VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA PREZENTAČNÍHO PŘEDMĚTU ZA POMOCÍ CAD/CAM TECHNOLOGIE

PRODUCTION OF A PRESENTATION ARTICLE USING THE CAD/CAM TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE Lukáš VESELÝ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Josef SEDLÁK, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2012

Místo tohoto listu bude vloženo zadání (oboustranně). Zadání musí být vevázáno v obou vyhotoveních práce. Do druhého výtisku bude vložena kopie.

Tento list není třeba tisknut!

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá obecnou terminologií a technologií třískového obrábění – zejména operací frézování s následným popisem nástrojových materiálů pro řezné nástroje. Součástí práce je návrh a tvorba modelu prezentačního předmětu pomocí softwaru Autodesk Inventor Professional 2010. Poslední část práce je zaměřena na návrh a tvorbu obráběcích strategií pomocí CAM softwaru PowerMill v. 9, verifikací vytvořených drah a následnou výrobou na konzolové vertikální frézce FV 25 CNC s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530.

Klíčová slova

frézování, nástroj, fréza, obrobek, materiál, stroj

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with general terminology and technology of machining - particularly milling with description of tool materials for cutting tools. Part of thesis is creating scheme and model of presentation object with software Autodesk Inventor Professional 2010. Last part of thesis is focused on creating a blueprint and machining strategy with CAM software PowerMill v. 9, verification of created lanes creation itself on vertical milling machine FV 25 CNC with guiding system Heidenhain iTNC 530.

Key words

Milling, Tool, Milling Cutter, Workpiece, Material, Machine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VESELÝ, Lukáš. *Výroba prezentačního předmětu za pomocí CAD/CAM technologie*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 73 s. příloh 0. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Sedlák Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Výroba prezentačního předmětu za pomocí CAD/CAM technologie** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. 5. 2012

Datum

Lukáš Veselý

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu Ing. Josefu Sedlákovi, Ph.D. za odborné rady, vzorové vedení, konzultace a čas, který mi věnoval při realizaci mé bakalářské práce. Dále mu děkuji za zařízení veškerého potřebného k realizaci obrábění. Současně děkuji panu Jiřímu Čechovi za obrábění prezentačního předmětu. Rovněž děkuji Jaroslavu Křížovi za vyrobení dřevěného rámu. Dále tímto děkuji svému otci – Stanislavu Veselému za opatření materiálu pro výrobu prezentačního předmětu.

V neposlední řadě děkuji rodičům za projevenou trpělivost při studiu celého bakalářského studia a za poskytnutý volný čas při psaní bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT 4
PROHLÁŠENÍ 5
PODĚKOVÁNÍ 6
OBSAH 7
ÚVOD 9
2 OBECNÁ TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ 10
2.1 Válcové frézování 11
2.1.1 Nesousledné frézování 11
2.1.2 Sousledné frézování 12
2.2 Čelní frézování 12
2.3 Okružní frézování 13
2.4 Planetové frézování 13
2.3 Obecné vzorce pro frézování 14
2.4 Hlavní typy frézovacích operací 18
2.5 Frézovací stroje 19
2.5.1 Konzolové frézky 19
2.5.2 Stolové frézky 21
2.5.3 Rovinné frézky 21
3 CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE 23
3.1 Slinuté karbidy 26
3.1.1 Nepovlakované slinuté karbidy 27
3.1.2 Povlakované slinuté karbidy 35
3.2 Cermety 41
3.2.1 Výchozí materiály a jejich vlastnosti 41
3.2.2 Výroba cermetů 42
3.2.3 Struktura a vlastnosti cermetů 43
3.3 Řezná keramika 44
3.3.1 Výchozí materiály a jejich vlastnosti 45
3.3.2 Výroba řezné keramiky 47
3.3.3 Struktura a vlastnosti řezné keramiky 47
3.4 Supertvrdé řezné materiály 48
3.4.1 Diamant 49
3.4.2 Kubický nitrid boru 50
4 VYTVOŘENÍ PREZENTAČNÍHO PŘEDMĚTU V PROGRAMU AUTODESK INVENTOR 51

4.1 Program Autodesk Inventor Professional 51
4.2 Popis pracovního prostředí programu Autodesk Inventor Professional 51
4.3 Postup tvorby modelu 53
4.3.1 Tvorba náčrtu 54
4.3.2 Tvorba vysunutí 55
4.3.3 Tvorba zkosení hran 56
4.3.4 Zhotovení textu – reliéfu 57
4.3.5 Hotový model 60
5. VÝROBA PREZENTAČNÍHO PŘEDMĚTU NA VERTIKÁLNÍ FRÉZCE FV 25 CNC S ŘÍDICÍM SYSTÉMEM HEIDENHAIN ITNC 530 61
5.1 Tvorba řídicího programu pro výrobu prezentačního předmětu 61
5.1.1 Popis pracovního prostředí programu PowerMill 9 61
5.1.2 Import modelu 62
5.1.2 Definice polotovaru 63
5.1.3 Technologické strategie 63
5.2 Výroba prezentačního předmětu 65
5.2.1 Popis konzolové vertikální frézky FV 25 CNC s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530 65
5.2.2 Popis použitých nástrojů 66
5.2.3 Popis zvoleného materiálu 67
5.2.4 Samotná výroba prezentačního předmětu 67
ZÁVĚR 70
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 71
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 73

ÚVOD

Proces frézování je výrobní technologií, kterou se obrábí zejména nerotační skříňové polotovary. V současné době se ale díky číslicovému řízení strojů dají vyrábět výrobky obsahující rotační či tvarové plochy poměrně snadno. Díky tomuto se snižují výrobní časy, protože není již potřeba přemisťovat obrobky na jiné stroje, což je efektivní a díky tomu se snižují celkové náklady na výrobu. Doba jde stále dopředu a s ní i vývoj strojů řízených počítačem.

Nynější technologie umožňuje obrábět a vyrábět nepřeberné množství různých výrobků, od miniaturních součástí do počítačů či mobilů, až po obří součástky do různých strojů či konstrukcí.

Pro efektivnější obrábění a snížení výrobních časů jde kupředu i vývoj materiálů pro řezné nástroje. Moderní technologie slinování a výroba různých prášků umožňuje specifické povlakování řezných nástrojů, které tak zlepšují jejich vlastnosti a jejich trvanlivost. Výzkumem materiálů pro řezné nástroje se zabývá spousta firem po celém světě.

Pro snazší představení výsledného modelu jsou ve strojírenském průmyslu hojně využívány různé softwary pro 3D modelování, jako je např. program Autodesk Inventor či SolidWorks. Tyto programy umožňují autentické zobrazení výsledného obrobku pomocí imitace různých materiálů – kovy, plasty, gumy, stavební materiál aj., včetně jeho chemického složení a fyzikálních vlastností. Nynější doba umožňuje import zkonstruovaných modelů do programů pro tvorbu a verifikaci drah, jako je např. program PowerMill aj. Tyto programy se buď pomocí přenosného média (CD, DVD, flash disk), nebo přes webové rozhraní nahrají do počítače u obráběcího stroje.

Výsledkem práce bude vznik prezentačního předmětu – puku. Puk bude vystaven v pohostinství ve sportovním areálu v Řečici. Tento předmět byl zvolen z toho důvodu, že hokej se stal mým oblíbeným sportem a aktivně ho hraji za tým HC Berani Řečice. Nápis na puku je bez interpunkce z toho důvodu, že šířka interpunkčních znamének byla příliš úzká pro dostupné nástroje.

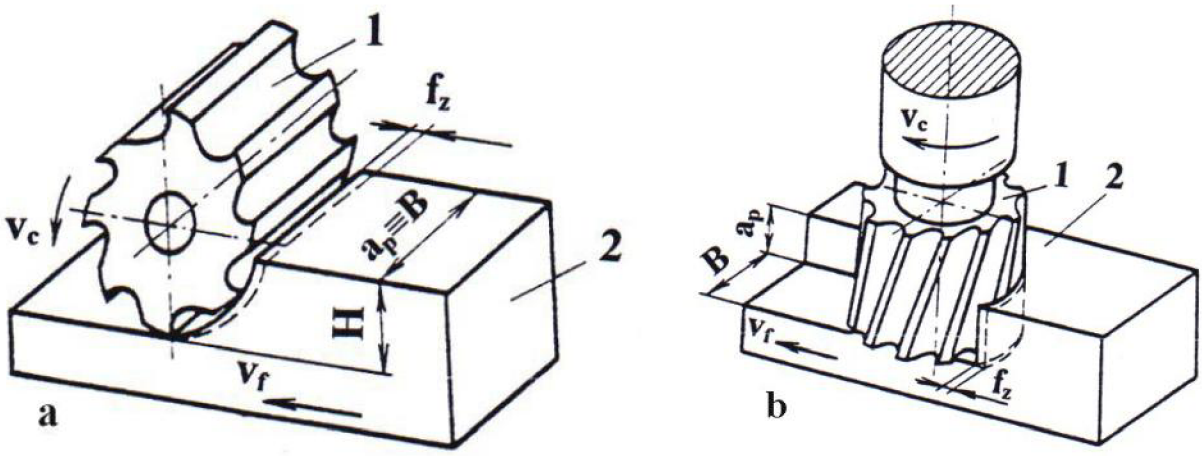
2 OBECNÁ TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ

Operace frézování je nejrozšířenější a nejefektivnější metoda obrábění rovinných a tvarových ploch. Je to metoda, při níž se materiál obrobku odebírá vícebřitým nástrojem – frézou, který se otáčí kolem své osy a pohybuje v osách *x, y* a *z* kolem obrobku, v předem daném směru. Právě díky tomuto způsobu obrábění je frézování tak efektivní univerzální metodou obrábění. Hlavní pohyb koná nástroj a vedlejší obráběný materiál, který se pohybuje převážně kolmo k ose nástroje. Řezný proces frézování je přerušovaný, kde každý zub frézy odřezává krátké třísky různé tloušťky[1,2,3].

První zmínka o použitelném frézovacím stroji – frézce, je známá někdy z konce 19. století. U moderních frézovacích strojů lze posuvové pohyby plynule měnit a mohou být realizovány ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky)[1,2].

Moderní frézování je velmi univerzální a všestrannou metodou obrábění. V několika uplynulých letech se frézování společně s vývojem obráběcích strojů vyvinulo do metod, které umožňují obrábění ve velmi širokém rozmezí konfigurací. Výběr metod na dnešních víceosých strojích není jednoduchý – kromě všech běžných aplikací lze frézováním obrábět i otvory, dutiny, povrchy, které byly dříve soustruženy, závity atd. Vývoj nástrojů přispěl rovněž k novým možnostem zvýšení produktivity, spolehlivosti a konzistence kvality, což je umožněno technologiemi využívajícími VBD (vyměnitelné břitové destičky) a nástrojů z monolitních karbidů[3].

Z technologického hlediska lze frézování rozdělit na dva základní druhy. Frézování válcové (Obr. 2.1a) (frézování obvodem frézy) a frézování čelní (Obr. 2.1b) (frézování čelem frézy)[1].

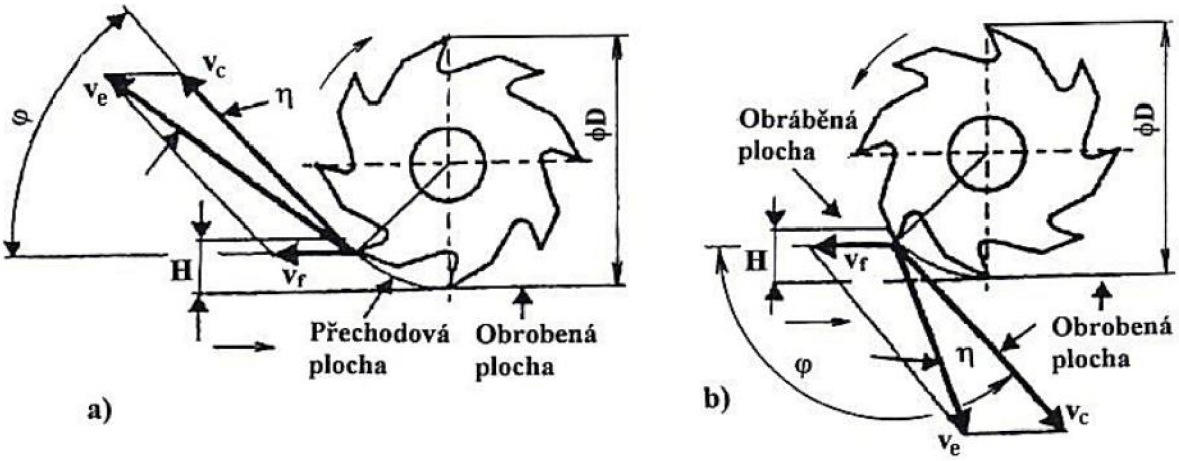


Obr. 2.1 Základní způsoby frézování[2].

a – válcové frézování, **b** – čelní frézování
1 – fréza, **2** – obrobek, $\mathbf{a_p}$ – šířka záběru ostří, **B** – šířka frézované plochy,
H – hloubka odebírané vrstvy, $\mathbf{v_f}$ – posuvová rychlost, $\mathbf{f_z}$ – posuv na zub, $\mathbf{v_c}$ – řezná rychlost.

2.1 Válcové frézování

„Válcové frézování se převážně uplatňuje při práci s válcovými a tvarovými frézami“[1]. Zuby nástroje jsou situovány pouze na obvodu frézy. Hloubka odebírané tloušťky H se nastavuje kolmo na osu nástroje a na směr posuvu. Obráběná plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. Válcové frézování v závislosti na kinematice obráběcího procesu lze rozdělit na frézování nesousledné (proti směru otáčení nástroje) (Obr. 2.2a) a na frézování sousledné (ve směru otáčení nástroje) (Obr. 2.2b). Z těchto dvou základních způsobů frézování se odvíjejí některé další možnosti způsobu frézování, jako např. frézování okružní a frézování planetové[1,2].



Obr. 2.2 Kinematika válcového frézování[2].

a –- nesousledné frézování, **b** – sousledné frézování
D – průměr frézy, **H** – hloubka odebírané vrstvy, $\mathbf{v_c}$ – řezná rychlost, $\mathbf{v_f}$ – posuvová rychlost,
$\mathbf{v_e}$ – rychlost řezného pohybu, **ϕ** – úhel posuvového pohybu, **η** – úhel posuvového pohybu.

2.1.1 Nesousledné frézování

Při tomto způsobu frézování je smysl pohybu (rotace) frézy proti pohybu (posuvu) obrobku. Obrobená plocha vzniká při vnikání do obráběného materiálu. Z nulové hodnoty se postupně tloušťka třísky mění na hodnotu maximální[1,2]. *„K oddělování třísky nedochází v okamžiku její nulové tloušťky, ale po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem. Přitom vznikají silové účinky a deformace způsobující zvýšené opotřebení břitu. Řezná síla při protisměrném frézování má složku, která působí směrem nahoru a odtahuje obrobek od stolu“*[1].

Hlavní výhody:

- trvanlivost nástroje nezávisí na okujích, písčitém povrchu obrobku apod.,
- není zapotřebí vymezování vůle mezi posuvovým šroubem a maticí stolu stroje,
- menší opotřebení šroubu a matice,
- záběr zubů frézy při jejím vřezávání nezávisí na hloubce řezu[1].

2.1.2 Sousledné frézování

Při frézování sousledném je smysl pohybu (rotace) frézy ve směru pohybu (posuvu) obráběného materiálu. Při vnikání zubu frézy do obrobku vzniká maximální tloušťka třísky. Když zub vychází ze záběru, tímto vzniká obrobená plocha. *„Řezné síly působí obvykle směrem dolů. Sousměrné frézování může probíhat pouze na přizpůsobeném stroji při vymezené vůli a předpětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézky. V opačném případě způsobuje vůle nestejnosměrný posuv, při němž může dojít k poškození nástroje, popř. i stroje“*[1].

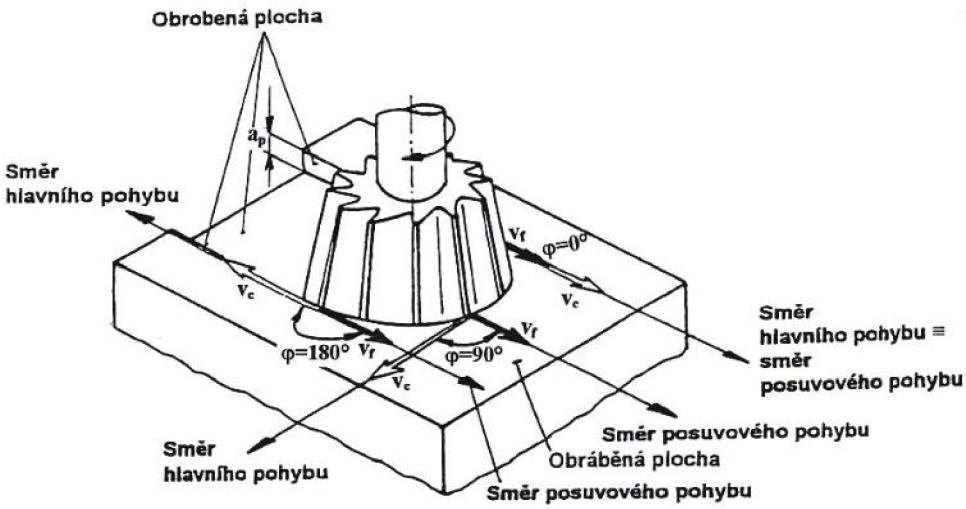
Hlavní výhody:

- vyšší trvanlivost břitů, což při použití vyšších řezných rychlostí a posuvů,
- menší potřebný řezný výkon,
- řezná síla přitlačuje obrobek ke stolu, a proto lze použít jednodušších upínacích přípravků,
- menší sklon ke chvění,
- obvykle menší sklon ke tvorbě nárůstku,
- nižší drsnost obrobeného povrchu[1].

2.2 Čelní frézování

„Čelní frézování se uplatňuje při práci s čelními frézami, u kterých jsou břity vytvořeny na obvodu i čele nástroje a hloubka odebírané vrstvy se nastavuje ve směru osy nástroje“[1]. Čelní frézování je nejrozšířenější frézovací operace a lze ji provádět s využitím velkého množství různých nástrojů. Nejčastěji se používají frézy s úhlem nastavení 45°, ale za určitých podmínek se také používají frézy s kruhovými břitovými destičkami, frézy pro frézování do rohu nebo kotoučové frézy[1,2].

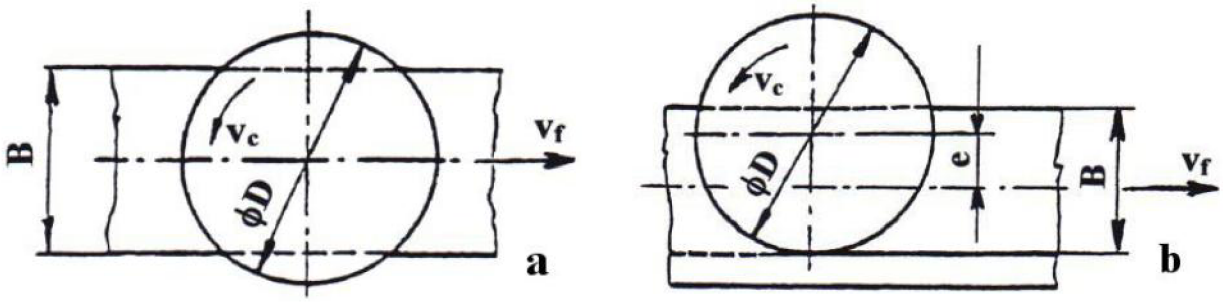
Základní pohyby čelního obrábění jsou naznačeny na (Obr. 2.3)[1].



Obr. 2.3 Kinematika čelního frézování[2].

$\mathbf{a_p}$ – šířka záběru ostří, $\mathbf{v_c}$ – řezná rychlost, $\mathbf{v_f}$ – posuvová rychlost, $\boldsymbol{\phi}$ – úhel posuvového pohybu.

Čelní frézování se dále dělí na symetrické čelní frézování (Obr. 2.4a) a nesymetrické čelní frézování (Obr. 2.4b). Toto rozdělení závisí na poměru šířky frézované plochy B, průměru frézy D a také na poloze osy frézy vzhledem k frézované ploše[1].

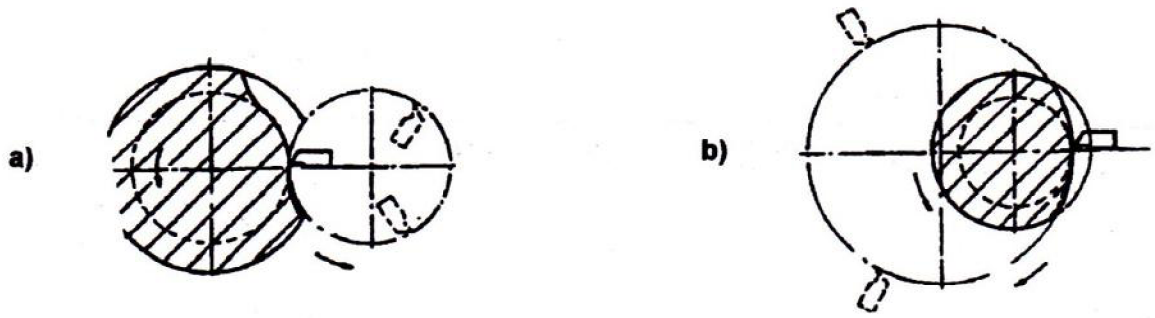


Obr. 2.4 Čelní frézování[1].

a – symetrické, **b** – nesymetrické.

2.3 Okružní frézování

Okružní frézování (Obr. 2.5) se nejčastěji používá při výrobě závitů a při obrábění dlouhých válcových tyčí. Nástrojem je frézovací hlava, která je osazená několika noži. Při řezání závitů koná frézovací hlava pouze rotační pohyb, kdežto při obrábění tyčí koná nástroj většinou pohyb rotační a posuvný. Další potřebné pohyby koná obrobek[1].

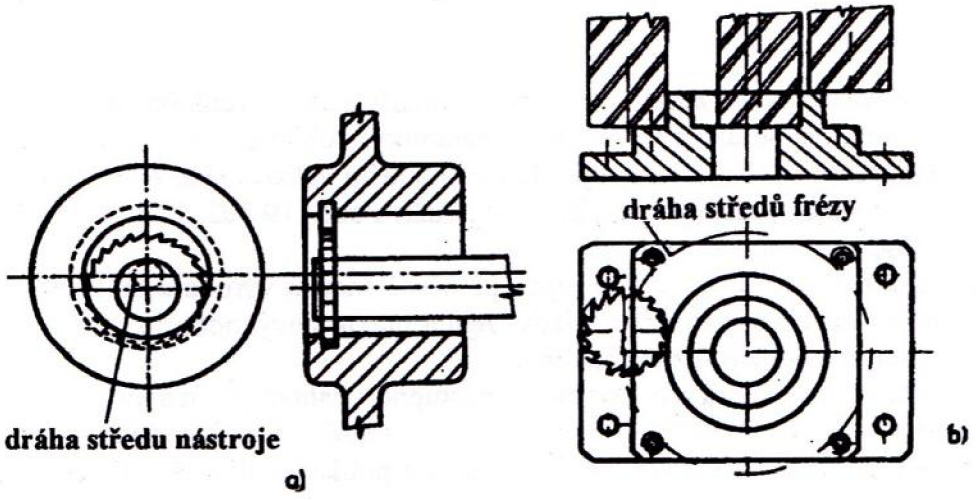


Obr. 2.5 Kinematika okružního frézování[1].

a – obrobek vně nástroje, **b** – obrobek uvnitř nástroje.

2.4 Planetové frézování

Planetové frézování (Obr. 2.6) se používá u obráběcích center vybavených kruhovou interpolací a také u číslicově řízených frézek. Jelikož pohyb nástroje může být u těchto strojů řízen po kružnici, lze tak obrábět části nebo i celé rotační plochy[1]. *„Tento způsob se využívá pro frézování vnitřních zápichů, kruhových zaoblení, vnějších válcových výstupků, větších otvorů a čelních ploch“*[1].



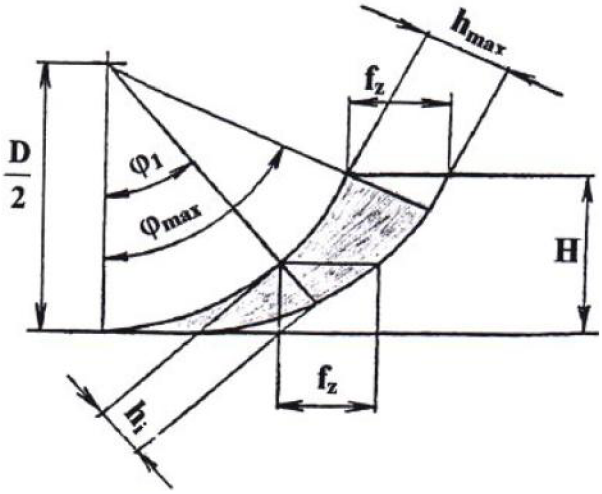
Obr. 2.6 Planetové frézování[1].

a – vnitřní zápichy, **b** – vnější a vnitřní válcové a čelní plochy.

2.3 Obecné vzorce pro frézování

Kinematika frézování je popsána několika veličinami, jako např. posuvná rychlost, řezná rychlost, rychlost řezného pohybu, tloušťka třísky, průřez třísky, aj.

Tloušťka třísky $\mathbf{h_i}$ se při nesousledném válcovém frézování mění (Obr. 2.7)[1].



Obr. 2.7. Změna jmenovité tloušťky třísky[2].

Tloušťka třísky h_i – jmenovitá tloušťka třísky v libovolné fázi jejího odřezávání[1]:

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z . sin\varphi_i \tag{2.1.}$$

kde: h_i [mm] – jmenovitá tloušťka třísky,
f_z [mm] – posuv na zub,
φ_i [°] – úhel posuvového pohybu.

Maximální tloušťka třísky h_{max} – maximální velikost jmenovité tloušťky třísky[1]:

$$h_{max} = f_z . \sin \varphi_{max} = f_z . \frac{2}{D} \sqrt{DH - H^2} \tag{2.2}$$

kde: h_{max} [mm] – maximální tloušťka třísky,
φ_{max} [°] – maximální úhel posuvového pohybu,
D [mm] – průměr frézy,
H [mm] – hloubka odebírané vrstvy.

Průřez třísky A_{Di} – jmenovitý průřez odebírané třísky[1]:

$$A_{Di} = h_i . a_p = f_z . a_p . sin\varphi_i \tag{2.3}$$

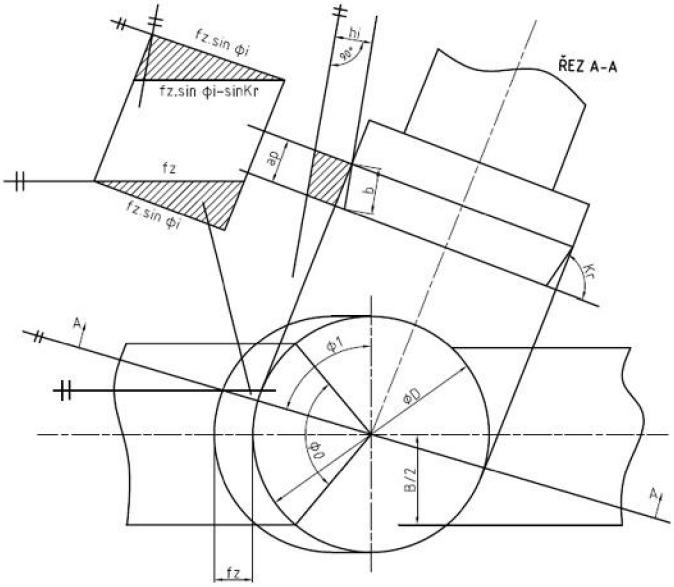
kde: A_{Di} [mm] – jmenovitý průřez třísky,
a_p [mm] – šířka záběru ostří.

Maximální průřez třísky A_{Dmax} – maximální velikost jmenovitého průřezu třísky[1]:

$$A_{Dmax} = h_{max} . a_p = f_z . a_p . sin\varphi_{max} \tag{2.4}$$

kde: A_{Dmax} [mm] – maximální průřez třísky.

Jmenovitý průřez třísky $\mathbf{A_{Di}}$ při čelním frézování se určí na základě poměrů sil na (Obr. 2.8)[1].



Obr. 2.8 Jmenovitý průřez třísky odebíraný zubem čelní frézy[1].

Tloušťka třísky $\mathbf{h_i}$ – jmenovitá tloušťka třísky při čelním frézování[1]:

$$h_i = f_z . sin\kappa_r . sin\varphi_i \tag{2.5}$$

kde: κ_r [°] – úhel nastavení frézy.

Šířka třísky $\mathbf{b_i}$ – jmenovitá šířka třísky je pro libovolné φ_i konstantní a rovná se[1]:

$$b = \frac{a_p}{sin\kappa_r} \tag{2.6}$$

kde: b [mm] – šířka třísky.

Průřez třísky $\mathbf{A_{Di}}$ – jmenovitý průřez třísky[1]:

$$A_{Di} = h_i . b = f_z . a_p . sin\varphi_i \tag{2.7}$$

Maximální průřez třísky $\mathbf{A_{Dmax}}$ – maximální velikost jmenovitého průřezu třísky při φ=0[1]:

$$A_{Dmax} = f_z . a_p \tag{2.8}$$

Řezná rychlost[3] v_c:

$$v_c = \frac{\pi . D . n}{1000} \tag{2.9}$$

kde: v_c [m.min^{-1}] – řezná rychlost,

n [ot.min^{-1}] – otáčky vřetene.

Otáčky vřetene[3] n:

$$n = \frac{v_c . 1000}{\pi . D} \tag{2.10}$$

Rychlost posuvu[3] v_f:

$$v_f = f_z . n . z_n \tag{2.11}$$

kde: z_n [ks] – celkový počet břitů na nástroji.

Rychlost řezného pohybu[2] v_e:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = n . 10^{-3} . \sqrt{(\pi D)^2 + (z_n . f_z)^2} \tag{2.12}$$

Počet zubů[2] n_z:

$$n_z = \frac{z_n . \varphi_{max}}{360°} \tag{2.13}$$

kde: n_z [ks] – počet zubů.

Velikost úběru materiálu[3] Q:

$$Q = \frac{a_p . a_e . v_f}{1000} \tag{2.14}$$

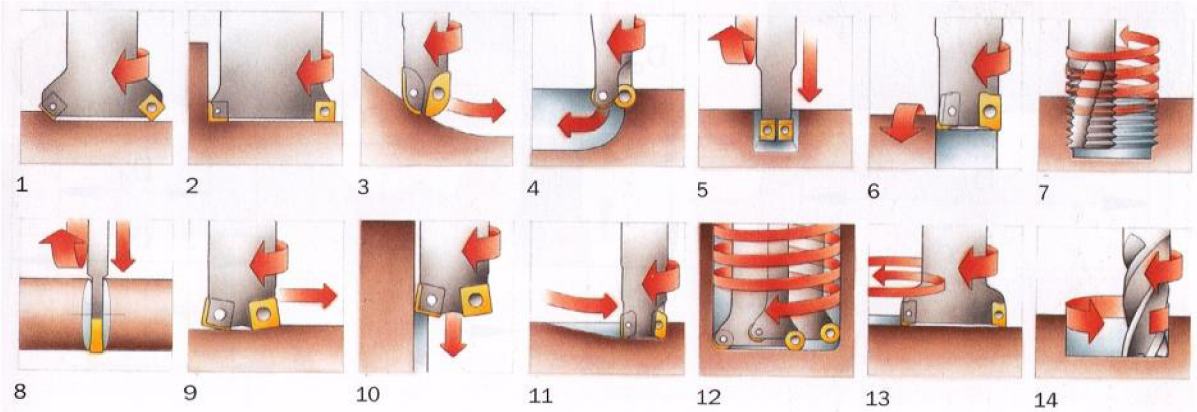
kde: Q [cm^3 . min^{-1}]– velikost úběru materiálu,

a_e [mm] – šířka záběru do obrobku.

2.4 Hlavní typy frézovacích operací

Rozdělení hlavních typů frézovacích operací podle účinku na součást nebo podle dráhy nástroje (Obr. 2.9)[3]:

- rovinné frézování,
- čelní frézování do rohu,
- kopírování,
- frézování dutin,
- frézování kotoučovou frézou,
- rotační frézování,
- frézování závitů,
- dělení materiálu,
- frézování s vysokým posuvem,
- ponorné frézování,
- zahlubování,
- šroubovicová interpolace,
- kruhová interpolace,
- odvalovací frézování.



Obr. 2.9 Hlavní typy frézovacích operací[3].

1 – rovinné frézování, **2** – čelní frézování do rohu, **3** – kopírování, **4** – frézování dutin, **5** – frézování kotoučovou frézou, **6** – rotační frézování, **7** – frézování závitů, **8** – dělení materiálu, **9** – frézování s vysokým posuvem, **10** – ponorné frézování, **11** – zahlubování, **12** – šroubovitá interpolace, **13** – kruhová interpolace, **14** – odvalovací frézování.

2.5 Frézovací stroje

Frézovací stroje – frézky jsou vyráběny a dodávány v nepřeberném počtů velikostí a modelů s různým zvláštním příslušenstvím. Z hlediska řízeného pracovního procesu se frézky rozlišují do dvou základních skupin, a to na ručně ovládané a programově řízené[1].

Dělení dle konstrukčně – technologické koncepce[2]:

- konzolové frézky,
- stolové frézky,
- rovinné frézky,
- speciální frézky.

„Velikost frézky určuje šířka upínací plochy stolu a velikost kužele ve vřetenu pro upnutí nástroje. Dalšími důležitými technickými parametry jsou maximální délky pohybu pracovního stolu nebo vřeteníku, rozsah otáček vřetena a posuvů, výkon elektromotoru pro otáčení vřetena a kvalitativní parametry dosahované u obrobených ploch“[1].

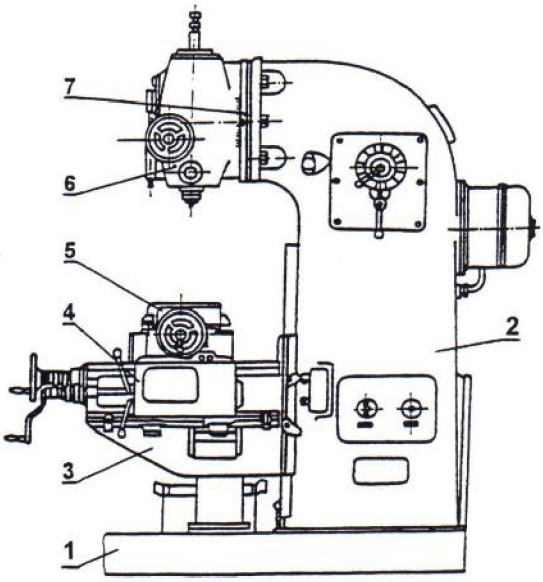
2.5.1 Konzolové frézky

Charakteristická část těchto strojů je zejména výškově přestavitelná konzola vedení stojanu. Po konzole koná pohyb příčný stůl společně s podélným pracovním stolem. Díky kombinaci těchto pohybů je zde umožněno přestavování obrobku, který je upnut na pracovním stole, ve třech pravoúhlých souřadnicích vzhledem k nástroji[1].

Tyto stroje jsou vhodné především pro frézování rovinných a tvarových ploch u menších a středně velkých součástí v kusové a malosériové výrobě. Jsou řazeny do tří hlavních skupin – konzolové frézky svislé (Obr. 2.10), konzolové vodorovné frézky (Obr. 2.11) a konzolové univerzální frézky (Obr. 2.12)[1].

Konzolové frézky svislé

Svislé konzolové frézky mají osu pracovního vřetene kolmou k upínací ploše stolu. Pracovní vřeteno je uložené buď ve svislé hlavě připevněné na stojanu stroje, nebo přímo ve stojanu. Svislou hlavu lze natáčet o ± 45° a vřeteno bývá svisle přestavitelné. Na těchto strojích se frézují především rovinné plochy rovnoběžné apod. K tomuto frézování se používají čelní frézy s kuželovou stopkou upínané přímo do kužele vřetene nebo s válcovou stopkou upnuté do upínače. Na větších strojích lze použít frézovací hlavy[1].

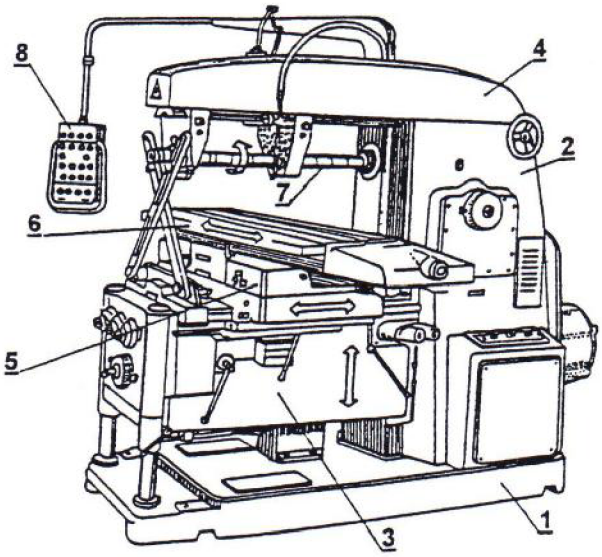


Obr. 2.10 Konzolová frézka svislá[2].

1 – základna, **2** – stojan, **3** – konzola, **4** – příčné sáně, **5** – podélný pracovní stůl, **6** – naklápěcí vřeteník, **7** – kruhová základna vřeteníku.

Konzolové frézky vodorovné

Vodorovné konzolové frézky (horizontky) mají osu pracovního vřetene vodorovnou a rovnoběžnou s plochou podélného stolu a kolmou na směr pohybu podélného stolu. Na těchto strojích se obrábějí převážně plochy rovnoběžné s upínací plochou stolu, drážky a tvarové plochy. Nejčastěji se na nich pracuje s válcovými frézami, kotoučovými frézami a frézami tvarovými[1].

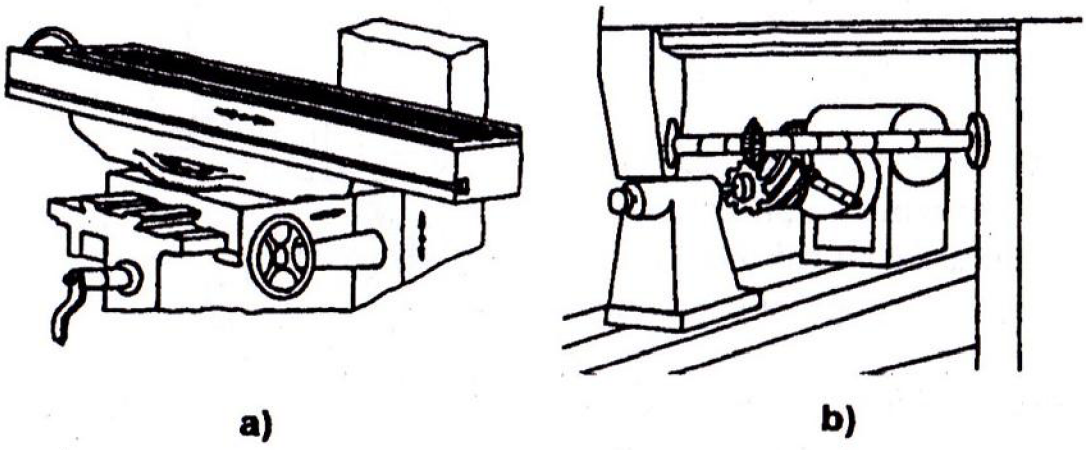


Obr. 2.11 Konzolová frézka vodorovná[2].

1 – základna, **2** – stojan, **3** – konzola, **4** – rameno, **5** – příčné sáně, **6** – podélný pracovní stůl, **7** – vřeteno, **8** – ovládací panel.

Konzolové frézky univerzální

Univerzální konzolové frézky jsou svojí konstrukcí podobné horizontálním. Liší se od nich tím, že jejich podélný stůl je otočný o ± 45° na obě strany ve vodorovné rovině kolem svislé osy kolmé k upínací ploše stolu[1].



Obr. 2.12 Konzolová frézka univerzální[1].

a – otočný podélný pracovní stůl, **b** – frézování zubové mezery válcové frézy.

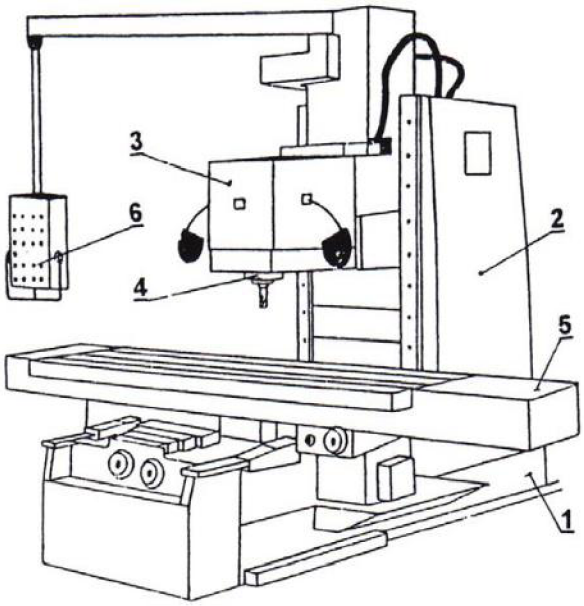
„Univerzálnost použití konzolových frézek je významně rozšířena zvláštním příslušenstvím, jako jsou různé hlavy, otočné stoly, dělící přístroje apod“[1].

2.5.2 Stolové frézky

Tyto frézky nemají konzolu, ale mají obvykle podélný příčný stůl. Pohyb ve svislém směru pro nastavení nástroje vzhledem k obráběnému materiálu je zajištěn přemisťováním frézovacího vřeteníku po vedení stolové frézky (Obr. 2.13)[1]. Na těchto strojích lze kvalitativně a produktivně obrábět těžší a rozměrnější obrobky. Dodávají se ve dvou provedeních a to jak ve svislém provedení, tak i ve vodorovném[1].

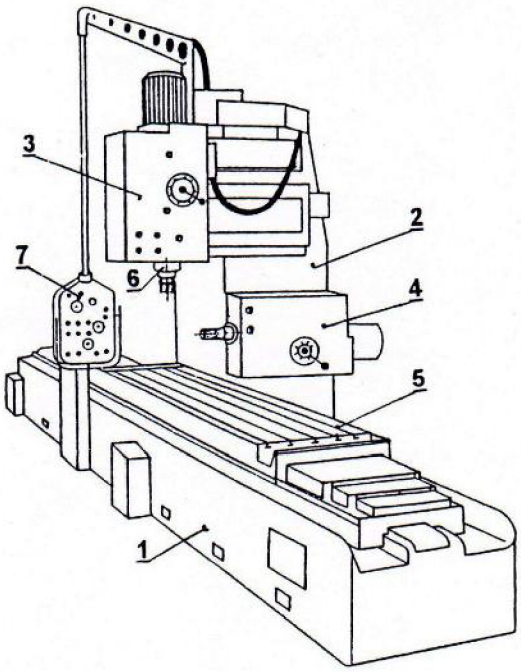
2.5.3 Rovinné frézky

Frézky rovinné patří k nejvýkonnějším druhům frézek. Jsou robustní konstrukce, tudíž se uplatňují při obrábění těžkých obrobků. Hodí se na kusovou a malosériovou výrobu, uplatňují se však dobře i ve výrobě sériové. Využívají se na nich nejčastěji frézovací hlavy při obrábění vodorovných, svislých a šikmých ploch a stopkové frézy při frézování úzkých ploch a drážek. U rovinných frézek (Obr. 2.14) má pracovní stůl pouze jeden stupeň volnosti, který se pohybuje v jednom vodorovném směru[1].



Obr. 2.13 Svislá stolová frézka[2].

1 – základní deska, **2** – stojan, **3** – vřeteník, **4** – vřeteno, **5** – pracovní stůl, **6** – ovládací panel.



Obr. 2. 14 Rovinná frézka[2].

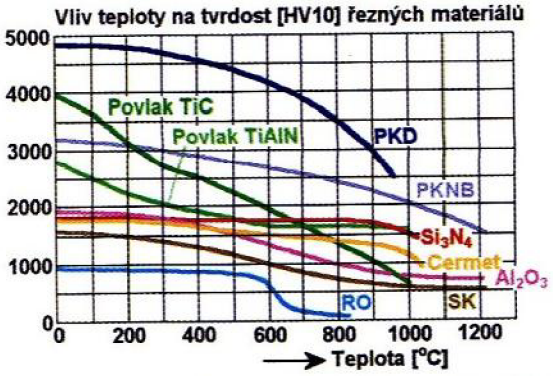
1 – lože, **2** – stojan, **3** – svislý vřeteník, **4** – vodorovný vřeteník, **5** – pracovní stůl, **6** – vřeteno, **7** – ovládací panel.

3 CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE

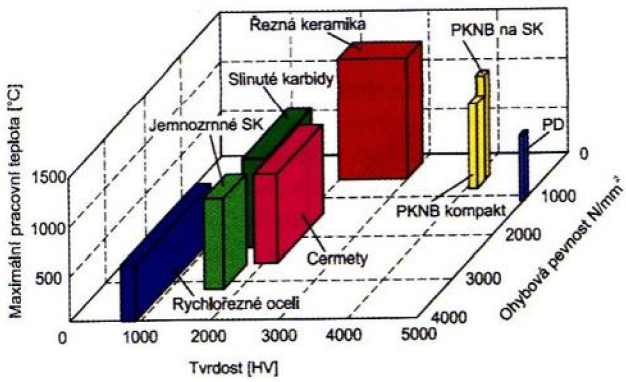
Strojírenský průmysl na celém světě používá při výrobě strojních součástí z rozdílných materiálů (kovových – oceli, litiny, slitiny Al, slitiny Cu, Slitiny Ni, slitiny Ti a nekovových – keramika, vláknově vyztužené kompozity atd.) různé metody obrábění, z nichž největší podíl zabírají soustružení, vrtání a frézování. K odebírání třísky a tvorbě nových součástí požadovaného tvaru, rozměrů a jakosti musí být k dispozici řezný nástroj, který má břit s odpovídající houževnatostí a současně vysokou tvrdostí v oblasti ostří. Tvrdost nesmí poklesnout ani při zvýšených pracovních teplotách (Obr. 3.1)[4,5].

Široký sortiment materiálů pro řezné nástroje, od nástrojových ocelí až po syntetický diamant, je příčinou celosvětového intenzivního výzkumu a vývoje v oblasti řezných materiálů a má úzkou souvislost s rozvojem konstrukčních materiálů určených pro obrábění. Současný hlavní problém není tedy hledání nových řezných materiálů, jelikož v blízké době nelze očekávat objevení zcela nového materiálu, ale optimální využití již známých materiálů s velmi přesným vymezením oblasti jejich využití. Prakticky každý nový druh nástrojového materiálu znamená posun použitelných řezných rychlostí k vyšším hodnotám[4,5].

„Aplikační oblasti materiálů pro řezné nástroje jsou vymezeny jejich fyzikálními (měrná hmotnost, velikost zrna, součinitel tření), chemickými (inertnost, stálost), teplenými (teplota tání, pracovní teplota, tepelná vodivost, délková roztažnost) a mechanickými vlastnostmi (tvrdost, modul pružnosti, pevnost v tlaku, a ohybu, lomová houževnatost)“[4] (Obr. 3.2). Nástrojové materiály s vysokou tvrdostí jsou vhodné k použití při vyšších řezných rychlostech a malých průřezech třísky (dokončovací obrábění), kde převládá spíše tepelné zatížení. Materiály s vyšší houževnatostí lze použít při vyšších posuvových rychlostech (hrubovací obrábění), zde díky většímu průřezu třísky převládá zatížení mechanické nad tepelným (Obr. 3.3)[4].

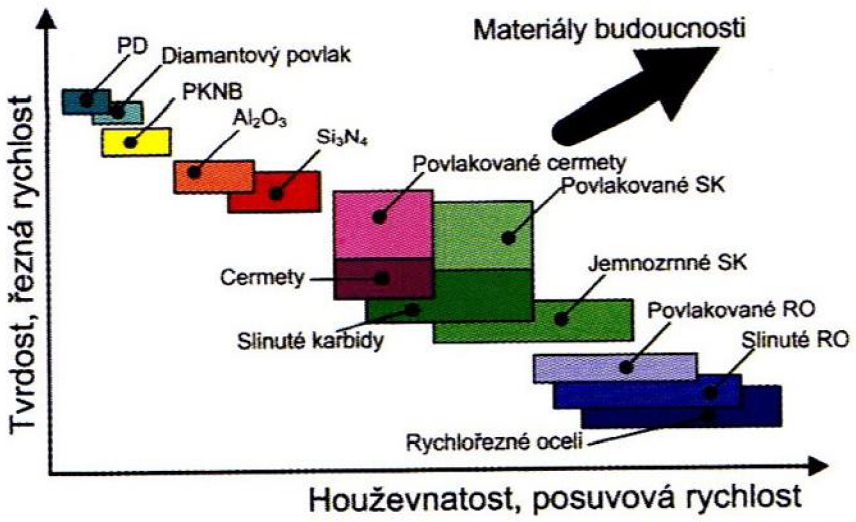


Obr. 3.1 Závislost nástrojových materiálů na teplotě[4].



Obr. 3.2 Vlastnosti materiálů pro řezné nástroje[4].

Slinuté karbidy (SK) mají nejvyšší modul pružnosti, lomovou houževnatost a ohybovou pevnost (Tab. 3.1). Díky těmto vlastnostem jsou SK vhodné pro použití při vysokých posuvových rychlostech a při těžkých přerušovaných řezech. Kvůli jejich nízké termomechanické stabilitě není možná aplikace při vyšších řezných rychlostech[4].



Obr. 3.3 Vliv mechanických vlastností nástrojového materiálu na pracovní podmínky[4].

Povlakované slinuté karbidy se skládají z pevného karbidového podkladu a z termochemicky stabilního tvrdého povlaku. Lze je tedy považovat za jednoduché kompozitní materiály. Výsledek tohoto složení dělá z povlakovaných SK nejvhodnější materiál pro vysoké řezné i posuvové rychlosti, přerušované řezy a velký úběr materiálu[4,5].

Tab. 3.1 Typické vlastnosti vybraných nástrojových materálů[4].

Vlastnost		Nástrojový materiál			
		Slinutý karbid	Cermet	Al_2O_3+TiC	Si_3N_4+přísady
Měrná hmotnost [g.cm^{-3}]		12,0÷15,1	5,6÷7,0	4,2÷4,3	3,2÷3,4
Pevnost v ohybu [MPa]		1000÷2400	1150÷1800	600÷900	600÷950
Tvrdost	[HV]	1900	2000	1000÷2400	1800÷2000
	[HRA]	90÷92	91÷93	93÷95	86÷95
Modul pružnosti v tahu [GPa]		520÷660	500	370÷420	300÷380
Souč. délkové roztažnosti [10^{-6}.K^{-1}]		4,5÷7,0	7,0÷7,5	1,5÷3,5	—
Měrná tepelná vodivost [W.m^{-1}.K^{-1}]		80	30	20÷25	30÷50
Lomová houževnatost [MPa.m$^{1/2}$]		10÷17	10	4,2÷6,5	5÷7

Řezná keramika (ŘK) na bázi Al_2O_3 (oxid hliníku – korund) se využívá při obrábění vysokými řeznými rychlostmi a nízkými posuvovými rychlostmi, protože má vysokou tvrdost za tepla a vysokou termochemickou stabilitu, ale nízkou houževnatost. ŘK na bázi Si_3N_4 (nitrid křemíku – neoxidová keramika) má houževnatost vyšší, a proto umožňuje použití vyšších posuvových rychlostí než ŘK na bázi Al_2O_3. Keramika je vhodná zejména pro obrábění šedých litin, naopak není příliš vhodná pro obrábění ocelí a tvárných litin, zde vykazuje rychlé opotřebení[4].

Cermety se se svojím využitím řadí mezi SK a ŘK. Tzn., že mohou být užity pro vyšší posuvové rychlosti než keramika a pro vyšší řezné rychlosti než slinuté karbidy. Dobře se uplatňují při obrábění korozivzdorných ocelí[4].

Syntetický diamant (Obr. 3.4) a kubický nitrid boru (Obr. 3.5) (KNB) mají obzvláště vysokou tvrdost a vynikající odolnost proti opotřebení. Vzhledem k ceně nástroje s těmito destičkami, omezeným možnostem změny tvaru nástroje a někdy ochotné reakci s některými obráběnými materiály jsou jejich aplikace omezeny na speciální případy obrábění. Syntetický diamant je vhodný pro obrábění neželezných slitin, nekovových materiálů a keramiky. KNB je vhodným nástrojovým materiálem pro obrábění superslitin, litin (tvrdost > 45 HRC), kalených ocelí a slinutých karbidů s vyšším obsahem kobaltu[4].

Obr. 3.4 Destičky ze syntetického diamantu[6].

Obr. 3.5 Destičky s povlakovaným KNB[7].

Vývoj budoucnosti bude zaměřen zejména na možnostech aplikace pro širší rozsah řezných podmínek. Další požadovaný faktor je zaručovaná trvanlivost a spolehlivost nástrojového materiálu bez jakékoliv poruchy. K velkému rozvoji dochází také u obráběných materiálů, proto musí být v souladu s těmito trendy vyvíjeny takové nástrojové materiály, se kterými lze tyto materiály efektivně a pohodlně obrábět. Z výš uvedeného je zřejmé, že neexistuje žádná přírodní ani člověkem vyrobená látka, která by byla univerzální pro řezné nástroje za jakýchkoliv podmínek. Je tedy velmi důležité znát podrobně fyzikální a mechanické vlastnosti každého konkrétního nástrojového materiálu a v souladu s nimi stanovit oblast jejich využití tak, aby výsledný obrobek byl obroben efektivně z hlediska času, produktivity a výrobních nákladů[4,5].

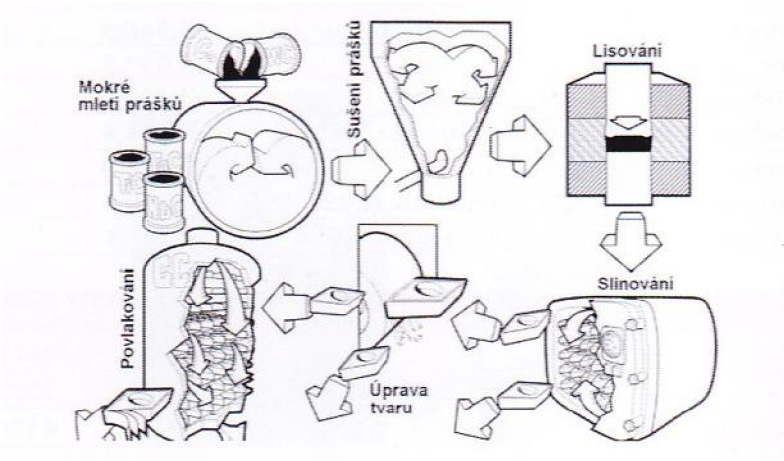
3.1 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou výrobkem práškové metalurgie. Proces práškové metalurgie sestává z mnoha operací, které pro dosažení požadovaných vlastností, mikrostruktury apod. musejí být náležitě prováděny a kontrolovány. Struktura a složení slinutých karbidů má rozhodující význam na kvalitu výrobku a tím i výkonnost, která je při obrábění důležitá. Výsledná struktura SK by měla být homogenní a reprodukovatelná[4,5].

Výroba slinutých karbidů

Podstatou výroby slinutých karbidů, používaných na řezné nástroje je lisování směsi prášků tvrdých karbidických částic s práškem pojícího kovu (nejčastěji kobaltu) a následné slinování za teploty blížící se bodu tavení pojiva. Tímto procesem vzniká kompaktní materiál, jenž vyniká poměrně vysokou pevností a tvrdostí blížící se tvrdosti výchozích karbidů. Celý postup lze rozdělit do následujících základních procesů (Obr. 3.6)[4,5].

- výroba, příprava prášků,
- formování směsi (lisování, vytlačování),
- slinování,
- lití,
- povlakování (pouze u povlakovaných SK).



Obr. 3.6 Postup výroby slinutých karbidů[4].

„Nejdůležitějšími faktory při výrobě prášků jsou vztah povrchu částic k jejich objemu a zvýšení hustoty vnitřních poruch, protože výrazně ovlivňují jejich technologické vlastnosti při lisování a slinování a tedy i konečné vlastnosti hotového výrobku“[4].

Slinování je tepelné zpracování při homologických teplotách 0,65÷0,80 složky s nejvyšší teplotou tavení. Slinováním se zvyšuje soudržnost výlisku zvětšením styčných ploch mezi částicemi, vytvořením slitin (popř. sloučenin) v místě styku a odstraněním deformačního zpevnění z výroby i zhutňování. Slinováním vznikne tedy kovové těleso při teplotách pod teplotou tavení prášku. Někdy nestačí slinování jednou. Při vyšších nárocích se aplikuje slinování vícekrát – nejčastěji dvakrát, jde tak o předslinování. Pokud je výrobek při slinování pod tlakem, potom se jedná o slinování pod tlakem. U vícesložkových soustav se teplota slinování řídí teplotou složky, která má nejvyšší teplotu tavení[8].

3.1.1 Nepovlakované slinuté karbidy

Nepovlakované slinuté karbidy současné doby pro řezné aplikace jsou podle normy ČSN ISO 513 označovány symboly HW a HF (s obsahem primárního WC)[4].

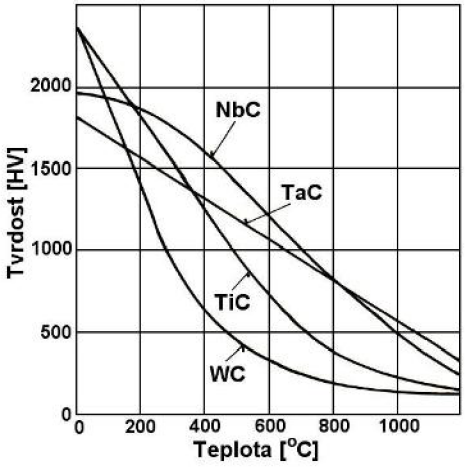
Rozdělení[4]:

- skupina **P** (označení modrou barvou),
- skupina **M**, (označení žlutou barvou),
- skupina K, (označení červenou barvou),
- skupina **N**, (označení zelenou barvou),
- skupina **S**, (označení hnědou barvou),
- skupina **H**, (označení tmavošedou barvou).

Každá skupina je vhodná pro jiné obráběné materiály a mají různé vlastnosti (Tab. 3.2). Základním karbidem pro výrobu všech druhů slinutých karbidů pro obrábění (povlakovaných i nepovlakovaných) je karbid wolframu (WC), pojícím kovem bývá kobalt (Co), jako další složky mohou být použity karbidy titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a chromu (Cr_3C_2). Každý karbid má jinou tvrdost závisející na teplotě (Obr. 3.7)[4,5].

Tab. 3.2 Skupiny SK a jejich použití[4,9].

Skupina	Podskupiny	vlastnosti, použití
P	P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50	Materiály tvořící dlouhou třísku (uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli). Velké řezné síly a značné opotřebení na čele (výmol).
M	M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40	Materiály tvořící třísku dlouhou a střední (lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny). Hrubovací operace. Středně až vysoké hodnoty řezných sil. Vydrolování ostří.
K	K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40	Materiály tvořící krátkou a drobivou třísku (šedé litiny, neželezné slitiny a nekovové materiály). Převládá abrazní a adhezní opotřebení. Relativně nízké řezné síly.
N	N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30	Neželezné materiály (slitiny mědi a hliníku, duroplasty, fíbry, plasty s vlákninou, tvrdá guma).
S	S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30	Žáruvzdorné slitiny na bázi Fe, superslitiny na bázi Ni nebo Co, Titan a Ti slitiny.
H	H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30	Zušlechtěné oceli s pevností nad 1500 MPa, tvrzené kokilové litiny HSh 55÷58 a kalené oceli HRC 48÷60.

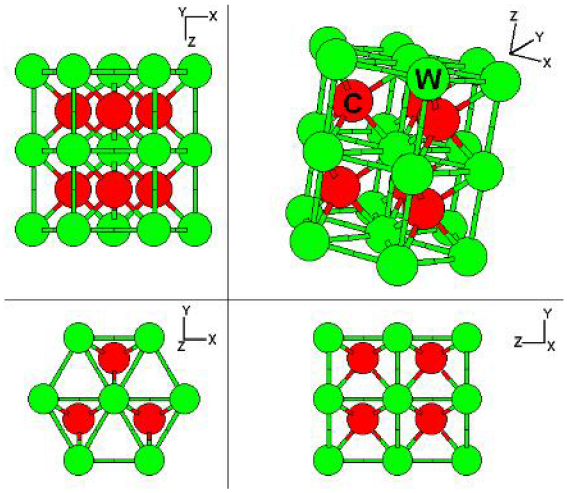


Obr. 3.7 Závislost tvrdosti karbidů na teplotě[4].

Výchozí materiály a jejich vlastnosti

Tvrdé, kovům podobné látky, které jsou základem nynějších slinutých karbidů a cermetům se skládají ze sloučenin uhlíku, dusíku, boru a křemíku s přechodovými prvky periodické soustavy. Karbidy jsou binárními sloučeninami uhlíku s pozitivnějšími prvky (kovy). Většina monokarbidů přechodových kovů má plošně středěnou mřížku kubickou a uhlík se nachází v osmistěnných intersticiálních polohách. Nejkratší vzdálenost mezi atomy kovu je u karbidu asi o 30% větší jak u příslušného čistého kovu[4,5].

Hodnoty teploty tavení a hodnoty tvrdosti jsou u karbidu mnohem vyšší než u oceli, což je patrné z (Tab. 3.3). Karbid molybdenu a karbid wolframu (Obr. 3.8) mají mřížku hexagonální, karbid chromu má mřížku ortorombickou a ostatní materiály mají mřížku kubickou plošně středěnou. Karbidy nevykazují žádné strukturní změny ani v teplotách, které se blíží k teplotě tavení, jelikož jsou to tvrdé a pevně spojené chemické sloučeniny[4].



Obr. 3.8 Hexagonální mřížka wolframu[4].

Karbidy se některými vlastnostmi podobají kovům s plošně středěnou kubickou mřížkou (např. dobrá elektrická a tepelná vodivost) a mají i vzhled kovů. I přes fakt, že tvrdost karbidů s narůstající teplotou klesá, uchovávají si za všech technologických podmínek mnohem větší tvrdost než oceli[4].

Tab. 3.3 Vlastnosti vybraných karbidů a nitridů[4].

Vlastnost		WC	TiC	TiN	Mo_2C
Typ mřížky		hexagonální	kubická, plošně středěná		hexagonální
Parametry mřížky [nm]	a	0,2900÷0,2907	0,43200÷0,43316	0,423÷0,424	0,3000÷0,3007
	b	—	—	—	—
	c	0,2830÷0,2864	—	—	0,4734÷0,4729
Měrná hmotnost [$g.cm^{-3}$]	teoretická	15,67	4,939	5,432	9,18
	skutečná	15,70÷15,80	4,91÷4,93	5,213÷5,430	9,06
Tvrdost [GPa]		20,8÷22,0	28,0÷35,0	18,0÷29,5	15,0÷24,5
Modul pružnosti v tahu [GPa]		620÷727	269÷510	251÷600	228÷535
Modul pružnosti ve smyku [GPa]		262	186	—	—
Modul objemové pružnosti [GPa]		—	240÷390	—	—
Pevnost v tahu [MPa]		350	—	—	—
Pevnost v ohybu [MPa]		550÷560	240÷400	—	—
Teplota tavení [°C]		2627÷2870	3160±100	2950±50	2485÷2690
Souč. délkové roztažnosti [$10^{-6}.K^{-1}$]	a	4,42÷5,20	6,52÷8,60	9,30÷9,35	4,9
	c	7,3	—	—	7,90÷8,20
Měrná tepelná vodivost [$W.m^{-1}.K$-1]		63÷121,8	21	19,2÷29,4	21,5
Měrná odpor [μΩ.cm]		17÷53	50÷68	25	71

- **Wolfram**

První zmínky o wolframu jsou známy už ze sedmnáctého století, kdy horníci v saském pohoří Ertz zjistili, že některé rudy narušují redukci cínovce a tvoří strusku. Wolfram dostal od horníků německé přezdívky jako „wolfert“ nebo „wolfrahm“, což znamená „vlčí pěna“. První průmyslová aplikace byly legované a kalené oceli na konci 19. století. V roce 1900 se světu představila první rychlořezná ocel[4].

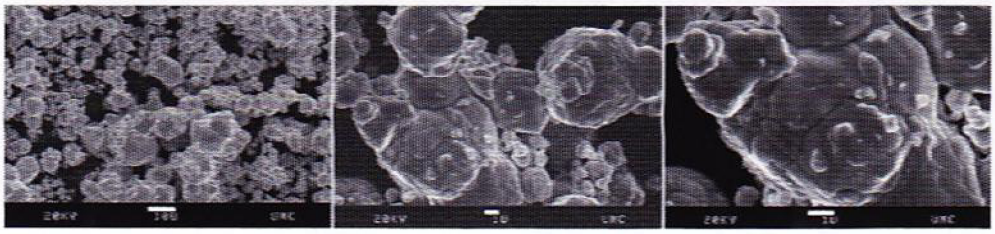
V současné době je wolfram používán nejvíce k výrobě slinutých karbidů. Výroba wolframového prášku je řazena mezi nejdůležitější technologické operace výroby slinutých karbidů. Velmi důležitým a sledovaným parametrem u výchozího prášku čistého wolframu je právě jeho zrnitost. Tento fakt nejvíce ovlivňuje velikost zrna WC. Hlavním technologickým požadavkem je proto řídit celý výrobní proces tak, aby bylo dosaženo požadované zrnitosti. Výchozími surovinami pro průmyslovou výrobu práškového wolframu jsou nejčastěji oxid wolframový, kyselina wolframová a tetrahydrát hydrogenwolframu dekaamonného[4,5].

Růstu velikosti zrna napomáhají následující faktory[4]:

- vysoká teplota redukčního procesu,
- rychlý nárůst teploty po délce trubkové pece,
- velká rychlost průchodu materiálu pecí,
- silná vrstva materiálu v kontejneru,
- nízká rychlost proudění vodíku a zvýšená vlhkost vodíku při vstupu do pece.

Karbid wolframu

Wolfram je vůbec prvním karbidem, který byl využíván jako tvrdá fáze slinutých karbidů. Má hexagonální krystalickou mřížku, snadno vytvářející rozpoznatelná zrna pravoúhlého nebo trojúhelníkového tvaru. V karbidu wolframu nelze rozpustit žádné jiné atomy kovů, může však obsahovat malé množství dusíku. Karbid wolframu (Obr. 3.9) se vyrábí z prášku čistého wolframu, který se po smíchání s pevným uhlíkem ohřívá v atmosféře nauhličujících plynů při teplotě 1300÷2400 °C. Karbid wolframu vzniká hlavně chemickou reakcí čistého wolframu s uhlíkem z plynné fáze. Prášek karbidu wolframu se prakticky vyrábí tak, že se za sucha smíchá čistý práškový wolfram s určitým množstvím uhlíku[4,5].



Obr. 3.9 Karbid wolframu[4].

- **Titan**

Titan je stříbrný lesklý kov, který krystalizuje v hexagonální kubické prostorově středěné mřížce při teplotách nad 900 °C. Kov dostal jméno po titanech, dětech Nebe a Země, odsouzených k životu ve skrytých ohních Země. Poprvé připravil titan ve znečištěné formě Berzelius v roce 1825¨. Titan se vyrábí z oxidu titaničitého (Ti_2O). Je sedmým nejrozšířenějším kovem v přírodě[4].

Karbid titanu

Karbid titanu (TiC) se vyrábí za vysokých teplot (asi 2000÷2200 °C) redukcí a nauhličováním směsi vysoce čistého TiO_2 a sazí nebo grafitového prášku v indukční peci ve vodíkové atmosféře nebo vakuu. Vakuová metoda je oproti vodíkové atmosféře výhodnější v tom, že TiC obsahuje vyšší množství vázaného uhlíku a neobsahuje dusík. V případě vodíkové atmosféry není třeba bránit přístupu vzduchu z okolí[4].

- **Tantal a niob**

Tantal a niob byly objeveny na začátku 19. století. Oba kovy patří k poměrně vzácným prvkům. Kovy krystalizují v prostorově středěných kubických mřížkách a v čistém stavu jsou poměrně měkké[4].

Tantal (Obr. 3.10) byl objeven švédským chemikem Andersem G. Ekebergem roku 1802, ale čistý prvek byl izolován později, a to roku 1820 Jönsem Berzeliem. Jmeno dostal podle bájného krále Tantala z řecké mytologie a je vyjádřením významné vlastnosti prvku – chemické netečnosti. Tantal i niob se nacházejí v minerálu proměnlivého složení, který se ale při větším obsahu niobu nazývá kolumbit (Obr. 3.11), jinak se jedná o tantal. Niob objevil roku 1801 Charles Hatchet jeho jméno je odvozeno od Niobe – dcera krále Tantala. Tantal a niob mají velmi podobné vlastosti[4,5].

Obr. 3.10 Tantal[10].

Obr. 3.11 Kolumbit[11].

Karbid tantalu a karbid niobu

Karbid tantalu (TaC) se vyrábí redukcí a nauhličováním oxidů kovů uhlíkem. V oxidu tantalečném (Ta_2O_5) je vždy obsažen i oxid niobičný (Nb_2O_5) v důsledku jejich fyzikálního spojení v rudě. Součástí struktury TaC bude vždy i NbC, protože tantalová ruda obsahuje i niob a jeho odstranění by bylo nákladné. Výsledný karbid je tedy často označován jako Tac.NbC[4].

- **Chrom a vanad**

Chrom (Cr) byl objeven v roce 1797 L. N. Vauquelinem a patří mezi prvky poměrně hojně se vyskytujícími na Zemi i ve vesmíru. Tento prvek se v přírodě vyskytuje velmi často současně s rudami železa. Největší světové zásoby jsou v Jihoafrické republice. Hlavním postupem metalurgického získávání chromu je redukce chromitu uhlíkem ve vysoké peci. Výsledkem je slitina chromu a železa – ferochrom. Výroba čistého chromu je komplikovanější[4].

Vanad (V) je poměrně rozšířeným prvkem na Zemi, ale vyskytuje se rozptýlený v podobě více než 60 minerálů. Poprvé byl objeven v roce 1801 A. M. del Rioem ve vzorku mexické olověné rudy. Čistý kov izoloval v roce 1867 H. E. Roscoe. Vyrábí se pražením rozdrcené rudy nebo zbytků kovového vanadu s uhličitanem sodným (Na_2CO_3) nebo chloridem sodným (NaCl) při teplotě 850 °C[4].

Karbid chromu a karbid vanadu

Karbid vanadu se vyrábí stejně jako karbid tantalu. Důkladně promíchaná směs odpovídajícího množství oxidu vanadečného a grafitového prášku nebo čistých sazí se nauhličuje ve vakuu při teplotě asi 1700 °C. Karbid chromu (Cr_3C_2) i karbid vanadu (VC) jsou velmi dobrými inhibitory růstu zrna[4].

- **Kobalt**

Kobalt (Co) je feromagnetický kov modrobílé barvy, který patří do tzv. „triády“ železa (Fe, Co, Ni). Byl objeven v roce 1735 G. Brandtem. Název prý dostal podle německého pojmenování skřítků Koboltů, kteří byli převážně zlomyslní a horníkům kazili jejich práci. Přítomnost kobaltu totiž zhoršovala zpracovatelnost a kvalitu vytěžených rud a kobaltové směsi navíc ohrožovaly jejích zdraví. Kobalt se vyskytuje i v mořské vodě. Kobalt ve slinutých karbidech má funkci pojiva, na začátku výrobního postupu se ve formě prášku přidává do výchozí práškové směsi. Kobalt je ve srovnání se železem méně reaktivní ve vlhkém vzduchu a nekoroduje i přesto, že patří mezi neušlechtilé kovy. Nachází se v různých rudách, např. v linnaeitu (Obr. 3.12), karolitu, smaltitu, kobaltitu (Obr. 3.13) a skutteruditu. V současné době se do základního kobaltového pojiva SK začínají přidávat i další kovy[4,5].

Obr. 3.12 Linnaeit[12].

Obr. 3.13 Kobaltit[12].

Struktura a vlastnosti

Celý historický vývoj nástrojových materiálů byl vždy zaměřen především na zlepšení jejich odolnosti proti opotřebení, zvýšení houževnatosti a pevnosti. Nejvyšší hodnoty pevnosti v tlaku a tvrdosti vykazují slinuté karbidy s nízkým obsahem kobaltu. Čím menší je velikost zrna tvrdých částic, tím vyšší je tvrdost libovolného materiálu. Pevnost v ohybu s narůstajícím obsahem kobaltu a hrubozrnnou strukturou roste. Při tahových nebo ohybových zkouškách probíhá porušení SK s téměř neznatelnou plastickou deformací, díky tomuto faktu jsou řazeny mezi křehké materiály, jako je sklo nebo keramika. Není to ale zařazení opodstatněné, jelikož při působení pouze normálových tlakových napětí mohou SK vydržet poměrně velké plastické deformace, aniž by došlo k jejich porušení. Tato vlastnost společně s vysokou tvrdostí a vyhovující pevností předurčuje vhodnost slinutých karbidů zejména v procesech pro řezné nástroje. SK mají mnohem vyšší mez kluzu a vyšší modul pružnosti v tahu než oceli[4,5].

V případě SK (i cermetů) jsou póry velké tvrdé částice a segregovaný pojící kov jsou hlavními defekty, na kterých se iniciuje trhlina. Shlukování tvrdých částic a segregace nečistot působí také jako místa pro v znik lomu. Tyto defekty jsou v zásadě společné pro všechny slinované tvrdé materiály, a tak je zřejmé, že u slinutých poroste pevnost bez poklesu tvrdosti jen tehdy, pokud bude snížen počet a velikost defektů. Proto je potřeba pečlivě řídit celou jejich výrobu od produkce prášků až po finální slinování, aby konečným produktem bylo jednolité slinuté těleso bez defektů. Vlastnosti řezných nástrojů ze SK závisejí tedy zejména na zrnitosti a složení materiálu, množství a velikosti strukturních defektů (např. póry) a velkou roli hraje samozřejmě i kvalita vstupních surovin[4,5].

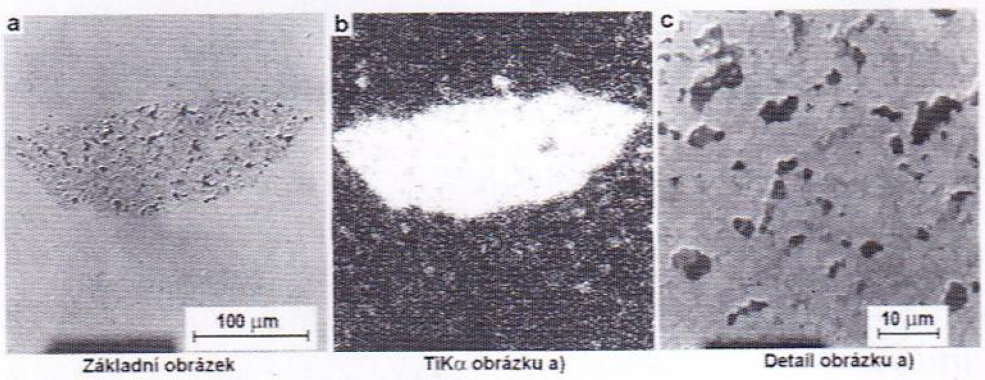
Mezi hlavní příčiny pórovitosti SK patří[4]:

- nízký obsah uhlíku,
- nedostatečné rozmělnění směsi,
- nehomogenita,
- zachycené plyny,
- nečistoty.

Nízký obsah uhlíku omezuje slinování a má skoro stejný vliv, jako snížení množství pojiva. Karbid je ochuzen o aktivní pojící fáze, pokud dojde k vytvoření podvojného karbidu wolfram – kobalt, což je následek příliš nízkého obsahu uhlíku[4].

Nehomogenita jasně souvisí s mletím. Jestliže mletí nebylo provedeno s potřebným účinkem, tak zůstane část pojícího kovu ve výlisku ve formě velkých částic nebo shluků. Při slinování se tento kov roztaví a vlivem povrchového napětí je vtažen do spár mezi karbidickými částicemi v přilehlých oblastech. Pokud je objem pojícího kovu velký, tak vznikne pór, menší objemy kovu se roztaví v kobaltová jezírka, která lze rozptýlit[4].

V důsledku znečištění nežádoucí příměsí vznikají místa zvýšené pórovitosti slinutého karbidu (Obr. 3.14). Nebyly dodrženy podmínky pro vytvoření dokonalého tuhého roztoku[4].



Obr. 3.14 Shluk pórů ve struktuře SK[4].

Obsah kobaltu – pojícího kovu ovlivňuje prakticky všechny mechanické i fyzikální vlastnosti slinutých karbidů, bez ohledu na jejich typ. Pokud obsah kobaltu roste[4]:

- klesá měrná hmotnost,
- klesá tvrdost,
- klesá relativní odolnost proti abrazi,
- klesá modul pružnosti ve smyku,
- klesá modul pružnosti v tahu,
- klesá pevnost v ohybu,
- klesá tepelná vodivost,
- klesá intenzita elektromagnetického pole,
- mírně roste únavová pevnost,
- roste pevnost v ohybu,
- roste pevnost v tahu,
- roste vrubová houževnatost,
- roste koeficient délkové roztažnosti,
- roste magnetická permeabilita,
- roste Poissonovo číslo.

„Mikrostrukturu slinutých karbidů lze sledovat pomocí optického mikroskopu (při zvětšení 1600÷2000x) na vybroušené a vyleštěné ploše, po vyvolání některou z následujících metod“[4]:

- **chemické leptání** – lepidlo Murakami, po 5÷6 minutách leptání se vzorek opláchne vodou a leptání se dokončí ponořením vzorku cca na 5 sekund do nitalu – 10% alkoholický roztok HNO_3,
- **elektrolytické leptání** – jako elektrolyt může být použit osmiprocentní HNO_3 (kyselina dusičná) a doba leptání je 5÷10 sekund,
- **oxidace ohřevem.**

„Podle použité metody lze vyvolat jen určitou strukturní složku nebo je možno vyvolat celkovou strukturu slinutého karbidu se všemi jeho složkami“[4].

Struktura slinutého karbidu velmi ovlivňuje jeho mechanické a fyzikální vlastnosti (např. tepelnou vodivost, měrnou hmotnost, tvrdost, tlakovou a ohybovou pevnost atd. Velice důležité je i rovnoměrné rozdělení velikosti zrn, ve struktuře by se neměla vyskytovat současně hrubá a jemná zrna[4].

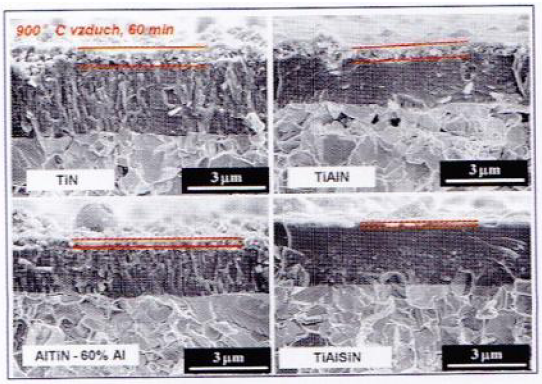
3.1.2 Povlakované slinuté karbidy

Jeden z nedůležitějších vývojových stupňů v průmyslu slinutých karbidů v průběhu 20. století je zavedení výroby vyměnitelných břitových destiček s tenkými povrchovými vrstvami TiC. Navzdory tomu, že vývoj v oblasti povlakování ve dvacátých a třicátých letech minulého století velmi intenzivní, nebylo dosaženo povlaků s technickou využitelností. Výzkum byl úspěšný až v roce 1952 a vedl k první sérii patentovaných aplikací v dané oblasti, patent povlakování SK vrstvou TiC byl německou firmou Metallgessllschaft AG přihlášen v roce 1959. Povlakování se tak stalo velice významnou a důležitou metodou zlepšení vlastností především u VBD pro řezné nástroje. První povlakované břitové destičky ze slinutého karbidu pro obrábění byly na trh uvedeny koncem 60. let 20. Století[4,5].

Zpočátku postačovalo několik typů povlaků jako konkurence jiným nástrojovým materiálům, ale v současné době je z hlediska uspokojování zvyšujících se požadavků každoročně vyvíjeno a zdokonalováno mnoho nových druhů povlakovaných slinutých karbidů pro různé aplikace. Jednotlivé materiály se liší kombinací vrstev, druhem povlaku, tloušťkou povlaku, metodou povlakování, substrátem atd. Správná kombinace všech těchto faktorů je velmi důležitá a závisí na ní efektivnost využití nástroje s povlakovanou břitovou destičkou[4].

Obvykle jsou uváděny tyto vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů[4]:

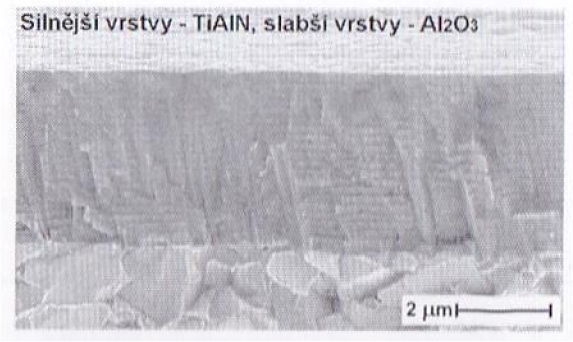
- **1. generace:** Jedná se o jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC) s tloušťkou asi 6 µm a špatnou soudržností podkladu s povlakem (dochází k tvorbě křehkého eta – karbidu). Při obrábění těmito nástroji proto rychle docházelo k odlupování povlaku, což způsobovalo znehodnocení nástroje.
- **2. generace:** Zde se jedná o jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN) bez eta – karbidu na přechodu podkladku a povlaku. Zdokonalení technologie výroby umožnilo vytvořit vrstvy povlaků o větší tloušťce (7÷10 µm) bez jejich odlupování.
- **3. generace:** Vícevrstvý povlak (dvě až tři vrstvy, případně i více) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Řazení vrstev je podle jejich vlastností. Na podklad se obvykle nanášejí vrstvy s větší přilnavostí a s menší odolností vůči opotřebení. Jako poslední vrstvy jsou nanášeny vrstvy se sníženou přilnavostí, ale s požadovanou zejména vysokou tvrdostí, odolností proti opotřebení a oxidací za zvýšených teplot (Obr. 3.15 – zoxidované vrstvy různé tloušťky jsou vymezeny dvěma rovnoběžnými úsečkami).



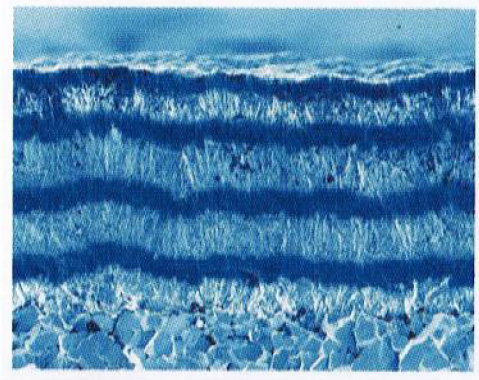
Obr. 3.15 Zoxidovaná vrstva na povrchu různých povlaků[4].

- **4. generace:** Jde o speciální vícevrstvý „multivrstvý“ povlak, nejčastěji složený z více než deseti vrstev a mezivrstev (Obr. 3.16 – tvrdost 3000 HV) s méně, či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami a tyto vrstvy jsou ze stejných materiálů, které se používají u povlaků 3. generace.

Za povlaky 4. generace jsou též považovány povlaky diamantové (Obr. 3.17), nanokompozitivní (povlak tvořený alespoň dvěma složkami, které jsou vzájemně nerozpustné, přitom je alespoň jedna složka krystalická), gradientní (složení vrstvy se plynule mění od substrátu k povrchu povlaku), supermřížkové (základní vrstva povlaků je opakována s tak krátkou periodou, aby byla vytvořena jednotná mřížka), inteligentní a kubický nitrid boru[4].



Obr. 3.16 Multivrstvý PVD povlak 4. Generace[4].



Obr. 3.17 Vícevrstvý diamantový povlak[4].

„Zcela nové vlastnosti vykazují nanokrystalické materiály s velikostí ≤10 nm. Chování těchto materiálů je určeno zejména procesy probíhající v hraničních oblastech, protože počet atomů v zrnech je srovnatelný nebo menší než počet atomů v těchto oblastech“ [4].

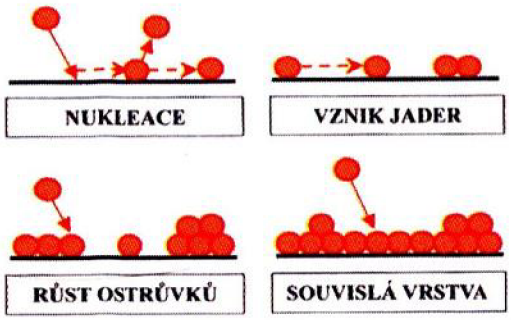
Metody povlakování

Povlakované slinuté karbidy se vyrábějí tak, že se na podklad z nepovlakovaného slinutého karbidu typu K, P nebo M nanáší tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a výbornou odolností proti opotřebení. Tyto vynikající vlastnosti vyplývají především z toho, že povlakový materiál ve srovnání se substrátem neobsahuje žádné pojivo, má o jeden i více řádů jemnější zrnitost a méně strukturních defektů a navíc tvoří bariéru proti difuznímu mechanizmu opotřebení nástroje. Metody povlakování, lze rozdělit do dvou základních skupin a to na metodu PVD a metodu CVD[4].

- **Metoda PVD**

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování) je charakteristická nízkými pracovními teplotami (pod 500 °C). Tato metoda měla původně sloužit k povlakování nástrojů z rychlořezné oceli (díky nízké teplotě je vyloučeno teplené ovlivnění nástroje). V poslední době došlo k rozvoji v používání této metody u nástrojů ze slinutých karbidů. U metody PVD jsou povlaky vytvářeny za sníženého tlaku (0,1÷1,0 Pa) kondenzací částic, které jsou uvolňovány ze zdroje částic fyzikálními metodami – rozprašováním nebo odpařováním, některé metody využívají i klasický ohřev. Uvolněné částice jsou ionizovány a reagují s atmosférou komory tvořící inertní a reaktivní plyn a záporným předpětím jsou urychlovány k povrchu substrátu, kde se usazují ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku. Vrstva povlaku vzniká dopadáním jednotlivých atomů

(Obr. 3.17). Vzniklé ostrůvky se spojují, až vytvoří souvislou vrstvu, která dále zvětšuje svou tloušťku a roste (Obr. 3.18)[4].



Obr. 3.17 Schéma vzniku PVD povlaku[4].

Obr. 3.18 Modely růstu vrstvy PVD povlaku[4].

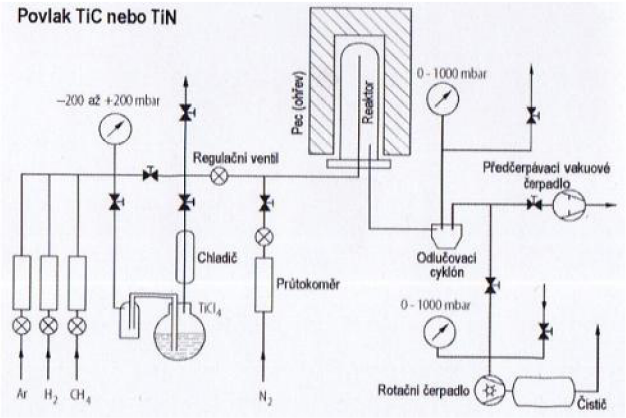
Nevýhoda všech metod PVD je relativně složitý vakuový systém a požadavek pohybovat povlakovanými předměty, aby bylo dosaženo rovnoměrné nanášení povlaku po celém povrchu. Mezi přednosti této metody patří možnost povlakování ostrých hran[4].

Metody PVD lze rozdělit do třech hlavních skupin[4,5]:

- **Napařování:** V napařovacích (evaporation) procesech je materiál odpařován z terčů, které jsou ohřívány různými způsoby. Substrát lze ohřívat a/nebo připojit na požadované předpětí použitím stejnosměrného nebo střídavého napájení. Napařování probíhá ve vakuu za tlaku $10^{-3} \div 10^{-8}$ Pa. Za tohoto tlaku je střední volná dráha v porovnání se vzdáleností terč – substrát velmi velká ($5.10^{2} \div 10^{7}$ cm). Odpařené atomy se proto před kondenzací na substrátu po několika drahách, což vede ke vzniku povlaku s nerovnoměrnou tloušťkou. Ke zmenšení střední volné dráhy se do komory přivádí odpovídající plyn.
- **Naprašování:** Naprašování (sputtering) je přemístění částic oddělených z povrchu zdroje fyzikálním odprašovacím procesem. Obvykle probíhá ve vakuu nebo při nízkém tlaku plynu (<0,7 Pa), kdy se odprášené částice dostanou na povrch substrátu bez kolize s molekulami plynu v prostoru mezi zdrojem a substrátem. Touto metodou lze nanášet tenké povlaky z těžkotavitelných materiálů bez požadavku ohřevu terče na vysokou teplotu. Naprašovací zařízení se skládá z katody (terč) vyrobené z materiálu, který mam být nanášen, držáku substrátu, odprašovacího plynu, vakuové komory, čerpacího systému a zdroje energie.
- **Iontová implantace:** Iontová implantace (ion – plating) he hybridní PVD proces povlakování, u kterého je povrch substrátu a/nebo ukládaný povlak bombardován svazkem částic s vysokou energií. Zdrojem ukládaných složek může být odpařování, odprašování, plyny nebo páry. Jelikož je mezi substrátem (katoda, záporný potenciál) a zdrojem odpařovaného materiálu (terčem) vytvořeno silné elektrické pole (50÷1000 V), dochází k elektrickému výboji v plynné atmosféře, který ionizuje částice plynu i odpařené částice terče. Reakcí iontů vzniká povlak, která se usazuje na povrchu substrátu.

- **Metoda CVD**

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition) se opírá o chemický proces povlakování, který je založen na reakci plynných chemických sloučenin v plazmě, která se vytváří v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového slinutého karbidu a následném uložení produktů heterogenní reakce na tomto povrchu (Obr. 3.19). Primárním požadavkem je, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní, ale přitom prchavou sloučeninu, která se díky přivedené energii (ohřev, laser, plazmová oblouk) chemicky rozkládá. Produkty jejího rozkladu jsou poté ukládány na ohřátý povrch povlakovaného předmětu, kde působí jako katalyzátor. V plynech musí být obsažen i nekovový reaktivní plyn, aby proběhla požadovaná reakce[4].



Obr. 3.19 Schéma CVD povlakovacího zařízení[4].

Jeden z nejdůležitějších parametrů každého povlaku je jeho soudržnost s podkladem. V závislosti na struktuře, mechanických, fyzikální a chemických vlastnostech podkladu, typu a tloušťce povlaku a podmínkách povlakování lze rozhraní podklad – povrch rozlišovat několik přechodových oblastí nebo mezivrstev[4]:

- Mechanická přechodová oblast – povrch podkladu je bez úprav nebo jen hrubě přebroušen, a proto se zde mohou vyskytovat dutiny a póry. Nanášený povlak je ukotven v otevřených povrchových pórech, čímž vzniká čistá mechanická vazba.
- Přechod monovrstva/monovrstva – přechod povlaku do podkladu přes jednu nebo několik atomových rovin. Tento přechod se tvoří, když povrch má velmi nízkou drsnost.
- Spojený přechod – v důsledku metalurgické nebo chemické interakce se mezi povlakem a podkladem tvoří jasně ohraničená mezivrstva s definovaným chemickým složením.
- Difuzní přechod – mezivrstva se strukturně gradientním přechodem z materiálu podkladu do materiálu povlaku. Nezbytnými předpoklady jsou vzájemná rozpustnost obou materiálů a dodání tepelné energie. Difuzní přechod se vyskytuje v případě, kdy dva vzájemné rozpustné materiály s kovově čistými povrchy zůstanou za působení teploty ve vzájemném kontaktu po delší dobu.
- Pseudifuzní přechod – tvoří se v případě, kdy se na povrchu podkladu vyskytují částice s vysokou energií. Tyto částice proniknou v krystalové mřížce podkladu do určité hloubky, která závisí na velikosti jejich energie a zůstanou tam uvězněny, aniž by začal působit difuzní mechanizmus.

Hlavní výhody metody CVD[4]:

- vysoká hustota povlaku,
- vysoká teplotní stabilita povlaku,
- vysoká homogenita povlaku,
- dobrá stechiometrie povlaku,
- možnost vytvářet poměrně složité vrstvy,
- ekonomická výhodnost tvorby silných vrstev povlaků,
- povlakování předmětu ze všech stran,
- relativně nízké provozní i pořizovací náklady.

Nevýhody metody CVD[4]:

- vysoké pracovní teploty,
- nelze vytvářet některé typy povlaků,
- nelze povlakovat ostré hrany,
- vysoká energetická náročnost,
- dlouhý pracovní cyklus – 8÷10 hodin,
- ekologický nevyhovující plynné směsi,
- tahová napětí ve vrstvě.

Čištění a úprava nástrojů před povlakováním

Aby nedocházelo k odlupování povlaků, musí být povrch nástroje před povlakováním patřičně očištěn, případně upraven.

Tyto potřebné procesy lze rozdělit do následujících skupin[4]:

- Broušení, leštění a kartáčování.
- Odmašťování – slouží k odstranění konzervačních a jiných mastných látek z povrchu nástroje pomocí průmyslových odmašťovadel na bázi ropných derivátů.
- Mokré čištění – provádí se pomocí kombinovaných metod s využitím oplachů, ultrazvuku, odstředění, vakuového sušení nebo elektrochemických metod.
- Pískování – metoda vhodná pro sériovou přípravu podkladů, používající se ve speciálních případech. Lze touto metodou odstranit i nečistoty uchycené v mírně pórovitém povrchu.
- Odjehlování – tato metoda je vhodná zejména u nástrojů z rychlořezných ocelí a je standardně aplikování již u výrobců nástrojů.
- Odstraňování starých povlaků – stripping. Metoda se provádí chemickou cestou a využívá silných oxidačních činidel.
- Čištění v průběhu procesu povlakování – jedná se o proces čištění na atomární úrovni.
- Žíhání ve vakuu – nástroje se po určitou dobu žíhají ve vakuu při teplotách blížící se k teplotám povlakovacím.
- Omílání v granulátech – mechanická úprava, používaná i v jiných oborech.

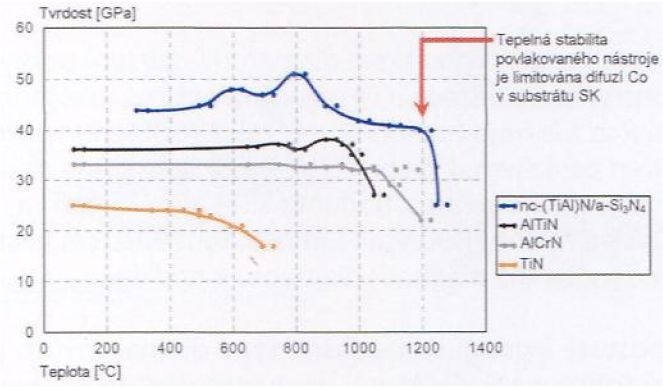
Vlastnosti povlaků

„K hlavním faktorům, které ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti a tím i řezný výkon povlakovaných SK, patří druh povlaku a jeho tloušťka, metoda povlakování a substrát. Pro řezný výkon je též důležitá drsnost povrchu povlaku a koeficient tření. Odolnost povlaku proti opotřebení závisí na typu povlaku (abrazní opotřebení je ovlivňováno tvrdostí, tepelné opotřebení termochemickou stabilitou, reprezentovanou volnou energií tvorby)“[4].

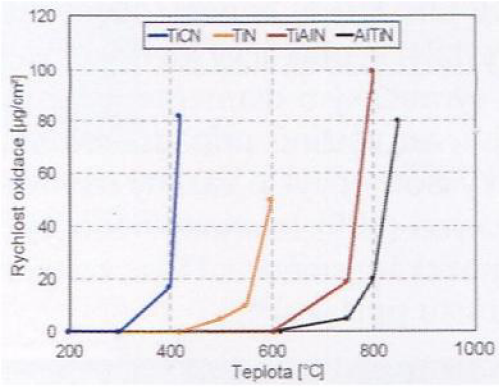
Jestliže je vrstva povlaku příliš slabá, pak je řezný výkon povlakovaných slinutých karbidů silně ovlivněn vlastnostmi podkladového materiálu. Opotřebení nástroje na hřbetě je urychlováno plastickou deformací břitu, a proto i u tenkých povlaků hřbetní opotřebení klesá s rostoucí tvrdostí podkladu – tvrdý podklad = malá deformace břitu. Když nedochází k vydrolování ostří nástroje, tak povlaky na tvrdém podkladu vykazují vyšší trvanlivost. V případě těžkých řezů a těžkých přerušovaných řezů je vydrolování eliminováno volbou podkladu s vysokou houževnatostí, i navzdory tomu, že běžné opotřebení je pak vyšší než u tvrdého podkladu[4,5].

Povlaky na SK pro obrábění mají vyšší tvrdost než běžné slinuté karbidy, snižují řezné síly, teploty, koeficient tření a brání difuznímu mechanismu opotřebení. I přes porušení vrstvy povlaku a odkrytí podkladového slinutého karbidu, udržují si povlakované břitové destičky často ještě po nějakou dobu svoji vyšší odolnost proti opotřebení. Významným faktorem ovlivňujícím vlastnosti povlaků jsou zbytková napětí vytvářená v jednotlivých vrstvách povlaku v průběhu ochlazovací fáze depozičního procesu[4,5].

Protože dnešní nástroje pracují při intenzivních řezných podmínkách – vysoké řezné rychlosti a vysoké úběry materiálu, kdy teploty na čelní ploše dosahují hodnot více než 1000 °C, patří zachování tvrdosti za vysokých teplot k velice důležitým vlastnostem povlaků. Těmto požadavkům nejlépe vyhovují nanokompozitní povlaky (Obr. 3.20), kde pokles tvrdosti povlakovaného SK je limitován spíše podkladek a nikoli povlakem. Další důležitou vlastností povlaků je jejich odolnost proti oxidaci za zvýšených teplot (Obr. 3.21)[4].



Obr. 3.19 Závislost tvrdosti vybraných typů povlaků na teplotě[4].



Obr. 3.20 Odolnost vybraných typů povlaků proti oxidaci za zvýšených teplot[4].

3.2 Cermety

Pojem CERMET vznikl složením prvních třech písmen slov „**CER**amics“ (keramika) a „**MET**al“ (kov), a proto by měl mít tento nástrojový materiál vlastnosti keramiky a kovu – tvrdost keramiky a houževnatost kovu, skutečnost je ovšem trochu rozdílná, protože takový materiál se zatím vytvořit nepodařilo. Ve skutečnosti se názvem cermety označují slinuté karbidy s tvrdou fází tvořenou zejména TiC, TiN, Ti(C,N), Mo_2C. Podle normy ČSN ISO 513 jsou cermety označovány symbolem **HT**[4,5].

3.2.1 Výchozí materiály a jejich vlastnosti

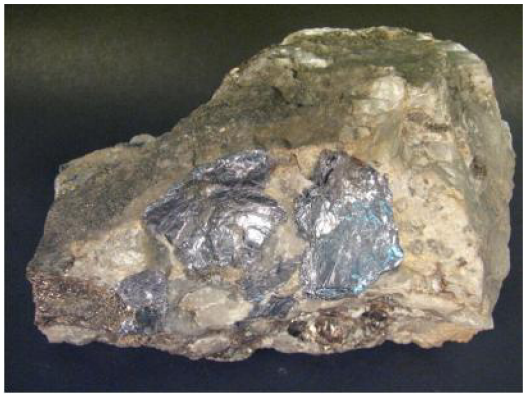
Lze říci, že všechny výchozí materiály pro výrobu slinutých karbidů jsou používány i pro výrobu cermetů – wolfram, titan, tantal, niob, chrom, vanad a kobalt (kapitola 3.1.1)[4].

- **Molybden**

Název molybden pochází z řeckého pojmenování olova molybdos, které označovalo jakýkoli měkký černý materiál vhodný ke psaní. Na Zemi je molybden vcelku vzácný a v rudách se nachází jen v nízkých koncentracích. Nejvýznamnější rudou je molybdenit (Obr. 3.21), jehož ložiska se nacházejí zejména v Coloradu v USA. Dalšími rudami jsou wulfenit a powelit. Molybdenit se těží buď samostatně, nebo se získává při výrobě mědi[4].

- **Nikl**

Nikl je typický feromagnetický prvek bílé barvy, který byl objeven roku 1751 německým chemikem baronem Axelem Frederikem Cronstedtem při pokusech o izolaci mědi z měďnaté rudy. Patří mezi přechodné prvky a jako relativně lehký je v přírodě zastoupen v poměrně velkém množství. V ryzí formě se v přírodě nachází velmi zřídka a obvykle se vyskytuje jako oxid ve směsi se železem, ve formě sulfidů nebo v nikelinu (Obr. 3.22)[4].



Obr. 3.21 Molybdenit[13].

Obr. 3.22 Nikelin[14].

- **Nitrid titanu**

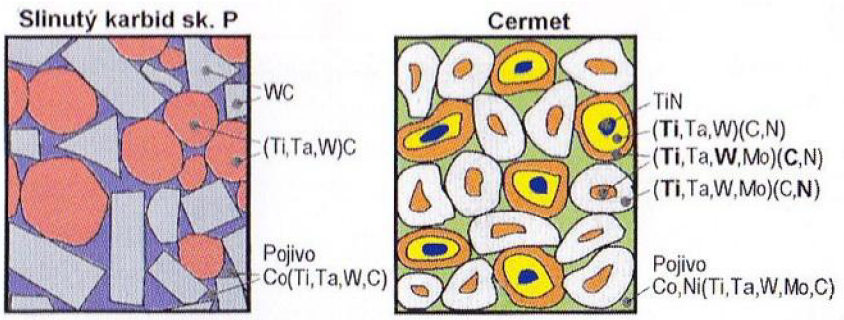
Pro výrobu prášku TiN lze použít mnoho odlišných metod, některé z nich produkují čistější materiály ve vztahu ke stopovým prvkům N_2 a O_2[4].

- **Karbonitrid titanu**

Přesný postup výroby si každý výrobce střeží, často však jde o kombinaci karbotermické redukce a nauhličování oxidu titaničitého nitridačním procesem. TiC má vyšší tvrdost než TiN. Fyzikální a mechanické vlastnosti karbonitridu se mění s narůstajícím množstvím dusíku. Karbonitrid titanu je jiný materiál než karbid a nitrid titanu[4].

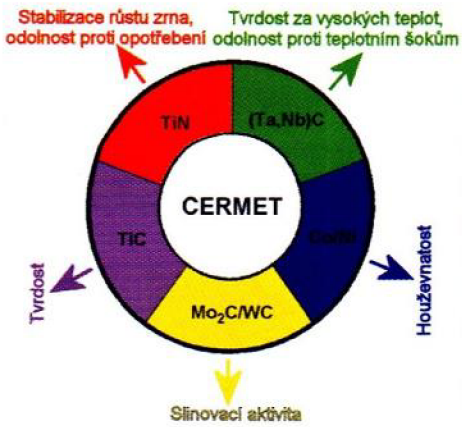
3.2.2 Výroba cermetů

Technologický postup výroby cermetů je velmi podobný výrobě slinutých karbidů. Jako výchozí materiály jsou nejčastěji používány binární tvrdé sloučeniny – TiC, TiN, Mo_2C, WC a (Ta,Nb)C důkladně promíchané s prášky Co a/nebo Ni, které tvoří pojivovou fázi. Zrna tvrdé fáze mají typický vzhled s mikrostrukturou typu jádro – plášť (Obr. 3.23). Při použití nelegovaných výchozích materiálů jádra často neobsahují žádný z těžších prvků. Při vyšších teplotách začínají pojivové kovy metalurgicky reagovat s tvrdými fázemi a vytvářejí tekutou fázi výrazně pod bodem tavení čistých kovů. Kovová tavenina rozpouští karbidové složky a začne probíhat precipitační rozpouštěcí mechanizmus. Tyto procesy mají rozhodující vliv na mikrostrukturu cermetů[4,5].



Obr. 3.23 Porovnání mikrostruktury slinutého karbidu a cermetu[4].

Pro řízení vlastností cermetů lze využít změny v obsahu jednotlivých základních složek (Obr. 3.24)[4].



Obr. 3.24 Vliv základních složek na vlastnosti cermetů[4]

K výrobě současných cermetů na bázi karbonitridu titanu se nejčastěji používají tyto metody[4]:

- slinování,
- vysokoteplotní lisování,
- slinování v kombinaci HIP,
- vysokoteplotní izostatické lisování (HIP).

Základním pojivem cermetů je nikl, ke kterému se často přidává kobalt kvůli snížení rozpustnosti Ti v Ni a stabilizaci karbonitridů. Pevná vazba mezi tvrdými částicemi a pojivem je základním předpokladem pro výrobu kvalitních cermetů. Dále je požadována poměrně vysoká smáčivost. Zlepšení smáčivosti lze dosáhnout v případech, kdy převládá absorpce atomů na styčných plochách, tedy při snížení povrchové energie nebo pokud existuje difuzní gradient na rozhraní tekuté a tuhé fáze. Velikost zrna tvrdé fáze cermetu závisí na době slinování a exponenciálně roste s narůstajícím časem. Doba slinování je však krátká, aby se zabránilo zhrubnutí zrna, což by vedlo ke zhoršení mechanických vlastností[4,5].

Současné cermety pro řezné nástroje možno považovat spíše za produkty průmyslové optimalizace než za výsledky systematického metalurgického výzkumu. Novými technologiemi slinování lze vyrobit monolitní cermetové nástroje poměrně velkých rozměrů[4].

3.2.3 Struktura a vlastnosti cermetů

Přidání dusíku nebo nitridů do cermetů typu TiC–Ni–Mo na začátku 70. let minulého století velkou mírou zvýšilo jejich řezné výkony v důsledku zjemnění mikrostruktury, a to to především zmenšení zrn tvrdé fáze. Současné moderní cermety obvykle obsahují TiC + TiN/Ti(C_xN_{1-x}) jako hlavní tvrdou složku a Ni/Co/Ni + Co jako kovové pojivo spojující karbonitridickou fázi[4].

Obecně lze říci, že ultrajemnozrnné cermety vykazují vyšší tvrdost ve srovnání s hrubozrnným cermetem, ale jejich ohybová pevnost není tak vysoká, jak by se mohlo zdát. Snížením velikosti zrna z hodnoty vyšší než 2 µm na hodnotu menší než 0,5 µm lze zvýšit tvrdost až o 25%. Tvrdost není příliš ovlivněna mikrostrukturou, na rozdíl od houževnatosti a pevnosti. Těžší roztok vytvrzené pojivové fáze cermetu přispívá ke zvýšení jeho tvrdosti. Přidáním kobaltu se zvyšuje pevnost spojení tvrdých zrn. Nejvyšší hodnoty lomové houževnatosti lze dosáhnout pomocí hrubšího karbonitridového zrna podporujícího odklánění trhlin a lepší rozložení tloušťky pojivové fáze brání šíření špičky trhliny prostřednictvím plastické deformace. Ohybová pevnost narůstá s obsahem uhlíku v materiálech, které neobsahují η – fázi ani grafit. Přítomnost grafitu a η – fáze ohybovou pevnost výrazně snižuje. Materiál obsahující grafit vykazuje výraznou pórovitost, a to zejména na povrchu. S narůstajícím obsahem uhlíku tvrdost klesá a materiál s obsahem grafitu vykazuje nejnižší trvanlivost. Tvrdost cermetů s rostoucí teplotou klesá (Tab. 3.4)[4,5].

Tab. 3.4 Závislost tvrdosti cermetů na teplotě[4].

Teplota [°C]	20	200	400	600	700	800	900	1000
Tvrdost $HV_{0,2}$	1759	1403	1162	880	739	562	463	346

Shrnutí vlastností a struktury ovlivněné obsahem vybraných prvků[4]:

1. **Narůstající obsah uhlíku (C):**

– snižuje zrnitost struktury,
– zmenšuje objem pláště zrn,
– zvyšuje tvrdost a snižuje houževnatost,
– snižuje objem Ti a Mo rozpuštěného v pojivu.

2. **Narůstající obsah molybdenu (Mo):**

– zvyšuje houževnatost,
– zmenšuje objem pojiva,
– zvětšuje objem pláště zrn,
– zvyšuje podíl Ti v plášti zrn,
– zvyšuje smáčivost karbidů a karbonitridů.

3. **Narůstající obsah dusíku (N):**

– řídí složení pláště zrn,
– zvyšuje chemickou stabilitu,
– zlepšuje odolnost proti teplotním šokům,
– udržuje shodnou strukturu v jádře i plášti zrn.

4. **Vliv uhlíku (C) + dusíku (N):**

– řídí velikost zrna,
– určuje složení pojiva,
– řídí objem pláště zrna ve vztahu k jádru.

5. **Vliv karbidu wolframu (WC):**

– tvoří pojivo mezi TaC.NbC a TiC,
– je obvykle obsažen v plášti zrn a napomáhá zvyšovat smáčivost mezi pojivem a jádrem.

6. **Vliv karbidu titanu (TiC):**

– ovlivňuje tvrdost materiálu,
– spojuje TaC.NbC v materiálu,
– řídí poměr N/(N+C) v materiálu.

7. **Vliv karbidu vanadu (VC):**

– zvyšuje únavovou pevnost,
– zvyšuje smykovou pevnost TiC vytvářením smíšených krystalů TiC–VC.

3.3 Řezná keramika

*„Moderní definicí je keramika obecně charakterizována jako **převážně krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru**“*[4]. Do této definice lze zahrnout nejen tradiční keramiku (porcelán, cement či cihly), ale i brousící materiály a řadu tzv. „nových“ (speciálních, konstrukčních, strojírenských, průmyslových, pokrokových apod.) keramických látek, jako je oxidová keramika, ferity, feroelektrika, nitridy (na bázi Si, B, Al), karbidy (na bázi Si, B), boridy (na bázi Ti) a další. Charakteristické pro novou keramiku je to, že je vyráběna z velmi čistých surovin a často z čistých výchozích chemikálií, jako keramika syntetická. Většina látek, které jsou řazeny do „nových keramik“, jsou krystalické, na rozdíl od tradiční keramiky, která obsahuje i značný podíl skelné (amorfní) fáze[4,5].

Výhoda keramik spočívá v tom, že lze různě kombinovat a kombinovat jejich vlastnosti tak, jak to vyžaduje konkrétní aplikace daného materiálu, proto je keramika velmi často používána pro výrobu řezných nástrojů, kde jsou s výhodou využívány zejména tyto vlastnosti[4]:

- vysoká tvrdost a odolnost proti plastické deformaci,
- odolnost proti mechanickému namáhání (zejména tlakem),
- odolnost proti působení vysokých teplot (u současných nejlepších materiálů i odolnost proti náhlým změnám teploty),

- odolnost proti opotřebení, chemickým vlivům a korozi (vysoká trvanlivost a řezivost),
- dostupnost základních surovin z domácích zdrojů a poměrně nízká cena.

Keramické materiály jsou používány především v konstrukčních aplikacích, velký nárůst byl koncem minulého století zaznamenán i v oblasti řezných nástrojů[4].

Pravděpodobně úplně první keramický nástroj používal člověk již v době kamenné a i mnohem později byly bloky pískovce, které obsahovaly velké množství mikroskopických břitů SiO_2, používané např. pro ostření nožů, břitev, nůžek apod. První úvahy o použití keramiky na bázi Al_2O_3 pro výrobu řezného nástroje padly v úvahu v Německu v roce 1905. Na našem území se výzkumu a vývoji keramických řezných materiálů věnoval Výzkumný ústav minerálů v Turnově, kde první keramické destičky byly vyrobeny v roce 1954. Kvůli vysoké křehkosti byly aplikační možnosti prvních keramických materiálů většinou omezeny pouze na nepřerušované řezání. Řezná keramika patří mezi velmi výkonné a účinné nástrojové materiály, avšak její úspěšné nasazení ve strojírenském průmyslu vyžaduje dodržet různé zásady, aby se její výhodné vlastnosti mohly projevit[4,5].

3.3.1 Výchozí materiály a jejich vlastnosti

Hlavními výchozími materiály pro výrobu řezných keramik jsou oxidy Al_2O_3, Y_2O_3, ZrO_3, karbid TiC a nitridy TiN a Si_3N_4. Jde většinou o chemicky velmi stabilní látky s vysokou tvrdostí, tlakovou pevností a odolností vůči vysokým teplotám[4].

- **Hliník**

Hliník (Al) je stříbřitě šedý nestálý kov a třetím nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře a byl objeven v roce 1825 dánským fyzikem Hansem Christianem Oerstedem. Nejběžnější horninou na bázi hliníku je bauxit (Obr. 3.25). Minerál získal svoje jméno podle města Les Baux v jižní Francii. Dalším významným minerálem obsahující hliník je kryolit (Obr. 3.26). Hliník se vyskytuje i ve formě hlinitokřemičitanů, jakou jsou zeolity, živce a slídy. Z bauxitu se také vyrábí **oxid hlinitý (Al_2O_3)**[4,15].

Obr. 3.25 Bauxit[15].

Obr. 3.26 Kryolit[13].

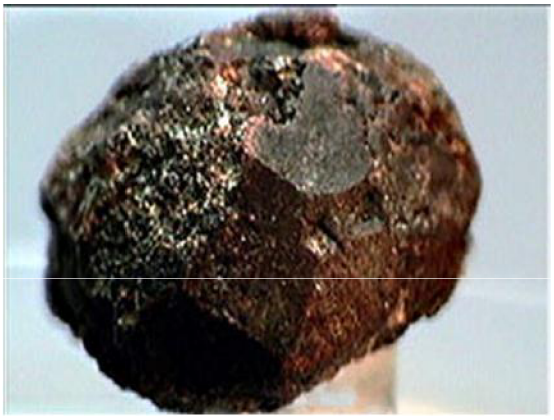
I navzdory tomu, že hliník patří mezi nejvíce zastoupené prvky v zemské kůře, patřila jeho průmyslová výroba do ještě nedávné doby k velmi obtížným procesům. Je to zejména z toho důvodu, že elementární hliník nelze jednoduše metalurgicky vyredukovat z jeho

rudy jako např. železo koksem ve vysoké peci. V současnosti používaná elektrolytická metoda přípravy byla zavedena v roce 1886[4,5].

- **Zirkonium**

Zirkonium (Zr) je šedý až stříbřitě šedý kovový prvek, který má výbornou odolnost proti korozi. Za objevitele je pokládán Martin Heinrich Klaproth roku 1789. První a dokonalé čisté elementární zirkonium bylo získáno až v roce 1914. Zirkonium je v zemské kůře obsaženo pouze ve formě sloučenin. Obsahuje jej řada minerálů, které mají podobné vlastnosti jako diamant – tvrdost a vzhledová podobnost. Mezi nejvýznamnější patří křemičitan zirkon (Obr. 3.27) a baddeleyit (Obr. 3.28)[4,15].

Obr. 3.27 Zirkonit[16].



Obr. 3.28 Baddeleyit[16].

Průmyslová výroba čistého zirkonia je poněkud nákladná, protože podobně jako v případě titanu nelze použít běžné metalurgické postupy, jako jsou redukce uhlím nebo vodíkem. V současné době se nejvíce k výrobě zirkonia používá zejména tzv. Krollův proces. Vyrábí se z něj **oxid zirkoničitý (ZrO_2)**[4].

- **Křemík**

Křemík (Si) je poměrně tvrdý polokov s vysokou afinitou ke kyslíku. Byl objeven švédským chemikem J. Jacobem Berzeliovem roku 1824. V čisté podobě se v přírodě nevyskytuje, existuje pouze v různých sloučeninách. Po kyslíku je druhým nejvíce zastoupeným prvkem v zemské kůře. Mezinárodní název – silicium je odvozen z latinského silex = pazourek. Křemík je základní složkou velké většiny hornin, které tvoří zemskou kůru – pískovcové horniny, žuly, jíly a především aluminosilikátové horniny na bázi ortoklasu. Lze tedy říci, že se křemík vyskytuje prakticky ve všech vyvřelých horninách. Nevýznamnější z nich je ovšem křemen (Obr. 3.29), tento minerál se může svým složením barevně lišit podle přítomnosti malého množství cizorodých prvků, které způsobují charakteristické zabarvení krystalického oxidu křemičitého. Téměř čistý oxid křemičitý je označován jako křišťál (Obr. 3.30). Fialově je zbarven ametyst, žlutě zbarven je citrín, růžový je růženín, hnědá barva označuje záhnědu a další červený je znám jako jaspis (Obr. 3.31), který se může vyskytovat v několika barevných variantách[4,15].

Výroba křemíku v průmyslovém měřítku spočívá v redukci taveniny vysoce čistého oxidu křemičitého v obloukové elektrické peci na grafitové elektrodě, jejíž materiál je přitom spalován na plynný oxid uhličitý. Křemík se dále využívá se k získání **nitridu křemíku (Si_3N_4)**[4].

Obr. 3.29 Křemen[14].

Obr. 3.30 Křišťál[17].

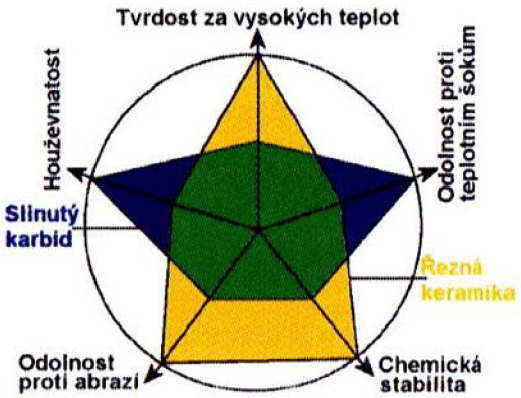
Obr. 3.31 Jaspis[14].

3.3.2 Výroba řezné keramiky

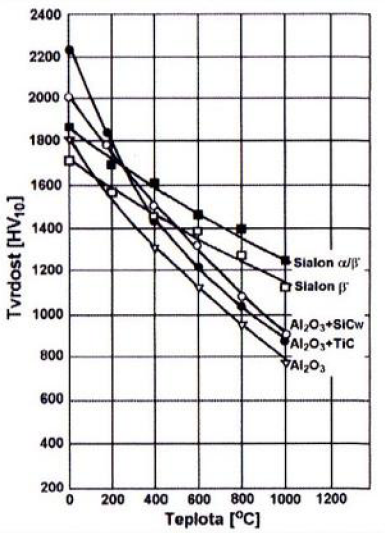
Proces výroby kompaktních keramických součástí (tedy i vyměnitelných břitových destiček pro řezné nástroje) je velmi podobný výrobě součástí ze slinutých karbidů a cermetů. Podstatný rozdíl je ale v tom, že keramické výrobky neobsahují žádný materiál, jehož funkcí by bylo spojení zrn tvrdé fáze do jednolitého tělesa. Tento fakt celou výrobu keramických materiálů znesnadňuje a klade vysoké nároky jak na výrobní zařízení, tak především na dodržení veškerých předepsaných parametrů pro technologický postup výroby. Vývoj mikrostruktury a slinovatelnosti keramických materiálů je možno ovlivnit přidáním přísad, které v průběhu slinování vytvářejí kapalnou fázi. Tímto způsobem lze dosáhnout hustějšího uspořádání částic při slinování a rychlejšího a lepšího zhutnění výrobku. Nekrystalická (amorfní) fáze, která se po slinování objeví na hranicích zrn, má ale zavinu degradaci mechanických vlastností materiálu při vyšších teplotách[4,5].

3.3.3 Struktura a vlastnosti řezné keramiky

Keramika je polykrystalický materiál se zrny malých rozměrů, který obsahuje náhodné technologické defekty a mikrostrukturní nehomogenity a vyznačuje se především vysokou tvrdostí (např. ve srovnání se slinutým karbidem – Obr. 3.32), dále nízkou houževnatostí a nízkou měrnou hmotností. Tyto faktory společně s dalšími určují finální mechanické



Obr. 3.32 Obecné porovnání keramiky a SK[4].



Obr. 3.33 Závislost tvrdosti keramiky na teplotě[4].

vlastnosti a potencionální aplikační možnosti tohoto materiálu. Omezená tvárnost má rozhodující a přitom také degradační roli z hlediska možnosti dosažení maximálních hodnot mechanických vlastností[4,5].

Tvrdost v případě keramiky nelze jednoznačně definovat jako fyzikální veličinu, protože více než jakákoli jiná mechanická vlastnost závisí na zkušebních podmínkách. Z hlediska měření tvrdosti spočívá největší rozdíl mezi kovem a keramikou v tom, že plastická deformace keramiky je hodně nízká a energie přivedená do materiálu při zkoušce tvrdosti se uvolňuje vznikem trhlin různého typu. S narůstající teplotou tvrdost keramiky klesá (Obr. 3.33)[4].

Velikost měrných tepel keramiky se od kovů příliš neliší a délková roztažnost je řádově stejná jako u kovů. Nízká tepelná vodivost je další typickou vlastností keramických materiálů a má negativní vliv na její mechanické vlastnosti. Nejtypičtější mechanickou vlastností keramiky je křehkost – keramika prakticky není schopna plastické deformace a porušuje se křehkým lomem, tj. nestabilním rychlým štěpným lomem s malou absorpcí energie. Chybí jí tedy vlastnosti typické pro kovy – houževnatost a tvárnost. Průběh i mechanizmy creepu (tj. časově závislé složky deformace) keramiky jsou prakticky stejné jako u kovů a slitin mohou být rozděleny do dvou skupin – mechanizmy probíhající uvnitř zrn a mechanizmy probíhající na hranicích zrn. Měření pevnosti v tahu by u křehkých materiálů vedlo k velkému rozptylu naměřených hodnot, a tak se zpravidla pevnost v tahu u keramik neuvádí. Pevnost v tlaku je u keramiky poměrně vysoká a lépe reprodukovatelná, protože povrchové trhliny na ni mají menší vliv. Ohybová pevnost keramických materiálů podobně jako u ostatních nástrojových materiálů klesá s narůstající teplotou[4,5].

3.4 Supertvrdé řezné materiály

Do všeobecného názvu supertvrdé materiály lze zahrnout dva synteticky vyrobené materiály, a to **diamant** (česká zkratka PKD vyjadřuje polykrystalický diamant – forma, ve které se jako řezný nástroj používají jednotlivé krystaly spojené do kompaktního tělesa pomocí různých pojiv) a **kubický nitrid boru** (české zkratky jsou KNB a PKNB – polykrystalický, anglické zkratky jsou CBN, c–BN). Díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem jako např. pevnost v tlaku, tvrdost aj. (Tab. 3.5) lze PKD i PKNB s velkou výhodou použít jako materiály pro řezné nástroje, a to především pro speciální aplikace[4].

Tab. 3.5 Vlastnosti syntetických supertvrdých materiálů[4].

Vlastnost	Diamant		Kubický nitrid boru	
	M	P	M	P
Měrná hmotnost [g.cm^{-3}]	3,515÷3,520	3,42÷4,50	3,43÷3,50	3,42÷4,40
Délka strany kubické mřížky [nm]	0,3567	—	0,3615	—
Pevnost v tlaku [GPa]	6,90÷16,53	4,2÷8,0	6,9	2,7÷3,5
Pevnost v ohybu [MPa]	1350	1200÷1700	700	500÷800
Tvrdost [HV]	5700÷13000	5000÷8000	4000÷7500	2700÷3500
Modul pružnosti v tahu [GPa]	820÷1250	776÷925	650÷850	587÷800
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	507	430	—	280
Lomová houževnatost K_{IC} [MPa.m$^{1/2}$]	3,4÷4,2	6,0÷11,0	—	3,5÷6,7

Poissonovo číslo [–]	0,10÷0,29	0,2	——	0,20÷0,22
Součinitel délkové roztažnosti [$10^{-6}.K^{-1}$]	0,8÷4,8	3,2÷4,6	3,5÷5,8	4,6÷4,9
Měrná tepelná vodivost [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	500÷2200	120÷550	13÷200	44÷200
Teplotní stálost [°C]	600÷700	——	1200÷1400	——
Pozn.: M = monokrystalický, P = polykrystalický				

3.4.1 Diamant

Diamant je čistý prvek, uhlík. Uhlík se vyskytuje v litosféře, atmosféře i hydrosféře, jako součást velkého množství organických i anorganických sloučenin. Nejvýznamnější a nejznámější z nich jsou jistě diamant a grafit. Ze surového diamantu (Obr. 3.34) se broušením vyrábějí diamanty klenotnické. Diamanty se v přírodě vyskytují zejména v intruzivní vyvřelé hornině – kimberlit (Obr. 3.35)[4].

Obr. 3.34 Surový diamant[17].

Obr. 3.35 Kimberlit[15].

- **Grafit**

Grafit je složen z vícevrstvé struktury (měkké černo – šedé šupinkovité krystaly jsou podél vrstev snadno štípatelné), která způsobuje výraznou anizotropii jeho fyzikálních vlastností. Grafit je dobrým vodičem tepla i elektřiny[4].

- **Diamant**

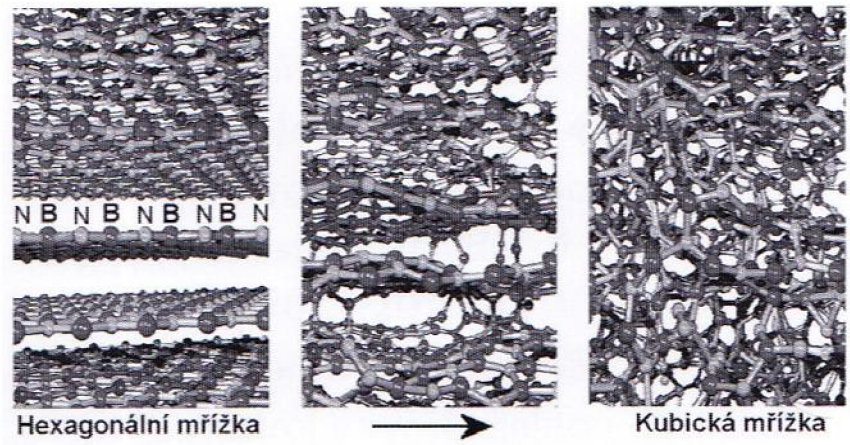
Diamant je nejtvrdší přírodní látkou s teplotou tavení >> 4000 °C, vysokým indexem lomu a nízkou reaktivitou, má nejlepší známou tepelnou vodivost, ale elektricky je nevodivý. Krystalizuje v kubické soustavě nejčastěji jako průhledný, někdy příměsemi zbarvený. Diamant je extrémně chemický inertní, nelze jej ovlivnit žádnými kyselinami ani jinými chemikáliemi, s výjimkou těch, které při vysokých teplotách působí jako oxidační činitelé – dusičnan sodný ($NaNO_3$). Nejvýznamnější nečistota přírodních i syntetických diamantů je právě dusík, jeho přítomnost ovlivňuje veškeré vlastnosti[4,5].

Protože má diamant poměrně nízkou teplotní stálost (při dosažení teplot nad 650 °C se mění na grafit), nesmí být používán pro obrábění materiálů na bázi železa, kde by při nadměrném ohřevu docházelo k silné difuzi mezi nástrojem a obráběný materiálem a tím k velmi rychlému opotřebení hlavně na čele nástroje. Široké uplatnění má diamant při obrábění hliníkových slitin, kde lze použít řezné rychlosti přesahující hodnotu 5000 $m.min^{-1}$, především s vysokým obsahem křemíku, který působí na nástroj velmi silným abrazivním účinkem. Často se využívá i pro obrábění slitin mědi (bronzy a mosazi)[4,5].

3.4.2 Kubický nitrid boru

Základní prvek **bor** a **dusík**, jsou hlavními složkami kubického nitridu boru a sousedí v periodické tabulce prvků s uhlíkem, bor zleva a dusík zprava. Bor (B) patří mezi polokovy s vysokým bodem tání i varu. V nepříliš vysoké čistotě byl izolován sirem Humphrym Davyem v roce 1808. Od Davyho dostal pojmenování „boron“. Nitrid boru (nitrid boritý – BN) vykazuje mnoho podobnosti s grafitem, má hexagonální strukturu. BN je měkký (vhodný jako mazací materiál), bílý, elektricky nevodivý, málo reaktivní a termicky stálý. Od grafitu se tedy liší pouze barvou a elektrickými vlastnostmi (grafit je elektricky vodivý)[4,5].

Kubický nitrid boru byl vytvořen až po objevu, že hexagonální forma může být za vysokých teplot a tlaku transformována na kubickou roku (Obr. 3.36) 1957. KNB má mnohem nižší tepelnou vodivost než diamant a je extrémně stabilní na vzduchu, ve vakuu a v dusíkové atmosféře, což je výrazný rozdíl ve srovnání s diamantem. Postupy výroby kubického nitridu boru existují dva, jeden využívá statický tlak a ten druhý tlak dynamický (rázové vlny)[4].



Obr. 3.36 Změna mřížky nitridu boru z hexagonální na kubickou[4].

4 VYTVOŘENÍ PREZENTAČNÍHO PŘEDMĚTU V PROGRAMU AUTODESK INVENTOR

Software Autodesk Inventor je parametrický, adaptivní 3D modelovací software, je součástí balíčku firmy Autodesk. Již více než 10 let je program Inventor světově nejprodávanější strojírenskou 3D CAD (Computer Aided Design = počítačem podporované projektování) aplikací. Software Autodesk Inventor je Windows aplikace. Aktuální verzí je Inventor 2013, která je kompatibilní s Windows 7 a Windows XP. Aplikace obsahuje knihovny, kde se nachází normalizované součástí jako např. šrouby, matice, čepy, ozubená kola, podložky, závlačky aj. Program Inventor umožňuje modelování složitých sestav. Lze navrhovat i svařence[15,18].

Program Autodesk Inventor umožňuje[18]:

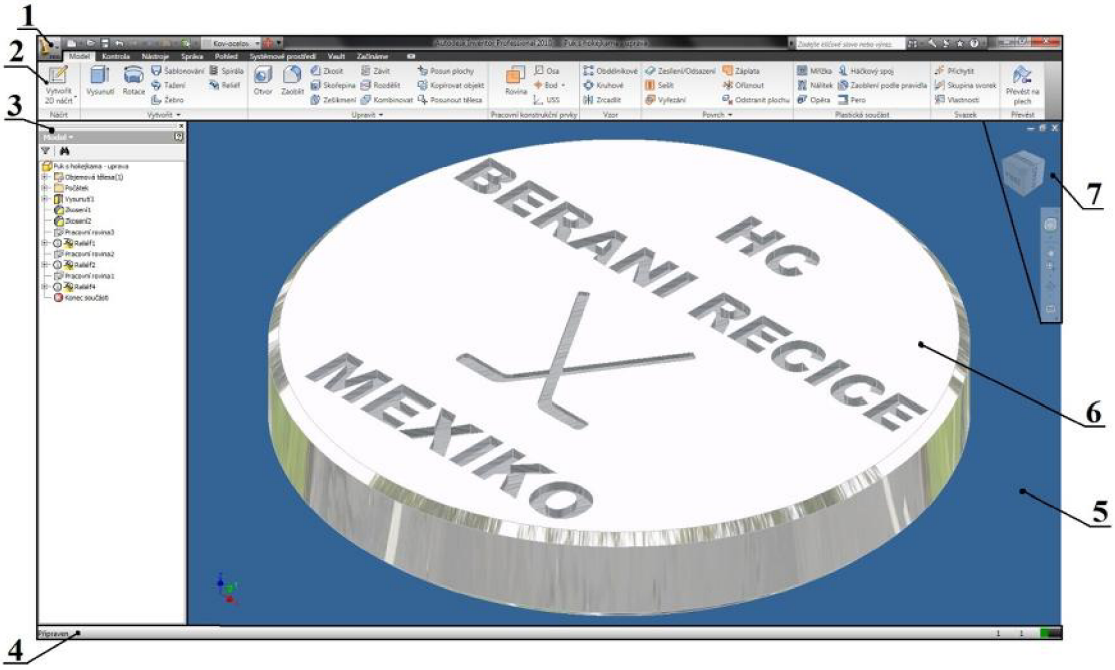
- pracovat paralelně v širším týmu konstruktérů,
- být produktivní již od prvního dne jeho použití,
- intuitivně vytvářet a modifikovat konstrukční sestavy,
- zachytit, sdílet a opakovaně využívat konstrukční znalosti,
- pracovat s rozhraním, které sleduje vaše pracovní postupy,
- používat konstrukční údaje o výrobku kdykoliv a kdekoliv,
- pracovat s obzvláště vysokým výkonem při rozsáhlých sestavách,
- vytvářet náčrty s prvotním řešením funkčnosti a následným řešením tvaru,
- vytvářet 2D výkresovou dokumentaci rychleji a přesněji než pomocí 2D CAD nástrojů,
- používat existující DWG (DraWinG – binární formát souborů výkresů AutoCADu) výkresy AutoCADu.

4.1 Program Autodesk Inventor Professional

Program Autodesk Inventor Professional zvyšuje produktivitu navrhování a rozšiřuje možnosti aplikace o konstrukci specifických strojírenských prvků, potrubních systémů a sestav s vedením pevných i ohebných trubek, elektromechanických zařízení, sestav s deskami plošných spojů, dynamické simulace, zpracování souborů oborových standardů. Vedle plné funkčnosti programu Autodesk Inventor Series obsahuje funkce pro izometrické vedení trubek, routing potrubních vedení, rozsáhlou knihovnu normalizovaných potrubních a spojovacích prvků[18].

4.2 Popis pracovního prostředí programu Autodesk Inventor Professional

Pracovní prostředí programu Inventor (Obr. 4.1) je uspořádáno tak, aby bylo uživateli umožněno rychlé snadné a přitom efektivní konstruování a modelování. Pracovní funkce a nástroje jsou seřazeny do skupin, což umožňuje zobrazení pouze těch funkcí, které uživatel v danou chvíli pro určitý krok potřebuje.



Obr. 4.1 Pracovní prostředí pogramu Inventor Professional.

Panel základní nabídky (Obr. 4.1, pozice 1)

Klasická nabídka známá z většiny softwarů kompatibilních s operačním systémem Windows. Zde lze nalézt možnost uložení souboru, otevření souboru, volby nového souboru, možnost zadání klíčového slova nebo výrazu pro nápovědu, či krok zpět nebo krok vpřed.

Panel nabídky programu Inventor (Obr. 4.1, pozice 2)

Základní nabídka programu Inventor, zde se nachází pás s možností volby karet (model, kontrola, nástroje aj.). V každé kartě jsou panely (náčrt, vytvořit, upravit aj.), které obsahují prvky pro úpravu modelu jako např. vysunutí, rotace, zkosit, reliéf apod.

Panel prohlížeč modelu (Obr. 4.1, pozice 3)

Tento panel je velice chytrá a užitečná pomůcka pro sledování historie u aktuálního stavu modelu. Jsou zde zobrazeny jednotlivé prvky, které jsou na modelu aplikovány. Pořadí prvku v prohlížeči odpovídá pořadí tvorby prvků. Každý prvek lze pomocí tlačítka “+“ rozkliknout. Po rozkliknutí se zobrazí náčrt prvku, který lze dodatečně upravovat. Dodatečně upravovat lze i jednotlivé prvky.

Spodní lišta (Obr. 4.1, pozice 4)

Spodní lišta programu slouží k informativním účelům, vlevo dole se zobrazuje jednoduchá nápověda, která napovídá další krok při každé operaci. Vpravo dole jsou dvě čísla, která informují o aktuálním počtu otevřených souborů. Vedle nich je jednoduchý ukazatel obsazenosti systémových prostředků.

Pracovní plocha (Obr. 4.1, pozice 5)

Pracovní plocha je hlavní část okna, kde je zobrazen model, sestava či výkres.

Model (Obr. 4.1, pozice 6)

Panel ovládání modelu (Obr. 4.1, pozice 7)

Tento panel umožňuje velmi snadné a efektivní manipulování s modelem či sestavou. Lze ho otáčet, přiblížit apod. Také zde lze zavřít nebo minimalizovat pouze vybraný soubor a ne celý program.

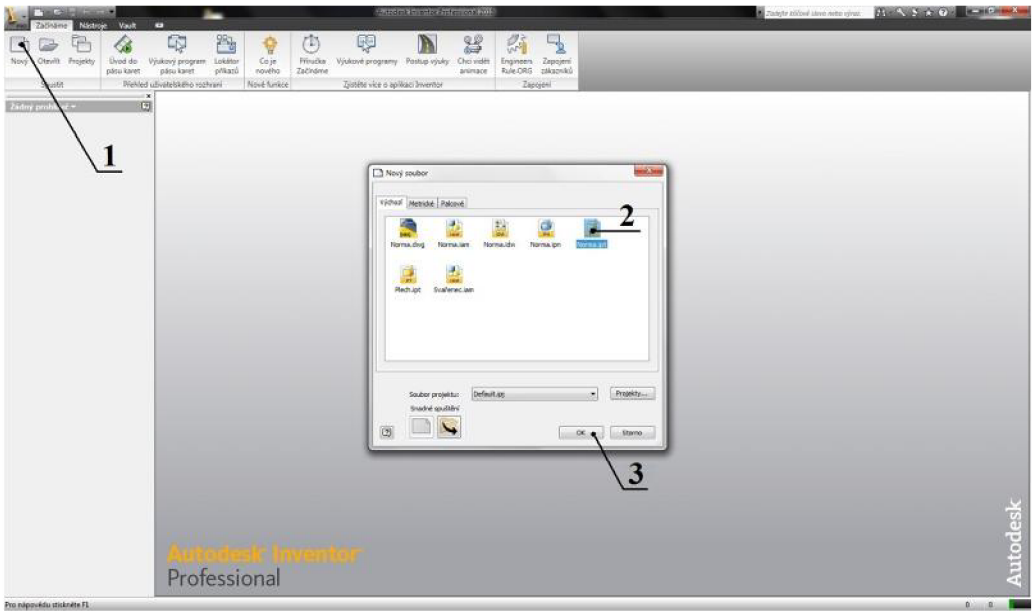
4.3 Postup tvorby modelu

Po otevření ikony programu Autodesk Inventor Professional 2010 (Obr. 4.2) se objeví signalizace spouštění (Obr. 4.3).

Obr. 4.2 Ikona pro spuštění programu Inventor Professional 2010.

Obr. 4.3 Signalizace spouštění programu Inventor Professional 2010.

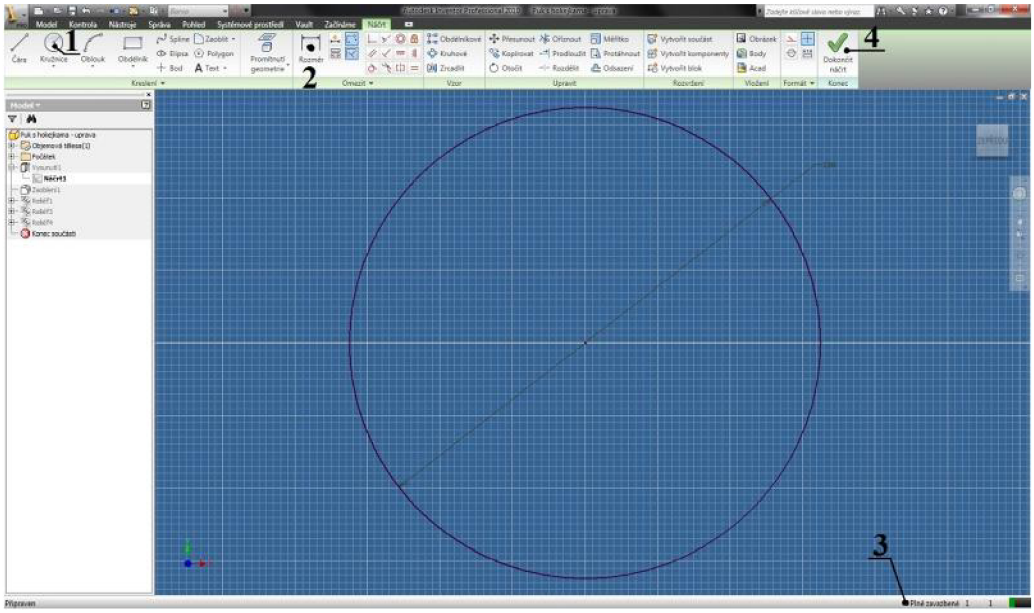
Po zmizení spouštěcí signalizace se objeví dialog s výběrem možností, jestli otevřít stávající soubor nebo vytvořit nový. Zvolena byla varianta nového souboru. Pokud je již program spuštěn (Obr. 4.4), lze se dostat k dialogu nového souboru buď přes hlavní menu Soubor => Nový, nebo kliknutím na ikonu (Obr. 4.4, pozice 1) s obrázkem čistého papíru. Objeví se modální dialog s výběrem typu nového dílu. Pro tvorbu náčrtu a následnou modelaci je učena volba „Norma.ipt“ (Obr. 4.4, pozice 2).



Obr. 4.4 Spuštěný program – dialog nového souboru.

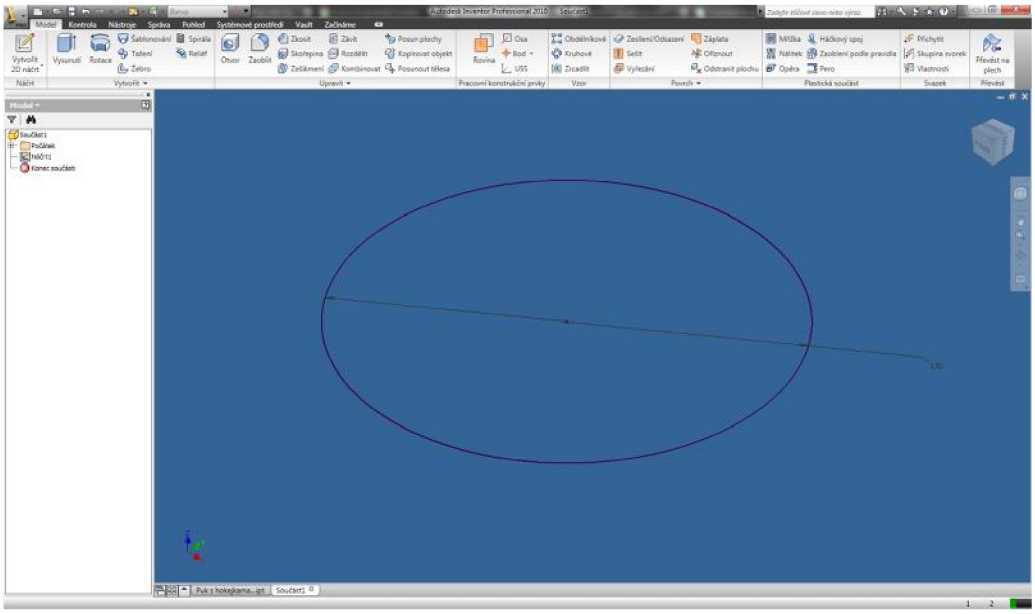
4.3.1 Tvorba náčrtu

Po použití tlačítka „OK“ (Obr. 4.4, pozice 3) se lze dostat do prostředí náčrtu. Zvolí se nástroj „Kružnice“ (Obr. 4.5, pozice 1), díky čemuž lze zkonstruovat kružnici o libovolném průměru. Střed kružnice je zvolen v počátku, což později značně zjednodušuje orientaci v 3D prostoru. Poté se náčrt okótuje pomocí tlačítka „Rozměr“ (Obr. 4.5, pozice 2) kliknutím na obrys kružnice. Jelikož se střed kružnice nachází v počátku, je proto náčrt plně zavazbený (Obr. 4.5, pozice 3). Náčrt je tedy hotový a připravený na 3D modelaci. Do prostředí 3D modelace se lze dostat tlačítkem „Dokončit náčrt“ (Obr. 4.5, pozice 4).



Obr. 4.5 Prostředí náčrtu.

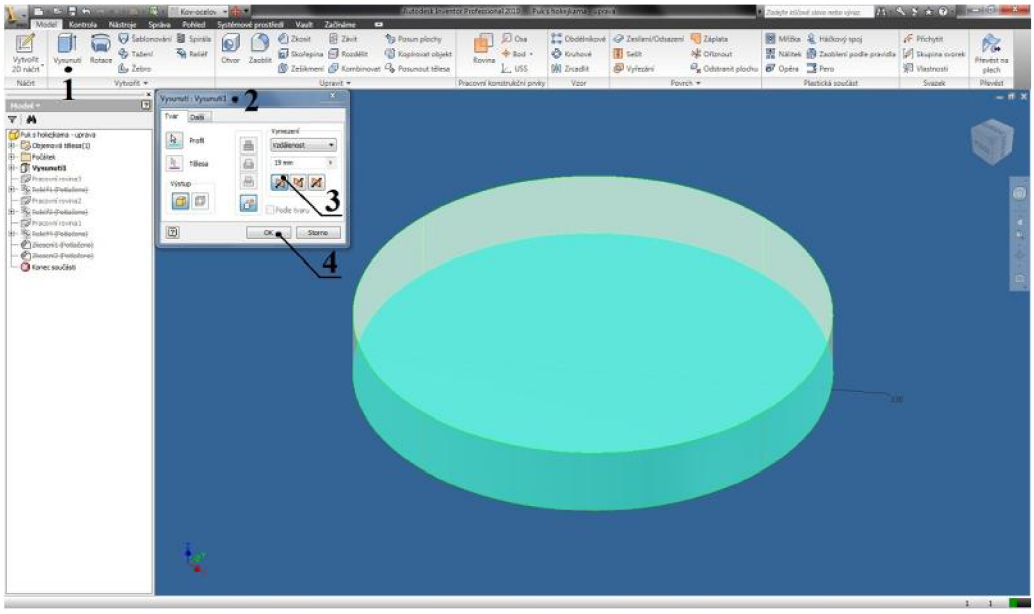
Náčrt v prostředí 3D modelování by měl vypadat jako na obrázku (Obr. 4.6).



Obr. 4.6 Hotový náčrt ve 3D prostředí.

4.3.2 Tvorba vysunutí

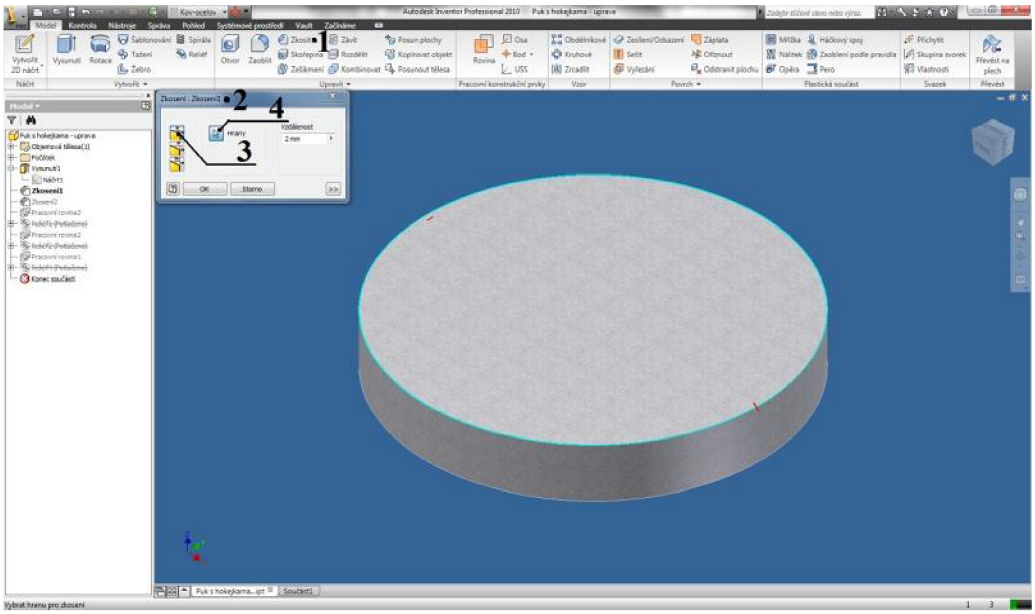
Kliknutím na tlačítko „Vysunout“ (Obr. 4.6, pozice 1), lze náčrt vysunout do požadované tloušťky. Objeví se dialogové okno „Vysunutí:Vysunutí1“ (Obr. 4.6, pozice 2). Profil pro vysunutí se sám automaticky označí. Poté se zvolí výška vysunutí – 19 mm. Zde je na výběr ze tří možností, vysunutí směrem nahoru od náčrtu, což je zvoleno (Obr. 4.6, pozice 3), dále vysunutí směrem dolů od náčrtu a vysunutí na obě strany od náčrtové roviny. Po navolení vlastností se klikne na tlačítko „OK“ (Obr. 4.6, pozice 4).



Obr. 4.6 Vysunutí ve 3D prostředí.

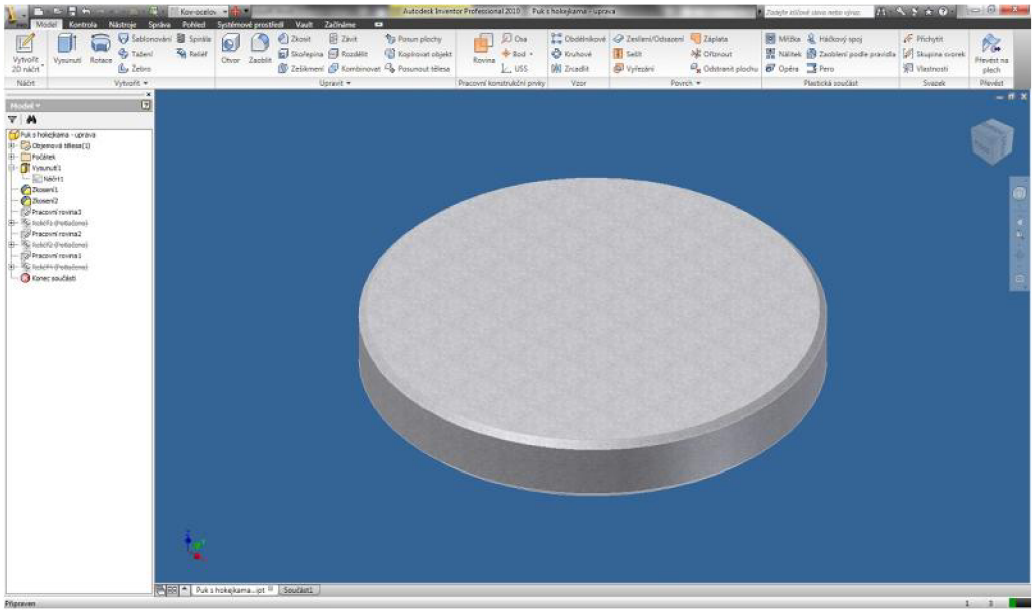
4.3.3 Tvorba zkosení hran

Následuje zkosení hran (Obr. 4.7) modelu pomocí tlačítka „Zkosení“ (Obr. 4.7, pozice 1). Po kliknutí na toto tlačítko se objeví dialogové okno „Zkosení:Zkosení1“ (Obr. 4.7, pozice 2). V tomto okně je několik možností zkosení, zvolila se varianta „Vzdálenost“ (Obr. 4.7, pozice 3) o hodnotě 2 mm. Tlačítkem „Hrany“ (Obr. 4.7, pozice 4) se vyberou ty hrany, na kterých se požaduje zkosení, poté lze kliknout na tlačítko „OK“ a zkosení je dokončeno. Při zkosení druhé hrany je postup analogický.



Obr. 4.7 Postup při zkosení hran.

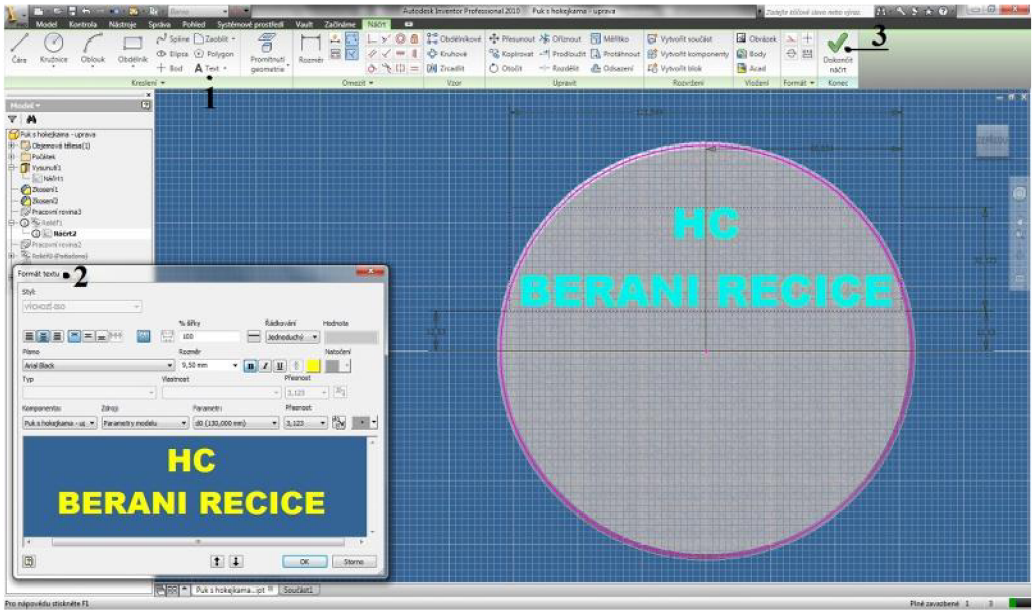
Zkosení hran lze vidět na (Obr. 4.8).



Obr. 4.8 Zkosení hran.

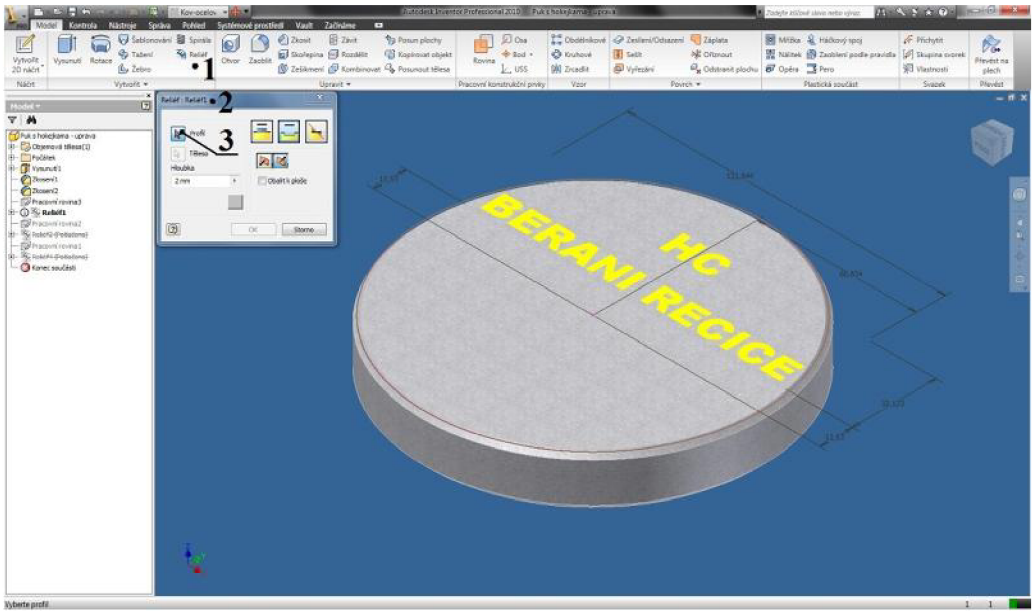
4.3.4 Zhotovení textu – reliéfu

Pro zhotovení prvního textu (Obr. 4.9) se musí zpět do prostředí 2D náčrtu, kde se klikne na tlačítko „Text“ (Obr. 4.9, pozice 1) a poté kamkoli na model. Otevře se okno „Formát textu“ (Obr. 4.9, pozice 2), které umožňuje formátovat text. Po doformátování textu se klikne na „OK“, text se vygeneruje a musí se opět zakótovat a plně zavazbit. Po splnění těchto podmínek se použije tlačítko „Dokončit náčrt“ (Obr. 4.9, pozice 3).



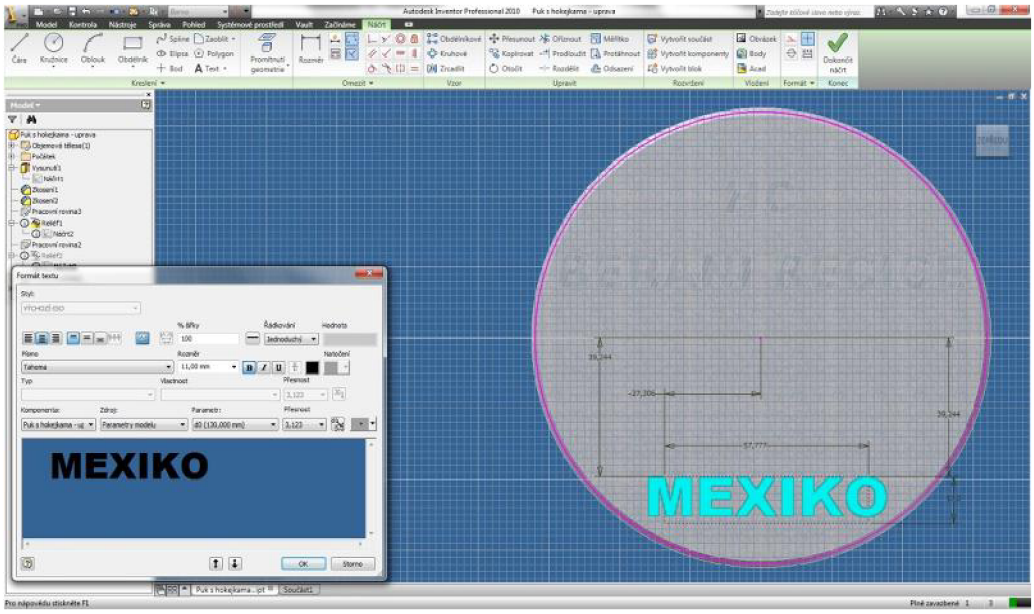
Obr. 4.9 Zhotovení prvního textu.

V prostředí 3D (Obr. 4.10) se klikne na tlačítko „Reliéf“ (Obr. 4.10, pozice 1). Objeví se dialogové okno „Reliéf:Reliéf1“ (Obr. 4.10, pozice 2). Tlačítkem „Profil“ (Obr. 4.10, pozice 3) se vybere profil textu pro požadovaný reliéf.



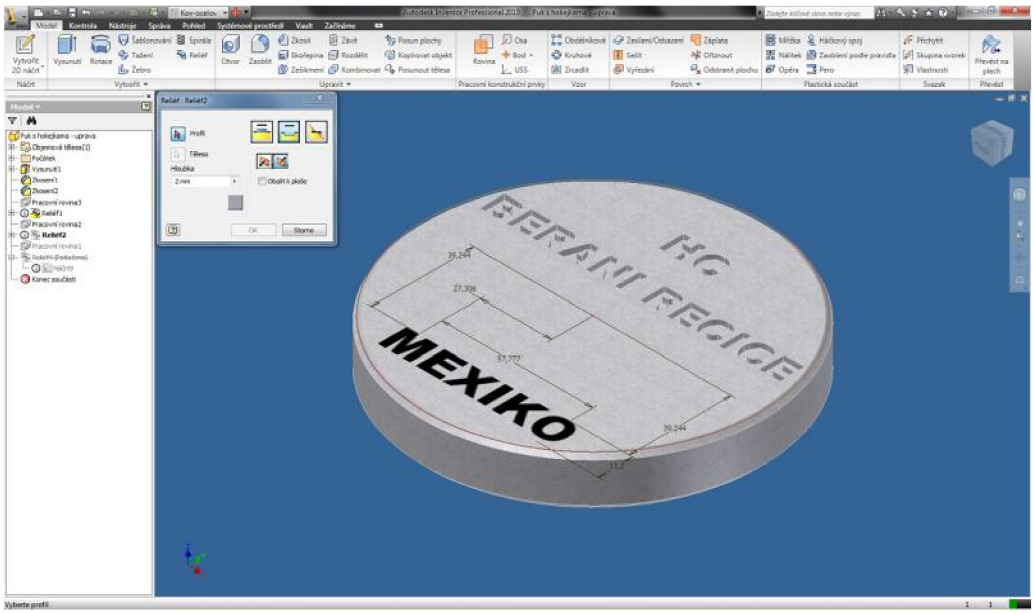
Obr. 4.10 Tvorba prvního reliéfu ve 3D prostředí.

Při tvorbě textu č. 2 (Obr. 4.11) bude postup obdobný jako při zhotovení textu prvního.



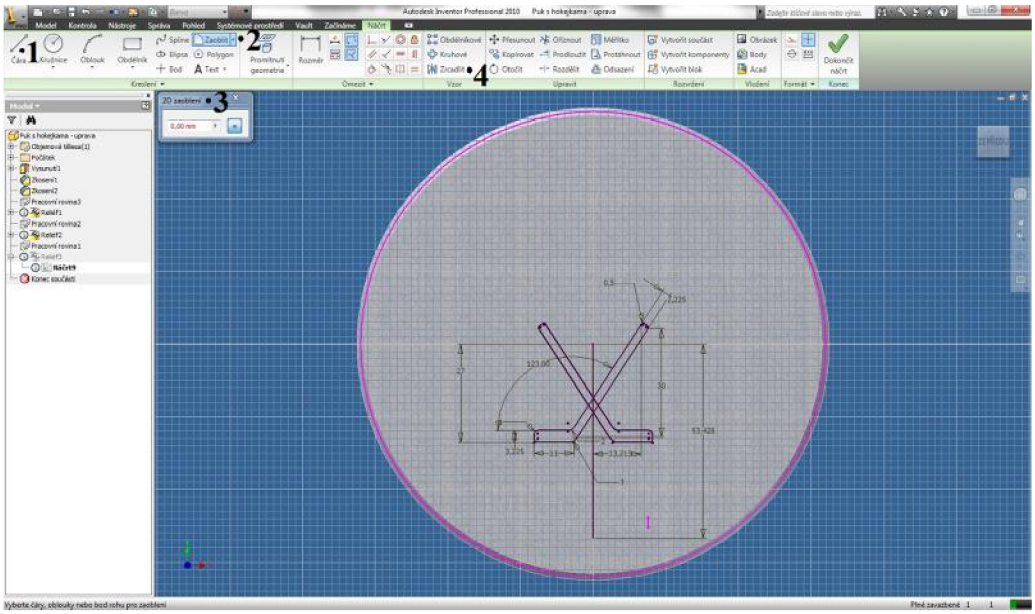
Obr. 4.11 Zhotovení druhého textu.

Postup zhotovení reliéfu č. 2 (Obr. 4.12) je analogický jako postup zhotovení reliéfu č. 1.



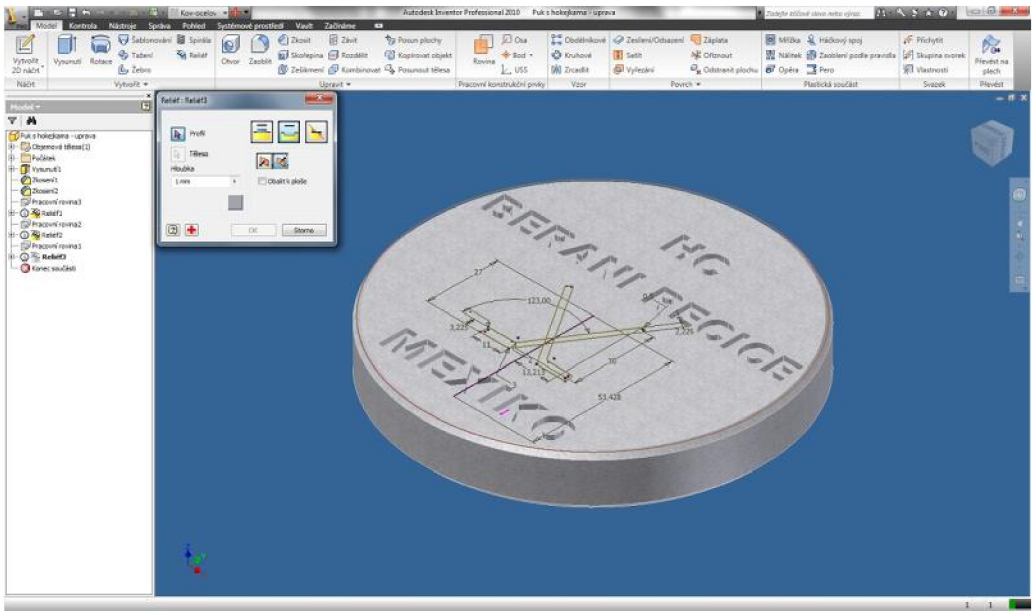
Obr. 4.12 Tvorba druhého reliéfu ve 3D prostředí.

Náčrt ornamentu ve tvaru zkřížených hokejových holí (Obr. 4.13) je zkonstruován pomocí příkazu „Čára“ (Obr. 4.13, pozice 1) a příkazu „Zaoblit“ (Obr. 4.13, pozice 2). Po kliknutí na tlačítko „Zaoblit“ se objeví okno „2D zaoblení“ (Obr. 4.13, pozice 3), kde se navolí patřičný poloměr zaoblení. Následně se klikne na první čáru, poté na druhou, které společně tvoří ostrou hranu a ta se zaoblí. Nejprve se vytvoří jedna hůl a pomocí příkazu „Zrcadlit“ (Obr. 4.13, pozice 4) lze vytvořit hůl druhou. Jestliže je náčrt zavazbený, lze použít příkaz „Dokončit náčrt“, které přepne program do prostředí 3D.



Obr. 4.13 Zhotovení náčrtu ornamentu.

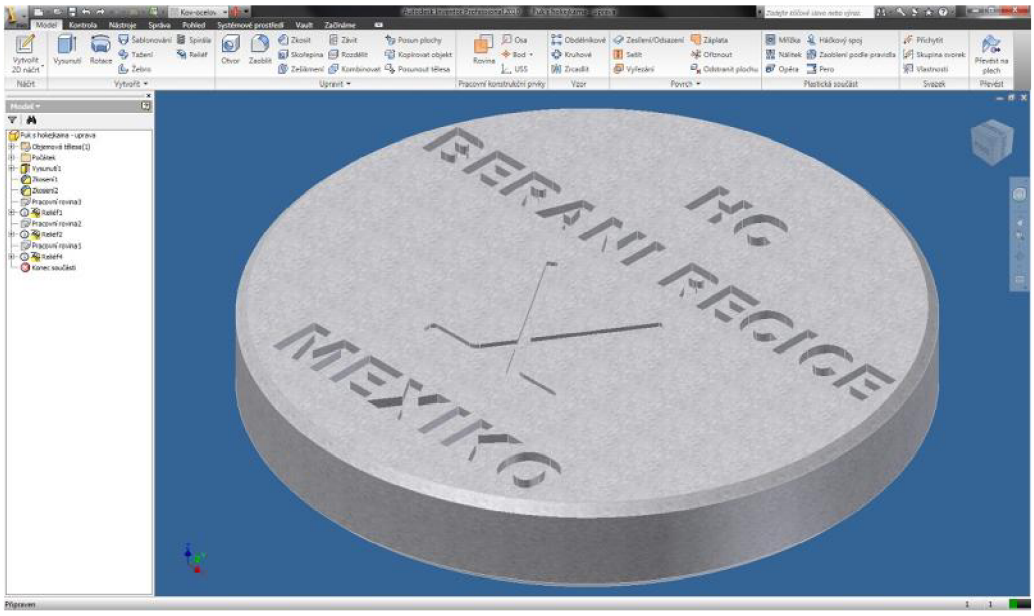
Třetí a poslední reliéf (Obr. 4.14) se vytvoří stejně jako ty předchozí s rozdílným profilem.



Obr. 4.14 Tvorba třetího reliéfu ve 3D prostředí.

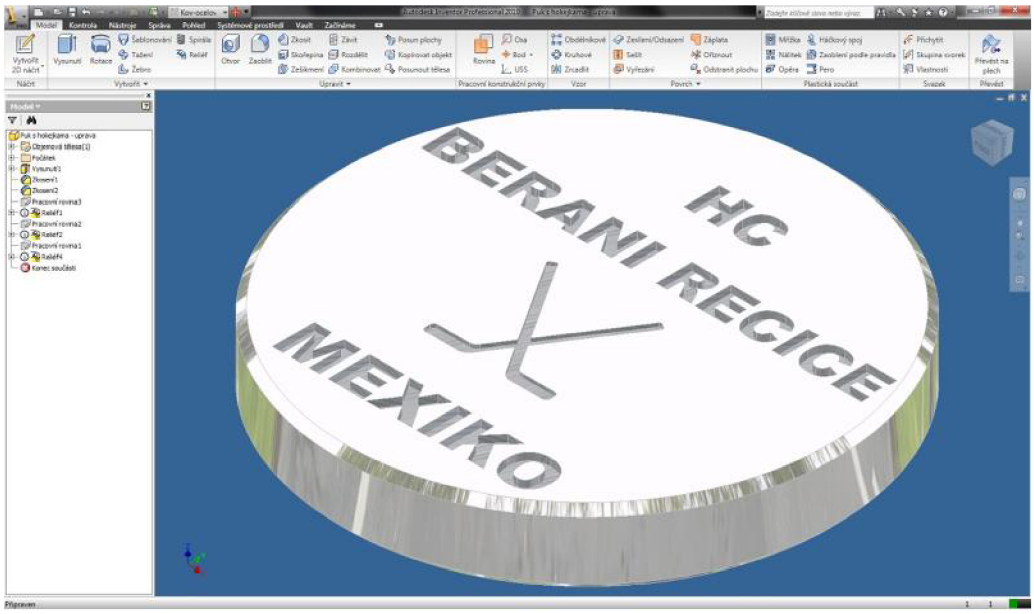
4.3.5 Hotový model

Hotový model z předdefinovaného materiálu je na obrázku (Obr. 4.15).



Obr. 4.15 Model z předdefinovaného materiálu.

Model s imitací materiálu, ze kterého je ve skutečnosti vyroben lze vidět na následujícím obrázku (Obr. 4.16).



Obr. 4.16 Model z finálního materiálu.

5. VÝROBA PREZENTAČNÍHO PŘEDMĚTU NA VERTIKÁLNÍ FRÉZCE FV 25 CNC S ŘÍDICÍM SYSTÉMEM HEIDENHAIN ITNC 530

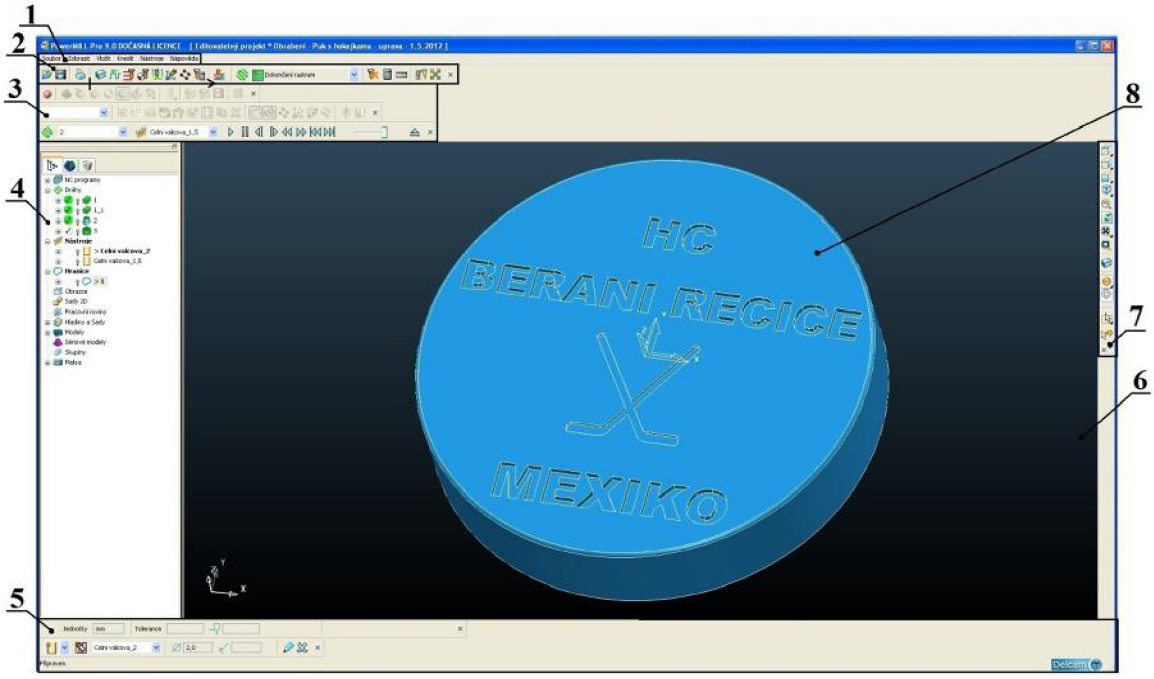
V tomto bodě bude popsána tvorba řídicího programu pro výrobu prezentačního předmětu a samotná výroba.

5.1 Tvorba řídicího programu pro výrobu prezentačního předmětu

Řídicí program pro výrobu prezentačního předmětu byl vytvořen v softwaru PowerMill 9. PowerMill je software od firmy Delcam, který je určen pro programování na CNC frézovacích strojích a centrech[19].

5.1.1 Popis pracovního prostředí programu PowerMill 9

Pracovní prostředí programu PowerMill 9 (Obr. 5.1) je uspořádáno tak, aby uživateli bylo umožněno co nejefektivnější ovládání.



Obr. 5.1 Pracovní prostředí programu PowerMillu 9.

Panel hlavní nabídky (Obr. 5.1, pozice 1)

Zde jsou příkazy ke správě samotného souboru. Dále se zde naleznou hlavní příkazy k ovládání programu.

Hlavní panel s příkazy (Obr. 5.1, pozice 2)

Tento panel obsahuje nejpoužívanější příkazy. Posloupnost plnění jednotlivých příkazů je přesně dána a je plněna zleva doprava.

Panel simulace (Obr. 5.1, pozice 3)

Panel simulace slouží k verifikaci drah nástrojů, lze zde zobrazit odebíraný materiál.

Panel vlastností (Obr. 5.1, pozice 4)

Díky tomuto panelu lze snadno kontrolovat a případně editovat jednotlivé procesy.

Panel nástrojů a stavový řádek (Obr. 5.1, pozice 5)

Tento panel umožňuje rychlé nastavení nástroje a nastavení řezných podmínek pro daný nástroj. Dále se zde zobrazují údaje o aktivních možnostech nastavení a informace týkající se aktuálního zobrazení.

Pracovní plocha (Obr. 5.1, pozice 6)

Pracovní plocha je hlavní část okna, kde je zobrazen model.

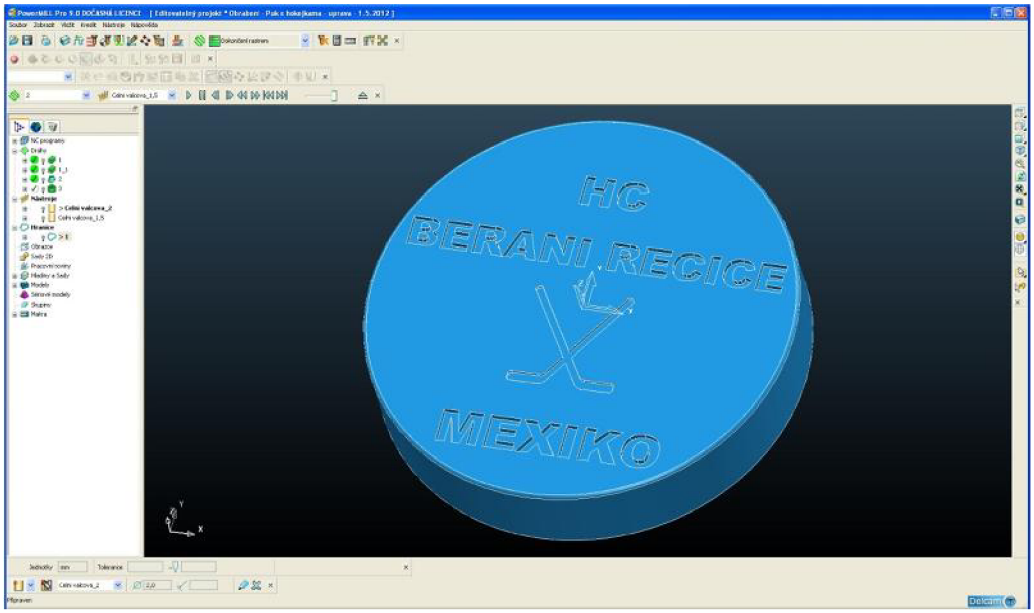
Panel zobrazení (Obr. 5.1, pozice 7)

Panel zobrazení slouží k rychlému ovládání modelu jako např. otáčení či posuv.

Model (Obr. 5.1, pozice 8)

5.1.2 Import modelu

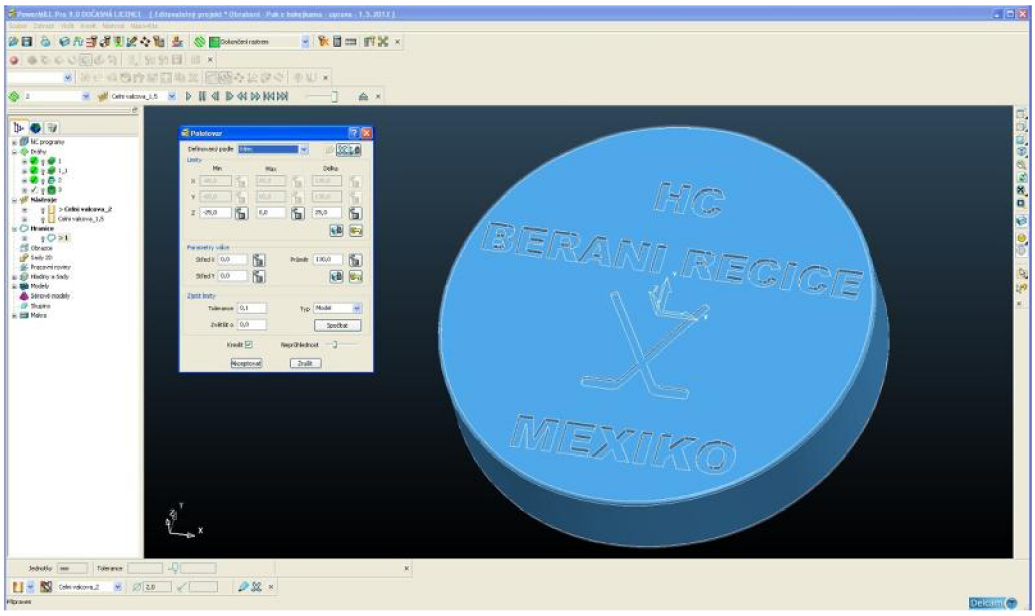
Import modelu do programu PowerMill 9 (Obr. 5.2) byl proveden přímo z programu Inventor, ze kterého byl model exportován do patřičného formátu, aby byl možný import do softwaru PowerMill 9.



Obr. 5.2 Import modelu do programu PowerMill 9.

5.1.2 Definice polotovaru

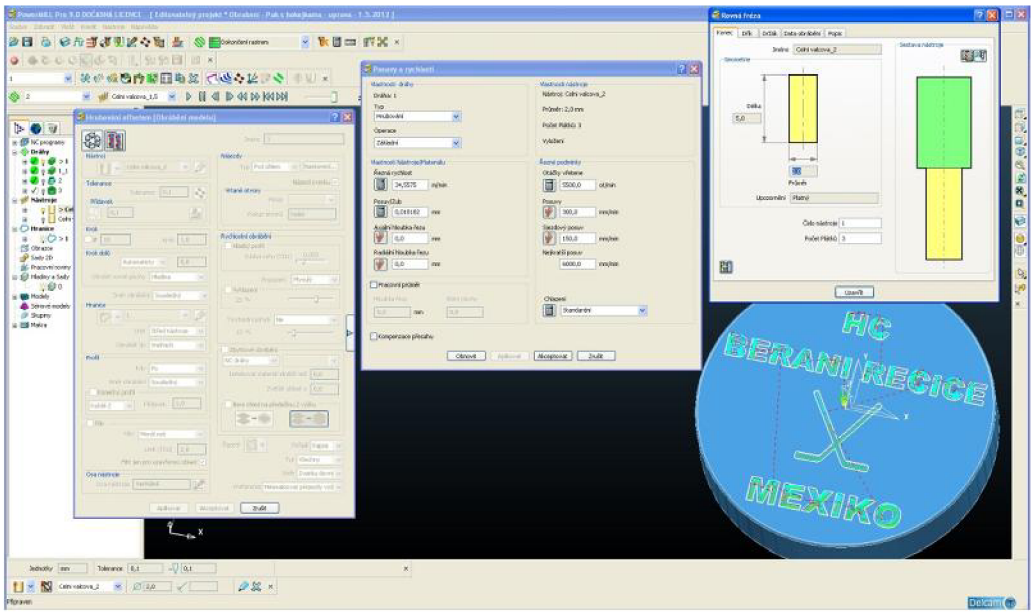
Pro správné nastavení drah nástroje je důležitá přesná definice polotovaru (Obr. 5.3).



Obr. 5.3 Definice polotovaru.

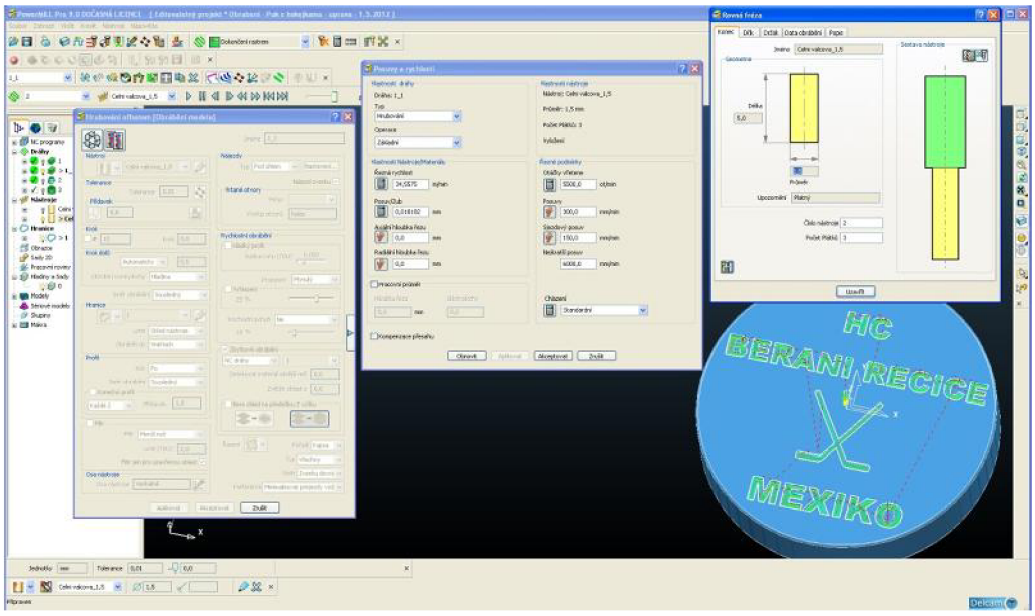
5.1.3 Technologické strategie

Jako první technologická operace byla provedena strategie hrubování offsetem (Obr. 5.4). Na tomto obrázku lze vidět nastavení strategie obrábění – hrubování offsetem, dále nastavení řezných podmínek (posuvy a rychlosti) a konečně definice nástroje pro tuto operaci.



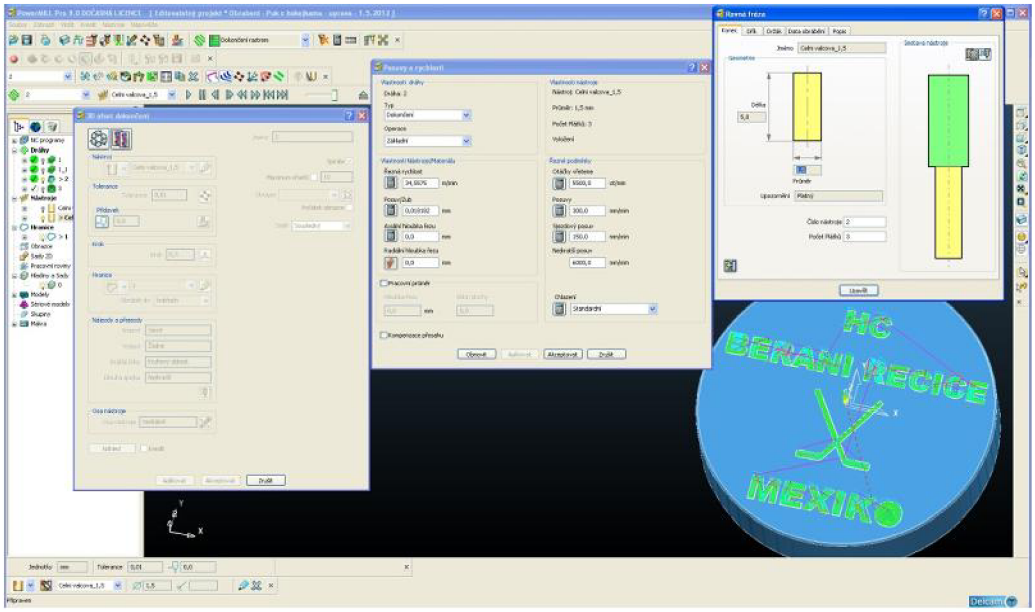
Obr. 5.4 Strategie hrubování offsetem čelní válcovou frézou o průměru 2 mm.

Následnou operací byla opět strategie hrubování offsetem (zbytkové obrábění z předchozí operace) s monolitní čelní válcovou stopkovou frézou o průměru 1,5 mm (Obr. 5.5).



Obr. 5.5 Strategie hrubování offsetem čelní válcovou frézou o průměru 1,5 mm.

Poslední operací byla strategie 3D ofset dokončení. Touto operací byl prezentační předmět dokončen. Na (Obr. 5.6) lze vidět strategii obrábění (3d ofset dokončení), řezné podmínky a definici nástroje. Jako nástroj je zde použita čelní válcová stopková fréza o průměru 1,5 mm.



Obr. 5.6 Strategie 3D ofset dokončení.

5.2 Výroba prezentačního předmětu

Prezentační předmět byl vyroben na konzolové vertikální frézce FV 25 CNC s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530.

5.2.1 Popis konzolové vertikální frézky FV 25 CNC s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530

Obráběcí stroj FV 25 CNC (Obr. 5.7) je konzolová vertikální frézka s pevným vřeteníkem a svislým vřetenem uloženým ve výsuvné pinole, s číslicovým řízením posuvu podélného a příčného, přičemž svislý číslicově řízený posuv vykonává výsuvná pinola. Svislý zdvih konzoly je neřízený a slouží k přestavení obrobku do vhodné polohy vůči vřetenu. V této poloze je možno konzolu zpevnit. Stroj se hodí především k obrábění středních a malých součástí s velkým podílem vrtacích a vyvrtávacích procesech díky NC řízené výsuvné pinole, která zvyšuje přesnost a rychlost těchto operací.

Obr. 5.7 Obráběcí stroj – konzolová vertikální frézka FV 25 CNC s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530.

Technické parametry stroje

Konzolová vertikální frézka FV 25 CNC je osazena řídicím systémem Heidenhain iTNC 530, který řídí všechny pracovní pohyby na stroji. Pro snadnější polohování konzoly je frézka vybavena ručním kolečkem. Nástroje jsou do vřetena upínány pomocí pneumaticko – hydraulického systému. Jako příslušenství lze využít otočného stolu a dělicího přístroje. Technické parametry jsou uvedeny v (Tab. 5.1).

Tab. 5.1 Technické parametry konzolové vertikální frézky FV 25 CNC řídicím systémem Heidenhain iTNC 530.

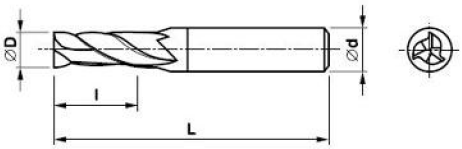
Stůl	
Rozměr pracovní plochy [mm]	300x1300 (350x1300)
Počet upínacích drážek [ks]	5
Šířka a rozteč up. drážek [mm]	14x50
Maximální zatížení stolu [kg]	200
Pracovní zdvih	
Podélný - osa X [mm]	760

Příčný - osa Y [mm]	355
Svislý - osa Z [mm]	152
Svislé přestavení konzoly [mm]	420
Pracovní posuv [mm.min^{-1}]	2,5÷3000
Rychloposuv [mm.min^{-1}]	9000
Vřeteno	
Upínací kužel [–]	ISO40
Otáčky n [ot.min^{-1}]	50÷6000
Výkon P [kW]	5,5
Vzdálenost osy vřetene od vedení stojanu [mm]	373
Stroj	
Celkový příkon P [kW]	22
Hmotnost m [kg]	1500
Zastavěná plocha [mm]	2750x2385
Výška [mm]	2030

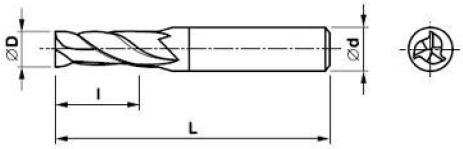
5.2.2 Popis použitých nástrojů

Pro vyhotovení předmětu byly použity tří – břité monolitní čelní válcové stopkové frézy ze SK (Obr. 5.8). U prvního hrubování – hrubování offsetem byla použita fréza o průměru 2 mm (Obr. 5.9) a pro druhé hrubování fréza o průměru 1,5 mm (Obr. 5.10). Pro dokončovací operaci – 3D ofset dokončení byla použita stopková fréza o průměru 1,5 mm.

Obr. 5.8 Tří – břitá stopková fréza[20].



Obr. 5.9 Fréza o průměru 2 mm[20].



Obr. 5.10 Fréza o průměru 1,5 mm[20].

V níže uvedené tabulce (Tab. 5.2) lze vidět rozměry čelní válcové frézy o průměru 2mm. V další tabulce (Tab. 5.3) jsou uvedené rozměry čelní válcové frézy s průměrem 1,5 mm, která byla použita pro druhé hrubování (zbytkové obrábění z 1. operace) a dokončování.

Tab. 5.2 Rozměry první frézy[20].

D [mm]	2
l [mm]	6
L [mm]	38
d [mm]	3

Tab. 5.3 Rozměry druhé frézy[20].

D [mm]	1,5
l [mm]	5
L [mm]	38
d [mm]	3

5.2.3 Popis zvoleného materiálu

Pro výrobu prezentačního materiálu byla použita duralová slitina. Dural (Obr. 5.11) nebo duraluminium (z lat. „tvrdý hliník“) je slitina hliníku. Obvykle obsahuje 90÷96 % hliníku a 4÷6 % mědi, může obsahovat malé množství hořčíku, manganu aj. Oproti čistému hliníku je dural nepatrně těžší, ale až pětkrát pevnější v tahu a je i tvrdší. Tvrdost i pevnost lze zvyšovat tepelným opracováním a zušlechťováním jako je tomu u ocelí. Dural je velmi snadno obrobitelný a lze ho svařovat v ochranné atmosféře. Další možností spojování je pájení pomocí speciálních tavidel, lepení nebo nýtování. Dural je chemicky odolný a lze ho snadno povrchově upravovat a barvit. Nevýhodou duralu je malá schopnost tlumit otřesy a pohlcovat rázy. Hojně se používá zejména v automobilovém průmyslu, při stavbě lodí a letadel, ve stavebnictví, při výrobě sportovních a zdravotnických potřeb[15].

Obr. 5.11 Dural – duralové tyče[23].

5.2.4 Samotná výroba prezentačního předmětu

Prvním krokem bylo upnutí materiálu (Obr. 5.12). Na tomto obrázku lze vidět chladicí systém, kterým proudí chladící emulze. Postup frézování je možné vidět na monitoru, kde je spuštěn řídicí program (Obr. 5.13).

Obr. 5.12 Upnutí materiálu a chladicí sytém s chladicí emulzí.

Obr. 5.13 Postup frézování v řídicím programu.

Dokončené první hrubování lze vidět na níže uvedeném obrázku (Obr. 5.14) a hotový proces druhého hrubování je vidět na obrázku (Obr. 5.15).

Obr. 5.14 Dokončené první hrubování.

Obr. 5.15 Dokončené druhé hrubování.

Na obrázku (Obr. 5.16) lze vidět obrobek po skončení operace dokončování, na dalším obrázku (Obr. 5.17) se vidí to samé v řídicím programu.

Obr. 5.16 Obrobek po skončení operace dokončení.

Obr. 5.17 Hotová operace dokončení v řídicím programu.

Po dokončení frézování se na soustruhu srazily hrany a poté byl prezentační předmět vyleštěn na stojanové brusce. Výsledek těchto operací lze vidět na níže uvedeném obrázku (Obr. 5.18).

Obr. 5.18 Prezentační předmět po sražení hran a vyleštění.

Pro vystavení prezentačního předmětu byl dodatečně vyroben dřevěný rám (Obr. 5.19), do kterého byla vyfrézována díra a do té vsazena finální podoba prezentačního předmětu (Obr. 5.20). Rám byl zhotoven v truhlářství Jaroslav Kříž a je ze smrkového dřeva.

Obr. 5.19 Dřevěný rám.

Obr. 5.20 Dřevěný rám se vsazeným prezentačním předmětem.

ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce se zabývá obecnou technologií frézování a popisem materiálů pro řezné nástroje. Dále se práce zaměřuje na tvorbu a návrh prezentačního předmětu v programu Autodesk Inventor Professional 2010. Poslední část práce se zabývá návrhem strategií pro obrábění a verifikací drah v programu PowerMill 9 s následnou výrobou prezentačního předmětu na konzolové vertikální frézce FV 25 CNC s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530. Dosažené cíle práce jsou shrnuty do následujících bodů:

- byla zpracována rešerše obecné technologie frézování,
- byla vypracována rešerše na téma materiálů pro řezné nástroje,
- byl navrhnut a zkonstruován model prezentačního předmětu v programu Autodesk Inventor Professional 2010, který byl následně importován do programu PowerMill 9,
- byly vytvořeny strategie obrábění v programu PowerMill 9,
- bylo realizováno obrábění na obráběcím stroji – konzolové vertikální frézce FV 25 CNC s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530.

Veškeré cíle práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2001. 270s. ISBN: 80-214-1996-2.
2. HUMÁR, A. Výrobní technologie II [online]. Studijní opory pro podporu samostudia. VUT v Brně, FSI, 2002. 84 s. [vid. 3. Ledna 2012]. Dostupné z: http://www.ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/VyrobniTechnologie._II.pdf.
3. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o. Technická příručka obrábění – kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91 – 97 – 2299 – 4 – 6.

4. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN: 978 – 80 – 254 – 2250 – 2.

5. HUMÁR, A. Slinuté karbidy a Řezná keramika pro obrábění. 1. vyd. Brno: CCB spol. s r.o., 1995. 256 s. ISBN: 80 – 85825 – 10 – 4.

6. SUPERHARD. [online]. [vid. 26. dubna 2012]. Dostupné z: http://www.superhard.cz/.

7. MMSPEKTRUM. [online]. [vid. 26. dubna 2012]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/.

8. TZS.KMM. [online]. [vid. 26. dubna 2012]. Dostupné z: http://tzs.kmm.zcu.cz/TZSprcelk.pdf.

9. SLINUTÉ KARBIDY A JEJICH EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ. [online]. [vid. 28. dubna 2012]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/.

10. JUMK, periodická tabulka prvků. [online]. [vid. 29. dubna 2012]. Dostupné z: http://jumk.de/mein-pse/.

11. CEMIE – MASTER. [online]. [vid. 30. dubna 2012]. Dostupné z: http://www.chemie-master.de/.

12. VOLKSAPOTHEKESCHAFFHAUSEN. [online]. [vid. 30. dubna 2012]. Dostupné z: http://www.volksapothekeschaffhausen.ch/.

13. INSTITUT GEOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ. [online]. [vid. 30. dubna 2012]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/.
14. MINERÁLY ČR A SR PETR ŠÍSTEK. [online]. [vid 1. května 2012]. Dostupné z: http://www.petrsistek.estranky.cz/.
15. WIKIPEDIE, otevřená encyklopedie. [online]. [vid. 2. května 2012]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/.

16. MINERALOGY DATABASE, databáze minerálů. [online]. [vid. 2 května 2012]. Dostupné z: http://webmineral.com/.

17. NEFERTITIS, databáze minerálů. [online]. [vid. 4. května 2012]. Dostupné z: http://www.nefertitis.cz/.

18. CADSTUDIO, online CAD/CAM příručka. [online]. [vid. 12. května 2012]. Dostupné z: http://www.cadstudio.cz/.

19. CAD/CAM. [online]. [vid. 14. května 2012]. Dostupné z: http://cadcam.fme.vutbr.cz/.

20. M & V, velkoobchod s nástroji. [online]. [vid. 18. května 2012]. Dostupné z: http://www.mav.cz/.

21. RCMICROCARS, velkoobchod. [online] [vid. 18. května 2012]. Dostupné z: http://www.rcmicrocars.eu/.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CAD	[-]	Počítačem podporované projektování
CAM	[-]	Počítačem podporovaná výroba
CVD	[-]	Chemical Vapour Deposition
CNC	[-]	Počítačové číslicové řízení
DWG	[-]	Binární formát souboru výkresu AutoCADu
HRA	[-]	Tvrdost dle Rockwella
HV	[-]	Tvrdost dle Vickerse
KNB	[-]	Kubický Nitrid Boru
NC	[-]	Číslicové řízení
PKD	[-]	Polykrystalický diamant
PKNB	[-]	Polykrystalický Kubický Nitrid Boru
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition
ŘK	[-]	Řezná Keramika
SK	[-]	Slinutý Karbid
VBD	[-]	Vyměnitelný Břitová Destička

Symbol	Jednotka	Popis
A_{Di}	[mm]	Jmenovitý průřez třísky
A_{Dmax}	[mm]	Maximální průřez třísky
D	[mm]	Průměr frézy
H	[mm]	Hloubka odebírané vrstvy
Q	[$cm^3 . min^{-1}$]	Velikost úběru materiálu
a_e	[mm]	Šířka záběru do obrobku
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
b_i	[mm]	Jmenovitá šířka třísky
f_z	[mm]	Posuv na zub
h_i	[mm]	Jmenovitá tloušťka třísky
h_{max}	[mm]	Maximální tloušťka třísky
n	[$ot.min^{-1}$]	Otáčky vřetene
n_z	[ks]	Počet zubů
v_c	[$m.min^{-1}$]	Řezná rychlost
v_f	[$mm.min^{-1}$]	Posuvový rychlost
v_e	[$m.min^{-1}$]	Rychlost řezného pohybu
z_n	[ks]	Celkový počet břitů nástroje
η	[kW]	Účinnost
κ_r	[°]	Úhel nastavení frézy
φ_i	[°]	Jmenovitý úhel posuvového pohybu
Φ_{max}	[°]	Maximální úhel posuvového pohybu