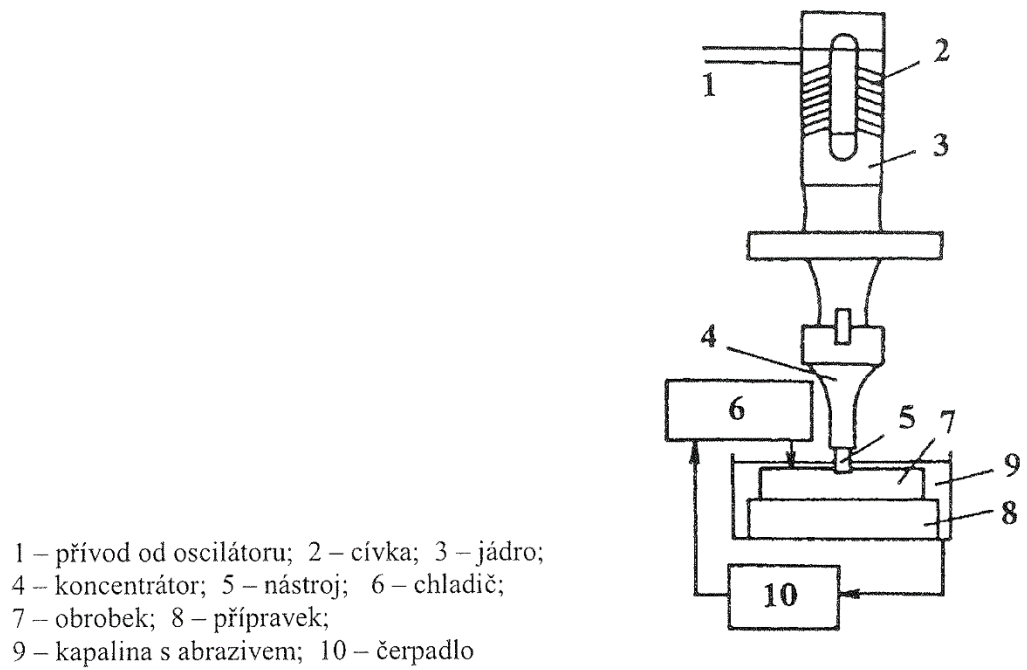
### 1.2.9 Ultrazvukové obrábění

Ultrazvukové obrábění se používá pro tvrdé a křehké materiály a materiály elektricky nevodivých.

Podstatou této abrazivní metody je řízené rozrušování obráběného materiálu účinkem úderů abrazivních zrn nacházejících se mezi obráběným povrchem a nástrojem, které jsou v podélném směru rozkmitávány na ultrazvukovou frekvenci. Počet kmitů je cca 18 - 25 tisíc za sekundu. Zrna rozrušují povrch obrobku a po přitlačení nástroje k obrobku dochází k překopírování tvaru nástroje na obrobek.

Obrábění ultrazvukem se uplatňuje ve dvou variantách [1,6,7]

- ultrazvukové nárazové obrábění (Obr. 24);
- rotační obrábění ultrazvukem.



Obr. 24. Princip ultrazvukového nárazového obrábění [1]

## 2 OBRÁBĚNÍ VRTÁNÍM

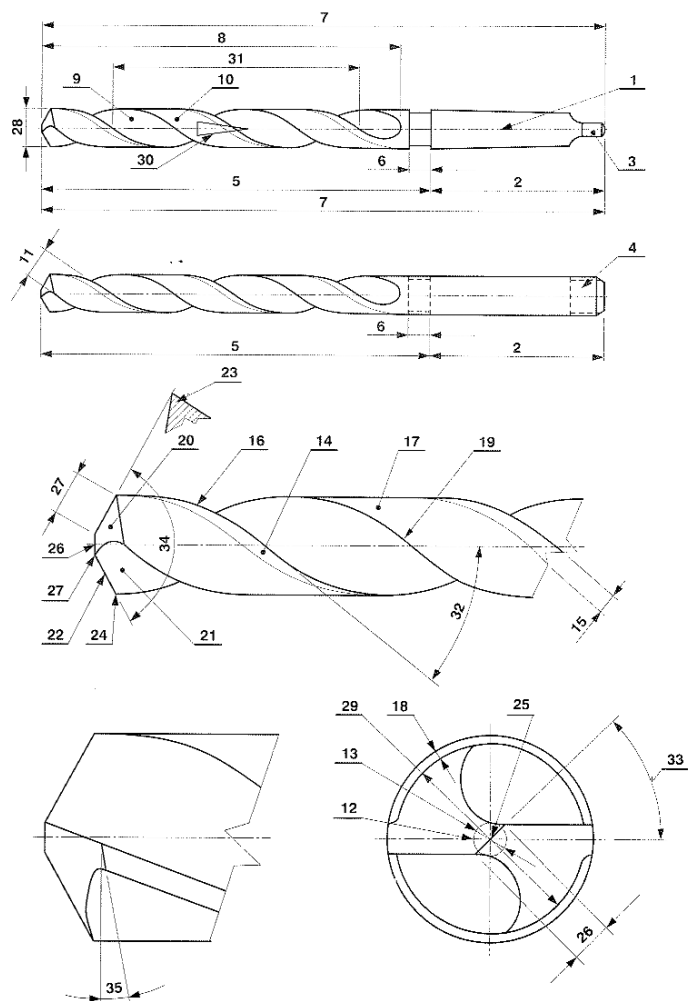
Vrtání nejrozšířenější metodou výroby děr v porovnání se soustružením, frézováním atd. Díry jsou vyráběné řezným nástrojem (dvou nebo tří - břitým vrtákem). Při vrtání vykonává nástroj relativní pohyb vůči obrobku. Nejběžnější typ vrtáků jsou šroubové (Obr. 25). V minulosti se vyráběli vrtáky z nástrojových ocelí, potom z rychlořezných ocelí a v současnosti se vyrábějí ze spěkaných karbidů nebo s karbidovou vyměnitelnou řeznou destičkou. Třísky, které vznikají při obrábění, jsou odváděny pomocí šroubové drážky na těle vrtáku.

Vrtání rozdělujeme na:

- vrtání krátkých děr (do hloubky  $3xD$ );
- vrtání hlubokých děr (do hloubky  $150xD$ ).

Termíny pro šroubové vrtáky:

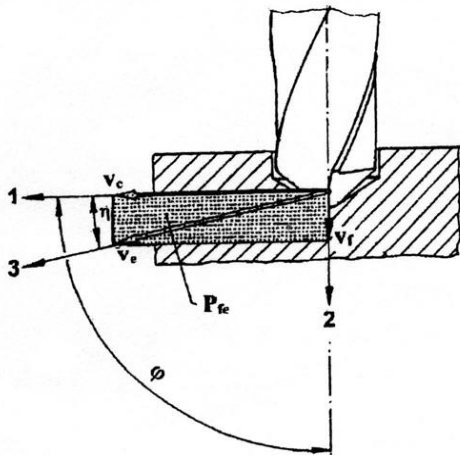
1. osa
2. stopka - kuželová, hladká válcová, hladká válcová s unáščem
3. vyražec
4. unášec
5. tělo vrtáku
6. krček
7. celková délka
8. délka drážky (šroubovice)
9. drážka
10. plocha vedlejšího hřbetu
11. šířka plochy vedlejšího hřbetu
12. jádro
13. tloušťka jádra
14. fazetka
15. šířka fazetky
16. vedlejší ostří
17. odlehčení
18. hloubka odlehčení
19. pata
20. hřbet
21. čelo
22. hlavní ostří
23. břit
24. vnější špička
25. příčné ostří
26. délka příčného ostří
27. délka hlavního ostří
28. průměr vrtáku ( $h_8$ )
29. průměr odlehčení
30. zpětná kuželovitost
31. stoupání šroubovice
32. úhel šroubovice  $\lambda$
33. úhel příčného ostří
34. úhel špičky  $\epsilon$
35. úhel hřbetu



Obr. 25. Šroubový vrták [9]

## 2.1 Kinematická charakteristika při vrtání

Při vrtání vykonává hlavní rotační pohyb řezný nástroj, a současně i vedlejší pohyb (posuv) ve směru osy. Kinematika řezného procesu je znázorněna na obr. 26. [8]



- 1 – směr hlavního pohybu
- 2 – směr posuvového pohybu
- 3 – směr řezného pohybu
- $v_c$  – řezná rychlost
- $v_f$  – posunová rychlost
- $v_e$  – rychlost řezného pohybu
- $P_{fe}$  – pracovní boční rovina
- $\varphi$  – úhel posuvového pohybu
- $\eta$  – úhel řezného pohybu

Obr. 26. Kinematika vrtacího procesu při vrtání šroubovým vrtákem [1]

## 2.2 Základní vztahy a veličiny vrtání

Mezi základní veličiny při procesu obrábění patří řezná rychlost ( $v_c$ ), posuv ( $f$ ), počet otáček ( $n_c$ ), viz. (Tab. 1).

Tab. 1 Základní veličiny [9]

Název veličiny	Jednotka	Popis
Počet otáček $n$	$[ot \cdot min^{-1}]$	veličina, která se vztahuje k hlavnímu pohybu a je vyjádřena počtem otáček za minutu.
Řezná rychlost $v$	$[m \cdot min^{-1}]$	je při vrtání určována počtem otáček a průměrem nástroje tj. je to dráha bodu, kterou urazí na obvodu nástroje za minutu.
Posuv na otáčku $f$	$[mm \cdot ot^{-1}]$	je posuv nástroje vůči obrobku, případně posuv obrobku vůči nástroji, vyjádřený délkou dráhy za časovou jednotku. Tento údaj je v praxi znám také jako strojní posuv, nebo posuv stolu.

Řeznou rychlost  $v_c$  můžeme určit z rovnice (1):

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n_c}{1000} \quad [\text{m/min}] \quad (1)$$

Posuvovou rychlost  $v_f$  určíme z rovnice (2):

$$v_f = f \cdot n_c \quad [\text{mm/min}] \quad (2)$$

Rychlost řezného pohybu (3):

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad [\text{m/min}] \quad (3)$$

Posuv na zub (4):

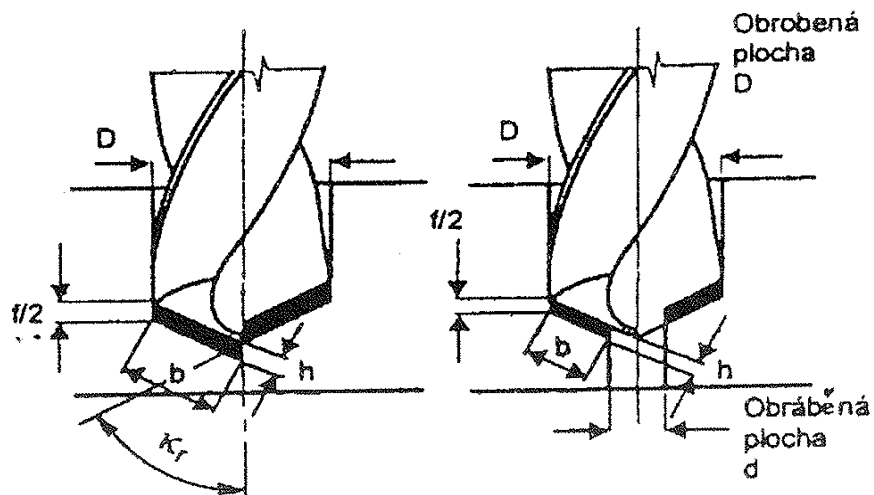
$$f_z = \frac{f}{z} \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

kde:  $z$  – počet zubů (břitů) nástroje [-]

### 2.3 Průřez třísky

Jmenovité rozměr třísky při vrtání šroubovým vrtákem se postupně vyjádří dle (Obr. 27).

[1]



Obr. 27. Jmenovité rozměry třísek při vrtání šroubovým vrtákem [1]



Jmenovitá tloušťka třísky:

$$h = \frac{f}{2} \cdot \sin \kappa_r \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

Jmenovitá šířka třísky při vrtání do plného materiálu:

$$b = \frac{D}{2 \cdot \sin \kappa_r} \quad [\text{mm}] \quad (5)$$

Jmenovitá šířka třísky při rozšiřování díry z  $\varnothing d$  na  $\varnothing D$ :

$$b = \frac{D - d}{2 \cdot \sin \kappa_r} \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

kde:  $\kappa_r$  – pracovní úhel nastavení hlavního ostří [°]

$f$  – posuv na otáčku [mm]

Jmenovitý průřez třísky  $A_D$  při vrtání do plného materiálu:

$$A_D = h \cdot b = \frac{D \cdot f}{4} \quad [\text{mm}^2] \quad (7)$$

Jmenovitý průřez třísky  $A_D$  při rozšiřování předvrtané díry:

$$A_D = h \cdot b = \frac{D - d}{4} \cdot f \quad [\text{mm}^2] \quad (8)$$

## 2.4 Řezné síly

Složky řezné síly se koncentrují v definovaném bodě na řezných hranách šroubovitého vrtáku a rozkládají se do směrů souřadnicového systému  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (Obr. 28). Když má šroubovitý vrták symetrické hrany, radiální síly  $F_p$  a  $F_p'$  se navzájem ruší. Řezné síly  $F_c$ ,  $F_c'$  působí přibližně na rameni  $d/4$ , kde vytváří kroutící moment  $M_k$ , který se přenáší na vřeteno stroje. Složky řezné síly  $F_f$  a  $F_f'$  se skládají a tvoří osovou sílu  $F_o$ , kterou překonává posunový mechanismus a namáhá vrták na vzpěr. Pro výpočet řezných sil  $F_c$  a  $F_f$  je možné využít empirické vztahy (9), (10). Pro výpočet  $M_k$  z řezných sil platí vztah (11). [8]

$$F_c = C_{F_c} \cdot D^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \quad [\text{N}] \quad (9)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot D^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \quad [\text{N}] \quad (10)$$

$$M_K = 2F_C \cdot \frac{d}{4} - 2F_P \cdot \frac{d_o}{2} \quad [\text{Nm}] \quad (11)$$

$C_{F_c}, C_{F_f}$  .....konstanta určena druhem a vlastnostmi materiálu a geometrie nástroje

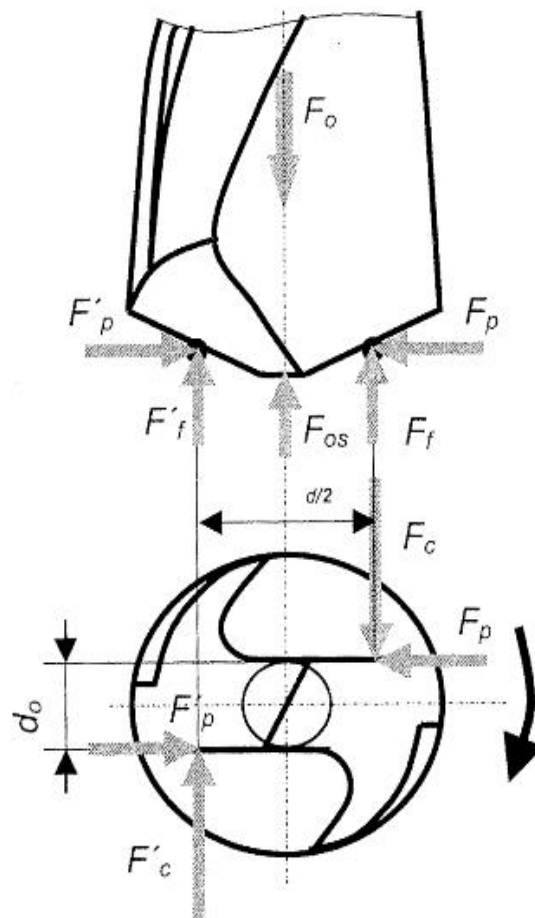
$x^{F_c}, y^{F_c}, x^{F_f}, y^{F_f}$  .... exponenty určeny řeznými podmínkami, materiálem a nástrojem

Všeobecně platí, že se zvětšujícím se posuvem roste  $M_k$  i  $F_o$ . Přitom intenzita změny

$M_k =$  funkce (posuv) a  $F_o =$  funkce (posuv) je analogická soustružení.

Pro oddělení třísky je potřeba vynaložit mechanickou energii nebo určitý výkon, který vy počítáme podle rovnice (12). [1,8]

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 2 \cdot 10^3} = \frac{F_c \cdot v_c}{12 \cdot 10^4} \quad [\text{kw}] \quad (12)$$

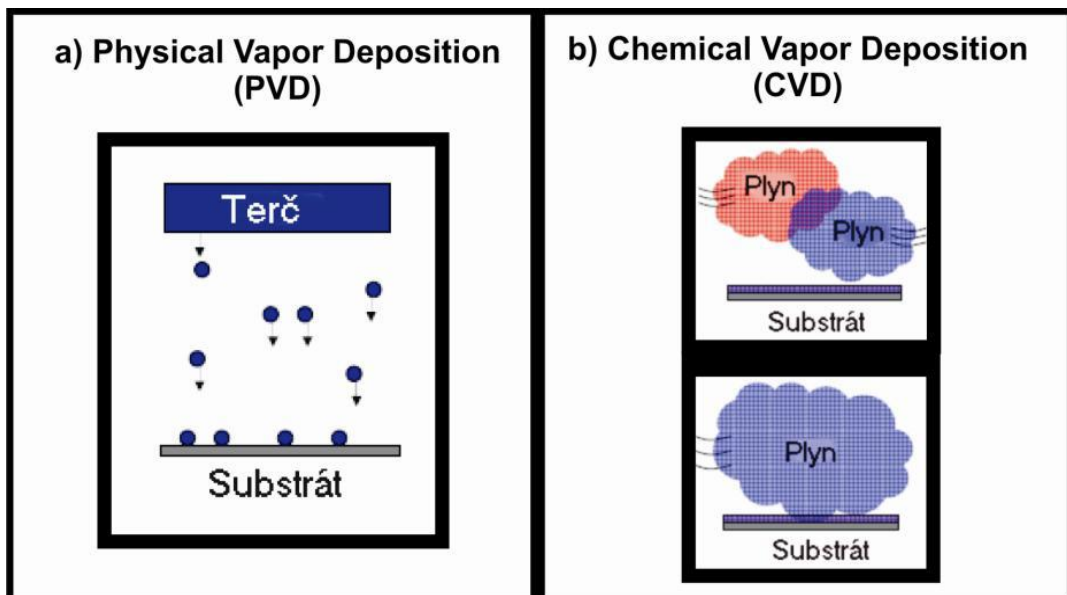


Obr. 28. Řezné síly při vrtání [8]

### 3 POVLAKOVÁNÍ NÁSTROJŮ

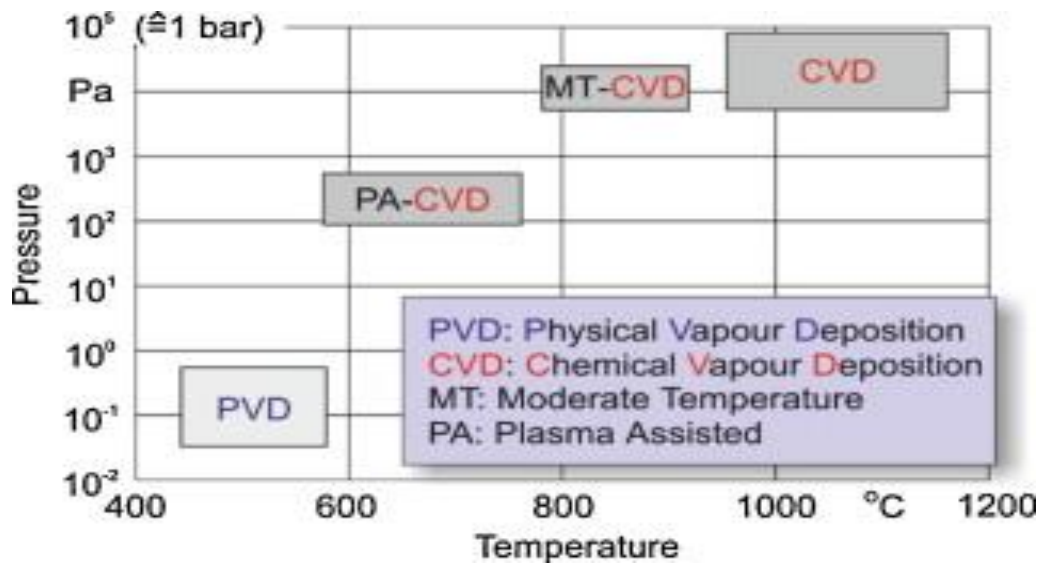
Výroba povlakovaných řezných nástrojů znamená kvalitativní skok ve vývoji řezných materiálů. Aplikací povlaků typu TiN, TiC, Ti(CN), TiAlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nebo jejich kombinací v mnohonásobných vrstvách, přinesla snížení opotřebení řezných hran, zvýšení trvanlivosti a životnosti řezných nástrojů. Řezné materiály jsou povlakovány dvěma základními metodami. Jedná se o CVD (Chemical Vapour Deposition) a PVD (Physical Vapour Deposition), které se dají dále dělit do dalších modifikací. CVD povlaky se již komerčně objevili na trhu v roce 1960. PVD metoda byla téměř o 20 let později.

Za hlavní charakteristické rozdíly mezi PVD a CVD povlaky jsou brány způsoby přípravy vrstvy (Obr. 29).



Obr. 29. Schéma tvorby povlaků a) metoda PVD b) metoda CVD

Další rozdíl mezi povlaky, jsou rozdílné závislosti teploty a tlaků potřebné pro proces nanášení (Obr. 30). [11,12,13]



Obr. 30. Nanášení povlaku v závislosti na tlaku a teplotě pro proces [10]

- CVD (Chemical Vapour Deposition), metoda chemická,
- PVD (Physical Vapour Deposition), metoda fyzikální,
- PACVD (Plasma Assisted CVD), metoda chemická,
- MTCVD (Middle Temperature), metoda chemická.

### 3.1 Rozdělení povlaků

Na trhu s povlakovanými řeznými nástroji jsou v současnosti k dispozici čtyři základní druhy povlaků (bez ohledu na způsob přípravy vrstvy PVD nebo CVD).

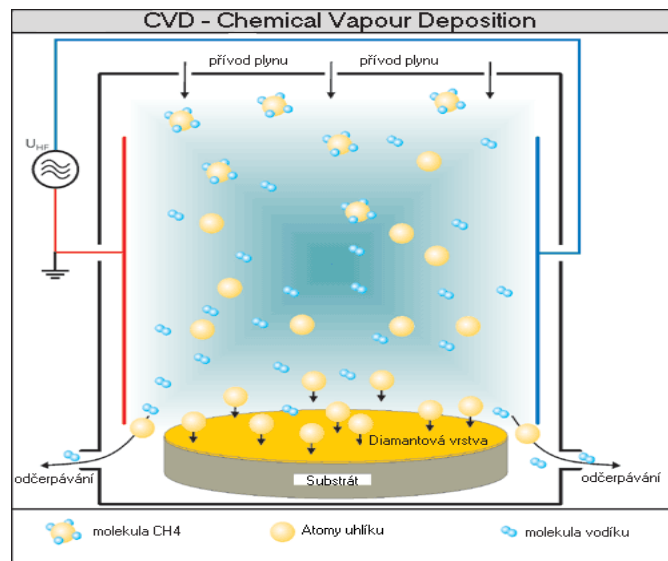
1. **Generace:** Jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC) s tloušťkou asi 6  $\mu\text{m}$  a špatnou soudržností podkladu a povlaku (tato nepříznivá vlastnost byla způsobena nedokonalou technologií výroby, kdy mezi podkladem a povlakem docházelo k tvorbě křehkého etakarbidu). Při obrábění takovými nástroji proto rychle docházelo k odlupování povlaku, což vedlo k znehodnocování nástroje.
2. **Generace:** Jednovrstvé povlaky na bázi sloučeniny titanu (TiN, Ti(C,N)), které svými mechanickými a tepelnými vlastnostmi, odpovídající rychlostí nanášení vrstvy a dobrou přilnavostí k základnímu materiálu, nejvíc vyhovují současným požadavkům. Díky zdokonalení technologie je možno vytvořit vrstvy povlaků o větší tloušťce (7 až 10  $\mu\text{m}$ ).

3. **Generace:** Vícevrstvý povlak (dvě až tři, případně i více vrstev) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Řazení vrstev odpovídá jejich vlastnostem tak, že jako první jsou na podklad obvykle nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu, které mají relativně nižší odolnost proti opotřebení a jako poslední jsou nanášeny vrstvy, které nemusí mít dobrou přilnavost k podkladu (dobrá přilnavost k předchozí vrstvě vyplývá z procesu výroby), ale požaduje se od nich zejména vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení a oxidaci za zvýšených teplot.
4. **Generace:** Speciální vícevrstvý povlak (více jak 10 vrstev a mezivrstev) méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Materiály jsou použity stejné jako u 3. generaci.

Za povlaky 4. generace jsou považovány též **diamantové, nanokompozitní** (povlak tvořený dvěma nebo více složkami, které jsou vzájemně nerozpustné, přitom alespoň jedna složka musí být krystalická), **gradientní, supermřížkové** (povlaky, u kterých je základní vrstva opakována s tak krátkou periodou, aby byla vytvořena jednotná mřížka) a „**inteligentní**“ povlaky (např. pro vyhodnocování opotřebení nástroje), v budoucnosti se k nim přiřadí i povlaky z **kubického nitridu boru** (na křemíkovém substrátu). [10]

### 3.1.1 Metoda CVD

Metoda CVD (Obr. 31) (Chemical Vapour Deposition) = chemické napařování z plynné fáze) probíhá za vysokých teplot (900 - 1100°C). Metoda využívá pro depozici směs chemicky reaktivních plynů (např. CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> apod.). Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi, vysoká teplota způsobuje disociaci molekul a podporuje vzájemnou chemickou reakci složek atmosféry. Vrstva vzniká na povrchu substrátu heterogenní reakcí. V principu nejde o čistě plazmatickou metodu.



Obr. 31. Schéma metody CVD [13]

CVD technologií lze připravit velmi rozmanité vrstvy kov, polovodičů a různých chemických sloučenin buď v krystalickém či amorfním stavu, jež jsou vysoce čisté a mají požadované vlastnosti. Rovněž lze řídit stechiometrii v širokých mezích.

#### Výhody metody CVD

- vysoká odolnost vůči opotřebení;
- ekonomicky výhodný pro tvorbu silných vrstev;
- povlaky mají vysokou adhezi, jsou dobře zakotveny do substrátu;
- povlaky vykazují vysokou teplotní stabilitu;
- nízké náklady na zařízení a řízení procesu = vhodné pro velkovýrobu i střední výrobu;
- rovnoměrná tloušťka u tvarově složitých nástrojů a součástí.

#### Nevýhody metody CVD

- vysoká energetická náročnost;
- dlouhý pracovní cyklus 8 - 10 hodin;
- vysoká teplota;
- ekologicky nevyhovující pracovní plynné směsi;
- tahové pnutí ve vrstvě (rozdílný koeficient tepelné roztažnosti),

- nemožnost dělat některé typy vrstev kombinací různých typů kovů (např. TiAlN). [13,14]

Vedle konvenčních metod CVD existují další upravené depoziční možnosti:

- **PACVD technika** (*Plasma Assisted CVD*) - Depozice z plynné fáze, technika je velmi atraktivní vzhledem k nízké provozní teplotě (600°C), schopnost vložit rovnovážné fáze a lepší kontrolu stechiometrie a čistoty povlaků. Nízká teplota. Postup nanášení par se provádí v plazmě výboji směsi plynu na částice v souladu s energetickou bilancí tepelnou.
- **MOCVD technika** (*Metallorganic CVD*) - se používá pro elektronické ukládání polovodičové vrstvy. Touto metodou, jsou výsledné vrstvy velmi tenké a obvykle epitaxiální. Teplota procesu bývá mezi 700-900°C.
- **LICVD technika** (*Laser Induced CVD*) – laserově indukovaná metoda. Existuje ve dvou variantách, jako jsou pyrolitická a fotolytická.
- **HFCVD technika** (*Hot - Filament CVD*), CVD využívající žhavé vlákno. U této metody jsou plynné složky rozkládány odporově ohřátým vláknem (až 2400 °C). [10,13,15]

### 3.1.2 Metoda PVD

Známa technologie vytváření vrstev PVD vrstev (Physical Vapour Deposition) je založena na odpaření nebo odprášení pevné látky (Ti, Al) v řízené atmosféře. Podmínky vzniku a vlastností vytvořených vrstev jsou velmi rozmanité. Povlaky vznikají při tlaku 0,1 - 1Pa ve vakuové komoře při teplotě 150 - 500°C, do níž je vpouštěn pracovní plyn, např. argon nebo dusík. Podle způsobu získání kovových iontů rozlišujeme metodu reaktivní naprašování, magnetronové naprašování a metodu reaktivního naprašování. [16]

Vznik povlakovaného povrchu spočívá v tom, že atomy jsou napovrch nejdříve zachyceny procesem sorpce. Atomy se pohybují po povrchu a potom jsou buď zachyceny trvalou vazbou, nebo zpětně uvolněny. Další dopadající atom se díky pohyblivosti po povrchu spojí vazbou s dříve zachycenými atomy a postupně tak vytváří izolované zárodky a ostrůvky rostoucí vrstvy, Ty se potom spojují, až vytvoří souvislou vrstvu. [10]

**Mezi výhody PVD metody patří:**

- vysoká odolnost vrstev;

- nízký koeficient tření;
- možnost vytvořit velké množství různých druhů vrstev;
- malá tloušťka vrstev;
- možnost výroby přesných vrstev;
- proces se uskutečňuje za malých teplot.

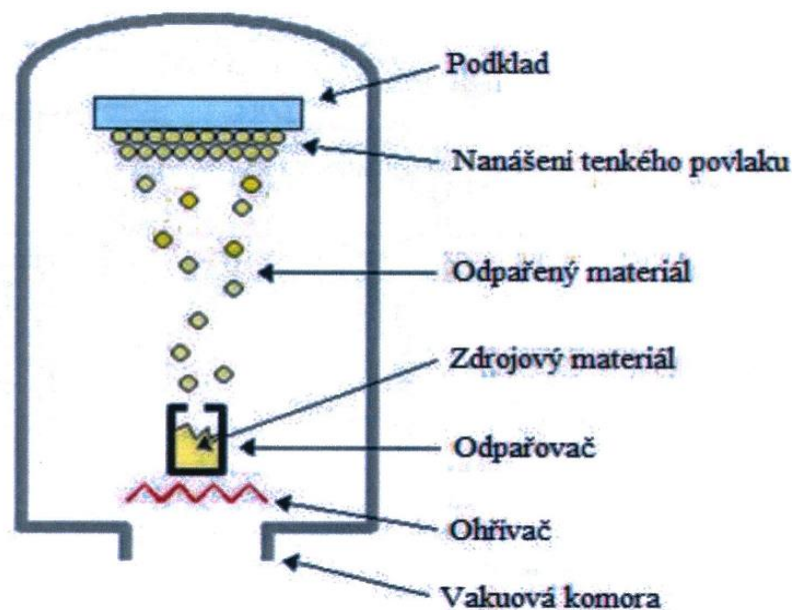
**Mezi nevýhody PVD metody patří:**

- relativně složitý vakuový systém;
- nutnost pohybovat povlakovanými předměty, z důvodu rovnoměrného uložení povlaku.

**3.1.2.1 Napařování**

Je založeno na odpařování materiálu ve vakuu a na kondenzaci jeho par na substrátu (Obr. 32). Odpařování terče lze provádět následujícími způsoby:

- elektronovým svazkem;
- elektrickým obloukem;
- pomocí laseru.

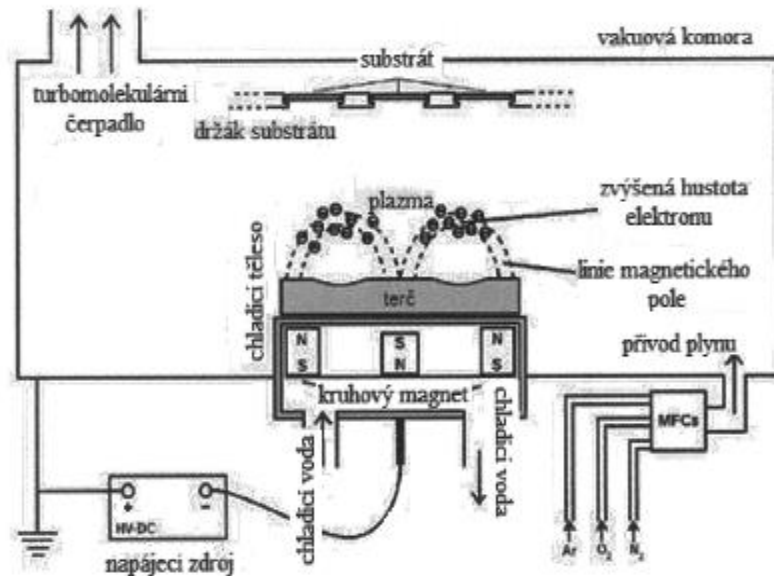


Obr. 32. Schéma vakuového napařování [17]



### 3.1.2.2 Naprašování

Naprašování (Obr. 33) vrstev je založeno na rozprašování materiálu katody (terče) energetickými ionty a kondenzací částic odprašeného materiálu na substrátu. Ionty pracovního plynu jsou urychlovány elektrickým polem a dopadají na povrch naprašovaného materiálu, který je ve formě plochého nebo válcového terče.



Obr. 33. Schéma naprašování [17]

Rozprašování probíhá v přítomnosti plazmatu:

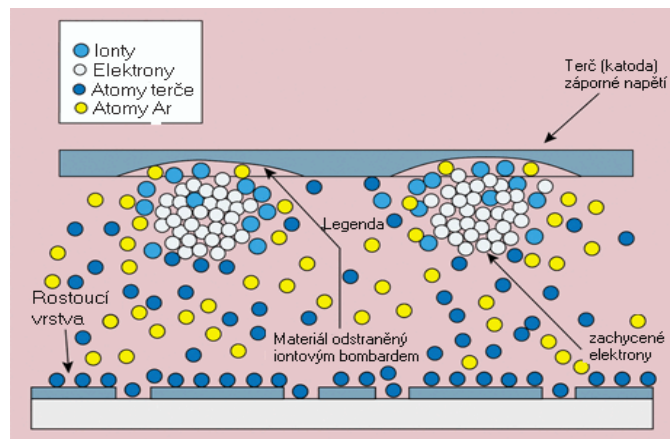
- buď inertního plynu (chemicky nereaguje s látkou povlaku) – depozice vrstev stejného složení jako má rozprašovaný terč;
- nebo směsi inertního a reaktivního plynu – reaktivní depozice vrstev různých chemických sloučenin.

Mezi hlavní přednosti naprašování proti napařování jsou:

- poměrně přesné přenesení složení slinutého terče do naprašované vrstvy,
- homogenní depozice vrstev,
- nepřítomnost mikročástic deponovaného kovu.

### 3.1.2.3 Magnetronové naprašování

Metoda je založena na rozprašování pevného terče, který je katodou, ionty pracovního plynu extrapolovanými z plazmatu doutnavého výboje, který je lokalizován pomocí magnetického pole v těsné blízkosti katody (Obr. 34). Elektronů plazmatu se zachycují v „tunelu“ siločar magnetického pole a drifují podél tunelu, tím se značně prodlouží jejich dráha, zvýší počet srážek a vytvoří plazma. Kladné ionty dopadají z plazmatu na terč. Částice rozprašeného terče prochází plazmatem směrem k substrátu, na kterém je záporné předpětí. [13]



Obr. 34. Magnetronové naprašování [13]

### 3.1.2.4 Nejčastěji používané PVD povlaky

**TiN (nitrid titánu)** – je nejběžnější používaný povlak, vykazuje nízkou reakci s kovovým materiálem a tak zabraňuje opotřebení nástrojů zapříčiněné nalepováním. Používá se na méně náročné aplikace při nízkých řezných rychlostech. [19]

**TiCN (titankarbonitrid)** - je speciálně navržený povlak s komplexní multivrstvou strukturou vyráběný obloukovou technologií. Povlak TiCN si udržuje vysokou houževnatost a odolnost vůči opotřebení i přes své vysoké tvrdosti. Tyto vlastnosti jsou naprosto nezbytné pro velké množství aplikací jakou je např. přerušovaný řez, kde vznikají nízké teploty na řezné hraně. Použití TiCN povlaků přináší výrazně zvýšení životnosti ve srovnání se standardním povlakem TiN. [18]

**TiAlN (titanaluminiumnitrid)** – V oblasti řezných nástrojů stále zvyšuje podíl na trhu na úkor ostatních vrstev, především TiN, i přes vyšší výrobní náklady. Má výbornou odolnost vůči vysokým teplotám. V současné době ideální pro vysokorychlostní obrábění. Jeho zajímavostí je vytváření povrchové vrstvy  $Al_2O_3$ , jež při řezu přispívá ke snížení tření, zvýšení difúzní odolnosti a zlepšení řezných vlastností. [16]

**TiAlSiN (titanaluminiumsiličnínitrid)** - Nanostrukturovaný vysokovýkonný povlak představuje nový milník pro tvrdé, suché a vysokorychlostní obrábění. Povlak vykazuje extrémně vysokou odolnost proti oxidaci v kombinaci s vysokou teplotní odolností. Tento povlak je výsledkem speciálního složení a nanášení prostřednictvím nového PVD systému. Vlastnosti tohoto nového povlaku přinášejí významné výhody pro aplikace, které v minulosti zastávali standardní povlaky AlTiN. [20]

## 4 MĚŘENÍ KVALITY POVLAKŮ

PVD povlaky jsou charakterizovány mnoha fyzikálními i chemickými veličinami jako jsou: otěruvzdornost, teplená odolnost, snížení třecího odporu korozivzdornost, adheze a koheze, tloušťka vrstvy, mikrotvrdość, apod.

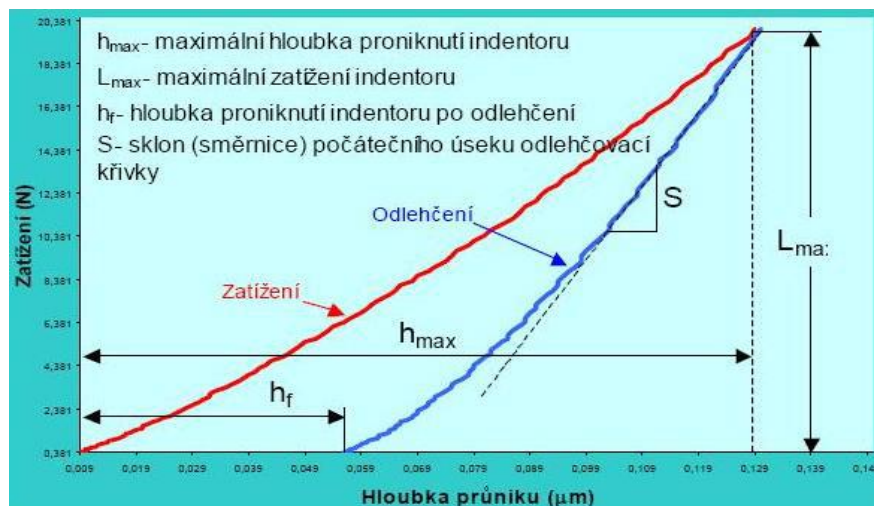
V této kapitole bude vysvětleno základní měření PVD povlaků

### 4.1 Měření tvrdosti

Pro tenké vrstvy i ostatní materiály je tvrdost definována jako „odolnost proti pronikání cizích předmětů“. Běžný způsob opotřebenění nástrojů je dán abrazivním otěrem. Právě proto je vysoká tvrdost základním parametrem otěruvzdorných vrstev. [21]

#### 4.1.1 Měření mikrotvrdości

Pro měření mikrotvrdości je třeba zajistit, aby měřící hrot (nejčastěji se používá Vickers) pronikl minimálně do 1/10 tloušťky vrstvy. Velikost zátěže při měření tvrdosti vrstev se proto volí v řádu mN. Vzniklá hloubka vtisku při takové zátěži je pod 0,5  $\mu\text{m}$ . díky tomu zabezpečíme, aby měření vrstvy nebylo ovlivněno vlastnostmi podkladového materiálu. Vzniklé stopy je velmi těžké vyhodnocovat pomocí mikroskopu, proto se používají různé mikrotvrdoměry např. nanoindentor. Z naměřených hodnot se stanovuje hloubka průniku indentoru a zachycující tvz. zatěžovací a odlehčovací křivkou. (Obr. 35). [13,21,22]



Obr. 35. Zatěžovací a odlehčovací křivka [22]

## 4.2 Měření adheze a koheze

Dobrá adheze vrstvy k substrátu je jedním z důležitých parametrů vrstvy charakterizující vlastnosti celého systému.

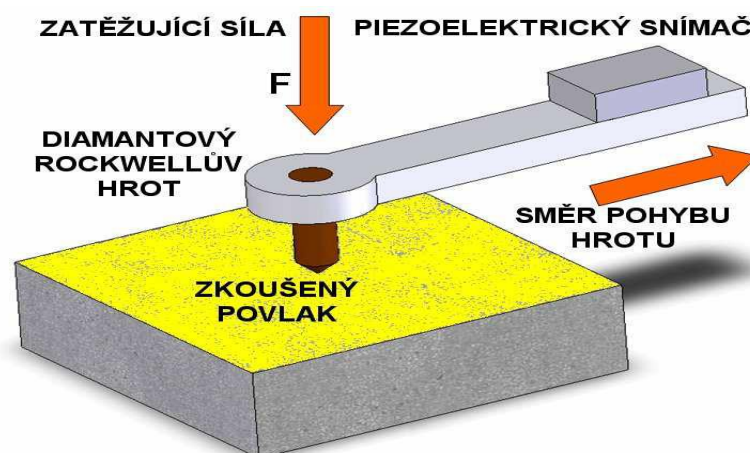
Nejběžnější metody používané ke zjišťování adhezně - kohezního chování jsou založeny na vytvoření napětí k překonání vazebních sil na rozhraní tenké vrstvy a odtržení části vrstvy. Jedná se o metody vnikací (Mercedes test) a vrypovou (Scratch test).

### 4.2.1 Vnikací metoda (Mercedes test)

Princip metody spočívá v diamantovém hrotu, který při předem definované zátěži vniká do substrátu nástroje. Tento hrot vyvolá v okolí vpichu napětí a na základě předem stanovených charakteristik jsou za použití mikroskopu posouzeny adhézní a kohézní vlastnosti povlaku. Tento test je velmi rychlý a efektivní, je však omezen minimální tvrdostí substrátu 54HRC a maximální tloušťkou povlaku 5  $\mu\text{m}$ .

### 4.2.2 Vrypová metoda (Scratch test)

Principem metody je plynulé zatěžování indentoru. Vzorek se pohybuje konstantní rychlostí horizontálně a indentor, který je zatěžován konstantní nebo plynule se zvyšující silou, proniká do povrchu vzorku při jeho pohybu a vytváří tak vryp. Tím se na rozhraní vrstva - substrát generuje pnutí, které při dosažení kritické hodnoty způsobí odtržení vrstvy od substrátu. Hodnota, při níž dojde k poškození vrstvy, se nazývá kritické zatížení  $L_c$  a je používána jako míra adheze dane vrstvy. Na (Obr. 35) je znázorněno princip scratch testu.



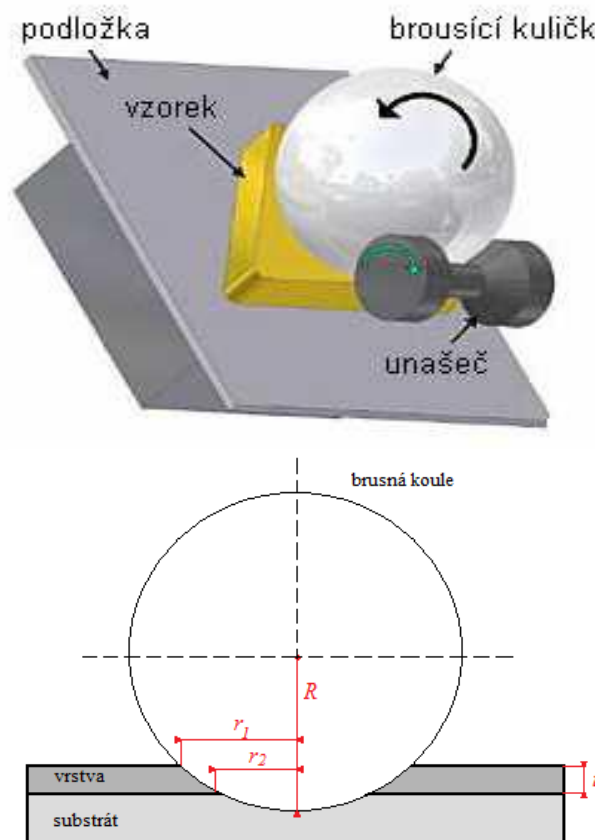
Obr. 36. Princip scratch testu [21]

### 4.3 Měření tloušťky povlaků

Různé povlaky jsou určeny pro různé aplikace. Každý povlak má svou předepsanou ideální tloušťku. Tloušťky povlaků se pohybují v rozmezí 2 – 10  $\mu\text{m}$ , v závislosti na použití nástrojů např. pro závitníky se nanáší vrstva 1 – 2  $\mu\text{m}$ , u odvalovacích fréz 2  $\mu\text{m}$ . Růst tloušťky povlaku zhoršuje mechanickou pevnost naneseného povlaku, může však zvýšit efektivitu poloměru zaoblení na řezné hraně, čímž na ní snižuje napětí. Pro určování tloušťek povlaků se nejčastěji používá tzv. kalotest. (Obr. 37). [21,22]

#### 4.3.1 Kalotest

Princip měření je jednoduchý. Z průměru kuličky (25mm) a mikroskopem změřených kulových vrchlíků je možné výpočtem stanovit tloušťku nanesené vrstvy (rovn.13). Toto měření je z důvodů vyšší přesnosti vhodné provádět na vyleštěných etalonech. Pro stanovení tloušťek na břitech se používá klasická metalografie založená na leštění vybrané části substrátu.



Obr. 37. Princip kalotestu [21]

Vzorec pro výpočet tloušťky povlaku

$$t = \sqrt{R^2 - r_2^2} - \sqrt{R^2 - r_1^2} \quad [\mu\text{m}] \quad (13)$$

Kde:  $R$  [ $\mu\text{m}$ ] - je poloměr kuličky

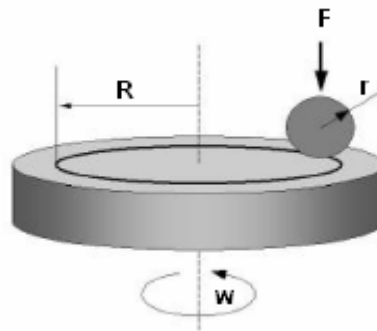
$r_1$  [ $\mu\text{m}$ ] - je vnější poloměr výbrusu

$r_2$  [ $\mu\text{m}$ ] - je vnitřní poloměr výbrusu

#### 4.4 Další metody měření povlaků

##### *Kluzné vlastnosti povlaku*

K určování kluzných vlastností se používá metoda tzv. PIN – on - DISC. Měření touto metodou spočívá ve vlačování pevně uchyceného tělíska (pinu) ve tvaru kuličky nebo hrotu z libovolného materiálu předem definovanou silou (zatížení 1 - 10N) do zkušebního vzorku, který se otáčí danou rychlostí (Obr. 38). [13]



Obr. 38 Schéma metody

PIN – on - DISC [13]

##### *Drsnost povlaku*

V případě nanášení PVD vrstev je výsledná drsnost ovlivněna jak kvalitou opracování nástroje, tak i povlakem. Zdrojem zvýšené drsnosti vrstev jsou makročástice, které vznikají během procesu povlakování. Drsnost povlaku zvyšuje řezné síly, a tak dochází k tepelnému a mechanickému namáhání břitů nástroje. [21]

##### *Odolnost proti oxidaci*

Oxidace vrstvy se dělí na povrchovou, objemovou a povrchově – objemovou. U povrchové oxidace může dojít k pasivaci, k tzv. tvorbě ochranné vrstvy na povrchu kovu, čímž se zabráňuje další oxidaci, tvorbě vyvýšenin, „hillocků“ na povrchu i ke zvýšení drsnosti. U

objemové oxidace mohou nastat fázové změny, růst zrna vrstvy nebo segregace prvků a fází. U oxidace povrchově objemové se mohou tvořit prázdná místa nebo trhliny v důsledku cyklického pnutí.

K měření odolnosti vůči oxidaci se ve většině případů používá gravimetrická metoda, při které se hodnotí změna hmotnosti vrstvy v závislosti na teplotě účinkem vzdušného kyslíku. Podmínkou ovšem je, že testovaný vzorek musí být celoplošně pokryt zkoumanou vrstvou. [21,23]

### ***Tepelná stabilita***

Při zvýšení teploty vlivem obrábění může docházet ke změně vnitřní struktury, např. nárůstem krystalitů, přechodem k jinému krystalickému uspořádání, změnou vnitřního napětí apod. Tyto charakteristiky, které se navenek projevují změnou mechanických vlastností, se vyhodnocují spolehlivě pomocí TEM (transmisní elektronová mikroskopie) či XRD (rentgenová difrakce). Takové analýzy jsou náročné na přístrojové vybavení a je možné provádět jen na specializovaných pracovištích.

### ***Chemická stabilita***

Popisuje odolnost vrstvy vůči chemické reakci s obráběným materiálem, zejména za vyšších teplot vznikajících během obrábění. Chemická stabilita vrstvy se může měnit s typem obráběného materiálu a s řeznými podmínkami. [21]



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 NÁVRH EXPERIMENTU

Cílem praktické části bylo ověření kvality povlaků vrtáků a jejich doporučení pro CNC výrobu ve firmě Vasmó s.r.o.

Byly řešeny tyto úkoly:

- Vliv druhů povlaku na opotřebení ostří - trvanlivosti
- Vliv tvrdosti povlaku a jeho tloušťky na jeho provedení
- Vyjádření závislosti opotřebení ostří na počtu odvrtných otvorů
- Vzájemné porovnání opotřebení
- Ekonomické zhodnocení

### 5.1 Zkušební stroj

Jako stroj pro provedení zkoušek jsem použil CNC frézku VC - 560 (Obr. 39). Jedná se o 5 - ti osé obráběcí centrum.

Základní parametry (Tab. 2).

*Tab. 2 Základní parametry CNC frézky VC 560*

Rok výroby	2006
Otáčky vřetene	60-8000 ot/min
Max. počet nástrojů	24
Kužel vřetena	SK40
Rychloposuv	30 m/min
Výkon vřetene motoru	13kW
Otáčky motoru	60-8000 ot/min
Rozměry frézky	2400 x 2200 x 2900 mm
Max. hmotnost obrobku	500 Kg
Pracovní plocha	
Osa X [mm]	560
Osa Z [mm]	410
Osa Y [mm]	410



Obr. 39 Frézka VC560

## 5.2 Nástroje na otvory

Jako zkušební nástroje byly použity šroubové vrtáky DIN 338 RN  $\varnothing$  8,2mm a vzorky pro měření tloušťky vrstvy a tvrdosti. Vzorky byly povlakovány ve společnosti Ionbond CzechCoating s.r.o. Používá povlakovací systém vyvinutý ve firmě Swiss - Plas s.a. Na povlakovacím zařízení typu L4/ARC, které využívá depozice z katod a zařízení typu M2/ARC vybavené dvěma katodama je možno provádět tyto povlaky – viz. Tab. 3.

Tab. 3 Vlastnosti povlaků [27]

Vrstva	Struktura	Barva	Toušťka ( $\mu\text{m}$ )	Mikrotvrdost (0,05 HV)/1	Koeficient tření poroti oceli	Teplota při depozici	Max. teplota použití
TiN	monovrstva	zlatá	1-5 $\mu\text{m}$	2300	0,4	<500	600
TiN	monovrstva	zlatá	1-2 $\mu\text{m}$	2000	0,4	150/250	600
TiCN	gradientní	šedá	1-4 $\mu\text{m}$	3000	0,4	<500	400
TiAlN	multivrstva	fialová	1-4 $\mu\text{m}$	3000	0,4	<500	800
AlTiN	monovrstva	černá	1-4 $\mu\text{m}$	3300	0,4	<500	900
CrN	monovrstva	kovová	1-4 $\mu\text{m}$	1750	0,4	<500	700
CrC	monovrstva	kovově šedá	1-4 $\mu\text{m}$	2300	0,4	<500	600
PLC	gradientní	šedá	<1 $\mu\text{m}$	1200-2000	0,15-0,2	<500	300
AlCrN	monovrstva	šedočerná	<1-5 $\mu\text{m}$	3300	0,4	<500	1100

Zkušební vzorky byly povlakovány těmito 4 druhy povlaků (Obr. 40):

- TiAlN
- AlCrN
- TiN
- AlTiSiN



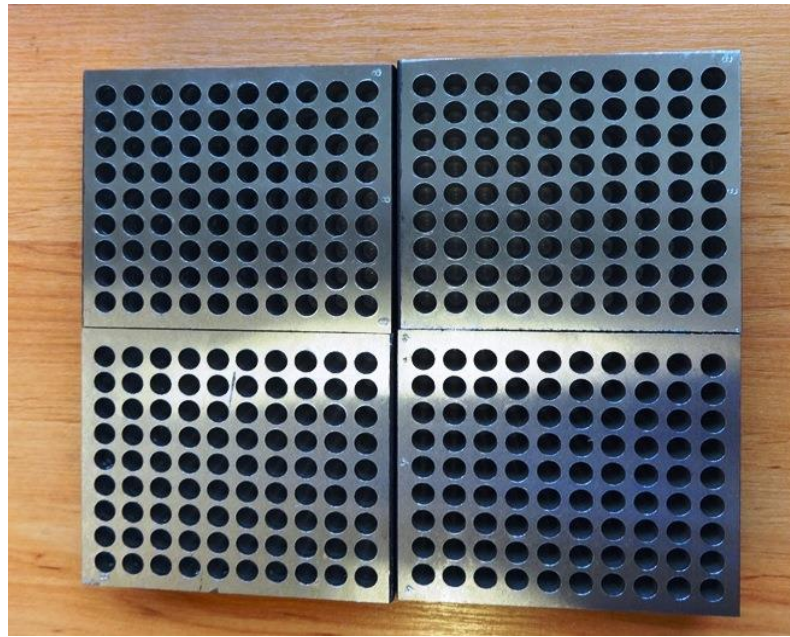
Obr. 40. Povlakované šroubové vrtáky

Každý vzorek byl napovlakován jednovrstvou a dvouvrstvou. Pro náš experiment byl použit i vrták bez povrchové úpravy.

### 5.3 Obráběný materiál

Použil jsem materiál ČSN 12050, který byl zušlechtěn na  $750\text{N/mm}^2$  (Obr. 41).

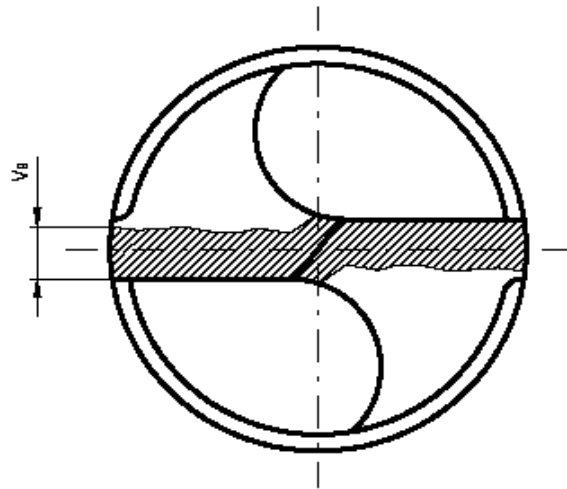
Jedná se o konstrukční ocel k zušlechtování, povrchovému kalení a pro velké výkovky. Uklidňená ocel je vhodná na hřídele těžkých strojů, rotory šroubových kompresorů, na čepy, šrouby, šneky, vodící čepy apod. Svařitelnost oceli je obtížná. [24]



*Obr. 41 Materiál zkušebního vzorku*

#### **5.4 Opatření ostří**

Na šroubových vrtácích, podobně jako na jiných typech řezných nástrojů, probíhá opotřebení na čele a na hřbetě nástroje. Velikost opotřebení je hodnocena šířkou otřené plošky na hřbetě, nebo rozměry žlábků na čele nástroje. Také průběh změny velikosti obou těchto hodnot v závislosti na čase je obdobný ostatním nástrojům. Absolutní hodnota uvedených opotřebení se mění podle použitého nástrojového materiálu, stavu jeho povrchové vrstvy (především na řezné části) a podle použitých řezných podmínek. Vzhledem k tomu, že šroubovitě vrtáky většinou pracují při relativně nižších řezných rychlostech, je pro jejich opotřebení charakteristické zejména opotřebení na hřbetě, hodnocené šířkou otřené plošky  $V_B$  (Obr. 42).

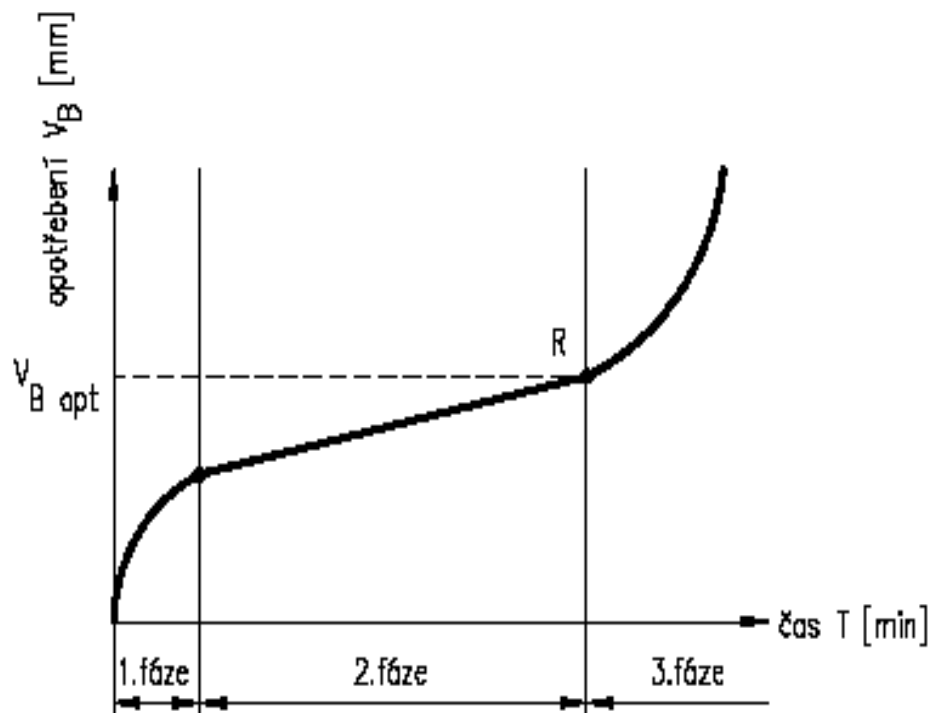


Obr. 42 Opotřebení na hřbetě břitu vrtáku

#### 5.4.1 Průběh opotřebení

Průběh opotřebení podél břitové hrany se mění, je proto nezbytné udávat místo, ve kterém se byla velikost opotřebení zjišťována. U vrtáků se nejčastěji provádí měření velikosti opotřebení v místě břitu nejvzdálenějším od osy nástroje, kde řezná rychlost dosahuje největší hodnoty. Opotřebení na čele vrtáků ve formě žlábků, je podstatně menší než na hřbetě. Z těchto důvodů opotřebení na čele nebývá používáno u šroubovitých vrtáků jako kritérium opotřebení.

Z technického hlediska považujeme břit vrtáku za otupený, když jeho opotřebení dosáhne velikosti, že při pokračování v dalším vrtání se břit vrtáku v krátkém čase zcela poruší. Je to opotřebení, které odpovídá reflexnímu bodu R na křivce opotřebení v závislosti na čase (Obr. 43).



Obr. 43 Závislost nárůstu opotřebení  $V_B$  na čase

V 1. počáteční fázi probíhá opotřebení velmi rychle vlivem nerovnosti ostří a vysokých tlaků v místě odběru třísky.

Ve 2. fázi po vyrovnání tlaků a vytvoření ostří odpovídajícím podmínkám obrábění se opotřebení břitu zpomalí a probíhá téměř lineárně.

Ve 3. fázi po dosažení meze opotřebení, trvanlivost břitu poklesne na takovou hodnotu, že dochází k rychlému otěru a břit vrtáku se rychle opotřebí. Pokračujeme - li ve vrtání, dochází k lavinovitému otěru a břit se úplně zničí.

Tato metodika se zabývá střední částí křivky – fázi č. 2, kde přírůstky opotřebení břitu probíhají pozvolna. Doba, po kterou vrták obrábí od svého naostření až do otupení je nazývána – trvanlivost břitu a označována písmene  $T$ . Je to tedy doba strojního času po kterou musí vrták vrtat, aby bylo dosaženo předepsaného kritéria opotřebení břitu  $V_B$ . [5]

Opotřebení hlavního břitu vrtáků  $V_B$ , jsem měřil pomocí dílenského mikroskopu. Mikroskop (Obr. 44), jehož optický systém je opatřen mikrometrickým posuvným šroubem s hodnotou dělení 0,01 mm. K zaměřování se používá okuláru s ryskovým systémem.



*Obr. 44 Dílenský mikroskop*

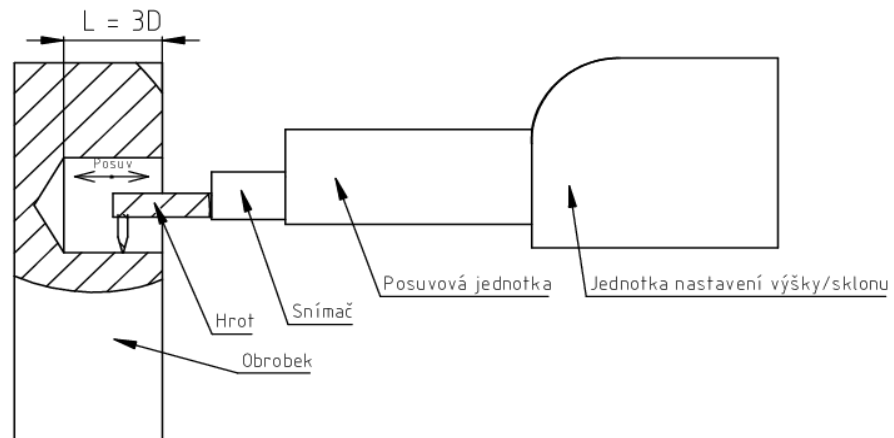
## **5.5 Drsnost obrobené plochy**

Na měření drsnosti vrtaných děr byl použit přenosný a robustní drsnoměr Mitutoyo SJ-410.

Díky snímacímu hrotu dokáže měřit povrch a charakterizovat ho za pomoci různých parametrů (až 40) dle národních i mezinárodních norem (DIN EN ISO, VDA, ANSI, JIS). [26]

Přístroj má posuv (rozsah osy X) 25 mm, zdvih (rozsah osy Z) až 800  $\mu\text{m}$ . Měření probíhá tak, že poloha snímacího hrotu vůči obrobku je zajištěna tak, aby posuv při měření byl rovnoběžný s povrchem obrobku. Viz schéma obr. 45.





Obr. 45 Schéma měření drsnosti  $R_a$ ,  $R_z$

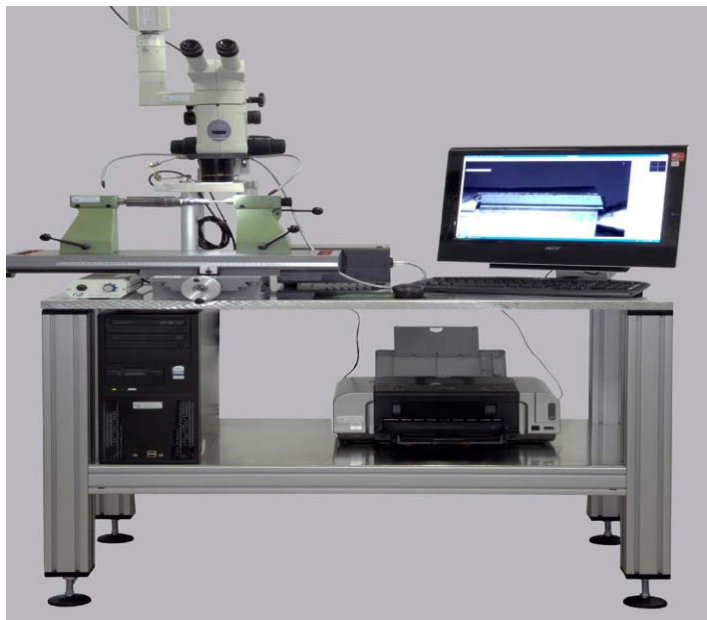
Díky vestavěné tiskárně se můžou naměřené hodnoty vytisknout. Přístroj zobrazuje i grafy a tolerance měření.



Obr. 46. Drsnoměr SJ-410

## 5.6 Tloušťka vrstvy

Pro měření tloušťky PVD povlaků byly použity Kalotesty. Pro stanovení tloušťky materiálu byl použit optický mikroskop NIKON SMZ 1500 s digitální kamerou DX20 (Obr. 47).



*Obr. 47 Mikroskop SMZ 1500 s kamerou DX20*

## 5.7 Tvrdost povlaku

Měření Instrumentované zkoušky tvrdosti bylo provedeno na přístroji Micro Combi Tester od firmy CSM Instruments dle normy ČSN EN ISO 14577-1.

Zvolené parametry zkoušky:

- aplikované zatížení - 0,5 N,
- výdrž na maximálním zatížení - 10 s,
- zatěžující a odtěžující rychlost - 1 N/min,
- Poissonovo číslo - 0,3.

Jako vnikací tělísko (indentor) byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  (Vickersův indentor). Měření byla provedena metodou DSI (Depth Sensing Indentation) a vyhodnocení mikro - mechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr.



*Obr. 48 Mikrotvrdoměr – Micro Combi Tester*

## 6 VÝSLEDKY ZKOUŠEK A JEJICH VYHODNOCENÍ

### 6.1 Velikost opotřebení

Při experimentu, stanovení opotřebení byla použita dlouhodobá zkouška při vrtání. Za porovnávací kritérium bylo stanovené opotřebení hřbetu  $VB = 0,2\text{mm}$ , při stejných řezných podmínkách pro všechny druhy napovlakovaných vrtáků.

Doporučené řezné podmínky se liší pro každý typ povlaků. Obvykle se udávají o 15 až 30% větší než u nepovlakovaných nástrojů. Po konzultaci s výrobcem šroubovitých vrtáků, byly řezné podmínky zvýšeny o 25 % nad udávané katalogové doporučení (Tab. 4). Vrtací zkoušky byly provedeny do hloubky  $L = 3D$  s přerušným řezem. Vrtáky se chladily řeznou kapalinou Blascut Kombi s koncentrací 10%.

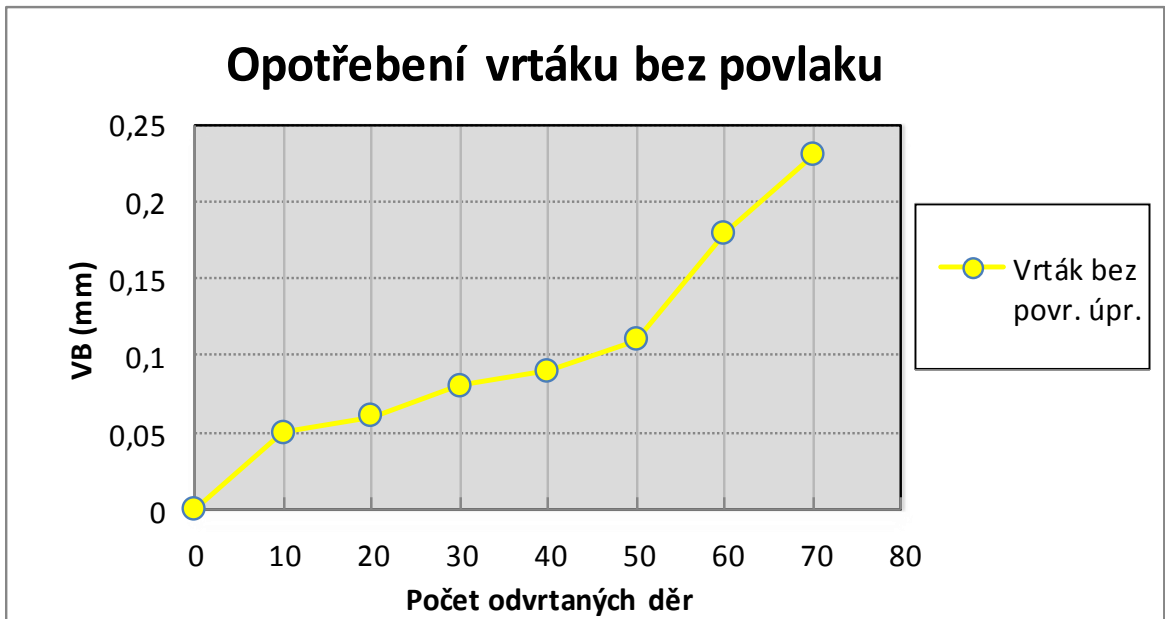
*Tab. 4 Řezné podmínky při dlouhodobé zkoušce opotřebení*

Řezná rychlost (m/mm)	Posuv (mm/ot)	Otáčky (ot/min)
28,75	0,162	1116

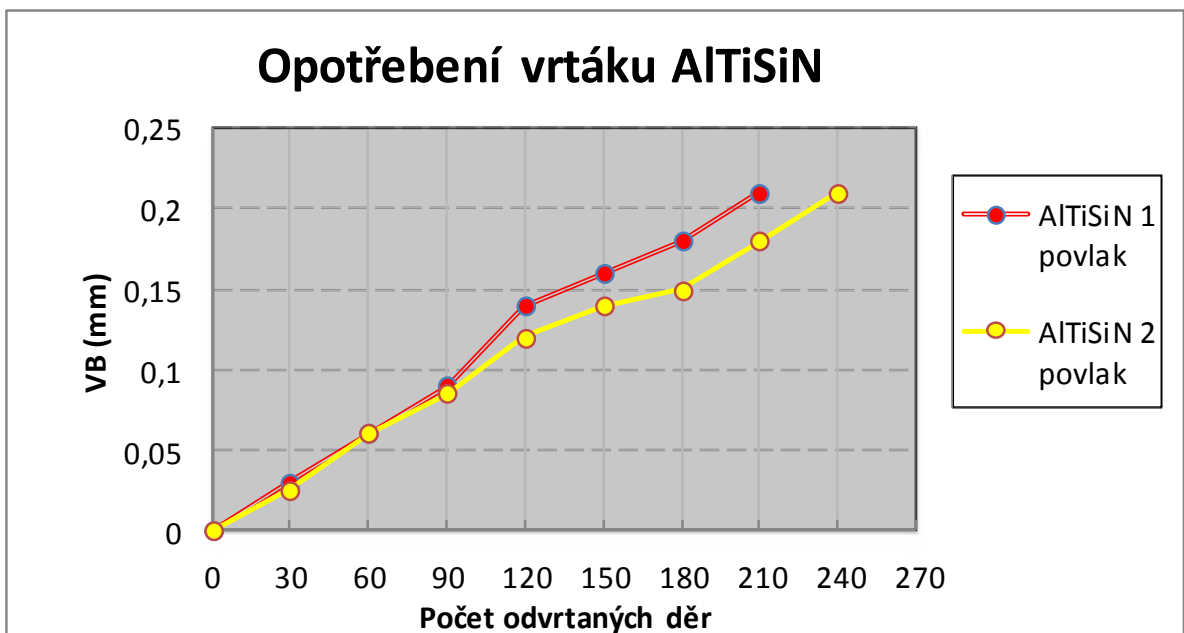
Z naměřených hodnot, v závislosti na počtu odvrtných děr, byly sestrojeny grafy pro jednotlivé typy povlaků.

Měření bylo prováděno u nepovlakovaného vrtáku po 10 dírách. U povlakovaných vrtáků bylo měření prováděno po 30 dírách, z důvodu malého opotřebení.

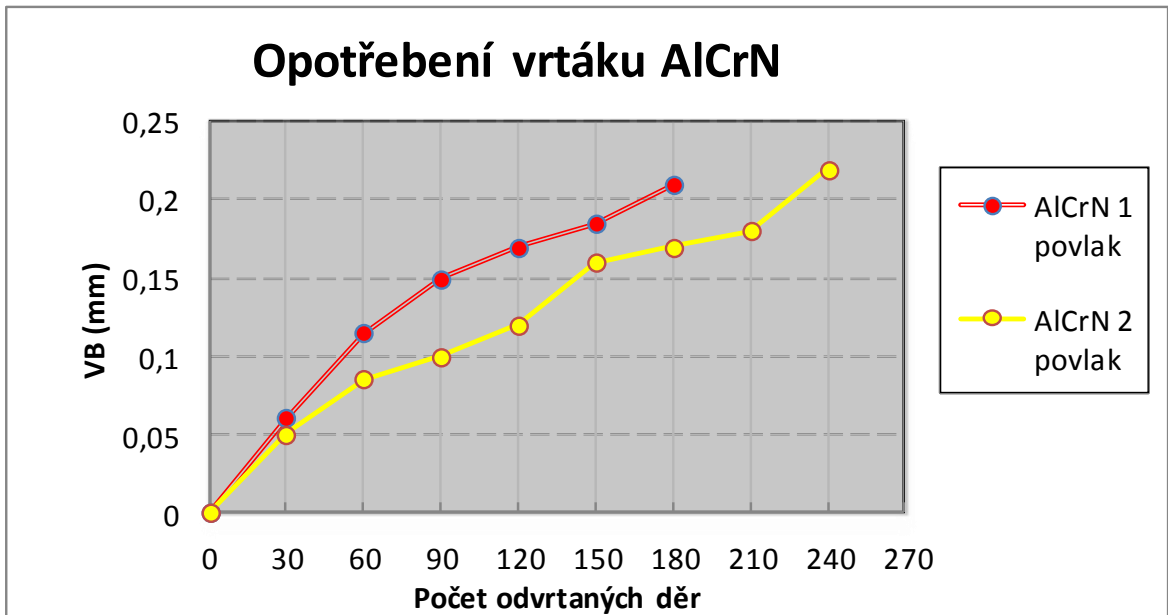
Na obrázcích 49. – 53. můžete vidět spojnicové grafy pro napovlakované šroubovitě vrtáky, jak narůstalo opotřebení v závislosti na počtu odvrtných děr.



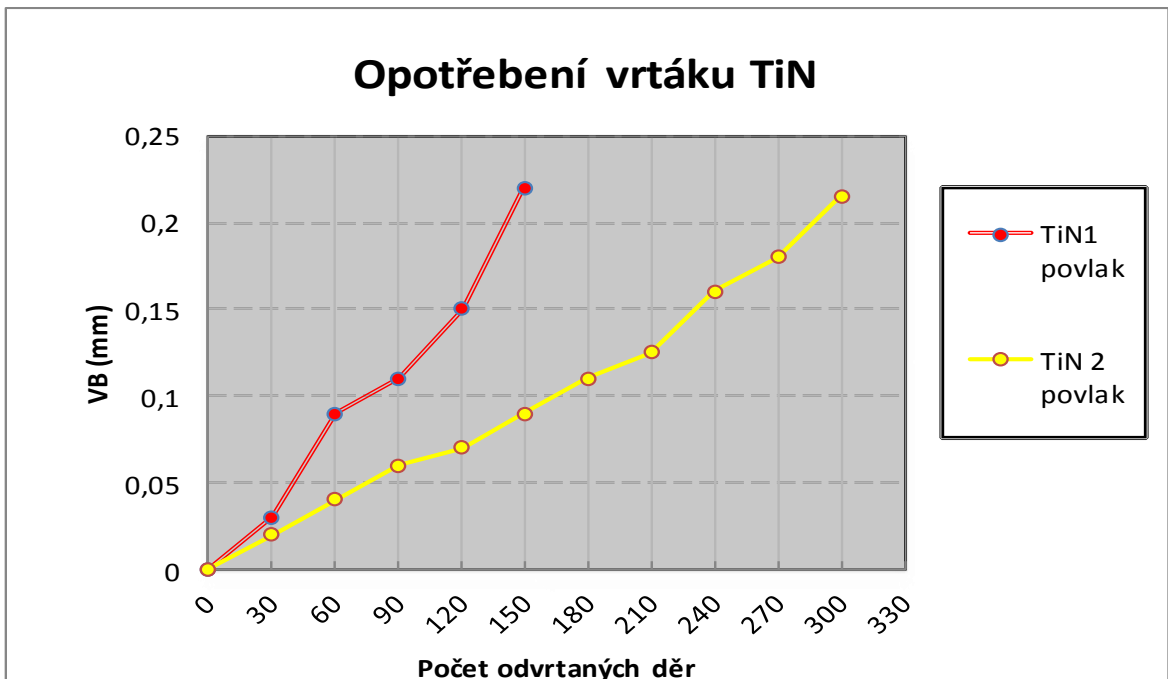
Obr. 49 Průběh opotřbení u vrtáku bez povlaku



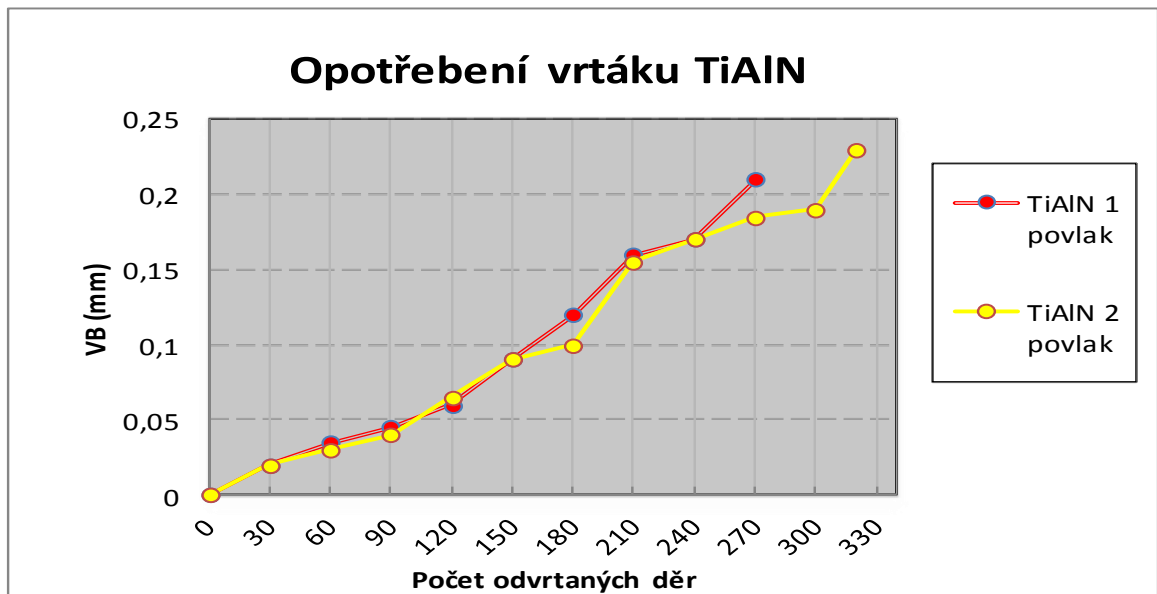
Obr. 50 Průběh opotřbení u vrtáku s povlakem AlTiSiN



Obr. 51 Průběh opotřebení u vrtáku s povlakem AlCrN

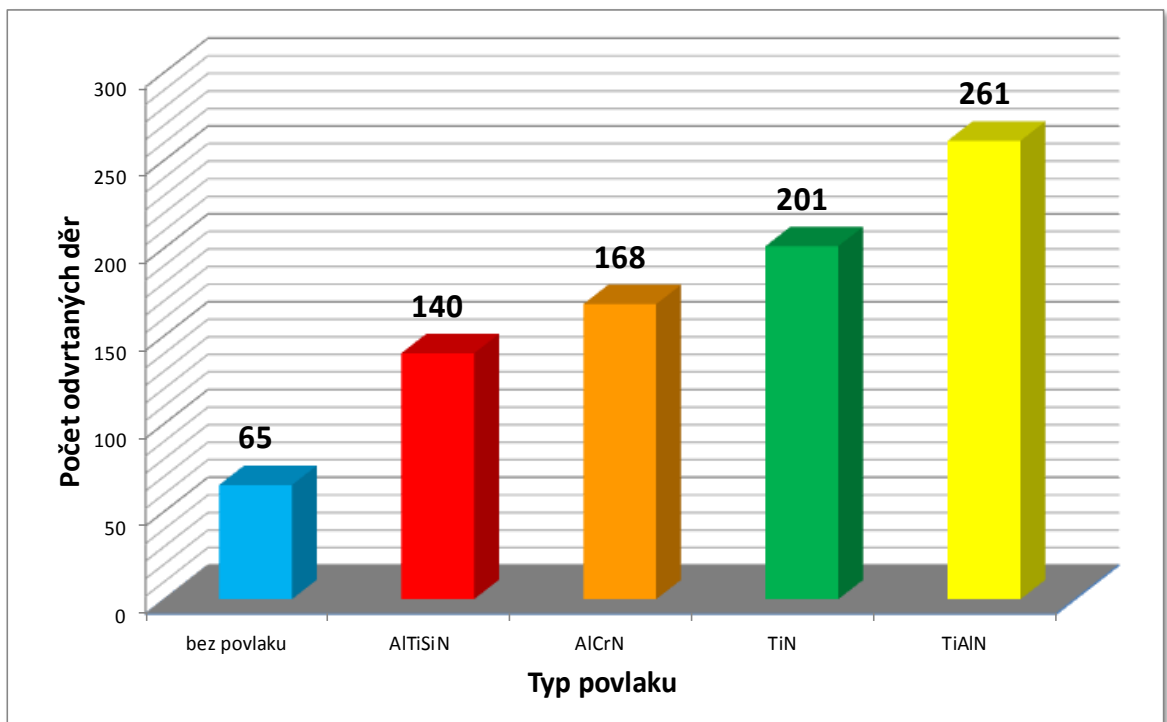


Obr. 52 Průběh opotřebení u vrtáku s povlakem TiN

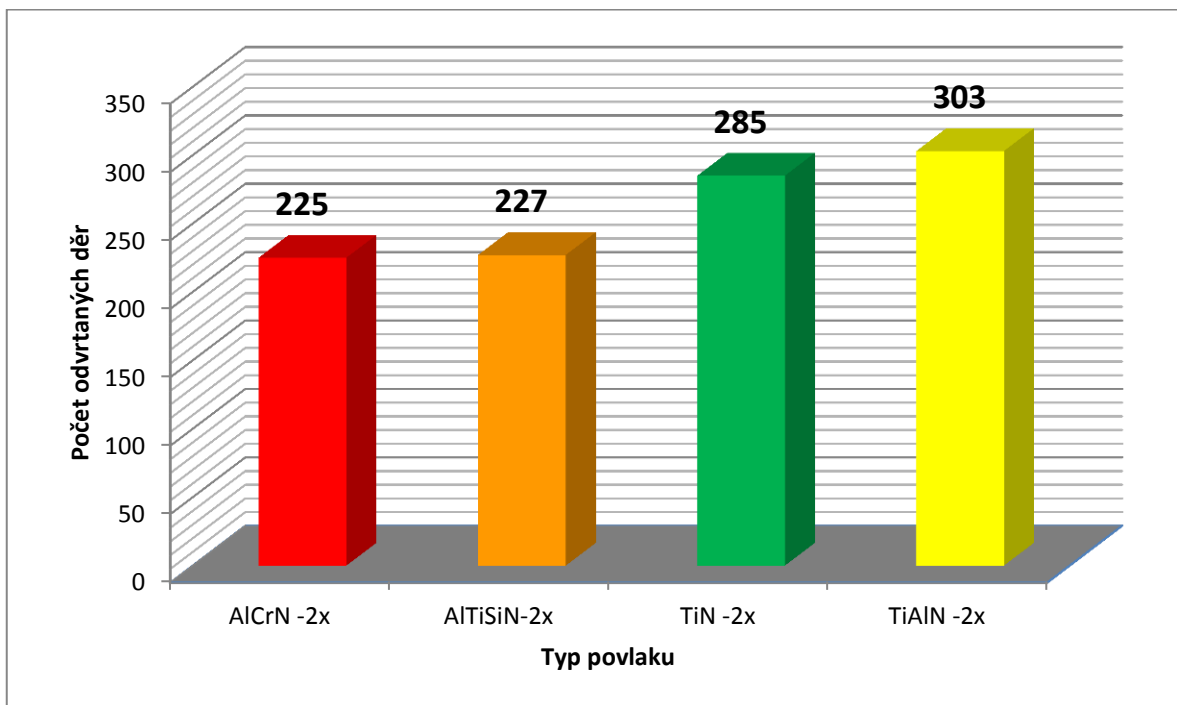


Obr. 53 Průběh opotřebení u vrtáku s povlakem TiAlN

V těchto grafech je zřejmé, že opotřebení vrtáku narůstá s počtem odvrтанých děr. U vrtáku napovlakovaných jednovrstvou je doba opotřebení kratší než u vrtáku se dvěma vrstvami. Z těchto grafů jsme odečetli průběh opotřebení  $V_B = 0,2\text{mm}$  a porovnali je v grafech 54-55.



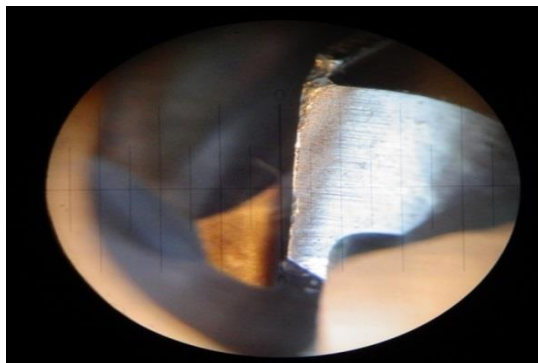
Obr. 54 Porovnání opotřebení vrtáků  $V_B = 0,2\text{mm}$  napovlakovaných jednou vrstvou



Obr. 55 Porovnání opotřebení vrtáků  $V_B = 0,2\text{mm}$  napovlakovaných dvěma vrstvy

Můžeme říct, že velmi rychle se opotřebují vrtáky bez povrchové úpravy. To může být způsobeno zvýšenými reznými podmínkami. Nejdéle vydržel povlak TiAlN u vrtáku s jedním povlakem. Dá se říct, že o třetinu než ostatní vrtáky. U vrtáku napovlakovaných dvakrát, je zřejmé, že nejdelší výdrž má opět vrták s povlakem TiAlN, ale oproti vrtáku s jednopovlakem se téměř o polovinu zvětšila trvanlivost u vrtáku s povlakem typu TiN.

Na obr. 56 je zobrazen, břit vrtáku bez povrchové úpravy po 70 dířích. Zbytek fotek opotřebení z mikroskopu naleznete v příloze I, která bude vzhledem k velkému počtu fotek k nalezení na CD.

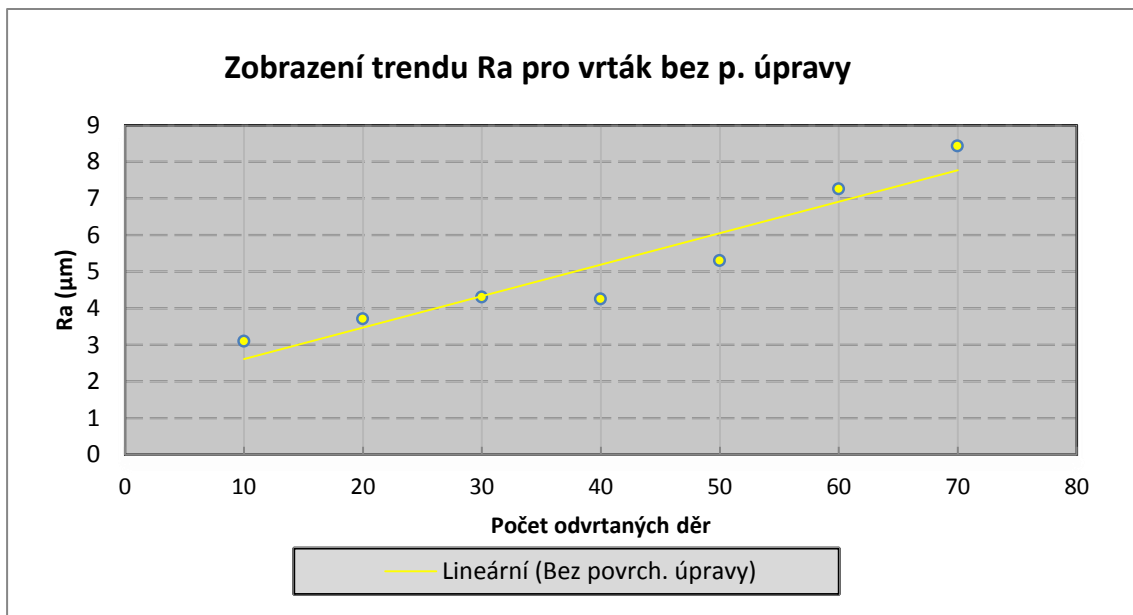


Obr. 56 Opotřebení vrtáku bez povlaku  
po 70 dířích

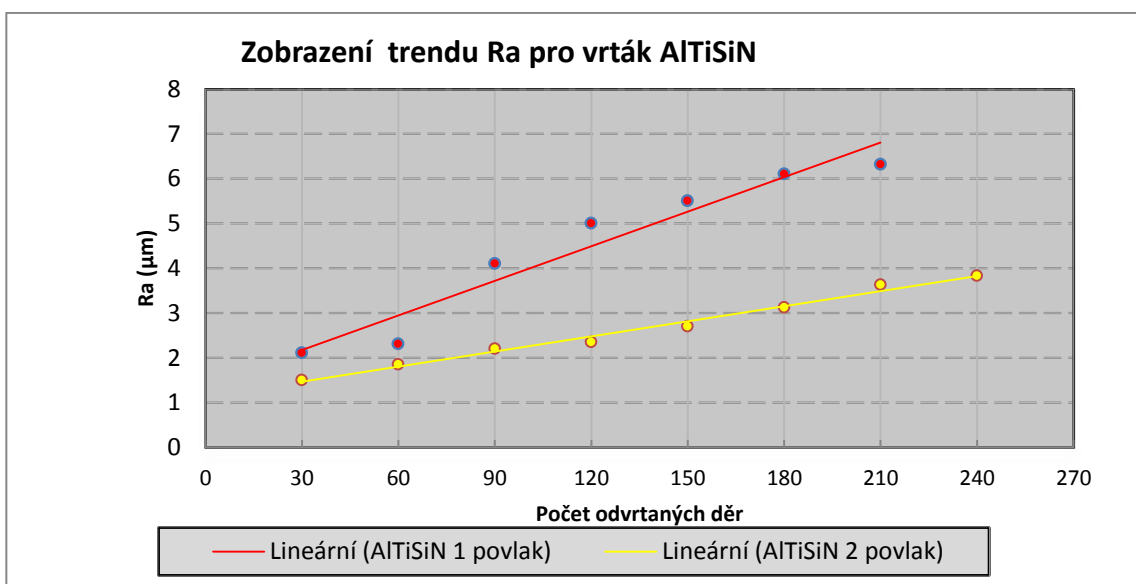


## 6.2 Hodnoty drsnosti

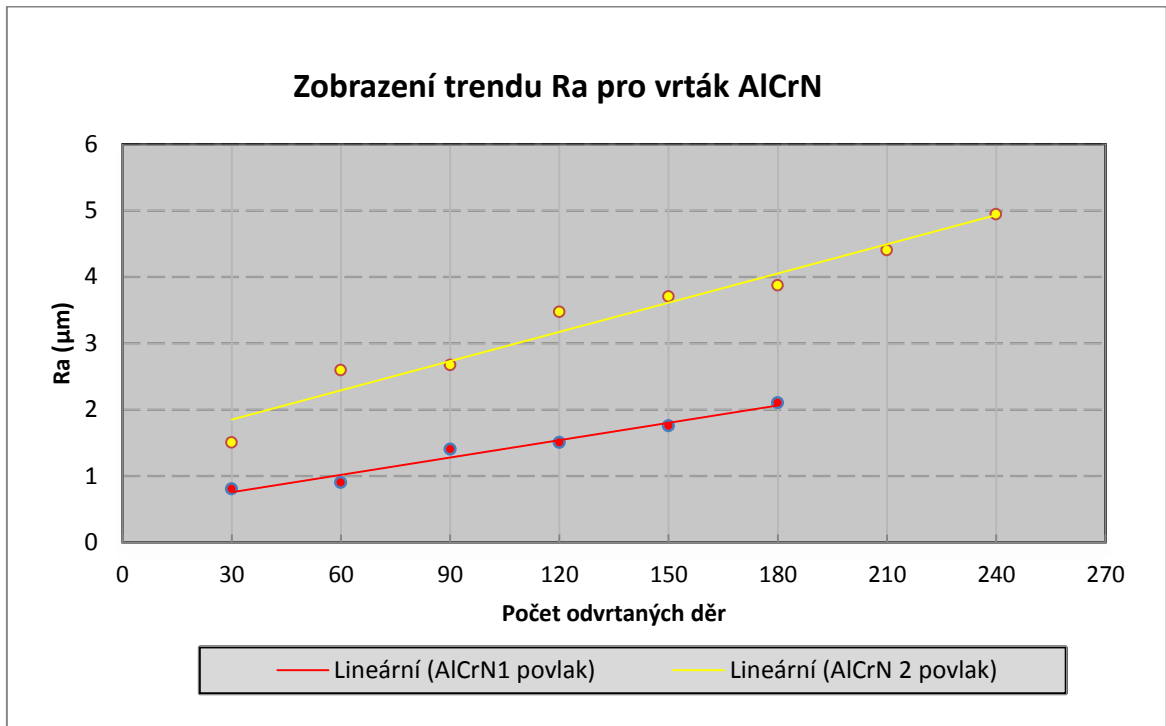
Při vyvrtání díry se kromě měření opotřebení hřbetu VB na vrtácích, měřila i drsnost povrchu vrtaných děr ( $R_a$ ,  $R_z$ ). Abychom jsme zjistili, který povlak je z hlediska jakosti děr nejlepší, byly nejdříve porovnávány mezi sebou vrtáky s jedním a se dvěma povlaky a výsledky vyhodnoceny v grafech jednotlivých trendů v závislosti na počtu odvrtaných děr (Obr. 57 - 61).



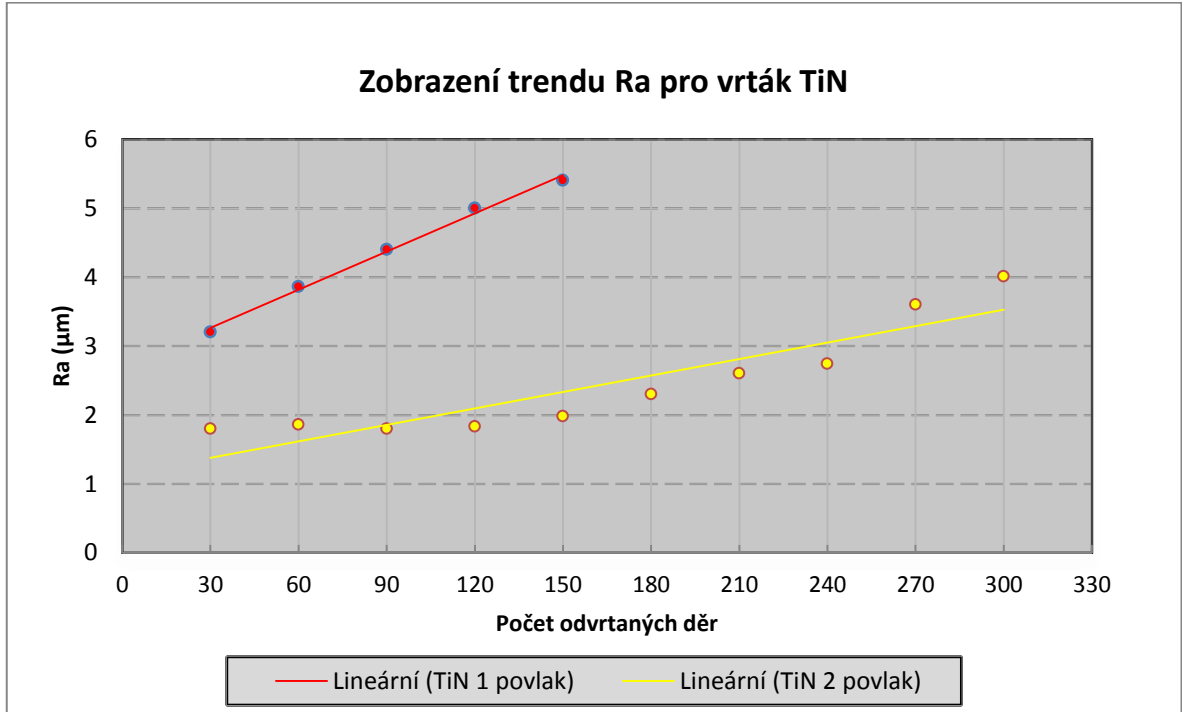
Obr. 57 Závislost trendu  $R_a$  na počtu odvrtaných děr vrtákem bez povrchové úpravy



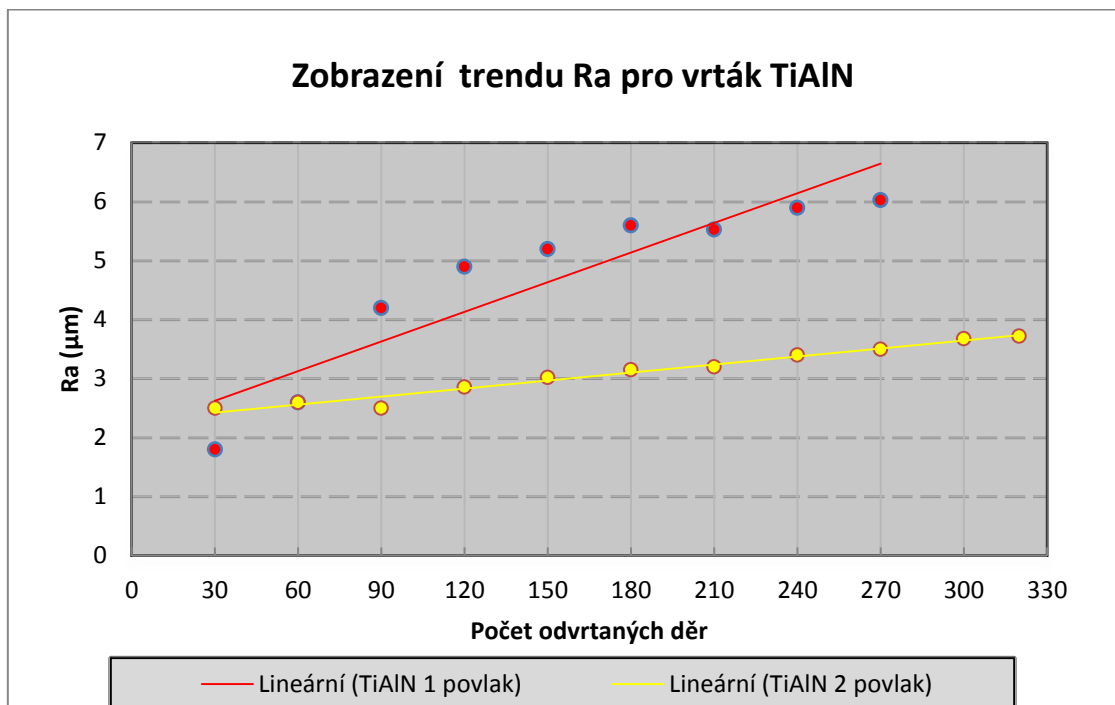
Obr. 58 Závislost trendu  $R_a$  na počtu odvrtaných děr vrtákem s povlakem AlTiSiN



Obr. 59 Závislost trendu Ra na počtu odvrtných děr vrtákem s povlakem AlCrN



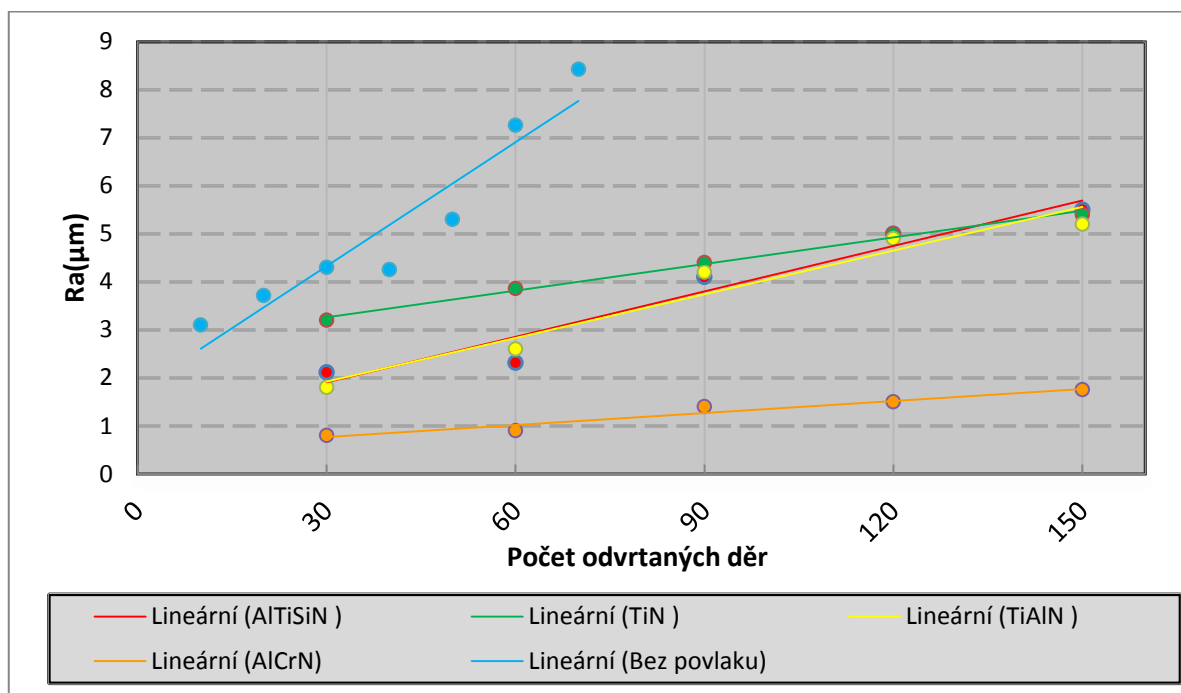
Obr. 60 Závislost trendu Ra na počtu odvrtných děr vrtákem s povlakem TiN



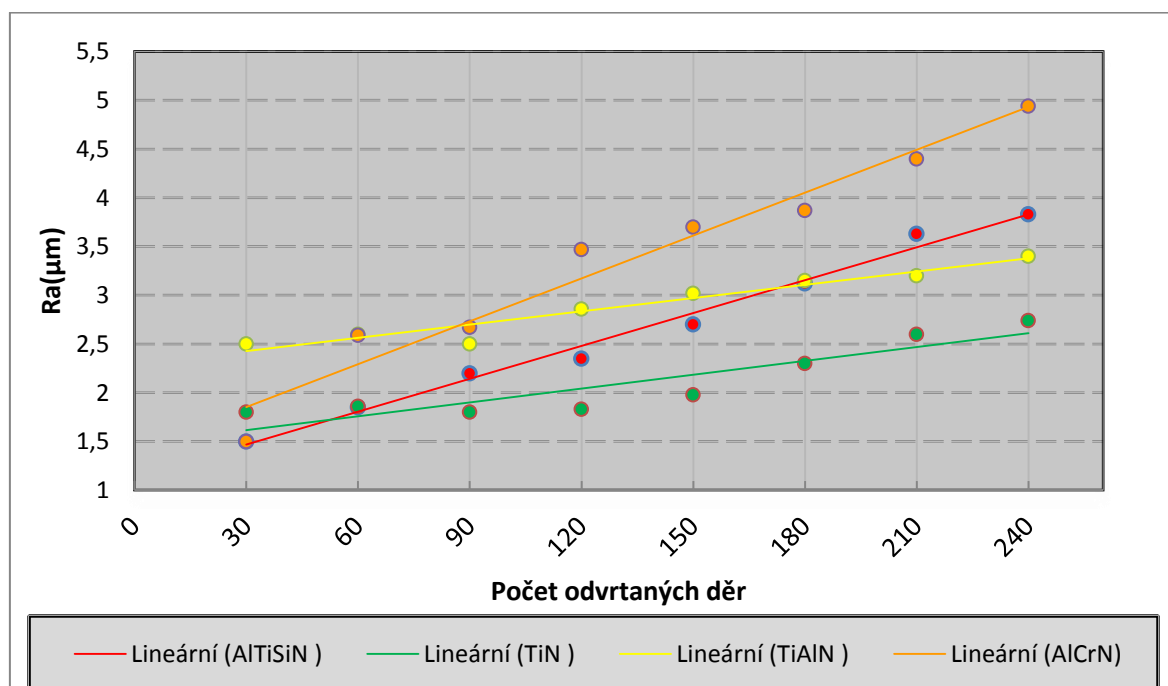
*Obr. 61 Závislost trendu Ra na počtu odvrtných děr vrtákem s povlakem TiAlN*

Z grafů je možné vidět, že povlaky se dvěma povlaky mají drsnost Ra, relativně nižší než u vrtáků s jedním povlakem. Jenom u povlaku AlCrN je to naopak.

V následujících grafem (Obr. 62 - 63), jsme porovnali vrtáky povlakované jednovrstvou mezi sebou a vrtáky povlakované dvouvrstvou. Aby nebyly výsledky zkreslené tak jsme určili, že se bude porovnávat Ra do 150 odvrtných děr u jednovrtáků a 240 děr u dvou povrtáků.



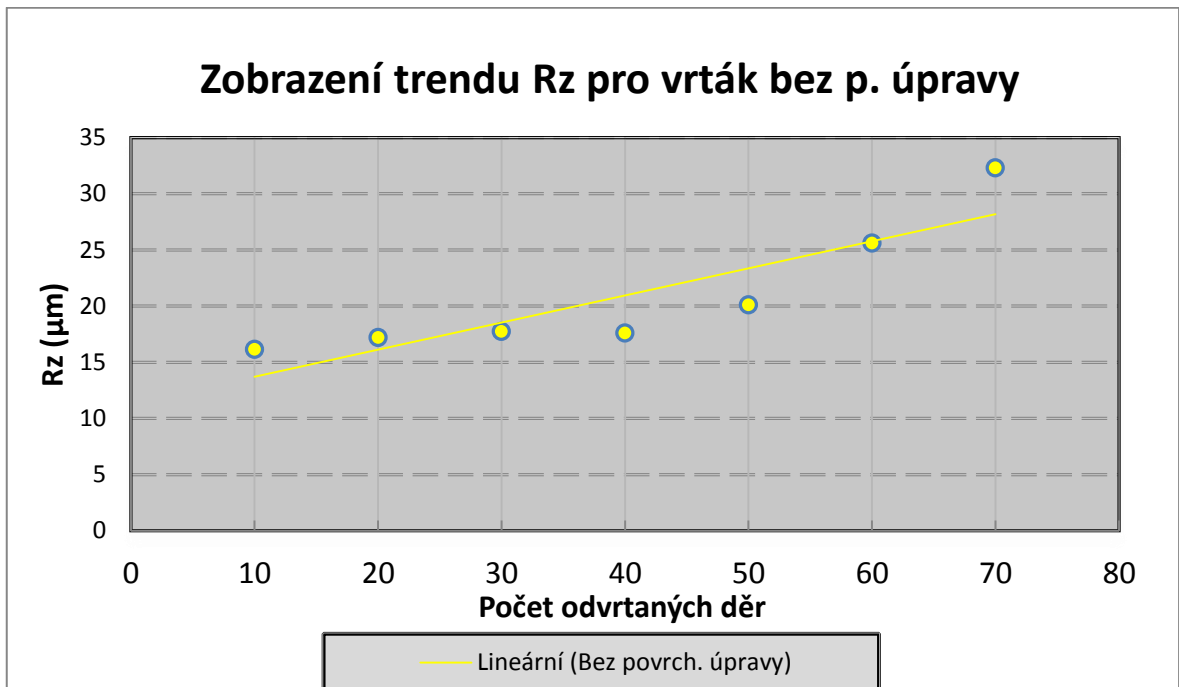
Obr. 62 Porovnání trendu Ra mezi jednotlivými povlaky s jednou vrstvou povlaku



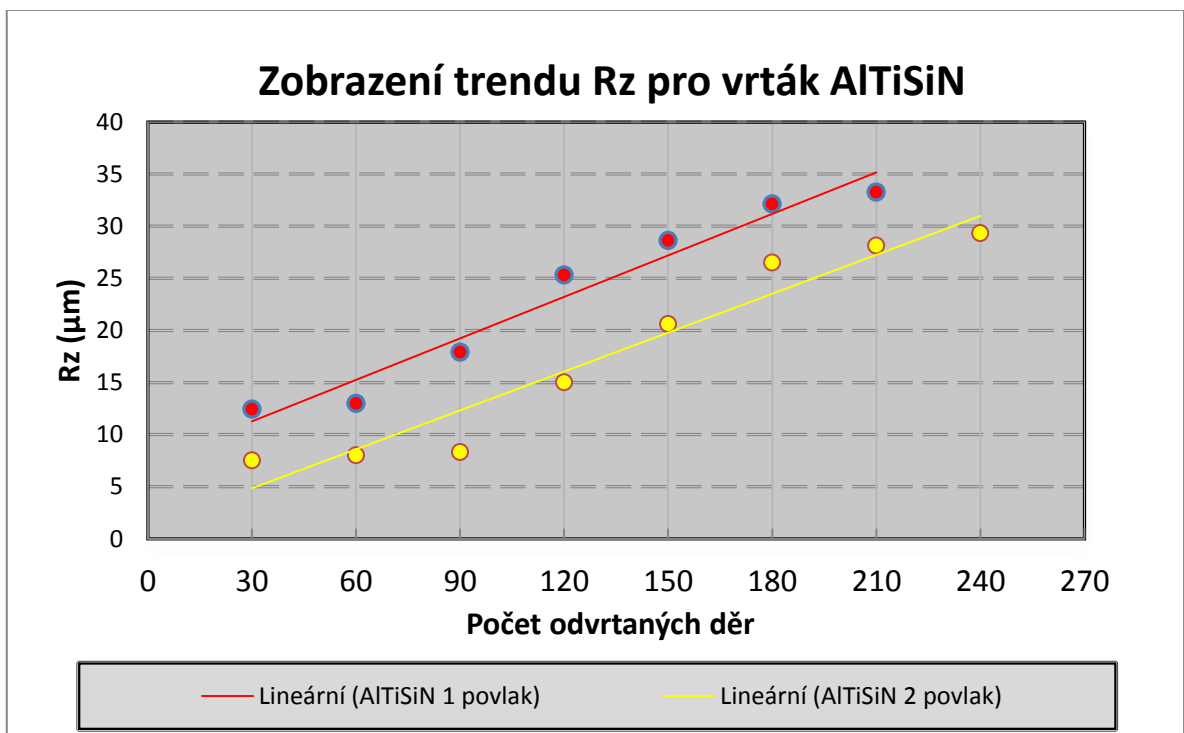
Obr. 63 Porovnání trendu Ra mezi jednotlivými povlaky se dvěma vrstvy povlaku

Z grafů lze vyčíst, že vrtáky s povlakem AlCrN s jednou vrstvou mají drsnost Ra nejlepší. U vrtáků se dvěma vrstvy je drsnost Ra u všech povlaků podobná, ale oproti vrtáku s jednou vrstvou je drsnost vrtáku povlakem AlCrN nejhorší.

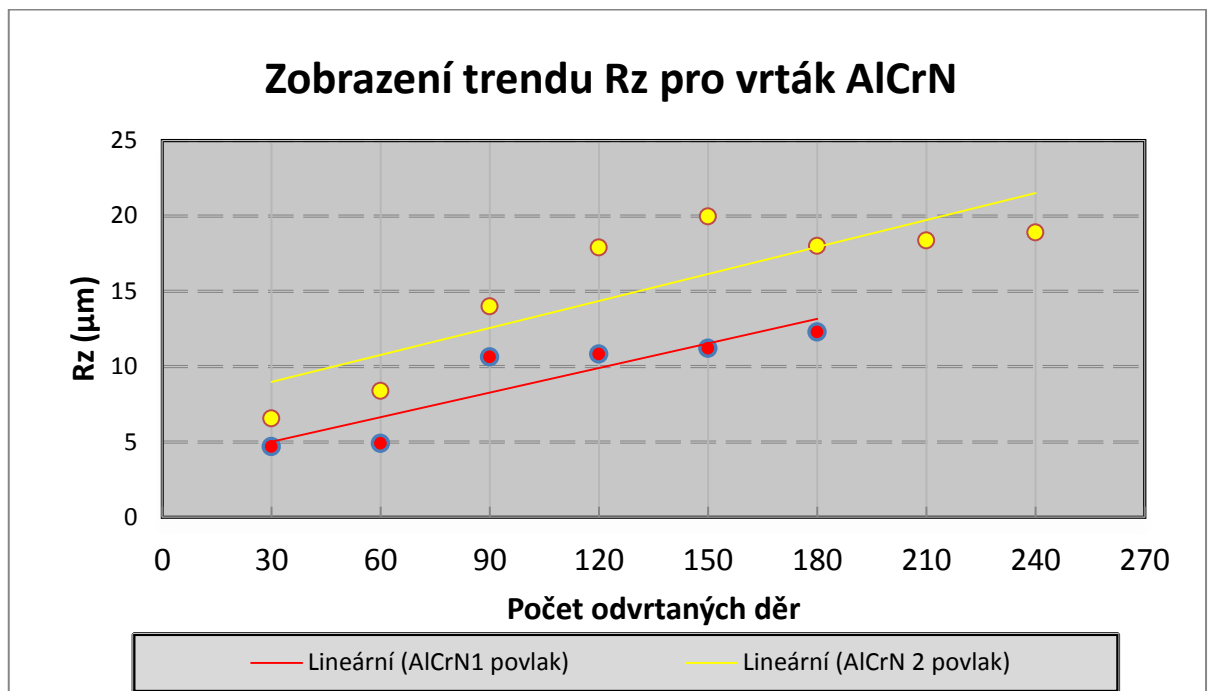
V grafech (Obr. 64 - 68) jsou znázorněni a porovnány drsnosti Rz vrtaných děr.



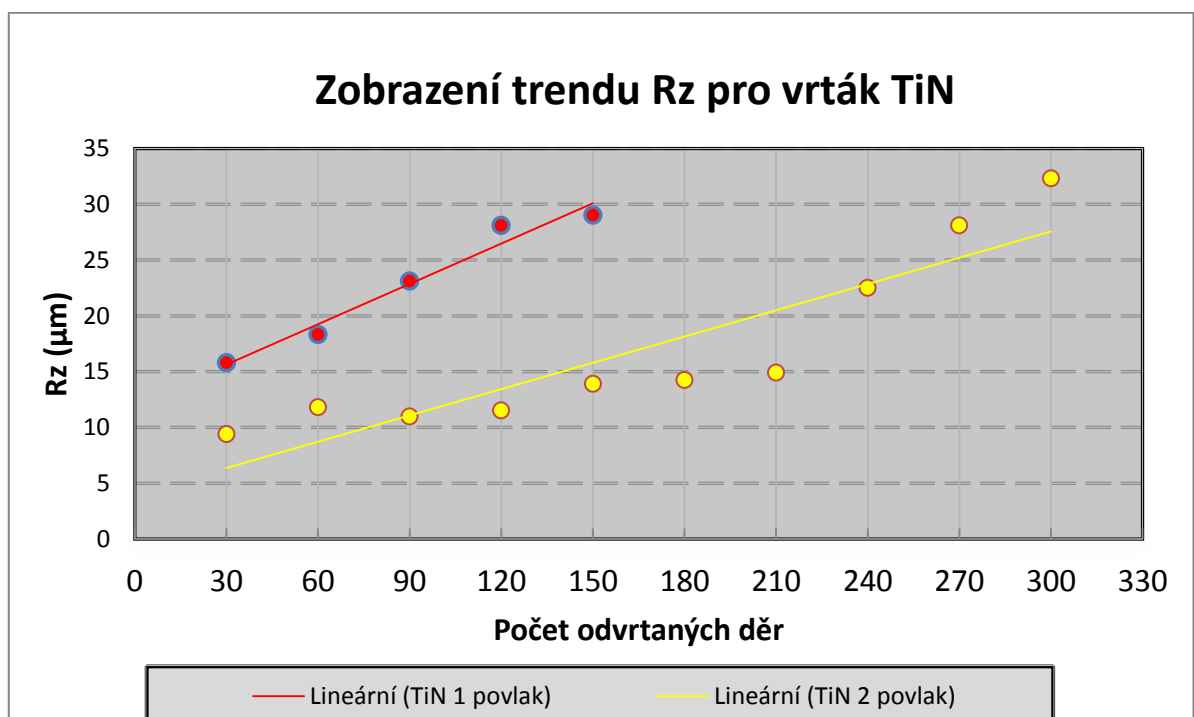
Obr. 64 Závislost trendu Rz na počtu odvrtných děr vrtákem bez povrchové úpravy



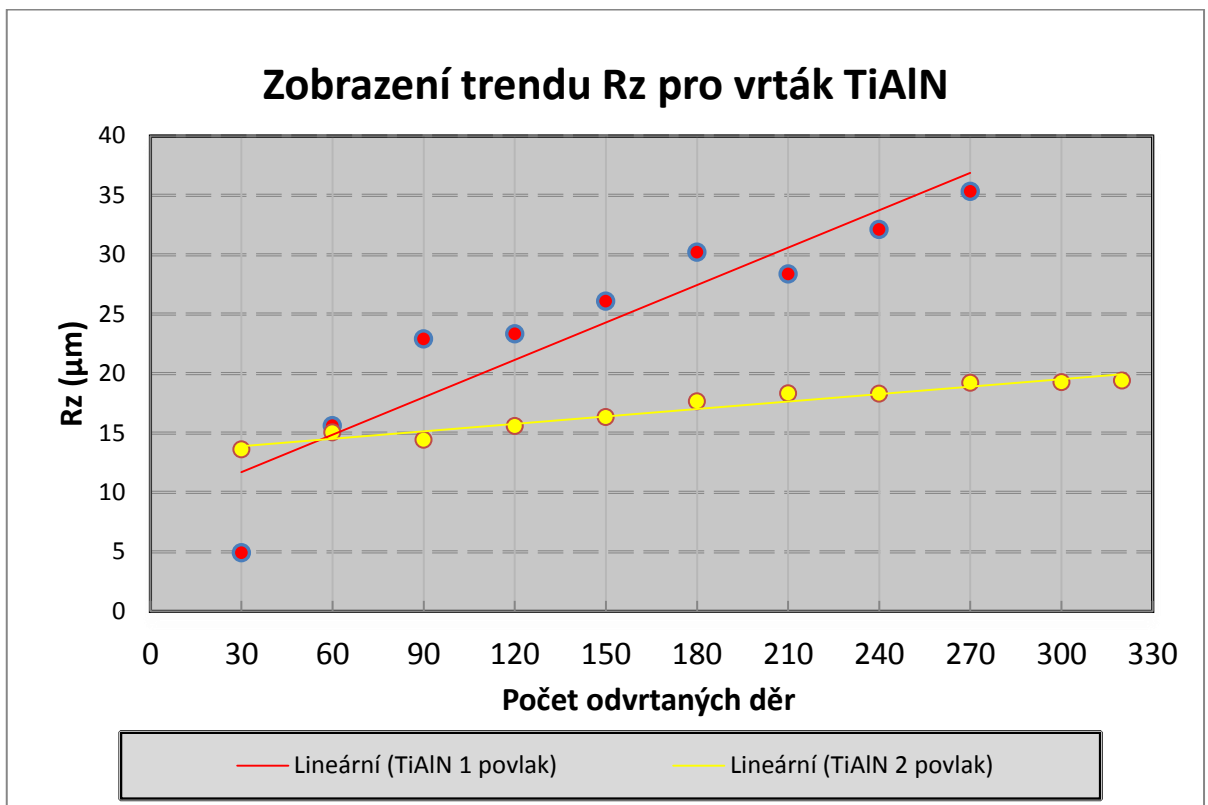
Obr. 65 Závislost trendu Rz na počtu odvrtných děr vrtákem s povlakem AlTiSiN



Obr. 66 Závislost trendu Rz na počtu odvrтанých děr vrtákem s povlakem AlCrN

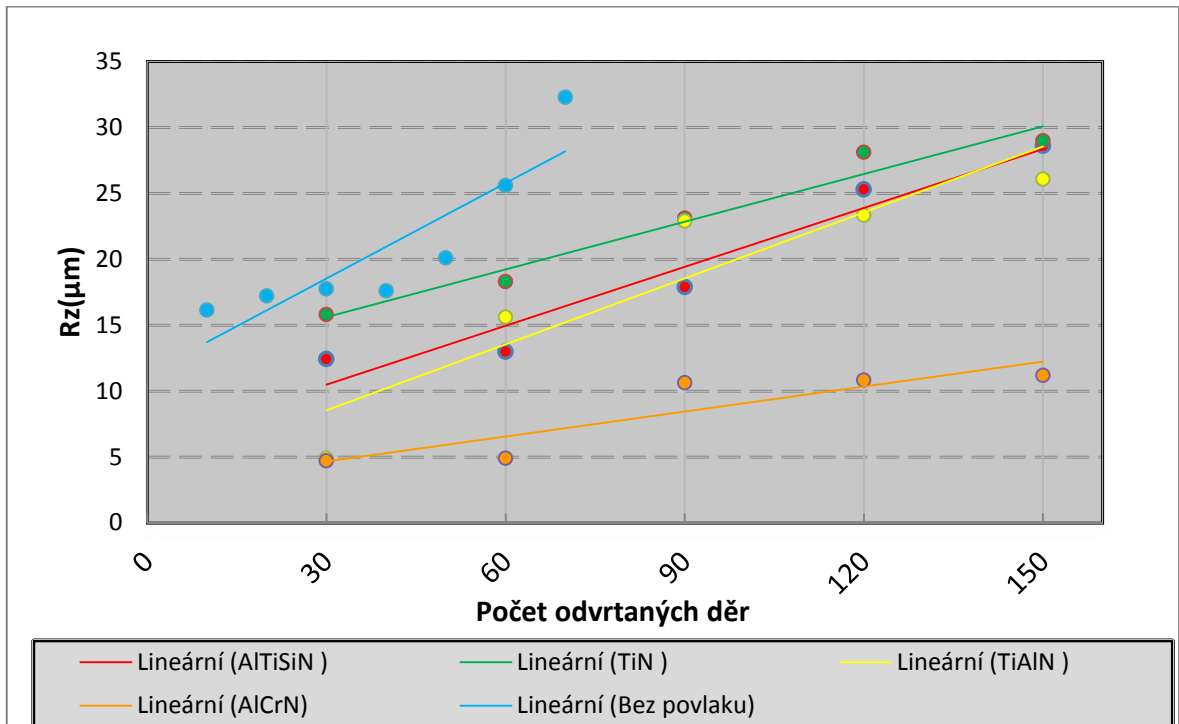


Obr. 67 Závislost trendu Rz na počtu odvrтанých děr vrtákem s povlakem TiN

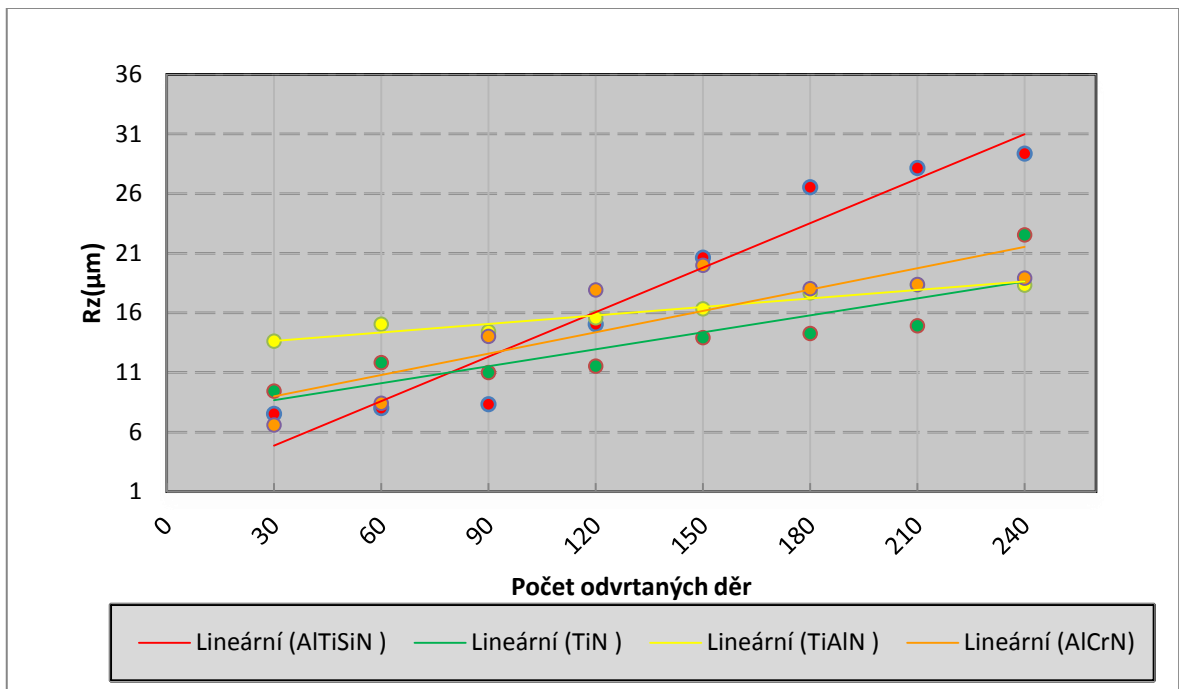


Obr. 68 Závislost trendu Rz na počtu odvrтанých děr vrtákem s povlakem TiAlN

V následujících grafem (Obr. 69 - 70), jsme porovnali vrtáky povlakované jednovrstvou mezi sebou a vrtáky povlakované dvouvrstvou. Stejně jako u porovnávání drsnosti Ra jsme použili pro Rz do 150 odvrтанých děr u jednopovlaků a 240 děr u dvou povlaků.



Obr. 69 Porovnání trendu Rz mezi jednotlivými povlaky s jednou vrstvou povlaku



Obr. 70 Porovnání trendu Rz mezi jednotlivými povlaky se dvěma vrstvy povlaku

Z grafů lze vyčíst, že vrtáky s povlakem AlCrN s jednou vrstvou mají drsnost Rz nejlepší. U vrtáků se dvěma vrstvi je drsnost Rz u všech povlaků podobná.



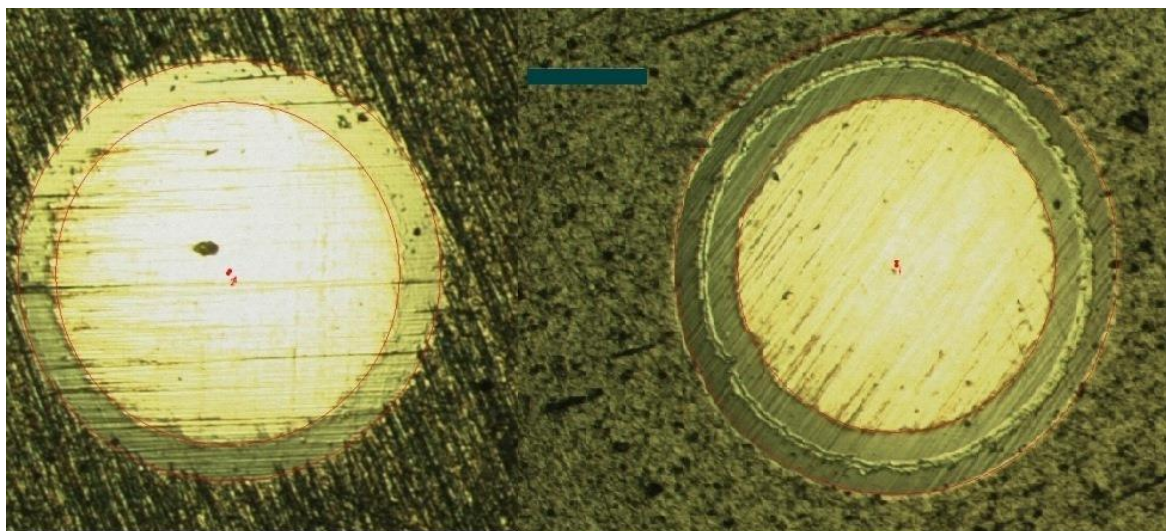
### 6.3 Tloušťky vrstvy povlaků

V tabulce č. 5 jsou zaznamenány tloušťky jednotlivých povrchů.

Tab. 5 Tloušťka jednotlivých povlaků

Vzorek	AlTiSiN	TiN	AlCrN	TiAlN
1 x povlak [μm]	3,145	2,158	2,119	1,942
2 x povlak [μm]	6,264	3,037	4,921	4,471

Tloušťka vrstva povlaků, by měla být v rozmezí 2 - 4 [μm] u vrtáku s jedním povlakem. Dle naměřených výsledků tuto podmínku splňují všechny povlaky. Z tabulky vidíme, že dvoupovlaky mají tloušťku povlaku dvojnásobnou. Jenom u povlaku TiN je vrstva menší, což může být způsobené kratší dobou vrtáku v povlakovacím zařízení. Na obr. 71 je vidět zkušební váleček s povlakem AlCrN. Z obrázku je dobře vidět rozdíl mezi jednou vrstvou povlaku a mezi dvěma. Zbytek obrázků s dalšími druhy povlaků bude z důvodu velkého počtu v příloze č. II.



a)

b)

Obr. 71 Povlakované vrstvy AlCrN a) jeden povlak; b) dva povlaky

## 6.4 Tvrdost vrstvy povlaku

ČSN EN ISO 14577 - 1 Kovové materiály - Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů

Metoda DSI se v praxi používá na širokém a rozmanitém množství materiálů, měkkými polymery počínaje a tvrdými uhlíkovými diamantu podobnými vrstvami konče.

Podstatou instrumentované zkoušky mikrotvrdosti je kontinuální záznam zatěžující síly  $P$  a okamžité polohy indentoru  $h$ . Grafické vyjádření této závislosti se označuje jako indentační křivka. Na Obr. 72 je zobrazen výsledek měření pro povlak TiN. Zbytek výsledků bude z důvodů velkého počtu v příloze č. III.

V tabulce č. 6 jsou zobrazeny výsledky měření tvrdosti. Tvrdosti dle Vickerse byly následně porovnány v grafech č 73 - 74.

*Tab. 6 Výsledky měření tvrdosti*

Vzorek	$H_{IT}$ [MPa]	$E_{IT}$ [GPa]	HV[Vickers]
<b>TiN-1x</b>	12476	270	<b>1177</b>
<b>TiN-2x</b>	19505	285	<b>1841</b>
<b>TiAlN-1x</b>	14156	291	<b>1336</b>
<b>TiAlN-2x</b>	15847	248	<b>1495</b>
<b>AlTiSiN-1x</b>	9505	208	<b>897</b>
<b>AlTiSiN-2x</b>	15006	233	<b>1416</b>
<b>AlCrN-1x</b>	10994	230	<b>1037</b>
<b>AlCrN-2x</b>	16339	259	<b>1542</b>

**Indentation parameters**

+ Standard

Acquisition Rate : 10,0 [Hz]

Linear Loading

Max load : 500,00 mN

Loading rate : 1000,00 mN/min

Unloading rate : 1000,00 mN/min

Pause : 10,0 s

+ MHTX S/N: 01-04253 settings

Fn contact : 15 mN

Approach speed : 5000 nm/min

Retract speed : 5000 nm/min

Retract Time : 3 sec

Dz sensor in fine range

Load in fine range

X Position :66,50 mm

Y Position :37,13 mm

Date : 14.4.2014

Hour : 14:32:53

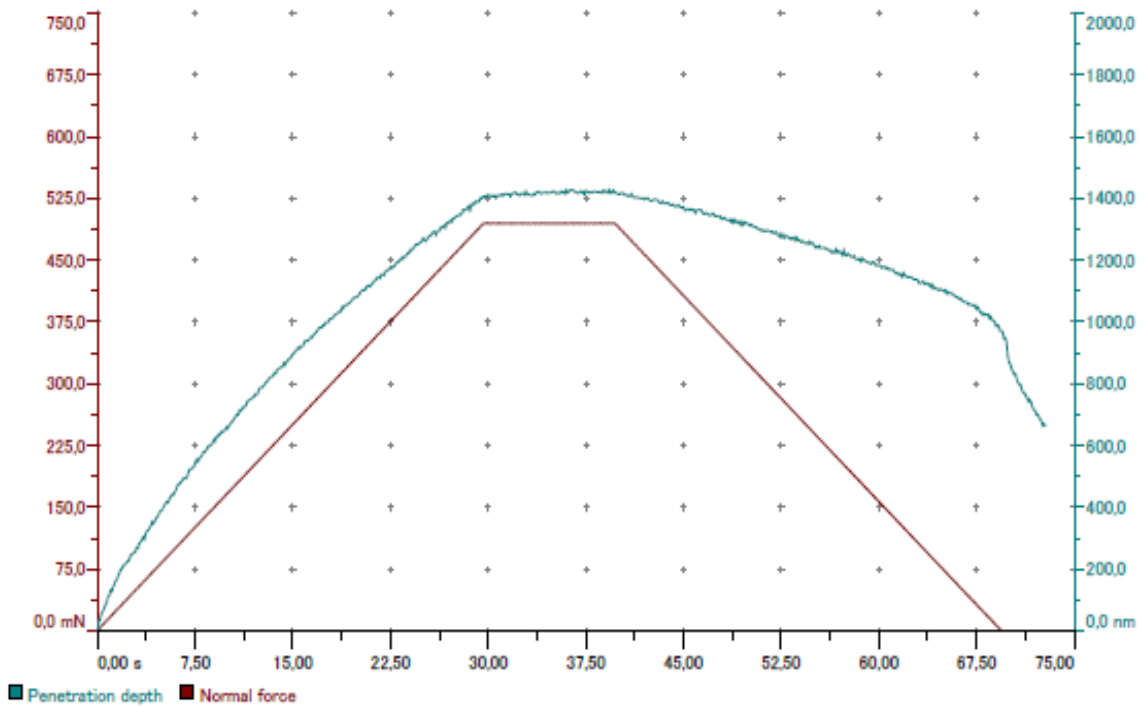
**Indenters**

Type : Vickers

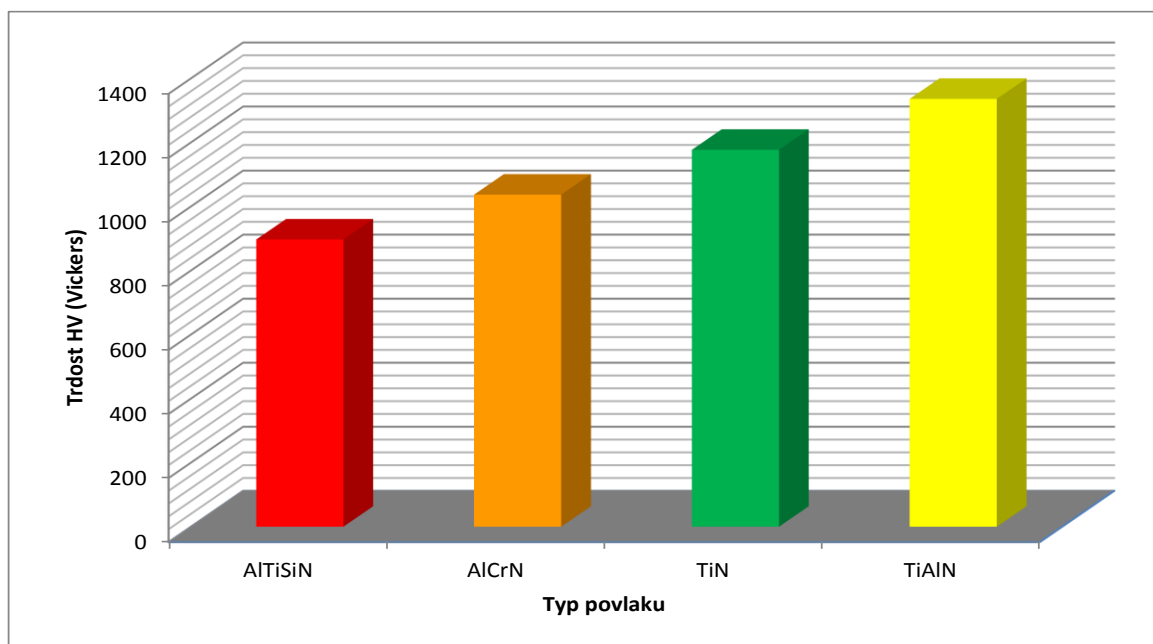
Serial number : V-H 69 18012011

Material : Diamond

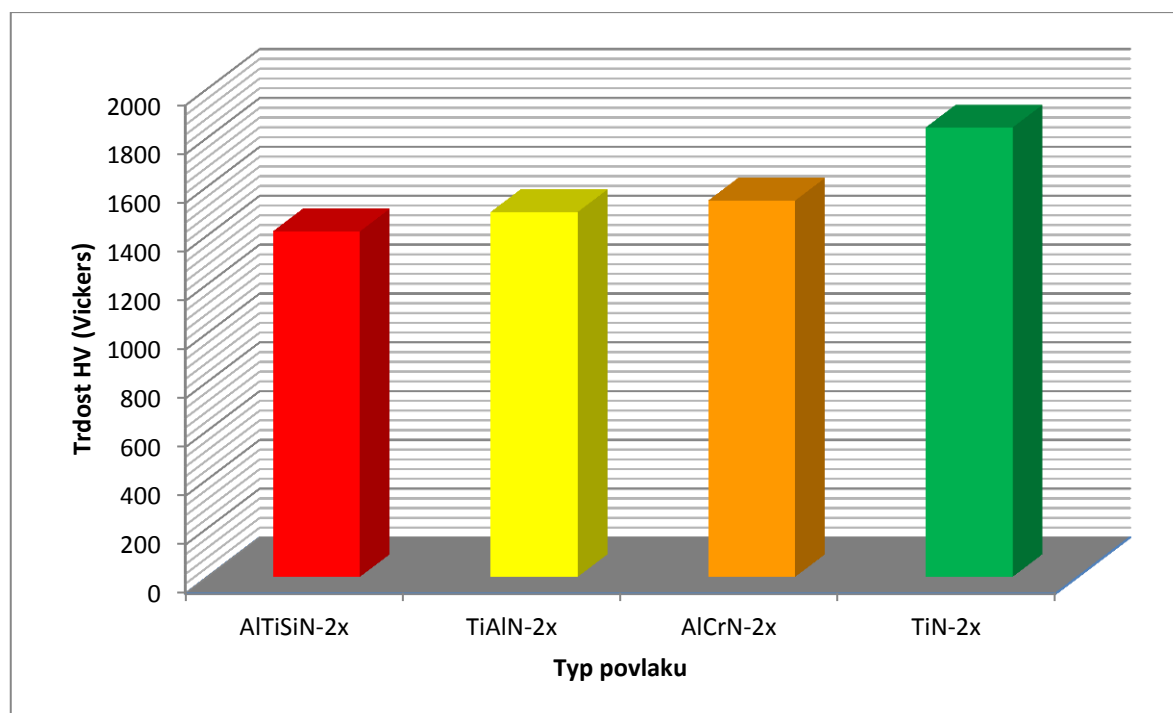
**Curves**



Obr. 72 Ukázka výsledků měření tvrdosti povlaku TiN s jedním povlakem



Obr. 73 Porovnání tvrdosti vrtáku s jedním povlakem dle Vickerse



Obr. 74 Porovnání tvrdosti vrtáku s dvěma povlaky dle Vickerse

## 6.5 Ekonomické zhodnocení

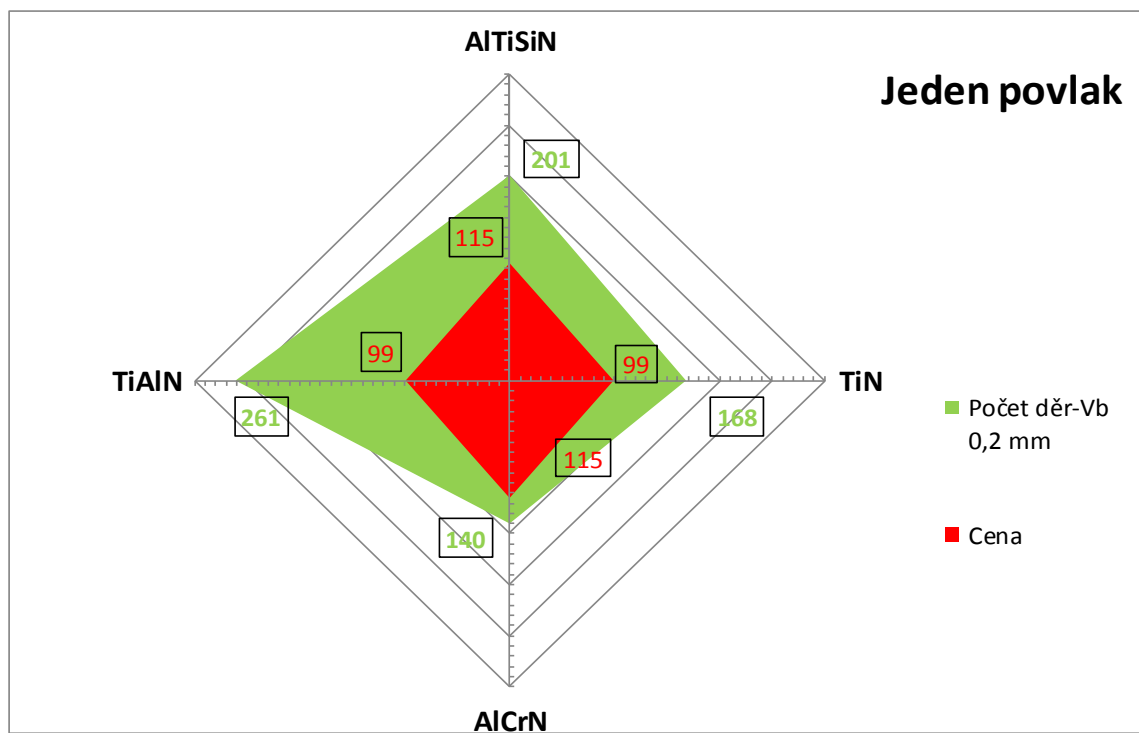
Budeme vycházet z ceny vrtáků a ceny povlaků nástrojů. Základní cena našeho použitého vrtáku je 35 Kč. V níže uvedené tabulce (Tab. 7), jsou uvedeny ceny vrtáku i s následným povlakem.

Tab. 7 Ceny povlakovaných vrtáků

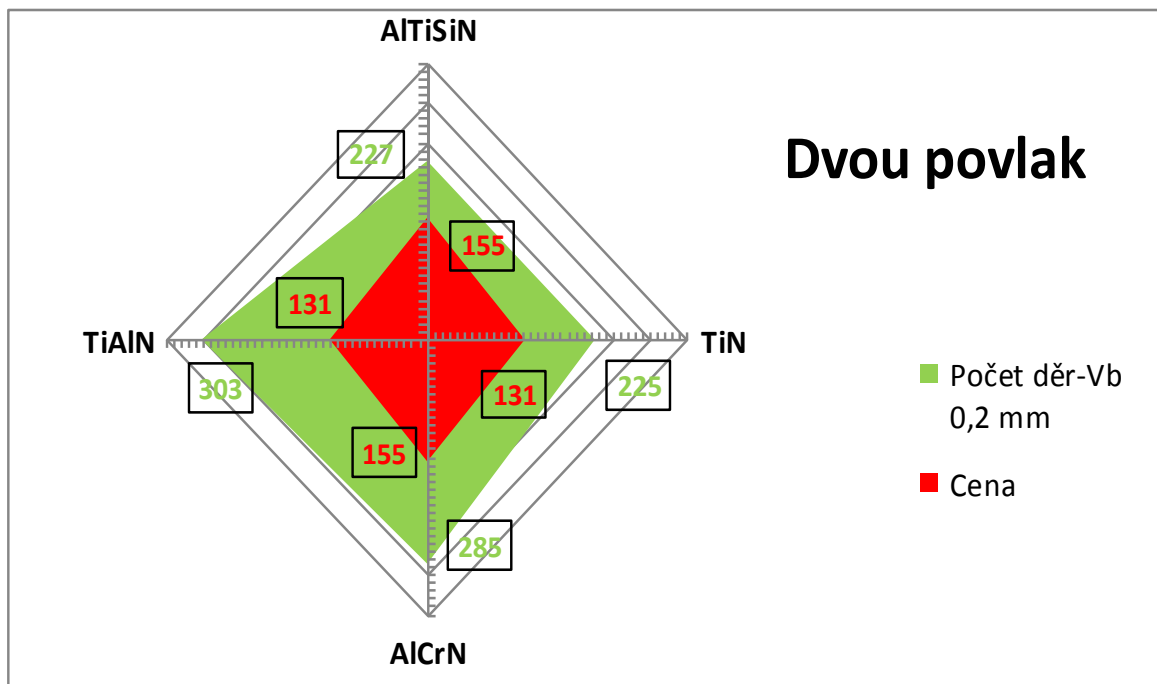
Povlak	AlTiSiN	TiN	AlCrN	TiAlN
1 x povlak Kč	115	99	115	99
2 x povlak Kč	155	131	155	131

Na první pohled se může zdát, že ceny povlaků jsou vzhledem k ceně vrtáků vysoké. Musíme si, ale uvědomit o kolik nám povlak prodlouží životnost samotného vrtáku. Cena povlaku na řezných nástrojích se odvíjí od průměru samotného nástroje. Cena nástroje může být různá, ale cena povlaku zůstává stejná.

Na Obr. 75 - 76 je ekonomické porovnání mezi jednopovlakem a dvoupovlakem z hlediska počtu odvrtných děr a ceně.



Obr. 75 Celkové ekonomické porovnání jednopovlaku



Obr. 76 Celkové ekonomické porovnání dvoupovlaku

Z přehledu ekonomické porovnání jsem navrhl pro společnost VASMO s.r.o. pro CNC obrábění použití těchto povlaků pro nástroje na vrtání:

- Pro vrtání s jedním povlakem doporučuji povlak TiAlN z důvodu nízké ceny a nejvyšší trvanlivosti.
- Pro vrtání se dvěma povlaky doporučuji povlak TiAlN a povlak AlCrN.

## 7 ZÁVĚR

Na základě vykonaných experimentů a dosažených výsledků můžeme konstatovat, že použití tvrdých PVD povlaků má značný vliv na opotřebení ostří a tím celkovou trvanlivost nástroje.

Z výsledků lze konstatovat, že trvanlivost vrtáku s PVD povlakem je 2 až 3 větší než u vrtáku bez povlaků. U vrtáku se dvěma vrstvami je to až 4 až 6 více. Výhodou povlaků je, že po opotřebení povlaku je možno nástroj znovu nabrousit a napovlakovat, tím se zvyšuje produktivita nástroje.

Z výsledku vyvrtání a vyhodnocení bylo dále zjištěno:

- Z hlediska opotřebení vrtáku
  - Vrtáky bez povrchové úpravy vydrží 70 děr. Po té se musí přebrousit a znovu napovlakovat.
  - U vrtáku s jedním povlakem je nejvýhodnější používat povlak typu TiAlN.
  - Vrtáky se dvěma povlaky prodlužují životnost přibližně o 1/3, než vrtáky s jedním povlakem. Jen u povlaku typu TiN je životnost povlaku téměř dvojnásobná.
- Z hlediska jakosti děr
  - Jakost díry vyjádřená průměrnou aritmetickou drsností se zhoršuje v závislosti na počtu odvrtných děr. Nejhuře dopadl vrták bez povrchové úpravy.
  - Drsnost povrchu vrtných děr je u vrtáku s jedním povlakem vyšší než u vrtáku se dvěma povlaky.
  - Pokud bychom potřebovali nejlepší jakost díry pouze vrtákem bez ohledu na trvanlivost nástrojů, použili bychom vrták s povlakem AlCrN jednou povlakovaný, který měl nejlepší jakost vrtných děr, ze všech zkoušených povlaků.

Dále lze z výsledků vrtní konstatovat tyto poznatky:

- kvalita řezné hrany (ostří) ovlivňuje proces vrtní. Geometrický tvar hrany (poloměr) a její drsnost jsou z důležitých faktorů ovlivňující přilnavost povlaků,

- řezný proces vrtání byl celkově klidnější oproti nepovlakovaným vrtákům, bylo usnadněno oddělování a odchod třísek,
- u povlakovaných vrtáků v průběhu zkoušky nebyl zaznamenán výskyt mikrotrhlin, tvoření šupinek ani jiné porušení způsobené materiálem nástroje, kdežto u nepovlakovaných vrtáků zhruba při 60 odvrtané díry byl zpozorován vznik mikrotrhlinek,
- prioritou pro užitnou hodnotu povlakovaného vrtáku je kvalita nanesené vrstvy. Rozhodující je zda deponovaná vrstva má při řezném procesu prokazatelně stabilní vlastnosti,
- z výsledků je zřejmé, že povlaky mohou výrazně přispět ke zvýšení trvanlivosti břitů rychlořezných nástrojů, tzn. umožňují zintenzivnění řezných podmínek při jejich použití při vrtání.

Díky vyhodnoceným datům jakosti, opotřebení a z ekonomického hlediska se vyplatí povlakovat řezné nástroje. Vývoj PVD povlaků jde neustále dopředu k vývoji nových a produktivnějších typů vrstev.

Výsledky získané a uveřejněné v této diplomové práci, jsou založené na teoretických poznacích a experimentálních měření a mohou být použité jako podklad pro aplikaci v praxi.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] KOCMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [2] *NOVÉ SMĚRY V PROGRESIVNÍM OBRÁBĚNÍ* [online]. 2007 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [3] HUMÁR A. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. Brno, 2003 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
- [4] ŘASA, J. a GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005, 256 s. ISBN 80-718-3337-1.
- [5] KOCMAN, K. a PROKOP J. *Technologie Obrábění*. druhé. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM s.r.o., 2005, 271 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [6] MORÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 1999, 102 s. ISBN 80-708-2518-9
- [7] *Nekonvenční metody obrábění*. STAVINOHA, Z. *COPTEL &ndash: Mechatronika* [online]. 2012 [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=33788&instance=2>
- [8] JURKO, J a LUKOVICS I. *Vrtanie: technologická metóda výroby dier*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2007, 191 s. ISBN 978-80-7318-488-9
- [9] STIM ZET. *Nástroje na obrábění otvorů*. [DVD]. Vsetín. ISBN neuvedeno.
- [10] HUMAR, A. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, UST, Odbor technologie obrábění. 2006 [cit. 2008-02-09]. Dostupny z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/>
- [11] *Cutting with coated tools* [online]. Řecko, 2012 [cit. 2014-03-17]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612002053>
- [12] JURKO, J., ZAJAC, J., ČEP, R., *Top trendy v obrábění 2. část – Nástrojové materiály*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2006. ISBN 80-968954-2-7
- [13] KŘIŽ, A. *Tenké vrstvy* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam - materiálový výzkum. [2005] [cit. 2014-03-16]. Dostupný z WWW:

<[http://www.ateam.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf)>

[14] MM Průmyslové spektrum. *Trendy v povlakování slinutých karbidů* [online]. 2001

[cit. 2014-03-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>

[15] Nanomateriály. *Technologie* [online]. 1999 [cit. 2014-03-20]. Dostupné z:

<http://zasoby.open.agh.edu.pl/~11sashot/strona.php?t=tw&h=cvd&v>

[16] MM Průmyslové spektrum. *Současnost a trendy povlakování technologií PVD*

[online]. 2003 [cit. 2014-03-20].

Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologiei-pvd.html>

[17] DOLEŽALOVÁ, PETRA. *Vlastnosti povlaků řezných nástrojů ze slinutého karbidu*.

Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.

[18] COMMERC SERVICE. *Multivrstvový povlak Eifeler TiCN*. [online]. 2008 [cit. 2014-

03-20]. Dostupné z: <http://www.commercservice.sk/ticn.html>

[19] COMMERC SERVICE. *Povlak Eifeler TiN*. [online]. 2008 [cit. 2014-03-20]. ]. Dostup

né z: [http:// http://www.commercservice.sk/hlavna%20stranka%20eifeler.html](http://http://www.commercservice.sk/hlavna%20stranka%20eifeler.html)

[20] COMMERC SERVICE. *Nanokompozitný povlak Eifeler TiAlSiN*. [online]. 2008 [cit.

2014-03-20]. ]. Dostupné z: <http://www.commercservice.sk/sistral.html>

[21] MM Průmyslové spektrum. *Měření vlastností povlaků na nástrojích* [online]. 2004

[cit. 2014-03-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-povlaku-na-nastrojich.html>

[22] KRÍŽ, A. *Hodnocení vlastností tenkých vrstev nitridu kovu*. ZČU v Plzni. [online]. [cit.

2014-03-20] Dostupné z

[http://www.ateam.zcu.cz/HODNOCENI\\_VLASTNOSTi\\_TENKYCH\\_VRSTEV\\_%20NITRIDU\\_KOVU.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/HODNOCENI_VLASTNOSTi_TENKYCH_VRSTEV_%20NITRIDU_KOVU.pdf)

[23] BENEŠ, Petr. Teplotní degradace tenkých otěruvzdorných PVD vrstev. *ATeam* [online].

2007 [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/download/rigo-benes.pdf>

[24] Feron a.s. *Katalog materiálu* [online]. [cit. 2014-03-28]. Dostupné z:

[http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat\\_normy.php](http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php)

[25] STIMZET. *Výroba nástrojů na otvory* [online]. [cit. 2014-03-28]. Dostupné z:

[http://www.stimzet.cz/data/csn221121\\_cz.html](http://www.stimzet.cz/data/csn221121_cz.html)

[26] MITUTOYO. *Katalog měřících přístrojů*. ISBN neuvedeno

[27] *Ionbond CzechCoating s.r.o.* [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z:

<http://www.czechcoating.cz/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$v_c$	[m/min]	Řezná rychlost
$v_f$	[m/min]	Rychlost posuvu
$v_e$	[m/min]	Výsledný řezný pohyb
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky obrobku
$a_e$	[mm]	Šířka frézování
$d, D$	[mm]	Průměr vrtáku
$\kappa_r$	[°]	Úhel nastavení hlavní řezné hrany
$a_p$	[mm]	Hloubka řezu
$F_c, F_c'$	[N]	Tangenciální složky řezné síly
$\gamma_f$	[°]	Boční úhel čela
$C_{F_c}, C_{F_f}$		konstanty určené druhem a vlastnostmi materiálu a geometrii nástroji
$D^{x_{F_c}}, f^{y_{F_c}}$		
$M_k$	[Nm]	Kroutící moment
$F_f, F_f'$	[N]	Posunové (axiální) složky řezné síly
$F_p, F_p'$	[N]	Radiální složky řezné síly
$F_O$	[N]	Osová síla
$F$	[mm]	Posuv
$v_{ft}$	[mm/min]	Tangenciální rychlost posuvu stolu
$n_s$	[ot/s]	Frekvence otáčení BK
$f_a$	[mm/ot]	Axiální posuv stolu
$n_w$	[mm/ot]	Frekvence otáčení obrobku
$v_z$	[m/min]	Rychlost zpětného pohybu stolu
$f_{dz}$	[mm]	Posuv na dvojzdvih
EDM		Elektro Discharge Machining
PBM		Plasma Beam Machining
LBM		Laser Beam Machining
EBM		Elektron Beam Machining
ECM		Elektro Chemical Machining

CM, CHM		Chemical Machining
USM		Ultrasonic Machining
$A_D$	[mm <sup>2</sup> ]	Jmenovitý průřez třísky
$P_c$	[kw]	Výkon
Ra	[μm]	Střední aritmetická úchylka profilu
Rz	[μm]	Výška nerovností profilu z deseti bodů
Lineární		Křivka regrese v grafu
TiAlN		Nitrid hliníku titanu
AlTiSiN		Nitrid křemíku hliníku a titanu
TiN		Nitrid titanu
AlCrN		Nitrid chromu hliníku
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Oxid hlinitý
HV		Tvrдость podle Vickerse
VB		Opotřebenění na hřbetě
$H_{IT}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Vtisková tvrдость
$E_{IT}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Vtiskový modul

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Základní práce na soustruhu [3]</i> .....	12
<i>Obr. 2. Druhy soustružení [2]</i> .....	12
<i>Obr. 3. Válcové frézování a) nesousledné b) sousledné [3]</i> .....	16
<i>Obr. 4. Čelní frézování [3]</i> .....	16
<i>Obr. 5. Okružní frézování a) vnější b) vnitřní [3]</i> .....	17
<i>Obr. 6. Planetové frézování a) vnější b) vnitřní [3]</i> .....	17
<i>Obr. 7. Nepravidelný úběr třísky [2]</i> .....	19
<i>Obr. 8. Vybrané způsoby obvodového broušení [2]</i> .....	20
<i>Obr. 9. Vybrané způsoby čelního broušení [2]</i> .....	21
<i>Obr. 10. Kinematika vyvrtávání [5]</i> .....	24
<i>Obr. 11. Obrázení a hoblování [2]</i> .....	25
<i>Obr. 12. Protahování a protlačování [2]</i> .....	26
<i>Obr. 13. Princip elektroerozivního obrábění [1]</i> .....	28
<i>Obr. 14. Principiální schéma anodomechanického obrábění [2]</i> .....	29
<i>Obr. 15. Schéma plazmového hořáku [7]</i> .....	30
<i>Obr. 16. Schéma obrábění rotačních ploch plazmou [1]</i> .....	30
<i>Obr. 17. Schéma obrábění laserem [7]</i> .....	31
<i>Obr. 18. Schéma obrábění paprskem elektronů [8]</i> .....	32
<i>Obr. 19. Schéma obrábění</i> .....	32
<i>Obr. 20. Elektrochemické obrábění [7]</i> .....	33
<i>Obr. 21. Obrábění otáčející elektrodou [7]</i> .....	34
<i>Obr. 22. Chemické obrábění [1]</i> .....	34
<i>Obr. 23. Schéma zařízení pro řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí [1]</i> .....	35
<i>Obr. 24. Princip ultrazvukového nárazového obrábění [1]</i> .....	36
<i>Obr. 25. Šroubový vrták [9]</i> .....	37
<i>Obr. 26. Kinematika vrtacího procesu při vrtání šroubovým vrtákem [1]</i> .....	38
<i>Obr. 27. Jmenovité rozměry třísek při vrtání šroubovým vrtákem [1]</i> .....	39
<i>Obr. 28. Řezné síly při vrtání [8]</i> .....	41
<i>Obr. 29. Schéma tvorby povlaků a) metoda PVD b) metoda CVD</i> .....	42
<i>Obr. 30. Nanášení povlaku v závislosti na tlaku a teplotě pro proces [10]</i> .....	43
<i>Obr. 31. Schéma metody CVD [13]</i> .....	45
<i>Obr. 32. Schéma vakuového napařování [17]</i> .....	47

<i>Obr. 33. Schéma naprašování [17]</i> .....	48
<i>Obr. 34. Magnetronové naprašování [13]</i> .....	49
<i>Obr. 35. Zatěžovací a odlehčovací křivka [22]</i> .....	51
<i>Obr. 36. Princip scratch testu [21]</i> .....	52
<i>Obr. 37. Princip kalotestu [21]</i> .....	53
<i>Obr. 38 Schéma metody</i> .....	54
<i>Obr. 39 Frézka VC560</i> .....	58
<i>Obr. 40. Povlakované šroubové vrtáky</i> .....	59
<i>Obr. 41 Materiál zkušebního vzorku</i> .....	60
<i>Obr. 42 Opatření na hřbetě břitu vrtáku</i> .....	61
<i>Obr. 43 Závislost nárůstu opotřebení <math>V_B</math> na čase</i> .....	62
<i>Obr. 44 Dilenský mikroskop</i> .....	63
<i>Obr. 45 Schéma měření drsnosti <math>R_a</math>, <math>R_z</math></i> .....	64
<i>Obr. 46. Drsnoměr SJ-410</i> .....	64
<i>Obr. 47 Mikroskop SMZ 1500 s kamerou DX20</i> .....	65
<i>Obr. 48 Mikrotvrdoměr – Micro Combi Tester</i> .....	66
<i>Obr. 49 Průběh opotřebení u vrtáku bez povlaku</i> .....	68
<i>Obr. 50 Průběh opotřebení u vrtáku s povlakem AlTiSiN</i> .....	68
<i>Obr. 51 Průběh opotřebení u vrtáku s povlakem AlCrN</i> .....	69
<i>Obr. 52 Průběh opotřebení u vrtáku s povlakem TiN</i> .....	69
<i>Obr. 53 Průběh opotřebení u vrtáku s povlakem TiAlN</i> .....	70
<i>Obr. 54 Porovnání opotřebení vrtáků <math>V_B = 0,2\text{mm}</math> napovlakovaných jednou vrstvou</i> .....	70
<i>Obr. 55 Porovnání opotřebení vrtáků <math>V_B = 0,2\text{mm}</math> napovlakovaných dvěma vrstvy</i> .....	71
<i>Obr. 56 Opatření vrtáku bez povlaku</i> .....	71
<i>Obr. 57 Závislost trendu <math>R_a</math> na počtu odvrtných děr vrtákem bez povrchové</i> .....	72
<i>Obr. 58 Závislost trendu <math>R_a</math> na počtu odvrtných děr vrtákem s povlakem AlTiSiN</i> .....	72
<i>Obr. 59 Závislost trendu <math>R_a</math> na počtu odvrtných děr vrtákem s povlakem AlCrN</i> .....	73
<i>Obr. 60 Závislost trendu <math>R_a</math> na počtu odvrtných děr vrtákem s povlakem TiN</i> .....	73
<i>Obr. 61 Závislost trendu <math>R_a</math> na počtu odvrtných děr vrtákem s povlakem TiAlN</i> .....	74
<i>Obr. 62 Porovnání trendu <math>R_a</math> mezi jednotlivými povlaky s jednou vrstvou povlaku</i> .....	75
<i>Obr. 63 Porovnání trendu <math>R_a</math> mezi jednotlivými povlaky se dvěma vrstvy povlaku</i> .....	75
<i>Obr. 64 Závislost trendu <math>R_z</math> na počtu odvrtných děr vrtákem bez povrchové úpravy</i> .....	76

<i>Obr. 65 Závislost trendu Rz na počtu odvrtných děr vrtákem s povlakem AlTiSiN .....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 66 Závislost trendu Rz na počtu odvrtných děr vrtákem s povlakem AlCrN.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 67 Závislost trendu Rz na počtu odvrtných děr vrtákem s povlakem TiN .....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 68 Závislost trendu Rz na počtu odvrtných děr vrtákem s povlakem TiAlN.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 69 Porovnání trendu Rz mezi jednotlivými povlaky s jednou vrstvou povlaku .....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 70 Porovnání trendu Rz mezi jednotlivými povlaky se dvěma vrstvy povlaku .....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 71 Povlakované vrstvy AlCrN a) jeden povlak; b) dva povlaky.....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 72 Ukázka výsledků měření tvrdosti povlaku TiN s jedním povlakem .....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 73 Porovnání tvrdosti vrtáku s jedním povlakem dle Vickerse .....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 74 Porovnání tvrdosti vrtáku s dvěma povlaky dle Vickerse.....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 75 Celkové ekonomické porovnání jednopovlaku .....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 76 Celkové ekonomické porovnání dvou-povlaku .....</i>	<i>85</i>



**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Základní veličiny [9].....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 2 Základní parametry CNC frézky VC 560.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 3 Vlastnosti povlaků [27].....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 4 Řezné podmínky při dlouhodobé zkoušce opotřebení.....</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 5 Tloušťka jednotlivých povlaků.....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 6 Výsledky měření tvrdosti.....</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 7 Ceny povlakovaných vrtáků.....</i>	<i>84</i>

**SEZNAM PŘÍLOH**

- P I            Fotky opotřebení  $V_B$  na šroubových vrtácích.
- P II            Fotky tloušťky povlaků.
- P III           Výsledky měření tvrdosti dle Vickerse.