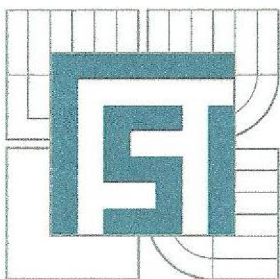


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## FRÉZOVÁNÍ VNITŘNÍCH ZÁVITŮ NA TĚLESECH VSTŘIKOVACÍCH JEDNOTEK BOSCH

MILLING OF INTERNAL THREADS IN BOSCH INJECTION UNIT BODIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR KRČÁL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Krčál

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

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

### **Frézování vnitřních závitů na tělesech vstříkovacích jednotek Bosch**

v anglickém jazyce:

### **Milling of internal threads in Bosch injection unit bodies**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na frézování vnitřních závitů na tělesech vstříkovacích jednotek Bosch povlakovanými závitovými frézami firem JEL a OSG (povlaky TiCN a TiAlCrN). Cílem práce je na základě teoretického rozboru problematiky frézování vnitřních závitů (nástroje, nástrojové materiály, tvrdé povlaky, opotřebení nástrojů a jejich trvanlivost) analyzovat stávající stav technologie výroby ve firmě Bosch Diesel, s.r.o., Jihlava a navrhnout úpravy technologie za účelem zefektivnění výroby.

Cíle diplomové práce:

1. Metody frézování vnitřních závitů a používané nástroje
2. Charakteristika soudobých moderních metod nanášení tvrdých otěruvzdorných povlaků, s podrobným rozбором metody PVD
3. Rozbor problematiky opotřebení řezných nástrojů s tvrdými otěruvzdornými povlaky
4. Analýza stávající technologie frézování vnitřních závitů na hlavních vývodech těles vstříkovacích jednotek ve firmě Bosch Diesel, s.r.o., Jihlava
5. Návrh aplikace nových typů frézovacích nástrojů se zaměřením na zvýšení jejich trvanlivosti a životnosti

Seznam odborné literatury:

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. AB SANDVIK COROMANT, Sandviken, Švédsko. Technická příručka obrábění. Elanders Švédsko. Říjen 2005. 601 s. C-2900:3CZE/01.
3. BROOKES, K.J.A. World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard materials. Sixth Edition. East Barnet Hertfordshire, United Kingdom: International Carbide Data, 1996. 220+528 p. ISBN 0 9508995 4 2.
4. HOFMANN GmbH, Germany. Garant - Příručka obrábění. [online]. Dostupné na [www: http://www.hoffmann-gmbh.de/download/cz/zerspanungshandbuch/cz-zerspanungshandbuch.pdf](http://www.hoffmann-gmbh.de/download/cz/zerspanungshandbuch/cz-zerspanungshandbuch.pdf)
5. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. MM publishing s. r.o., Praha. 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
6. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. MM Průmyslové spektrum - Speciální vydání. Zář 2004. ISSN 1212-2572., s. 84-96.
7. Technické materiály a prospekty firem CemeCon, CzechCoating, Iscar, Komet, Liss-Platit, OSG, SHM Šumperk, Sandvik Coromant.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 25.11.2009

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Petr Krčál

Bytem: Studénky 15, 58832 Puklice

Narozen/a (datum a místo): 6.6. 1985, Jihlava

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

se sídlem Technická 2896/2, 616 69 Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

## Článek 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Frézování vnitřních závitů na tělesech vstřikovacích jednotek Bosch

Vedoucí/ školitel VŠKP: Doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Ústav: Ústav strojírenské technologie

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

- tištěné formě – počet exemplářů ...2.....
- elektronické formě – počet exemplářů ...1.....

\* hodící se zaškrtněte



2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

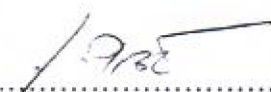
## Článek 2 Udělení licenčního oprávnění


1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy  
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3 Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29.5. ....

  
.....  
prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

  
.....  
Autor

**ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se v úvodu zabývá různými druhy výroby závitů (zvláštní důraz je kladen na výrobu vnitřních závitů), odlišnými druhy nanášení otěruvzdorných povlaků metodami PVD a CVD, popsání jejich hlavních výhod a nevýhod. Poté jsou v práci vysvětleny jednotlivé mechanismy a formy opotřebení nástrojů s povlakem. V druhé části diplomové práce je provedena analýza současného stavu výroby vnitřních závitů u vysokotlakých zásobníků firmy Bosch a následně pomocí elektronového řádkovacího mikroskopu porovnáno 6 odlišných závitových fréz.

**Klíčová slova**

Výroba závitů, frézování závitů, nanášení povlaků na nástroje, opotřebení otěruvzdorných povlaků, vysokotlaký zásobník firmy Bosch

**ABSTRACT**

At the beginning of this master's thesis I describe the production of different types of threads (with special emphasis on the production of internal threads), then I discuss different types of application of abrasion resistant coating by PVD and CVD, I describe their main advantages and disadvantages. Further, this master's thesis explains particular mechanisms and forms of tool wear on tool with coating. In the second part of this master's thesis the analysis of the current status of the production of internal threads in the Rail (high-pressure chamber) is made. In the last part I compare six different threads cutters by the use of a scanning electron microscope.

**Key words**

threads production, milling threads, tool coating, abrasion resistant coating wear, high-pressure chamber from the Bosch (Rail)

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KRČÁL, P. *Frézování vnitřních závitů na tělesech vstřikovacích jednotek Bosch*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Frézování vnitřních závitů na tělese vstříkovací jednotky Bosch vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum:

.....  
Bc. Petr Krčál

## **Poděkování**

Děkuji tímto panu Doc. Ing. Antonu Humárovi CSc., firmě Bosch Diesel Jihlava s.r.o. a panu Miroslavu Bartůškovi, Ing. Zdeňkovi Přenosilovi, Bohuslavu Fialovi, Ústavu materiálových věd a inženýrství a paní Ing. Drahomíře Janové, Firmě Cemecon Ivančice a panu Ing. Jakubovi Něničkovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

**OBSAH**

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 Metody frézování vnitřních závitů a používané nástroje.....	10
1.1 Závitý.....	10
1.2 Výroba závitů.....	10
1.2.1 Řezání závitů.....	10
1.2.2 Tváření závitů.....	11
1.2.3 Soustružení závitů.....	12
1.2.4 Frézování závitů.....	12
2 Moderní metody nanášení tvrdých otěruvzdorných povlaků.....	19
2.1 Povlaky.....	19
2.1.1 Historie povlakování.....	21
2.1.2 Materiály pro nanášení otěruvzdorných povlaků.....	21
2.1.3 Úprava materiálu před a po nanesení povlaků.....	22
2.2 Nanášení povlaků metodou CVD (Chemical vapour deposition).....	23
2.2.1 Metoda MTCVD (Middle Temperature CVD).....	23
2.2.2 Metoda PACVD (Plasma Assistant CVD).....	24
2.2.3 Metoda HFCVD (Hot Filament CVD).....	24
2.3 Metoda PVD (Physical vapour deposition).....	25
2.3.1 Princip rotace nástrojů v komoře.....	26
2.3.2 Iontová implantace.....	27
2.3.3 Naprašování.....	28
2.3.4 Napařování.....	30
3 Opotřebení řezných nástrojů s otěruvzdornými povlaky.....	32
3.1 Všeobecné mechanismy opotřebení řezných nástrojů.....	32
3.1.1 Adheze.....	32
3.1.2 Abraze.....	33
3.1.3 Difúze.....	33
3.1.4 Oxidace.....	33
3.1.5 Plastické porušení.....	33
3.1.6 Křehký lom.....	33
3.2 Opotřebení nástrojů s tenkými otěruvzdornými povlaky.....	33
3.3 Trvanlivost a životnost nástroje.....	37
4 Analýza stávající technologie frézování vnitřních závitů vstřikovacích jednotek Bosch.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.1 Historie firmy Bosch.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.2 Vstřikovací jednotka Bosch (vysokotlaký zásobník - Rail).....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.3 Frézování vnitřního závitu vstřikovací jednotky Bosch.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.3.1 Otěruvzdorné povlaky na frézách ve firmě Bosch Diesel Jihlava.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.3.2 Používané frézy ve firmě Bosch Diesel s.r.o. Jihlava.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
5 Návrh aplikace nových frézovacích nástrojů se zaměřením na zvýšení jejich trvanlivosti a životnosti.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
5.1 Porovnání kvality povrchu povlaků.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
5.2 Špatné napovlakování ostrých hran na nástroji.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>

5.3 Odhalení starých vrstev povlaků .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>	
5.4 Degradace materiálu vlivem broušení nástrojů	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>	
5.5 Zhodnocení Analýzy .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>	
Závěr.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>	
Seznam použitých zdrojů .....		40
Seznam použitých zkratk a symbolů.....		43
Seznam příloh.....		44
6 PŘÍLOHY .....		62
6.1 Frézovaný Závit M18x1,5 ve vývodu vysokotlakého zásobníku Bosch ..		62
6.2 Frézovaný Závit M24x1,5 ve vývodu vysokotlakého zásobníku Bosch ..		63
6.3 Závitovací fréza M16x1,5 .....		64
6.4 Polokvantitativní disperzní analýza povrchu prvního nástroje- Povlak TiCN.....		65
6.5 Polokvantitativní disperzní analýza povrchu třetího nástroje- Povlak TiCN.....		66
6.6 Polokvantitativní disperzní analýza povrchu čtvrtého nástroje- základní substrát.....		67
6.7 Polokvantitativní disperzní analýza povrchu čtvrtého nástroje- povlak TiAlCrN .....		68
6.8 Polokvantitativní disperzní analýza povrchu pátého nástroje- povlak TiAlN.....		69



## ÚVOD

Tato diplomová práce byla vypracována ve spolupráci s firmou Bosch Diesel s.r.o. Jihlava. Tato firma vyrábí v Jihlavě naftové čerpadla a vysokotlaké zásobníky pro dieselové motory a je největším zaměstnavatelem v kraji Vysočina. Podrobněji jsem se seznámil s výrobou v této firmě na akci High-Tech day, kde jsme prošli s jejich odborníky během celého dne většinu výrobního závodu na Pávově a byly nám popsány konkrétně jednotlivé provozy a pracoviště.

Ke spolupráci jsem si vybral tuto firmu, protože má obrovské zkušenosti v oblasti obrábění, což je obor, kterým se na vysoké škole zabývám a zajímá mě. Firma využívá velice moderní výkonné obráběcí stroje a výrobní postupy, výborně spolupracuje se studenty a po skončení vysoké školy bych rád u této firmy nastoupil jako zaměstnanec.

Tato diplomová práce by měla firmě Bosch Diesel s.r.o. Jihlava pomoci odstranit nebo zmírnit podíl vylamování závitových fréz, při výrobě vstupních a výstupních závitů v tělese vysokotlaké jednotky- Rail.

# 1 METODY FRÉZOVÁNÍ VNITŘNÍCH ZÁVITŮ A POUŽÍVANÉ NÁSTROJE

## 1.1 Závity

Jsou to normalizované technické součásti, které umožňují rozebíratelný spojení. Závity se nejčastěji dělí:

- vnější (šroub), vnitřní (matice),
- pravý – levý,
- jednochodý, dvouchodý, vícechodý.

Dále se mohou dělit dle tvaru profilu: metrický (M), whitworthův (W), trubkový válcový (G), lichoběžníkový rovnoramenný (Tr) atd.

Hlavním geometrickým prvkem závitu je šroubovice. Je to čára, která vznikne rotací a posunem bodu kolem osy závitu. Závity používají lícovací soustavu jednotné matice, které zajišťuje vzájemnou polohu matice-šroub. Uložení používané u závitů bývá nejčastěji přechodné nebo s vůlí.

## 1.2 Výroba závitů

Principem výroby závitů je vytváření šroubovité drážky, která se vyrábí buď tvářením (vytlačování materiálu) nebo obráběním (odebíráním třísky). Z hlediska pevnosti je výhodnější tvářením závitů vzhledem k průběhu vláken viz kapitola tvářením závitů. Výrobu závitů se dělí na sériovou a kusovou výrobu. Z hlediska principu výroby na:

- řezání závitů,
- tvářením závitů,
- soustružení závitů,
- broušení závitů,
- frézování závitů.

### 1.2.1 Řezání závitů

**Řezání vnějších závitů** - Pro řezání vnějších závitů se používají kruhové závitové čelisti (očka). Nejprve jsou šroub a oko namazány, jinak by mohlo při řezání závitu docházet k trhání závitu. Dále je nasazeno oko kolmo na dřík a s mírným tlakem se začne očkem otáčet (pro pravý závit ve směru hodinových ručiček). Pokud se během řezání zvýší odpor proti otáčení, dělá se půl otáčky zpět a po té se pokračuje v řezu (kvůli odvodu třísek). U této metody je nevýhoda, že pro každý průměr a stoupání závitu je potřeba mít jiná závitová očka. Lze používat strojní závitová očka, která se umísťují na soustruh.

**Řezání vnitřních závitů** - Pro řezání vnitřních závitů se používají závitníky.

1) *Sadové závitníky*

V jedné sadě jsou zpravidla tři sadové závitníky. První dva z nich se používají jako řezací a poslední jako závitník kalibrovací. Na konci každého závitníku je čtyřhran, který zajišťuje přenos kroutícího momentu při řezání závitu.

## 2) Maticové závitníky

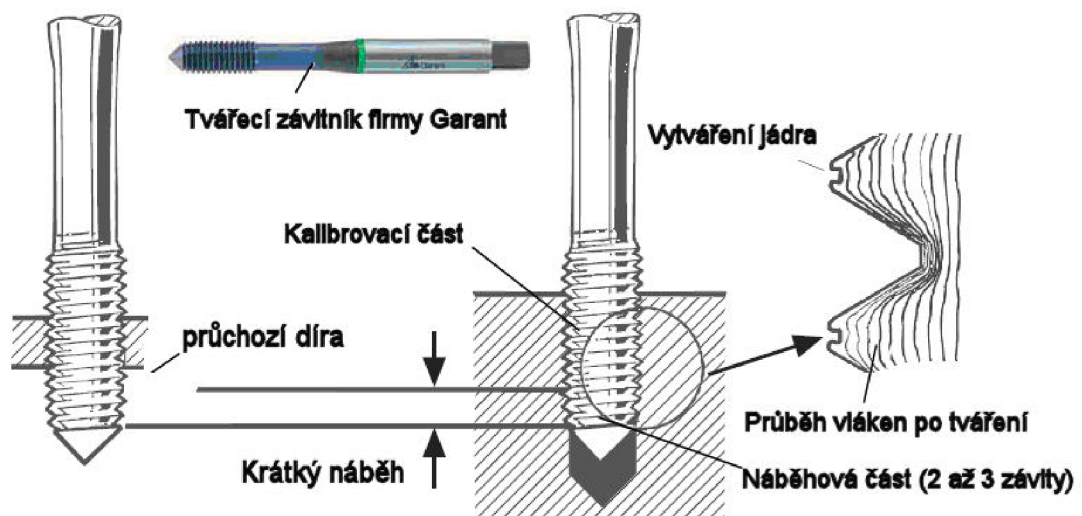
Mají delší řezný kužel než sadové, a proto se používají pro průchozí díry. Při jednom průchodu dírou vyřežou celý závit.

### 1.2.2 Tváření závitů

Tváření závitů je velice produktivní beztržisková metoda výroby závitů, která se vyplatí zejména při hromadné výrobě, kde se zvýšené náklady na tvářecí závitník mnohonásobně zaplatí.

Výhodou použití tvářecích závitníků je nezanášení díry třískami, použití v neprůchozích dírách, velká pevnost povrchu závitu (vzhledem k průběhu vláken obrázek 1.1), lepší jakost povrchu, velká bezpečnost proti prasknutí závitníku (závitník není oslaben drážkami), vysoká produktivita řezného procesu, nemusí se přeastřovat nástroj, vyšší trvanlivost nástroje (až 10 krát oproti třískovému obrábění). Podmínkou nasazení této technologie je dobrá tvárnost materiálu (nejlépe mosaz, hliník, měď) a tažnost nad 10%, což splňují skoro všechny oceli do 500 MPa.

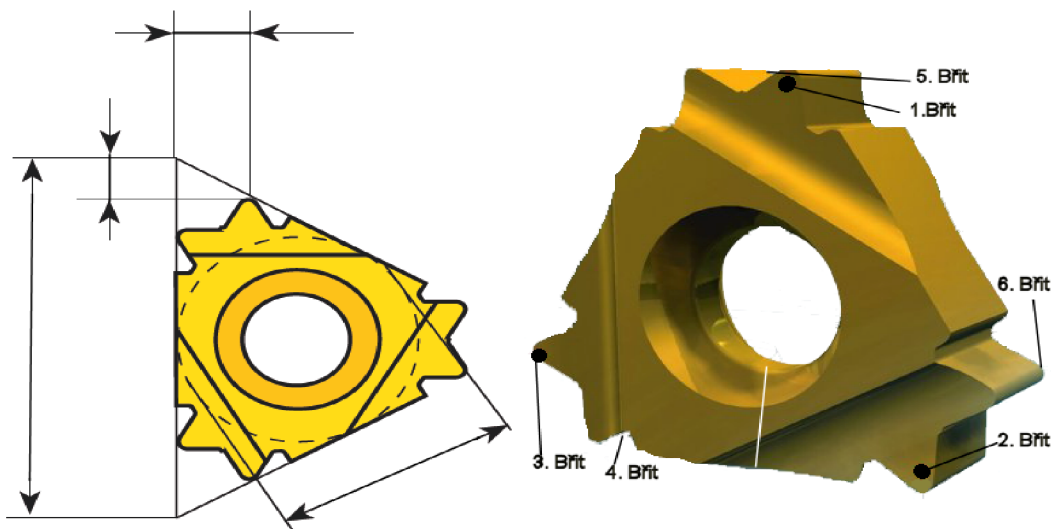
Někdy lze tvářet závity i u ocelí s mezí pevnosti až 900 MPa, tuto hranici použití lze získat pouze dlouhodobou praktickou zkouškou. Není vhodné tuto metodu používat pro závity v křehkých ocelích, v litinách a v martenzitických ocelích s vysokou pevností. Velký důraz je kladen na předvrtání díry, kde při malém průměru se může poškodit závitník a při velké díře závit nedotvářet. Závitník se dělí na náběhovou část (na tuto část se myslí při závitování neprůchozích děr, protože v této části je závit tvářen, a tudíž nemá požadované rozměry závitu) a na kalibrovací část viz obrázek 1.1. Vzhledem k lepším kluzným vlastnostem se na závitníky nejčastěji nanáší tvrdá vrstva TiC, TiCN a pro lepší tribologické vlastnosti se závitníky mažou.<sup>1,2</sup>



Obr. 1.1 Tváření závitů, závitník<sup>1</sup>

### 1.2.3 Soustružení závitů

Jako v mnoha odvětvích, tak i v soustružení závitů, je snaha co nejvíce snížit náklady na výrobu součástí. Postupný trend vývoje břitových destiček je zcela zřejmý a to: zvyšování počtu řezných břitů, zlepšování tvarů utvařečů a tím snižování nákladu a času obrábění. Dnes jsou starší destičky (například se třemi břity) nahrazeny nástroji, které jsou ekonomičtější například od Izraelské firmy Vargus destička V6, která je v některé literatuře považována za průlomovou v této oblasti viz obrázek 1.2.<sup>3</sup>



Obr. 1.2 Určení jednotlivých břitů a hlavních technologických rozměrů<sup>3</sup>

### 1.2.4 Frézování závitů

Frézování závitů patří k velice produktivní metodě výroby závitů. Kvůli velkému rozšíření CNC strojů zaváděných do velkosériové výroby je frézování závitů velice rozšířenou metodou, vzhledem k interpolačnímu pohybu, který většina CNC strojů ovládá. Většinou se frézování závitů používá pro výrobu závitů mimo osu rotace obrobku, pro velké průměry závitů, v neprůchozích otvorech nebo pro výrobu malých závitů viz obrázek 1.3, který by byl konvenčním způsobem téměř nevyrobitelný, a u výroby by hrozilo zalomení závitníku v díře.



Obr. 1.3 Porovnání velikosti frézy a hlavičky sirky<sup>4</sup>

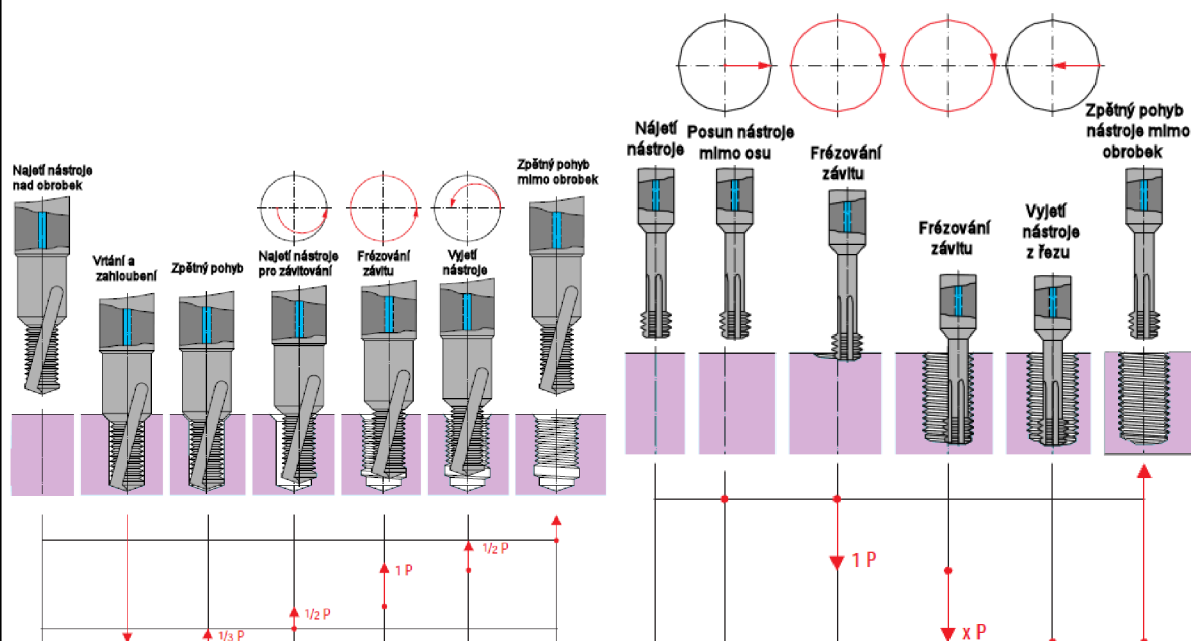
Dříve při zadření závitníku a následném zlomení, bylo velice obtížné závitník vyjmout z materiálu, aniž by se nepoškodil závit, ale u frézování závitů toto nenastává. Principy moderních metod výroby závitu frézováním na CNC frézkách a CNC obráběcích centrech jsou vidět na obr. 1.4, 1.5 Obrovská výhoda je patrná z obr. 1.4, kde jeden frézovací nástroj:

- vyvrtá díru,
- zahloubí díru,
- frézuje závit.

Na této revoluční metodě je vidět velká úspora jak nástrojů, tak hlavního a vedlejšího obráběcího času. Dochází také ke snížení zmetkovitosti a k celkovému zjednodušení výrobního procesu, který nám zlevní celkovou cenu výrobku. Výhodou je vznik krátké drobivé třísky, není třeba různých nástrojů pro průchozí a neprůchozí díry a jedním nástrojem lze udělat pravý i levý závit.

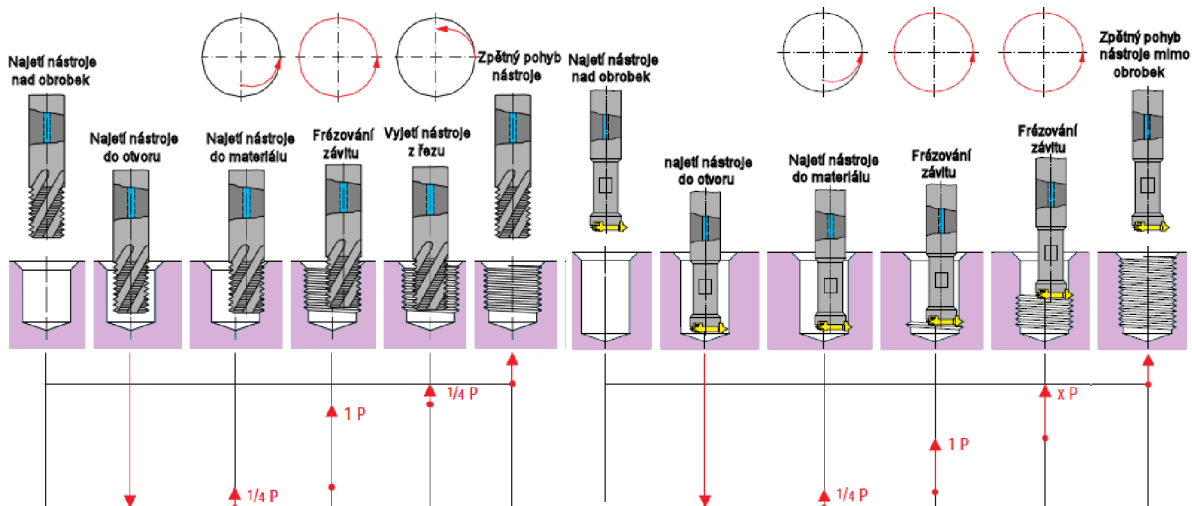
Problém může nastat také při výrobě závitu v tvrdých materiálech, kdy při zlomení závitníku lze způsobit neopravitelný zmetek. Při frézování závitů nemůže nastat toto zalomení, a proto je frézování závitů v mnoha případech upřednostňováno před jinými metodami výroby závitů.

Pro zvýšení trvanlivosti se frézy vyrábějí ze slinutých karbidů a na ty se následně nanáší vrstva otěruvzdorného povlaku, nejčastěji TiCN (pro ocel o vyšší pevnosti), TiAlN, TiAlCrN. Tyto druhy povlaků se také používají pro snížení koeficientu tření, který snižuje řezný odpor při samotném procesu frézování závitu. Obvykle uprostřed závitových fréz je kanál pro přívod procesní kapaliny, který slouží jak k chlazení nástroje, tak k odvodu třísek. Interpolací pohyb je znázorněn na obrázku 1.6 (u CNC strojů funkce G02- interpolace ve směru hod. ručiček, G03- interpolace proti směru hod. ručiček)

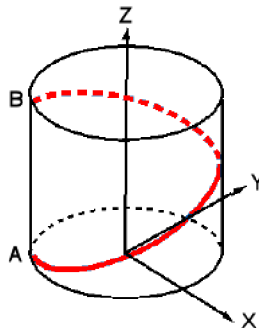


Obr. 1.4 Cirkulární frézování závitů do plného materiálu<sup>5</sup>

Rezná rychlost  $v_c$  při frézování závitů se doporučuje volit stejná jako u konvenčních strojů, ale musí se snížit rychlost posuvu  $v_f$ . Při frézování pravého závitu se najede na dno díry a při frézování se pokračuje směrem nahoru proti směru hodinových ručiček. Při frézování levého závitu se volí opačný postup, a to že začátek frézování je na vrchu díry (vzhledem k velikosti díry) a pokračuje se proti směru hodinových ručiček směrem dolů.<sup>8</sup>



Obr. 1.5 Stopkové frézování závitů do předvrtaného otvoru<sup>5</sup>



Obr. 1.6 Schéma interpolačního pohybu<sup>6</sup>

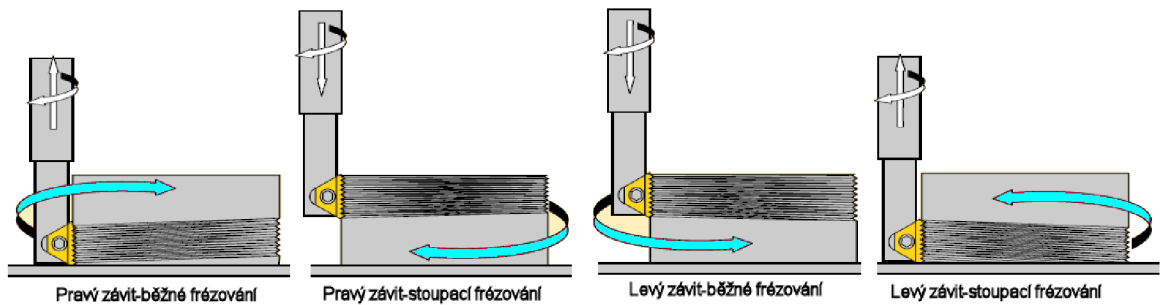
### Frézování vnějších závitů<sup>7</sup>

Frézování závitů je velice produktivní metoda výroby závitů a to zejména v hromadné výrobě. Mezi její největší výhody patří zejména: nutnost pouze jednoho nástroje pro pravý i levý závit (obrázek 1.7), frézování závitů na velkých průměrech obrobku, vysoká produktivita, vysoká bezpečnost, atd.

*Metody výroby frézování vnějších závitů*

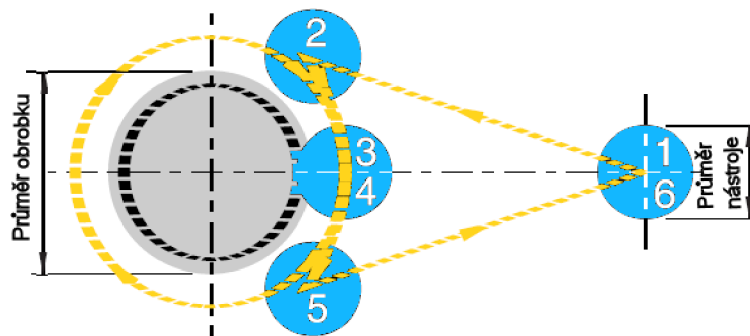
- A) Pohyb podél tangenciální křivky
- B) Radiální pohyb
- C) Pohyb podél tangenciální přímky



Obr. 1.7 Principy pohybu při frézování vnějších závitů <sup>7</sup>

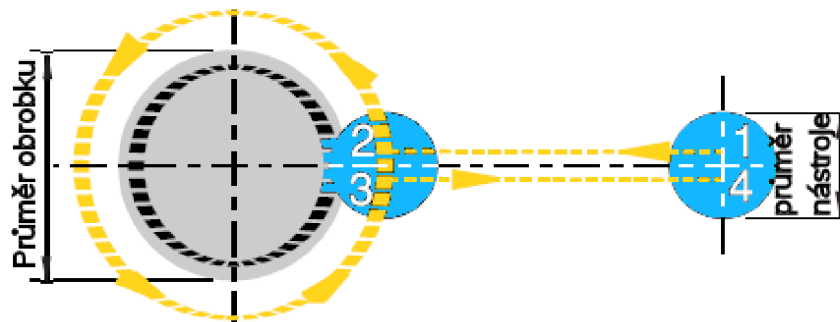
### A) Pohyb podél tangenciální křivky

Tato metoda je obdobná jako u frézování vnitřních závitů. Má stejné výhody i podobný princip pohybu (rozdíl je vidět na obrázku 1.8) viz kapitola frézování vnitřních závitů.

Obr. 1. 8 Schéma pohybu nástroje podél tangenciální křivky (vnější závit) <sup>7</sup>

### B) Radiální pohyb

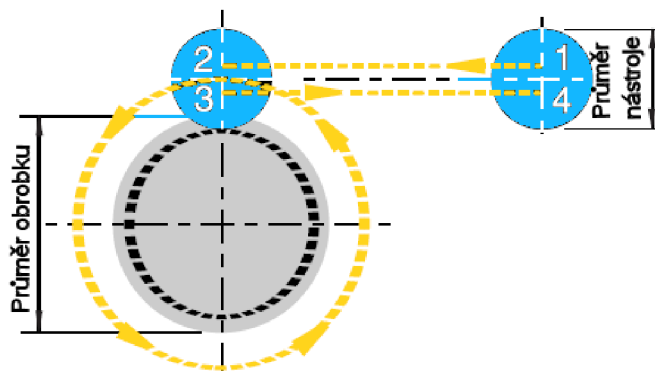
Principem se nějak neliší od frézování vnitřních závitů i výhody jsou stejné (kapitola níže frézování vnitřních závitů). Teorie pohybů je znázorněna na obrázku 1.9.

Obr. 1.9 Schéma radiálního pohybu nástroje (vnější závit) <sup>7</sup>

### C) Pohyb podél tangenciální přímky

Metoda je velice jednoduchá, a proto má řadu výhod (frézování velkých průměrů závitů, jednoduše programovatelný pohyb nástroje atd.), bohužel lze ji aplikovat pouze pro vnější závit. Princip pohybu je:

- 1-2) Radiální vstup za plynulého posunu v ose Z
- 2-3) Pohyb po šroubovici kolem 360°
- 3-4) Radiální výstup

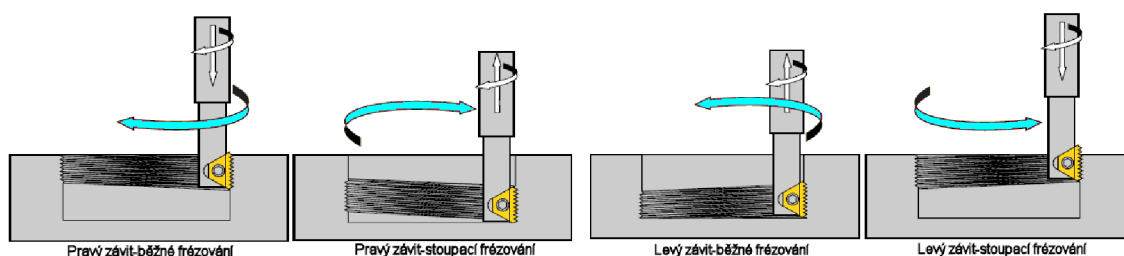


Obr. 1.10 Schéma tangenciálního pohybu po přímce (vnější závit)<sup>7</sup>

### Frézování vnitřních závitů<sup>7</sup>

Nástroj koná interpolační pohyb obrázek 1.6. V ose X a Y koná nástroj kruhový pohyb a v ose Z lineární pohyb. Pokud je závit pouze v úhlu 90° musí se frézou v ose Z pohybovat pouze 1/4 velikosti výšky stoupání závitu.<sup>6</sup>

Velice důležitou problematikou je také předvrtání díry pro závit o předepsané toleranci, který může zajistit dobrý a kvalitní závit.



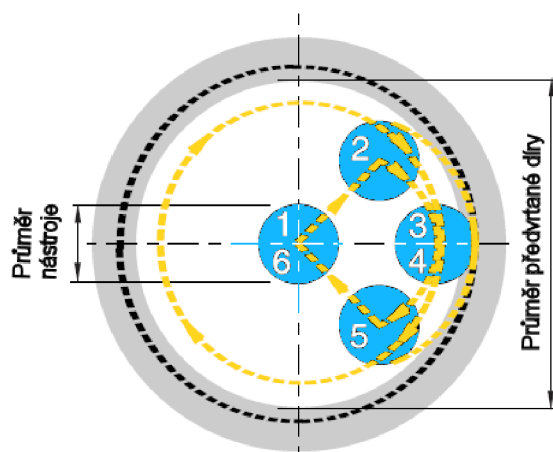
Obr. 1.11 Principy pohybu při frézování vnitřní závity<sup>7</sup>

Metody výroby frézování vnitřních závitů A) Pohyb podél tangenciální křivky  
B) Radiální princip pohybu

### A) Pohyb podél tangenciální křivky

U této metody jsou minimální vibrace a to i u tvrdších materiálů. Řez je plynulý a je dosahovaná nejvyšší kvalita povrchu závitů. Nevýhoda je ve složitějším programování nežli u radiálního přístupu. Principy pohybů (obrázek 1.12) jsou:

- 1-2) Rychloposuv
- 2-3) Vstup nástroje podél tangenciální křivky a následný pohyb v ose Z
- 3-4) Pohyb po šroubovici v  $360^\circ$
- 4-5) Výstup nástroje podél tangenciální křivky
- 5-6) Rychloposuv

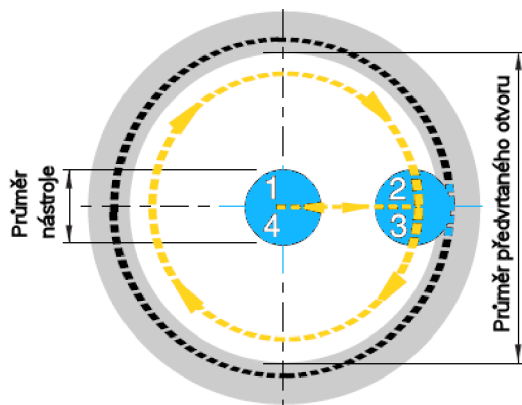


Obr. 1.12 Schéma pohybu nástroje podél tangenciální křivky (vnitřní závit) <sup>7</sup>

### B) Radiální princip pohybu

Je to nejjednodušší princip pohybu, ale je vhodný pouze pro kratší závit. Pokud je použit radiální pohyb u tvrdšího materiálu může docházet k vibracím při samotném frézování závitů, což negativně ovlivňuje přesnost závitů i jeho kvalitu. Principy pohybů (obrázek 1.13) jsou:

- 1-2) Radiální vstup nástroje
- 2-3) Pohyb po šroubovici v  $360^\circ$
- 3-4) Radiální výstup nástroje



Obr 1.13 Schéma radiálního pohybu nástroje pro vnitřní závity<sup>7</sup>

**Princip výpočtu hodnot do CNC programu při vnitřním frézování závitů.**

*Základní vztahy pro vnitřní frézování závitů:*

Rychlost posuvu na ostří: <sup>1</sup>

$$v_f = f_z \cdot n_o \cdot z \quad (1.1)$$

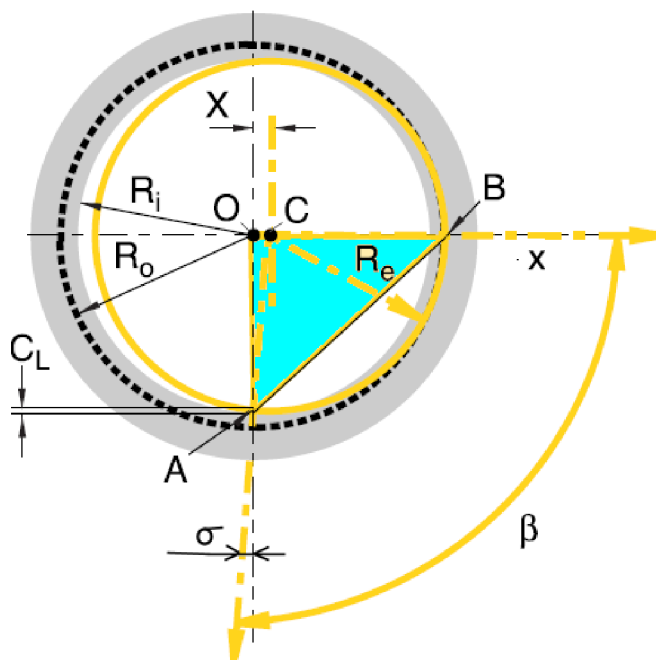
kde:  $f_z$  [mm] je posuv na zub,  
 $n_o$  [ $\text{min}^{-1}$ ] jsou otáčky nástroje,  
 $z$  [-] počet břitů.

Rychlost posuvu ve středu nástroje: <sup>1</sup>

$$v_{f1} = \frac{v_f \cdot (d_1 - D_f)}{d_1} \quad (1.2)$$

kde:  $d_1$  [mm] průměr vnitřního závitu,  
 $D_f$  [mm] průměr frézy,  
 $v_f$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ] rychlost posuvu na ostří.

Tyto veličiny stačí pouze pro programování lineárního pohybu CNC stroje. Pro pohyb po šroubovici jsou potřeba hodnoty odvozené níže. Veškeré vztahy vycházejí z obrázku 1.14

Obr. 1.14 Používané veličiny při frézování vnitřních závitů<sup>7</sup>

Trojúhelník OAC použijeme pro určení  $Re$ . Z obrázku 1.14 je patrný pravý úhel v bodě O a platí:

$$OA = R_i - C_L$$

$$CA = Re$$

$$OC = R_o - Re$$

Dle Pythagorovy věty:  $OA^2 + OC^2 = AC^2 \Rightarrow (R_i - C_L)^2 + (R_o - Re)^2 = Re^2$  a z toho plyne:

$$Re = \frac{R_o^2 + (R_i \cdot C_L)^2}{2 \cdot R_o} \quad (1.3)$$

Určení úhlu  $\beta$ :  $\beta = 90^\circ + \sigma$

$$\sin \sigma = \frac{OC}{CA} = \frac{R_o - Re}{Re} \quad (1.4)$$

$$\sigma = \arcsin \frac{R_o - Re}{Re} \Rightarrow$$

$$\beta = 90^\circ + \arcsin \frac{R_o - Re}{Re} \quad (1.5)$$

Vypočtené hodnoty se vloží do CNC programu.

## 2 MODERNÍ METODY NANÁŠENÍ TVRDÝCH OTĚRUVZDORNÝCH POVLAKŮ

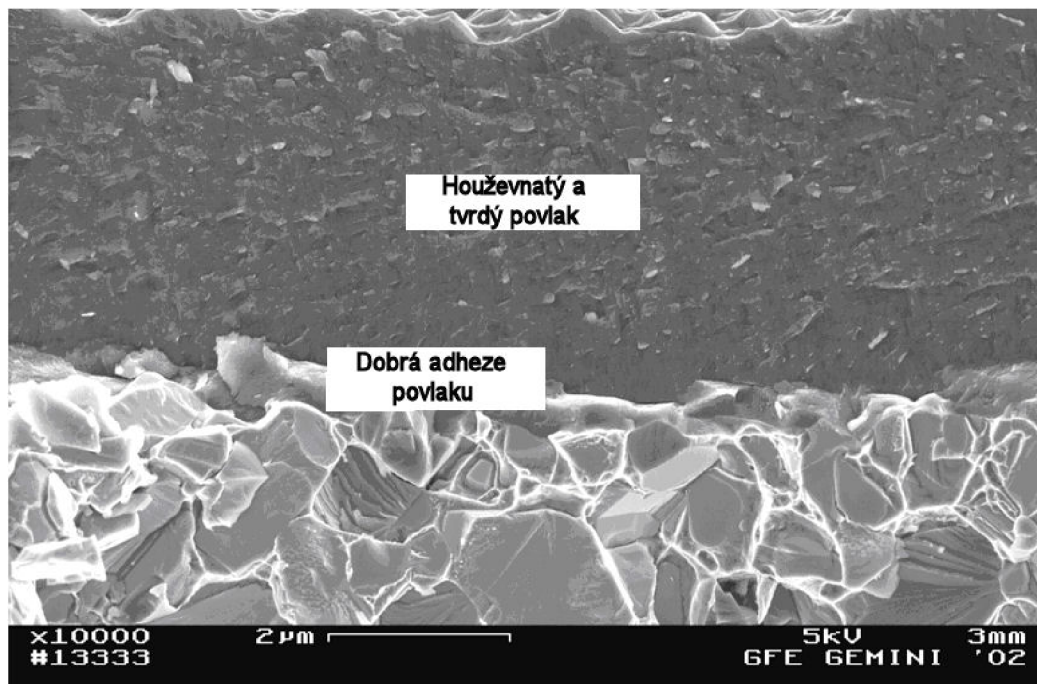
### 2.1 Povlaky

Nanášení tenkých vrstev povlaků na nástroje pro moderní CNC obráběcí stroje je v dnešní době téměř povinností. CNC stroje umožňují pracovat ve vysokých řezných rychlostech a to samé je požadováno po nástrojích. Při hromadné výrobě je cena nástrojů s povlaky zanedbatelná a náklady na ně se v průběhu výroby mnohonásobně vrátí. V současné době se téměř na všechny druhy řezných materiálů (cermety, slinuté karbidy, řezná keramika) nanáší tenké otěruvzdorné povlaky.

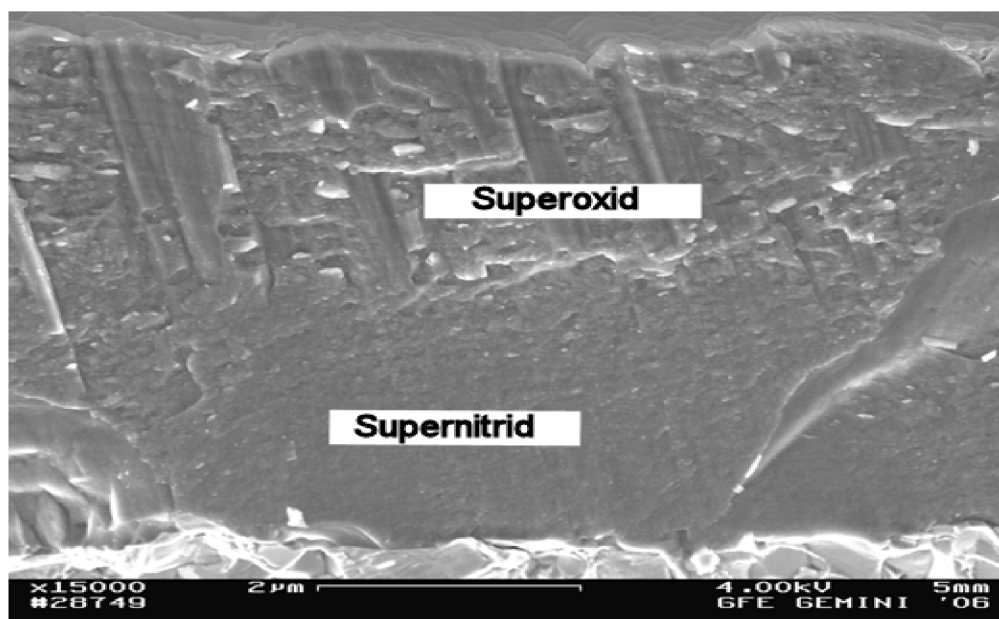
Existují dvě základní metody nanášení povlaků na nástroje a to PVD (Physical Vapour Deposition) a CVD (Chemical Vapour Deposition), včetně jejich různých modifikací (MTCVD, PACVD, MWPCVD, MLCVD, IPVD...), které se do značné míry překrývají. Hlavní rozdíl v těchto metodách je v teplotě, při které pracují. U PVD je to kolem  $500^\circ\text{C}$  a u CVD je to až  $1100^\circ\text{C}$  (záleží na používané metodě). Obrovskou výhodou povlaků je jejich vysoká teplotní stálost, otěruvzdornost, malé tření při obrábění bez nutnosti použití procesní kapaliny. Nanášení povlaků není vždy prováděno kvalitním zařízením, protože zařízení slou-

žící k nanášení povlaků stojí v řádech milionů až desítek milionů korun, a proto je lepší kupovat nástroje s dražšími povlaky, které budou mít určitě delší trvanlivost a náklady vrátí.

Budoucnost povlaků směřuje k výrobě supernitridu a superoxidů (například CrAlSiO) viz obrázek 2.1, 2.2. Tyto povlaky mají velice dobrou adhezi k substrátu, jsou houževnaté, na povrchu hladké ( $f= 0,3$ ) a velice tvrdé (tvrdość až 3500 HV). V povlaku nevznikají téměř žádné napětí. Jsou odolné proti oxidaci, takže snášejí velice vysoké pracovní teploty (až 1000 °C).<sup>15</sup>



Obr. 2.1 Struktura supernitridu <sup>15</sup>



Obr. 2.2 Struktura superoxidu <sup>15</sup>



Dle některé literatury je uváděno, že povlaky na bázi TiAlN (například TiAl-CrN atd.) jsou kvalitnější, než povlaky na bázi TiN. Samozřejmě záleží na konkrétním případě výroby. Pro srovnání, tvrdost tepelně zpracované oceli oproti povlaku TiN je skoro poloviční.<sup>9</sup>

Další obrovskou výhodou je odolnost proti tvorbě nárůstku na špičce nástroje, jak je vidět na obrázku 2.3. To je způsobeno především tím, že při obrábění nástroji s povlaky jsou používány vysoké rychlosti a i koeficient tření je výrazně nižší než u nástrojů bez povlaků, a proto nastává minimální vážnutí materiálu na špičce nástroje.



Obr. 2.3 Tvorba nárůstku u nástroje s povlakem a bez povlaku<sup>13</sup>

### 2.1.1 Historie povlakování<sup>10,12, 13, 14</sup>

První břitové destičky ze slinutého karbidu s tenkým povlakem vyrobila firma Sandvik Coromat v roce 1969. Jednalo se o povlak TiC poté následovaly povlaky TiN, TiCN a později  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , které byly nanášeny metodou CVD. V roce 1980 se na trhu objevily vrtáky s povlaky TiN od firmy Balzers. Dle různé literatury se dělí nejčastěji vývoj povlaků do 4 generací:

1. *generace*: Povlak s jednou vrstvou TiC (tloušťka 7 až 9  $\mu\text{m}$ ). Špatná soudržnost podkladu a povlaku, kvůli vzniku eta karbidu

2. *generace*: Povlak s jednou vrstvou TiC, TiCN, TiN, (tloušťka 13  $\mu\text{m}$ ). Vzhledem k lepší technologii výroby povlaku, byla lepší soudržnost povlaku a substrátu.

3. *generace*: Vícevrstvé povlaky (3, 4 a více povlaků). Jednotlivé vrstvy jsou ostře ohraničeny. Povlaky jsou nanášeny od houževnatého (přilnavost k základnímu materiálu) po tvrdé otěruvzdorné povlaky. Kombinace povlaků TiC, TiN, TiCN,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

4. *generace*: Vícevrstvý povlak (v počtu desítek povlaků), nemusí být zřetelné přechody mezi povlaky. K povlakům z 3 generace jsou připojeny např. AlCrN, AlTiN,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ , TaCN, TiZrN, ZrCN, atd.

### 2.1.2 Materiály pro nanášení otěruvzdorných povlaků

V současné době se převážně nanášejí povlaky na slinuté karbidy, které vykazují velice dobré mechanické vlastnosti oproti jiným materiálům. Slinuté karbidy obsahují velké množství tvrdých karbidů (karbid wolframu, karbid titanu, atd.) a pojící fáze (nejčastěji kobalt). Tyto dvě složky lze kombinovat v různých

poměrech a dosáhnout tak například extrémně tvrdého (křehkého) materiálu (hodně karbidů) nebo naopak houževnatého (měkkého) materiálu (hodně kobaltu).

Lom ve slinutém karbidu se šíří obvykle po hranicích zrn, a proto při použití diskových zrn lze dosáhnout mnohem vyšší pevnosti, protože trhlina se hůře dostane po hranicích zrn a je nucena postupovat přes zrno.

### 2.1.3 Úprava materiálu před a po nanesení povlaků<sup>12, 13, 14</sup>

#### Úprava nástrojů před nanášením povlaků

*Odmašťování:* Slouží ke zvýšení přilnavosti k základnímu materiálu. Dříve se používal benzín a petrolej. V současné době je toto nahrazeno ekologickými odmašťovacími látkami na bázi ropných derivátů. Tyto deriváty se méně odpařují a mají velice dobrou smáčivost.

*Mokré čištění:* Obsahuje mnoho variant oplachování (vakuové, elektrochemické, odstředivé sušení, atd.). Čištění probíhá v alkalických prostředích jako například NaOH, KOH. Dále následuje oplachování a odstraňování zbytků kyselin a jiných látek, nanesení pasivátorů (ochránění povrchu) a následné rychlé sušení.

*Pískování:* Zrna o velikosti kolem 50  $\mu\text{m}$  (nejčastěji SiC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) jsou vrhány na nástroj kde odstraňují například otřepy u slinutých karbidů, které vznikly slinutím, nebo otřepy u přebroušených nástrojů atd.

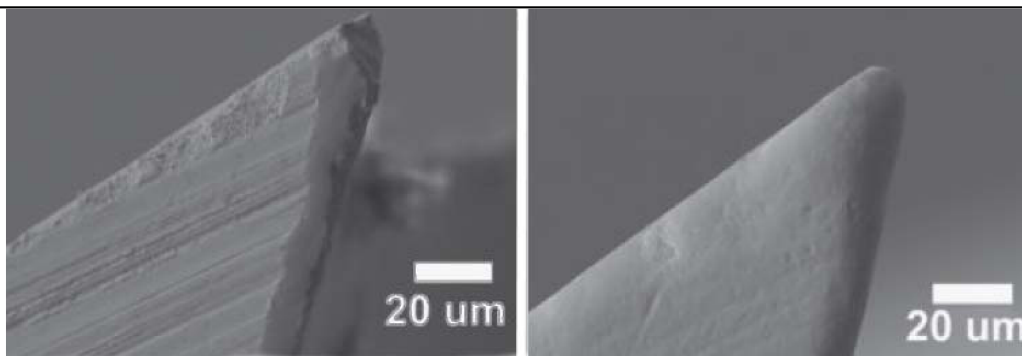
*Odjehlování:* Existují dva druhy odjehlení: Ruční nebo kartáčování (použití u mechanizované výroby). U HSS jde o standardní postup úpravy. Dle možností lze volit i metodu omílání.

*Strhávání starých povlaků:* Jde o odstranění starého povlaku a následného přebroušení nástroje. Povrch se naleptává činnidly a je prováděn chemicky a elektrochemicky. Problém této metody je ve slinutých karbidech, kde může nastat naleptání kobaltu jako pojivové fáze a tím i narušení vlastností materiálu na povrchu.

#### Úprava nástrojů po procesu nanášení povlaků

*Žihání ve vakuu:* Je to část procesu při nanášení povlaků, která slouží k vyčištění povlakovací komory a samotného povlaku. Nevýhoda je časová náročnost této metody a tím i prodloužení procesu nanášení povlaků.

*Omílání v granulátech (mikroúprava břitu):* Velice důležitá technologie, která opraví defekty po broušení povlaků, zaoblí hrany nástroje a vyleští povrch. Používá se také po procesu nanášení povlaků, kvůli odstranění ostrých hran, které při záběru působí obrovské napětí na břit, vzhledem k malé stykové ploše obrobek- nástroj.



Špička nástroje z HM materiálu před omíláním

Špička nástroje z HM materiálu po omílání

Obr. 2.4 Obrázek bříty před a po omílání <sup>13</sup>

*Leštění po procesu nanášení povlaků:* Zabraňuje pozdějšímu nalepování materiálu při obrábění a to vede ke snížení teploty řezu. Při této metodě nesmí docházet k oddělování nebo úpravě bříty jako u omílání. Proto se používají šetrnější principy jako například pasty, granuláty, abraziva, atd.

## 2.2 Nanášení povlaků metodou CVD (Chemical vapour deposition)

Je to nejstarší metoda nanášení povlaků na slinuté karbidy. Byla nejrozšířenější do začátku 90. let, než se objevila výhodnější PVD metoda. Principem metody je reakce chemických sloučenin v plazmě. Jako plynné prostředí při procesu nanášení povlaků se používá metan  $\text{CH}_4$  a dusík  $\text{N}_2$ . Velkou nevýhodou je vysoká teplota při samotném procesu (většinou kolem  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ ) a vznik tahových napětí v povlaku, které rozevírají případné trhliny v povlaku. Naopak výhodou je dobrá adheze k podkladu a možnost použití tlustšího povlaku. Výhodou je také, že nevzniká tzv. stínový efekt, takže se povlak rovnoměrně nanáší po celém povrchu i v dutinách.

Tab. 2.1 Chemické rovnice při nanášení povlaků metodou CVD <sup>15</sup>

$2 \text{AlCl}_3 + 6 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2 \Rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6 \text{HCl} + 3 \text{CO}$	800-1300 °C
$12 \text{WF}_6 + \text{C}_6\text{H}_6 + 33 \text{H}_2 \Rightarrow 6 \text{W}_2\text{C} + 72 \text{HF}$	325-600 °C
$\text{B}_2\text{H}_6 + 2 \text{NH}_3 + \text{H}_2 \Rightarrow \text{BN}_{\text{hex}} + 7 \text{H}_2$	300- 350 °C
$\text{CH}_3\text{SiCl}_3 + \text{H}_2 \Rightarrow \text{SiC} + \text{HF} + \text{H}_2$	1400-800 °C

• pevná látka • plyn

### 2.2.1 Metoda MTCVD (Middle Temperature CVD)

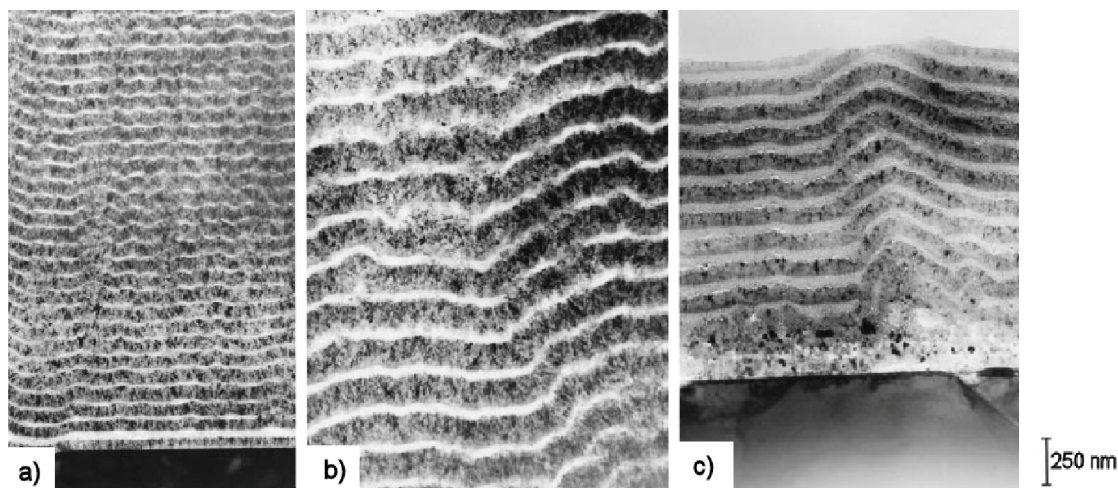
Metoda odstraňuje problém vysokých teplot u CVD. U metody MTCVD se teplota pohybuje kolem  $800\text{ }^\circ\text{C}$ . Vzhledem k nízké teplotě nedochází

k tepelnému ovlivnění a snížení houževnatosti slinutého karbidu. Proto lze použít vyšší posuvové rychlosti při obrábění.

### 2.2.2 Metoda PACVD (Plasma Assistant CVD)

Označovaná také jako **PCVD**, **PECVD** (Plasma Enhanced CVD), **CACVD** (Cascade Arc Plasma assisted CVD), **MWCVD** (MicroWave CVD). Tato metoda pracuje za teplot kolem 490-560 °C (Pokud teplota klesne pod 550 °C, dochází ke snížení tvrdosti vlivem popuštění materiálu). Výhody metody PACVD je: nanášení povlaků a nitridace se provádí v jednom procesu (duplexní nanášení povlaků), nanášení povlaků na složitější tvary (lze nanášet i v dírách), použití nízkého vakua, nízký koeficient tření, atd. Mezi největší nevýhodu patří časová náročnost a malá výrobnost povlaků.<sup>11, 12, 17</sup>

Další druh plazmové CVD metody je **MLCVD** (Multi-Layer CVD). S MLCVD může nanést až 200 velmi tenkých vrstev, které slouží jako bariéra proti šíření trhlin v povlaku. Trhliny mají horší prostupnost mezi jednotlivými vrstvy povlaků nebo může dojít až k úplnému zastavení šíření trhliny.



Obr. 2.5 Povlak PACVD(multivrstvý), (tmavé vrstvy TiN). a) Tloušťka TiN= 75nm a  $Al_2O_3$  = 20nm, b) Tloušťka TiN= 160 nm a  $Al_2O_3$  =40 nm, c) Tloušťka TiN= 80nm,  $Al_2O_3$ = 50nm<sup>17</sup>

### 2.2.3 Metoda HFCVD (Hot Filament CVD)

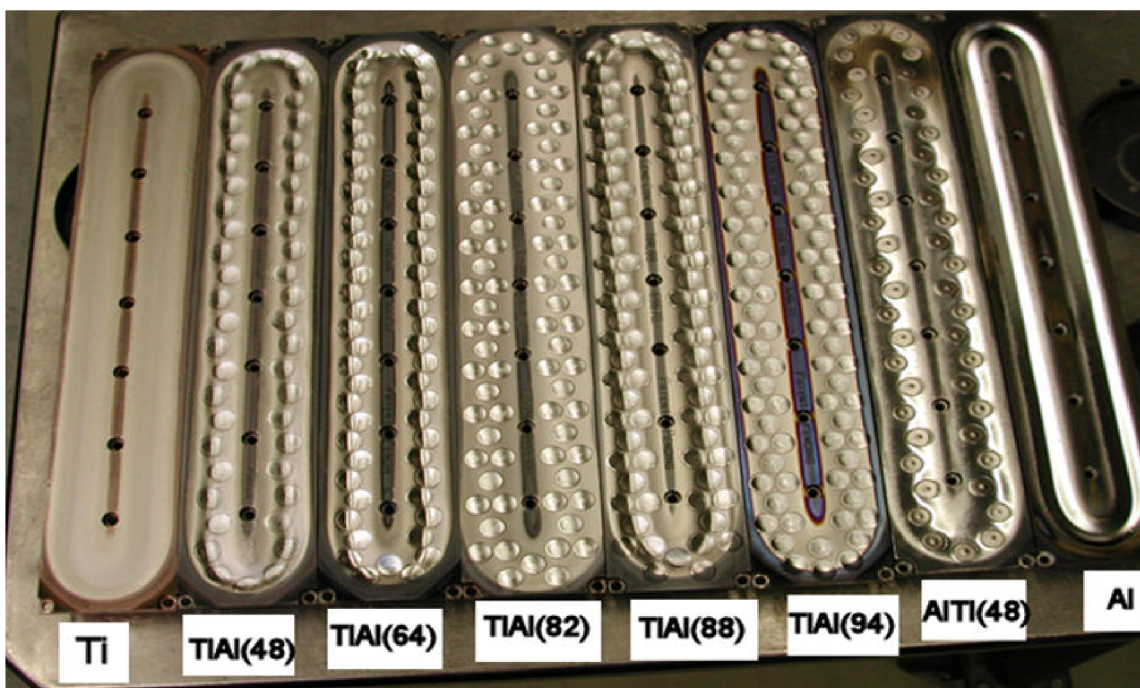
Při této metodě se využívá žhavého wolframového vlákna (kolem 2400 °C), které je umístěno blízko substrátu. To způsobuje urychlení procesu nanášení povlaků. Metoda se využívá pro vytváření diamantových povlaků.<sup>12</sup>

Existují i další modifikace metody CVD jako například LICVD-LCVD (Laser Induced CVD), AACVD (Aerosol Assisted), ALCVD (Atomic Layer CVD), APCVD (Atmospheric Pressure CVD), atd.



### 2.3 Metoda PVD (Physical vapour deposition)

Metoda PVD probíhá za teploty okolo 350-550 °C, takže tepelně nemusí ovlivňovat materiál. Dle fyzikálního principu existují dvě metody nanášení povlaků: *naprašování* (urychlujeme ionty Ar), *odpařování* (laserem, elektronovým prskem, indukčně, nízkonapětovým obloukem). Odpařené částice reagují s atmosférou komory (inertní plyn Ar<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) a jsou urychlovány záporným nábojem na povrch substrátu, kde se ukládají ve formě požadovaného povlaku. Odpařování se provádí z terčů obrázek 2.6. Terče se liší počtem bodů materiálu, které jsou určené k odpařování.



Obr. 2.6 Různé typy terčů <sup>15</sup>

Další rozdělení lze provést z hlediska uspořádání těchto terčů.

- terče jsou uprostřed komory určené k nanášení povlaků,
- terče jsou na vnitřním plášti komory (ve dveřích),
- kombinace těchto dvou variant.

Metoda vytváří oproti CVD žádoucí tlakové napětí, a tak uzavírá případné trhliny vzniklé v povlaku. U této metody lze povlak nanášet i na ostré hrany. Nevýhodou se stává nutnost vakuového zařízení (tlak v komoře kolem 0,5 Pa) a rotace součástí, protože proces nanášení povlaků se děje pouze ve směru odpařovaných částic.

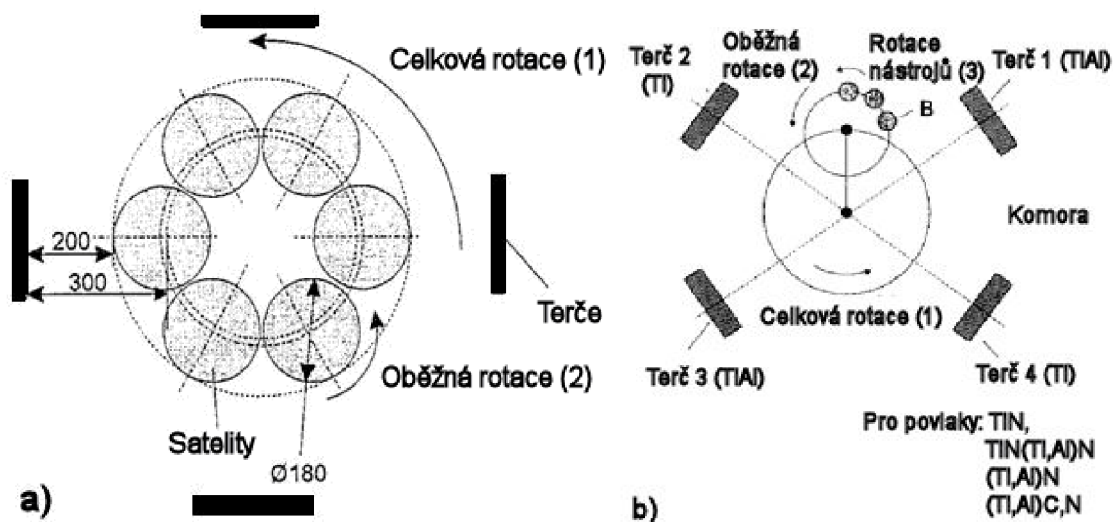
### 2.3.1 Princip rotace nástrojů v komoře

Princip rotace nástrojů je velice důležitý z hlediska rovnoměrnosti nanášení povlaků na nástroje. Musí se dodržet velice striktní synchronizace otáčení nástrojů a rychlosti nanášení povlaků. Pokud není dodržen tento systém, dochází ke vzniku nerovnoměrného povlaku a tím vyššímu pnutí nebo horší adhezi povlaků atd. Většinou se při nanášení povlaku používají tři smíšené pohyby viz obrázek 2.7.

Dalším důležitým pojmem je **koeficient kapacity výrobní dávky**<sup>20</sup>. Dle koeficientu  $C_b$  lze určit výrobní dávku, která je nutná k zajištění dané výroby. Dané veličiny jsou určeny zvolením parametrů zařízení určeného k nanášení povlaků viz obrázek 2.8.

koeficient kapacity výrobní dávky:<sup>20</sup>

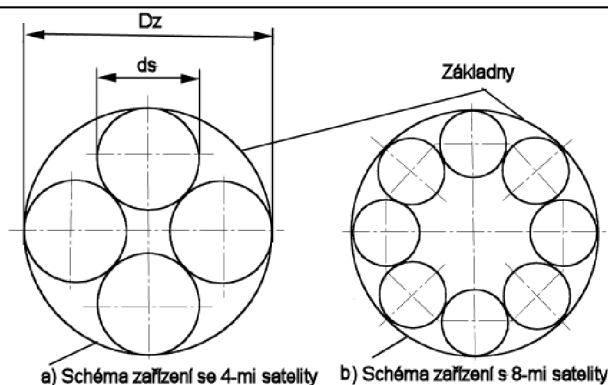
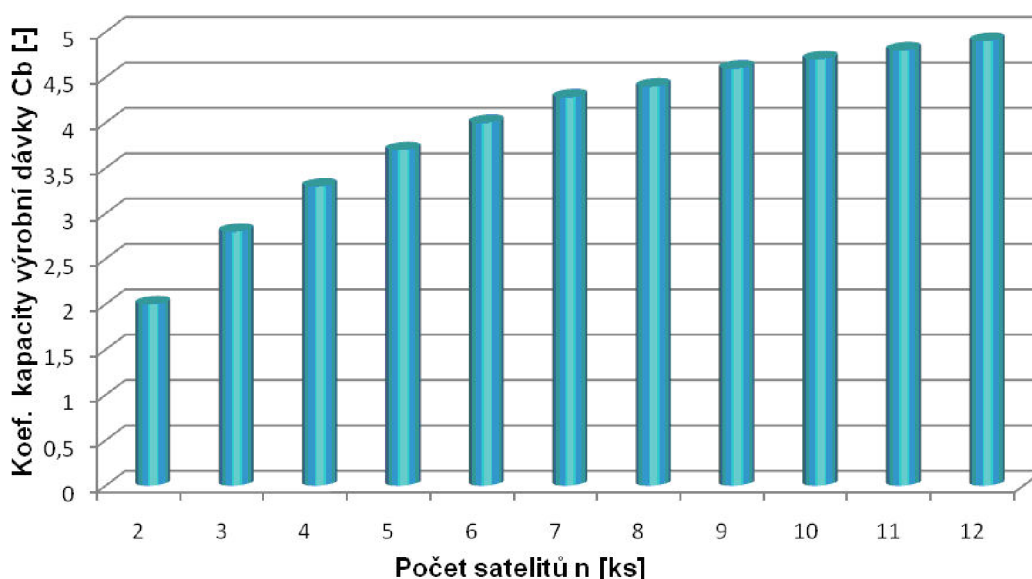
$$C_b = \frac{n \cdot l_s}{A_e} = 4 \cdot \frac{n \cdot d_s}{D_z^2} \quad (2.1)$$



Obr. 2.7 a) Rozměry šesti satelitů a vzdálenost od terčů při procesu nanášení povlaků, b) Označení všech tří hlavních pohybů v komoře<sup>18, 19</sup>

Kde:  $n$  [ks] počet satelitů,  
 $A_e$  [mm<sup>2</sup>] plocha kruhu  $D_z$ ,  
 $l_s$  [mm] výška jednoho satelitu,  
 $d_s$  [mm] průměr satelitu,  
 $D_z$  [mm] průměr základny.

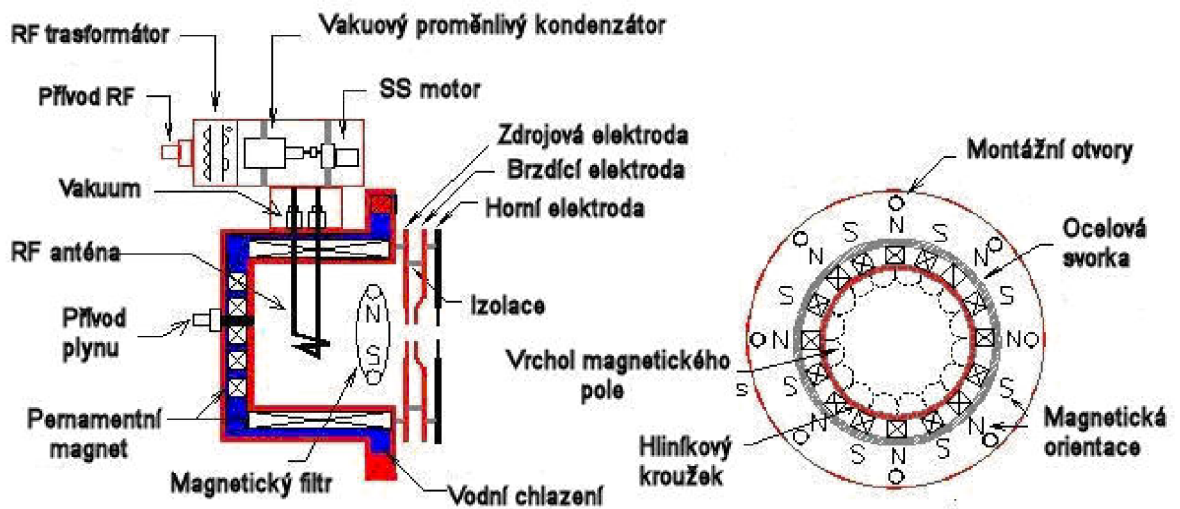
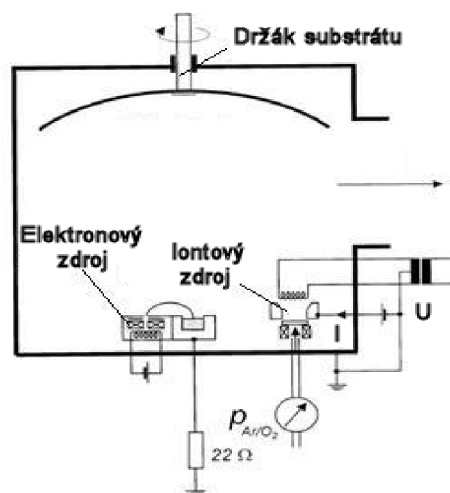


Obr. 2.8 Parametry rotačního systému a uspořádání satelitů <sup>20</sup>Obr. 2.9 Závislost počtu satelitů na koeficientu výrobní dávky <sup>20</sup>

### 2.3.2 Iontová implantace

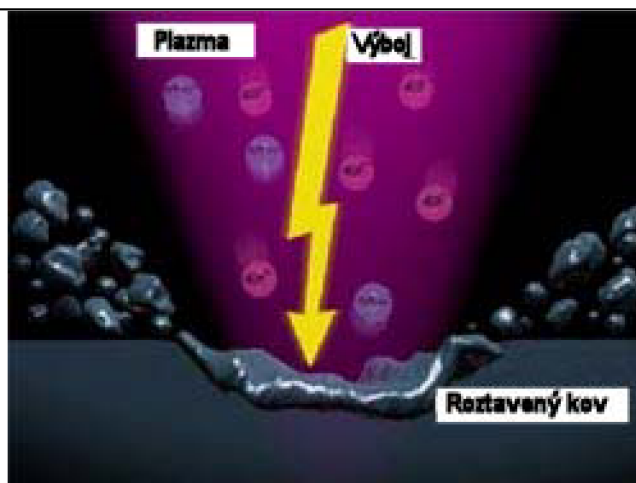
Iontová implantace se skládá většinou z iontového zdroje (děla) obrázek 2.10, urychlovače (zde částice dostanou vyšší energii) a samotné komory. Princip procesu je v bombardování povrchu substrátu nebo nanášení povlaku částicemi o vysoké energii. Mezi substrátem a odpařovaným zdrojem je vytvořeno silné elektrické pole, a proto dochází k elektrickému výboji, který ionizuje atomy plynu i odpařeného materiálu. Reakcí těchto iontů vzniká povlak, který se následně usazuje na substrátu.

Získávání materiálu k nanášení povlaků z terčů je provedeno: odpařováním, odprašováním, z plynů a par. Výhody iontové implantace je vysoká různorodost nanášených povlaků (možnost nanášení plastů), vynikající hustota a adheze povlaku (způsobená bombardováním částmi o vysoké energii), možnost použití řízeného bombardování k očištění substrátu. Mezi nevýhody patří zejména nedodržení stejnoměrného bombardování substrátu, složitost v řízení a nastavování vstupních hodnot pro samotný proces nanášení povlaku. <sup>14,21,24</sup>

Obr. 2.10 Schéma principu iontového zdroje <sup>22</sup>Obr. 2.11 Princip iontového nanášení povlaků <sup>23</sup>

### 2.3.3 Naprašování

Metoda funguje na principu odprašování materiálu ze zdrojů (terčů), které probíhá ve vakuu nebo za sníženého tlaku. Zařízení je tvořeno katodou (terč), komory substrátu, zařízením pro tvorbu vakua, zdroje, čerpacího zařízení. Vytvořením elektrického pole vznikne doutnavý výboj, který hoří mezi terčem a inertní atmosférou (anoda) nebo terčem ze záporným nábojem. Pomocí tohoto výboje se udržuje argonová plazma, která po dodání energie z elektrického pole vyráží atomy základního materiálu a ty jsou následně nanášeny na substrát.

Obr. 2.12 Princip odprašování materiálu z terčů <sup>26</sup>

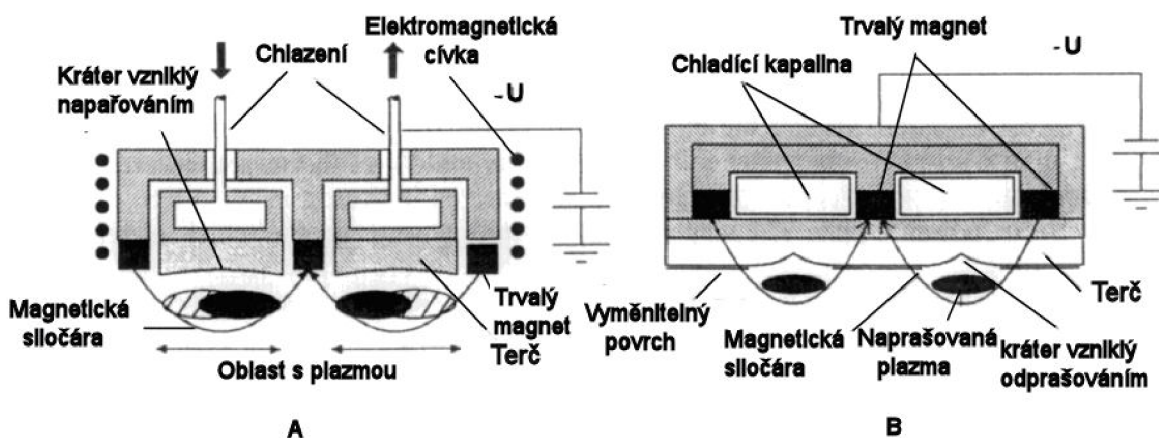
### Magnetronové napařování <sup>12</sup>

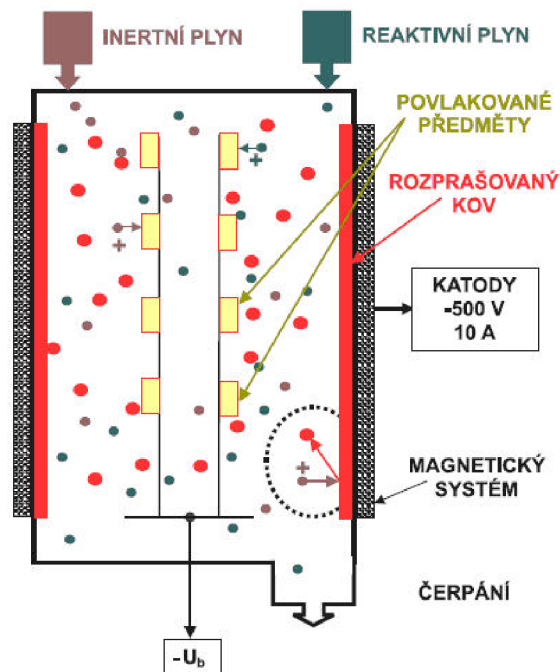
Pomocí magnetronů se řídí magnetické pole uvnitř komory a tím je dosaženo rozšíření plazmy až k substrátu určeného k nanášení povlaků (obrázek 2.14). Proces probíhá za velmi nízkého tlaku v jednotkách Pascalů.

Na obrázku 2.13 je vidět pohled na vyvážené magnetrony (síla mezi vnějšími a vnitřními magnety je přibližně stejná), pokud jsou magnetrony nevyvážené (síla vnitřního nebo vnějšího magnetu převyšuje), na magnetickém poli se už nepodílejí všechny magnetické siločáry, a tak není zaručeno symetrické magnetické pole a magnetron může být poškozen nadměrným ohřevem od plazmy.

*Nevýhody této metody jsou:* horší adheze povlaku, drahý zdrojový materiál (terč), nižší rychlost nanášení povlaků oproti metodě, která využívá vypařování.

*Nevýhody této metody jsou:* nanášení více vrstev povlaků, malá vzdálenost mezi substrátem a materiálem určeného k nanášení povlaků, tvorba povlaků s plynulou změnou složení (gradientní povlaky), velká variabilita v uspořádání katod, atd.

Obr. 2.13 a) Pohled na vyvážený rozšířený magnetron (SpeedMAG) s dvěma rozšířenými plazmatickými přenosy, b) Standardní vyvážený magnetron <sup>23</sup>

Obr. 2.14 Princip magnetronového naprašování <sup>25</sup>

### 2.3.4 Napařování<sup>12,24,27</sup>

V metodě napařování je zdrojový materiál (terč) zahříván na obrovskou teplotu. Tento materiál začne vařit a následně se volně odpařuje díky vakuu, které je dosažené v komoře ( $10^{-1}$  až  $10^{-8}$  Pa) a následně kondenzuje na všech površích v komoře. Tento princip je stejný u všech druhů napařování, odlišnosti jsou v druhu zahřívání terčů (indukční zahřívání, odporové, paprskem elektronů, obloukem, laserem, atd.). Limitujícím prvkem jsou možnosti odpařování daného materiálu (například hliník se velice obtížně vypařuje).

*Výhody vakuového napařování jsou:* Z PVD metod je tato nejlevnější, povlaky jsou velice čisté, proces je poměrně snadno ovladatelný a kontrolovatelný.

*Nevýhody vakuového napařování:* Omezené nanášení různých druhů povlaků, nutnost velké vakuové komory, procento využití zdrojového materiálu je poměrně nízká, špatné nanášení povlaků na tvarově složitějších součástech, atd.

#### Obloukové napařování <sup>12,24</sup>

Katoda je obvykle terč a anoda je vlastní komora určená k nanášení povlaků. Mezi anodou a katodou hoří oblouk, který lokálně taví katodu v tzv. místě katodové skvrny (průměr kolem  $10^{-2}$  mm). Oblouky mohou být v principu dvojího druhu a to *pulzní* nebo *kontinuální*.

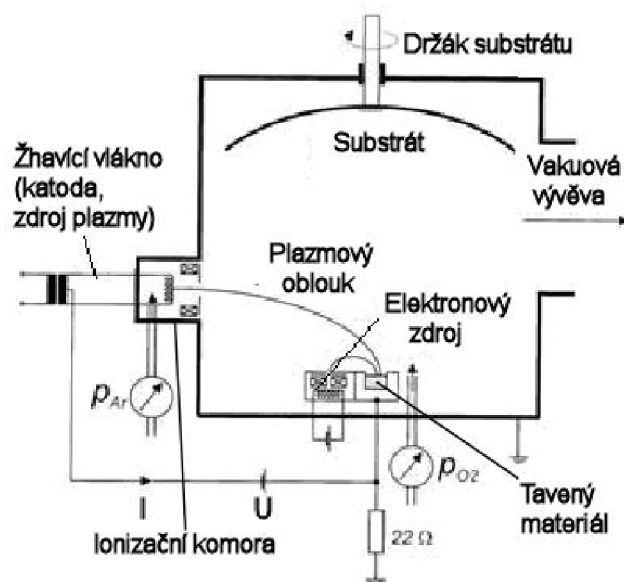
*Pulzní oblouk* je obnovován a zhášen v krátkých intervalech pomocí kondenzátoru, a tak je katoda částečně ochlazována mezi jednotlivými výboji. Nevýhodou je, že mezi jednotlivými cykly se materiál neodpařuje, a tak nanášení povlaků je časově náročnější.

Kontinuální oblouk odpařuje materiál z celého povrchu terče, ale v povlaku mohou vznikat větší vměstky.

Zdrojový materiál je odpařován pomocí nízkonapětového oblouku a katodová skvrna (lze ji řídit pomocí magnetického pole- řízené odpařování) se velmi rychle pohybuje po povrchu terče (kolem 40 až 60 m.s<sup>-1</sup>). Na povrchu terče vzniká teplota kolem 15 000 °C, která zajišťuje odpaření kteréhokoliv materiálu.

*Výhody obloukového napařování* jsou: menší znečištění terče, vysoká hodnota ionizovaných atomů v plazmě, možnost odpařovat všechny druhy vodivých materiálů, vysoká variabilita uspořádání katod, atd.

*Nevýhody obloukového napařování* jsou: Nelze odpařovat nevodivé materiály, odpařovaný materiál je ve formě kuliček (makročástic) a může být takto uložen i na povrchu. Toto lze odstranit pomocí filtru, který nám však zpomaluje rychlost nanášení depozice.



Obr. 2.14 Princip odpařování s vychylovaným elektronovým paprskem (low-voltage ion plating )<sup>12,23</sup>



### 3 OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ S OTĚRUVZDORNÝMI POVLAKY

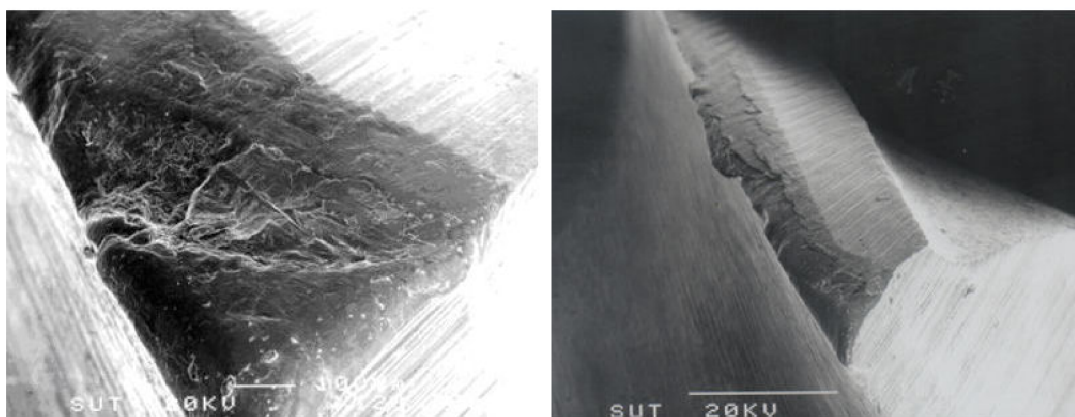
Opotřebení nástrojů s otěruvzdornými povlaky je důsledkem styku dvou materiálů, které vůči sobě konají relativní pohyb. Při řezném procesu jsou v relativním pohybu vůči sobě obráběný materiál, nástroj a tříska, a proto dochází k opotřebení v důsledku tření za velmi vysokých teplot a tlaků. Mechanismus opotřebení je velice komplikovaný děj, při kterém působí mnoho faktorů jako například vlastnosti materiálu, geometrie nástroje, podmínky řezného procesu, typ operace, atd.

#### 3.1 Všeobecné mechanismy opotřebení řezných nástrojů

Při součtu celkového opotřebení se tyto mechanismy dost často prolínají a většinou je jeden z nich převládající a určující pro stanovení základní trvanlivosti. Odstranění některých mechanismů opotřebení lze docílit aplikací vhodných povlaků. Povlaky zpomalují nebo odstraňují některé mechanismy opotřebení a slouží například jako zábrany proti difúzi a oxidaci. Nejdůležitějším faktorem procesu řezání je jeho teplota, která velmi úzce souvisí s mechanismy opotřebení (částečně i určuje, jaké opotřebení se u řezného procesu uskutečňuje).

##### 3.1.1 Adheze

Adheze neboli přilnavost je fyzikální druh opotřebení a nejlépe nastává u chemicky příbuzných a kovově čistých materiálů. Vzniká za působení vysokého tlaku a teploty, kdy se materiál na vrcholcích mikronerovností svaří a to následně způsobuje vytrhávání materiálu z povrchu nástroje. To zhoršuje kvalitu povrchu nástroje a tím zvyšuje teplotu samotného procesu řezání. Na obrázku 3.1 vlevo je vidět jak vlivem adheze byl materiál nástroje vytrhán a tím poškozen jeho hřbet.



Obr. 3.1 Opotřebení čelní frézy M41 bez povlaku. Řezné podmínky:  $v_c = 18,85$   $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f_z 100$   $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , průměr frézy 4 mm. <sup>31</sup>

### 3.1.2 Abrazie

Tento fyzikální mechanismus opotřebení vzniká vždy a nedá se mu zabránit (použitím povlaků lze proces pouze zpomalit). Vzniká díky tvrdým částicím (různé druhy karbidů, vměstků), které jsou obsaženy jak v nástroji, tak i v obrobku. U slinutých karbidů je podíl tvrdých částic až 90 % a u rychlořezné oceli kolem 30 %. Abrazní opotřebení je přímo úměrné tvrdosti nástroje, a proto čím tvrdší materiál, tím vyšší je odolnost vůči abrazi.

### 3.1.3 Difúze

Je to chemický děj, který je úměrný zvyšující se teplotě a tlaku, kdy na rozhraní nástroj-obrobek difundují atomy a přecházejí z tvrdší matrice do měkčí. Většinou tyto atomy přecházejí z nástroje do obrobku, kdy nástroj změkčuje a naopak obrobek se stává tvrdší. Je to děj dlouhodobý, který začíná probíhat (dle materiálu nástroje a rezných podmínek) kolem 900 °C a ze vzrůstající teplotou se urychluje. Tento mechanismus byl aktuální především do doby, než se začaly používat otěruvzdorné povlaky u nástrojové oceli, kdy migrace uhlíku z nástroje do obrobku velice měnila rezné vlastnosti jak nástroje, tak i obráběného materiálu.

### 3.1.4 Oxidace

Vzniká díky oxidům (chemický děj), které vnikají do rezného procesu a tvoří na nástroji tzv. rýhy opotřebení (primární hřbetní rýha, sekundární-oxidační rýha, rýha na čele). Tento mechanismus opotřebení lze nejčastěji odstranit použitím vhodného povlaku.

### 3.1.5 Plastické porušení

V tomto mechanismu dochází ke změně tvaru špičky nástroje, důsledkem velkého tepelného a mechanického zatížení. Na příčinu vzniku tohoto mechanismu má výmol na čele, který ostří na nástroji zeslabuje a to je následně náchylnější vůči plastickému porušení.

### 3.1.6 Křehký lom

Tento mechanismus nastává okamžitě v důsledku zvýšení mechanického zatížení nástroje (například u odlitků jsou v povrchové vrstvě tvrdá zrna z formy, které způsobují obrovské místní zatížení), použitím přerušovaného řezu, atd.

## 3.2 Opotřebení nástrojů s tenkými otěruvzdornými povlaky

### Tepelná stálost povlaků:

Samotný povlak je vytvářen za termodynamicky nestabilních podmínek a může obsahovat vady, které se projeví pak při samotném procesu obrábění jako



například pnutí v povlaku, při nárůstu teploty růst krystalů, změna k jinému uspořádání krystalů atd. Proto je velice důležité, aby povlaky od různých firem byly velice pečlivě kontrolovány a dodávány v co nejlepší kvalitě a aby nedokonalost povlaku neovlivňovala celkovou trvanlivost nástroje.<sup>29</sup>

### Odolnost povlaků proti oxidaci

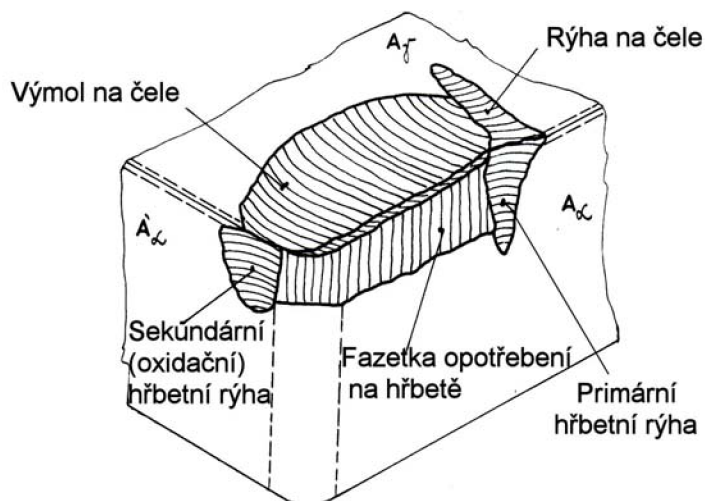
Rozlišujeme oxidaci povrchovou a hloubkovou. Povrchová oxidace není tak nebezpečná a v mnoha případech vytváří na povrchu tenkou vrstvu oxidů, která samotné oxidaci zabraňuje. Hloubková oxidace působí velice negativně na nástroj, protože mění vnitřní mřížkové vazby v povlaku a v krajním případě může docházet k oddělení povlaku od substrátu.<sup>29</sup>

### Chemická stabilita povlaků

Chemická stabilita povlaků je dána zejména typem povlaku a principem jeho nanášení. Například diamantový povlak je vhodný na obrábění neželezných kovů, ale přitom je naprosto nevyhovující pro obrábění běžných ocelí (při vyšších řezných rychlostech), protože může docházet k migraci atomů uhlíků. Ze vzrůstající teplotou se chemická stabilita nástrojů rapidně zhoršuje.<sup>29</sup>

### Formy opotřebení povrchu povlaku

Na obrázku 3.2 jsou vidět jednotlivé formy opotřebení funkčních ploch řezného nástroje. Pro snížení abrazivního a adhezivního opotřebení se používají velmi tvrdé a otěruvzdorné povlaky, ale i přes používání těchto povlaků jsou tyto dva mechanismy rozhodující pro dvě nejdůležitější formy opotřebení a to *fazetky opotřebení na hřbetě* a *výmolu na čele*, které určují základní trvanlivost nástrojů.



Obr 3.2 Formy opotřebení nástrojů s povlakem<sup>38</sup>

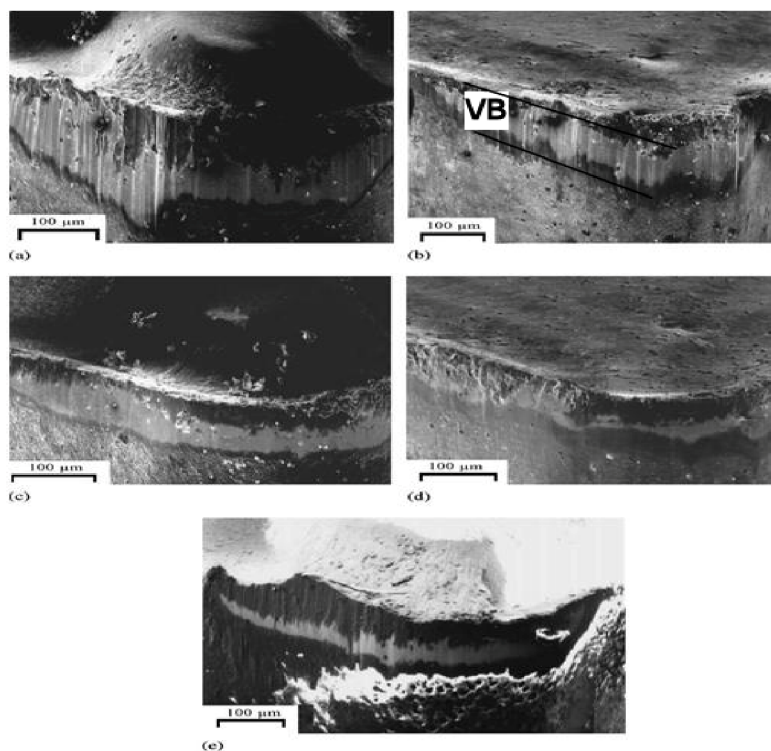
#### 1) Opotřebení na hřbetě

Tento mechanismus opotřebení se při obrábění vyskytuje pokaždé a je na něm založena prakticky celá trvanlivost nástroje. Na obrázku 3.3 je vidět opotřebení nástrojů s povlakem od firem Seco a Widia, při obrábění hliníku s částicemi oxidu hlinitého (dosažení většího abrazivního opotřebení). Na obrázku lze také

vidět rýhy od těchto částic a celkové opotřebení na hřbetě označované jako VB (viz obrázek 3.3 b), které slouží jako hlavní měřítko ke stanovení trvanlivosti.

Na obrázcích 3.3-a,b, za stejných řezných podmínek a při stejném obráběném materiálu, lze vidět obrovský rozdíl v opotřebení fazetky na hřbetě, kde jiný povlak může zcela změnit velikost opotřebení nástroje. Naopak u obrázku 3.3-c,d jsou vidět minimální rozdíly v opotřebení nástroje, při obrábění materiálu, který obsahuje zrna  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o velikosti  $32\ \mu\text{m}$ . Na posledním obrázku 3.3-e je patrná velká deformace povlaku (vysoká teplota procesu řezání) vzhledem k vysoké tvrdosti obráběného materiálu.

Na obrázcích 3.3 a 3.4 jsou též vidět velké rýhy, které jsou vytvořeny abrazivním opotřebením, které způsobují tvrdé částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a proces opotřebení značně urychlují. U nástrojů s povlaky je vždy přítomen abrazivní mechanismus opotřebení, protože jsou vždy buď v nástroji nebo v materiálu přítomny tvrdé otěruvzdorné částice.



Obr. 3.3 Opotřebení hřbetu nástroje. Obráběný materiál je hliník s obsahem vysoce abrazivních částic  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (30 hmot. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )<sup>30</sup>

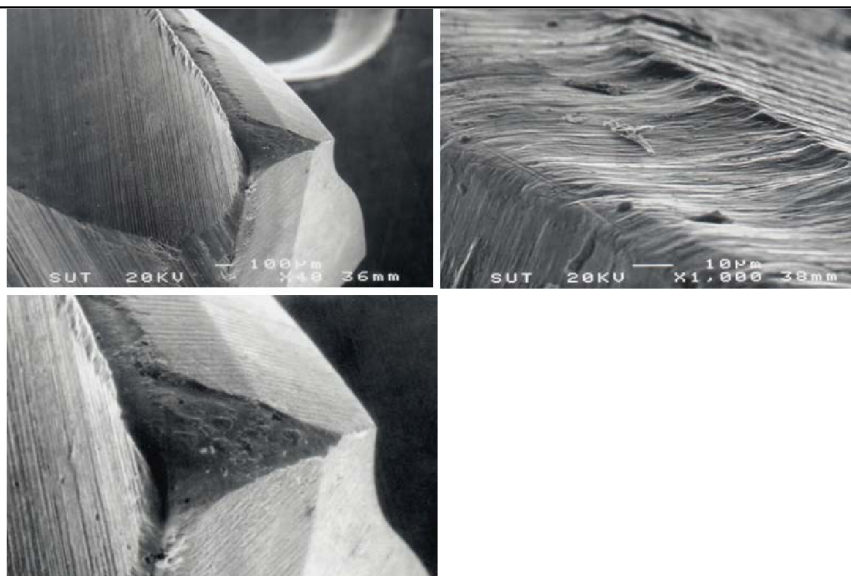
a) Povlak TiN nanesen na materiál K10, řezná rychlost  $210\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , pro  $16\ \mu\text{m}$  částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

b) Povlakovaný nástroj TP30 (firma SECO), řezná rychlost  $210\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , pro  $16\ \mu\text{m}$  částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

c) Povlak TiN nanesen na materiál K10, řezná rychlost  $100\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , pro  $32\ \mu\text{m}$  částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

d) Povlakovaný nástroj TP30 (firma SECO), řezná rychlost  $100\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , pro  $32\ \mu\text{m}$  částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

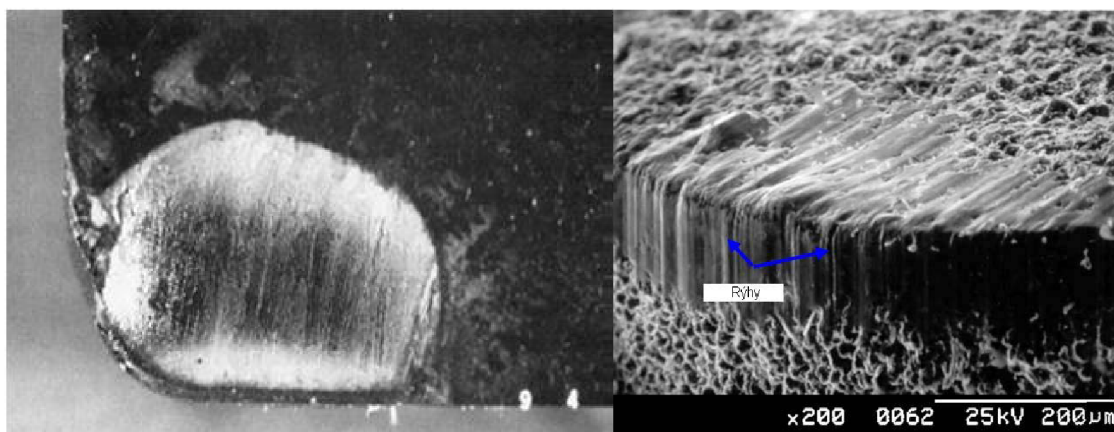
e) Povlak TiN nanesen na materiál K10, Obráběný materiál s 10 hmot. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , pro  $32\ \mu\text{m}$  částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



Obr. 3.4 Opotřebení na hřbetě čelní frézy s povlakem TiCN (tloušťka 3µm), zobrazení pomocí elektronového řádkovacího mikroskopu. Řezné podmínky:  $v_c = 39,26 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $f_z = 250 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , průměr frézy 4 mm.<sup>31</sup>

## 2) Výmol na čele

Tento druh opotřebení je rovnoběžný s ostřím, tedy je umístěn na čele nástroje viz obrázek 3.2. Za velmi vysokých řezných rychlostí nebo při obrábění houževnatých materiálů může být toto opotřebení primární, které bude určovat celkovou trvanlivost nástroje. Výmol na čele je většinou způsoben přilnavostí obráběného materiálu k obrobku a zeslabuje šířku ostří. Měří se hloubka výmolu označována jako KT a délku od hrany ostří do maximální hodnoty KT, která se označuje jako KM. Poměr KT/KM by měl být v rozmezí 0,2 až 0,4 mm. Na obrázku 3.5 je vidět opotřebení na čele a směr odchodu třísky obráběného materiálu, které naznačují abrazivní rýhy opotřebení<sup>28</sup>



Obr. 3.5 Výmol na čele. Obrázek vpravo opotřebení CBN-TiN při soustružení, řezné podmínky:  $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $f_z = 0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $a_p = 0,25$ <sup>28, 32</sup>

### 3) Delaminace povlaku

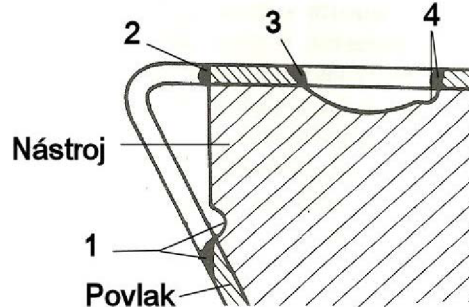
Příčinou odlamování povlaku může být jeho velká šířka nebo špatně zvolená metoda nanášení povlaku. U metody CVD jsou povlaky náchylnější na odlamování, protože se během nanášení povlaku může vytvořit oduhlíčená eta-fáze nebo vlivem vysokých teplot mohou vzniknout trhliny. U metody CVD vznikají tahové pnutí, které trhliny otvírají. Problémem u metody PVD jsou nižší teploty, při kterých se povlak nanáší a tím i občas špatná přilnavost k základnímu substrátu, ale ta se dá zvýšit použitím tzv. *duplexního povlakování*, kdy v jednom zařízení se provádí plazmová nitridace a následně nanášení povlaku.

Občas dochází k porušení povlaku v důsledku vysokého opotřebení (obrázek 3.6), ale i přes tuto skutečnost je nástroj schopen ještě chvíli obrábět, vzhledem k tomu, že podkladový materiál je většinou slinutý karbid, který je velice tvrdý a tím odolný proti abrazivnímu opotřebení, které je zde dominantní. Snížení opotřebení zabraňuje také samotný povlak (obrázek 3.6):<sup>33</sup>

1) V dolní části hřbetu je vytvořen tzv. ochranný „práh“ z povlaku, který vystupuje nad rovinu opotřebení. Tento nános brání pohybu obráběného materiálu a tím způsobuje jeho váznutí, které má za následek pozdější vznik rýhy před tímto prahem. Rýha pomalu podemílá povlak a tím ho vydroluje, což zvětšuje plošku opotřebení<sup>33</sup>

2) +3) Povlak vytvoří tzv. „štít“, který brání obráběnému materiálu v opotřebování základního materiálu (slinutého karbidu)<sup>33</sup>

4) Je používáno stejného mechanismu jako add. 1)<sup>33</sup>



Obr. 3.6 Delaminace povlaku<sup>33</sup>

### 3.3 Trvanlivost a životnost nástroje

*Trvanlivost nástroje* je doba od začátku obrábění do jeho mezního opotřebení (čas čistého obrábění). Hranice opotřebení je různá, vzhledem k odlišným metodám obrábění a různorodosti používaných rezných materiálů. Jako hranice opotřebení se nejčastěji uvádí velikost opotřebení na hřbetě (VB), hloubka výmolu na čele (KT) a v některých případech také prolomení otěruvzdorného povlaku, zvýšení drsnosti povrchu obráběného materiálu, zvýšení rezných odporů a tím i výkonu obráběcího stroje, atd.

*Životnost nástroje* je součet jednotlivých trvanlivostí až do úplného opotřebení a následného odstranění nástroje z výroby. Například u břitových destiček

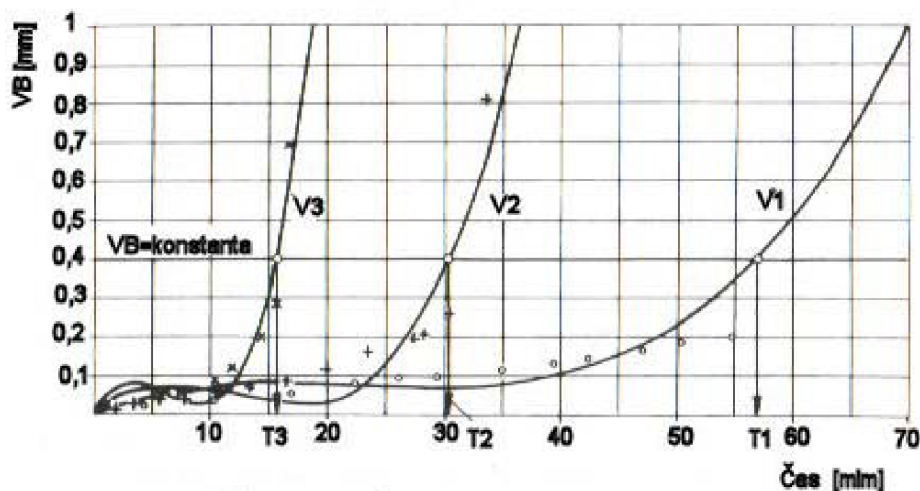


je více řezných hran, které tvoří jednotlivé trvanlivosti a jejich součet je celková životnost nástroje. Z tohoto principu je dán vztah 3.1

$$Z = \sum_{i=1}^{n+1} T_i = (n_s + 1) \cdot T \quad [\text{min}] \quad (3.1)$$

Kde:  $T_i$  [min] jednotlivé trvanlivosti  
 $T$  [min] aritmetický průměr hodnot  $T_i$   
 $n_s$  [-] počet možných ostření nástroje

Na obrázku 3.7 je vidět závislost opotřebení VB (konstanta) na čase při různých řezných rychlostech  $v_1 < v_2 < v_3$ . Na začátku křivky je vidět rapidní růst opotřebení, protože plocha styku nástroj-obrobek je velice malá a to způsobuje obrovský tlak, který špičku nástroje „utaví“ a tím zvýší velikost opotřebení VB. Z tohoto obrázku vychází obrázek 3.8, který ukazuje závislost jednotlivých trvanlivostí na řezné rychlosti.



Obr. 3.7 Závislost času na opotřebení hřbetu VB <sup>33</sup>

Začátkem století Taylor přišel na to, že veličinou, která nejvíce ovlivňuje dobu trvanlivosti je řezná rychlost. Stanovil základní vztah závislosti těchto dvou veličin tzv. T-v závislosti (obrázek 3.8) a Taylorův vztah který je:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad [\text{min}] \quad (3.2)$$

Kde:  $C_T$  [-] konstanta  
 $v_c$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] Řezná rychlost  
 $m$  [-] Exponent- směrnice vytvořené přímky

Vzhledem k přehlednějšímu ( $C_T$  je kolem  $10^{11}$ ) výpočtu byl zaveden vztah:

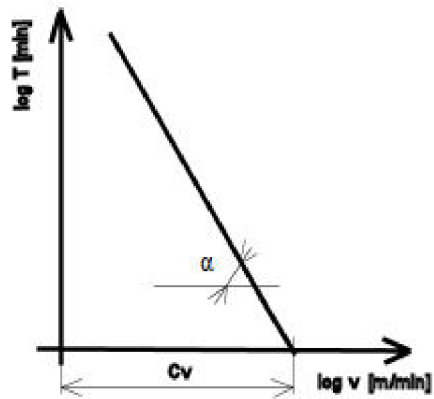
$$v_c = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}}} \quad (3.3)$$

Exponent  $m$  a  $C_v$  (řádově  $10^3$ ) se určuje z obrázku 3.7. Exponent  $m$  je vyjádřen vztahem:

$$m = \operatorname{tg} \alpha$$

Kde:  $\alpha$  [°] úhel přímky

(3.4)



Obr. 3.8 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. HOFFMANN GROUP. Munich, Germany. *Garant příručka obrábění*. [online]. [cit. 17. února 2010]. Dostupný z WWW: <<http://www.hoffmann-gmbh.de/download/cz/zerspanungshandbuch/cz-zerspanungshandbuch.pdf>>.
2. HULA, J. Výroba vnitřních závitů tvářením. *MM - Průmyslové spektrum*. 4/2001, č. 4, s. 28-29. ISSN 1212-2572.
3. VARGUS Ltd. Nahariya, Israel. *Vargus catalogue*. [online]. [cit. 28. ledna 2010]. Dostupné z WWW: <[http://www.vargus.com/download/files/VARGUS\\_MAIN\\_MM250110.pdf](http://www.vargus.com/download/files/VARGUS_MAIN_MM250110.pdf)>.
4. WISERNER, Manfred. Vrtací závitorezné frézy zkracují výrobní časy. *MM - Průmyslové spektrum*. 3/2009, č. 3, s. 46. ISSN 1212-257.
5. EMUGE - FRANKEN s.r.o. *Emuge - technika frézování závitů*. [online]. 1.2.2001 [cit. 28. března 2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.emugefranken.cz/soubory/134cz.pdf>>.
6. SCIENTIFIC CUTTING TOOLS. Simi Halley, California, USA. *Thread Mill Help: Understanding Thread Mills* [online]. [cit. 27. ledna 2010]. Dostupný z WWW: <<http://www.sct-usa.com/millhelp.asp>>.
7. KENNAMETAL Inc. Latrobe, Pennsylvania, USA. *Thread Mills*. [online]. [cit. 28. března 2010]. Dostupné z WWW: <[http://www.kennametal.com/images/repositories/PDFs/009\\_Thread\\_Mills.pdf](http://www.kennametal.com/images/repositories/PDFs/009_Thread_Mills.pdf)>.
8. SANDVIK AB, Sandviken, Sweden. *Thread milling with CoroMill® Plura*. [online]. [cit. 28. března 2010]. Dostupné z WWW: <[http://www.kennametal.com/images/repositories/PDFs/009\\_Thread\\_Mills.pdf](http://www.kennametal.com/images/repositories/PDFs/009_Thread_Mills.pdf)>.
9. AUDY, Jaromir. Důležitost povlakování rezných nástrojů pro ekonomické obrábění. *MM - Průmyslové spektrum*. 12/2009, č. 12, s. 46. ISSN 1212-2572.
10. OC Oerlikon AG. Pfäffikon, Switzerland. *Balzars presents a world novelty: G6 - The new generation of PVD coatings*. [online]. 2006 [cit. 28. března 2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.balzars-elay.com/bpl/pol/05-company/03-press/prBHQ-005W3DnavidW269.php>>.
11. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro rezné nástroje. *MM - průmyslové spektrum speciál*. Září 2004, s. 84-97. ISSN 1212-2572.
12. HUMÁR, Anton. *Materiály pro rezné nástroje*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
13. HOLUBÁŘ P., ŠÍMA, M., ZINDULKA, O. Technologie úprav nástrojů před a po povlakování. *MM - Průmyslové spektrum*. 9/2005, č. 9, s. 70-72. ISSN 1212-2572.
14. CSELLE, Tibor. HOLUBÁŘ, Pavel. SHM, s.r.o. Šumperk [online]. 12.1.2007 [cit. 29. března 2010]. *Nové trendy v přípravě PVD povlaků*. Dostupné z WWW: <<http://www.shm-cz.cz/files/literatura/40.pdf>>.



15. NĚNIČKA, Jakub. *Future made by CemeCon*. Firemní prezentace CemeCon Centrum Ivančice.
16. HUMÁR A., DANG V. H. Trendy v povlakování slinutých karbidů. *MM - průmyslové spektrum*. 7/2001, č. 7, s. 43-45. ISSN 1212-2572.
17. BAUER, H.D. ARNOLD, B. BARTSCH, K. Manufacturing and structure investigation of TiN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Multilayers. *NanoStructured Materials*. 1999, Vol. 11, No. 8, s. 1101-1109. ISSN 0965-9773.
18. ROTHER, B. On the possibility of physical vapour deposition process design by coordinated substrate rotation modes. *Surface and Coatings Technology*. 1994, Volumes 64, issue 3, s. 155-159.
19. STEVENSON, Paul. MATTHEWS, Allan. PVD equipment design: concepts for increased production throughput. *Surface and Coatings Technology*. 1995, Volumes 74-75, Part 2, s. 770-780.
20. ROTHER, B. EBERBACH, G. GABRIEL, H.M. Substrate-rotation systems and productivity of industrial PVD processes. *Surface and Coatings Technology*. 1999, volumes 86-87, Part 1, s. 694-698.
21. Ion implantation In *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 6 July 2006, 7 March 2010 [cit. 29. března 2010]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Ion\\_implantation](http://en.wikipedia.org/wiki/Ion_implantation)>.
22. CASE TECHNOLOGY, INC<sup>®</sup>. Ipswich, Massachusetts, USA. *The Ion Source*. [online]. 6/6/99 [cit. 13. března 2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.casetechnology.com/implanter/source.html>>.
23. ULKER, Hans K. Optical coatings deposited by ion and plasma PVD processes. *Surface and Coatings Technology*. 12. března. 1999, 112, s. 250-256. ISSN 0257-8972.
24. MATTOX, Donald M. *Product Finishing online* [online]. 2009 [cit. 13. března 2010]. Vacuum Deposition Processes. Dostupné z WWW: <<http://www.pfonline.com/articles/069901.html>>.
25. VALTER, Jan. VYSKOČIL, Jiří. Plazmové povlakování. *MM - Průmyslové spektrum*. 5/2000, č. 5, s. 18-19. ISSN 1212-2572.
26. SHM, s. r. o. Šumperk. *PVD technologie SHM*. [online]. 2007, [cit. 14. března 2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.shm-cz.cz/cs/technicke-informace/pvd-technologie-shm>>.
27. MEMS AND NANOTECHNOLOGY EXCHANGE. Virginia, USA [online]. 25.8.2009 [cit. 11. dubna 2010]. *Deposition Processes*. Dostupné z WWW: <<http://www.memsnet.org/mems/processes/deposition.html>>.
28. GHOSE, J. *Manufacturing Processes: Theory of Metal Cutting & Machine Tools*. Lecture notes. [online]. [cit. 20. dubna 2010]. Dostupné na WWW: <<http://www.scribd.com/doc/7106865/Chip-Formation-and-Tool-Life>>.
29. ŠÍMA, Michal. ZINDULKA, Ondřej. Měření vlastností povlaků na nástrojích. *MM - Průmyslové spektrum*. 6/2004, č. 6, s. 30-31. ISSN 1212-2572.

30. SAHIN, Y. KOK, M. CELIK, H. Tool wear and surface roughness of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle-reinforced aluminium alloy composites. *Journal of material processing technology*. 28 June 2002, n. 128, s. 280-291. ISSN 0924-0136.
31. BANH, T. L. PHAN, Q. T. NGUYEN, D. B. Wear Mechanisms of PVD Coated HSS Endmills Used to Machine 1045 Hardened Steel. *AZojomo: Journal of materials online* [online]. September 2005, volume 1, [cit. 13. dubna 2010]. Dostupný z WWW: <<http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=3000>>.
32. ABHIJEET S, More. WENPING, Jiang. W.D., Brown. Tool wear machining performance of cBN-TiN coated carbide inserts and PCBN compact inserts in turning AISI 4340 hardened steel. *Journal of material processing technology*. 28 June 2006, n. 180, s. 253-262. ISSN 0924-0136
33. HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno: CCB spol. s. r. o., 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
34. ROBERT BOSCH GmbH, Stuttgart. *Welcome to the Historical Communications*. [online]. 16.1.2009. [cit. 28. dubna 2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.bosch.com/content/language2/html/2859.htm>>.
35. ROBERT BOSCH GmbH, Stuttgart. *O firmě Bosch v České republice*. [online]. 16.1.2009. [cit. 28. dubna 2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.bosch.cz/content/language1/html/867.htm>>.
36. KOMET Group, Besigheim, Germany. *History*. [online]. 1998 [cit. 16. dubna 2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.kometgroup.com/en/navigation-top/komet-group/history.html>>.
37. MALLE Klaus. Specialista pro vývrty a závit. *MM - Průmyslové spektrum*. 4/2002, č.4, s. 72. ISSN 1212-2572.
38. KENNAMETAL Inc. Latrobe, Pennsylvania, USA. *End Mills. High-Performance carbide Drills*. [online]. 11.7.2006 [cit. 31. března 2010]. Dostupné z WWW: <[http://www.kennametal.com/images/pdf/products\\_services/metalworking/Hanita\\_metric\\_catalog\\_complete.pdf](http://www.kennametal.com/images/pdf/products_services/metalworking/Hanita_metric_catalog_complete.pdf)>.
39. KENNAMETAL Inc. Latrobe, Pennsylvania, USA. *History*. [online]. 1999 [cit. 31. března 2010]. Dostupné z WWW: <[http://www.kennametal.com/en-US/company\\_profile/history\\_page.jhtml](http://www.kennametal.com/en-US/company_profile/history_page.jhtml)>.
40. LISS a.s., *povlakovací centrum PLATIT*. Firemní prezentace Liss a.s. Rožnov pod Radhoštěm.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A, B, C, O	-	Výpočtové body při frézování vnitřních závitů
$A_e$	$\text{mm}^2$	Plocha kruhu $D_z$
$C_b$	-	koeficient kapacity výrobní dávky
CL	mm	Parametr frézování vnitřních závitů
$C_T$	-	Konstanta
$d_1$	mm	Průměr vnitřního závitu
$D_f$	mm	Průměr frézy
$d_s$	mm	Průměr satelitů
$D_z$	mm	Průměr základny
f	-	Koeficient tření
$f_z$	mm	Posuv na zub
KM	mm	Délka od ostří nástroje po maximální hodnotu KT
KT	mm	Maximální hloubka výmolu na čele
Is	mm	Výška jednoho satelitu
m	-	Exponent- směrnice přímky
n	ks	Počet satelitů
$n_f$	$\text{min}^{-1}$	Otáčky závitové frézy
$n_o$	$\text{min}^{-1}$	Otáčky
$n_s$	-	Počet možných ostření nástroje
Re	mm	Poloměr frézy
Ri, Ro	mm	Poloměry vnitřního závitu
T	min	Aritmetický průměr trvanlivostí
$T_j$	min	Jednotlivé trvanlivosti
VB	mm	Opotřebenění na hřbetě
$v_c$	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	Řezná rychlost
$v_f$	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Rychlost posuvu
$v_{f1}$	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Rychlost posuvu ve středu nástroje
x	mm	Posun nástroje
z	-	Počet břitů
$\alpha$	°	Úhel přímky
$\beta, \sigma$	°	Úhly při vnitřním frézování

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1	Frézovaný Závit M18x1,5 ve vývodu vysokotlakého zásobníku Bosch
Příloha 2	Frézovaný Závit M24x1,5 ve vývodu vysokotlakého zásobníku Bosch
Příloha 3	Závitovací fréza M16x1,5
Příloha 4	Polokvantitativní disperzní analýza povrchu prvního nástroje- Povlak TiCN
Příloha 5	Polokvantitativní disperzní analýza povrchu třetího nástroje- Povlak TiCN
Příloha 6	Polokvantitativní disperzní analýza povrchu čtvrtého nástroje- základní substrát
Příloha 7	Polokvantitativní disperzní analýza povrchu čtvrtého nástroje- povlak TiAlCrN
Příloha 8	Polokvantitativní disperzní analýza povrchu pátého nástroje- povlak TiAlN

