



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# MONOLITNÍ FRÉZOVACÍ NÁSTROJE S PVD POVLAKY A JEJICH VYUŽITÍ

MONOLITHIC MILLING TOOLS WITH PVD COATINGS AND THEIR USE

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Ševčík

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

BRNO 2016

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Jan Ševčík**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2015/16

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 bakalářské práce:

## **Monolitní frézovací nástroje s PVD povlaky a jejich využití**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Bakalářská práce je zaměřena na rozbor metody frézování, charakteristiku slinutých karbidů a základních povlakovacích metod. Další část práce je zaměřená na PVD povlaky nanášené na monolitní frézovací nástroje.

### **Cíle bakalářské práce:**

Úvod

1. Charakteristika metody frézování
2. Charakteristika slinutých karbidů
3. Charakteristika metody PVD
4. Monolitní frézovací nástroje s PVD povlaky a jejich využití pro praxi

Závěr

### **Seznam literatury:**

PTÁČEK,L.a kol.. Nauka o materiálu I. 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM,2002. 392 s. ISBN: 80-7204-283-1.

FOREJT,M.,PÍŠKA,M. Teorie obrábění,tváření a nástroje. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM,2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.

HUMÁR,A. Materiály pro řezné nástroje. 1.vyd. Praha: MM publishing, s.r.o.,2008. 235s. ISBN 978-8-254-2250-2.

MATTOX,M. Handbook of Physical Vapour Deposition (PVD) Processing. 2.vyd.Albuquerque (USA): APR,2010. 917s. ISBN: 978-0-8155-2037-5.



Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Předložená bakalářská práce se zabývá monolitními frézovacími nástroji ze slinutého karbidu, na jejichž povrch je nanášena tenká vrstva povlaku. Práce nejprve obecně popisuje metodu frézování, základní rozdělení frézovacích operací a frézovacích nástrojů, silový rozbor zatížení nástroje. Následně je rozebrána problematika slinutých karbidů, jejich výroba, vlastnosti a jejich rozdělení do skupin. Poté je popsána charakteristika povlakovacích metod, především metoda PVD, a jejich modifikací. Poslední část je věnována nabídkám výrobců povlakovaných monolitních fréz. Je zde uvedeno několik vybraných nástrojů a popsány jejich vlastnosti, geometrie a vhodnost použití.

### Klíčová slova

frézování, slinutý karbid, PVD povlak, monolitní frézovací nástroj

## ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the monolithic milling tools carbide on the surface which is deposited by a thin layer of rating on. First of all, the thesis describes the method of milling, the basic division of milling operations and milling tools, power analysis tool load. Then, it is analyzed problems of cemented carbides, its production, properties and dividing into groups. After that it is described characteristic of coating methods, especially the PVD method, and its modifications. The last part is devoted to producer's offers of coated monolithic mills. There are introduced few selected tools and described its characteristics, geometry and application suitability.

### Key words

milling, sinter carbide, PVD coating, monolithic milling tool

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠEVČÍK, Jan. *Monolitní frézovací nástroje s PVD povlaky a jejich využití*. Brno 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 49 s. Vedoucí práce Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

### **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Monolitní frézovací nástroje s PVD povlaky a jejich využití** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Jan Ševčík

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Aleši Jarošovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu a umožnění vysokoškolského studia.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 CHARAKTERISTIKA METODY FRÉZOVÁNÍ.....	9
1.1 Kinematika frézování .....	9
1.2 Rozdělení frézování .....	9
1.3 Průřez třísky .....	11
1.4 Řezné síly.....	13
1.5 Rozdělení frézovacích nástrojů.....	14
2 CHARAKTERISTIKA SLINUTÝCH KARBIDŮ .....	17
2.1 Historie.....	17
2.2 Rozdělení SK .....	18
2.3 Výroba SK .....	19
2.4 Vlastnosti SK .....	24
2.5 Nepovlakované a povlakované SK .....	29
3 CHARAKTERISTIKA METODY PVD.....	30
3.1 Historie.....	30
3.2 Rozdělení povlaků .....	30
3.3 Metody nanášení povlaků .....	32
3.3.1 PVD (Physical Vapour Deposition).....	32
3.3.2 CVD (Chemical Vapor Deposition) .....	36
3.4 Vlastnosti povlaků .....	37
4 MONOLITNÍ FRÉZOVACÍ NÁSTROJE S PVD POVLAKY A JEJICH VYUŽITÍ PRO PRAXI.....	39
4.1 ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE.....	39
4.2 SECO .....	41
4.3 DORMER PRAMET .....	43
ZÁVĚR .....	45
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	46
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	49

## ÚVOD

Metoda frézování je jedním z nejrozšířenějších způsobů třískového obrábění. První frézky, se svými nástroji - frézami, byly zhotoveny koncem 18. stol. a od té doby prošly značným vývojem. Frézy se vyvíjely, jak z pohledu změny jejich geometrie ostří, způsobu upínání ke stroji, tak i z pohledu jejich materiálového složení.

S neustálým rozvojem nových konstrukčních materiálů s vysokými požadavky na pevnost, tvrdost apod. bylo potřeba vyvíjet také materiály nástrojů, které je budou schopny efektivně obrábět. V dnešní době jsou k tomuto účelu používány zejména nástroje ze slinutých karbidů, cermetů, keramiky, diamantu či kubického nitridu boru. V případě slinutých karbidů došlo za několik desítek let k velkému vývoji těchto materiálů a k jejich rozšíření do různých oblastí použití. Jelikož slinutý karbid v mnoha ohledech předčí vlastnosti rychlořezné oceli, lze se s nástroji zhotovenými z tohoto materiálu setkávat v praxi čím dál častěji.

Dlouhodobý výzkum v oblasti povlakování přispěl ke značnému zdokonalení vlastností povlaků. Došlo také k vývoji nových povlaků a povlakovacích metod, čímž se rozšířila oblast jejich použití. Většina moderních nástrojů ze slinutého karbidu je po jejich výrobě povlakována. Povlakováním lze několikanásobně prodloužit trvanlivost nástroje a zlepšit jeho vlastnosti, jako jsou např. tvrdost, odolnost vůči opotřebení, chemickou či tepelnou stabilitu. Při obráběcím procesu pak lze dosahovat vyšších řezných a posuvových rychlostí při zachování požadované jakosti obrobeného povrchu. Současné povlaky se mohou skládat z několika vrstev, přičemž každá z vrstev dodává finálnímu povlaku specifické vlastnosti.

V dnešní době se na trhu objevuje nepřehledné množství nástrojů z povlakovaných slinutých karbidů, které jsou vyvinuty téměř pro každou konkrétní aplikaci. Liší se od sebe druhem povlaků, typem substrátu, tloušťkou povlaku, kombinací vrstev, metodou nanášení povlaku atd.

## 1 CHARAKTERISTIKA METODY FRÉZOVÁNÍ

Frézování je operace třískového obrábění, při níž dochází k odebrání materiálu z obrobku rotačním vícezubým nástrojem – frézou. Břity frézy se nachází na povrchu válcové, kuželové nebo jiné rotační plochy, jejíž osa se shoduje s osou otáčení nástroje. Při obrábění dochází jednotlivými zuby nástroje k přerušovanému odběru třísek materiálu, přičemž je snahou zajistit, aby docházelo k záběru více zubů současně. Omezí se tak vznik nežádoucích rázů a vibrací. Frézováním lze vyrobit rovinné či tvarové plochy, drážky, zahloubení, vybrání, osazení, ozubení, vnější a vnitřní závity aj. [1,2].

### 1.1 Kinematika frézování

Frézovací nástroj koná vždy pohyb hlavní – rotační, obrobek většinou vedlejší - posuvový, buď přímočarý nebo rotační. U okružního a planetového frézování koná posuvový rotační pohyb buď obrobek nebo nástroj. Hlavní pohyb je definován řeznou rychlostí  $v_c$  určenou vztahem [2]:

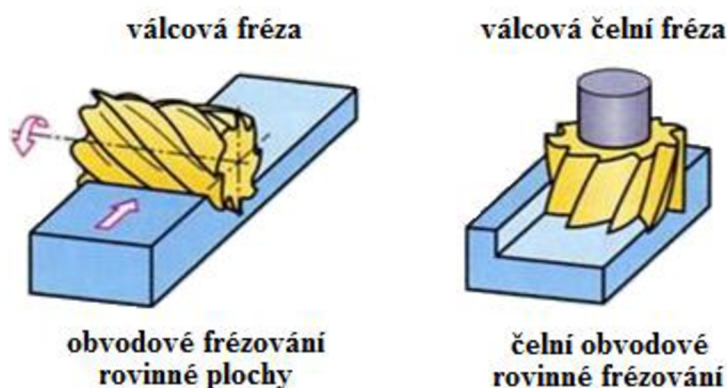
$$v_c = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}. \quad (1.1)$$

Vedlejší pohyb je definován posuvovou rychlostí  $v_f$  a určen vztahem [2]:

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}. \quad (1.2)$$

### 1.2 Rozdělení frézování

Podle polohy osy nástroje vůči obráběné ploše se frézování dělí na válcové (osa je rovnoběžná s obráběnou plochou) a čelní (osa je kolmá) – obr. 1.1 [2].



Obr. 1.1 Typy frézování [3].

### Válcové frézování

Při válcovém frézování se materiál odebrá obvodem nástroje, zuby jsou umístěny pouze na obvodu frézy. Podle smyslu otáčení nástroje vzhledem k posuvu obrobku dělíme frézování na sousledné a nesousledné (obr. 1.2) [2,4].

### Sousledné frézování

Je-li smysl otáčení nástroje shodný s posuvem obrobku, jedná se o sousledné frézování. Při vnikání nástroje do obrobku je tloušťka odebírané třísky maximální, postupně se snižuje až na nulovou hodnotu. Řezná síla působí směrem dolů a obrobek je tedy přitlačován ke stolu stroje.

#### Výhody sousledného frézování [2,4]:

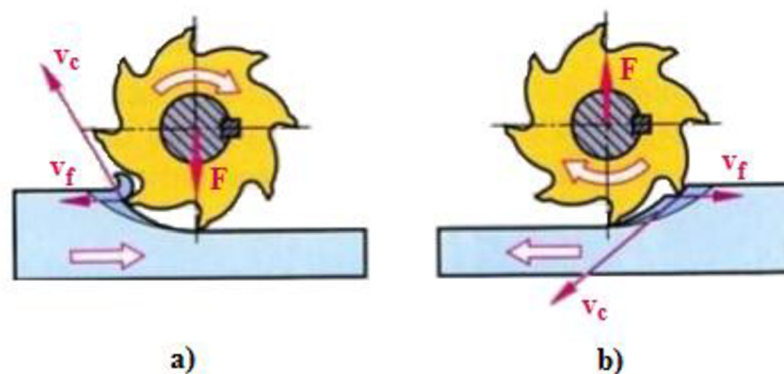
- možnost použít vyšších řezných rychlostí a posuvů z důvodu vyšší trvanlivosti břitů,
- použití jednodušších upínacích přípravků – obrobek je přitlačován řeznou silou ke stolu,
- obrobená plocha dosahuje menší drsnosti,
- potřeba menších řezných výkonů,
- menší pravděpodobnost vzniku kmitání,
- menší tendence k tvoření nárůstku.

### Nesousledné frézování

Je-li smysl otáčení nástroje opačný než posuv obrobku, jedná se o nesousledné frézování. Při obrábění se tloušťka třísky zvyšuje z nulové hodnoty na maximální. Řezná síla působí směrem nahoru a obrobek je odtahován od stolu stroje.

#### Výhody nesousledného frézování [2,4]:

- posuvový šroub a matice stroje se méně opotřebovává, není požadavek na vymezování jejich vůle,
- nehrozí vtahování nástroje do obrobku a nežádoucímu zvyšování posuvu a velikosti třísky,
- trvanlivost nástroje nezávisí tolik na povrchu obrobku, zuby vnikají přes povrch jen při jejich vstupu do řezu,
- nehrozí vznik velkých rázů při vstupu zubů do záběru,
- počáteční záběr zubů nezávisí na hloubce řezu.

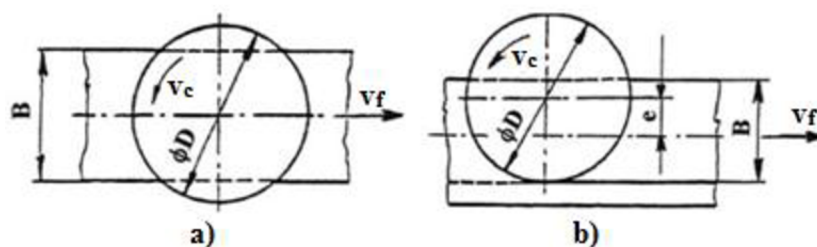


Obr. 1.2 Válcové frézování: a) nesousledné, b) sousledné [3].



### Čelní frézování

Používají se čelní frézy mající břity na čele i obvodě nástroje. Dochází současně k souslednému i nesouslednému frézování. V závislosti na poloze osy otáčení frézy a obráběné plochy, lze rozdělit frézování na symetrické – osa nástroje prochází středem frézované plochy, a nesymetrické – osa nástroje prochází mimo střed frézované plochy (obr. 1.3) [2,4].



Obr. 1.3 Čelní frézování: a) symetrické, b) nesymetrické [4].

### 1.3 Průřez třísky

Průřez třísky není během obrábění konstantní, mění se její tloušťka. Při válcovém (obr. 1.4) sousledném frézování je zpočátku tloušťka odebírané tloušťky maximální, postupně se pak snižuje až na nulovou hodnotu. Při nesousledném frézování se tloušťka třísky zvyšuje z nulové hodnoty na maximální. Jmenovitou tloušťku třísky  $h_i$  v kterékoliv fázi odebrání lze určit vztahem [2]:

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm]}. \quad (1.3)$$

Úhel posuvového pohybu  $\varphi_i$  se v závislosti na poloze zubu mění, u fréz se šikmými zuby nebo zuby ve šroubovici se mění podél jejich ostří [2].

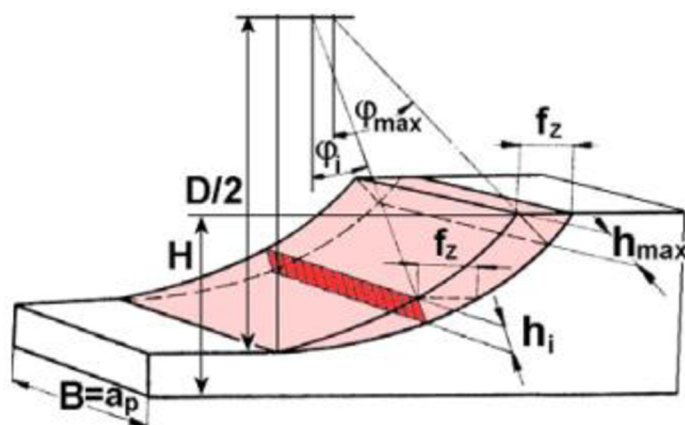
Pro jmenovitý průřez třísky při poloze zubu  $i$  platí vztah (1.4) [2], jejíž maximální hodnota bude při  $\varphi_i = \varphi_{max}$  určená vztahem (1.5) [2],

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (1.4)$$

$$A_{Dmax} = a_p \cdot h_{max} = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_{max} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1.5)$$

přičemž platí:

$$\sin \varphi_{max} = \frac{2}{D} \sqrt{D \cdot H - H^2} \text{ [-]}. \quad (1.6)$$



Obr. 1.4 Průřez třísky při válcovém frézování [2].

Při čelním frézování (obr. 1.5) je tloušťka třísky ovlivněna úhlem posuvového pohybu  $\varphi_i$  ale i úhlem nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$ . Pro  $\kappa_r=90^\circ$  se její okamžitá hodnota určí ze vztahu [2]:

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \text{ [mm]}. \quad (1.7)$$

Jmenovitá šířka třísky  $b_i$  je pro kterékoliv  $\varphi_i$  konstantní a určí se ze vztahu [2]:

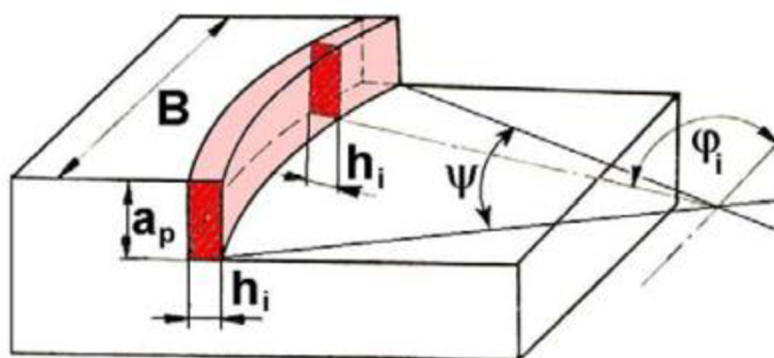
$$b_i = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \text{ [mm]}. \quad (1.8)$$

Jmenovitý průřez třísky  $A_{Di}$  při  $\kappa_r=90^\circ$  je [2]:

$$A_{Di} = b_i \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm}^2\text{]}. \quad (1.9)$$

Maximální jmenovitý průřez třísky nastává při  $\varphi_i=90^\circ$ , pak tedy jeho hodnota bude [2]:

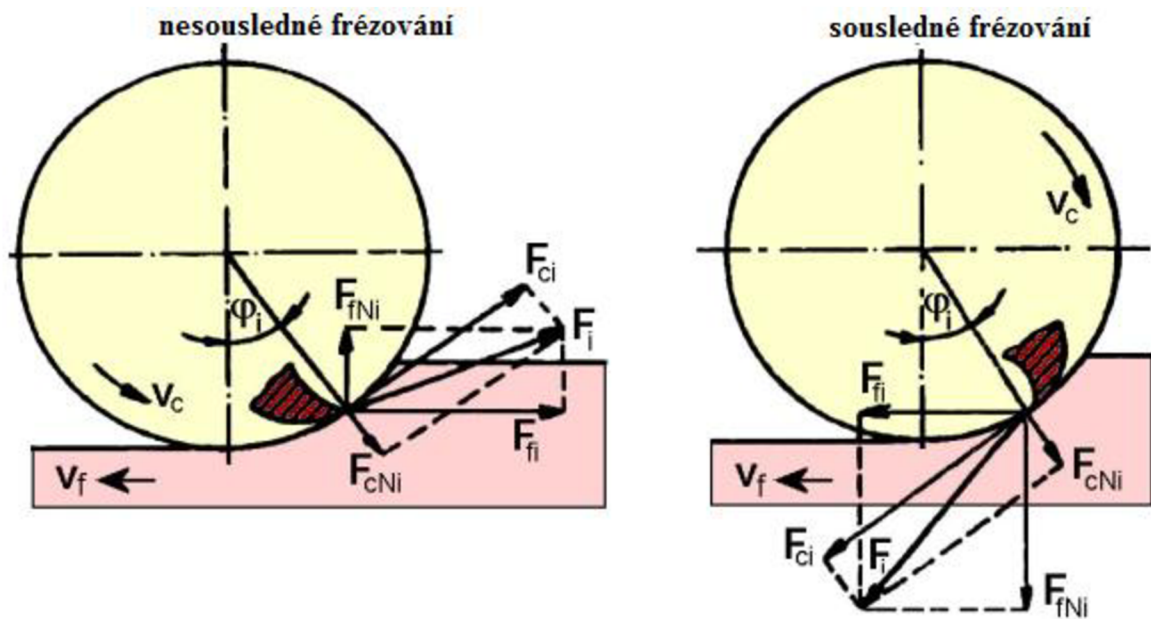
$$A_{Dmax} = a_p \cdot f_z \text{ [mm}^2\text{]}. \quad (1.10)$$



Obr. 1.5 Průřez třísky při čelním frézování. [2]

### 1.4 Řezné síly

Při rozboru řezných sil (obr. 1.6) při frézování se vychází ze sil působících na jeden břit, který se nachází v poloze určené úhlem  $\varphi_i$ . Při frézování válcovou frézou s přímými zuby je celková řezná síla  $F_i$ , působící na jeden břit, rozložena na složky  $F_{ci}$  a  $F_{cNi}$ , respektive na  $F_{fi}$  a  $F_{fNi}$  [2,4].



Obr. 1.6 Řezné síly válcové frézy působící na břit nástroje [2].

Řezná síla  $F_{ci}$  se určí pomocí měrné řezné síly  $k_{ci}$  a průřezu třísky  $A_{Di}$ : [2]:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [N]}, \quad (1.11)$$

kde:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \text{ [MPa]}, \quad (1.12)$$

pak:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \text{ [N]}. \quad (1.13)$$

Při čelním frézování se řezná síla  $F_{ci}$  určí analogicky [2]:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [N]}, \quad (1.11)$$

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \text{ [MPa]}, \quad (1.12)$$

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sin^x \varphi_i \text{ [N]}. \quad (1.13)$$

Ve většině případů se frézy vyrábí jako vícebřité nástroje, při frézování pak dochází k záběru více břitů současně. Výsledné síly potom závisí na množství zabírajících břitů a na jejich okamžité poloze vzhledem k obrobku. Pro stanovení potřebného výkonu a krouticího momentu vřetena frézky je důležité určit celkovou řeznou sílu  $F_c$ . Pro válcové frézování se vypočítá podle vztahu [2]:

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \text{ [N]}, \quad (1.14)$$

pro čelní frézování podle vztahu [2]:

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \text{ [N]}. \quad (1.15)$$

Počet břitů v záběru se pro válcové frézování stanoví podle vztahu [2]:

$$n_z = \frac{\varphi_{\max}}{360} \cdot z \text{ [-]}, \quad (1.16)$$

pro čelní frézování podle vztahu [2]:

$$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z \text{ [-]}, \quad (1.17)$$

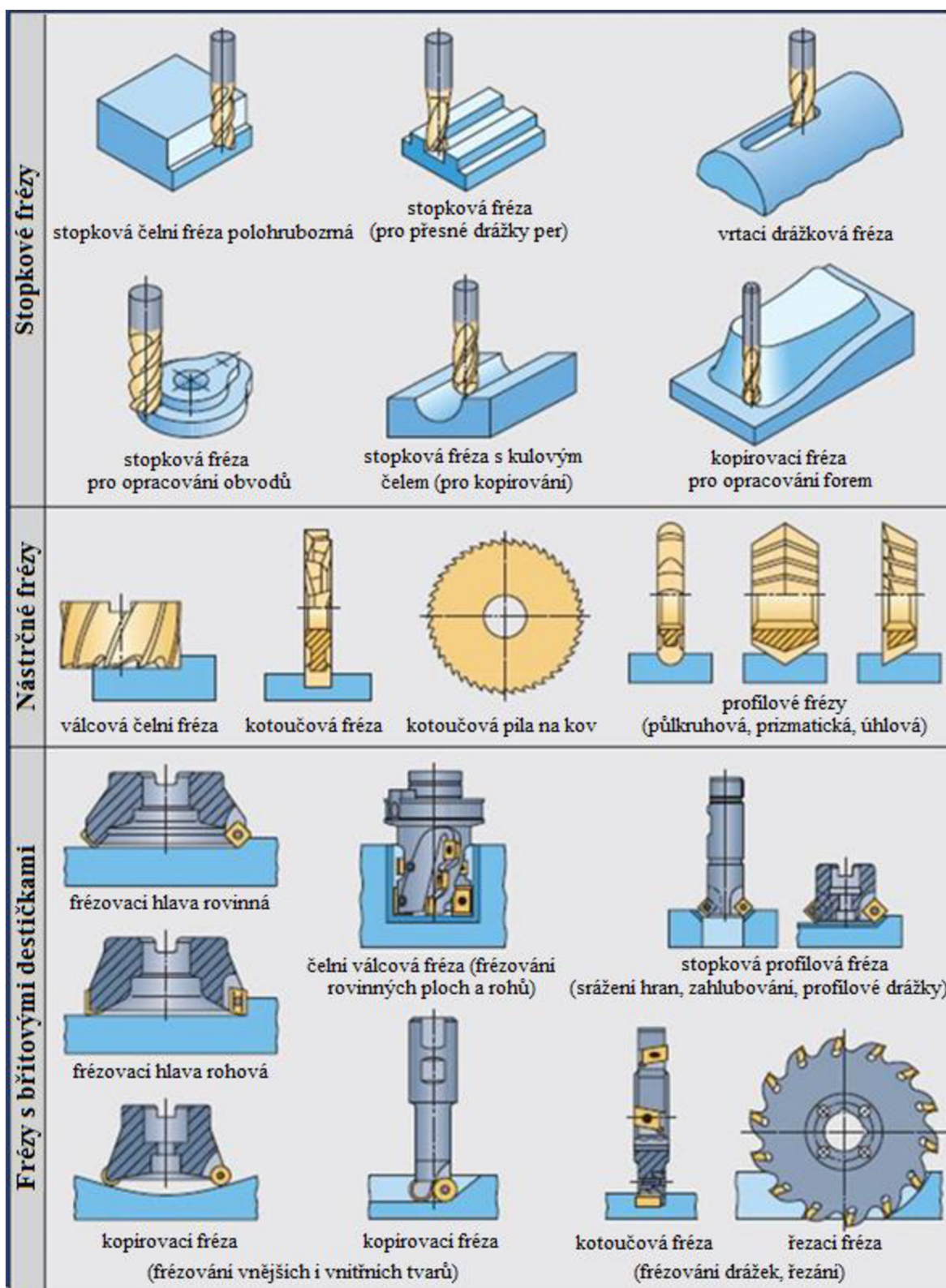
přičemž se výsledná hodnota zaokrouhluje vždy nahoru na celé číslo [2].

### 1.5 Rozdělení frézovacích nástrojů

Jelikož je ve strojírenství technologie frézování rozšířena do mnoha obráběcích aplikací, používá se mnoho typů fréz (obr. 1.7). Lze je rozčlenit do několika skupin podle různých hledisek [2,5,6]:

- a) Podle umístění břitů
  - válcové frézy (břity na válcové ploše)
  - čelní frézy (břity na čelní ploše)
  - válcové čelní (břity na čelní i válcové ploše)
  - kotoučové (břity na válcové ploše a obou čelních plochách frézy)
  - kuželové (břity na jedné nebo dvou kuželových plochách)
  - tvarové (břity na různých tvarových plochách)
- b) Podle provedení zubů
  - frézy s frézovanými zuby (čelo i hřbet zubů tvoří rovinné plochy, ostření se provádí na hřbetu zubu)
  - frézy s podsoustruženými zuby (hřbet zubů je vytvořen částí Archimedovy spirály, čelo zubů tvoří rovinné plochy, ostření se provádí na čele zubu)

- c) Podle průběhu ostří zubů:
- frézy s přímými zuby (zuby nástroje jsou situovány rovnoběžně s osou nástroje),
  - frézy se zuby ve šroubovici (v pravotočivé či levotočivé šroubovici).
- d) Podle nástrojového materiálu břitů:
- rychlořezná ocel,
  - slinutý karbid,
  - cermet,
  - řezná keramika,
  - kubický nitrid boru,
  - polykrystalický diamant.
- e) Podle způsobu upínání:
- frézy nástrčné (upínací otvor s drážkou pro pero - přenos krouticího momentu),
  - frézy stopkové (stopka válcová či kuželová - upínací Morse, metrický nebo ISO kužel, tepelné či hydraulické upínače, kleštiny).
- f) Podle geometrického tvaru funkční části:
- válcové,
  - kotoučové,
  - úhlové,
  - drážkovací,
  - kopírovací,
  - rádiusové,
  - na výrobu ozubení.
- g) Podle konstrukce nástroje:
- frézy monolitní (těleso i břity jsou z jednoho materiálu),
  - frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami (mechanicky upevněné k tělesu frézy).



Obr. 1.7 Různé typy frézovacích nástrojů [7].

## 2 CHARAKTERISTIKA SLINUTÝCH KARBIDŮ

Slinuté karbidy jsou výrobky práškové metalurgie. Jsou tvořeny směsí jemných a tvrdých částic karbidů a pojiva. Jako základní prvek je využíván karbid wolframu (WC), další příměsi mohou být např. karbid titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a chromu ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ). Jako pojivo se nejčastěji používá kobalt (Co), který dodává materiálu houževnatost. Poměr a druh jednotlivých karbidů a pojiva pak stanovuje vlastnosti SK [8,9,10].

Slinuté karbidy se vyznačují vysokou pevností, odolností vůči opotřebení a chemickou stálostí. Disponují také vyšší tvrdostí než rychlořezné oceli a dokážou si svoji tvrdost zachovat i při vyšších teplotách. Díky svým vlastnostem se hojně využívají k výrobě obráběcích nástrojů [8,9,10].

### 2.1 Historie

Za počátkem objevu karbidů stojí vynález elektrické obloukové pece, díky které bylo možno dosáhnout vyšších teplot. Na přelomu 19. a 20. stol. se spousta vynálezců a inženýrů snažila pomocí obloukové pece vyrobit umělý diamant. Díky svým nezdařeným pokusům objevili řadu látek s vysokou teplotou tavení, např. karbidy, boridy či silicidy. Nově objevený karbid wolframu byl svými vlastnostmi velmi podobný kovům a přitom vykazoval vysokou tvrdost. Poprvé byl karbid wolframu komerčně využit pro výrobu drátových průvlaků. Tehdejší nedokonalou znalostí výroby a zpracování karbidů byly průvlakky velice křehké a tedy pro průmysl nepoužitelné. Počátkem 20. stol. bylo z wolframového prášku úspěšně vyrobeno žhavicí vlákno. Započal se tímto rozvoj vědního oboru práškové metalurgie, který řešil problémy výroby řezných materiálů na bázi karbidu wolframu. K významným průkopníkům práškové metalurgie patří irský vědec Karl Schröter, který učinil pokus, kdy smíchal práškový wolfram s uhlíkem, následně směs ohřál a získal tak práškový karbid wolframu. Zjistil také, že když se do směsi přidá malé množství práškového kovu z podskupiny Fe-Co-Ni, výrobek se vylisuje, ohřeje se ve vodíkové atmosféře nad  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ , je pak možné dosáhnout rovnoměrného rozložení tvrdých zrn v materiálu. Výrobek pak také vykazuje vysokou tvrdost, pevnost a nízkou pórovitost. Následně bylo zjištěno, že jako pojící kov je nejvhodnější použít kobalt [8].

Díky svým vlastnostem se tento nový materiál začal hojně užívat i pro výrobu řezných nástrojů. Ve srovnání s nástrojovými ocelmi byl nový materiál dražší, ale na druhou stranu umožňoval použití vyšších řezných rychlostí. Průmyslový vzestup výroby slinutého karbidu typu WC-Co zajistila německá firma Krupp, která jej vyráběla pod názvem WIDIA. S postupem času se zjistilo, že velikost zrna karbidické části razantně ovlivňuje vlastnosti SK. Snahou mnoha vědců tedy bylo vyvinout a vyrobit materiál s co nejvíce jemnou a rovnoměrnou strukturou. V období 2. světové války byl nedostatek wolframových materiálů. To mělo za příčinu vývoj nových SK bez obsahu wolframu, cermetů [8].



## 2.2 Rozdělení SK

Druhů slinutých karbidů je nespočetné množství, každý z nich má jiné složení, vlastnosti a tedy i rozdílné využití. Pro práci s nimi je třeba rozřadit a označit. Podle normy ČSN ISO 513 se slinuté karbidy značí [8]:

HW – nepovlakované slinuté karbidy s obsahem karbidu wolframu WC a zrnitostí větší než 1  $\mu\text{m}$ ,

HF – nepovlakované slinuté karbidy s obsahem karbidu wolframu WC a zrnitostí menší než 1  $\mu\text{m}$ ,

HC – povlakované slinuté karbidy.

Podle použití se SK dělí do šesti hlavních skupin - viz. tab. 2.1. Podskupiny se označují písmenem hlavní skupiny a číslem, které udává jejich vlastnosti. Přitom platí, že se vzrůstajícím číslem, roste podíl pojícího kovu a tím i houževnatost a pevnost v ohybu, klesá ale tvrdost a otěruvzdornost. Z hlediska složení se mohou nepovlakované karbidy označovat jako jednodobidové (K), dvojkobidové (P) a vícekobidové (M) [8,9].

Tab. 2.1 - značení slinutých karbidů [8,9].

skupina	podskupiny	chemické složení	Obráběné materiály
<b>P</b>	P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50	WC (30-82)% + TiC (8-64)% + Co (5-17)% + (TaC.NbC)	uhlíkové oceli, slitinové oceli, feritické korozivzdorné oceli
<b>M</b>	M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40	WC (79-84)% + TiC (5-10)% + TaC.NbC (4-7)% + Co (6-15)%	lité oceli, austenitické a austeniticko-feritické korozivzdorné oceli, tvárné litiny, žáruvzdorné a nemagnetické oceli, slitiny Ti
<b>K</b>	K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40	WC (87-92)% + Co (4-12)% + (TaC.NbC)	šedé litiny, tvárné a temperované litiny, nezelezné slitiny, nekovové materiály
<b>N</b>	N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30		nezelezné kovy, slitiny Al a Cu, nekovové materiály
<b>S</b>	S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30		Speciální žáruvzdorné slitiny na bázi Ni, Co, Fe, Ti, titan a jeho slitiny
<b>H</b>	H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30		zušlechtnuté oceli s pevností nad 1500 Mpa, kalené oceli s tvrdostí nad 48 HRC



Při obrábění dochází vlivem tření v kontaktu řezného nástroje a obrobku ke zvýšení teploty. To má např. u nástrojových ocelí, ale i u SK za následek změnu tvrdosti řezného nástroje. Chemickým složením SK lze ovlivnit zachování tvrdosti materiálu řezného nástroje i za vyšších teplot [8].

Jestliže se při přípravě slinutého karbidu přidá do směsi některý z kovů (V, Nb, Ta, Ti, Hf) či karbidů (VC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, NbC, TaC, Zr/HfC), zpomalí se tím růst zrna a zrno se zjemní. Celková tvrdost a pevnost slinutého karbidu se zvýší, kdežto houževnatost se sníží [8].

Volba slinutého karbidu řezného nástroje se odvíjí od druhu materiálu obrobku, jeho tvrdosti a od velikosti rázů vznikajících při obrábění. Vhodná volba SK razantně ovlivňuje výrobní čas a náklady.

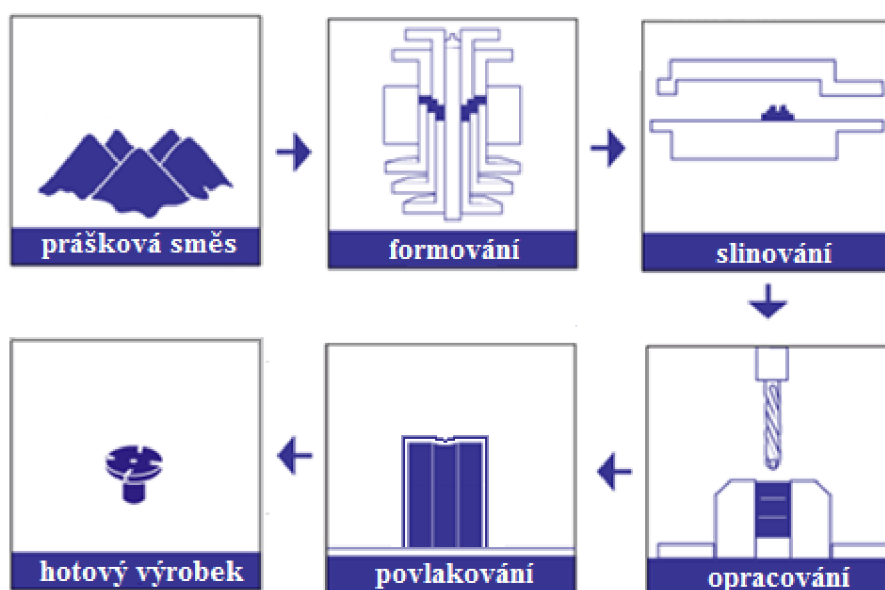
### 2.3 Výroba SK

Výroba SK je prováděna technologií práškové metalurgie. Tato technologie zahrnuje přípravu prášku tvrdých karbidických částic a kovových pojiv, jejich smíšením ve stanovených poměrech, lisováním do požadovaných tvarů a následným slinováním.

Ve výrobním procesu je kladen důraz na složení a strukturu materiálu, na správný postup výroby při definovaných podmínkách a následnou kontrolu, zda výsledný SK splňuje požadované vlastnosti.

Celý proces výroby SK se skládá z těchto operací (obr. 2.1) [11]:

- výroba a příprava prášků,
- formování polotovarů,
- slinování,
- opracování polotovaru do požadovaného tvaru,
- povlakování – u povlakovaných SK.



Obr. 2.1 Proces výroby slinutých karbidů [11].

### Výroba a příprava prášků:

Směs určená k výrobě SK je složena z kovového pojiva a prášku různých karbidů. Tento prášek lze získat např. karbidizací pomocí pevného či plynného uhlíku, chemickým vylučováním z nauhličených feroslitin, usazováním z plynné fáze či při elektrolýze odpovídajících solí [8].

Nejčastější surovina k přípravě SK je wolfram. Čistý práškový wolfram je vyráběn z oxidu wolframového ( $WO_3$ ) pomocí redukce v redukční peci. Smíchá se se sazemi, kterými je za vysokých teplot nauhličován. Teplota má v tomto případě rozhodující vliv na velikost zrn karbidového prášku. Při nižší teplotě cca  $1600^\circ C$  se tvoří jemnější zrno, při teplotě nad  $2000^\circ C$  vznikají hrubší zrna. Velikost zrn má vliv na vlastnosti hotového výrobku [8].

Následně se prášky karbidů a pojiva smísí a melou v mlecích zařízeních, nejčastěji v kulových mlýnech. Uvnitř mlýnu se nacházejí mlecí kuličky, které se při otáčení bubnu mlýnu pohybují a způsobují rozmělnění a dokonalé promíchání částic směsi. Mletí lze provádět za sucha nebo za mokra, po kterém se směs musí dokonale vysušit. Záměrem tohoto procesu je vytvoření jemnozrné, homogenní směsi. Zrna karbidů musí být rovnoměrně rozptýlena v celém objemu směsi a pojiví kov je musí dokonale obalovat. Do směsi se často přidávají plastifikátory, které mají při lisování za úkol usnadnit pohyb částic mezi sebou, snížit tření mezi lisovanou směsí a lisovacími nástroji. Přidávají polotovaru také pevnost a napomáhají k zachování tvaru po jeho vyklopení z lisovací formy. Plastifikátory je nutné před slinováním odstranit, aby neznečistili polotovar nežádoucími příměsemi. Provádí se to vysoušením nebo tzv. předslinováním za nízkých teplot. Jako plastifikátory se používají např. kaučuk, parafin, kafr, pryskyřice, nejčastěji v chemicky rozpuštěné formě [8,9].

### Formování polotovarů

Formováním řádně rozmíchané směsi karbidů a pojiva vzniknou polotovary, které mají požadovaný tvar ale nízkou pevnost. Formování se uskutečňuje na formovacích lisech, izostatickým lisováním za studena nebo hydrostatickým lisováním. Další formovací metodou je vytlačování přes trysku, lití či vstřikování do pomocných forem. Nejčastěji se používá oboustranné lisování, při kterém dochází k pohybu dvou lisovníků proti sobě, přičemž lisující směs se nachází mezi nimi. Výhodou této metody je, že dochází k rovnoměrnému zhutnění materiálu v celém objemu. Dále tato metoda umožňuje rychlejší vytahování výlisku z lisu. Lisovací tlaky se pohybují v rozmezí 50- 150 MPa. Lisovaný polotovar musí mít rozměry o něco větší než konečný výrobek, protože při slinování dochází k jeho smrštění až o 20 i více procent [8].

Při **izostatickém lisování za studena** (viz. obr. 2.2) se směs nasype do pružné formy z latexu či silikonového kaučuku. Aby se při samotném lisování do formy nedostala pracovní kapalina, musí se pečlivě uzavřít. Tlak je při lisování vyvíjen buď mechanickým pístem (suchá metoda) a nebo hydraulickým tlakem kapaliny (mokrý metoda). Suchá metoda se využívá především pro tvorbu menších výlisků. Proces začíná vložením formy do tlakové komory, nasypáním prášku do formy, jejím uzavřením a zaplněním prostoru mezi stěnami formy a tlakové komory kapalinou. Pomocí pístu následuje stlačování pružné formy, přičemž dochází ke zvyšování tlaku v kapalině obklopující formu. Po skončení této operace je výlisek vytlačen z formy ven a proces se může opakovat. Výhodou této metody

je možnost její automatizace. Mokrý metoda se používá pro lisování větších součástí a nedá se plně automatizovat. Po nasypání prášku do formy je forma uzavřena, prášek je v ní setřesen a přebytečný vzduch z ní odsán. Forma se umístí do ocelového koše, který se vloží do tlakové komory. Komora se naplní kapalinou a následně se uzavře. Zvýšením tlaku v kapalině dojde ke stlačení formy a k vylisování součásti [8].



Obr. 2.2 Principiální schéma izostatického lisování za studena:

a) suchá metoda; b) mokrá metoda [10,12].

U obou metod je velice důležité dodržet časový průběh lisování - nárůst tlaku, výdrž na stanoveném tlaku, snižování tlaku. Nejcitlivější na rychlost změny tlaku je poslední fáze, při které dochází k oddělování výlisku od formy a uvolňování stlačeného vzduchu. Při vysoké rychlosti snižování tlaku může dojít k nedokonalému oddělení výlisku od formy a k tvorbě trhlin [8].

Metoda **vytlačování** je nejčastěji používána k výrobě monolitních řezných nástrojů kruhového průřezu, které nejsou vhodné pro lisování. Vyrábějí se takto např. monolitní vrtáky či frézy. Lze je vyrábět i s vnitřními kanálky, které slouží k přívodu procesní kapaliny. U této metody se využívá šnekový podavač, který je zcela zaplněn práškem (se zvýšeným obsahem plastifikátoru). Otáčením šneku je prášek dodáván do vytlačovacích lisů, kterými je následně vytlačen do požadovaného tvaru. Vytlačovací tlak je řízen plynule, bez nutnosti přerušování procesu. Délka vytlačeného polotovaru je hlídána optickým čidlem. Po dosažení požadované délky je polotovar odřezán [8].

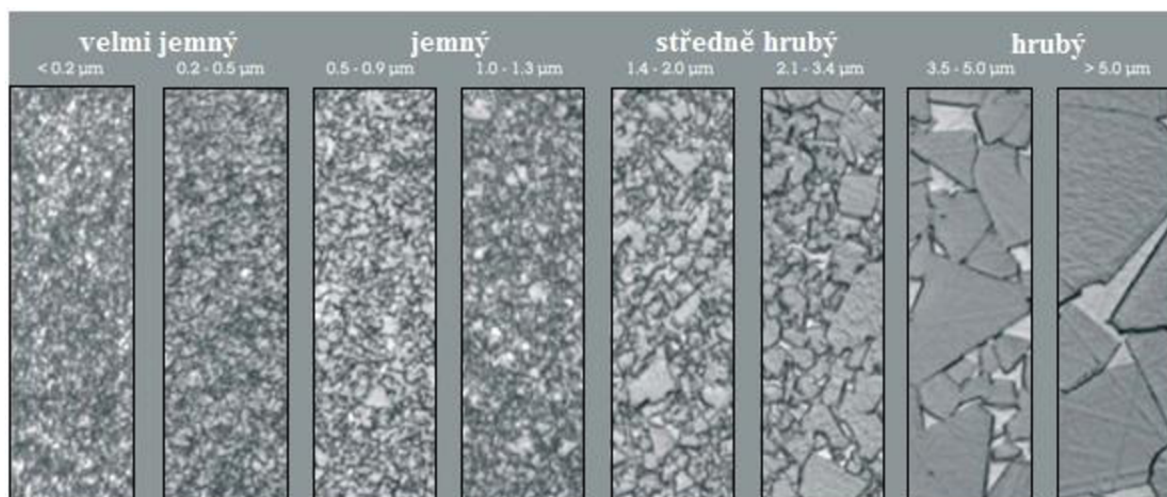
### Slinování

Slinování karbidů je nejkritičtější operace celého výrobního procesu, proto musí být celý proces pečlivě kontrolován. Dochází při něm ke spékání částic prášku a jeho přeměnu do pevného, kompaktního stavu. Především jde o zhutnění materiálu, zvýšení jeho pevnosti a snížení pórovitosti. Slinování se provádí ve speciální slinovací peci (obr. 2.3). Vkládá se do ní vylisovaný výrobek a za řízených podmínek (v atmosféře  $H_2$ ,  $H_2/N_2$ , Ar či ve vakuu) je polotovar ohříván, po skončení slinování i ochlazován [8].



Obr. 2.3 Vakuová slinovací pec HFL 5748-20IQ [13].

Hnací silou slinování a zhutňování je snižování povrchové energie prášku. Čím je prášek jemnější, tím větší je povrch zrn a větší je i akumulovaná povrchová energie. Jemnost prášku má vliv i na výslednou strukturu materiálu (obr. 2.4). Díky jemným zrnům se průběh slinování urychluje a snižuje se teplota začátku smršťování. Vliv mají také inhibitory růstu zrna (VC,  $Cr_3C_2$ , TaC, atd.), které zvyšují teplotu začátku smršťování, snižují rychlost smršťování a snižují bod tavení eutektického pojiva [8].

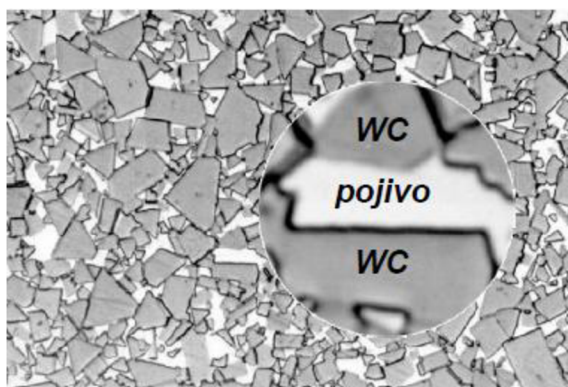


Obr. 2.4 Rozdílná zrnitost struktury slinutých karbidů [14].

Proces slinování probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku, v tzv. předslinování, se materiál zahřívá na teplotu 700-850 °C, při které dochází k odstranění plastifikátoru z prášku. Ve druhém kroku, následuje již konečné slinování materiálu, při kterém dochází k fázovým změnám a fyzikálně-chemickým pochodům. Mezi tvrdými karbidickými zrnky se vytvoří hranice a difúzními procesy se přeskupí jednotlivé složky. Pracovní teplota se nachází nad teplotou vzniku tekuté fáze a podle obsahu jednotlivých prvků se pohybuje v rozmezí 1350-1650 °C [8].



Tvrdé karbidické částice jsou vzájemně sloučeny pojivou fází (obr. 2.5), obsahující zejména kobalt a v malém množství i wolfram, která dodává materiálu houževnatost. Struktura kobaltu je při teplotě nad 418 °C stabilní, tvoří ji plošně středěná kubická mřížka (fcc), po snížení teploty pod 418 °C přechází na hexagonální mřížku (hcp). Díky rozpuštěnému wolframu se kubická mřížka stabilizuje a po ochlazení materiálu se již nemění. V důsledku toho se vytváří velký počet vrstvených chyb. Do pojiva pronikají prvky z tvrdých strukturních složek, přičemž rozpustnost kovových prvků je řízena aktivitami uhlíku a dusíku. Když se slinované těleso bude ochlazovat, začne klesat rozpustnost a prvky N a C reprecipitují na zrnech tvrdé fáze nebo difundují ven mimo materiál [8].



Obr. 2.5 Struktura SK – tvrdá fáze WC, pojivo Co [15].

Jako vzor poslouží **systém WC-Co**, ve kterém dochází k tvorbě slinutého tělesa za přítomnosti tekuté fáze. Proces lze charakterizovat [8]:

- vytvářením skeletu tuhé fáze,
- částečným zhutněním materiálu v zárodku skelné fáze,
- naprostým smáčení tuhé fáze fází tekutou,
- neúplným rozpouštěním těžkovitelných karbidických zrn v tavenině s následnou krystalizací nových tvrdých fází z tvořících se roztoků.

Při teplotách 1150-1300 °C dochází k aktivnímu smršťování pórovitého výlisku, ke slinování tuhých fází (WC, Co) a k produkci tuhého roztoku na bázi kobaltu. Po ohřátí výlisku na teplotu tavení eutektika a následném vzniku tekuté fáze začínají působit síly povrchových napětí. Dochází tak k transportu karbidických zrn, který způsobuje zhutnění materiálu. V případě, že objem tekuté fáze se nachází v rozmezí 25-35%, dochází téměř k dokonalému zhutnění, při menších objemech je zhutnění neúplné. Růst karbidických zrn lze podpořit zvýšením teploty nebo delší výdrží na slinovací teplotě. Umožňuje jej rekystalizace přes tekutou fázi. Rozvíjejí se kontakty mezi karbidickými zrny a vytváří se karbidický skelet. Růst zrn ovlivňuje přítomnost dalších typů karbidů a obsah uhlíku v práškové směsi. Aby se docílilo žádaných vlastností slinutého polotovaru, je potřeba v tuhé fázi WC udržet obsah uhlíku v rozsahu 6,06-6,12 %, jinak hrozí vytvoření nežádoucích fází a slabých míst ve struktuře materiálu. Při krystalizaci se z tekuté fáze vylučuje karbid wolframu na zrnech WC, což může přispívat ke zvětšování zrna, zaplňování mezer mezi zrny a k tvorbě doplňkových spojení [8].

Jako vzor pro slinování v tuhé fázi poslouží **systém WC-TiC-Co**. Proces lze charakterizovat [8]:

- nižší rozpustnost tuhé fáze v kapalně než v systému WC-Co a naopak vyšší rozpustnost než v systému Ti-Co,
- horší smáčivost tuhého roztoku (W,Ti)C tekutým kobaltem než v systému WC-Co.

Zhutnění probíhá stejnými mechanismy jako v systému WC-Co, avšak růst zrn jedné fáze zabraňuje růstu zrn druhé fáze. Zrnitost výsledného slinutého polotovaru závisí na poměru tvrdých fází a velikosti zrn výchozích prášků. V tomto systému není tak podstatné dodržet přesný obsah uhlíku v materiálu, jak v systému WC-Co [8].

**Slinování funkčně gradientních materiálů** je založeno na plynulé změně strukturního či chemického složení a mechanických vlastností v závislosti na vzdálenosti od povrchu materiálu. Funkčně gradientních materiálů se využívá v aplikaci pro řezné nástroje, kde se dosahuje na povrchu nástroje vrstvy odolné vůči abrazivnímu opotřebení a poměrně houževnatého jádra. Pro zvýšení řezného výkonu a trvanlivosti nástroje se na většinu SK nanáší povlak. V povlaku se však vlivem tepelného a mechanického zatížení nástroje vytvářejí mikrotrhliny, které se dále mohou šířit a může tak dojít k destrukci nástroje. Gradientním slinováním lze tomu zabránit, kdy se vytváří povrchová vrstva, která je houževnatější než jádro a tím má i menší sklony k šíření trhlin [8].

### **Opracování SK**

Po procesu slinování se některé výrobky už dále neopracovávají, přestože při slinování došlo k jejich smrštění. Z důvodu vysokých požadavků na přesnost geometrie se však některé polotovary musí dále opracovávat např. broušením, lapováním či leštěním [16].

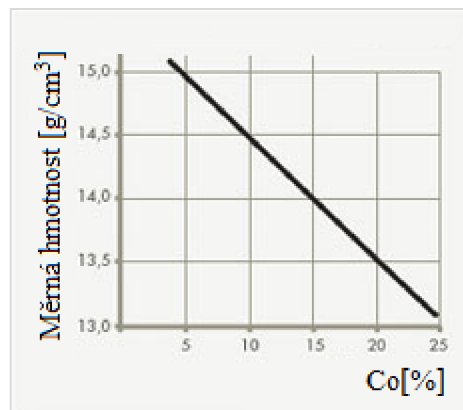
### **2.4 Vlastnosti SK**

Vlastnosti SK se mohou ve velké míře lišit. Ovlivňuje je složení materiálu, velikosti zrn, jejich rozložení, druh a množství přísad, rovnoměrnost mikrostruktury, obsah C a N, množství druh a nečistot, defekty, póry, atd.

Obecně lze o SK říci, že se snižujícím se obsahem kobaltu roste jejich tvrdost a pevnost v tlaku. Tvrdost dále roste s jemnější strukturou tvrdých částic. Mírou odolnosti proti porušení při funkci je mez pevnosti v ohybu, která se zvyšuje s rostoucí velikostí tvrdých zrn a s rostoucím obsahem kobaltu. SK se vyznačují tím, že mají vyšší modul pružnosti v tahu a vyšší mez kluzu než oceli [8].

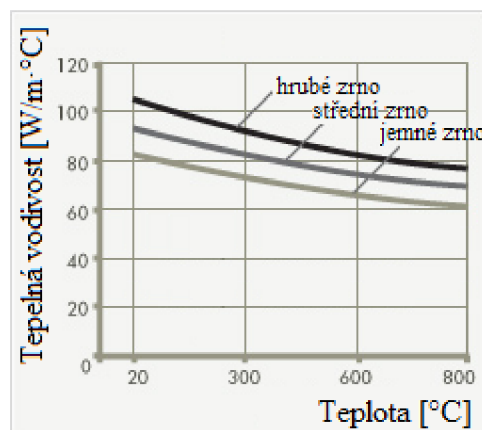
### **Fyzikální vlastnosti SK typu WC-Co**

- **Měrná hmotnost** se pohybuje v rozmezí 12,3-15,2 g·cm<sup>-3</sup>, což se dá považovat za poměrně vysokou hodnotu. S rostoucím obsahem kobaltu klesá (obr. 2.6). Z důvodu zůstatku malého množství pórů a nečistot je skutečná měrná hmotnost o něco nižší než teoretická [8,17].



Obr. 2.6 Měrná hmotnost v závislosti na obsahu Co [17].

- **Tepelná vodivost** se pohybuje v rozsahu  $50-105 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a je v porovnání s rychlořeznými oceli 2- až 3krát vyšší. Je jen v malé míře závislá na obsahu kobaltového pojiva. S rostoucí teplotou klesá, roste naopak u materiálů s hrubou strukturou (obr. 2.7). Čím je tepelná vodivost materiálu nástroje nižší, tím více tepla je při obrábění odváděno obrobkem a obráběcí nástroj je tak méně tepelně zatížen. Nižší tepelná vodivost však snižuje odolnost vůči teplotním šokům [8,18].



Obr. 2.7 Tepelná vodivost jako funkce teploty, různých velikostí zrn WC [18].

- **Součinitel délkové roztažnosti** se pohybuje v rozmezí  $3,4-7,1 [10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}]$  a jeho hodnota je v porovnání s oceli nižší. Zvětšuje se s rostoucím obsahem kobaltu [8].

-**Měrný odpor** se pohybuje v rozsahu  $17-24,3 \mu\Omega\cdot\text{cm}$  a mění se se změnou obsahu kobaltu [8].

### Fyzikální vlastnosti SK typu WC-TiC-Co

- **Měrná hmotnost** se pohybuje v rozmezí  $5,2-14,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a závisí především na obsahu TiC a též na obsahu kobaltu. Čím větší obsah tyto strukturální složky v materiálu mají, tím více měrná hmotnost klesá. Skutečná měrná hmotnost je o něco nižší než teoretická z důvodu zůstatku malého množství pórů a nečistot [8].

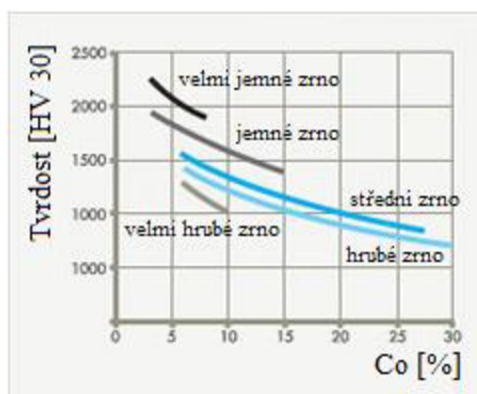
- **Tepelná vodivost** se pohybuje v rozsahu  $15-100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , klesá s rostoucím obsahem TiC a je nižší než u SK typu WC-Co. Při vysokém obsahu TiC je tepelná vodivost nižší než u rychlořezných ocelí [8].

- **Součinitel délkové roztažnosti** se pohybuje v rozmezí  $5,5-7,9 [10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}]$  a jeho hodnota je v porovnání se systémem WC-Co o něco vyšší. Zvětšuje se s rostoucím obsahem TiC [8].

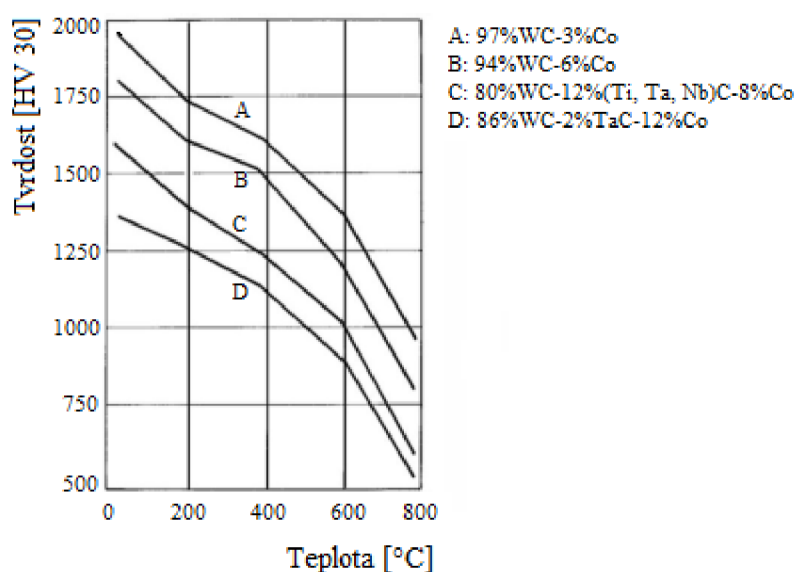
- **Měrný odpor** se pohybuje v rozsahu  $20-85 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  a klesá s rostoucím obsahem TiC [8].

### Mechanické vlastnosti SK typu WC-Co

- **Tvrдость** se nachází na hranicích 780-2 152 HV. Čím má materiál jemnější strukturu a nižší obsah kobaltu, tím dosahuje SK vyšších hodnot tvrdosti (obr. 2.8). Oproti rychlořezným ocelím má však mnohem vyšší tvrdost a to i za zvýšených teplot. Některé SK s velmi jemnou strukturou si zachovávají poměrně dobrou tvrdost až do teplot  $800^\circ\text{C}$  (obr. 2.9) [8,9,19].



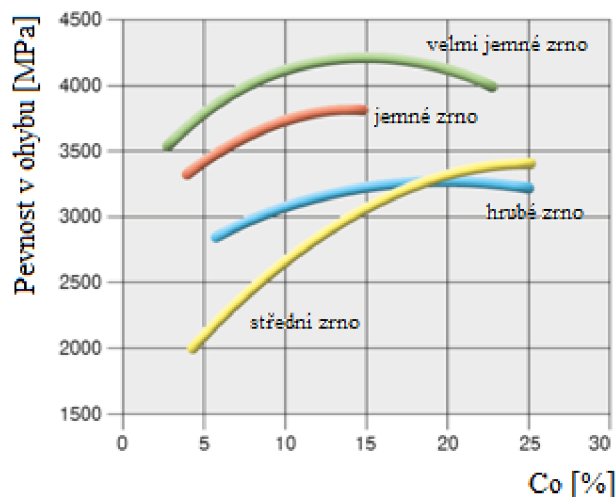
Obr. 2.8 Závislost tvrdosti na obsahu Co a velikosti zm WC [19].



Obr. 2.9 Závislost tvrdosti na teplotě pro různé typy karbidů [9].

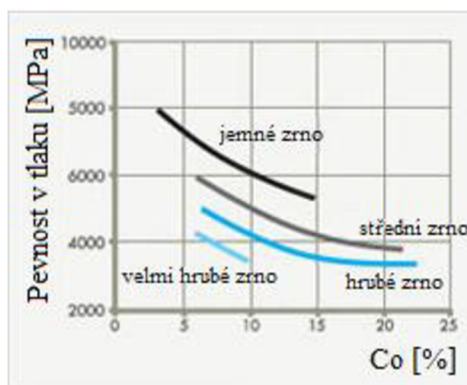


- **Pevnost v ohybu** může dosahovat hodnot v rozsahu 2000-4700 MPa. S rostoucím obsahem kobaltu roste až po určitou hranici maxima (obr. 2.10). Při dosažení maximální hodnoty pevnosti, pro danou velikost zrn WC, s dalším zvětšováním obsahu kobaltu klesá. Technologii výroby SK lze pevnost v ohybu zvýšit, např. vysokoteplotním izostatickým lisováním [8,20].



Obr. 2.10 Závislost pevnosti v ohybu na obsahu Co a velikosti zrn WC [20].

- **Pevnost v tlaku** je uváděna v rozmezí 3100-8000 MPa (obr. 2.11). S přibývajícím obsahem kobaltu, hrubšími zrny WC ve struktuře a se zvyšující se teplotou její hodnota klesá [8,21].

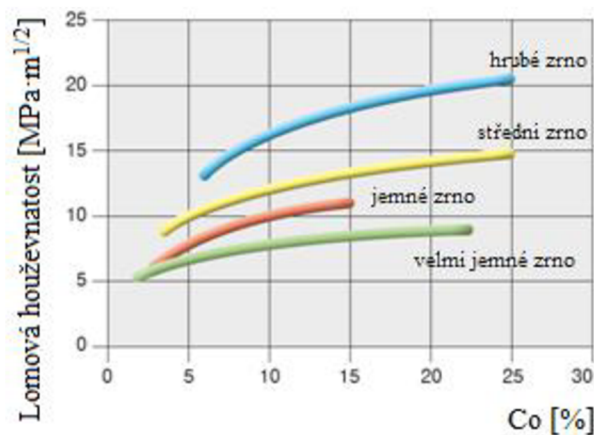


Obr. 2.11 Závislost pevnosti v tlaku na obsahu Co a velikosti zrn [21].

- **Pevnost v tahu** může dosahovat hodnot až 1200-2750 MPa, její hodnota dosahuje přibližně poloviny meze pevnosti v ohybu. Měření je však velice obtížné, protože SK vykazují velmi nízkou tažnost a vysokou křehkost [8].

- **Modul pružnosti v tahu** se nachází na hranicích 440-670 GPa, **modul pružnosti ve smyku** v rozmezí 170-270 GPa. Oproti rychlořezným ocelím jsou tyto hodnoty téměř třikrát vyšší. S jemnějším zrnem WC a klesajícím obsahem kobaltu tyto hodnoty rostou [8].

- **Lomová houževnatost** se definuje jako kritická hodnota součinitele intenzity napětí v okamžiku nestabilního šíření trhliny a je mírou odolnosti tělesa s definovanou trhlinou proti křehkému porušení. Lomová houževnatost roste s rostoucím obsahem kobaltu a hrubší strukturou (obr. 2.12). Do teplot 500-700°C se její hodnota nemění, po překročení této hranice však strmě roste [8,20].



Obr. 2.12 Závislost lomové houževnatosti na obsahu Co a velikosti zrn WC [20].

### Mechanické vlastnosti SK typu WC-TiC-Co

- **Tvrдость** je vyšší než u SK typu WC-Co (v případě srovnávání materiálů se stejným hmotnostním obsahem kobaltu). Tvrдость se zvyšuje se zvyšujícím se obsahem TiC a snižováním obsahu kobaltu. Naopak se zvyšující se teplotou tvrдость klesá [8].

- **Pevnost v ohybu** je nižší než u SK typu WC-Co (v případě srovnávání materiálů se stejným hmotnostním obsahem kobaltu). Ohybová pevnost se snižuje s rostoucím obsahem TiC (při konstantním obsahu kobaltu), naopak s rostoucím obsahem kobaltu se ohybová pevnost zvyšuje (při konstantním obsahu TiC). Se zvyšující se teplotou pevnost v ohybu klesá [8].

- **Pevnost v tlaku** je uváděna v rozmezí 3500-5600 MPa. S přibývajícím obsahem Co a TiC klesá [8].

- **Modul pružnosti v tahu** se snižuje s rostoucím obsahem Co a TiC. Je nižší než u SK typu WC-Co [8].

- **Lomová houževnatost** je nižší než u SK typu WC-Co (v případě srovnávání materiálů se stejným hmotnostním obsahem kobaltu a stejnou velikostí zrna) [8].

## 2.5 Nepovlakované a povlakované SK

Nástroje vyrobené z **nepovlakovaného SK** tvoří v současné době jen malou část vyráběných nástrojů. Využívají se jen ve vymezených případech, např. při obrábění s nízkými řeznými silami nebo v aplikacích, které kladou důraz na maximální ostrot břitu. Typické užití nachází při obrábění žáruvzdorných a titanových slitin, k soustružení tvrzených materiálů nebo k výrobě miniaturních nástrojů. Nepovlakované SK disponují samoostřicí schopností. Jejich opotřebení je značné, avšak kontrolované [8].

Většina nástrojů, vyrobených ze SK, se dále upravuje a jejich povrch se opatřuje povlakem (obr. 2.13) z tvrdého materiálu. Povlakování se provádí za účelem zlepšení užitných vlastností řezného nástroje, jako je např. zvýšení jeho životnosti, odolnosti vůči opotřebení či zvýšení řezných rychlostí. Dle konkrétního použití, se na nástroj aplikuje vhodný povlak. Mezi významné materiály pro povlakování se řadí [8,22]:

TiN, AlTiN, TiCN, TiAlN, ZrN, CrN, AlTiCrN, CrTiN, MoS<sub>2</sub>, AlCrN<sup>3</sup>, TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



Obr. 2.13 Břítové destičky s různými typy povlaků [23].

### 3 CHARAKTERISTIKA METODY PVD

Povlakované SK se vyrábí tak, že se na podkladový materiál (dříve SK typu K, P, M, dnes už speciální SK) nanáší tenká vrstva materiálu, která vykazuje vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. Přitom tenká vrstva povlaku dosahuje vyšší pevnosti i tvrdosti než stejný homogenní materiál v jiné formě. Tyto vlastnosti jsou důsledkem toho, že materiál povlaku neobsahuje žádné pojivo, má o jeden i více řádů jemnější strukturu než podkladový materiál a obsahuje menší množství pórů a dutin. Povlak také plní funkci bariéry před difúzním mechanismem opotřebení nástroje [24].

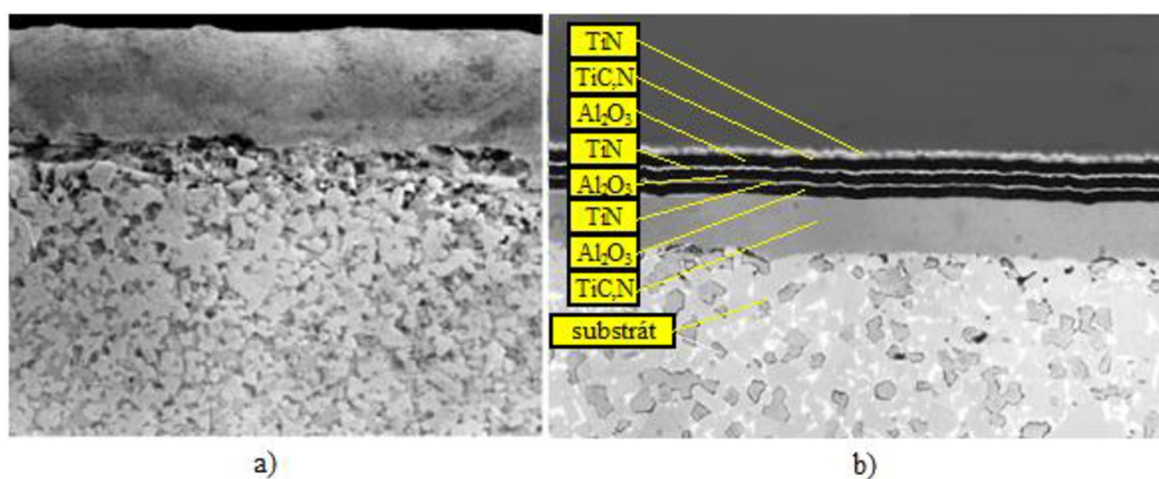
#### 3.1 Historie

Významným mezníkem ve vývoji řezných materiálů v oblasti slinutých karbidů bylo započetí výroby vyměnitelných břitových destiček s tenkými povrchovými vrstvami TiC, kdy s nimi koncem 60. let 20. stol. na trh přišla firma Sandvik Coromant. V následujících několika letech byly vytvořeny nové povlaky typu TiN, TiCN a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Povlaky se nejdříve nanášeli metodou CVD (Chemical Vapour Deposition-chemické povlakování), kdy se na povrch nástroje nanášeli jedno- či vícevrstvé povlaky. Metoda PVD (Physical Vapour Deposition-fyzikální povlakování) se začala používat až zažátkem 80. let. Nejvíce používaný povlak nanášený touto metodou byl jednovrstvý povlak na bázi TiN. V raném období povlakovaných SK se užívalo jen několika málo typů povlaků. S rostoucími požadavky na řezné nástroje byly stávající povlaky zdokonalovány a začaly se vyvíjet i nové druhy povlaků. V dnešní době se používá mnoho povlakovaných SK, které se od sebe liší svou aplikací, typem substrátu, druhem a tloušťkou povlaku, kombinací vrstev, metodou nanášení povlaku atd. [8].

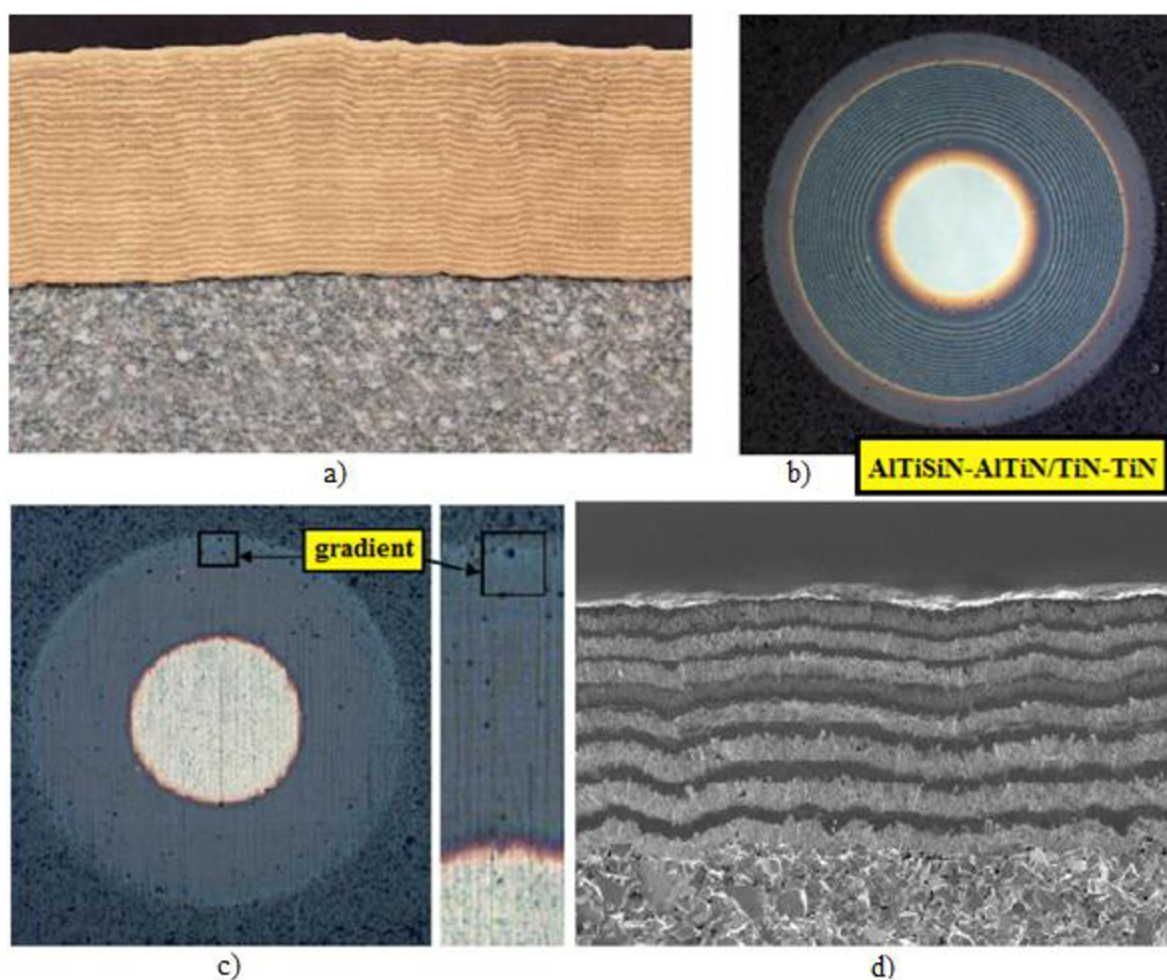
#### 3.2 Rozdělení povlaků

Podle vývoje povlaků SK je lze rozdělit na čtyři stupně [8]:

- **1. generace:** Jednovrstvý povlak na bázi TiC o tloušťce 6 μm, avšak se špatnou soudržností povlaku s podkladem,
- **2. generace:** Jednovrstvý povlak na bázi TiC, TiCN, TiN o tloušťce 7-10 μm s lepší soudržností povlaku s podkladem (obr. 3.1 a)),
- **3. generace:** Vícevrstvý (dvou- tří- či více-vrstvý) povlak (obr. 3.1 b)) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami (řazení vrstev podle jejich vlastností-dobrá přilnavost k povrchu, vysoká odolnost vůči opotřebení, atd.), vrstvy řazené nejčastěji v pořadí (od podkladu k povrchu): TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN,
- **4. generace:** Speciální vícevrstvý (až deseti- či více-vrstvý) povlak (obr. 3.2) s méně či více zřetelnými přechody mezi vrstvami, složené ze stejných materiálů, jak povlaky 3. generace, se schopností zpomalovat či odklánět šíření trhlin od povrchu povlaku. Jsou zde zařazeny povlaky diamantové, nanokompozitní, gradientní, supermřížkové, „inteligentní“, z kubického nitridu boru.



Obr. 3.1 Různé typy povlaků: a) povlak 2. Generace, b) několikavrstvý povlak 3. generace [25].



Obr. 3.2 Povlaky 4. Generace: a) vícevrstvý povlak [25], b) nanokompozitní povlak [26], c) gradientní povlak-zajišťuje povlaku výjimečnou tepelnou a chemickou stabilitu [27], d) vícevrstvý diamantový povlak CCDia-vysoce tvrdý a odolný proti opotřebení [28].

Snahou vývoje povlaků SK je snížit jejich teplotu tvorby, zlepšit jejich vlastnosti, především tvrdost a odolnost proti oxidaci a to i za zvýšených teplot. Povlaky lze podle tvrdosti rozdělit [8]:

- tvrdé povlaky – tvrdost < 40 GPa,
- supertvrde povlaky – tvrdost > 40 GPa (povlaky z kubického nitridu boru, amorfního nitridu uhlíku, polykrystalického diamantu, jedнокrystalové nitridové supermřížkové povlaky).

Podle principu povlakování se dělí do dvou základních skupin [8]:

- PVD (Physical Vapour Deposition) – fyzikální nanášení povlaků,
- CVD (Chemical Vapor Deposition) – chemické nanášení povlaků.

### 3.3 Metody nanášení povlaků

#### 3.3.1 PVD (Physical Vapour Deposition)

PVD (metoda fyzikálního nanášení povlaků) je charakteristická tvorbou povlaků v prostředí vysokého vakua a relativně nízkých teplot (150-500 °C). Zdroj materiálu, tzv. terč (např. Ti, Cr, Al, ...), který je použit k povlakování, je ze zdroje uvolňován do plynné fáze různými fyzikálními metodami. Do vakuové komory je současně vháněn reaktivní plyn (např. Ar, N<sub>2</sub>), který s kovovými parami reaguje a vytváří chemickou sloučeninu. Tato sloučenina se pak usazuje na povrchu součásti a vzniká tenký homogenní povlak o tloušťce 1-5 μm. Celý proces lze shrnout do třech na sebe navazujících kroků [8,24]:

- převedení materiálu do plynné fáze,
- transport par od zdroje k substrátu,
- usazování par a tvorba povlaku na povrchu substrátu.

K dosažení těchto kroků lze dospět různými fyzikálními metodami. Mezi nejpoužívanější patří [8,24,29]:

- napařování (přímé, reaktivní, aktivované reaktivní, s asistencí iontového paprsku),
- naprašování (doutnavý výboj),
- iontová implantace (doutnavý výboj, iontový paprsek).

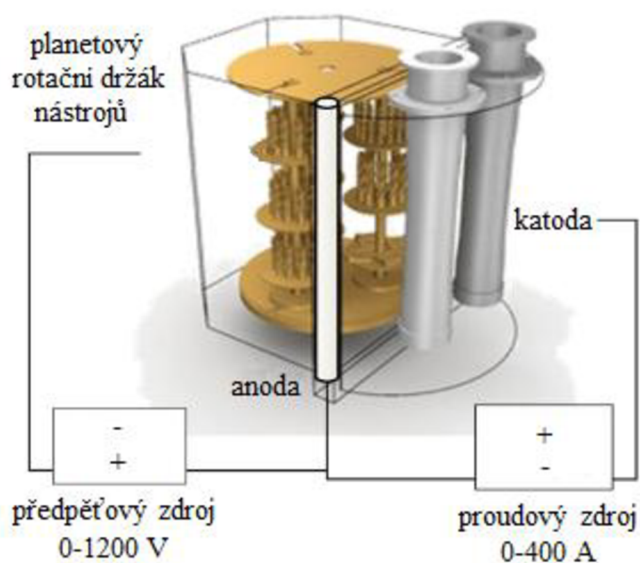
**Metoda napařování** spočívá v odpařování materiálu z terče ve vakuu a následnou kondenzací par na substrátu. Odpařování se provádí ohřevem materiálu, jeho přeměnou z tuhého či kapalného stavu do plynné fáze. Ohřev může být realizován různými metodami, např. odporově, indukčně, elektronovým svazkem, obloukovým výbojem nebo pomocí laseru. Do vakuové komory se přivádí plyn (např. Ar), který způsobuje rovnoměrnou tloušťku povlakové vrstvy [8].



**Odporový ohřev** – zdrojem jsou vyhřívané dráty a kovové fólie, které jsou vyráběny z kovů s vysokou teplotou tavení a s nízkým tlakem par. Nedochozí tak ke znečištění vytvářeného povlaku [8].

**Elektronový paprsek** - při odpařování se elektronovými děly generují elektronové paprsky vysokého výkonu, které ve vakuové komoře odpařují materiál a přehřívají substrát. Výhodou této metody je možnost odpařovat prvky s nízkým tlakem par a vytvářet multivrstvé povlaky skládající se z různých vrstev. Tato metoda není však vhodná pro řezné nástroje [8].

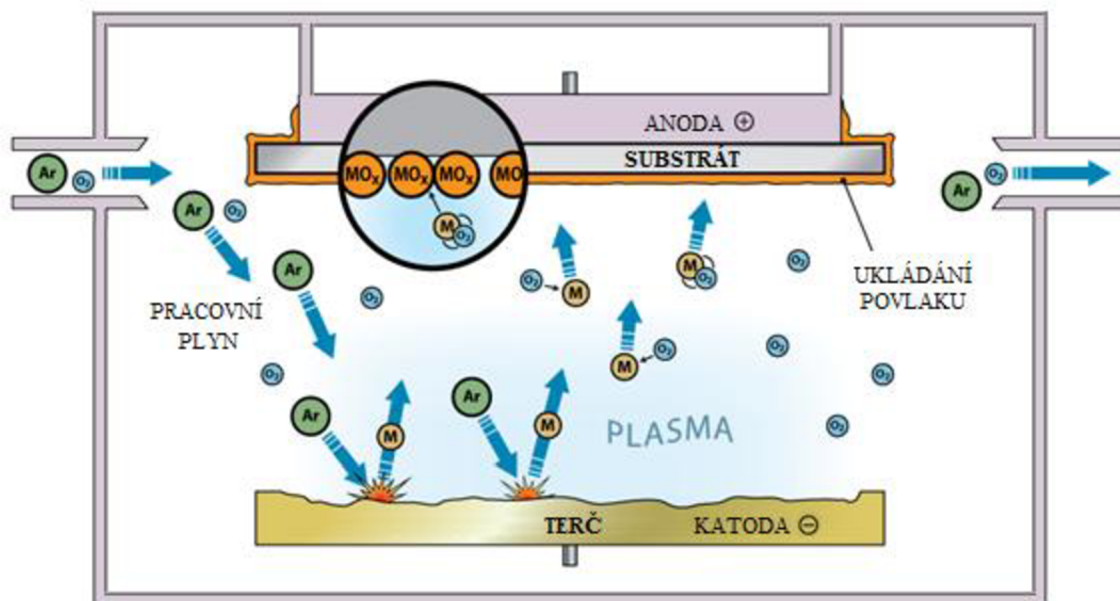
**Obloukový výboj** – materiál je odpařován díky hoření nízkonapětového elektrického oblouku. Na vakuové komoře (anoda) hoří oblouk po celé její ploše, avšak na terči (katodě) hoří jen bodově. V místě této skvrny, jejíž pohyb lze řídit magnetickým polem, se dosahuje teploty 10 000-20 000 °C a dochází tak k odpařování materiálu z terče. Díky takto vysokým teplotám lze odpařovat prakticky všechny elektricky vodivé materiály. Základní schéma zapojení zařízení je na obr. 3.3 [8].



Obr. 3.3 Schéma zapojení zařízení při přípravě povlaků nízkonapětovým obloukem [30].

**Laser** – materiál je z terče odpařován laserovým paprskem. Výhodou této metody je produkce složek s vysokou energií, které mají kladný vliv na jakost povlaku [8].

**Metoda naprašování** spočívá v odprašování materiálu z terče energetickými ionty pracovního plynu a následnou kondenzací materiálu na substrátu (obr. 3.4) [8].



Obr. 3.4 Schéma naprašování [31].

Ve vakuové komoře (anoda) vlivem elektrického pole a inertního plynu hoří doutnavý výboj. Pomocí výboje se nad záporně nabitým terčem udržuje argonová plazma, jejíž kladné ionty bombardují povrch terče (katoda) a odprašují z něj jednotlivé atomy. Odprašené atomy následně prochází ionizovaným pracovním plynem. Nakonec dopadají na povrch povlakované součásti, kde se shlukují a vytváří povlak. Metoda naprašování má více modifikací:

**Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody** – je velice jednoduchou a často využívanou metodou k tvorbě povlaků. Systém se skládá především z terče (katoda) a substrátu (anoda). Katoda je zpravidla chlazená vodou a zastává funkci zdroje povlakovacího materiálu a zdroje elektronů, které udržují doutnavý výboj. Nevýhodou této metody je však pomalá rychlost nanášení povlaku a ohřev substrátu vlivem bombardování částicemi [8,29].

**Magnetronové naprašování** – je založeno na rozprašování terče ionty pracovního plynu, které jsou extrapolované z plazmatu doutnavého výboje. Poloha doutnavého výboje je přitom usměrňována pomocí magnetického pole v těsné blízkosti terče. Výhodou této metody je možnost odprašovat libovolný materiál (včetně slitin a nevodivců) a možnost nanášet multivrstvé či gradientní povlaky [8,29].

**Radiofrekvenční naprašování** – umožňuje tvorbu povlaků i z elektricky nevodivých terčů. Tato metoda umožňuje tvorbu elektricky vodivých, polovodivých a nevodivých povlaků [8].



**Naprašování iontovým paprskem** – iontový paprsek, jehož zdrojem je inertní nebo reaktivní plyn, je namířen na terč a odprašuje z něj částice. Substrát je vhodně umístěn, aby zachytával odprašené částice. Tato metoda umožňuje vynikající přilnavost a vysokou čistotu povlaku [8].

**Výhody naprašování [8,24,29]:**

- nízké zatížení tepelnou radiací,
- odprašovaný terč je stabilním zdrojem par,
- malá vzdálenost terče a substrátu, vakuová komora může mít tedy malý objem,
- možnost odprašování různých prvků, slitin a chemických sloučenin,
- možnost povlakovat i velice ostré hrany.

**Nevýhody naprašování [8,24,29]:**

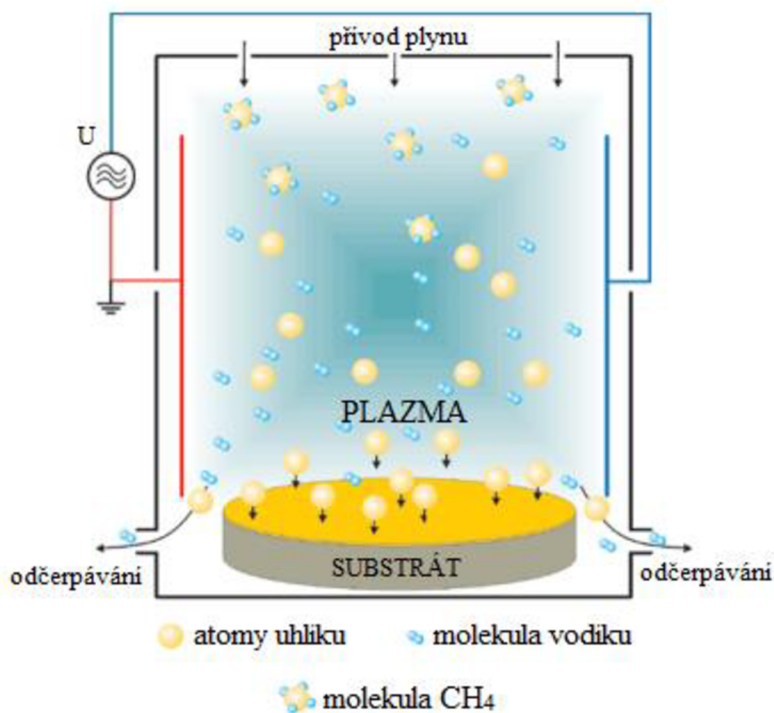
- nízká intenzita naprašování,
- nutnost odvádění tepla, které vzniká dopadajícími částicemi na terč,
- k vytvoření rovnoměrné tloušťky povlaku je nutno povlakovanou součástí otáčet,
- terč nebo výsledný povlak může být pracovním plynem znečištěn,
- velké vnitřní napětí povlaku.

**Iontová implantace** je metoda hybridního PVD procesu, při které dochází k bombardování povrchu substrátu svazkem částic s vysokou energií. Částice jsou přitom z terče získávány odpařováním nebo odprašováním. Díky silnému elektrickému poli mezi terčem a substrátem dochází v plynné atmosféře k elektrickému výboji, který způsobuje ionizaci částic pracovního plynu a odpařených částic terče. Následně dochází k reakci iontů a k jejich usazování na substrátu, vzniká tak povlak. Výhodou iontové implantace je možnost nanášet povlaky různorodého složení o výborných vlastnostech a to i na plasty nebo tepelně zušlechtnuté materiály [8,32].

PVD metoda se dříve používala pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí (kvůli nízkým pracovním teplotám nedocházelo k tepelnému ovlivnění nástroje). Dnes dochází k rozmachu této metody a rozšíření aplikace i na slinuté karbidy [8,24].

### 3.3.2 CVD (Chemical Vapor Deposition)

CVD (metoda chemického nanášení povlaků) je charakteristická tvorbou povlaků, na základě plynných reakcí v plazmatu. Plazma se nachází v nejbližším okolí povlakovaného tělesa a probíhá v něm reakce plynů, které musí obsahovat stabilní, ale zároveň prchavou sloučeninu. Sloučenina, která obsahuje povlakovaný materiál, se vlivem přivedené energie (ohřev, plazmový oblouk, laser) chemicky rozkládá a reaguje s reaktivním plynem. Složky heterogenní reakce se pak ukládají na ohřátý povrch substrátu a vzniká tak povlak. Tvorbu povlaku názorně ukazuje obr. 3.5.



Obr. 3.5 Tvorba diamantového povlaku CVD metodou [29].

Proces povlakování se provádí za vysokých teplot (950-1050°C), tudíž některé materiály (např. rychlořeznou ocel) nelze touto metodou povlakovat. Ohřevem na vysokou teplotu by mohlo dojít k tepelnému ovlivnění základního materiálu. Proto se CVD metoda používá především k povlakování slinutých karbidů. Tloušťka CVD povlaků je větší než u PVD povlaků, proto dochází k zaoblování hran a snížení jejich ostroty. Nevýhodou může být vysoká energetická náročnost, toxické pracovní plynné směsi a dlouhý pracovní cyklus (až 10 hodin) [8,29].

Mezi výhody CVD metody patří vysoká tepelná stabilita vytvořených vrstev, rovnoměrná tloušťka povlaku, vysoká adheze, odolnost vrstev proti opotřebení, možnost vytvářet složité vrstvy, možnost povlakovat tvarově komplikované a nepřístupné povrchy. Nízké ekonomické nároky řadí tuto metodu mezi nejběžnější metody pro povlakování slinutých karbidů [8,29].

Stále častěji se v poslední době používají různé modifikace CVD metody, např. nízkotlaková, se žhavicím vláknem, laserem indukovaná nebo s lavinovým plazmatickým výbojem [8].

### 3.4 Vlastnosti povlaků

V dnešní době je na trhu nabízeno nepřehledné množství různých druhů povlaků. Použití a způsob opotřebení nástroje hraje velkou roli při výběru povlaku. Ke klíčovým faktorům ovlivňující fyzikální a chemické vlastnosti povlakovaného nástroje, ale i řezného výkonu, patří druh povlaku, jeho tloušťka, složení substrátu a metoda povlakování. Pro řezný výkon je také důležitý koeficient tření a drsnost povrchu. Abrazivní opotřebení závisí na tvrdosti povlaku, tepelné opotřebení ovlivňuje termochemickou stabilitu, odolnost povlaku proti opotřebení záleží především na typu povlaku. Obecné porovnání vlastností vybraných povlakových materiálů je v tab. 3.1 [8,33].

Tab. 3.1 Srovnání vlastností vybraných povlakových materiálů [8].

Hodnocení	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
Výborná	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
↑	TiAlN	TiAlN	TiAlN	TiAlN
	TiN	TiN	TiCN	TiN
	TiCN	TiCN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiCN
Špatná	TiC	TiC	TiN	TiC

Obecně se popisuje několik základních vlastností povlaků:

**Tvrdost** – odvíjí se především od typu materiálu povlaku. Pro určení tvrdosti se používají mikrotvrdoměry, které zaručí měření tvrdosti pouze povlaku a ne i podkladového materiálu. Hodnota tvrdosti se uvádí v HV nebo v GPa. Mezi povlaky s vysokou tvrdostí patří diamantové povlaky a povlaky s obsahem boru. Tvrdost u většiny povlaků s rostoucí teplotou klesá [30].

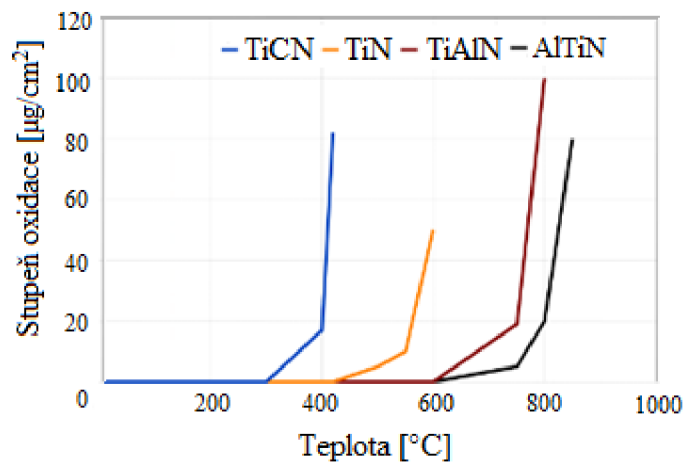
**Tloušťka** – dosahuje hodnot 1-10 μm a je jednou z nejdůležitějších charakteristik povlaku, má vliv na trvanlivost nástroje a na řezné síly při obráběcím procesu. Pro měření tloušťky povlaku na rovinných plochách se používá kalotester [30].

**Drsnost** – vysoká drsnost zvyšuje řezné síly, břit nástroje je pak více tepelně a mechanicky namáhán. Vysokou drsnost způsobují makročástice, které vznikají při povlakovacím procesu [30].

**Adheze** – špatná přilnavost povlaku k podkladu může způsobit její odloupení, nástroj se pak zhoršují řezné vlastnosti. Adheze povlaku závisí na tloušťce povlakové vrstvy, podkladovém materiálu a v neposlední řadě i na povlakovací metodě [30].

**Kluzné vlastnosti** – lze je aplikací vhodného povlaku zlepšit a snížit tak při obrábění třecí síly. Výrazně se takto sníží tepelné zatížení nástroje [30].

**Odolnost vůči oxidaci** – oxidace je jedním ze způsobů opotřebení nástroje, která může (po překročení maximální teploty povlaku) způsobit snížení tvrdosti vrstvy a následně její odloupení. Srovnání odolnosti základních typů PVD povlaků vůči oxidaci je na obr. 3.6. [30].



Obr. 3.6 Závislost stupně oxidace základních PVD povlaků na teplotě [30].

**Chemická stabilita** – určuje schopnost povlaku odolávat chemickým reakcím s obráběným materiálem a to i za zvýšených teplot. Např. diamantové povlaky jsou chemicky stabilní při obrábění neželezných materiálů, avšak při obrábění ocelí chemicky reagují a jsou pro tuto aplikaci nevhodné [30].

**Tepelná stabilita** – je schopnost povlaku zachovat si svoje vlastnosti i za zvýšených teplot. Vlivem obrábění dochází ke zvýšení teploty nástroje a může tak dojít ke změně vnitřní struktury povlaku a ke změně jeho mechanických vlastností. Díky analýzám tepelné stability lze pro určitou aplikaci stanovit optimální řezné podmínky či optimální typ povlaku nástroje [30].

## 4 MONOLITNÍ FRÉZOVACÍ NÁSTROJE S PVD POVLAKY A JEJICH VYUŽITÍ PRO PRAXI

Monolitní frézovací nástroje ze slinutého karbidu jsou velice výkonné a univerzální nástroje pro různé aplikace obrábění. Nanášením povlaků se jejich vlastnosti zlepšují a rozšiřuje se jejich oblast použití. Jsou vhodné pro obrábění rozmanitých materiálů a tvarů obrobků a to i za vysokých teplot. Jejich použití lze nalézt pro hrubovací, ale i dokončovací práce, pro obrábění osazení, drážek, dutin, aj. S výhodou se využívají při vysokorychlostním obrábění, kde se kombinuje velká hloubka řezu s poměrně malým radiálním záběrem. Vysoká tuhost nástroje zajišťuje dosažení vysoké rozměrové přesnosti a jakosti obráběného povrchu. Velmi častá je aplikace v CNC strojích, kde se využívá frézování všemi směry, obvodem či čelem nástroje. Nejčastěji jsou tyto nástroje provedeny jako dvou- či více- břité, válcové čelní, kulové či toroidní [6].

Níže jsou popsány společnosti ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE, SECO a DORMER PRAMET, jejichž produkce se zabývá výrobou povlakovaných monolitních frézovacích nástrojů ze slinutého karbidu. U každého výrobce je vybráno a popsáno několik nástrojů, které vyrábí. Dalšími významnými společnostmi zabývající se problematikou povlakování či výroby fréz ze slinutých karbidů jsou Gühring, Ceratizit, Sandvik Coromant, Liss, Carbide, Inova Tools, aj.

### 4.1 ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE

Společnost ZPS- FRÉZOVACÍ NÁSTROJE (ZPS-FN) a.s. (obr 4.1), se sídlem ve Zlíně, se především zabývá výrobou fréz a vrtáků ze slinutých karbidů a rychlořezné oceli, ale i tepelným zpracováním nástrojových ocelí a jiných kovů. Počátky výroby nástrojů sahají do 30. let 20. století, jejichž výroba byla součástí koncernu Baťa. Roku 1992 vznikla v rámci ZPS dceřiná společnost ZPS-FN a.s. a od roku 2001 se stala samostatnou akciovou společností. Společnost se dělí do dvou výrobních oddělení – frézy a tepelné zpracování. ZPS-FN dodává své výrobky především na tuzemský trh, stále více však proniká i na evropský trh, především do Německa [34].



Obr. 4.1 Logo firmy [34].

**S119602** – válcová čelní hrubovací fréza (obr. 4.2) určená pro obrábění nízkolegovaných, legovaných a vysoce legovaných ocelí, nerezových ocelí, žáruvzdorných ocelí, šedé a tvárné litiny, titanových slitin. Materiál frézy je slinutý karbid potažený vysoce výkonným PVD povlakem AlTiN, který je vyvinut pro obrábění při nedostatečném chlazení. Při obrábění lze však místo řezu chladit olejem. Čelo nástroje je sraženo pod úhlem  $45^\circ$ . K upnutí nástroje k vřetenu slouží válcová stopka. Tato fréza je určena pouze k obrábění v radiálním směru.

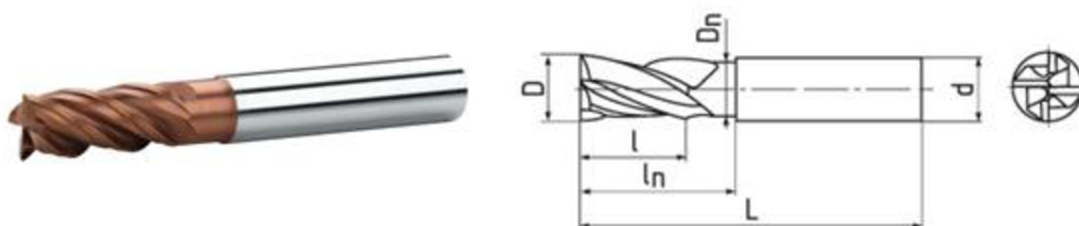


Obr. 4.2 Fréza S119602 [35].

Tab. 4.1 – Geometrie nástroje [35].

Úhel šroubovice	$\lambda = 45$	[°]	Průměr upínacího prvku	$d = 16 \text{ h6}$	[mm]
Úhel čela	$\gamma = 6$	[°]	Délka řezné části	$l = 32$	[mm]
Počet břitů	$z = 5$	[-]	Délka nástroje	$L = 92$	[mm]
Průměr nástroje	$D = 16 \text{ h10}$	[mm]			

**S151602.080** – válcová čelní čtyřbřitá fréza (obr. 4.3) určená pro hrubovací i dokončovací práce, pro obrábění nerezové a žáruvzdorné oceli a k obrábění titanových slitin. Materiál frézy je slinutý karbid potažený PVD povlakem AlCrN, který vyniká vysokou odolností vůči vysokým teplotám (až  $1100^\circ\text{C}$ ) bez oxidace či reakce s obráběným materiálem. Místo řezu je nutno při obrábění chladit olejem. Čelo nástroje je sraženo pod úhlem  $45^\circ$ . K upnutí nástroje k vřetenu slouží válcová stopka. Tato fréza je určena k obrábění v radiálním a postupném směru.



Obr. 4.3 Fréza S151602.080 [36].

Tab. 4.2 – Geometrie nástroje [36].

Úhel šroubovice	$\lambda = 40/42$	[°]	Délka řezné části	$l = 19$	[mm]
Úhel čela	$\gamma = 12$	[°]	Délka nástroje	$L = 63$	[mm]
Počet břitů	$z = 2$	[-]	Délka nástroje po krček	$l_n = 25$	[mm]
Průměr nástroje	$D = 8 \text{ h10}$	[mm]	Průměr krčku	$D_n = 7,6$	[mm]
Průměr upínacího prvku	$d = 8 \text{ h6}$	[mm]			

**S360002.020** – čtvrtkruhová vydutá fréza (obr. 4.4) určena pro zhotovení rádiusových ploch o poloměru 2 mm. Materiál frézy je slinutý karbid potažený vysoce výkonným PVD povlakem AlTiN, který je vyvinut pro obrábění při nedostatečném chlazení. Chlazení však lze provádět pomocí oleje. K upnutí nástroje k vřetenu slouží válcová stopka. Tato fréza je určena k obrábění v radiálním a postupném směru.



Obr. 4.4 Fréza S360002.020 [37].

Tab. 4.3 – Geometrie nástroje [37].

Úhel šroubovice	$\lambda=0$	[°]	Délka nástroje	L= 63	[mm]
Úhel čela	$\gamma=0$	[°]	Malý průměr	Dc= 4	[mm]
Počet břitů	z= 4	[-]	Rádus	R= 2	[mm]
Průměr upínacího prvku	d= 8 h6	[mm]	Úhel sklonu ostří	$\alpha=2$	[°]

## 4.2 SECO

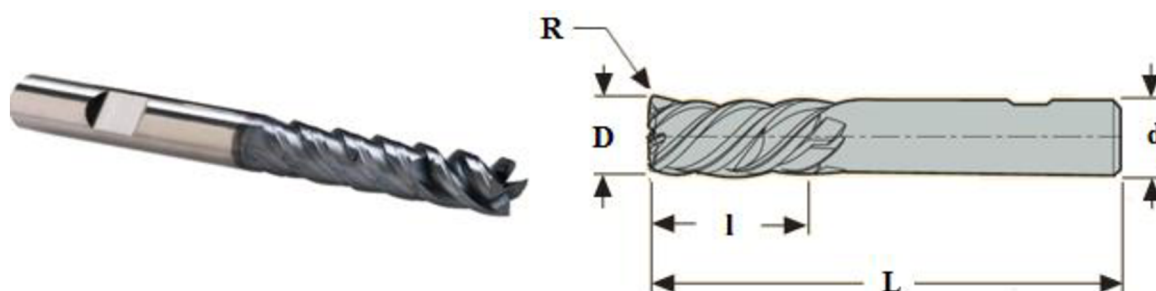
Společnost SECO (obr. 4.5) se sídlem ve švédské Fagerstě a zastoupením ve více než 50 zemích světa se zabývá vývojem a výrobou povlakovaných i nepovlakovaných nástrojů pro frézování, soustružení, vrtání, závitování, upichování, vystružování a další oblasti obrábění. Společnost SECO nabízí břitové destičky ze slinutých karbidů, CBN (kubického nitridu boru) a PCD (polykrystalického diamantu), ale i monolitní frézy a vrtáky. Poskytuje i řadu různých variant upínacích systémů k uchycení nástroje ve stroji.



Obr. 4.5 Logo firmy [38].

**JABRO-Solid2 JS554** – Monolitní čtyřbřitá fréza pro hrubování (obr. 4.6), určená pro obrábění všech běžných materiálů od ocele až po titanové slitiny. Materiál frézy je slinutý karbid krytý PVD povlakem SIRON-A (AlCrN) s vysokou odolností vůči vysokým teplotám. Při obrábění není nutnost chlazení nástroje. Čelo nástroje je v provedení s rohovým rádiusem. K upnutí nástroje k vřetenu slouží válcová stopka s ploškou (weldon). Fréza je určena k obrábění všemi směry posuvu.



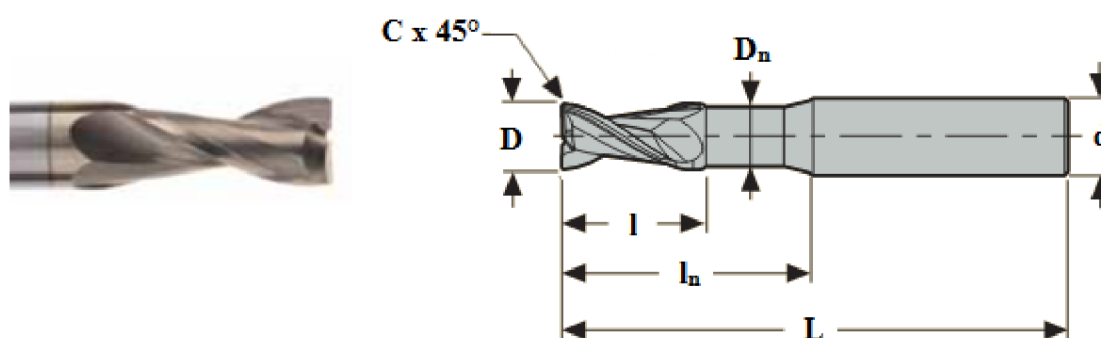


Obr. 4.6 Fréza JABRO-Solid2 JS554 [38].

Tab. 4.4 – Geometrie nástroje [38].

Úhel šroubovice	$\lambda = 48$	[°]	Průměr upínacího prvku	$d = 12 \text{ h5}$	[mm]
Úhel čela	$\gamma = 8$	[°]	Délka řezné části	$l = 26$	[mm]
Počet břitů	$z = 4$	[-]	Délka nástroje	$L = 80$	[mm]
Průměr nástroje	$D = 12 \text{ e7}$	[mm]	Rohový rádius	$R = 0,5$	[mm]

**JABRO-Solid2 JS452** – dvoubřitá válcová fréza (obr. 4.7) určená pro obrábění hliníku, pro hrubovací a dokončovací práce, drážkování, boční frézování, vrtání, obrábění tenkostěnných a vystouplých profilů. Materiál frézy je slinutý karbid pokrytý povlakem HEMI (na bázi diboridu titanu- $\text{TiB}_2$ ) – povlak s nízkým součinitelem tření, snižuje adhezi-ulpívání materiálu na břit nástroje, zajišťuje plynulý odvod třísky a tepla z místa řezu. Čelo nástroje je sraženo pod úhlem  $45^\circ$ . K upnutí nástroje k vřetenu slouží válcová stopka. Tato fréza je určena k obrábění v radiálním, axiálním i postupném směru.



Obr. 4.7 Fréza JABRO-Solid2 JS452 [39].

Tab. 4.5 – Geometrie nástroje [39].

Úhel šroubovice	$\lambda = 30$	[°]	Průměr krčku	$D_n = 4,7$	[mm]
Úhel čela	$\gamma = 15$	[°]	Délka řezné části	$l = 8$	[mm]
Počet břitů	$z = 2$	[-]	Délka nástroje	$L = 57$	[mm]
Průměr nástroje	$D = 5 \text{ e7}$	[mm]	Délka nástroje po krček	$l_n = 17$	[mm]
Průměr upínacího prvku	$d = 6 \text{ h5}$	[mm]	Rohové sražení	$C = 0,1 \times 45^\circ$	[mm]



### 4.3 DORMER PRAMET

Společnost DORMER PRAMET (obr. 4.8) vznikla roku 2014 spojením podniku Dormer Tools a Pramet Tools. Produkce podniku Dormer Tools byla dříve zaměřena na výrobu monolitních nástrojů, kdežto podnik Pramet Tools se specializoval především na výrobu nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu. Dnes společnost DORMER PRAMET nabízí svým zákazníkům celou řadu nástrojů, jako jsou např. monolitní nástroje a nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami pro frézování, soustružení, vrtání či závitování. Společnost distribuuje své výrobky do celého světa, kde má více jak 30 poboček [40].

# DORMER PRAMET

Obr. 4.8 Logo firmy [40].

**S802HB** – dvoubřitá drážkovací fréza (obr. 4.9) určena k dokončovacímú frézování v toleranci P9, pro obrábění všech druhů oceli do tvrdosti 49 HRC, k obrábění nerezové oceli, šedé litiny, mosazi, bronzu, hliníku a magnezia. Materiál frézy je slinutý karbid potažený povlakem ALCRONA (AlCrN) – povlak s vysokou tvrdostí i při vysokých teplotách (až 1100°C) s odolností vůči oxidaci. K upnutí nástroje k vřetenu slouží válcová stopka s ploškou (weldon). Při obrábění není nutnost chlazení nástroje. Tato fréza je určena k obrábění všemi směry posuvu.

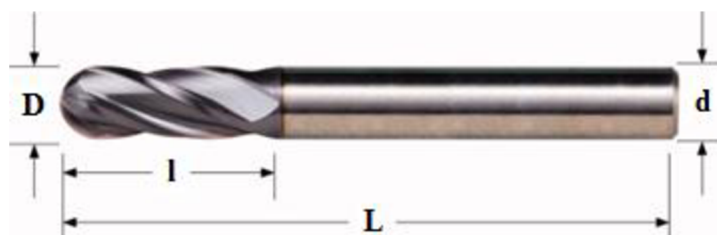


Obr. 4.9 Fréza S802HB [41].

Tab. 4.6 – Geometrie nástroje [41,42].

Úhel šroubovice	$\lambda = 30$	[°]	Průměr upínacího prvku	d = 10	[mm]
Úhel čela	$\gamma = 9$	[°]	Délka nástroje	L = 66	[mm]
Počet břitů	z = 2	[-]	Délka řezné části	l = 10	[mm]
Průměr nástroje	D = 9	[mm]			

**S511** – rádiusová kopírovací fréza (obr. 4.10) určena k frézování rádiusů, pro obrábění všech druhů oceli do tvrdosti 49 HRC, nerezové oceli, šedé litiny, titanu, niklu, hliníku a jejich slitin. Materiál frézy je slinutý karbid s povlakem X-CEED (povlak na bázi TiAlN s vysokou tvrdostí přes 3500 HV). Čelo nástroje je v provedení s rohovým rádiusem. K upnutí nástroje k vřetenu slouží válcová stopka. Tato fréza je určena k obrábění v radiálním a postupném směru posuvu.



Obr. 4.10 Fréza S511 [43].

Tab. 4.7 – Geometrie nástroje [43,44].

Úhel šroubovice	$\lambda = 30$	[°]	Průměr upínacího prvku	$d = 16$	[mm]
Úhel čela	$\gamma = 10$	[°]	Délka nástroje	$L = 100$	[mm]
Počet břitů	$z = 4$	[-]	Délka řezné části	$l = 8$	[mm]
Průměr nástroje	$D = 16$	[mm]			

## ZÁVĚR

Monolitní frézovací nástroje patří k univerzálním a vysoce výkonným nástrojům, které lze využít pro velké spektrum obráběcích procesů. Stopkové frézy jsou zvláště účinné při vysokorychlostním frézování – hrubování, ale jsou i vhodné při dokončovacích operacích. V současnosti je jejich častá aplikace ve výkonných obráběcích strojích s pokročilými funkcemi programování, kde je snaha dosáhnout maximálního využití potenciálu obráběcího nástroje, ale i stroje.

Řezné vlastnosti nástroje závisí především na vlastnostech podkladového materiálu, typu povlaku a způsobu jeho nanášení. Jako vhodným podkladovým materiálem pro výrobu povlakovaných nástrojů se ukázal být slinutý karbid, který se skládá z tvrdých karbidických zrn spojených kovovým pojivem. Slinutý karbid je produktem práškové metalurgie a jeho výroba je prováděna lisováním a následným spékáním kovového prášku.

Snahou výrobců je vyrobit (zhotovit) slinutý karbid s co nejjemnější strukturou, která vykazuje lepší vlastnosti než hrubá struktura.

V současnosti jsou vyráběny především speciální slinuté karbidy, které jsou určeny přímo k povlakování.

Povlak, nanesený na povrch slinutého karbidu, dodává nástroji mnohem lepší vlastnosti, než by měl samotný nepovlakovaný nástroj. Povlaky se liší složením materiálu, tloušťkou a počtem jednotlivých vrstev a metodou jejich nanášení.

PVD (metoda fyzikálního nanášení povlaků) je typická tvorbou povlaků při relativně nízkých teplotách v prostředí vysokého vakua. Oproti metodě CVD (metoda chemického nanášení povlaků), nedochází vlivem nižší pracovní teploty k nežádoucímu tepelnému ovlivnění struktury nástroje. Zdroj materiálu, určeného k povlakování, se různými metodami odpařuje nebo odprašuje. Následně se tyto odloučené částičky transportují a usazují na povrchu povlakovaného nástroje, kde vytváří souvislý povlak.

Tendence poslední doby již nesměruje k vytváření výhradně jednovrstvých či vícevrstvých povlaků, ale míří spíše k tvorbě speciálních multivrstvých, nanokompozitních, gradientních či inteligentních povlaků. Snahou vývoje je snížit jejich teplotu tvorby, zvýšit jejich tvrdost a odolnost vůči oxidaci při vysokých teplotách.

Společnost ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE patří k významným tuzemským výrobcům fréz ze slinutých karbidů a rychlořezné oceli. Pro zvýšení užitné hodnoty fréz nabízí jejich povlakování univerzálním povlakem AlTiN nebo AlCrN. Díky svým zkušenostem a kvalitou výrobků nachází své uplatnění i na evropských trzích.

Společnosti SECO a DORMER PRAMET patří ke světovým producentům obráběcích nástrojů pro vrtání, soustružení a frézování. Jejich nedílnou součástí je výroba a povlakování monolitních fréz a frézovacích břitvých destiček.

Dalšími firmami zabývající se problematikou povlakování či výroby fréz ze slinutých karbidů jsou Gühring, Ceratizit, Sandvik Coromant, Liss, Carbide, Inova Tools, aj.

Dokonalá znalost procesu frézování, nastavení příznivých řezných a posuvových rychlostí, ale i vhodný výběr frézovacího nástroje pro konkrétní obráběcí operaci, může strojírenským firmám ušetřit nemalé peníze a navíc zefektivnit jejich výrobu.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. ŠVRČINA, Josef. *Podstata frézování* [online]. 2013, 6 s. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: [http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/\\_sablony/Praxe\\_II\\_a\\_III/VY\\_52\\_INOVACE\\_H-02-20.pdf](http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sablony/Praxe_II_a_III/VY_52_INOVACE_H-02-20.pdf)
2. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. 2003 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf). Studijní opory pro magisterskou formu studia.
3. HROŠKO, Pavol a Jozef KRESÁŇ. *Strojárstvo a ostatná kovopracúvacia výroba II* [online] 2015, 180 s. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://zoei.sssebrno.cz/frezovani-rovinnych-ploch/>
4. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
5. SPŠ Ostrava - Vítkovice, příspěvková organizace. *Frézování* [online]. 2015, 7 s. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: [http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/STT/STT2-10\\_Frezovani\\_RAJ.pdf](http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/STT/STT2-10_Frezovani_RAJ.pdf). Studijní opory
6. KUDELA, Miroslav. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
7. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: [http://uvp3d.cz/drtic/wp-content/uploads/2014/07/UvP\\_STR\\_ST45\\_002\\_001.jpg](http://uvp3d.cz/drtic/wp-content/uploads/2014/07/UvP_STR_ST45_002_001.jpg)
8. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
9. BORO VAN, Petr. *Moderní řezné materiály 1. část (2)* [online] 2012. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/moderni-rezne-materialy-1-cast-2>. Technický týdeník.
10. SKOTNICOVÁ, Kateřina a Miroslav KURSA. *Prášková metalurgie* [online]. 2013, 157 s. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: [http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/03\\_Materialov%C3%A9\\_inzenyrstvi/06\\_Praskova\\_metalurgie/Skotnicova\\_Praskova\\_metalurgie.pdf](http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/03_Materialov%C3%A9_inzenyrstvi/06_Praskova_metalurgie/Skotnicova_Praskova_metalurgie.pdf). Studijní opory.
11. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.simon.de/media/images/sinter/schema-fertigungsprozess.gif>
12. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: [http://www.kobelco.co.jp/english/products/ip/img/product\\_cip\\_04\\_i\\_01.gif](http://www.kobelco.co.jp/english/products/ip/img/product_cip_04_i_01.gif)
13. CORDISCO, Nick. *Maximizing vacuum furnace gas quenching performance* [online]. 2013, 4 s. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://solarmfg.com/wp-content/uploads/2013/03/Solar-Reprint-Max-Vacuum-LoResv2.pdf>
14. [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: [http://www.destinytool.com/uploads/2/4/9/5/24954651/2043311\\_orig.png](http://www.destinytool.com/uploads/2/4/9/5/24954651/2043311_orig.png)
15. ZČU Plzeň, oddělení povrchového inženýrství. *Prášková metalurgie* [online]. 2006, 84s. [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/praskova\\_metalurgie.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/praskova_metalurgie.pdf)

16. SANDVICK HARD MATERIALS, *Cemented karbide* [online]. 2013 [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://www.allaboutcementedcarbide.com/03.html>
17. [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: [http://www.allaboutcementedcarbide.com/01\\_05\\_2395.gif](http://www.allaboutcementedcarbide.com/01_05_2395.gif)
18. [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: [http://www.allaboutcementedcarbide.com/01\\_05\\_2398.gif](http://www.allaboutcementedcarbide.com/01_05_2398.gif)
19. [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: [http://www.allaboutcementedcarbide.com/01\\_03\\_2135.gif](http://www.allaboutcementedcarbide.com/01_03_2135.gif)
20. CERAZIT, *Wear parts komplete programme* [online]. 2015, 246 s. [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: [http://www.cerazit.com/uploads/tx\\_extproduct/files/GD\\_KT\\_PRO-0272-0915\\_SEN\\_ABS\\_V1.pdf](http://www.cerazit.com/uploads/tx_extproduct/files/GD_KT_PRO-0272-0915_SEN_ABS_V1.pdf)
21. [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: [http://www.allaboutcementedcarbide.com/01\\_04\\_2258.gif](http://www.allaboutcementedcarbide.com/01_04_2258.gif)
22. LISS, *Katalog povlaků PLATIT* [online]. 2012, 38 s. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: [http://www.liss.cz/files/katalog\\_povlaku.pdf](http://www.liss.cz/files/katalog_povlaku.pdf)
23. [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollection/Images/Technical%20guide/Pablo/H%20Materials/081706.jpg>
24. MMSPEKTRUM, *Trendy v povlakování slinutých karbidů* [online]. 2001, 43 s. [cit. 2016-04-08]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>
25. BAĎURA, Zdeněk. *Řezné materiály* [online]. 2014, 35 s. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: [ftp://afnet.upol.cz/Public/AFNET/2013-05-09%20Sem%20Moderni%20technologie%20SebP%20%2814%29/00\\_%20TBC%20prezentace/%C5%98ezn%C3%A9%20materi%C3%A1ly%20%28UMT-SLO%29.pdf](ftp://afnet.upol.cz/Public/AFNET/2013-05-09%20Sem%20Moderni%20technologie%20SebP%20%2814%29/00_%20TBC%20prezentace/%C5%98ezn%C3%A9%20materi%C3%A1ly%20%28UMT-SLO%29.pdf)
26. SHM, PRAMET TOOLS, *Progresivní PVD povlaky pro frézování kolejnic* [online]. 2014, 3 s. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: [http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2014/06/2014\\_06.pdf](http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2014/06/2014_06.pdf)
27. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/multimedia/image/24/2418.jpg>
28. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: [http://www.mmspektrum.com/content/image/gallery/12\\_2013\\_76\\_1386669201/emo\\_nastroje\\_obr\\_14.jpg](http://www.mmspektrum.com/content/image/gallery/12_2013_76_1386669201/emo_nastroje_obr_14.jpg)
29. PODANÝ, Pavel. *Tenké vrstvy* [online]. 2006, 77 s. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf)
30. ŠÍMA, M. a M. JÍLEK, *Vytváření otěruvzdorných povlaků na nástrojích technologii PVD* [online]. 2014, 8 s. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: [https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/attachments/302/Technologie\\_\\_PVD.pdf](https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/attachments/302/Technologie__PVD.pdf)
31. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: [http://lnf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/images/c/ce/Sputter\\_Deposition.png](http://lnf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/images/c/ce/Sputter_Deposition.png)
32. TAEGUTEC, *Výroba VBD a druhy povlaků* [online]. 2010, 6 s. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: [http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka\\_obrabeni\\_331.pdf](http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni_331.pdf)

33. ŠÍMA, M., M. JÍLEK, P. HOLUBÁŘ a O. ZINDULKA, *Měření vlastností povlaků na nástrojích* [online]. 2004, 30 s. [cit. 2016-04-20]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-povlaku-na-nastrojich.html>
34. ZPS-FN, *Společnost ZPS-FN a.s.* [online]. 2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/spolecnost-zps-fn-a-s/>
35. ZPS-FN, *Frézy válcové čelní dlouhé* [online]. 2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/produkty/detail/frezy-valcove-celni-dlouhe,-45-,-din-6527-1,-typ-hr,-hladka-stopka,-sk,-kod-s119602,-prumer-16-mm1/>
36. ZPS-FN, *Frézy válcové čelní dlouhé* [online]. 2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/produkty/detail/frezy-valcove-celni-dlouhe,-2-brity-do-stredu,-40-42-,-din-6527-1,-typ-n,-hladka-stopka,-sk,-kod-s151602,-prumer-8-mm/>
37. ZPS-FN, *Frézy čtvrtkruhové vyduté* [online]. 2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/produkty/detail/frezy-ctvrtkruhove-vyduce,-typ-n,-hladka-stopka,-sk,-kod-s360002,-prumer-2-mm/>
38. SECO, *Update 2016-1* [online]. 2015, 172 s. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: [https://www.secotools.com/CorpWeb/Czech%20Republic/katalogy/016119\\_CZ\\_CAT\\_Update\\_2016-1.pdf](https://www.secotools.com/CorpWeb/Czech%20Republic/katalogy/016119_CZ_CAT_Update_2016-1.pdf)
39. SECO, *Monolitní karbidové frézy* [online]. 2014, 344 s. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: [http://www.secotools.com/CorpWeb/Czech%20Republic/katalogy/2015/CZ\\_Catalog\\_Solid%20end%20mills\\_2015\\_Inlay\\_LR.pdf](http://www.secotools.com/CorpWeb/Czech%20Republic/katalogy/2015/CZ_Catalog_Solid%20end%20mills_2015_Inlay_LR.pdf)
40. DORMER PRAMET, *Profil společnosti* [online]. 2016 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.dormerpramet.com/cs-cz/company/who-we-are>
41. PLOBERGER, *Fréza stopková S802HB* [online]. 2016 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://shop.ploberger.cz/Obr-b-n/Fr-zy/Fr-za-stopkov-S802HB-HM-Alcrona-DIN-6527K-1.html#>
42. DORMER PRAMET, *S802HB* [online]. 2016 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.dormerpramet.com/cs-cz/products/product-details?psf=S802HB&psfid=DORS802HB>
43. PLOBERGER, *Fréza rádiusová S511* [online]. 2016 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://shop.ploberger.cz/Obr-b-n/Fr-zy/Fr-za-r-diusov-S511-HM-X-CEED-1.html>
44. DORMER PRAMET, *S511* [online]. 2016 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.dormerpramet.com/cs-cz/products/product-details?psf=S511&psfid=DORS511>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
<b>CBN</b>	[-]	kubický nitrid boru
<b>CVD</b>	[-]	Chemical Vapor Deposition
<b>HCP</b>	[-]	Hexagonal Closed Packed (šesterečná těsně uspořádaná mřížka)
<b>HRC</b>	[-]	tvrdost dle Rockwella
<b>HV</b>	[-]	tvrdost podle Vickerse
<b>PCD</b>	[-]	polykrystalický diamant
<b>PVD</b>	[-]	Physical Vapour Deposition
<b>SK</b>	[-]	slinutý karbid
<b>WC</b>	[-]	karbid wolframu
<b>ZPS-FN</b>	[-]	ZPS-Frézovací nástroje

Symbol	Jednotka	Popis
<b>A<sub>Di</sub></b>	[mm <sup>2</sup> ]	jmenovitý průřez třísky
<b>A<sub>Dmax</sub></b>	[mm <sup>2</sup> ]	maximální jmenovitý průřez třísky
<b>C</b>	[mm]	rohové sražení
<b>C<sub>Fc</sub></b>	[-]	konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu
<b>D</b>	[mm]	průměr nástroje
<b>D<sub>n</sub></b>	[mm]	průměr krčku
<b>F<sub>c</sub></b>	[N]	celková řezná síla
<b>F<sub>c</sub>; F<sub>cNi</sub>; F<sub>f</sub>; F<sub>fNi</sub></b>	[N]	složky celkové řezné síly působící na jeden břit
<b>F<sub>i</sub></b>	[N]	celková řezná síla působící na jeden břit
<b>H</b>	[mm]	hloubka záběru
<b>L</b>	[mm]	délka nástroje
<b>R</b>	[mm]	rádus
<b>R<sub>a</sub></b>	[ μ m]	střední aritmetická hodnota drsnosti
<b>R<sub>q</sub></b>	[ μ m]	střední kvadratická hodnota drsnosti
<b>a<sub>p</sub></b>	[mm]	šířka záběru ostří
<b>b<sub>i</sub></b>	[mm]	jmenovitá šířka třísky



<b>d</b>	[mm]	průměr upínacího prvku
<b>f<sub>n</sub></b>	[mm]	posuv na otáčku
<b>f<sub>z</sub></b>	[mm]	posuv na zub
<b>h<sub>i</sub></b>	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
<b>k<sub>ci</sub></b>	[MPa]	měrná řezná síla
<b>l</b>	[mm]	délka řezné části
<b>l<sub>n</sub></b>	[mm]	délka nástroje po krček
<b>n</b>	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky nástroje
<b>n<sub>z</sub></b>	[-]	počet břitů v záběru
<b>v<sub>c</sub></b>	[m.min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
<b>v<sub>f</sub></b>	[mm.min <sup>-1</sup> ]	posuvová rychlost
<b>x</b>	[-]	exponent vlivu tloušťky třísky
<b>z</b>	[-]	počet zubů (břitů) frézy
<b>α</b>	[°]	úhel sklonu ostří
<b>γ</b>	[°]	úhel čela
<b>κ<sub>r</sub></b>	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
<b>λ</b>	[°]	úhel šroubovice
<b>π</b>	[-]	Ludolfovo číslo
<b>φ<sub>i</sub></b>	[°]	úhel posuvového pohybu
<b>φ<sub>max</sub></b>	[-]	maximální úhel posuvového pohybu
<b>ψ</b>	[°]	úhel záběru frézy

