VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

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

OBRÁBĚNÍ TĚŽKOOBROBITELNÝCH MATERIÁLŮ

METHODS OF MACHINING DIFFICULT - MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE RADEK ŠEBELA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. MILAN KALIVODA
SUPERVISOR

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Radek Šebela

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Obrábění těžkoobrobitelných materiálů

v anglickém jazyce:

Methods of machining difficult-materials

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor problematiky těžkoobrobitelných materiálů: Přehled těchto materiálů, obrobitelnost, základní metody obrábění, nástrojové vybavení, vlivy na řezný proces.

Cíle bakalářské práce:

V uceleném tématu soustředit podmínky a principy obrábění na současný stav techniky. Znalost materiálů. Znalost nástrojů. Doložení technologických procesů.

Seznam odborné literatury:

1. CIHLÁŘOVÁ, Petra, Michael Lars George HILL and Miroslav PÍŠKA. Fundamentals of CNC Machining. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://cnc.fme.vutbr.cz>.
2. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. ŠTULPA, Miloslav. CNC obráběcí stroje a jejich programování. 1. vyd. Praha: Technická literatura BEN, 2007. 128 s. ISBN 978-80-7300-207-7.
4. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. Miroslav Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
5. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing s. r. o., 2008. 240 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
6. KOCMAN, Karel. Speciální technologie obrábění. 3. vyd. Brno: VUT v Brně, Akademické nakladatelství CERM, 2004. 230 s. ISBN 80-214-2562-8.
7. FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. Nástrojové oceli. 1. vyd. Brno: Dům techniky Brno, 1994. 234 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Kalivoda

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 24.10.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c. Děkan fakulty

ABSTRAKT

Téma bakalářské práce je ucelený rozbor jednotlivých druhů a metod obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Dále přehled vybraných nástrojových materiálů pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů a faktorů ovlivňujících řezné prostředí. V závěru je uveden přehled firem, které se obráběním těchto materiálů zabývají.

Klíčová slova

těžkoobrobitelné materiály, konvenční metody, nekonvenční metody, slinuté karbidy

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is a comprehensive analysis of various types and methods of machining difficult-materials. In addition an overview of selected tool materials for machining difficult-materials and factors affecting the cutting area. At the end an overview of companies that are engaged in machining these materials.

Key words

difficult-materials, conventional methods of machining, unconventional methods of machining, cemented carbide tools

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠEBELA, Radek. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 44 s. příloh 5. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Obrábění těžkoobrobitelných materiálů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum	Radek Šebela

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Milanu Kalivodovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD

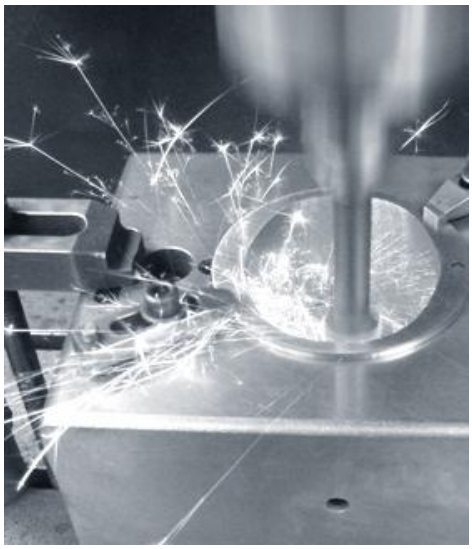
Strojírenství patří k nejstarším a nejobsáhlejším technickým disciplínám. Je to technický obor, který se zabývá návrhem, vlastní výrobou, měřením (testováním) a údržbou strojních součástí, strojů a strojních zařízení. Pro správnou výrobu je důležitá znalost strojírenské technologie, podle které byl zvolen pracovní postup, aby mohla být výroba zadaných strojních součástí provedena v požadovaných rozměrech a odpovídající kvalitě. S tím souvisí i vhodný výběr pracovních strojů a nástrojového vybavení, u kterého v současnosti nesmí být opomíjeno ekonomické hledisko.

Těžkoobrobitelné materiály se vyznačují svojí pevností a především vysokou tvrdostí. Tyto vlastnosti ovšem značnou měrou ovlivňují složitost mechanického procesu vlastního obrábění těchto materiálů, mezi které se řadí např. titanové slitiny, niklové slitiny, superslitiny, keramika atd. V současnosti je tato problematika velice důležitá a diskutovaná, jelikož se výše uvedené materiály prosazují v mnoha technických disciplínách, jako je např. energetika a zdravotnictví.

Jak už bylo řečeno vlastní obrábění je velice složité. Je prováděno konvečními metodami (soustružení, frézování, vrtání …),nebo nekonvenčními metodami obrábění, které jsou v dnešní době velice populární a stále častěji využívané. Hlavním faktorem při volbě metody obrábění však zůstává cena, a proto se nekonvenční metody, které jsou stále ve většině případů nákladnější, používají především v aplikacích, které nejsou možné provést konvenčními metodami.

Současně s volbou metody obrábění je nutné zvolit vhodný nástrojový materiál. Pro obrábění těžkoobrobitelných se využívá slinutých karbidů (SK), řezné keramiky a supertvrdých materiálů (PD, PKNB). Volba nástroje je důležitá, protože s procesní kapalinou musí vytvořit takové prostředí, aby bylo dosaženo co nejlepšího výrobku vysoké jakosti.

V poslední části bude uveden přehled firem, které se přímo obráběním těžkoobrobitelných materiálů zabývají.



Obr. 1 CNC obrábění [9]

1 OBROBITELNOST

Zde budou definovány pojmy obrobitelnosti a popsány faktory, které s obrobitelností přímo souvisí.

1.1 Pojem obrobitelnost

Definice: „Z hlediska technologie obrábění je obrobitelnost základní vlastností materiálu a v obecném smyslu ji lze definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být efektivně zpracován některou z metod obrábění. Je hlavním činitelem, který ovlivňuje volbu řezných podmínek pro funkci nástroje při všech metodách obrábění.“ [1]

1.2 Pojem obrobitelnost

Obrobitelnost závisí na mnoha faktorech, z nichž nejdůležitější jsou:

- způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu, mikrostruktura obráběného materiálu,
- chemické složení daného materiálu,
- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu (tvrdost, pevnost, houževnatost, tepelná vodivost),
- metoda obrábění (soustružení, frézování, broušení, atd.),
- řezné podmínky (řezná rychlost, šířka záběru ostří, posuv na otáčku, posuv na zub),
- řezné prostředí (obrábění za sucha, typ procesní kapaliny a způsob její aplikace),
- geometrie nástroje (úhly polohy ostří, úhly čela a hřbetu),
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu (zejména tvrdost za vysokých teplot, chemická stabilita, odolnost proti opotřebení). [1]

1.3 Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů

Při obrání těžkoobrobitelných materiálů dochází v důsledku vysokých napětí k velkým deformacím v oblasti primární plastické deformace, i v oblasti kontaktu třísky s čelem řezného nástroje, s čímž souvisí i vznik velkého množství tepelné energie. Vysoké mechanické a tepelné zatížení břitu nástroje, spolu s tvrdými částicemi ve struktuře obráběného materiálu, výrazně zvyšují intenzitu opotřebení nástroje a snižují jeho trvanlivost. Výběr vhodného typu nástroje a nástrojového materiálu má proto rozhodující vliv na tvarovou a rozměrovou přesnost obrobků, drsnost povrchu obrobených ploch, i na hospodárnost výroby. [1]

2 TĚŽKOOBROBITELNÉ MATERIÁLY

Tyto materiály se sice vyznačují unikátními mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které jsou využívány v leteckém, potravinářském nebo v poslední době prudce se rozvíjejícím medicínském průmyslu. Na druhé straně se při obrábění uvedených materiálů výrazně zvyšuje mechanické a tepelné zatížení břitů. [2]

Mezi těžkoobrobitelné materiály lze zařadit:

- titanové slitiny,
- superslitiny (na bázi železa, kobaltu, nebo niklu),
- keramické materiály,
- kompozitní materiály,
- materiály vyrobené práškovou metalurgií (slinuté karbidy),

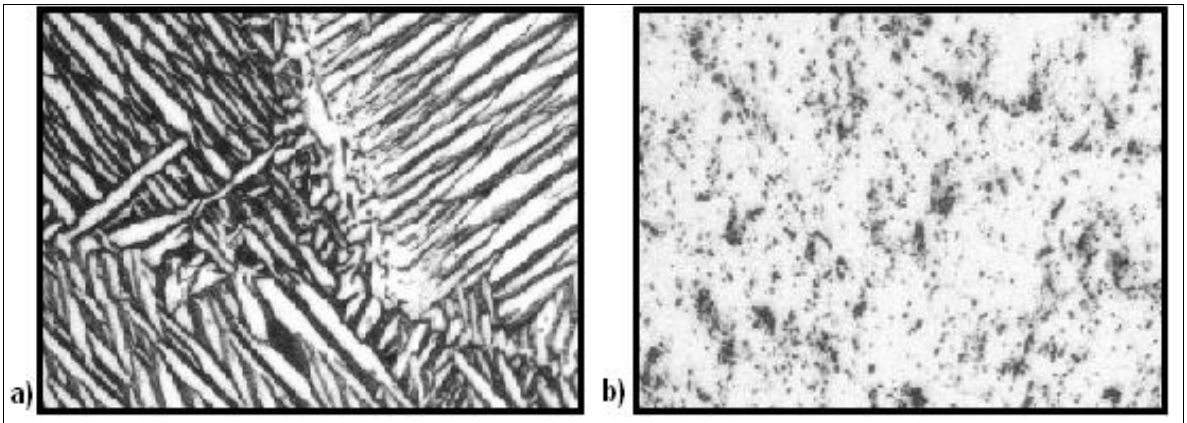
- slitiny hliníku s vysokým obsahem křemíku,
- platina a její slitiny. [1]

2.1 Titan a jeho slitiny

Titan (obr. 2.1) je polymorfní kov, jeho nízkoteplotní modifikace α krystalizuje v šesterečné soustavě s nejsměstnanějším uspořádáním a je stabilní do teploty 883 °C, kdy překrystalizuje na krychlovou, prostorově středěnou (BCC) modifikaci β. Má poměrně nízkou elektrickou i tepelnou vodivost a nízký součinitel délkové roztažnosti. Vyznačuje se dobrou odolností proti korozi, která je ve většině prostředí (např. chemický, farmaceutický, potravinářský průmysl) lepší, než u korozivzdorných ocelí. Jeho pevnostní hodnoty se blíží hodnotám pevnosti ocelí, má ale podstatně nižší modul pevnosti v tahu, mez průtažnosti se blíži jeho pevnosti v tahu. Titan má vysoký součinitel tření a velký sklon k zadírání. [1]

2.1.1 Přehled titanových slitin

- **slitiny α:** obsahují α stabilizátory, někdy v kombinaci s neutrálními prvky, proto mají α mikrostrukturu. Zástupce např. Ti-5Al-2,5Sn, která má při pokojové teplotě i zvýšené teplotě vysokou pevnost v tahu a odolnost proti creepu a poměrně dobrou houževnatost při nízkých teplotách.
- **slitiny blízké α:** mají vysoký podíl α stabilizátorů a omezené množství β stabilizátorů, proto je jejich mikrostruktura charakterizována vysokým podílem fáze α a pouze malým podílem fáze β (např. slitina Ti-6Al-4Sn-3,5Zr-0,5Mo-0,35Si-0,7Nb-0,06C). Niob pro zvýšení odolnosti proti oxidaci, uhlík zvyšuje rozsah provozních teplot.
- **slitiny α+β:** mají smíšenou α-β mikrostrukturu a patří k nejvíce používaným titanovým slitinám. Představitelem této skupiny je např. Ti-6Al-4V. Hliník snižuje měrnou hmotnost stabilizuje a zpevňuje fázi α, vanad zvyšuje objem houževnatější fáze β. Vysokou pevnost a odolnost proti creepu, odolnost proti únavovému porušení a snadné odlévání
- **slitiny β:** obsahují velké množství stabilizátorů β a vyznačují se velkou schopností vytvrzování, zlepšenou tvařitelností za studena s vysokou měrnou hmotností. [1]



a – α titan, b – β titan

Obr. 2.1 Mikrostruktura slitin titanu [10]

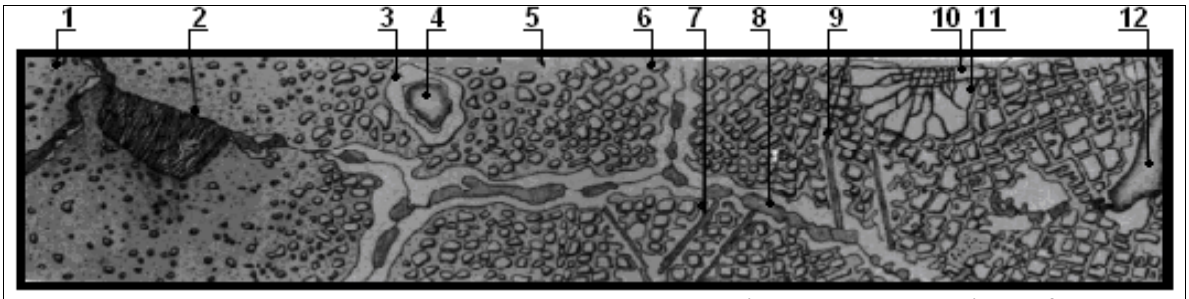
2.2 Superslitiny

Za tzv. superslitiny (obr. 2.2) jsou považovány slitiny na bázi železa, niklu nebo kobaltu, používané za vysokých teplot, které často přesahují hodnotu 70% teploty tavení materiálu. Hlavními materiálovými vlastnostmi jsou vysoká odolnost proti oxidaci s korozi za zvýšených teplot (nad 650 °C) a vysoká odolnost proti creepu.

Největší podíl v rámci superslitiny zaujímají slitiny na bázi niklu, které jsou ve velké míře používány pro výrobu součástí leteckých motorů. Niklové slitiny mají dvoufázovou rovnovážnou mikrostrukturu, která obsahuje fázi γ (matrice) a fázi γ' (hlavní vytvrzující fáze většiny těchto slitin). [1]

2.2.1 Přehled niklových slitin

- **Skupina A** tyto slitiny mají střední pevnost vysokou houževnatost, zvýšení tvrdosti lze dosáhnout pouze zpracováním za tepla. Po zpracování za vysokých teplot jsou docela poddajné.
- **Skupina B** jedná se zejména o slitiny typu Ni-Cu, které mohou být vytvrzeny pouze zpracováním za studena. Ve srovnání se slitinami skupiny A mají vyšší pevnost a o něco nižší houževnatost.
- **Skupina C** patří sem, zejména slitiny typu Ni-Cr, Ni-Fe-Cr, které jsou podobné austenitickým korozivzdorným ocelím. V porovnání s běžnými typy korozivzdorných ocelí však mají nižší abrazivní účinek.
- **Skupina D** zahrnuje materiály, které lze vytvrdit stárnutím a je rozdělena do dvou skupin na nevystárnuté materiály a vystárnuté materiály. Tyto materiály se vyznačují vysokou pevností a tvrdostí, zejména ve vystárnutém stavu. Pokud jsou rozpustně žíhány a zakaleny, nebo prudce ochlazeny proudem vzduchu, mají nižší tvrdost a jsou snadno obrobitelné.
- **Skupina E** speciální materiál, který kombinuje pevnost, houževnatost a korozní odolnost materiálu, s velmi dobrou obrobitelností dosaženou zvýšeným obsahem síry. [1]



1 – γ', 2 – karbid $M_{23}C_6$, 3 - γ', 4 – karbid MC, 5 – matrice γ, 6 – γ', 7 – sigma fáze, 8 – karbid $M_{23}C_6$, 9 – sigma fáze, 10 – eutektikum, 11 – γ', 12 - karbid MC

Obr. 2.2 Mikrostruktura niklové superslitiny [11]

2.3 Keramické materiály

Keramika je obecně charakterizována jako převážně krystalický materiál se zrny malých rozměrů, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru – oxidová keramika (Al_2O_3,ZrO_2,ThO_2), ferity, feroelektrika, nitridy (na bázi Si, B, Al), karbidy (na bázi Si, B), koridy (na bázi Ti) a další. Keramické látky jsou vázány

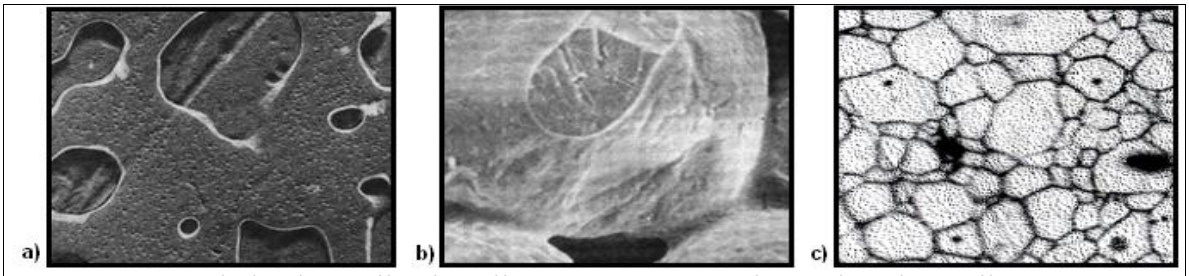
meziatomovými vazbami iontovými a kovalentními. Jejich vazba není ale čistě iontová nebo čistě kovalentní, obvykle se vyskytují oba typy vazby současně. V krystalové struktuře, tvořící základ keramických materiálů, převažují složité mřížky kubické a hexagonální. [1]

V posledních letech byly výrazně zlepšeny některé vlastnosti keramických materiálů tak, že to umožnilo podstatně rozšířit jejich aplikace ve strojírenské výrobě. Výrazně k tomu přispěly i pokroky v oblasti obrábění keramik a to jak v surovém stavu, tak v konečné fázi výroby polotovarů i konkrétních součástí. [1]

Charakteristické vlastnosti keramik:

- odolnost vůči vysokým teplotám,
- vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení,
- vysoká přesnost tvaru,
- výborné izolační vlastnosti,
- chemická odolnost a inertnost, odolnost vůči korozi a erozi,
- biologická slučitelnost. [1]

Součásti z konstrukčních keramik (obr. 2.3) jsou obvykle vyráběny lisováním nebo odléváním, a pokud přesnost součásti není rozhodující, je snahou vyrobit ji v konečném tvaru a rozměrech tak, aby odpadlo jakékoliv opracování. Součásti, které vyžadují větší přesnost, musí být dále obráběny, což lze provádět zejména v surovém ale i ve slinutém stavu (zde však nejsou vhodné všechny metody obrábění). [1]



a – skelná keramika, b – slinutá zrna SiO_2, c – korundová keramika

Obr. 2.3 Mikrostruktura [12]

2.4 Kompozitní materiály

Označení „kompozitní“ znamená „vytvořený, či skládající se ze dvou nebo více výrazně odlišných částí“. Materiál, který má dvě nebo více odlišných materiálových složek neboli fází, je podle toho tedy složeným materiálem. Avšak jen tehdy, když mají tyto složky rozdílné fyzikální vlastnosti, a tudíž i vlastnosti složeného materiálu jsou zřetelně odlišné od vlastností jeho složek. Takovýto materiál je označován jako kompozit. Kompozity (obr. 2.4) jsou tvořeny jednou nebo více nespojitými fázemi, ponořenými ve spojité fázi. Diskontinuitní fáze je obvykle tvrdší a pevnější než spojitá fáze a nazývá se ***vyztužení*** nebo vyztužující materiál, zatímco spojitá fáze se nazývá ***matrice*** (pojivo). [1]

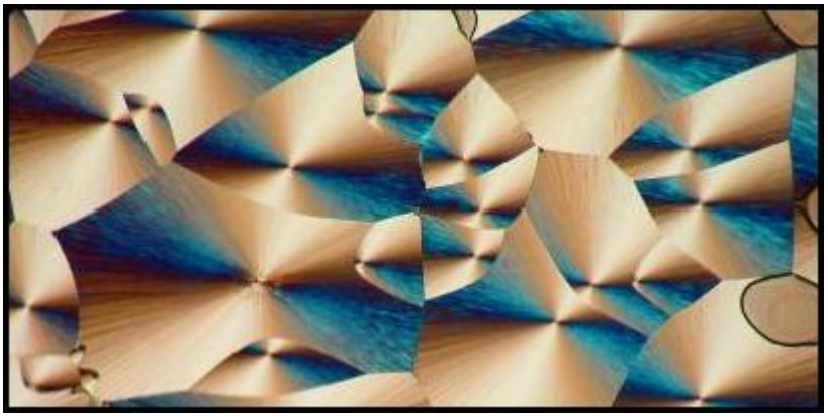
Jako matrice jsou používány:

- pryskyřice, polymery:
  - reaktoplasty,
  - termoplasty,
  - kaučuky,

- silikáty (sklo, cement, keramika),
- kovy (zejména hliník a jeho slitiny).

Základní typy vyztužujících vláken:

- přírodní (bavlna, sisal, juta, celulóza),
- anorganická (skelná, uhlíková, kovová, bórová, SiC),
- organická (aramidy – Kevlar, polyamidy, UHMWPE – polyetylén s ultravysokou molekulovou hmotností). [1]



Obr. 2.4 Struktura krystalizujících polymerních materiálů [13]

3 ZÁKLADNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ MATERIÁLU

Zde bude uvedeno rozdělení konvečních a nekonvečních technologií obrábění. V části konvenčních technologií bude věnována pozornost soustružení, frézování a vrtání. Další konvenční technologie jako jsou vyhrubování, vystružování, hoblování, obrážení nebudou dále popsány, jelikož mají nízké procento zastoupení v praxi. Hlavní důraz bude kladen na nekonvenční technologie obrábění, které jsou nejčastěji používány pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů.

3.1 Konvenční technologie obrábění

Obráběcí proces se uskutečňuje různými metodami obrábění. K základním metodám patří soustružení, frézování, vrtání, vyhrubování, vystružování a zahlubování, vyvrtávání hoblování a obrážení, protahování a protlačování. Uvedené metody jsou charakterizovány použitím nástrojů s definovanou geometrií břitu a představují v současné době nejvíce využívané aplikace při obrábění strojírenských součástí. [2]

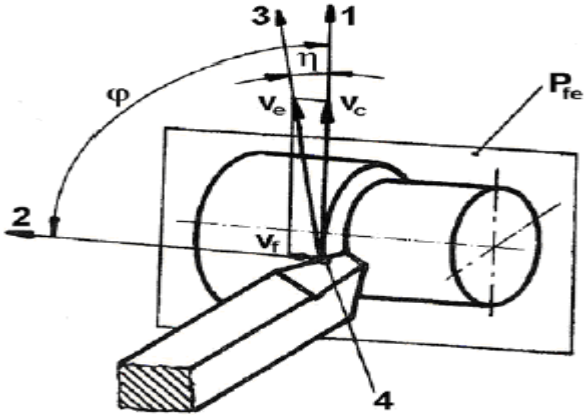
3.2 Technologie soustružení

Soustružení je metoda obrábění používaná pro zhotovení součástí rotačních tvarů, při níž se většinou používají jednobřité nástroje různého provedení. Z mnoha hledisek představuje soustružení nejjednodušší způsob obrábění a také velmi frekventovanou metodu využívanou ve strojírenství. [3]

Soustružení je univerzální metodou obrábění. Soustružením lze obrábět vnější a vnitřní válcové, kuželové, ale i tvarové plochy, rovinné čelní plochy a zápichy. Dále je možno na soustruzích vrtat, vyvrtávat, vystružovat, řezat závity, vroubkovat, válečkovat, hladit, leštit atd. [4]

3.2.1 Kinematika obráběcího procesu

Hlavní pohyb je obvykle rotační pohyb obrobku, přičemž rychlost hlavního pohybu je současně řeznou rychlostí $\mathbf{v_c}$. Posuvový pohyb je přímočarý nebo obecný, vykonává ho obvykle nástroj a má rychlost posuvového pohybu $\mathbf{v_f}$. Řezný pohyb se při soustružení válcové plochy (obr. 3.1) realizuje po šroubovici, při soustružení čelní plochy po Archimédově spirále a při soustružení rotační plochy obecného tvaru po obecné prostorové křivce. Rychlost řezného pohybu $\mathbf{v_e}$. [2]



$\mathbf{P_{fe}}$ – pracovní boční rovina, **1** – směr hlavního pohybu, **2**- směr posuvového pohybu, **3**- směr řezného pohybu, **4** – uvažovaný bod ostří

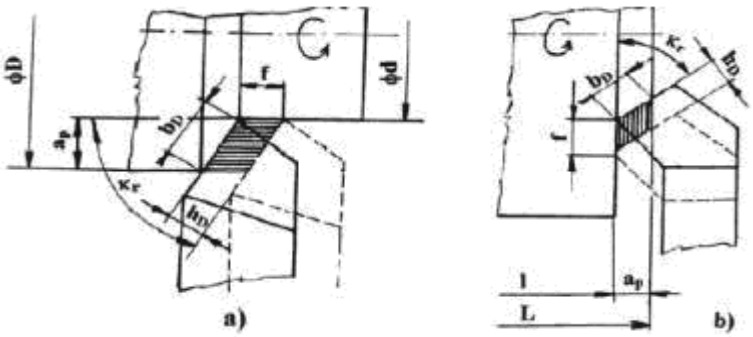
Obr. 3.1 Pohyby při podélném soustružení válcové plochy [3]

3.2.2 Kinematické veličiny

Kinematiku řezného procesu popisují veličiny, jako *hlavní pohyb, směr hlavního pohybu, řezná rychlost* $\mathbf{v_c}$*, posuvový pohyb, směr posuvového pohybu, posuvová rychlost* $\mathbf{v_f}$*, řezný pohyb, směr řezného pohybu, rychlost řezného pohybu* $\mathbf{v_e}$. Přehled vzorců kinematických veličin viz. příloha 1. [2]

3.2.3 Průřez třísky

Průřez třísky (obr. 3.2) je určen jako vrstva obráběného materiálu, která má být odebrána působením ostří nástroje. Adekvátně k „průřezu třísky“ lze použít pojem „plocha řezu“ nebo „plocha průřezu třísky“. Přehled vzorců rozměrů třísky viz. příloha 1. [2]



a) válcová plocha, b) čelní plocha

$\mathbf{a_p}$ – šířka záběru ostří, $\mathbf{b_D}$ – jmenovitá šířka třísky, $\mathbf{h_D}$ – jmenovitá tloušťka třísky

$\boldsymbol{\kappa_r}$ – nástrojový úhel nastavení hlavního ostří, **D** – průměr obráběné plochy

d – průměr obrobené plochy, **L** – délka obráběné plochy, **l** – délka obrobené plochy

Obr. Obr. 3.2 Identifikace průřezu třísky při soustružení [4]

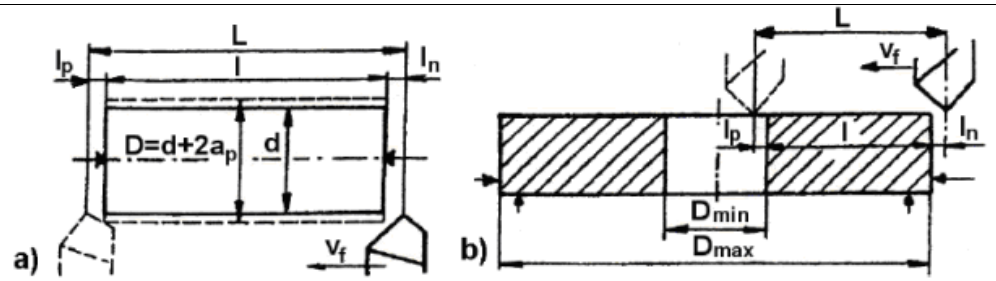
3.2.4 Řezné síly

Řezný proces se realizuje jako výsledný proces působení složité silové soustavy mezi nástrojem a obrobkem. Identifikace této silové soustavy umožňuje optimalizaci řezných podmínek s ohledem na průběh obrábění a stabilitu břitu nástroje. [2]

Celková řezná síla **F** a její složky, řezná síla $\mathbf{F_c}$, posuvová síla $\mathbf{F_f}$, a pasivní síla $\mathbf{F_p}$ se pro podélné soustružení válcové plochy stanoví podle vztahů viz. příloha 1.

3.2.5 Jednotkový strojní čas

Při stanovení jednotkového strojního času soustružnických obráběcích procesů se vychází z poměrů naznačených na (obr. 3.3). Rovnice pro výpočty strojních časů soustružení válcové a čelní plochy viz. příloha 1. [2]



a) podélné soustružení, b) čelní soustružení

Obr. 3.3 Jednotkový strojní čas [4]

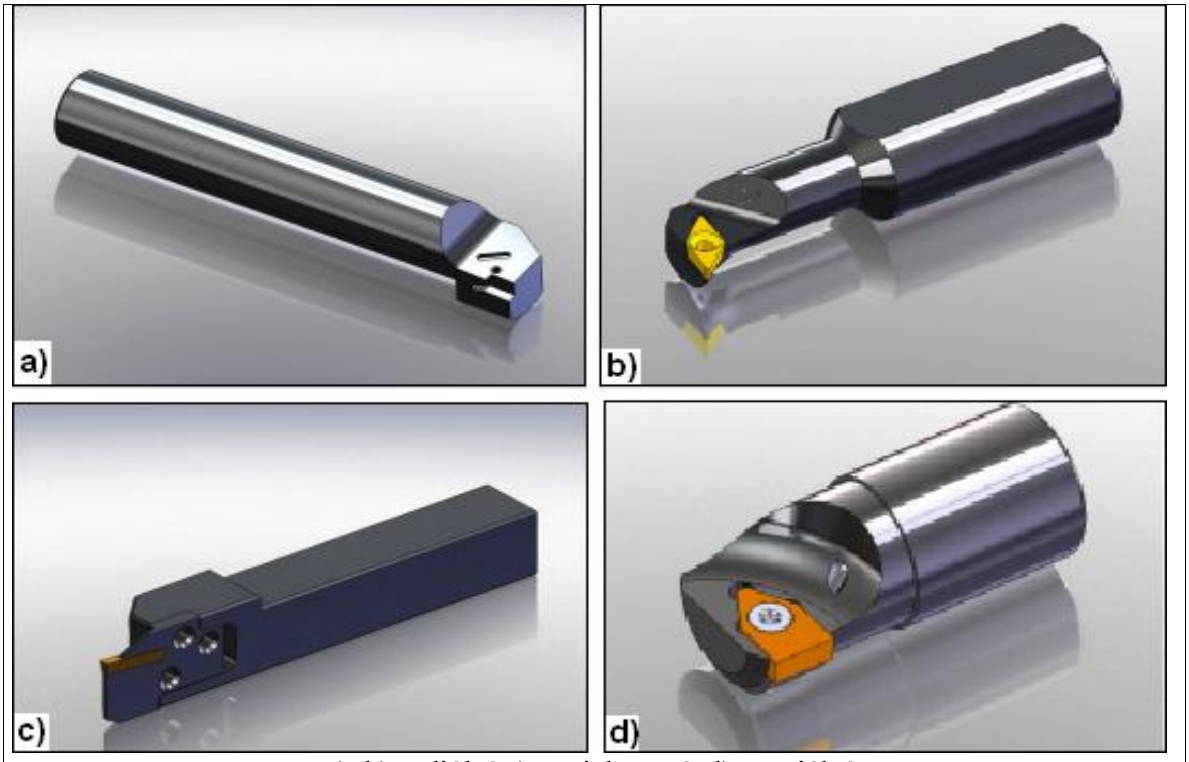
3.2.6 Soustružnické nože

Z technologického hlediska se rozlišují soustružnické nože (obr. 3.4) *radiální* (nejužívanější), *prizmatické, kotoučové* a *tangenciální*. [4]

- **Radiální soustružnický nůž** se skládá z pracovní a upínací části. Podle polohy ostří v pracovní souřadnicové soustavě se rozlišují nože *pravé* (směr posuvu zprava do leva) a *levé* (směr posuvu zleva doprava). Dle konstrukce je lze dělit na *celistvé*, s *pájenými* a s *vyměnitelnými břitovými destičkami*. [4]
- **Prizmatické nože** se používají pro vnější soustružení tvarových ploch zapichováním. Profil nože se řeší pro jednotlivé uzlové body v rovině čela a potom v radiální rovině nože. [2]
- **Kotoučové nože** se používají výhradně jako nože tvarové. Tvar po obvodu kotoučového nože není totožný s tvarem, který má být obroben. Ostření kotoučového nože se provádí na čele a může se mnohokrát opakovat, aniž se mění jeho funkční tvar. [2]
- **Tangenciální nože** se rovněž používají jako tvarové, nejčastěji na soustružnických revolverových automatech. Nůž vykonává posuvový pohyb po přímce mimoběžné k ose rotace obrobku. [2]
- **Nože s vyměnitelnými břitovými destičkami**, vyměnitelné břitové destičky jsou mechanicky upnuté k nožovému držáku. Jde zejména o destičky ze slinutých karbidů, řezné keramiky, cermetů a kubického nitridu bóru, případně ze syntetického diamantu. Destička je obvykle vícebřitá a po otupení jednoho břitu se

pootočí do další polohy a aplikuje se další břit. Výměna destiček je rychlá a snadná. Poloho břitu není obvykle nutno seřizovat. [2]

- **Speciální nože**

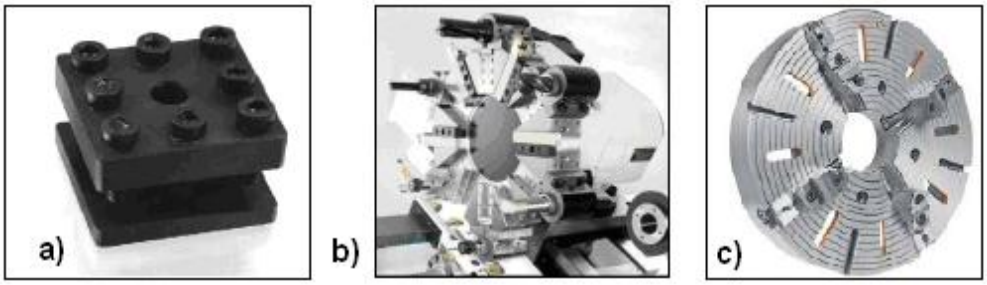


a), b) radiální c) zapichovací, d) speciální

Obr. 3.4 Soustružnické nože [14]

3.2.7 Upínání nástrojů

Upnutí soustružnických nástrojů (obr. 3.5) musí být jednoznačné a spolehlivé a je-li to nutné, má umožnit výškové přestavení. Soustružnické nože upínáme do různých druhů upínek, nebo do otočných nožových hlav, do kterých je možné především u univerzálních hrotových soustruhů upnout až čtyři nože současně. Dále je možné upnout nástroje ve speciálních držácích do revolverových hlav. [4]

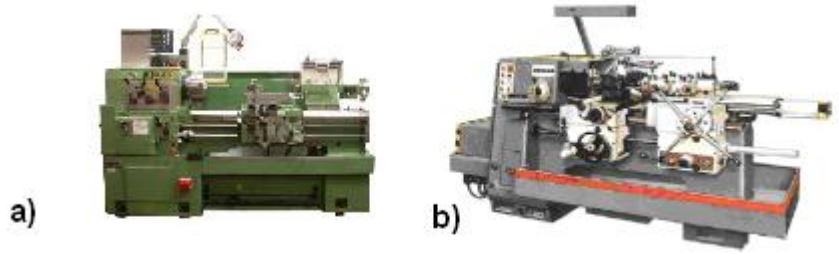


a) nožová hlava, b) revolverová hlava, c) upínací deska

Obr. 3.5 Upnutí soustružnických nožů [4], [15], [16]

3.2.8 Soustruhy

Soustružnické stroje mají největší podíl zastoupení ze strojírenské obráběcí techniky. V provozech strojírenských podniků jsou zastoupeny ve velkém počtu typů a různých stupních automatizace.
Z konstrukčně technologického hlediska rozlišujeme soustruhy *hrotové*, *revolverové*, *svislé* a *speciální* (obr.3.6).
Podle stupně automatizace můžeme soustruhy a soustružnická centra dělit na *ručně ovládané*, *poloautomatické* a *automatické*. [2]



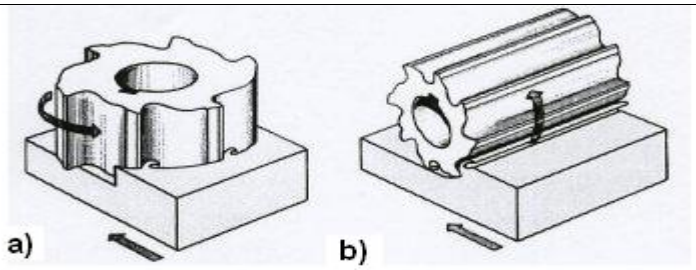
a) univerzální hrotový, b) revolverový

Obr. 3.6 Soustruhy [4], [17]

3.3 Technologie frézování

Frézování (obr. 3.7) je metoda obrábění, při které se materiál obrobku odebírá břity otáčejícího se nástroje. Posuv koná obvykle obráběná součást ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích zařízení se posuvy mohou plynule měnit a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky.

Z technologického hlediska se v závislosti na aplikovaném nástroji rozliší frézování válcové (frézování obvodem) a frézování čelní (frézování čelem). Dalšími způsoby mohou být frézování okružní a planetové. [3]



a) čelní frézou, b) válcovou frézou

Obr. 3.7 Frézování [18]

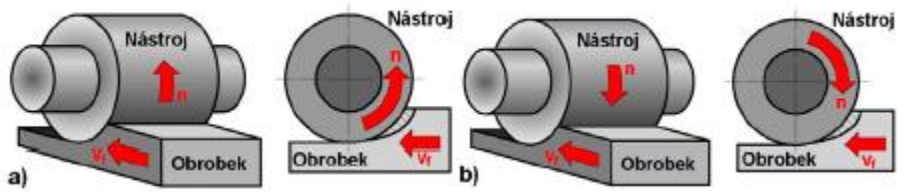
3.3.1 Kinematika obráběcího procesu

Válcové frézování (obr. 3.8) se v mnoha případech uplatňuje při obrábění válcovými a tvarovými frézami. Zuby frézy jsou vytvořeny pouze po obvodu nástroje, hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu frézy a směr posuvu. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. V závislosti na kinematice obráběcího procesu se rozlišuje frézování *sousledné* (sousměrné) a *nesousledné* (protisměrné). [3]

- Při **nesousledném frézování** je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Tloušťka třísky se mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. 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 má složku, která působí směrem nahoru a odtahuje obrobek od stolu stroje.

- Při **sousledném frézování** je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka třísky vzniká při vnikání zubu frézy do obrobku. Obrobená plocha se vytváří, když zub vychází ze záběru. Řezné síly působí obvykle směrem dolů, proti stolu stroje. Sousledné frézování může probíhat pouze na přizpůsobeném stroji při vymezené vůli a předpětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézky. V opačném případě způsobuje vůle nestejnoměrný posuv, při němž může dojít k poškození nástroje, popř. i stroje. [4]



a) nesousledné, b) sousledné

Obr. 3.8 Válcové frézování [4]

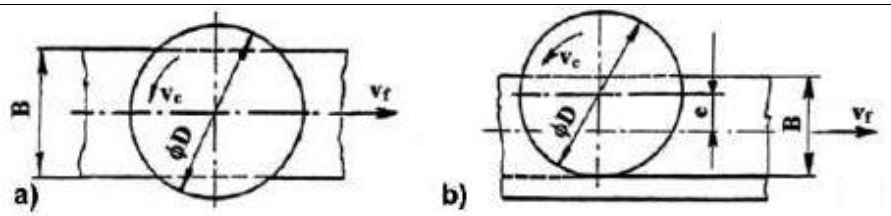
Výhody nesousledného frézování:

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

Výhody sousledného frézování:

- vyšší trvanlivost břitů, což umožňuje použití vyšších řezných rychlostí a posuvů,
- menší potřebný řezný výkon,
- řezná síla přitlačuje obrobek ke stolu, takže lze použít jednodušších upínacích přípravků,
- menší sklon ke kmitání,
- obvykle menší sklon k tvoření nárůstku,
- menší drsnost obrobeného povrchu. [4]

Čelní frézování (obr 3.9) se používá při práci s čelními frézami, které mají břity vytvořeny na obvodě i čele nástroje. Podle polohy osy frézy vzhledem k frézované ploše se dělí na symetrické a nesymetrické frézování. U čelního frézování pracuje fréza sousledně a nesousledně. [2]



a) symetrické, b) nesymetrické

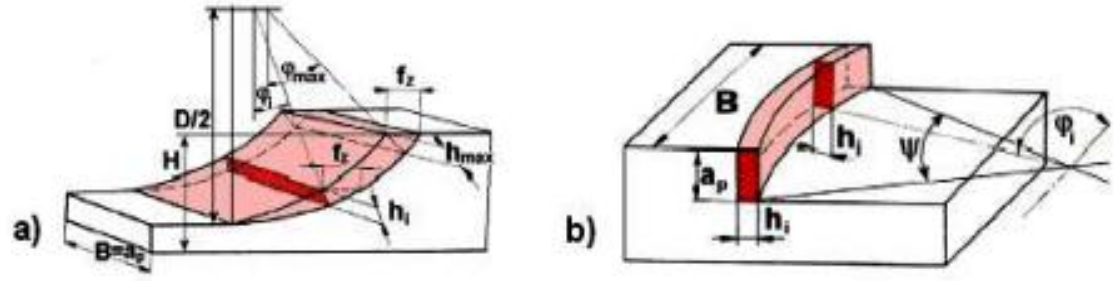
Obr. 3.9 Čelní frézování [4]

3.3.2 Kinematické veličiny

Rozbor kinematických veličin viz. příloha 2.

3.3.3 Průřez třísky a její rozměry

Tloušťka odřezané třísky $\mathbf{h_i}$ se při válcovém nesousledném frézování mění od nulové do maximální hodnoty od maximální hodnoty do nuly při sousledném frézování (obr.3.10). Rovnice pro výpočet rozměrů třísky viz. příloha 2.

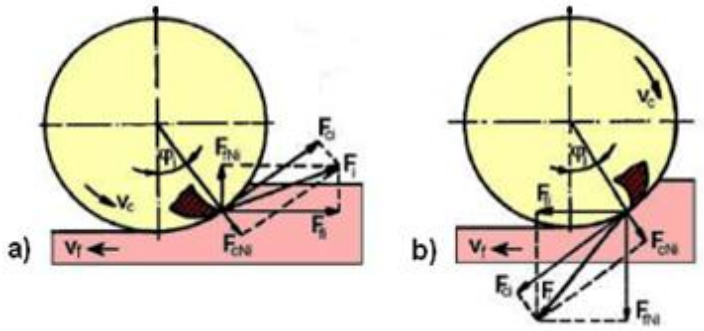


a) válcové frézování, b) čelní frézování

Obr. 3.10 Průřez třísky [4]

3.3.4 Řezné síly

Pro určení řezných sil při frézování vycházíme ze silových poměrů na jednom břitu, který se nachází na místě určeném úhlem φ_i. Pro válcové frézování nástrojem s přímými zuby se celková řezná síla působící na břitu $\mathbf{F_i}$ dělí na složky $\mathbf{F_{ci}}$ a $\mathbf{F_{cNi}}$, resp. na složky $\mathbf{F_{fi}}$ a $\mathbf{F_{fNi}}$ (obr. 3.11). [3]



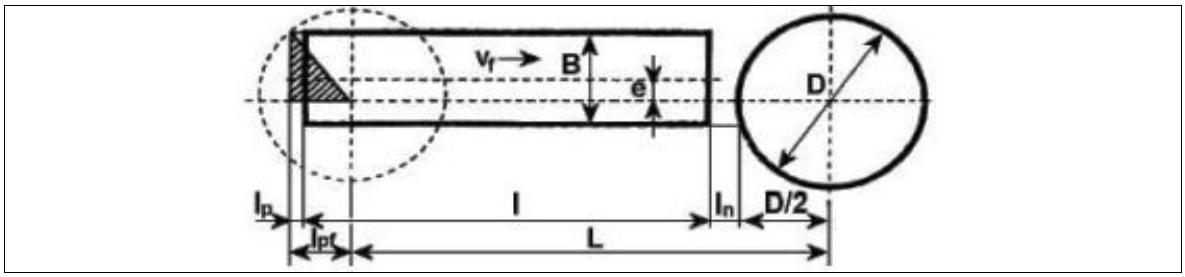
a) nesousledné frézování, b) sousledné frézování

$\mathbf{F_i}$ – celková řezná síla, $\mathbf{F_{ci}}$ – řezná síla, $\mathbf{F_{cNi}}$ – kolmá řezná síla, $\mathbf{F_{fi}}$ – posuvová síla, $\mathbf{F_{fNi}}$ – kolmá posuvová síla

Obr. 3.11 Řezné síly na zubu válcové frézy v pracovní rovin P_{fe} [4]

3.3.5 Jednotkový strojní čas

Hodnoty jednotkového strojního času pro základní případy frézování se vyjádří na základě poměrů naznačených na obr. 3.12. Rovnice pro výpočty strojních časů a další dva případy (obr. 3.13, 3.14) viz. příloha 2. [2]



Obr. 3.12 Dráha frézy pro hrubé čelní frézování asymetrické [4]

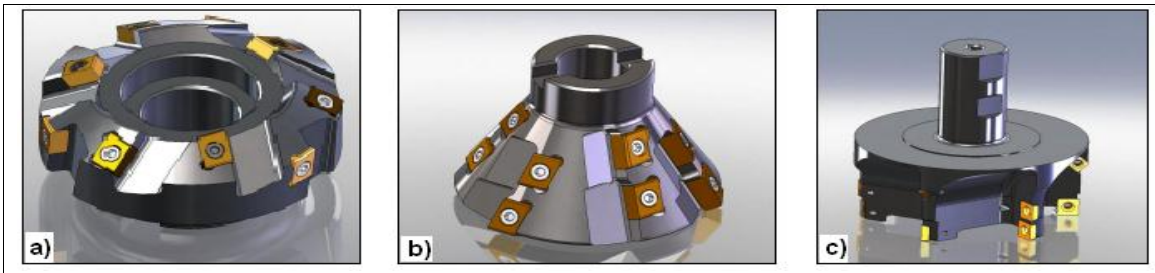
3.3.6 Frézy

Frézy jsou několikabřité nástroje. Břity mají uspořádány na válcové, kuželové nebo jiné tvarové ploše.

Vzhledem k mnohostrannému využití frézování ve strojírenské výrobě a k širokému rozsahu technologie frézování je možné v současnosti využít mnoho typů fréz, příklady fréz (obr. 3.15), další typy viz. příloha 2. [2]

Frézy lze rozdělit do jednotlivých skupin z různých hledisek:

- **podle umístní zubů –** čelní, válcové a válcové čelní,
- **podle nástrojového materiálu zubů –** rychlořezné, slinuté karbidy, cermety, řezná keramika, PKNB, PD,
- **podle provedení zubů –** frézované zuby, podsoustružené,
- **podle směru zubů –** přímé zuby, zuby ve šroubovici,
- **podle počtu zubů –** jemnozubé, polohrubozubé, hrubozubé,
- **podle konstrukčního uspořádání –** celistvé, s vloženými noži, s vyměnitelnými břitovými destičkami,
- **podle geometrického tvaru funkční části –** válcové, kotoučové, úhlové, drážkovací, kopírovací, rádiusové, na výrobu čelního ozubení,
- **podle způsobu upnutí –** nástrčné a stopkové,
- **podle smyslu otáčení –** pravořezné a levořezné. [4]



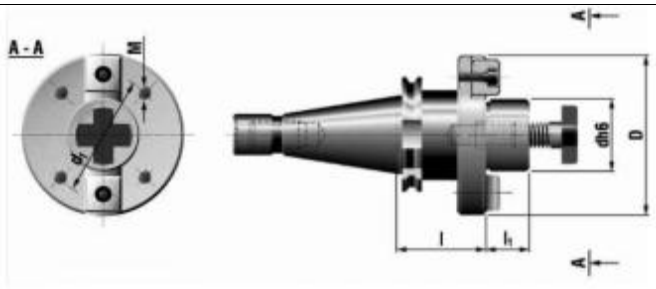
a) tvarová, b) úhlová fréza, c) tvarový záhlubník

Obr. 3.15 Příklady druhů fréz [19]

3.3.7 Upínání nástrojů

Pro upínání nástrčných fréz na frézkách se používá:

- frézovací trny (obr. 3.16),
- upínací kužely (metrické, Morse je samosvorný),
- tepelné upínače,
- hydraulické upínače,
- upínací pomůcky: upínky, opěrky, podpěry atd. [4]



Obr. 3.16 Frézovací trn pro frézovací hlavu [20]

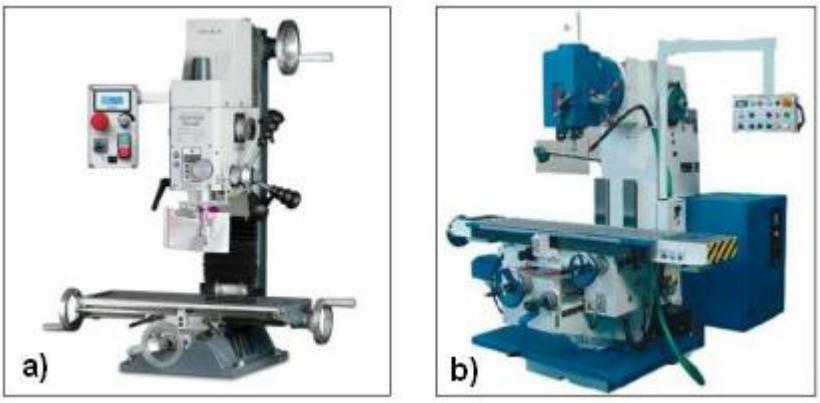
3.3.8 Příslušenství frézek – dělicí přístroj

Dělicí přístroj obr. 3.17 se používá pro přímé, nepřímé a diferenciální dělení spojené s výrobou ozubení ozubených kol. [4]

Obr. 3.17 Univerzální dělící přístroj [4]

3.3.9 Frézovací stroje (frézky)

Frézky (obr. 3.18) jsou vyráběny a nabízeny ve velkém množství modelů a velikostí. K frézkám je možné dostat zvláštní příslušenství (např. dělící přístroj). Dělíme je do čtyř základních skupin *konzolové*, *stolové*, *rovinné* a *speciální*. Můžeme je koupit v různých stupních automatizace, *ručně řízené*, *řízené programově*. [2]



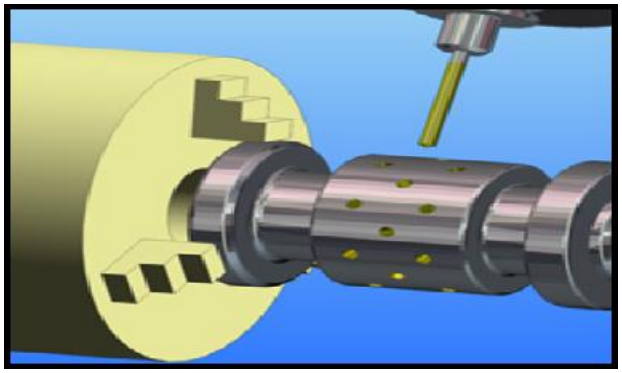
a) stolová frézka, b) konzolová frézka

Obr. 3.18 Příklady druhů v frézek [21], [22]

3.4 Technologie vrtání

Vrtání (obr. 3.19) je výrobní metoda, kterou se zhotovují díry zplna, nebo se zvětšují již vyrobené díry. Tím rozumíme předvrtané, předlité, předlisované atd. Hlavní pohyb je

rotační a vykonává ho obvykle nástroj (vrták). Osa vrtáku je zpravidla kolmá k obráběné ploše, na které vrták vstupuje do materiálu. Vedlejším pohybem je pohyb posuvový, ve směru své osy, vykonává vrták. [5]

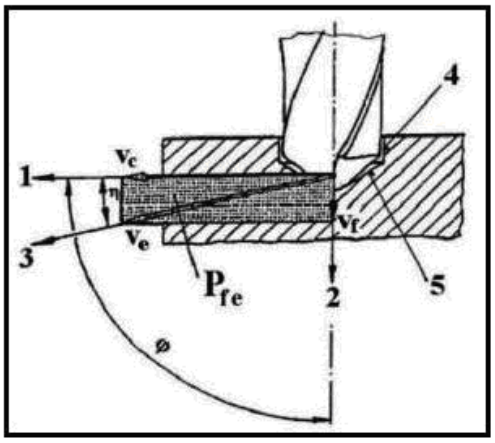


Obr. 3.19 Vrtání přípravku [23]

3.4.1 Kinematika obráběcího procesu

Kinematické souvislosti vrtacího procesu jsou uvedeny na obr 3.20.

1 – směr hlavního pohybu,
2 – směr posuvového pohybu,
3 – směr řezného pohybu,
$\mathbf{v_c}$ – řezná rychlost,
$\mathbf{v_f}$ – posuvová rychlost,
$\mathbf{v_e}$ – rychlost řezného pohybu,
$\mathbf{P_{fe}}$ – pracovní boční rovina,
$\boldsymbol{\varphi}$ – úhel posuvového pohybu,
$\boldsymbol{\eta}$ – úhel řezného pohybu. [3]



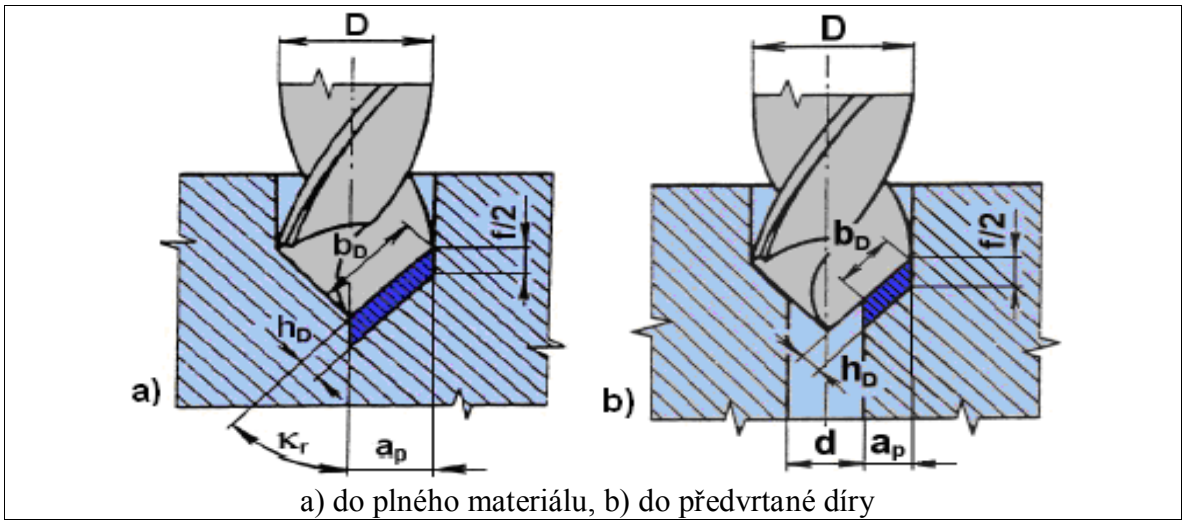
Obr. 3.20 Kinetika obráběcího procesu [3]

3.4.2 Kinematické veličiny

Kinematiku řezného procesu popisují veličiny, řezná rychlost $\mathbf{v_c}$ (která se ve směru od obvodu ke středu nástroje neustále zmenšuje, až v ose nástroje dosáhne nulové hodnoty), posuvové rychlosti $\mathbf{v_f}$ a rychlosti řezného pohybu $\mathbf{v_e}$. Přehled vzorců kinematických veličin viz. příloha 3. [5]

3.4.3 Průřez třísky a její rozměry

Parametry průřezu třísky pro vrtání jsou popsány dle obr. 3.21. Přehled vzorců rozměrů třísky viz. příloha 3.
Šířka záběru ostří šroubovitého vrtáku při vrtání díry je $\mathbf{a_p = D/2}$, pro vrtání do předvrtané díry $\mathbf{a_p = (D-d)/2}$. [2], [5].



a) do plného materiálu, b) do předvrtané díry

Obr. 3.21 Průřez třísky při vrtání dvoubřitým šroubovým vrtákem [5]

3.4.4 Řezné síly

Při vrtání standardním šroubovitým nebo kopinatým vrtákem je materiál odebírán současně dvěma břity nástroje, které jsou symetrické podle osy. Výsledné síly jsou potom dány součtem nebo rozdílem hodnot na obou břitech nástroje (obr. 3.22):

- **posuvová síla**

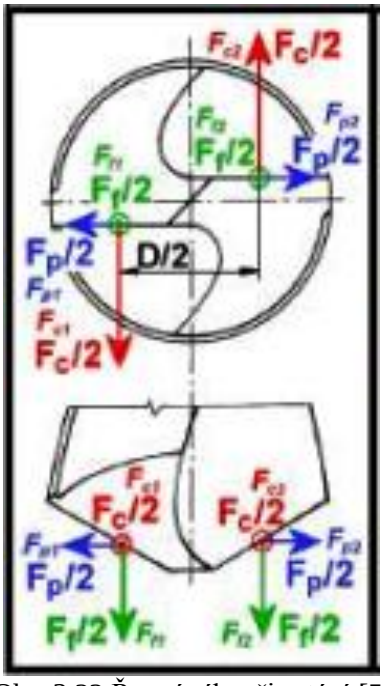
$$F_f = F_{f1} + F_{f2} \quad [N], \qquad (3.57)$$

- **pasivní síla**

$$F_p = F_{p1} - F_{p2} \quad [N], \qquad (3.58)$$

- **řezná síla**

$$F_c = F_{c1} + F_{c2} \quad [N], \qquad (3.59)$$



Obr. 3.22 Řezné síly při vrtání [5]

Další výpočtové vztahy viz. příloha 3.

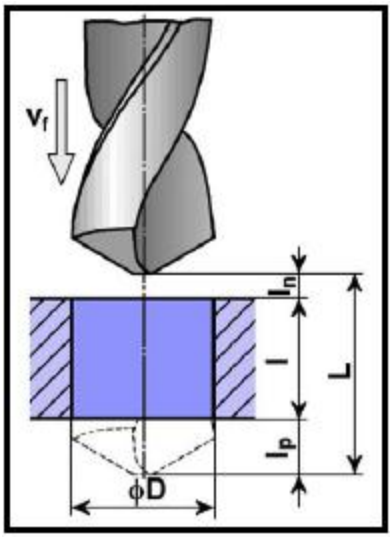
3.4.5 Jednotkový strojní čas

Jednotkový strojní čas $\mathbf{t_{AS}}$ při vrtání šroubovitým vrtákem lze vyjádřit na základě obr 3.23 vztahem: [2]

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \frac{l_n + l + l_p}{n \cdot f} \quad \text{[min]}, \qquad (3.61)$$

kde:

l [mm] – délka vrtané díry,
$\mathbf{l_n}$ [mm] – délka náběhu vrtáku,
$\mathbf{l_p}$ [mm] – délka přeběhu vrtáku,
$\mathbf{v_f}$ [mm min^{-1}] – posuvová rychlost,
n [min^{-1}] – otáčky vrtáku,
f [mm] – posuv na otáčku. [5]

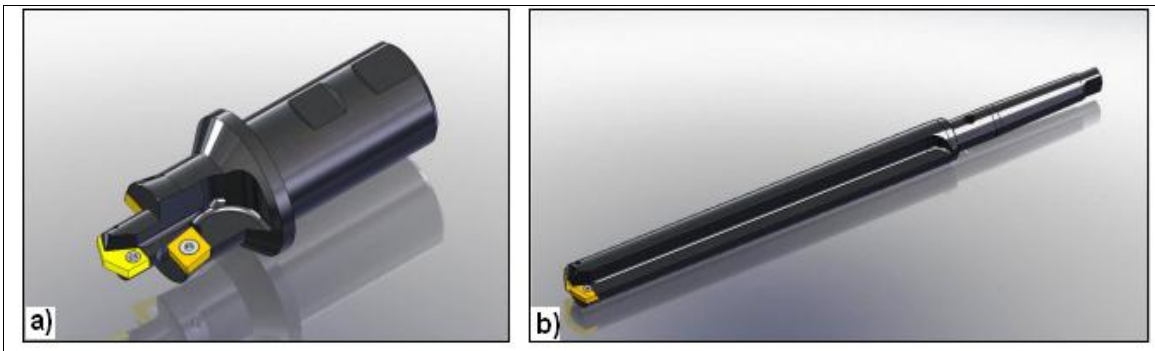


Obr. 3.23 Dráha vrtáku [5]

3.4.6 Vrtáky

Vrtací nástroje nebo-li vrtáky (obr. 3.24) je možné rozdělit dle druhu, konstrukce a geometrie nástroje:

- středicí vrtáky,
- šroubové vrtáky (nejvyužívanější nástroj),
- kopinaté vrtáky,
- vrtáky s vyměnitelnou špičkou,
- vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami,
- korunkové vrtáky,
- dělové a ejektorové vrtáky atd. [5]



a) vrták a záhlubník, b) šroubový vrták

Obr. 3.24 Vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami [24]

3.4.7 Vrtací stroje (vrtačky)

Vrtání, ale také vyhrubování, vystružování a zahlubování se realizuje na vrtacích strojích, vrtačkách. Někdy se uvedené metody mohou provádět i na soustruzích, vodorovných vyvrtávačkách či obráběcích centrech.

Vrtačky (obr 3.25) lze rozdělit do skupin dle konstrukčního provedení: stolní, stojanové, sloupové, otočné, vodorovné, na hluboké díry a speciální. [2]

Obr. 3.25 Stolní vrtačka [25]

3.5 Nekonvenční technologie obrábění

Nekonveční technologie (metody) obrábění nachází v současnosti, kdy jsou využívány stále častěji materiály s vysokou pevností, tvrdostí, houževnatostí a odolností proti opotřebení, které není možné obrábět standardními metodami, stále větší uplatnění.

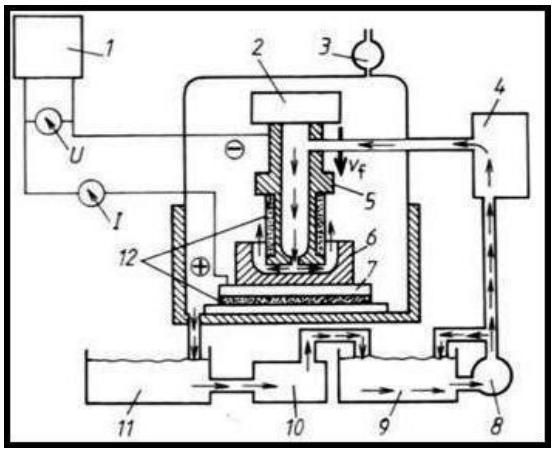
Tyto technologie využívají fyzikálního nebo chemického principu úběru materiálu. Ve většině případů jde o bezsilové působení na materiál, nevznikají třísky, které známe z obrábění řeznými nástroji. U těchto technologií obrábění nezávisí obrobitelnost na mechanických vlastnostech materiálu jako je tomu u klasického třískového obrábění. [3]

3.5.1 Elektrochemické obrábění

Elektrochemické obrábění (obr. 3.26) je metoda beztřískového řízeného obrábění elektricky vodivých materiálů. Jedná se o řízený proces oddělování materiálu rozpouštěním v elektrolytu, kdy obrobek je anoda a nástroj katoda. Elektrolyt je v mezeře mezi nástrojem a obráběným materiálem. Materiál obrobku je rozpouštěn stejnosměrným proudem o nízkém napětí. [6]

Popis schématu:

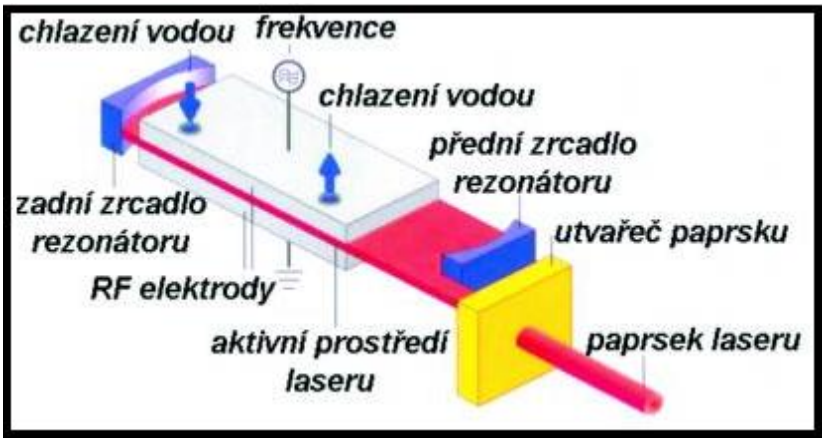
1 – napájecí zdroj,
2 – mechanismus posuvu,
3 – odsávání,
4 – filtr,
5 – nástroj,
6 – obrobek,
7 – pracovní stůl,
8 – čerpadlo,
9 – zásobník elektrolytu,
10 – filtr,
11 – nádrž s elektrolytem,
12 – izolace. [3], [6]



Obr. 3.26 Schéma elektrochemického obrábění [6]

3.5.2 Obrábění laserem

Obrábění materiálu laserem (obr. 3.27) je nekonvenční metoda založena na principu přeměny světelné energie na energii tepelnou. Laser pracuje na principu vynuceného záření. Jedná se tedy o úběr materiálu účinkem úzkého paprsku monochromatického světla soustředěného do předdefinovaného bodu (malá ploška), kde dochází k odtavení materiálu. V oblasti těžkoobrobitelných materiálů se laserová technika využívá pro rozřezání materiálu, výrobu přesných otvorů a výrobu průvlaků z diamantu. [3], [7]



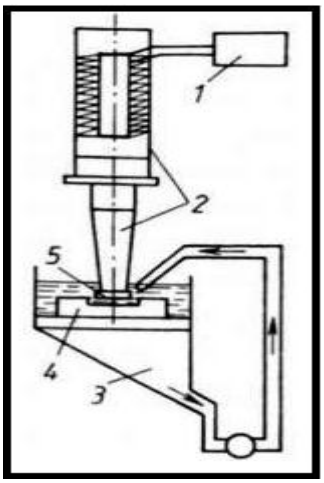
Obr. 3.27 Konstrukce CO2 laseru [7]

3.5.3 Ultrazvukové obrábění

Obrábění ultrazvukem (obr. 3.28) je založeno na rozrušování materiálu obrobku ultrazvukovou vibrací zrn abrazivního materiálu (brusiva). Zrna musí být nástrojem přitlačována stálou silou na obráběný povrch, čímž se uskutečňuje překopírování tvaru činné části nástroje do obrobku. Je především využívána jako dokončovací operace při opracování tvrdých, křehkých nekovových materiálů. [3]

Popis schématu:

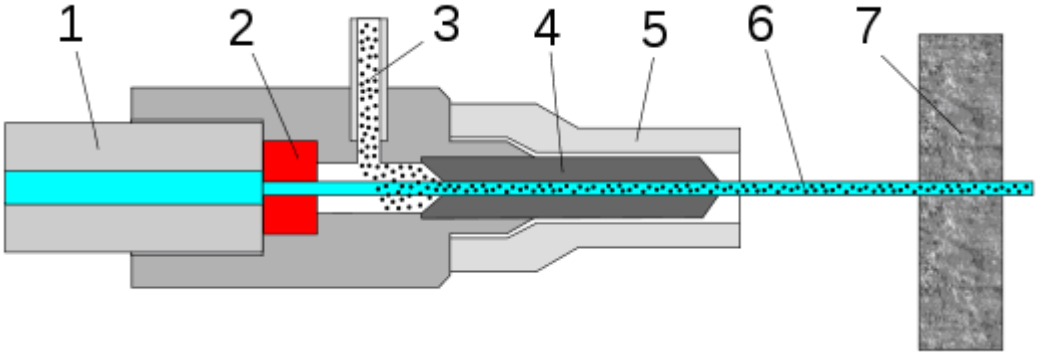
1 – generátor ultrazvukových kmitů,
2 – systém pro vytvoření mech. kmitů,
3 – přívod brousících zrn a kapaliny,
4 – obrobek,
5 – nástroj. [8]



Obr. 3.28 Zařízení pro obrábění ultrazvukem [8]

3.5.4 Vodní paprsek

Obrábění vodním paprskem (obr. 3.29) využívá jako řezný nástroj paprsek vody o vysokém tlaku a rychlosti. V praxi se využívá řezání čistým vodním paprskem (nekovové materiály – lamináty, kompozity atd.) nebo vodním paprskem s abrazivní příměsí (tvrdé a velmi tvrdé materiály – titan, kobalt, SK atd.). [3]



1 – vysokotlaký přívod vody, 2 – rubínová nebo diamantová tryska, 3 – abrazivo, 4 – směšovací trubička , 5 – držák, 6 – paprsek, 7 – materiál

Obr. 3.29 Schéma vodního paprsku [26]

Před prvky ve schématu bývá předřazeno vysokotlaké čerpadlo se zásobníkem vody, filtr, multiplikátor a akumulátor.

Výhodou vodního paprsku je snížení ceny za nástroj, nedochází ke zpevnění materiálu ani k jeho ohřevu. Při obrábění se netvoří prach. Lehké začlenění do automatizovaných systémů. Nevýhodou je složitá hydraulika přístroje a vysoké pracovní bezpečností podmínky.

4 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

V současnosti je na trhu široký sortiment materiálů řezných nástrojů. V rozsahu od nástrojových ocelí po syntetický diamant. Toto široké spektrum nástrojových materiálů vzniklo s rozvojem konstrukčních materiálů pro obrábění a s vývojem nových, zejména číslicových, obráběcích strojů a obráběcích center. Jednotlivé druhy materiálů se rozdělují do skupin podle vhodnosti pro jednotlivé strojní aplikace, (obr. 4.1, obr. 4.2) viz. příloha 4.

Základní vlastnosti nástrojového materiálu jsou tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu a houževnatost. Všechny vlastnosti musí nástrojový materiál splňovat při vysokých teplotách a stanovenou dobu. Všechny kategorie řezných nástrojů musí splňovat odolnost proti mechanickým a teplotním rázům. [3], [4]

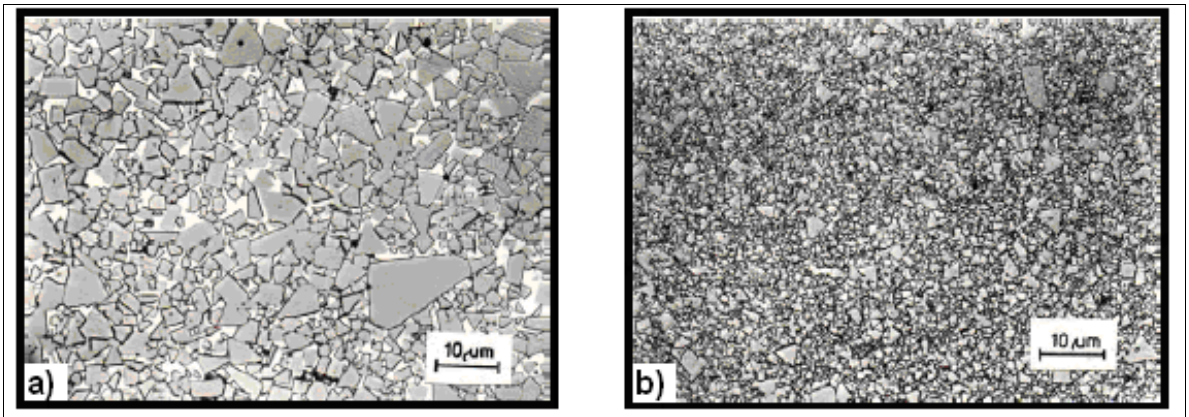
4.1 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy (SK – obr. 4.3) patří k nejužívanějším materiálům mezi tvrdými nástrojovými materiály. Je možné je využít pro obrábění s vysokými rychlostmi posuvu a těžké přerušované řezy. Z důvodu své nízké termochemické stability však nejsou vhodné pro obrábění s vysokými řeznými rychlostmi. Jsou otěruvzdorné, obtížně obrobitelné, křehké a mají sklon k vydrolování břitů.

Tab. 4.1 Rozdělení SK dle obráběného materiálu [29].

OBRÁBĚNÝ MATERIÁL	OZNAČENÍ SK dle ISO 153	
Ocel	**P**	
Korozivzdorná ocel	**M**	
Litina	**K**	
Neželezné kovy	**N**	
Žáropevné slitiny	**S**	
Kalené ,zušlechtěné oceli	**H**	

Vyrábějí se práškovou metalurgií, spékáním (slinováním) karbidu wolframu, titanu a dalších kovů. Jednotlivé částečky karbidů jsou spojeny pojivem, nejčastěji kobaltem. U slinutých karbidů není nutné tepelné zpracování ke zvýšení tvrdosti. [3], [4]



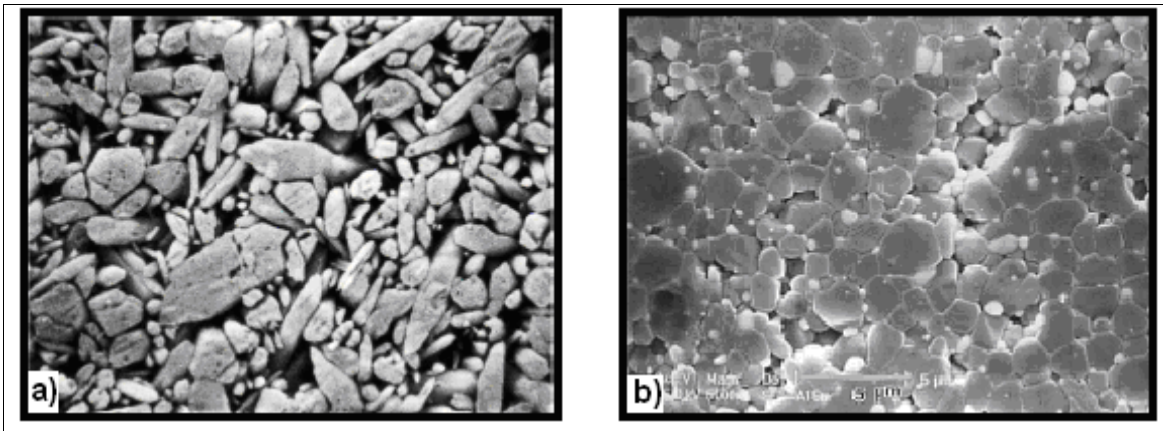
a) hrubozrnná, b) jemnozrnná

Obr. 4.3 Mikrostruktura SK skupiny K [4]

4.2 Řezná keramika

Keramiku (obr. 4.4) lze obecně charakterizovat jako polykrystalický materiál. Hlavním materiálem jsou většinou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Jsou velmi

tvrdé, ale velmi křehké. Proto se do řezné keramiky pro zvýšení houževnatosti přidávají nikl a karbidy titanu. Mají vysokou odolnost proti otěru, snášejí vysoké teploty a není u nich nutné tepelné zpracování pro zvýšení tvrdosti. Velkou výhodou je také relativně nízká cena. [3], [4]



a) typu sialon, b) Al_2O_3 + 15%ZrO_2

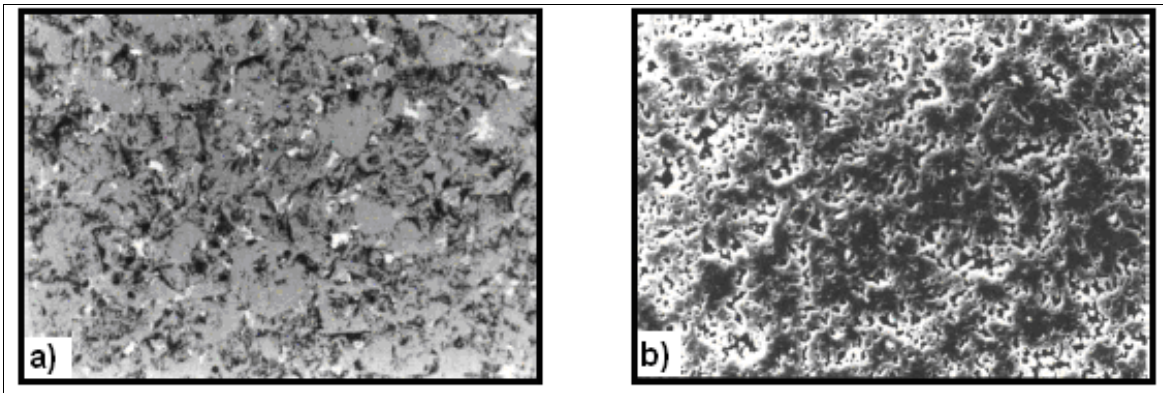
Obr. 4.4 Mikrostruktura řezné keramiky [4]

4.3 Supertvrdé materiály

Jedná se o dvě skupiny synteticky vyrobených materiálů a to o polykrystalický diamant (PD) a polykrystalický nitrid bóru (PKNB)(obr. 4.5). mají skvělé mechanické vlastnosti. Je výhodné je nasadit jako náhrady za broušení při dokončování obrábění z hlediska integrity povrchu.

Polykrystalický diamant není vhodný pro obrábění materiálů na bázi železa, jelikož se vyznačuje silnou afinitou k uhlíku, což by mělo za následek difúzi mezi nástrojem a obráběným materiálem. Využívá se pro obrábění neželezných kovů a nekovových materiálů (hliník a jeho slitiny, měď atd.).

Polykrystalický nitrid bóru je používán pro obrábění tvrdých žáruvzdorných materiálů, kalené oceli, litiny, kobaltových a niklových slitin. [4], [5]



a) Polykrystalický diamant, b) Polykrystalický nitrid bóru

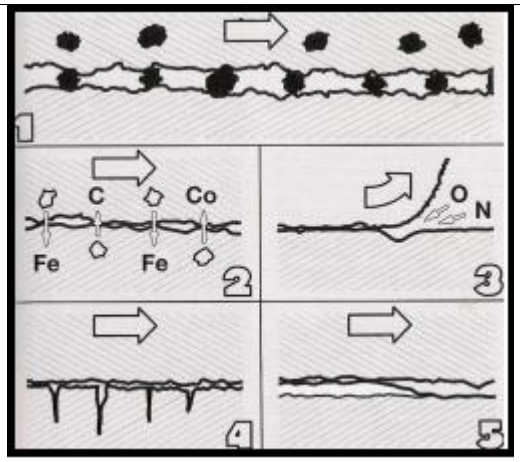
Obr. 4.5 Mikrostruktura super tvrdých materiálů [4]

5 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ŘEZNÉ PROSTŘEDÍ

Vhodné řezné prostředí je voleno podle druhu použitého řezného materiálu a tomu odpovídající řezné rychlosti. Podle velikosti řezné rychlosti, která se pohybuje v intervalu několika metrů až několik desítek metrů za sekundu bude muset být využit odpovídající řezný olej, kterým se snižuje teplota v místě interakce nástroje s obráběným materiálem a tím i snižuje opotřebení nástroje. Důležitou úlohu však zde sehrává i obráběný materiál, jeho obrobitelnost, velikost průřezu odebírané třísky a složitost prováděných obráběcích operací. [5]

5.1 Opotřebení břitu nástroje

Důsledkem obráběcího procesu je vznik velkého množství tepla, které je vyvinuto na ploše čela a hřbetu nástroje. Většina obráběných materiálů obsahuje tvrdé částice různého druhu, které se svojí tvrdostí neliší od materiálů břitu nástroje. Tyto částice mohou u nástroje vyvolat např. abrazivní efekt. Kombinací mechanických, tepelných, chemických a abrazivních faktorů dochází ke složitému zatěžování břitu nástroje, což má za následek jeho opotřebení obr. 5.2. Podle zatížení břitu je možné rozlišovat několik mechanismů opotřebení viz obr. 5.1. [2]



1 – abrazivní opotřebení, **2** – difuzní opotřebení, **3** – oxidační opotřebení,
4 – lom – statický nebo dynamický, **5** – adhezní opotřebení

Obr. 5.1 Schéma základních mechanizmů opotřebení [3]

5.1.1 Abrazivní otěr

Vzniká působením tvrdých částic v materiálu obrobku. Jedná se o mechanismus podobný broušení, při němž se tvrdé částice dostávají mezi povrch obrobku a povrch nástroje. Je významný především při nízkých řezných rychlostech. [3]

5.1.2 Difuzní otěr

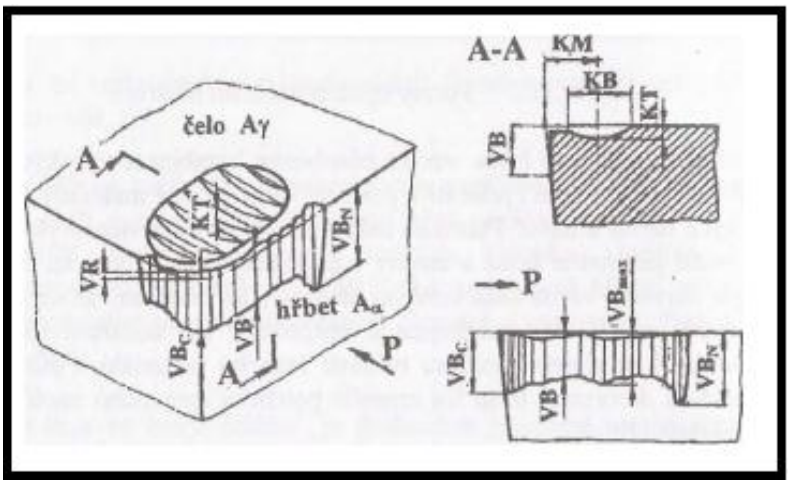
Vzniká působením chemických vlivů při obrábění. Chemické vlastnosti materiálu a jeho afinita k danému materiálu obrobku jsou základními činiteli pro vznik difuzního opotřebení. Tvrdost materiálu má na tomto procesu relativně malý podíl. K tomuto opotřebení dochází za vyšších teplot, jelikož při nízkých teplotách není difúze možná. [3]

5.1.3 Oxidační otěr

Vysoké teploty řezného procesu, které spolu s okolním vzduchem mají za následek oxidaci nástrojového materiálu. Nejnáchylnější oblast na oxidační otěr je v místě kontaktu břitu, kde končí šířka třísky, tedy v místě kde má vzduch přístup do řezného procesu. [3]

5.1.4 Adhezní otěr

Projevuje se při nízkých teplotách obrábění na čele břitu nástroje. Je způsoben vytrháváním částic břitu v důsledku adhezních spojů mezi nástrojem a obrobkem. Dochází k vytváření nárůstku mezi třískou a nástrojem. Nárůstek může mít za následek znehodnocení původního břitu vydrolováním nebo výlomem. [4]



Obr. 5.2 Parametry opotřebení břitu řezného nástroje [2]

Legenda k obrázku (obr.5.2):

VB … průměrné opotřebení hřbetu,
VB_c … opotřebení hřbetu v oblasti špičky,
VB_N … vrubové opotřebení hřbetu,
VB_{max} … maximální opotřebení hřbetu,
KT … hloubka žlábku opotřebení čela,
KB … šířka žlábku opotřebení čela,
KM … poloha středu žlábku opotřebení čela,
VR … radiální opotřebení špičky.

5.2 Tepelné bilance řezného procesu

V průběhu procesu obrábění je skoro všechna práce řezání přeměněna v teplo. Teplo řezného procesu **Q_e**, výrazně ovlivňuje řezný proces, jelikož:

- negativně působí na řezné vlastnosti nástroje,
- ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- ovlivňuje pěchování a zpevňování obráběného materiálu,
- ovlivňuje podmínky tření na čele i hřbetě nástroje.

Hlavní zdroje tepla se nachází v oblasti plastických deformací při tvoření třísky, v oblasti tření třísky po čele nástroje a v oblasti tření hřbetu po obrobené ploše. [2], [4]

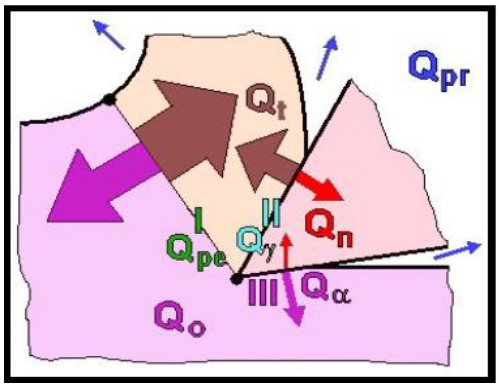
$$Q_e = Q_{pe} + Q_\gamma + Q_\alpha \qquad [J] \qquad (5.1)$$

Teplo které vzniklo vlivem řezného procesu $\mathbf{Q_e}$ je odváděno do jednotlivých prvků obráběcího procesu.

$$Q_e = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \qquad [J] \qquad (5.2)$$

Vznik tepla při tvoření třísky je znázorněn na obr 5.3.

Legenda k obr. 5.3
I – oblast plastické deformace při tvoření třísky,
II – oblast třen třísky po čele nástroje,
III – oblast tření hřbetu po ploše,
$\mathbf{Q_{pe}}$ – teplo vzniklé v oblasti plastických deformací při tvoření třísky [J],
$\mathbf{Q_\gamma}$ - teplo vzniklé v oblasti tření třísky po čele nástroje [J],
$\mathbf{Q_\alpha}$ - teplo vzniklé v oblasti tření hřbetu nástroje po přechodové ploše [J],
$\mathbf{Q_t}$ - teplo odvedené třískou [J],
$\mathbf{Q_o}$ - teplo odvedené obrobkem [J],
$\mathbf{Q_n}$ - teplo odvedené nástrojem [J],
$\mathbf{Q_{pr}}$ - teplo odvedené řezným prostředím[J].



Obr. 5.3 Vznik a odvod tepla [4]

Množství vytvořeného tepla závisí na vlastnostech obráběného materiálu, geometrii nástroje a řezných podmínkách takto:

- se zvyšováním řezné rychlosti narůstá množství vzniklého tepla,
- se zvyšováním posuvové rychlosti a šířky záběru ostří roste množství vzniklého tepla,
- při zvětšení pracovního úhlu nastavení hlavního ostří κ_{re} se vzniklé teplo soustřeďuje na kratší úsek břitu a proto tepelné zatížení nástroje narůstá,
- při zmenšování úhlu čela γ narůstá úhel řezu δ, intenzita plastické deformace se zvyšuje a proto roste i množství vzniklého tepla,
- při zmenšování úhlu hřbetu α narůstá práce tření na hřbetě nástroje a tím i množství vzniklého tepla.

Podíl jednotlivých složek tepla odváděného třískou, obrobkem, nástrojem a prostředím, závisí na tepelné vodivosti materiálu obrobku a nástroje, na řezných podmínkách, řezném prostředí a na geometrii břitu řezného nástroje. Celkové množství tepla, které vzniká při obrábění lze změřit kalorimetry. [2], [4]

5.3 Procesní kapaliny

Opotřebení nástrojů a snížení tepla vzniklého při řezaní je možné dosáhnou pomocí procesních kapalin. Procesní kapaliny se obecně rozdělují do dvou základních skupin podle účinku na proces řezání, tj. kapaliny s převažujícím chladicím účinkem a kapaliny s převažujícím mazacím účinkem. Z technologického a provozního hlediska jsou další požadavky na kapaliny:

- čisticí účinek,
- ochranný účinek,
- provozní stálost,
- zdravotní nezávadnost,
- přiměřené náklady. [3]

Chladící účinek

Je schopnost řezné kapaliny odvádět teplo od místa řezu. Tuto schopnost má každá kapalina, která smáčí povrch. Tento účinek nastává při obrábění vždy. Odvod tepla se uskutečňuje tím, že proud řezné kapaliny oplachuje nástroj, třísky i obrobek a přejímá vzniklé teplo. Chladicí účinek řezných kapalin souvisí se smáčecí schopností, na výparném teple, na rychlosti vypařování za určitých teplot, na tepelné vodivosti a na měrném teple. Čím vyšší jsou tyto veličiny, tím větší bude chladicí účinek řezné kapaliny. [2], [3]

Chladící účinek

Schopnost kapaliny vytvořit na povrchu kovu vrstvu, která brání přímému styku kovových povrchů a snižuje tření mezi nástrojem a obrobkem. Je závislý na viskozitě kapaliny. Mazací účinek nám zajistí zmenšení řezných sil, zmenšení spotřeby energie a zlepšení jakosti obrobeného povrchu. Mazací účinek řezné kapaliny je tedy vyžadován především pro dokončovací operace a při provádění náročných operací jako je např. výroba ozubení. [2], [3]

5.3.1 Vodné roztoky

Nejjednodušší řezné kapaliny, které mají dobré chladicí a čisticí účinky, ale které mají plno nevýhod. Voda jako základní přísada potřebuje řadu úprav např. změkčování, přidávání přísad proti korozi, k lepší smáčivosti a proti pěnivosti. Musí být vždy alkalický. Muže u nich docházet k rozmnožování anaerobních bakterií, což má za následek tvorbu kalů a nepříjemný zápach. [2], [3]

5.3.2 Emulzní kapaliny

Disperzní soustava dvou vzájemně nerozpustných kapalin, z nichž jedna z nich tvoří mikroskopické kapky rozptýlené v druhé kapalině. Ve většině případů jde o olej ve vodě, přičemž je nutné použít další složky tzv. emulgátory. Tyto látky zmenšují povrchové napětí emulgovaných kapalin a stabilizují emulzi. Chladicí účinek závisí na koncentraci emulze. Schopnost ochrany proti korozi je dána hodnotou pH emulze, ale v menší míře než u vodných roztoků. Emulzní kapaliny s současnosti zahrnutí 80% používaných řezných kapalin.[2], [3]

5.3.3 Minerální oleje

Ropné produkty s dobrými mazacími vlastnostmi, ale horším chladicím účinkem. Mají dobrý ochranný účinek a dobrou odolnost proti stárnutí. Mají dobré provozní vlastnosti, a proto se používají jako základ pro oleje řezné. [3]

5.3.4 Řezné oleje

Jedná se o zušlechtěné minerální oleje. Přísady, které se používají mají vyšší tlakovou únosnost a také lepší mazací vlastnosti. [3]

5.3.5 Syntetické kapaliny

Kapaliny s obrovskou provozní stálostí, ale jejich mazací, chladicí a ochranné účinky nejsou lepší, než u minerálních olejů. Ve většině případů jsou rozpustné ve vodě. [3]

5.4 Trvanlivost nástroje

Trvanlivost lze obecně definovat jako dobu, po kterou je nástroj schopen efektivně plnit požadované aplikace s příslušnými parametry. Jde o časový interval od nasazení po konec provozuschopnosti nástroje. Po té musí být nástroj buďto naostřen nebo vyměněn.

Trvanlivost a životnost (součet trvanlivostí) břitu nástroje se nejčastěji popisuje jako čas řezného procesu [min] nebo jako dráha řezu [m]. Trvanlivost nástroje je podobně jako opotřebení nástroje závislé především na metodě obrábění, vlastnostech nástrojového a obráběného materiálu a řezných podmínkách. Závislost trvanlivosti (obr. 5.4.) na řezné rychlosti je popsána pomocí Taylorova vztahu ve tvaru:

$$T = C_T \cdot v_c^{-m} \qquad [\text{min}] \tag{5.3}$$

příp. ve tvaru:

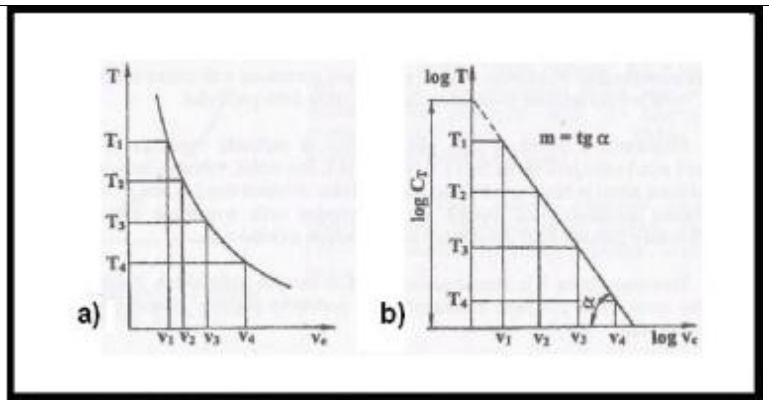
$$v_c = C_v \cdot T^{-1/m} \qquad [m\ \text{min}^{-1}] \tag{5.4}$$

kde:

$C_v = C_T^{1/m}$,

C_T – konstanta [-],
C_v – konstanta [-],
m – exponent [-],
v_c – řezná rychlost [m min^{-1}].

Konstanta **C_T** závisí na materiálu obrobku a na materiálu nástroj. Velikost exponentu **m** charakterizuje především vlastnosti řezného nástroje a způsobu obrábění. [2], [3], [4]



a) lineární souřadnice, b) logaritmické souřadnice

Obr. 5.4 Průběh závislosti T = f (v_c) [4]

6 FIRMY

Do práce byly vybrány firmy MATEZA a WALTER. Další firmy zabývající se touto problematikou jsou např. firma SKF a NADEL.

6.1 Firma MATEZA

Produkty firmy MATEZA jsou všechny možné druhy ložisek jako jsou kluzná, valivá, ale také ložiskové jednotky, těsnění a mazání atd.

Obr. 6.1 Ložiska firmy MAZETA [27]

6.2 Firma WALTER

Firma WALTER se zabývá výrobou nástrojů pro soustružení, frézování, vrtání a řezání závitů, tzv. high tech nástroje. Tyto nástroje jsou z těžkoobrobitelných slitin.

Obr. 6.2 Nástroje firmy WALTER [28]

7 DISKUZE

Tato práce je tvořena šesti hlavními kapitolami:

V první a druhé kapitole jsou uvedeny základní pojmy, jako je např. obrobitelnost. Hlavní částí druhé kapitoly je především rozbor těžkoobrobitelných materiálů s rozdělením do skupin a podskupin. Ke každé skupině materiálu je uvedena základní charakteristika, chemické prvky tvořící tyto materiály a využití jednotlivých skupin materiálů.

Ve třetí kapitole jsou rozebrány tři hlavní typy konvenčních technologií obrábění materiálu. Jde o soustružení, frézování a vrtání. Pro každou je provedena základní charakteristika dané technologie, stručný přehled nástrojů a strojů. V příloze jsou jednotlivé technologie doloženy technickou specifikací, která slouží pro výpočty základních parametrů. Na což plynule navazuje přehled vybraných nekonvenčních technologií obrábění, kterým je např. vodní paprsek. Každá zvolená metoda je popsána základní charakteristikou technologie a je doplněna o blokové schéma.

Pro provedení výčtu metod a jejich charakteristik je možné říci, že jsou v současnosti nekonvenční technologie velmi populární. Jedinou stinnou stránkou těchto technologií je jejich cena. Jelikož hodnoty těchto zařízení a náklady na jejich údržbu jsou stále velmi vysoké, jsou z ekonomického hlediska stále výhodnější metody konvenční. Náklady na nástroje a údržby těchto strojů jsou výrazně nižší. Proto se nekonveční technologie používají především u aplikací, kterých není možné dosáhnout využitím metod konvečních.

Čtvrtá kapitola je věnována materiálům, kterých je využíváno pro výrobu nástrojů (břitových destiček). Materiály jsou doloženy mikrostrukturou, základním přehledem charakteristických vlastností a vhodností použití obrábění jednotlivých matriálů.

Pátá kapitola je spjata s opotřebením materiálu. Je zde uveden přehled mechanismů opotřebení. Poté popisuje faktory řezného prostředí jako je teplota. Na závěr jsou rozebrány možnosti, které sníží opotřebení nástroje. Hlavní význam je kladen na procesní kapaliny.

V závěrečné šesté kapitole je uveden přehled několika firem, které se obráběním materiálů s vysokou tvrdostí přímo zabývají (Walter), nebo tvrdokovy tvoří součásti jejich výrobků (MAZETA, SKF). Tento přehled je jen orientační.

ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsou popsány všechny základní technologie obrábění těžkoobrobitelných materiálů, konvenční i nekonvenční. U konvenčních metod je uvedena technická specifikace pro výpočet základních parametrů. Těžkoobrobitelné materiály se vyznačují především svojí vysokou tvrdostí a pevností, tudíž vlastní obrobení materiálu je velice obtížné. Je tedy velmi důležité zvolit vhodnou technologii, potažmo vhodný nástroj.

Pokud není zvolena vhodná technologie s vhodnými parametry a vhodnými nástroji dochází k nepříznivému ovlivnění výrobního procesu. Pokud např. je zvolena příliš vysoká řezná rychlost, dojde ke zkrácení strojního času výroby obrobku. Současně ovšem dosaženo např. k rychlejšího opotřebení nástroje, nebo jeho trvalého poškození. Z toho plyne, že bude nástroj nutno častěji měnit a ve výsledku se strojní čas natáhne. Nesprávnou volbou se tedy doba výroby naopak prodlužuje. To ve výsledku znamená vzrůst nákladů na obrábění, pořízení nástrojů a celkově na celou výrobu. Pokud je ovšem zvolena správná technologie se správným postupem, dojde v konečném pohledu k zoptimalizování procesu, což je velmi důležité především u materiálů s vysokou tvrdostí, jelikož pořizovací náklady nástrojů jsou vysoké.

V současnosti jsou kladeny vysoké požadavky na průmyslové hospodářství. Důležitá je volba vhodného poměru mezi rychlostí výroby a ekonomickou stránkou výroby. Optimální produktivita snižuje výrobní náklady a zvyšuje konkurenceschopnost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PÍŠKA, M. at all. *Speciální technologie obrábění*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. KOCMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění.* 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. KOCMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
4. HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění – 1. část.* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Brno: VUT–FSI, Ústav strojírenské technologie. 2003 [cit. 2012–05–01]. Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf>.
5. HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění – 2. část.* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Brno: VUT–FSI, Ústav strojírenské technologie. 2003 [cit. 2012–05–01]. Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf>.
6. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Elektrochemické obrábění [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: < http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-dil.html >.
7. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Laserové obrábění [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: < http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>.
8. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Ultrazvukové obrábění [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: < http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-3-dil.html.>.
9. RESEL: Přesné CNC obrábění. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.obrobna.cz/cnc.php>.
10. UJP PRAHA: Slitiny a pseudoslitiny. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: < http://www.ujp.cz/?section=vyrobky-a-sluzby&lang=cs&subsection=slitiny-a-pseudoslitiny&part=3>.
11. SMÉKALOVÁ, J. *Vztah mezi stukturou a vlastnostmi litých niklových slitin.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 37 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Tomáš Podrábský, CSc.
12. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.vscht.cz/ipl/predmety/Prezentace%20nanomaterialy%202/NANO_10.pdf>.
13. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM: Současnost technického vysokého školství. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-technickeho-vysokeho-skolstvi.html>.

14. FANYCO. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fanyco.cz/cz/14-soustruznicke-noze.html>.
15. BOST. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <https://mail.bost.sk/webka/brany.bost.sk/technologie/na-slovensko-prichadzaju-sustruznicke-automaty-aero-turn.html>.
16. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.c-n-c.cz/viewtopic.php?f=51&t=7601&start=0>.
17. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:HwacheonCentreLathe_460x1000.jpg>.
18. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.tch.estranky.cz/fotoalbum/fotoalbum/frezovani_zpusoby/frezovani-valcovou-a-celni-frezou.jpg.html>.
19. FANYCO. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fanyco.cz/cz/15-kuzelove-valcove-tvarove-frezy.html>.
20. PILANA MCT. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.pilanamct.cz/cz/frezovaci-trny-pro-frezovaci-hlavy-53.html>.
21. NÁŘADÍ Š+V. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://naradi-sv.cz/czech/fgv_32.php>.
22. REMES. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.remes.sk/sk/detail/stolova-frezka-opti-bf-20-vario-bow->.
23. EDGECAM. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.edgecamcz.cz/historie-edgecam-clanky/edgecam-10-75/>.
24. FANYCO. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fanyco.cz/cz/10-vrtaky-s-platkem.html>.
25. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web:< http://www.naradi-hrebec.cz/cz/e-shop/412052/c23296-stolni-asukovaci-vrtacky/proma-b1316b-2f400-stojanova-vrtacka-25401303.html>.
26. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%98ez%C3%A1n%C3%AD_vodn%C3%ADm_paprskem>.
27. MATEZA. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.mateza.cz/index.php?menu=4&vybranaskupina=01&vybranaskupina1=0106>
28. WALTER. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.walter-tools.com/>
29. SANDVIK: Coromant. [online]. [cit. 2012-05-19]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/CoroKey_2010.pdf>
30. WALTER: KÖRBER SCHLEIFRING. [online]. [cit. 2012-05-19]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.walter-machines.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
BCC	[-]	prostorově středěná krystalová mřížka
PD	[-]	polykrystalický diamant
PKNB	[-]	polykubický nitrid bóru
SK	[-]	slinutý karbid
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
A_D	[mm]	jmenovitý průřez třísky
C_T	[-]	konstanta
C_V	[-]	konstanta
D	[mm]	průměr obráběné plochy
F	[N]	celková řezná síla
F_c	[N]	řezná síla
F_{cNi}	[N]	kolmá řezná síla
F_f	[N]	posuvová síla
F_{fNi}	[N]	kolmá posuvová síla
F_p	[N]	pasivní síla
L	[mm]	dráha nástroje
P	[kW]	výkon elektromotoru
P_{Fe}	[-]	pracovní boční rovina
Q_n	[J]	teplo odvedené nástrojem
Q_o	[J]	teplo odvedené obrobkem
Q_{pe}	[J]	teplo vzniklé v oblasti plastických deformací při tvoření třísky
Q_{pr}	[J]	teplo odvedené řezným prostředím
Q_t	[J]	teplo odvedené třískou
Q_α	[J]	teplo vzniklé v oblasti tření hřbetu nástroje
Q_γ	[J]	teplo vzniklé v oblasti tření třísky po čele nástroje

a_p	[mm]	šířka záběru ostří
b_D	[mm]	jmenovitá šířka třísky
e	[-]	excentricita
f	[mm]	posuv na otáčku
f_z	[mm]	posuv na zub
h_D	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
h_i	[mm]	tloušťka odřezané třísky
k_{ci}	[MPa]	měrná řezná síla
l	[mm]	délka obráběné plochy
l_n	[mm]	délka náběhu
l_p	[mm]	délka přeběhu
m	[-]	exponent
n	[min^{-1}]	otáčky
v_c	[$m.min^{-1}$]	řezná rychlost
v_f	[$m.min^{-1}$]	posuvová rychlost
v_e	[$m.min^{-1}$]	rychlost řezného pohybu
t_{AS}	[min]	jednotkový strojní čas
x	[-]	exponent vlivu tloušťky třísky
z	[-]	počet zubů
ψ	[°]	úhel záběru fréz
φ	[°]	úhel posuvového pohybu
η	[°]	úhel řezného pohybu
η	[-]	mechanická účinnost
κ_r	[°]	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1 (1/6)

1. Technická specifikace

Tab. 1.1Přehled kinematických veličin [4].

Řezná rychlost	$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \quad [m \cdot \min^{-1}]$	(3.1)
Posuvová rychlost	$v_f = f \cdot n \quad [mm \cdot \min^{-1}]$	(3.2)
Rychlost řezného procesu	$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad [m \cdot \min^{-1}]$	(3.3)

kde:

D [mm]	průměr obráběné plochy
n [min^{-1}]	otáčky obrobku
f [mm]	posuv na otáčku obrobku

Tab. 1.2 Průřez třísky a její rozměry [4].

Šířka záběru ostří a_p		
- podélné soustružení	$a_p = 0{,}5 \cdot (D - d) \quad [mm]$	(3.4)
- čelní soustružení	$a_p = (L - l) \quad [mm]$	(3.5)
Jmenovitý průřez třísky A_D	$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot f \quad [mm]$	(3.6)
Jmenovitá šířka třísky b_D	$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [mm]$	(3.7)
Jmenovitá tloušťka třísky h_D	$h_D = \frac{A_D}{b_D} \quad [mm]$	(3.8)

Tab. 1.3 Řezné síly a výkon elektromotoru [4].

Řezná síla	$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fe}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [N]$	(3.9)
Posuvová síla	$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [N]$	(3.10)
Pasivní síla	$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad [N]$	(3.11)
Celková řezná síla	$F = \sqrt{F_C^2 + F_f^2 + F_p^3} \quad [N]$	(3.12)
Výkon hnacího elektromotoru	$P = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4 \cdot \eta} \quad [kW]$	(3.13)

kde:

C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp} [-]	materiálové konstanty
x_{Fc}, x_{Ff}, x_{Fp} [-]	exponenty vlivu **a_p**
y_{Fc}, y_{Ff}, y_{Fp} [-]	exponenty vlivu **f**
F_c [N]	řezná síla
v_c [m min^{-1}]	řezná rychlost
η [-]	mechanická účinnost obráběcího stroje

PŘÍLOHA 1 (2/6)

Tab. 1.4 Jednotkový strojní čas [4].

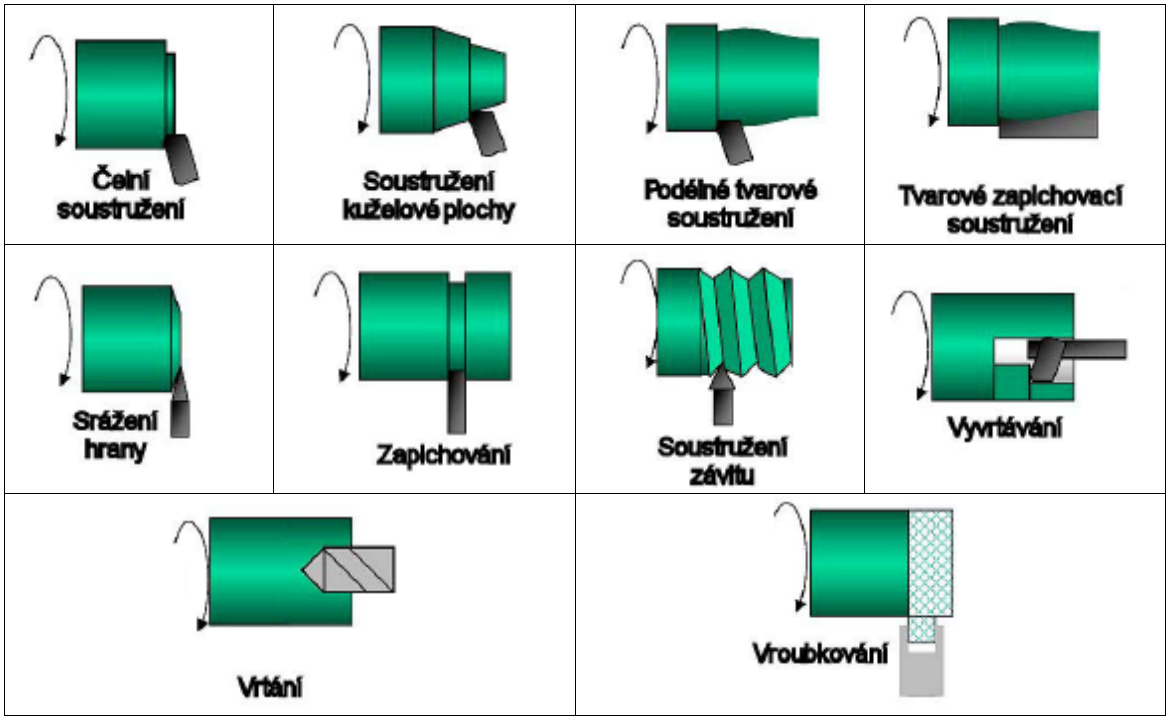
Jednotkový strojní čas pro podélné soustružení válcové plochy		
Jednotkový strojní čas	$t_{AS} = \dfrac{L}{n \cdot f}$ [min]	(3.14)
Dráha nástroje ve směru posuvu	$L = l + l_n + l_p$ [mm]	(3.15)
Jednotkový strojní čas pro soustružení čelní plochy		
Jednotkový strojní čas	$t_{ASv} = \dfrac{\pi \cdot [(D_{\max} + 2 \cdot l_n)^2 - (D_{\min} - 2 \cdot l_p)^2]}{4 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f}$ [min]	(3.16)
Dráha nástroje ve směru posuvu	$L = \dfrac{[(D_{\max} + 2 \cdot l_n) - (D_{\min} - 2 \cdot l_p)]}{2}$ [mm]	(3.17)

kde:

l [mm]	délka soustružené plochy
l_n [mm]	délka náběhu
l_p [mm]	délka přeběhu

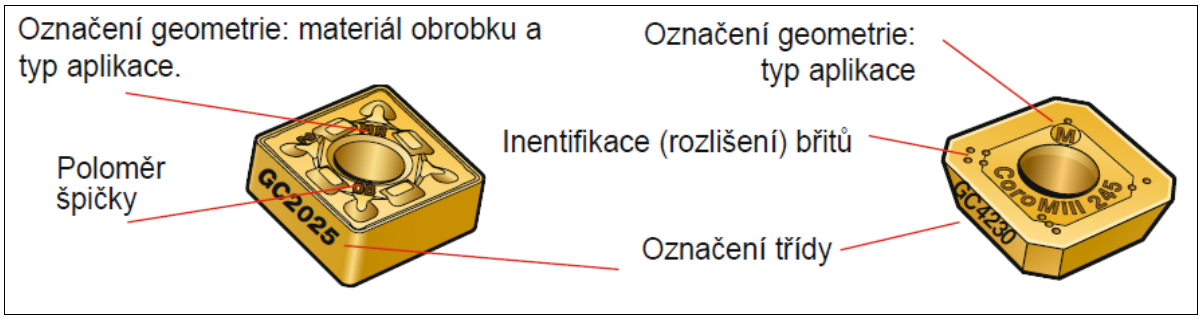
2. Praktická využití soustruhu

Tab. 1.5 Základní operace na soustruhu [4].



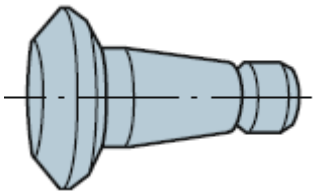
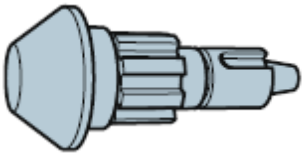
PŘÍLOHA 1 (3/6)

1. Označení VBD, nástrojových držáků a podmínky obrábění:

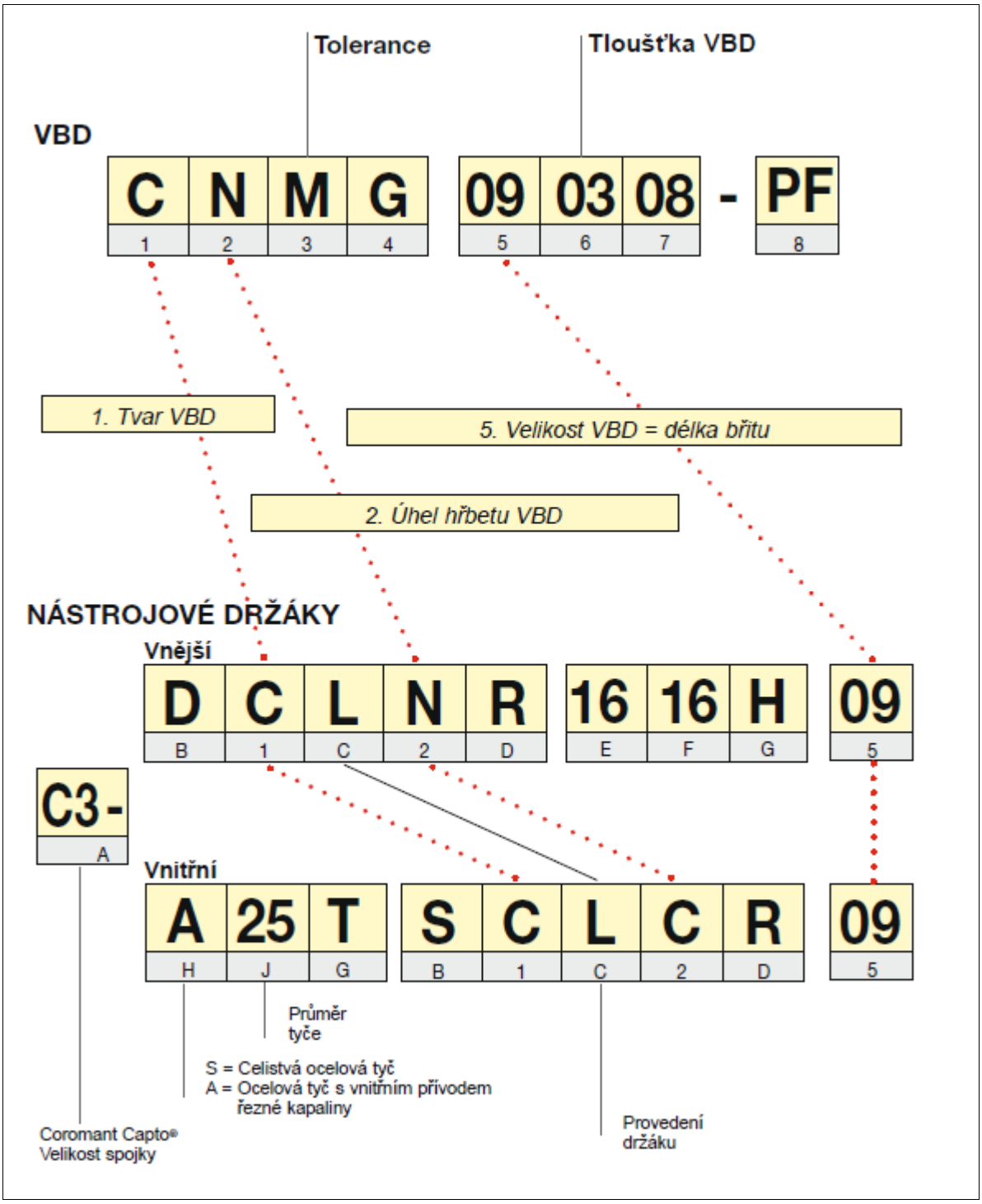


Označení VBD [29]

Tab. 1.6 Podmínky obrábění [29].

Dobré	**Průměrné**	**Obtížné**
		
Nepřerušované řezy. Vysoké rychlosti. Vynikající upnutí obrobku. Malé vyložení	Obrábění tvarových ploch. Střední rychlosti. Výkovky nebo odlitky. Dobré upnutí obrobku.	Přerušované řezy. Nízké rychlosti. Nedostatečná stabilita upnutí obrobku.

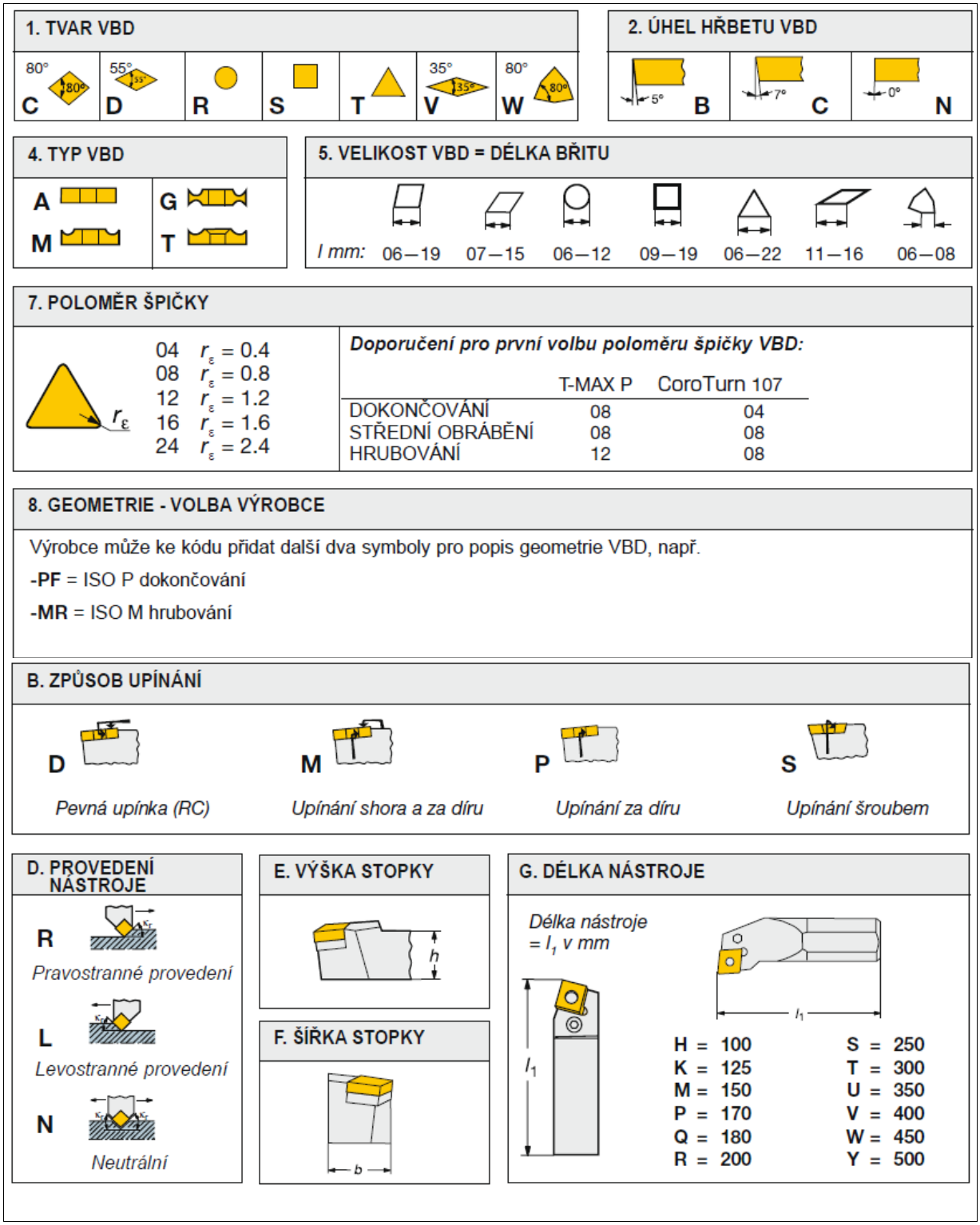
PŘÍLOHA 1 (4/6)



Kódové označení VBD a nástrojových držáků [29]

PŘÍLOHA 1 (5/6)

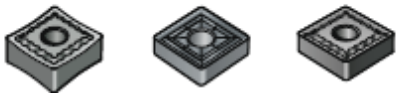
2.Soustružnické nástroje - kódové označení VBD a nástrojových držáků:



Kódové označení VBD a nástrojových držáků [29]

PŘÍLOHA 1 (6/6)

Tab. 1.6 Volba VBD [29].

Určete třídu materiálu	Negativní VBD T-MAX P Přejděte na stranu s VBD a vyberte geometrii, třídu a řezné podmínky.	Pozitivní VBD CoroTurn 107 Přejděte na stranu s VBD a vyberte geometrii, třídu a řezné podmínky.
P	Dokončování, Střední obrábění, Hrubování 	Dokončování, Střední obrábění, Hrubování 
M	Dokončování, Střední obrábění, Hrubování 	Dokončování, Střední obrábění, Hrubování 
K	Dokončování, Střední obrábění, Hrubování 	Dokončování, Střední obrábění, Hrubování 
N		Střední obrábění 
S	Dokončování, Střední obrábění, Hrubování 	Dokončování, Střední obrábění 
H	Dokončování 	Dokončování 

PŘÍLOHA 2 (1/4)

1. Technická specifikace

Tab. 2.1Přehled kinematických veličin [4].

Řezná rychlost	$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \quad [m \cdot \min^{-1}]$	(3.18)
Posuvová rychlost	$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [mm \cdot \min^{-1}]$	(3.19)
Posuv na otáčku	$f_n = f_z \cdot z \quad [mm]$	(3.20)

kde:

D [mm]	průměr nástroje
n [min^{-1}]	otáčky nástroje
f_Z [-]	posuv na zub
z [-]	pořez zubů

Tab. 2.2 Průřez třísky a její rozměry [4].

Tloušťka odřezané třísky	$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin\varphi_i \quad [mm]$	(3.21)
Max velikost jmenovité tloušťky třísky h_{max}	$h_{\max} = f_z \cdot \sin\varphi_{\max} = f_z \cdot \frac{2}{D} \cdot \sqrt{DH - H^2} \quad [mm]$	(3.22)
Jmenovitý průřez třísky A_{Di}	$A_{Di} = h_i \cdot a_p = f_z \cdot a_p \cdot \sin\varphi_i \quad [mm^2]$	(3.23)
Max velikost jmenovité průřezu třísky A_{max}	$A_{D\max} = h_{\max} \cdot a_p = f_z \cdot a_p \cdot \sin\varphi_{\max} \quad [mm^2]$	(3.24)
	$\sin\varphi_{\max} = \frac{2}{D} \cdot \sqrt{D \cdot H - H^2} \quad [-]$	(3.25)
Max velikost jmenovité průřezu třísky A_{max}, při $\varphi_i = 90°$	$A_{D\max} = f_z \cdot a_p \quad [mm^2]$,	(3.26)
Jmenovitá tloušťka třísky h_i	$h_i = f_z \cdot \sin\kappa_r \cdot \sin\varphi_i \quad [mm]$	(3.27)
Jmenovitá šířka třísky b_i	$b = \frac{a_p}{\sin\kappa_r} \quad [mm]$	(3.28)

kde:

f_z [mm]	posuv na zub
φ_i [°]	úhel posuvového pohybu

PŘÍLOHA 2 (2/4)

Tab. 2.3 Řezné síly [4].

Válcové frézování		
Řezná sila F_{ci}	$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi_i \quad [N]$	(3.29)
Měrná řezná sila k_{ci}	$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin\varphi_i)^{1-x}} \quad [MPa]$	(3.30)
Po dosazení do vzorce (3.29)		
	$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \quad [N]$	(3.31)
Celková řezná sila F_c	$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad [N],$	(3.32)
Počet zubů v záběru	$n_z = \frac{\varphi_{\max}}{360} \cdot z \quad [-]$	(3.33)
Čelní frézování		
Řezná sila F_{ci}	$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi_i \quad [N]$	(3.34)
Měrná řezná sila k_{ci}	$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin\kappa_r \cdot \sin\varphi_i)^{1-x}} \quad [MPa]$	(3.35)
	$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{x-1}\kappa_r \cdot \sin^x \varphi_i \quad [N]$	(3.36)
Celková řezná sila F_c	$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad [N]$	(3.37)
Počet zubů v záběru	$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z \quad [-]$	(3.38)

kde:

C_{Fc} [-]	konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu
x [-]	exponent vlivu tloušťky třísky
φ_{max} [°]	maximální úhel posuvového pohybu
ψ [°]	úhel záběru frézy
z [-]	počet zubů (břitů) frézy

PŘÍLOHA 2 (3/4)

Tab. 2.4 Jednotkový strojní čas [4].

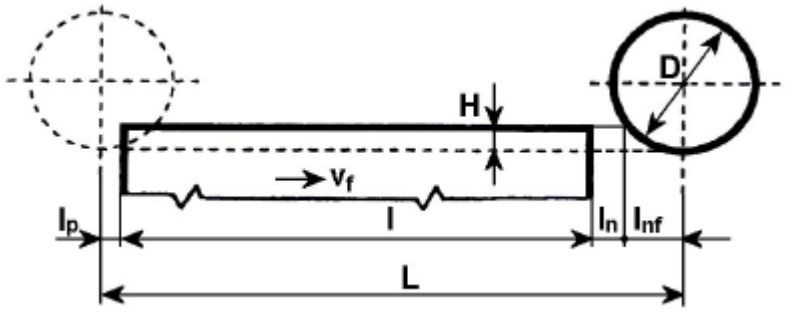
Jednotkový strojní čas frézování		
Jednotkový strojní čas	$t_{AS} = \frac{L}{v_f}$ [min]	(3.39)
Válcové frézování		
Dráha nástroje ve směru posuvu	$L = l + l_n + l_p + l_{nf}$ $[mm]$	(3.40)
kde	$l_{nf} = \sqrt{H \cdot (D - H)}$ $[mm]$	(3.41)
Čelní hrubé frézování asymetrické		
Dráha nástroje ve směru posuvu	$L = l + l_n + l_p + \frac{D}{2} - l_{pf}$ $[mm]$	(3.42)
kde	$l_{pf} = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{B}{2} + e\right)^2}$ $[mm]$	(3.43)
Čelní frézování načisto asymetrické		
Dráha nástroje ve směru posuvu	$L = l + l_n + l_p + D$ $[mm]$	(3.44)

kde:

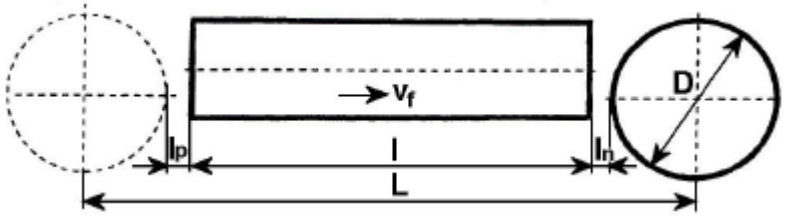
L [mm]	dráha nástroje ve směru posuvového pohybu
v_f [mm min^{-1}]	posuvová rychlost

2. Dráhy frézy

Tab. 2.5 Jednotkový strojní čas [4].



Obr. 3.13 Dráha frézy pro válcové frézování



Obr. 3.14 Dráha frézy pro čelní frézování načisto asymetrické

PŘÍLOHA 2 (4/4)

Tab. 2.6 Frézy s VBD [29].

Běžné rovinné frézování CoroMill® 345 ∅ 40 – 250 mm	P M K N H	-L -M -H
Běžné rovinné frézování CoroMill® 245 ∅ 50 – 250 mm	P M K N S H	-L -M -H
Rovinné frézování neželezných materiálů CoroMill® Century ∅ 40 – 200 mm	K N H	-L
Frézování do rohu CoroMill® 490 ∅ 20 – 250 mm	P M K H	-L -M -H
Čelní frézování/frézování do rohu/frézování drážek CoroMill® 390 ∅ 12 – 200 mm	P M K N S H	-L -M -H
Rovinné frézování/ tvarové frézování Hrubování/těžké hrubování CoroMill® 200 ∅ 50 – 100 mm	P M K N S H	-L -M -H
Rovinné frézování/tvarové frézování Lehké hrubování/polodokončování CoroMill® 300 ∅ 25 – 80 mm	P M K N S H	M-xM E-xM M-xH
Čelní frézování/Srážení hran/ tvarové frézování CoroMill® 316 ∅ 10 – 25 mm	P M K N S H	

PŘÍLOHA 3 (1/3)

1. Technická specifikace

Tab. 3.1Přehled kinematických veličin [4].

Řezná rychlost	$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \quad [m \cdot \min^{-1}]$	(3.45)
Posuvová rychlost	$v_f = f \cdot n \quad [mm \cdot \min^{-1}]$	(3.46)
Rychlost řezného procesu	$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = 10^{-3} \cdot n \cdot \sqrt{(\pi \cdot D)^2 + f^2} \quad [m \cdot \min^{-1}]$	(3.47)
Posuv na zub	$f_z = \frac{f}{z} \quad [mm]$	(3.48)

kde:

D [mm]	průměr obráběné plochy
n [min^{-1}]	otáčky obrobku
f [mm]	posuv na otáčku obrobku
z [-]	počet zubů (břitů nástroje)

Tab. 3.2 Průřez třísky a její rozměry [4].

Jmenovitý průřez třísky	$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot \frac{f}{2} \quad [mm^2]$	(3.49)
Vrtání do plného materiálu	$A_D = \frac{D \cdot f}{4} \quad [mm^2],$	(3.50)
Vrtání do předvrtané díry	$A_D = \frac{(D-d) \cdot f}{4} \quad [mm^2],$	(3.51)
Vrtání do plného materiálu pro dvoubřitý nástroj	$A_D = \frac{D \cdot f}{2} \quad [mm^2],$	(3.52)
Vrtání do předvrtané díry pro dvoubřitý nástroj	$A_D = \frac{(D-d) \cdot f}{2} \quad [mm^2],$	(3.53)
Jmenovitá tloušťka třísky	$h_D = \frac{f}{2} \cdot \sin \kappa_r \quad [mm],$	(3.54)
Jmenovitá šířka třísky do plného materiálu	$b_D = \frac{D}{2 \cdot \sin \kappa_r} \quad [mm],$	(3.55)
Jmenovitá šířka třísky do předvrtané díry	$b_D = \frac{D-d}{2 \cdot \sin \kappa_r} \quad [mm].$	(3.56)

kde:

b_D [mm]	jmenovitá šířka třísky
h_D [mm]	jmenovitá tloušťka třísky
a_p [mm]	šířka záběru ostří
f [mm]	posuv na otáčku

PŘÍLOHA 3 (2/3)

Tab. 3.3 Řezné síly [4].

Řezná síla	$F_c = C_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [N],$	(3.57)
Posuvová síla	$F_f = C_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [N],$	(3.58)
Kroutící moment k ose vrtáku	$M_k = C_M \cdot D^{X_M} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [N\,mm]$	(3.59)
Řezný výkon	$P_c = \frac{F_C \cdot v_c}{2 \cdot 60 \cdot 10^3} = \frac{F_C \cdot v_c}{12 \cdot 10^4} \quad [kW].$	(3.60)

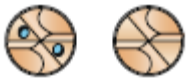
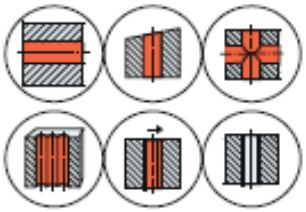
kde:

C_{Fc}, C_{Ff} [-]	konstanty, vyjadřující vliv obráběného materiálu
x_{Fc}, x_{Ff} [-]	exponenty, vyjadřující vliv průměru vrtáku
y_{Fc}, y_{Ff} [-]	exponenty, vyjadřující vliv posuvu na otáčku
D [mm]	průměr obráběné plochy
f [mm]	posuv na otáčku

PŘÍLOHA 3 (3/3)

2. Všeobecné vrtání:

Tab. 3.4 Typy vrtáků [29].

Typy vrtáků	Třídy	Materiál	Univerzální použití
CoroDrill® Delta C R840, ∅ 3 – 20 mm 	 GC1220	P N M S K H	
CoroDrill® Delta C R842, ∅ 3.0 – 20 mm 	 GC1210	K	
CoroDrill® Delta C R846, ∅ 3.0 – 12 mm 	 GC1220	M S	
CoroDrill® Delta C R850, ∅ 5.0 – 14 mm 	 N20D	N	
CoroDrill® 880 ∅ 12 – 63.00 mm 	 GC4014 GC4024 GC4034 GC4044 H13A GC2044  GC1044 H13A GC1144	P N M S K H	

Poznámka:

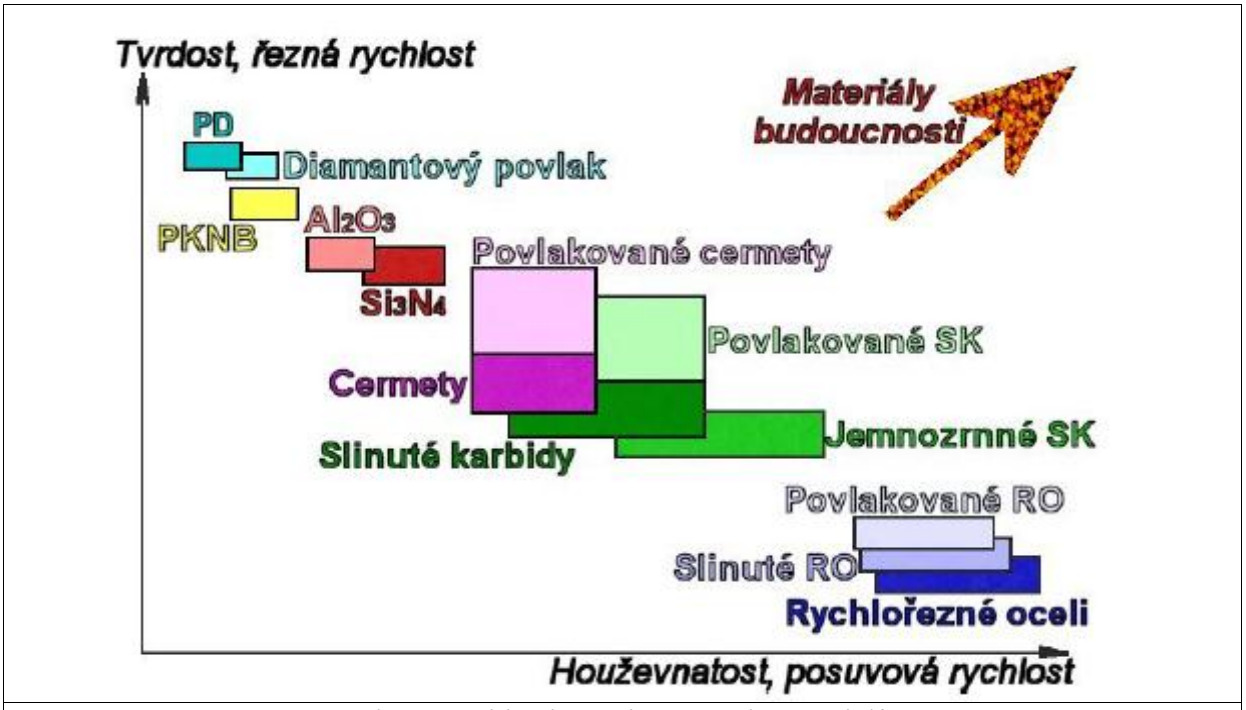
 Vnitřní přívod řezné kapaliny.	 Vnější přívod řezné kapaliny.

SANDVIK Coromant

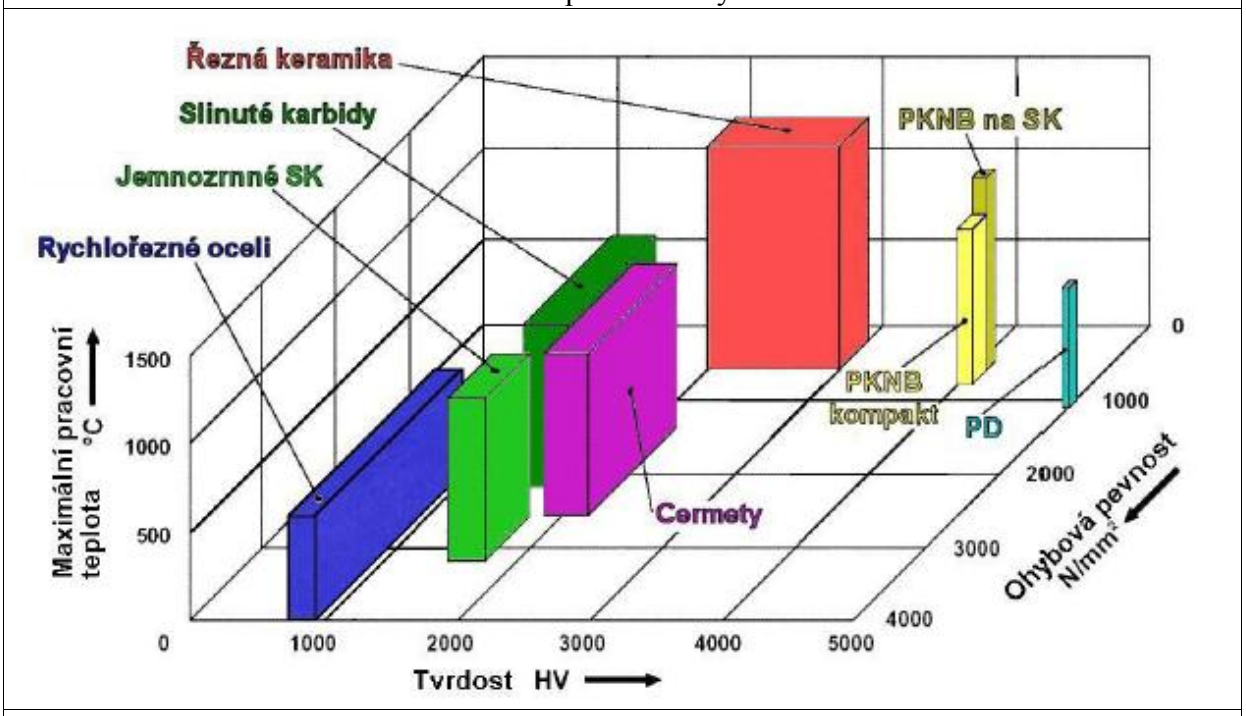
PŘÍLOHA 4

1. Vlastnosti nástrojových materiálů

Tab. 4.1Vlastnosti nástrojových matriálů [4].



Obr. 4.1 Oblasti použití řezných materiálů



Obr. 4.2 Hodnoty vybraných vlastností řezných materiálů

PŘÍLOHA 5 (1/3)

Obráběcí stroj HELITRONIC DIAMOND [30]

PŘÍLOHA 5 (2/3)

Obráběcí stroj HELITRONIC POWER DIAMOND [30]

PŘÍLOHA 5 (3/3)

Obráběcí stroj HELITRONIC POWER DIAMOND, s přídavnou bruskou [30]