

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE



OBROBITELNOST MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ

MACHINABILITY OF MATERIALS AND ITS TESTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství
Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

MIROSLAV MIKOLÁŠ

PRAHA 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mikoláš** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **437239**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Obrobitelnost materiálů a jejich zkoušení

Název bakalářské práce anglicky:

Machinability of materials and its testing

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Možnosti laboratorních zkoušek obrobitelnosti
3. Experimentální měření
4. Vyhodnocení a závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

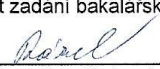
Ing. Vítězslav Rázek CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

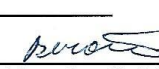
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce

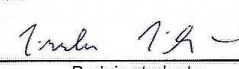

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

3.5. 2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma obrobitelnost materiálů a jejich zkoušení vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady, které jsou uvedené v příloženém seznamu citací.

V Praze dne:.....

Podpis:.....

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce, panu Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za věcné připomínky a rady v oblasti strojírenské technologie a za trpělivost, při vypracovávání této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině, za plnou podporu při mém studiu a vypracovávání této bakalářské práce.

Anotace

Tato bakalářské práce pojednává o problematice obrobitelnosti materiálů a jejich zkoušení.

V teoretické části této práce se zabývám základními pojmy souvisejícími s obráběním, charakteristikou řezného procesu, charakteristikou nástrojových materiálů a materiály používanými ve strojírenství. Dále pak obrobitelností materiálů, metodami hodnocení obrobitelnosti a jednotlivými zkouškami obrobitelnosti materiálů. V praktické části této práce vyhodnocuji a porovnávám obrobitelnost dvou materiálů, zkouškou obrobitelnosti vrtáním při konstantním zatížení.

Klíčová slova

Obrábění, obrobitelnost, řezný proces, materiály, vrtání.

Abstract

This bachelor thesis deals with the issue of material working and their testing. In the theoretical part I pay attention to the basic terms related to working, characteristic of cutting process, characteristic of tool materials and materials which are used in mechanical engineering. Then I focus on material working, methods of evaluation of working and particular tests of material working.

In the practical part I evaluate and compare working of two particular materials. The comparison is based on the test of working materials by drilling in the process of steady loading.

Keywords

working, cutting process, materials, drilling

Obsah

Seznam zkratek	8
Úvod.....	9
1 Základní pojmy:	10
1.1 Obrábění:	10
1.1.1 Druhy obrábění	11
1.2 Obráběcí nástroje	13
2 Řezný proces.....	14
2.1 Charakteristika řezného procesu	14
2.2 Síly při řezném procesu.....	14
2.3 Drsnost povrchu při řezném procesu.....	16
2.3.1 Nejčastěji používané parametry	17
3 Nástrojové materiály	19
3.1 Rychlořezná ocel (RO).....	19
3.2 Slinuté karbidy (SK)	19
3.3 CERMET.....	20
3.4 Řezná keramika (ŘK).....	21
3.5 Kubický nitrid bóru (KNB).....	21
3.6 Polykrystalický diamant (PKD)	22
4 Materiály ve strojírenství	23
4.1 Kovy.....	23
4.1.1 Vlastnosti kovů a slitin	24
4.2 Plasty	25
4.3 Kompozity.....	26
4.4 Keramika	26
5 Obrobitelnost	27
5.1 Hodnocení obrobitelnosti	28

5.2	Metody zkoušení obrobitelnosti	30
5.2.1	Dlouhodobé zkoušky obrobitelnosti	30
5.2.2	Krátkodobé zkoušky obrobitelnosti	32
5.3	Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů	38
6	Praktická část - Zkouška obrobitelnosti vrtáním při konstantním zatížení.....	40
6.1	Popis zkoušky.....	40
6.2	Popis měření.....	41
6.3	Vyhodnocení a porovnání.	46
7	Závěr	53
8	Bibliografie	54
	Seznam obrázků.....	56
	Seznam tabulek	57

Seznam zkratek

- HŘP - Hlavní řezný pohyb
- PVD - Physical vapour deposition (nanášení povlaků fyzikální metodou)
- CVD - Chemical vapour deposition (nanášení povlaků chemickým procesem)
- VBD - Vyměnitelná břitová destička
- TiN - Nitrid titanu
- TiC - Karbid titanu
- Al₂O₃ - Oxid hlinitý
- TiCN - Karbonitrid titanu
- VB_B - Opotřebení na hřbetu nástroje
- VB_{Opt} - Optimální opotřebení na hřbetu nástroje
- i_o - Index obrobiteľnosti

Úvod

Obrobitelnost materiálu je z hlediska technologie třískového obrábění jedna z jeho nejdůležitějších vlastností. Můžeme ji definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být zpracován některou z metod obrábění. Obrobitelnost je závislá na mnoha faktorech jako jsou: druh a způsob obrábění, použitý nástrojový materiál, obráběný materiál, řezné prostředí.

Jelikož v poslední době, ať už ve strojírenské výrobě, letecké a kosmonautické výrobě nebo lékařském průmyslu, čím dál tím více roste využívání těžkoobrobitelných materiálů jako jsou například: titan, nikl, chrom apod., roste i zájem o hodnocení obrobitelnosti těchto materiálů.

V této práci je podrobněji popsána obrobitelnost materiálů, faktory ovlivňující obrobitelnost materiálů a metody hodnocení a zkoušení obrobitelnosti.

1 Základní pojmy:

1.1 Obrábění:

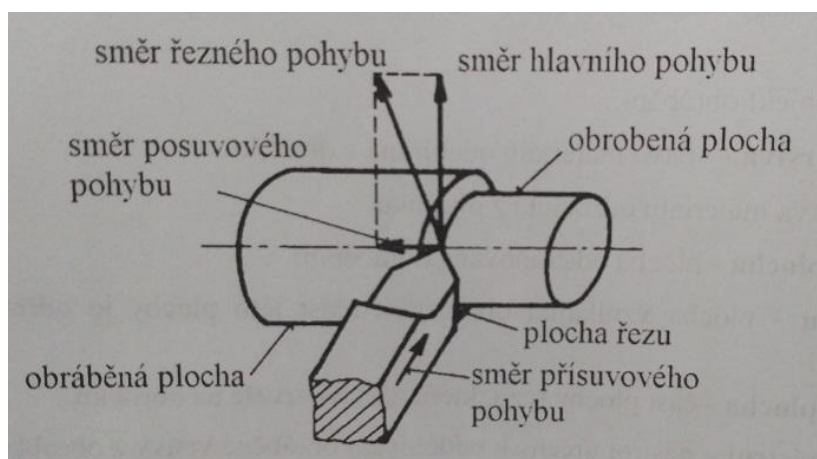
Obrábění považujeme za jeden z řady technologických procesů, při němž ubíráme materiál ze součástí (polotovaru) a vytváříme tak požadovaný tvar a požadovanou kvalitu povrchu těchto součástí. Tato technologie získala ve strojírenské technologii velmi významné místo. Téměř většina strojírenských součástí má jako konečnou technologii zpracování právě obrábění, a to i s vysokými kvalitativními parametry, kterých lze v této době už poměrně jednoduše dosáhnout.

Oddělovat materiál z polotovaru můžeme dvěma způsoby:

- a. materiál oddělujeme formou třísek působením břitu obráběcího nástroje - tzv. řezáním. Toto oddělování se nazývá mechanické.
- b. materiál oddělujeme elektrickými nebo elektrochemickými a tomu podobnými metodami.

V této bakalářské práci se budu zabývat základními technologickými metodami, které využívají mechanické oddělování materiálu součástí ve formě třísky - řezání. Tento proces oddělování materiálu probíhá za působení řezné části obráběcího nástroje - břitu.

Následující základní pojmy jsou ukázány na obrázku č. 1 - Technologie soustružení.



Obrázek 1 - Ukázka základních pojmů[1]

Obráběná plocha - plocha materiálu, ze které se odebrává materiál a mění se v třísku.

Plocha řezu - plocha, která vzniká při obrábění. (Její další část může být obrobena při další fázi obrábění).

Obrobena plocha - plocha, která vznikla na součásti po obrobení. (Konečná plocha).

Řezný pohyb - tento pohyb je vytvářen dvěma pohyby - řezným a posuvovým. Může být definován jako relativní pohyb obrobku a nástroje, který umožňuje obrábění.

Hlavní řezný pohyb (HŘP) - hlavní pohyb, který spolu s pohybem posuvovým umožňuje obrábění. Tento pohyb vykonává buď nástroj nebo obrobek, vzhledem k tomu, o jaké obrábění se jedná. Při soustružení je HŘP rotace obrobku. Při frézování je HŘP rotace obráběcího nástroje. Při obrábění je HŘP přímočarý pohyb obráběcího nástroje.

Řezná rychlost - rychlost, jejíž velikostí definujeme rychlost hlavního řezného pohybu. Její jednotka je $m \cdot \text{min}^{-1}$. Pouze při broušení se řezná rychlost udává v $m \cdot s^{-1}$. Označuje se jako „ v_c “.

Posuvový pohyb – vedlejší řezný pohyb. Tento pohyb může být definován také jako relativní pohyb obrobku a nástroje umožňující obrábění.

Posuv - pohyb, který udává, o jakou hodnotu se nástroj nebo obrobek posune ve směru posuvového pohybu. Při obrábění rozlišujeme několik typů posuvů:

1. posuv na otáčku (obrobku nebo nástroje) - f [mm]
2. posuv na zub (obráběcího nástroje) - f_z [mm]
3. posuv za minutu - f_m [$mm \cdot \text{min}^{-1}$]
4. posuv na zdvih - f_{zd} [mm]

Přisuvový pohyb - také vedlejší řezný pohyb. Pohyb ve směru do obrobku. Jeho velikostí je udáváno, jak velká bude hloubka třísky.

Hloubka třísky (šířka záběru ostří) - Je to hodnota udávající jak velký záběr bude mít ostří. Dá se také definovat jako vzdálenost mezi dvěma plochami - obrobenou a obráběnou. Značí se a_p .

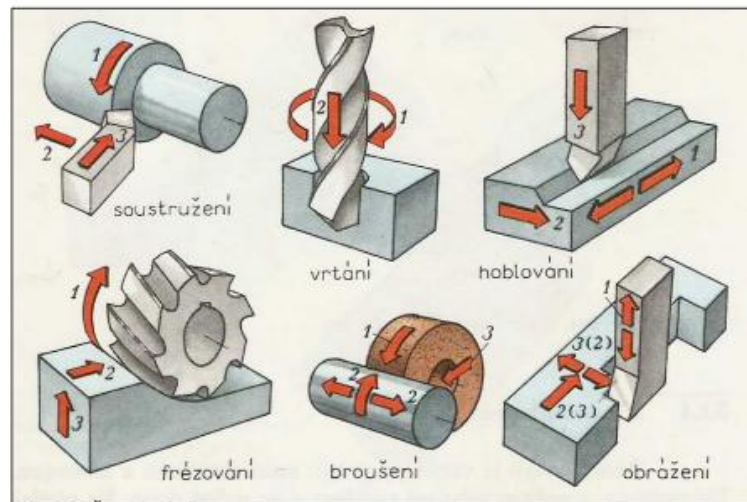
1.1.1 Druhy obrábění

Obrábění jako takové může být rozděleno z více hledisek:

1. Podle hlavního řezného pohybu

- když je hlavní řezný pohyb rotační a vykonává ho obrobek, jedná se o soustružení.
- když je hlavní řezný pohyb rotační a vykonává ho nástroj, může se jednat o jeden z těchto způsobů: frézování, vrtání, vyvrtávání, vyhrubování, vystružování, broušení, řezání kotoučovou pilou, zahlubování.
- v případě hlavního řezného pohybu přímočarého vratného, který vykonává obrobek, se jedná o hoblování.

- v případě hlavního řezného pohybu přímočarého vratného, který vykonává nástroj, se může jednat o jeden z těchto způsobů obrábění: obrážení, protlačování, protahování, řezání rámovou nebo pásovou pilou, popř. pilování.[2]



Obrázek 2 - Způsoby obrábění rozdělené podle hlavních řezných pohybů
1 - Hlavní řezný pohyb
2,3 - Vedlejší řezné pohyby[2]

2. Podle způsobu obrábění:

- ruční - hlavní řezný pohyb vykonává člověk ručními nástroji (pilování, řezání ruční pilou apod.).
- strojní - hlavní a další řezné pohyby vykonává stroj (soustružení, frézování atd.).

3. Podle vzniku třísky - třískové a beztřískové:

- třískové obrábění lze charakterizovat jako obrábění, při kterém působí břit nástroje na polotovár, a za vzniku třísek (odstraňovaného materiálu) z něj vzniká obrobek.
- beztřískové obrábění lze charakterizovat jako obrábění, při kterém nevzniká odpad ve formě třísek. Někdy se také nazývá jako nekonvenční způsob obrábění.

4. Podle charakteristických znaků:

- obrábění nástroji s definovanou geometrií (soustružení, frézování, vrtání, vyhrubování, řezání závitů, obrážení).
- obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií (honování, lapování, broušení a superfinišování).
- obrábění nekonvenčními metodami (elektro-erozivní obrábění, obrábění ultrazvukem, obrábění laserem, obrábění vodním paprskem, chemické obrábění).[3]

1.2 Obráběcí nástroje

Obráběcí nástroj je prvek, který má rozdílný tvar daný způsobem obrábění a různou charakteristiku, danou materiálem, ze kterého byl vyroben (nástrojovým materiálem).

Obráběcí nástroje mají zpravidla tyto části:

Těleso - část nástroje

Stopka - část nástroje, za kterou se nástroj upíná

Upínací díra - díra, sloužící pro upnutí nástroje

Břit - část nástroje sloužící k odebírání materiálu. Skládá se z čela, hřbetu a ostří.

Čelo - plocha (plochy), po které odchází tříska z místa řezu. Na nástroji může být více čel. Čelo hlavní, které se značí jako $A\gamma$ a čelo vedlejší, které se značí jako $A\gamma'$.

Hřbet - plocha (plochy), která je přilehlá k obrobené ploše. Rozlišuje se hlavní hřbet $A\alpha$ a vedlejší hřbet $A\alpha'$.

Ostří - hrana, která vznikne na přechodu mezi čelem a hřbetem. Na nástroji může být více ostří. V tomto případě se hlavní ostří označuje S a vedlejší ostří S' .

Špička - část břitu nacházející se ve spojnici hlavního a vedlejšího ostří.

Pro popsání geometrie nástroje se používají dva souřadnicové systémy. Je to nástrojový souřadnicový systém a pracovní souřadnicový systém, někdy známý také jako kinematický. Ten se vyznačuje tím, že zahrnuje i změnu nástrojových úhlů v důsledku pracovních pohybů. Zatímco u nástrojové souřadnicové soustavy se pracuje s nástrojovou geometrií břitu nástroje a vychází se ze směru hlavního řezného pohybu a posuvu, oba tyto směry jsou předpokládáné. Tento systém se využívá při výrobě, konstrukci a kontrole nástroje.[1]

2 Řezný proces

2.1 Charakteristika řezného procesu

Při obrábění se vlivem působení břitu nástroje na obrobek odebírají části materiálu nazývané se třísky. Tento proces se nazývá řezání nebo také řezný proces.

Řezný proces vzniká v obráběcím systému, který se člení na subsystemy pracovních nástrojů, pracovních strojů, manipulačních přípravků a prostředí, ve kterém proces vzniká. Obrobek je hlavním objektem v obráběcím procesu a jako nejdůležitější výstup jsou parametry obrobených ploch.[4]

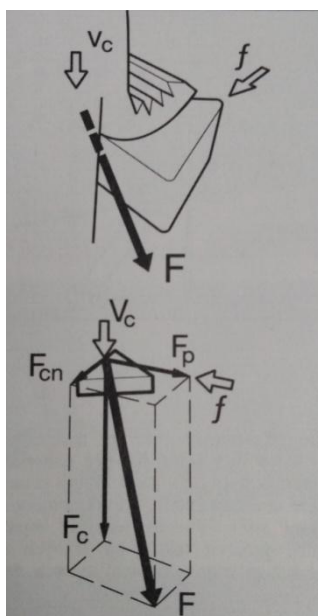
Řezný proces můžeme rozdělit na dva typy: ortogonální a obecný.

Při ortogonálním řezání svírá ostří kolmý úhel se směrem řezného pohybu. Při tomto způsobu řezání se zkoumá problematika tvorby třísky v rovině. Naopak při obecném řezání, kdy ostří svírá se směrem řezného pohybu úhel různý (podle nastavení), se problematika tvorby třísky řeší v prostoru.[5]

2.2 Síly při řezném procesu

Aby byla tříska oddělena z obrobku, je zapotřebí vynaložit velké síly. Z toho vyplývá, že existuje blízký vztah mezi potřebou výkonu pro řezný proces a silami vznikajícími při tomto procesu. Hodnoty řezných sil můžeme buď změřit dynamometrem nebo je z teoretického hlediska vypočítat. Tyto síly se skládají ze sil přetvářejících třísku a ze sil, které vznikají při odřezávání třísky. Při řezném procesu vznikají v místě břitu prioritně tlakové síly, ale vznikají zde i síly smykové. Obě tyto síly působí v jiných směrech. Největší tlakovou sílu je možné zaznamenat na ostří břitu, která se poté podél čela zeslabuje.

Z prostorového hlediska je možno výslednou řeznou sílu „ F “ rozdělit na tři jednotlivé síly, které jsou jejími složkami. Viz obr.3.



Obrázek 3 - Prostorové složky síly F[6]

Řezná síla „ F_c “ vzniká kontaktem a třením mezi obrobkem a nástrojem. Velký vliv na velikost řezné síly má krouticí moment a příkon.

Síla „ F_p “ je označována jako pasivní složka výsledné síly, někdy také nazývána jako radiální síla. Její směr je kolmý k síle řezné. Vliv na její velikost má geometrie břitu.

Síla „ F_{cn} “ je označována jako síla posuvová, jelikož působí ve směru posuvu a ve směru obrábění. Tato složka síly hraje velkou roli hlavně při vrtání. Na její velikost má opět vliv hlavně geometrie břitu.

Ke zjištění velikosti potřebného výkonu „ P “ je nutné znát měrnou řeznou sílu „ k_c “, která vyjadřuje vliv uvedené řezné síly. Měrná řezná síla je definována jako řezná síla, jež je vztažena na jednotku plochy řezu, která je právě vystavená řezání. Dá se vyjádřit vztahem:

$$k_c = \frac{F_c}{A} [N * mm^{-2}] \quad (1)$$

Měrná řezná síla „ k_c “ má velice úzkou spojitost s velikostí vrstvy odebíraného materiálu „ h_1 “ a posuvem „ f “. Při nárůstu „ h_1 “ se zmenšuje hodnota „ k_c “. Proto je snaha, aby hodnoty posuvu „ f “ byly vždy při řezném procesu v rámci možností co největší.

Jako shrnutí lze tedy říci, že každá složka síly je dominantní při jiném způsobu obrábění. Řezná síla má největší dominanci při obrábění jako je soustružení nebo frézování a ovlivňuje tak příkon stroje. Oproti tomu posuvová síla má dominanci při vrtání a síla pasivní hraje hlavní roli při obrábění vnitřních ploch a je závislá na úhlu nastavení hlavního ostří a poloměru špičky. Jak už bylo řečeno, velikost složek síly se zvětšuje s rostoucí velikostí průřezu třísky. Poměr mezi jednotlivými složkami bývá při hrubování zpravidla 4:2:1 - $F_c:F_p:F_{cn}$. Ovšem při vrtání se jejich poměr zcela liší a závisí hlavně na posuvu.[6]

2.3 Drsnost povrchu při řezném procesu

Jelikož obrobená plocha není po žádném typu obrábění dokonale hladká, vykazuje tak určitou drsnost povrchu, která se vyznačuje mikronerovnostmi vzniklými právě při obrábění.

Drsnost povrchu tedy chápeme jako jakost povrchu po obrobení. Jinými slovy pak jako souhrn různých nerovností na povrchu součásti na předem daném úseku. Drsnost se zpravidla vyhodnocuje podle způsobu obrábění, hloubky stop zanechaných po nástroji nebo vzhledu.[7]

Velký vliv na drsnost povrchu mají fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu, tvar a geometrie nástroje, způsob obrábění a v neposlední řadě řezné podmínky, zejména pak posuv a řezná rychlost. Drsnost dále může ovlivňovat i tuhost celé soustavy (stroj-nástroj-obrobek), řezná kapalina, způsob upnutí a opotřebení nástroje.[8]

Vhodně zvolená a předepsaná drsnost může zajistit prodlouženou životnost a spolehlivost součásti. Naopak neadekvátně zvolená drsnost má za následek vysoké výrobní náklady a dlouhý výrobní čas.[7]

Drsnost povrchu se vyhodnocuje podle naměřených parametrů. Měřené parametry jsou normalizované a dělí se podle normy ČSN EN ISO 4287, platné od března 1999, na parametry typu P - parametry vypočítané ze základního profilu. Dále se dělí na parametry typu R - parametry drsnosti vypočítané z profilu drsnosti a na parametry typu W. To jsou parametry vlnitosti, které se vypočítají z profilu vlnitosti.[9]

2.3.1 Nejčastěji používané parametry

Mezi nejčastěji používané parametry patří R parametry. Jsou to parametry drsnosti a dají se vypočítat z profilu drsnosti.

Dále se dělí na:

Rp - největší výška výstupku profilu

Rz - největší výška profilu (součet výšky největšího výstupku a hloubky největší prohlubně)

Rv - největší hloubka prohlubně profilu

Ra - průměrná aritmetická úchylka profilu

Rc - průměrná výška prvků profilu

Rq - kvadratický průměr pořadnic v rozsahu základní délky

Rsk - šikmost posuzovaného profilu

Rku - špičatost posuzovaného profilu [10]

Jedním z nejčastěji používaných parametrů pro vyhodnocení drsnosti povrchu je parametr Ra, jelikož jeho měření je relativně jednoduché a poměrně přesné i při opakovaném měření. Tento parametr udává vzdálenost střední hodnoty všech nerovností profilu na vyhodnocované délce od střední čáry daného profilu.

Při stanovení parametru Ra se jedná pouze o statistickou hodnotu a proto toto vyhodnocování nemusí být vždy jednoznačné a stejné. Je to způsobeno tím, že při stanovení hodnoty se nebere v úvahu výška výstupků a prohlubní, ale jejich průměrná hodnota. Proto dvě součásti se stejným povrchem a hodnotou Ra mohou mít jiný tvar profilu povrchu, ale i funkčnost. Je tedy lepší drsnost povrchu vyhodnocovat pomocí více parametrů.[11]

Existuje více způsobů, jak drsnost povrchu hodnotit:

Kvalitativní hodnocení - jedná se o hodnocení drsnosti povrchu za použití lidských smyslů. Porovnává se obrobená plocha s plochou vzorku (etalonu) hmatem, zrakem, popřípadě jednoduchými optickými přístroji. Tato metoda je nejméně spolehlivá.

Nepřímé kvantitativní hodnocení - toto hodnocení spočívá v porovnávání obrobené plochy s plochou vzorku (etalonu) pomocí komparačních měřidel. Výsledkem je rozdíl těchto dvou drsností.

Dotykové profilometry s postupnou transformací profilu - při této metodě se měřící dotyk rovnoměrně posouvá po zkoumané ploše a zaznamenává změny výšky v mnohonásobném zvětšení, které jsou způsobeny nerovností povrchu. Tato metoda je velice přesná.

Bezdotykové profiloměry - tato metoda využívá pro své měření optické metody a přístroje.[11]

Na následujícím obrázku jsou zaznamenány jednotlivé hodnoty drsností povrchu, které jsou dosažitelné při různých způsobech obrábění .

Způsob obrábění	Dosahovaná drsnost povrchu a přesnost		
	hrubování	obrábění na čisto	jemné obrábění
soustružení	$R_a = 12,5 - 100$ IT 11 - 14	$R_a = 1,6 - 12,5$ IT 9 - 11	$R_a = 0,2 - 1,6$ IT 5 - 8
frézování	$R_a = 6,3 - 25$ IT 10 - 13	$R_a = 1,6 - 6,3$ IT 7 - 13	$R_a = 0,8 - 1,6$ IT 7 - 8
vrtání a vyvrtávání	$R_a = 12,5 - 100$ IT 11 - 14	$R_a = 1,6 - 6,3$ IT 9 - 11	$R_a = 0,4 - 1,6$ IT 5 - 8
hoblování a obrážení	$R_a = 6,3 - 12,5$ IT 11 - 12	$R_a = 3,2 - 6,3$ IT 9 - 11	$R_a = 1,6 - 3,2$ IT 8 - 10
broušení	$R_a = 0,8 - 6,3$ IT 9 - 11	$R_a = 0,2 - 1,6$ IT 5 - 7	$R_a = 0,05 - 0,4$ IT 3 - 4

Obrázek 4 - Drsnosti povrchů při různých způsobech obrábění[10]

3 Nástrojové materiály

Jelikož se v poslední době čím dál více kladou nároky na výslednou kvalitu obrobku, je zapotřebí zlepšovat i vlastnosti nástrojů, potažmo materiálů, ze kterých jsou nástroje vyrobené. Mezi nejdéle používaný materiál patří nástrojová ocel, která se v dnešní době používá již minimálně, jelikož její používání je vysoce neproduktivní. Další skupinu materiálů tvoří rychlořezné oceli, které vynikají vysokou houževnatostí, ale bohužel na úkor tvrdosti. Jako jeden z nejpoužívanějších materiálů je slinutý karbid, který disponuje dobrou tvrdostí i houževnatostí. Dalšími nástrojovými materiály jsou keramika, kubický nitrid boru a diamant buď v přírodní nebo syntetické formě. Tyto materiály mají vysokou tvrdost a velkou odolnost proti otěru, zato ale malou houževnatost. Jednotlivé materiály jsou podrobněji popsány níže.

3.1 Rychlořezná ocel (RO)

Jedná se o ocel s malým obsahem uhlíku, do které jsou jako hlavní přísadové prvky přidávány: wolfram, chrom a vanad v různém poměru. Další přísadové prvky pak mohou být molybden a kobalt. Rychlořezné oceli se značí 19 XXX podle procentuálního obsahu jednotlivých přísadových prvků.

Rychlořezná ocel, jak už bylo řečeno, má vysokou houževnatost. Bohužel však má malou odolnost proti opotřebení, tvrdost a teplotní odolnost zhruba do 500°C. Je poměrně laciná na výrobu a proto má stále vysoké zastoupení ve využívaných nástrojových materiálech ve strojírenství. Z rychlořezné oceli se vyrábějí monolitní nástroje a tvarově složitě speciální nástroje, které se mohou ještě povlakovat metodou PVD (physical vapour deposition) pro zlepšení jejich vlastností.

3.2 Slinuté karbidy (SK)

Slinutý karbid je materiál, který se skládá z více složek, a to z karbidů tvrdých materiálů jako jsou karbid wolframu, karbid titanu, karbid tantalu a karbid niobu, a pojiva. Jako nejčastější pojivo se používá kobalt. Dohromady tyto složky dávají vyváženou kombinaci mezi tvrdostí a houževnatostí. Slinuté karbidy se vyrábějí práškovou metalurgií následujícím postupem: nejdříve se vyrobí prášek (různý poměr karbidů a pojiva), poté se prášek slisuje na tvar polotovaru, následně je prášek slinován (spékán) a poté se jednotlivé polotovary tvarují na konečný tvar. Dále se slinutý karbid může ještě povlakovat pro zlepšení konečných vlastností. [6]

Jelikož výroba slinutých karbidů je poměrně drahá, vyrábí se ze SK monolitní nástroje pouze výjimečně a materiál se spíše používá pro výrobu vyměnitelných břitových destiček (VBD), které se připevňují do těles nástrojů vyrobených z lacinějšího materiálu.

Mezi výhody slinutých karbidů patří velká tvrdost, pevnost, vysoká teplotní odolnost (až 900°C), odolnost proti opotřebení a použitelnost za vyšších řezných rychlostí oproti rychlořezné oceli. Naopak SK jsou drahé na výrobu, nemají velikou houževnatost, a proto špatně snáší rázy.

Za účelem zlepšení vlastností nástrojů ze slinutých karbidů, zejména trvanlivosti, se na ně nanáší povlaky metodou CVD (chemical vapour deposition). Nanášení povlaků je v této době už běžné a nástroje bez povlaků jsou spíše výjimečné. Mezi nejpoužívanější materiály na povlaky patří: nitrid titanu (TiN), karbid titanu (TiC), oxid hlinitý (Al₂O₃) a karbonitrid titanu (TiCN).

Slinuté karbidy se dále dělí do skupin podle normy ISO 513, která nestanovuje přesné chemické složení jednotlivých skupin slinutých karbidů, nýbrž je dělí do skupin podle vhodnosti jeho použití. Tedy dělí slinuté karbidy do skupin označovaných písmeny: P (vhodné pro obrábění ocelí), M (vhodné pro obrábění korozivzdorné oceli), K (vhodné pro obrábění litiny), N (vhodné pro obrábění neželezných kovů), S (vhodné pro obrábění žáruvzdorných slitin nebo superslitin na bázi Ni, Ti), H (vhodné pro obrábění ocelí s vysokou pevností nad 1500 MPa). V těchto skupinách jsou dále slinuté karbidy ještě číselně označovány. Tyto čísla udávají poměr mezi houževnatostí a tvrdostí - čím menší číslo, tím menší houževnatost a větší tvrdost.[12]

Slinuté karbidy jsou v současné době nejvíce využívaným materiálem ve strojírenství, a to díky svým poměrně dobrým vlastnostem a přijatelné ceně.

3.3 CERMET

Název cermet vznikl spojením dvou slov a to: CERamic a METal. Jak název napovídá, jedná se o materiál, kde základ tvoří tvrdé keramické částice a jsou spojeny kovovým pojivem. Tvrdá složka je zpravidla tvořena karbidem titanu (TiC), karbonitridem titanu (TiCN) nebo nitridem titanu (TiN). Lze tedy říci, že cermety jsou slinuté karbidy zhotovené na bázi titanu místo wolframu. Cermety se z počátečního křehkého stádia díky vývoji výrobních technologií vyvinuly a mají tak větší houževnatost. Mají vysokou odolnost proti opotřebení, vysokou chemickou stabilitu a tvrdost za tepla.

Cermety se používají zejména při dokončovacích operacích, jelikož se prosazují spíše při velkých řezných rychlostech, malých posuvech a hloubkách řezu. Používají se spíše u obrábění, kde jsou nejdůležitějšími kritérii přesnost rozměrů a jakost obrobeného povrchu. Na hrubovací operace se nepoužívají z důvodu příliš malé pevnosti a houževnatosti břitů.

3.4 Řezná keramika (ŘK)

Řezná keramika je materiál, pro který je charakteristická velká tvrdost, odolnost proti opotřebení a velmi nízká tepelná vodivost. Vyznačuje se také svojí vysokou trvanlivostí, vhodností použití při vysokých řezných rychlostech a teplotní odolností až do 1200°C. Oproti tomu mezi její nevýhody patří velká křehkost, nízká houževnatost, vysoká výrobní cena, špatná snášenlivost teplotních šoků a nutnost vysoce výkonných a tuhých strojů k jejímu použití.[13]

Norma ISO 513 dělí dále keramiku na 4 skupiny, a to podle jejího složení:

- CA - čistá oxidická keramika (skládá se z 99% z Al_2O_3)
- CM - směsná oxidická keramika (obsahuje 20-40% TiC nebo TiN)
- CN - nitridová keramika (dvousložkový materiál skládající se z krystalů nitridu křemíku Si_3N_4 a pojiva)
- CC - povlakovaná řezná keramika (nanášení povlaku z TiN nebo TiCN metodou CVD)[12]

3.5 Kubický nitrid bóru (KNB)

Je to syntetický materiál vyznačující se svojí extrémní tvrdostí, a to i při velmi vysokých teplotách (až 2000°C) a výbornou odolností proti opotřebení. KNB je houževnatější než ŘK, ale nemá tak výbornou teplotní odolnost. Jednou z největších nevýhod tohoto materiálu je velice vysoká výrobní cena.

Proto se tento materiál používá buď ve formě vyměnitelných břitových destiček, ale častěji pouze jako špička vyměnitelné břitové destičky, která se připájí na VBD ze SK.

KNB se používá pouze pro obrábění velmi tvrdých materiálů, jako jsou kalené oceli, litiny, žáruvzdorné slitiny apod. Při použití KNB na „měkké“ materiály dochází k velkému opotřebení. [13] [6]

3.6 Polykrystalický diamant (PKD)

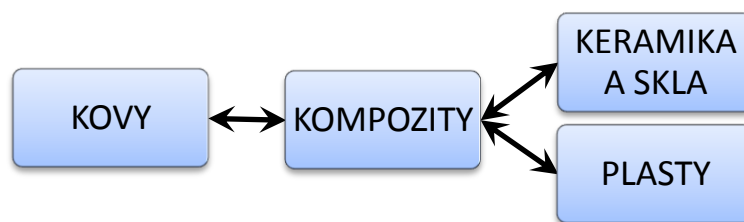
PKD je syntetický materiál, který se svými vlastnostmi zejména pak vysoce extrémní tvrdostí, vynikající odolností proti abrazivnímu opotřebením, tepelnou vodivostí, vyrovnává diamantu přírodnímu. Mezi největší nevýhody tohoto materiálu patří afinita k železným kovům, tepelná odolnost (maximálně 700°C) a velmi vysoká výrobní cena.

PKD se vyrábí slinováním diamantových zrn a kobaltového pojiva. Dodává se buď ve formě VBD nebo pouze jako špička VBD stejně jako u KNB. Další možnost jeho dodání je ve formě tenkého (0,5-1mm) povlaku na VBD ze SK.

PKD se využívá zejména na obrábění velice abrazivních materiálů jako jsou: slinuté karbidy, kámen, keramika, slitiny mědi, kompozity a jiné. Výjimku tvoří právě železné kovy. Největší využití má PKD však ve formě brousících nástrojů.[13]

4 Materiály ve strojírenství

Konstrukční materiály je možné rozdělit do čtyř skupin, viz obrázek 5. Pro každou skupinu jsou charakteristické jiné vlastnosti a jiné výrobní a zpracovatelské technologie.[14]



Obrázek 5 - Základní rozdělení konstrukčních materiálů[14]

4.1 Kovy

Charakteristickými znaky pro kovové materiály jsou vysoké moduly pružnosti, možnost tepelného zpracování a možnost zpevnění materiálu legováním. Mezi jejich výhody patří vysoká houževnatost, dobrá tvářitelnost a také elektrická a tepelná vodivost. Mezi jejich nevýhody patří malá korozní odolnost.

Jelikož se čisté kovy pro praktické použití příliš nehodí kvůli jejich nízké pevnosti a tvrdosti, využívají se jen tehdy, když chceme využít jejich významné fyzikální vlastnosti, např. elektrickou vodivost. Proto přidáním dalších prvků do taveniny zlepšujeme vlastnosti kovu. Tyto kovy se pak nazývají slitiny. Prvky přidávané do taveniny se dělí na doprovodné prvky, to jsou prvky, které souvisí s chemickým složením použitých surovin a na prvky přísadové, někdy také nazývané legující prvky. Tyto prvky jsou do taveniny přidávány cílevědomě kvůli zlepšení vlastností kovu.

Jako základní surovinu pro slitiny považujeme surové železo, které se vyrábí ze železné rudy ve vysoké peci. Surové železo se nehodí na přímou výrobu součástek a proto se upravuje jeho chemické složení dalšími výrobními pochody.[14]

Jednu z nejdůležitějších rolí hraje ve složení kovu uhlík. Podle jeho obsahu dělíme slitiny na tři skupiny:

1. Chemicky čisté železo s obsahem uhlíku do 0,02%. Je měkké dobře svařitelné a tvárné, ale v praxi moc nevyužívané kvůli své malé pevnosti.
2. Oceli - obsah uhlíku do 2,11% + další doprovodné a přísadové prvky. Oceli jsou vysoce využívaným materiálem díky svým mechanickým vlastnostem. Oceli se dále dělí na oceli k tváření a oceli na odlitky. Tyto dvě skupiny se dále dělí na oceli konstrukční a nástrojové.
3. Litiny - obsahují více jak 2,11% uhlíku. Používají se na výrobu odlitků. Litiny dělíme na dvě základní skupiny a to podle tvaru způsobu vyloučení uhlíku:
 - a) Litiny grafitické, ve kterých je převážná většina uhlíku vyloučena jako volný uhlík - grafit. Podle tvaru grafitu se tyto litiny dále dělí na litiny s lupínkovým grafitem, červíkovitým grafitem a kuličkovým grafitem.
 - b) Litiny karbidické (bílé), ve kterých je většina uhlíku vázaná ve formě karbidů přísadových prvků. Tato litina má vysokou tvrdost, ale bohužel i křehkost.[14]

4.1.1 Vlastnosti kovů a slitin

Každý materiál má své specifické vlastnosti, které zpravidla závisí na jeho stavu. Stav materiálu je charakterizován podle jeho výsledné struktury a způsobu zpracování.

Vlastnosti materiálu se dělí na: fyzikální, mechanické, chemické a technologické. Tyto vlastnosti jsou pro nás důležité z hlediska posouzení technického využití materiálu a správné volby následné výroby výrobků z těchto materiálů.

1. Fyzikální vlastnosti - jsou projevem vnitřní stavby materiálu, např.: hustota, tepelná vodivost, elektrické a magnetické vlastnosti, teplotní délková roztažnost a další.
2. Chemické vlastnosti - mezi chemické vlastnosti se řadí např.: korozní odolnost, tepelná odolnost nebo žáruvzdornost. Jsou to vlastnosti, které závisí na chemickém složení materiálu.
3. Mechanické vlastnosti - tyto vlastnosti se zkoumají za působení vnějších faktorů např. tahovými zkouškami na zkušebních strojích. Zkoumá se vztah mezi mechanickým namáháním a odporem, který určitý materiál vyvodí vůči tomuto namáhání.

4. Technologické vlastnosti - jsou souhrn určitých fyzikálních, chemických a mechanických vlastností. Jejich základní veličina není přesně definována. Vyjadřují se jako porovnatelné ukazatele komplexního charakteru a umožňují porovnání adekvátnosti materiálu pro určitý technologický proces. Nejdůležitější technologické vlastnosti jsou:
- a) slévatelnost - udává míru vhodnosti materiálu k výrobě kvalitních odlitků.
 - b) tvařitelnost - udává schopnost materiálu snášet deformaci způsobenou vnějšími vlivy, než se naruší celistvost materiálu.
 - c) svařitelnost - schopnost materiálu za určených podmínek vytvořit spoj s náležitými podmínkami. [14]
 - d) obrobiteľnosť - môže byť definovaná jako souhrn vlastností materiálu, které mají vliv na průběh procesu obrábění daného materiálu konkrétním způsobem obrábění. Laicky řečeno: Jak jednoduché, popřípadě jak složité je daný materiál obrábět. [6]

4.2 Plasty

Plasty jsou materiály tvořené makromolekulárními látkami neboli polymery, které se výrazně podílí na určování vlastností plastů. Při výrobě plastů se používají i další složky jako jsou např.: stabilizátory, změkčovadla, pigmenty a jiné. Tyto složky jsou označovány jako přísady. Plasty jsou charakteristické svým nízkým modulem pružnosti. Na druhou stranu jsou poměrně pevné a velice lehké například oproti kovům. Jsou odolné proti korozi a mají nízký koeficient tření.

Plasty lze rozdělit ze dvou hledisek. Podle jejich původu nebo podle jejich chování v závislosti na teplotě.

Podle původu:

- a) Plasty z kondenzačních produktů
- b) Plasty z polymerizačních produktů
- c) Plasty z přírodních produktů

Podle chování v závislosti na teplotě:

- a) Termoplasty (plastomery) - tyto plasty jsou specifické tím, že za působení tepla změkknou a lze je různě tvarovat. Po ochlazení se jim vrátí svoje původní tvrdost. To vše probíhá bez jakékoliv změny vlastností materiálu. Tento proces je možné neustále opakovat.
- b) Reaktoplasty (durometry) - Tento typ plastů se naopak teplem vytvrzuje. Plasty lze vytvrzovat jak za vysokých teplot, tak i za teplot okolních. Po jejich vytvrzení se plast stane netavitelným a nerozpustným. Do této skupiny patří i elastomery, což jsou přírodní a syntetický kaučuk.

V současné době se plasty nejvíce používají v chemickém a potravinářském průmyslu. Mají své uplatnění i v dopravním průmyslu a při výrobě potrubí a armatur.[14]

4.3 Kompozity

Kompozity jsou takové materiály, které se skládají alespoň ze dvou chemicky odlišných složek. Tyto složky mají zpravidla odlišné i fyzikální a mechanické vlastnosti. Jednotlivé složky se nazývají buď výztuž (složka nespojitého charakteru, která je tvrdší a tužší) nebo matrice (složka spojitá a poddajnější, která má funkci pojít výztuž dohromady).

Kompozity lze rozdělit podle povahy matrice, a to na kompozity s kovovou maticí, kompozity s maticí polymerovou nebo kompozity s keramickou maticí.

Tento materiál má v současné době velkou perspektivu z hlediska používání v technice, jelikož je schopen splňovat spoustu protichůdných požadavků. Bohužel jsou ale poměrně drahé.[14]

4.4 Keramika

Keramiku lze definovat jako směs skládající se z anorganických nekovových materiálů, která je vytvářena slinováním za vysokých teplot. Její předností jsou: vysoký modul pružnosti, vysoká tuhost, tvrdost a odolnost proti opotřebení. Má také velkou teplotní a korozní odolnost. Bohužel tento materiál je velmi křehký, těžko snáší teplotní šoky a má malou houževnatost. I přesto je poměrně využívaným materiálem ve strojírenství.[14]

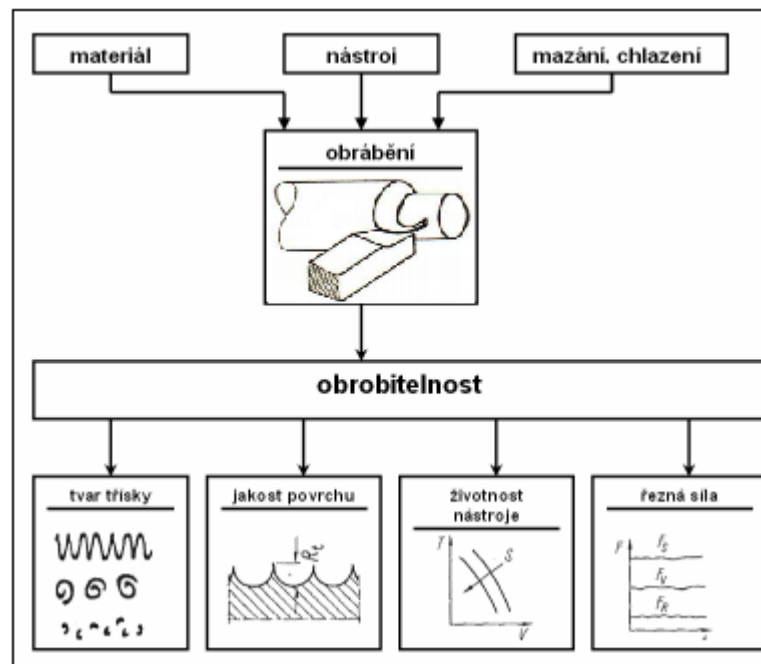
5 Obrobitelnost

Jak už bylo řečeno výše, obrobitelnost je jedna z technologických vlastností materiálů, která není přesně definována a vymezena.

Můžeme jí definovat více způsoby, a to:

- „souhrn vlastností obráběného materiálu z hlediska jeho vhodnosti pro výrobu součástí konkrétním způsobem obrábění.“ [6]
- „Obrobitelnost materiálu vyjadřuje souhrnný vliv fyzikálních vlastností a chemického složení obráběného materiálu na průběh procesu řezání a na ekonomické, popřípadě i kvalitativní výsledky procesu řezání.“ [15]
- „Obrobitelnost je souhrn vlastností materiálu, které mají vliv na průběh a výsledky procesu obrábění. Pojem obrobitelnost zahrnuje v sobě vlastnosti obráběného materiálu, řezné podmínky a požadavky kladené na vlastnosti obrobku“ [14]

Obrobitelnost nezáleží vždy jen na materiálu obrobku, nýbrž jde o vzájemné působení materiálu nástroje a obrobku.[16]



Obrázek 6 - Hlavní parametry charakterizující obrobitelnost[16]

Obrobitelnost závisí na mnoha dalších parametrech, které ji ovlivňují. Nejdůležitější z nich jsou:

- způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu
- mikrostruktura obráběného materiálu
- chemické složení obráběného materiálu
- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu
- metoda obrábění
- pracovní prostředí
- geometrie nástroje
- řezné podmínky
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu[17]

5.1 Hodnocení obrobitelnosti

Při vyhodnocování obrobitelnosti vždy porovnáváme materiál hodnocený s materiálem jiným (etalonovým), který byl obráběn za stejných řezných podmínek.

K vyhodnocování obrobitelnosti můžeme použít vícero kritérií jako jsou: velikost opotřebení řezného nástroje, velikost teploty při řezném procesu, drsnost obrobené plochy, tvar třísky, velikost řezných sil, potřebný výkon při obrábění a jiné. [5]

Jelikož pojem obrobitelnost není jednoznačně definovatelný z důvodu různorodosti operací obrábění, kontinuálního vývoje a zlepšování řezných nástrojů, vždy se bude jednat o porovnání s jiným materiálem. Avšak přesnější by bylo sestavení všech vlastností obrobku ovlivňující obrobitelnost (metalurgie, chemie, mechanika, tepelné zpracování, legující přísady, vměstky) do porovnávací tabulky a následný zpracovatel by si na základě těchto údajů provedl vlastní vyhodnocení obrobitelnosti. Tato metoda by byla velice náročná a pracná, ale mnohem přesnější.[6]

Nejčastěji používaným kritériem pro hodnocení obrobitelnosti je míra opotřebení nástroje. Při zkoušce se určuje buď řezná rychlost pro stanovenou trvanlivost ostří nástroje $-V_T$ [m/min.] nebo trvanlivost nástroje pro stanovenou řeznou rychlost T_V [min.] .[18]

Materiály používané ve strojírenství byly pro potřeby vyhodnocování obrobiteľnosti rozděleny do celkem devíti základních skupin a jsou označovány malými písmeny:

- a - litiny
- b - oceli
- c - těžké nezelezné kovy (měď a slitiny mědi)
- d - lehké nezelezné kovy (hliník a jeho slitiny)
- e - plastické hmoty
- f - přírodní nerostné hmoty
- g - vrstvené hmoty
- h - pryže
- v - tvrzené litiny pro výrobu válců.

V každé z těchto devíti skupin je vždy stanoven jeden konkrétní materiál jako etalonový. Ve vztahu k tomuto materiálu je pak určována relativní obrobiteľnost všech ostatních materiálů dané skupiny. [5]

Ve skupině litin je etalonem materiál 42 2420 - litina s lupínkovým grafitem. Ve skupině ocelí je etalonovým materiálem normalizačně žíhaná ocel 12 050.1. Ve skupině těžkých nezelezných kovů je etalonem materiál 42 3212.21 a pro skupinu lehkých nezelezných kovů je etalonovým materiálem 42 4380.11.

Materiály v každé z těchto skupin jsou dále děleny do tříd, které se označují číslem umístěným před písmenem, a to na základě indexu obrobiteľnosti daného tímto vztahem:

$$i_0 = \frac{V_{cT15}}{V_{cT15\ et}} [-] \quad (2)$$

V_{cT15} - řezná rychlost při trvanlivosti 15 min. pro hodnocený materiál [m/min.].

$V_{cT15\ et}$ - řezná rychlost při trvanlivosti 15 min. pro etalonový materiál [m/min.].

Střední hodnota indexu obrobiteľnosti je odstupňována geometrickou posloupností s kvocientem $q = 10^{1/10} = 1,26$ (třída etalonových materiálů má vždy hodnotu $q=1$). Z toho vyplývá, že hodnota řezné rychlosti v_{cT} je v dané třídě vždy 1,26-krát vyšší nebo nižší, než hodnota řezné rychlosti v_{cT} v třídě sousední. Materiály v třídách s nižšími čísly než má etalonový materiál mají obrobiteľnost horší než etalonový materiál.

Materiály s číslem vyšším než má etalonový materiál mají obrobiteľnosť lepšiu než etalonový materiál. Dĕlení skupin materiálov a - d na triedy, vĕtne hodnot indexu obrobiteľnosti i_0 , je podrobneji ukázáno v nasledujúcej tabuľke: [5]

Index obrobiteľnosti i_0			Materiál			
Vyjádrené kvocientem	Stred	Rozsah	Litiny	Oceli	Slitiny	
					mĕdi	hliníku
$1,26^{-13}$	0,050	0,045÷0,054		1b		
$1,26^{-12}$	0,065	0,055÷0,069		2b		
$1,26^{-11}$	0,080	0,070÷0,089		3b		
$1,26^{-10}$	0,10	0,09÷0,11	1a	4b		
$1,26^{-9}$	0,13	0,12÷0,14	2a	5b	2c	
$1,26^{-8}$	0,16	0,15÷0,17	3a	6b	3c	
$1,26^{-7}$	0,20	0,18÷0,22	4a	7b	4c	
$1,26^{-6}$	0,25	0,23÷0,28	5a	8b	5c	4d
$1,26^{-5}$	0,32	0,29÷0,35	6a	9b	6c	5d
$1,26^{-4}$	0,40	0,36÷0,44	7a	10b	7c	6d
$1,26^{-3}$	0,50	0,45÷0,56	8a	11b	8c	7d
$1,26^{-2}$	0,63	0,57÷0,71	9a	12b	9c	8d
$1,26^{-1}$	0,80	0,72÷0,89	10a	13b	10c	9d
$1,26^0$	1,00	0,90÷1,12	11a	14b	11c	10d
$1,26^1$	1,26	1,13÷1,41	12a	15b	12c	11d
$1,26^2$	1,59	1,42÷1,78	13a	16b	13c	12d
$1,26^3$	2,00	1,79÷2,24	14a	17b	14c	13d
$1,26^4$	2,50	2,25÷2,82		18b	15c	14d
$1,26^5$	3,15	2,83÷3,55		19b		15d
$1,26^6$	4,00	3,56÷4,47		20b		16d

Obrázek 7 - Rozdĕlení materiálov do tried obrobiteľnosti[5]

5.2 Metody zkoušení obrobiteľnosti

Zkoušky obrobiteľnosti se dĕlí podle doby trvání, a to na:

- Dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti
- Krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti - tyto zkoušky se dále dĕlí podle metody zkoušení na:
 - přímé metody
 - nepřímé metody[17]

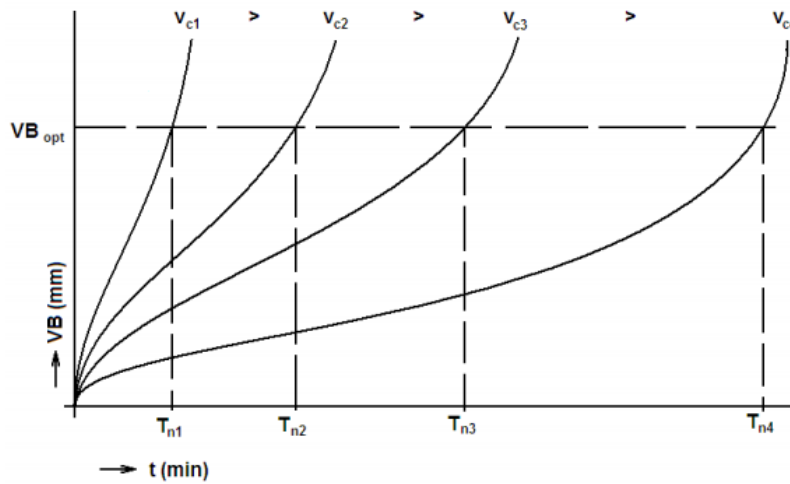
5.2.1 Dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti

Hlavním parametrem při této zkoušce je hodnota řezné rychlosti. Zkouška se provádí buď soustružením nebo frézováním za předem určených konstantních řezných parametrů, určeným druhem řezného nástroje a jeho geometrií a více odstupňovanými řeznými rychlostmi až do optimálního otupení břitu.

Tato zkouška se považuje jako základní a posuzuje se podle ní míra objektivity ostatních zkoušek obrobiteľnosti. Nevýhodou této zkoušky je však časová náročnost zkoušky a velká spotřeba obrábĕného materiálu. [17]

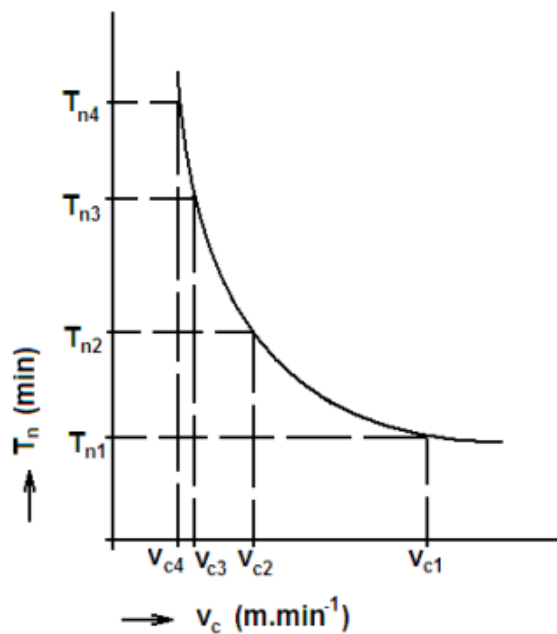
Níže je popsán průběh dlouhodobé zkoušky obrobitelnosti:

1. Změří se časový průběh opotřebení na hřbetu nástroje VB_B pro několik hodnot řezných rychlostí při konstantních řezných parametrech ($f=\text{konst.}$; $a_p=\text{konst.}$) a sestrojí se křivky otupení. Viz obr. 8. [17]



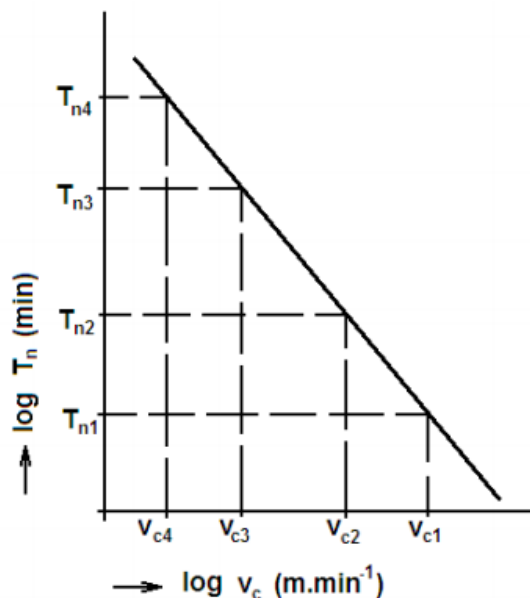
Obrázek 8 - Křivky otupení při různých řezných rychlostech[17]

2. Určí se kritérium opotřebení VB_{opt} a tím se stanoví odpovídající trvanlivost břitu pro každou řeznou rychlost. Viz obr. 9.[17]



Obrázek 9 - Stanovení jednotlivých trvanlivostí na základě kritéria opotřebení[17]

3. Sestrojí se závislost $T_n = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích. Poté je možné určit index obrobitelnosti pro vybranou trvanlivost nástroje při srovnání řezných rychlostí zkoumaného a etalonového materiálu. Naměřené hodnoty se převádějí do logaritmických souřadnic kvůli jednoduššímu odečítání hodnot trvanlivosti, jelikož po zlogaritmování se křivka závislosti stane přímkou. [17]



Obrázek 10 - Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti[17]

5.2.2 Krátkodobé zkoušky obrobitelnosti

Tyto zkoušky jsou vhodné pro rychlé rozřídění nových materiálu podle stupně obrobitelnosti nebo pro ověření možné změny stupně obrobitelnosti u jednotlivých dodávek stejného druhu materiálu nebo pro rychlé určení relativního stupně obrobitelnosti u nově vyvíjených materiálů.

Tyto zkoušky jsou sice nesrovnatelně rychlejší a úspornější na materiál oproti dlouhodobým zkouškám, avšak na úkor objektivnosti a spolehlivosti zkoušky.[17]

Krátkodobé zkoušky se dále dají rozdělit podle principu a použitého kritéria na přímé a nepřímé metody. Přímé metody jsou založeny na zjišťování intenzity opotřebení nástroje za smluvně daných podmínek. Nepřímé metody vycházejí z předpokládaného vztahu mezi charakteristickými parametry řezného procesu a opotřebením břitu nástroje.[19]

Přímé metody:

- čelní zkouška
- mikrozkouška trvanlivosti
- snížení míry opotřebení
- použití nástroje se sníženou řezivostí
- zvýšení řezné rychlosti

Nepřímé metody:

- dynamická zkouška (měření řezných sil)
- měření tvrdosti obrobku
- mikrometrická metoda
- porovnání tvaru třísky
- Leyensetterova metoda
- vrtání při konstantním zatížení
- měření teploty při řezání
- měření hloubky zpevněné vrstvy

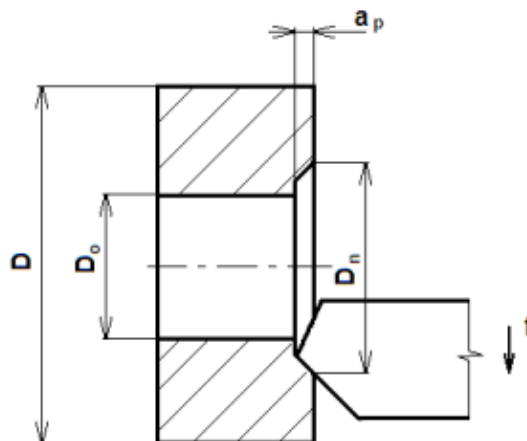
5.2.2.1 Přímé metody

Čelní zkouška: Spočívá v soustružení mezikruží z průměru D_0 na průměr D na čele součásti ze zkoumaného materiálu. Zkouška se provádí při konstantních otáčkách, posuvu a hloubce třísky. S rostoucím obráběným průměrem roste i řezná rychlost. Cílem této zkoušky je změřit na jakém průměru D_n a při jaké řezné rychlosti dosáhl nástroj předem stanovené hodnoty opotřebení. Kritériem této zkoušky je pak porovnání řezné rychlosti zkoumaného materiálu a řezné rychlosti dosažené při obrábění stejnou metodou materiálu etalonového. Nevýhodou této výroby je nutnost výroby obrobku s velikým poměrem průměru k délce.[17]

$$i_o = \frac{v_{czk}}{v_{cet}} \quad (3)$$

v_{czk} - řezná rychlost zkoumaného materiálu[m/min]

v_{cet} - řezná rychlost etalonového materiálu [m/min]



Obrázek 11 - Schéma čelní zkoušky[17]

Mikrozkouška obrobiteľnosti: Tato zkouška je použitelná pouze u nástrojů, které mají lapované funkční plochy. Tím dosáhneme výrazného snížení opotřebení v počáteční fázi obrábění a lze rychle získat hodnoty pro sestavení závislosti $T_n=f(v_c)$, a to při malé spotřebě materiálu. Vychází se z hodnoty otupení na hřbetu nástroje $VB_B=0,1\text{mm}$. [17]

Zkouška za snížené míry opotřebení: Tato zkouška je založena na dlouhodobé zkoušce obrobiteľnosti a vychází z ní. Obrábí se tedy za stejných podmínek jako při dlouhodobé zkoušce, avšak pro snížení časové náročnosti se volí kritérium obrobiteľnosti v_{c5} . To znamená, že se obrábí pouze 5 minut. A mezní míra opotřebení je pouze 0,1 až 0,25 mm. Tím se dosáhne krátkodobosti zkoušky, bohužel však na úkor objektivnosti hodnocení indexu obrobiteľnosti. [17]

Snížení řezivosti nástroje: Tato zkouška opět vychází z dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti. Její podstatou je snížení řezivosti nástroje vhodným tepelným zpracováním a dosažení tím rychlejšího opotřebování nástroje za stejných řezných podmínek. Tím se opět dosáhne krátkodobosti zkoušky. Další možností je úprava břitu nástroje snížením úhlu špičky a břitu. [19]

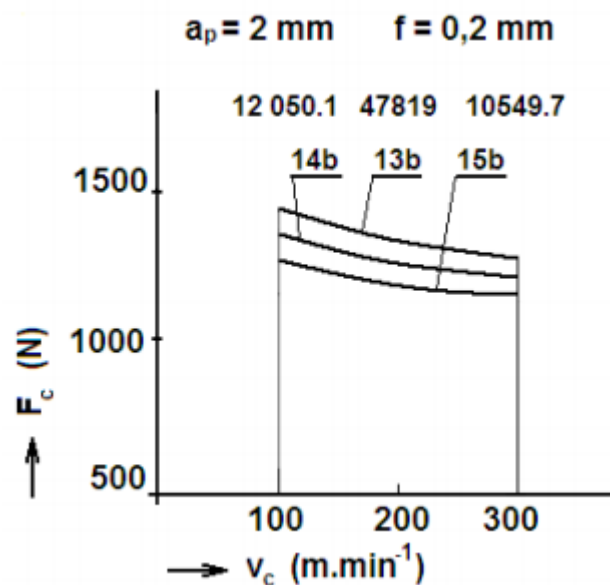
Zvýšení řezné rychlosti: Zkouška opět vychází z dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti, ale její podstatou je zvýšení řezné rychlosti a dosažení tak snížení trvanlivosti nástroje a krátkodobosti zkoušky. Závislost $T_n=f(v_c)$ se extrapoluje do nižších hodnot k vyšším. [19]

5.2.2.2 Nepřímé metody

Dynamická zkouška: je založena na teoreticky dokázaném a experimentálně potvrzeném faktu, že houževnatější materiál (z hlediska obrobitelnosti) při naprosto stejných řezných podmínkách i ostatních parametrech procesu řezání klade větší měrný řezný odpor.

Podstatou této zkoušky je stanovení závislosti řezné síly F_c na řezné rychlosti v_c a porovnání hodnot zkoumaného materiálu s předem důkladně otestovaným etalonovým materiálem dlouhodobou zkouškou obrobitelnosti. Závislost pasivní a posuvové složky řezné síly se z důvodu malé významnosti neuvádějí.

Na obrázku 12 je vidět příklad závislostí F_c na v_c při podélném soustružení za striktně dodržovaných parametrů a technologických podmínek.[17]



Obrázek 12 - Závislost řezné síly na řezné rychlosti při podélném soustružení[17]

Měření tvrdosti obrobku: Tato zkouška spočívá ve vtlačování kužele z tvrdokovu do zkoumaného materiálu a poté do etalonového materiálu a měří se průměr vtisku. Poté se určí index obrobitelnosti vztahem:

$$i_o = \frac{d_e}{d_{zk}} \quad (4)$$

d_e - průměr vtisku do etalonového materiálu[mm]

d_{zk} - průměr vtisku do zkoumaného materiálu[mm]

Výhodou této metody je možnost využití klasických tvrdoměrů a nenáročnost na velikost zkoumaného a etalonového materiálu.[17]

Mikrometrická metoda: Tato metoda spočívá v porovnávání řezných rychlostí zkoumaného a etalonového materiálu při totožných hodnotách drsnosti povrchu. Je pouze metodou doplňkovou a kvůli její velké neobjektivnosti ji nelze použít jako samostatné kritérium.[19]

Porovnání tvaru třísky: Stejně jako metoda předchozí je tato metoda pouze doplňková a nelze ji použít samostatně. Spočívá v porovnávání tvaru a druhu třísky materiálu zkoumaného a etalonového vyrobených za stejných řezných podmínek. Měří se například poloměr svinutí třísky nebo koeficient pěchování třísky.[17]

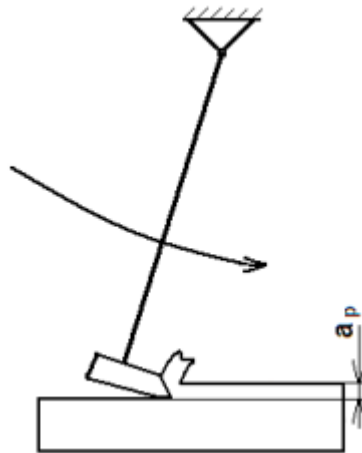
Leyensetterova metoda: Tato metoda je založena na principu Charpyho kladiva. Na kyvadle upevněném ve stanovené výšce je připevněn nůž, který po spuštění kyvadla do vzorku vyryje žlábek. Index obrobitelnosti se poté stanoví jako poměr délky žlábků ve zkoumaném a etalonovém materiálu. [17]

Vztah pro určení indexu obrobitelnosti je tedy:

$$i_o = \frac{a_{pzk}}{a_{pet}} \quad (5)$$

a_{pzk} - hloubka vniknutí nože do zkoumaného materiálu[mm].

a_{pet} - hloubka vniknutí nože do etalonového materiálu[mm].



Obrázek 13 - Schéma funkce Leysetterovi metody [17]

Metoda vrtání při konstantním zatížení: Metoda spočívá v měření času vrtání do konstantní hloubky při zvolené řezné rychlosti a průměru vrtáku. Kritériem pro stanovení hodnoty obrobiteľnosti je buď čas vrtání nebo hodnota posuvu. Pro vyloučení vlivu příčného ostří se zkouška provádí do předvrtaných otvorů. Čím vyšší dosažený posuv nebo nižší čas při konstantních podmínkách, tím je obrobiteľnost materiálu lepší. Výhodou této zkoušky je malá časová náročnost.

Metoda měření teploty při řezání: Tato metoda, jak vyplývá z názvu, spočívá v měření střední teploty dosažené při řezném procesu na zkoumaném a etalonovém materiálu při stejných pracovních podmínkách. [19]

Tato metoda určování stupně obrobiteľnosti se vyznačuje vysokým stupněm objektivity, avšak nevýhodou je její použitelnost vždy jen pro jednu skupinu materiálů (např.: uhlíkové oceli, slitiny hliníku a jiné).[17]

Zkouška se provádí vždy při konstantních řezných parametrech buď metodou přirozeného termočlánku nebo pomocí termodu, a to kvůli vyloučení vlivů chemického složení zkoumaných materiálů. [19] Zkoušku je vhodné provádět při konstantních hodnotách hloubky třísky a posuvu a alespoň při třech různých řezných rychlostech. Čím menší teplota při řezném procesu, tím lepší stupeň obrobiteľnosti má zkoumaný materiál. [17]

Index obrobiteľnosti se pak stanoví ze vztahu:

$$i_o = \frac{\theta_{zk}}{\theta_e} \quad (6)$$

θ_{zk} - Střední teplota zkoumaného materiálu [°C]

θ_e - Střední teplota etalonového materiálu [°C]

Měření hloubky zpevněné vrstvy: Tato metoda spočívá v měření mikrotvrdostí zpevněné vrstvy těsně pod obrobeným povrchem a porovnáváním naměřených hodnot mezi etalonovým a zkoumaným materiálem.[17]

Index obrobiteľnosti se určí vztahem:

$$i_o = \frac{HM_e}{HM_{zk}} \quad (7)$$

HM_e - hloubka zpevněné vrstvy etalonového materiálu [μm]

HM_{zk} - hloubka zpevněné vrstvy zkoumaného materiálu [μm]

5.3 Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů

Při obrábění těžkoobrobitelných materiálů vzniká velké napětí a následná deformace v oblastech primární plastické deformace, potažmo i v místě kontaktu třísky s čelem nástroje, a tím vzniká i velké množství tepelné energie v těchto oblastech. Za zvýšeného mechanického a tepelného namáhání břitu nástroje a vlivem tvrdých částic ve struktuře obráběného materiálu dochází k výraznému zvětšení opotřebení nástroje, a tím se i výrazně snižuje jeho trvanlivost. Rozhodující vliv na tvarovou a rozměrovou přesnost, drsnost povrchu a hospodárnost výroby má tedy správně a vhodně zvolený typ nástroje a nástrojového materiálu.[20]

Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů ovlivňuje mnoho činitelů, z nichž nejdůležitější jsou: fyzikální a mechanické vlastnosti, chemické složení, způsob výroby, mikrostruktura materiálu. Tito činitelé bývají často spolu vzájemně vázány a působí hlavně na intenzitu otupování břitu nástroje a na velikost teploty při obrábění. Dále mohou mít vliv na utváření třísky, velikost řezných sil a drsnost obrobeného povrchu.[15]

Z fyzikálních vlastností mají na obrobitelnost největší vliv zejména tvrdost, pevnost, houževnatost, tepelná vodivost a adhezní schopnosti. Vysoká tvrdost má vliv na velikost abrazivního opotřebení nástroje, zato vysoká pevnost má vliv na velikost řezné síly. Nízká tepelná vodivost materiálu může mít za následek nadměrnou koncentraci tepla na břitu a následnou plastickou deformaci břitu a jeho porušení.[15]

Chemické složení obráběného materiálu určuje všechny jeho vlastnosti. Ovlivňuje tak chemickou aktivitu materiálu obrobku k materiálu břitu, která se projevuje vzájemnou adhezí a difúzí slitinových prvků materiálu obrobku do materiálu břitu nástroje, a naopak a schopností tvorby chemických sloučenin při vyšších teplotách.

Jedním z prvků, který nejvíce ovlivňuje obrobitelnost, je uhlík, který tvoří se železem karbid železa nazývaný cementit. Oceli, které mají nízký obsah uhlíku, jsou houževnaté a velmi tažné. Nárůstek vznikající na břitu tedy zhoršuje jakost povrchu. Oceli s obsahem uhlíku 0,2 - 0,3% mají poměrně dobrou obrobitelnost. Při obsahu uhlíku nad 0,3% obrobitelnost opět klesá.

Další prvky ovlivňující obrobiteľnosť: mangan, křemík, síra, fosfor, olovo, chrom, nikl, molybden, wolfram, kobalt, hliník, titan. Tyto prvky podobně jako uhlík ovlivňují obrobiteľnosť buď kladně nebo záporně podle jejich procentuálního obsahu.[15]

6 Praktická část - Zkouška obrobiteľnosti vrtáním při konstantním zatížení

Účelem praktické části mé práce bylo vyhodnocení a porovnání obrobiteľnosti, a to zkouškou obrobiteľnosti vrtáním při konstantním zatížení u dvou různých materiálů. Prvním materiálem byla slitina titanu - Ti6AlV4 a jako druhý materiál byla použita nerezová ocel - 15-5PH. Chemické složení materiálů je detailněji popsáno níže.

6.1 Popis zkoušky

Tato zkouška obrobiteľnosti je založena na měření času nebo velikosti posuvové síly při vrtání do materiálu při konstantním zatížení. Hloubka vrtání je vždy konstantní a předem zvolená, stejně jako řezná rychlost a průměr vrtáku. Zkouška se provádí buď do předvrtaných otvorů nebo se čas měří až po zavrtání vrtáku, aby se vyloučil vliv příčného ostří.

Kritériem pro vyhodnocení obrobiteľnosti je tedy čas nebo velikost posuvové síly. Čím vyšší dosažená posuvová síla nebo kratší čas vrtání při stejných řezných podmínkách, tím je obrobiteľnost lepší.

Výhoda této zkoušky spočívá v tom, že je časově nenáročná.[17]

6.2 Popis měření

Experiment byl prováděn v laboratoři ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Jako obráběcí stroj byla zvolena vrtačko - frézka BF 20 L Vario od výrobce Optimum. Viz obr. 14.



Obrázek 14 - Vrtačko-frézka Optimum

Jako obráběcí nástroj byl zvolen vrták o průměru 4,3 mm ze slinutého karbidu - B221A04300HP KC7315 od německého výrobce Kennametal, který je zachycený na obr. 15



Obrázek 15 - Použitý vrták ze slinutého karbidu

Použité materiály na zkoušku obrobitelnosti byly dva. Slitina titanu - Ti6AlV4 a nerezová ocel 15-5PH. V tabulkách č. 1 a č. 2 je důkladněji popsáno chemické složení obou materiálů.

Tabulka 1 - Chemické složení slitiny titanu Ti6AlV4[21]

Chem. Prvek	Ti	Al	V	Fe	O
Obsah v %	90	6	4	Max. 0,25	Max 0,2

Tabulka 2 - Chemické složení nerezové oceli 15-5PH[22]

Chem. Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Cb	Mo
Obsah v %	0,07	1	1	0,03	0,015	14-15,5	3,5-4,5	2,5-4,5	0,45	0,5

Pro oba materiály byly zvoleny čtyři řezné rychlosti, a to: 5 m/min, 10 m/min, 15 m/min, 20 m/min. Pro každou rychlost jsem vrtal 10 děr do obou materiálů.



Obrázek 17 - Slitina titanu



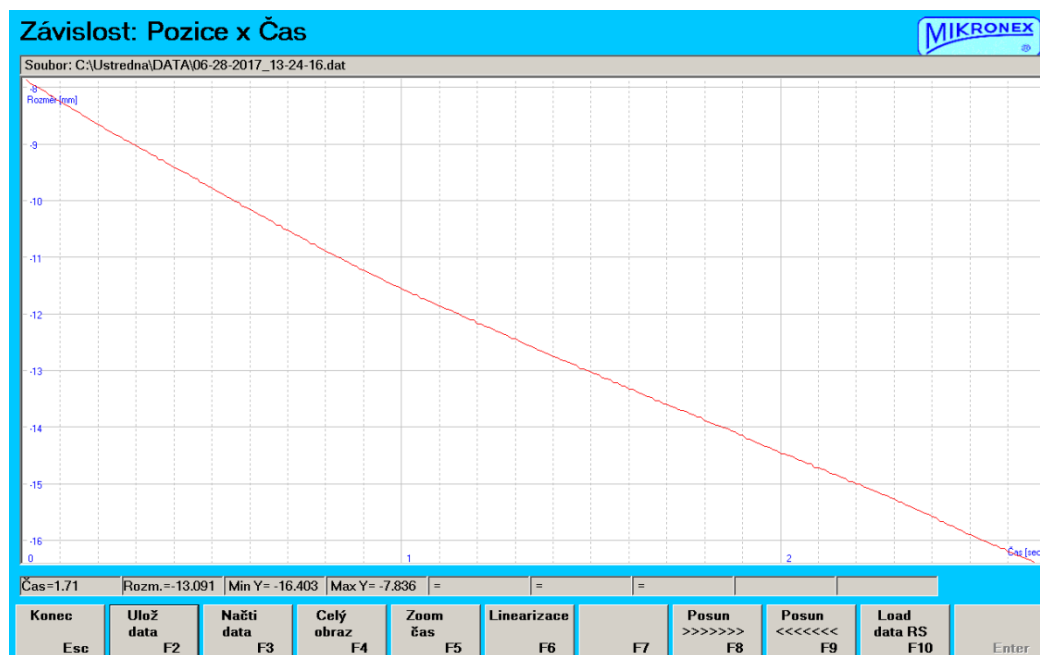
Obrázek 16 - Nerezová ocel

Při vrtání jsem měřil čas vždy na konstantním úseku 8,6mm (odpovídající dvěma průměrům vrtáku) za pomoci měřicí ústředny Mikronex SN 600.X zobrazené na obrázku č. 18. Měření času a úseku vždy probíhalo až po zavrtání vrtáku do hloubky 2mm, aby se odstranily vlivy axiálního ostří.



Obrázek 18 - Měřicí ústředna Mikronex SN 600.X

Tato měřicí ústředna poté převáděla jednotlivé hodnoty do počítače, kde za pomoci programu Mikronex CNC ústředna byly vykreslovány závislosti pozice vrtáku na čase (průběhy vrtání), příklad průběhu vrtání je zobrazen na obrázku č. 19. Vrtání probíhalo za konstantního zatížení 5,5 kg.



Obrázek 19 - Průběh vrtání vykreslený programem Mikronex CNC ústředna

Dále jsem po každých deseti vyvrtaných otvorech kontroloval opotřebení na hřbetě vrtáku za pomoci dílenského mikroskopu s digitálním odměřováním. Viz obr. 20.



Obrázek 20 - Dílenský mikroskop s digitálním odměřováním

Pokud opotřebení překročilo hodnotu 0,1mm nebo pokud byly na průběhu vrtání zaznamenány razantní změny, bylo nutné vrták vyměnit za nový. Avšak této hodnoty jsem nikdy nedosáhl, jelikož při vrtání do nerezové oceli se 3x zlomil vrták, což nastalo v případech řezných rychlostí 5, 15, 20 m/min. Z tohoto důvodu jsem byl nucen vzít pokaždé nový vrták.

Z výsledných časů jsem pro každou rychlost a materiál zvlášť nejrychlejší a nejpomalejší čas vyškrtl a poté zbylé časy zprůměroval do jednoho průměrného času. Dále jsem vypočítal směrodatnou odchylku pomocí programu Microsoft Excel.

Poté jsem si ze vzorce pro výpočet řezné rychlosti:

$$v_c = \frac{\pi * D * n}{1000} \quad (8)$$

vyjádřil a vypočítal otáčky **n**, při kterých byly jednotlivé otvory vyvrtávány.

Tyto otáčky jsem si dosadil do vzorce pro strojní čas:

$$t_{AS} = \frac{l}{n * f_{ot}} \quad (9)$$

z kterého jsem si vyjádřil f_{ot} a po dosazení vypočteného průměrného času za t_{AS} a délky měřeného úseku za l (vždy 8,6mm) jsem byl schopen vypočítat posuv na jednu otáčku f_{ot} .

Dále jsem si vypočtenou hodnotu f_{ot} dosadil do vzorce:

$$f_{ot} = f_z * z \quad (10)$$

ze kterého jsem si vyjádřil posuv na jeden zub f_z , a po dosazení hodnoty 2 (počet zubů vrtáku = 2) za počet zubů z , jsem byl schopen vypočítat hodnotu i tohoto posuvu.

Následovalo vyhodnocení a porovnání obrobitelnosti obou materiálů mezi sebou z hlediska časové náročnosti a velikosti posuvu při jednotlivých řezných rychlostech. Toto vyhodnocení a porovnání je zaznamenáno a popsáno v následující kapitole.

6.3 Vyhodnocení a porovnání.

V následující tabulce jsou zaznamenány průměrně časy se směrodatnou odchylkou pro jednotlivé řezné rychlosti a materiály. Časy jsou uváděny v sekundách.

Tabulka 3 - Průměrné časy vrtání se směrodatnou odchylkou

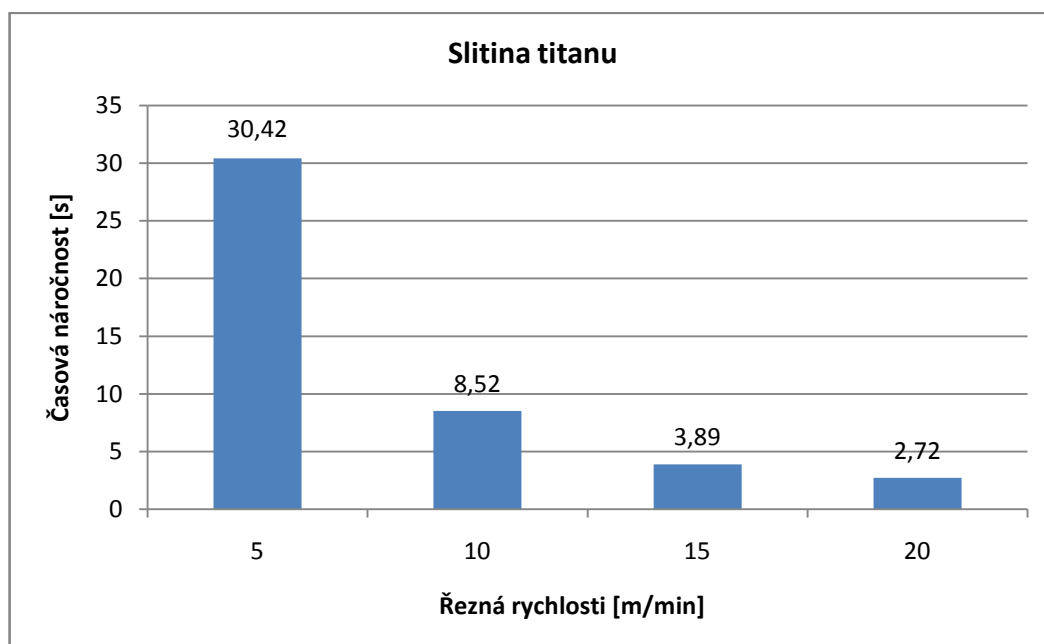
Řezné rychlosti →	5 m/min	10 m/min	15 m/min	20 m/min
Materiál ↓				
Slitina titanu	30,42 ± 3,25	8,52 ± 0,35	3,89 ± 0,25	2,72 ± 0,07
Nerezová ocel	43,21 ± 1,24	11,34 ± 0,31	5,89 ± 0,12	3,93 ± 0,13

Vyhodnocení: Tučně zvýrazněné časy jsou časy, které vyhovují podmínkám pro obrábění $8s < t < 20s$. Tyto podmínky byly stanovené na základě doporučení a ověření dříve provedenými experimenty na ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie.

Proto je vhodné obrábět oba materiály řeznou rychlostí 10 m/min. Důkazem toho také může být destrukce tří vrtáků při obrábění nerezové oceli při ostatních třech řezných rychlostech. Při obrábění titanové slitiny nedošlo k destrukci vrtáku při žádné z řezných rychlostí.

Závěr: Byla provedena zkouška vlivu řezné rychlosti na celkový čas obrábění. Jako jediná vyhovující rychlost byla vybrána rychlost 10 m/min, jelikož pouze tato řezná rychlost splňovala podmínku časové náročnosti $8s < t < 20s$.

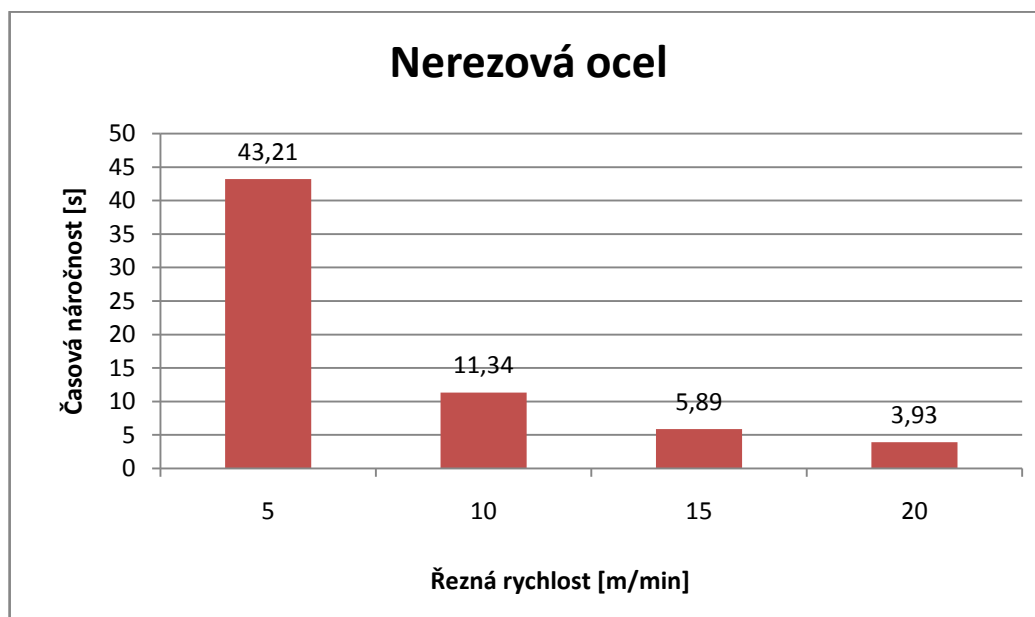
Na obrázku č.21 můžeme vidět porovnání časové náročnosti a řezné rychlosti pro slitinu titanu.



Obrázek 21 - Časová náročnost při obrábění titanu

Z grafu je patrné, že se zvyšující se řeznou rychlostí nám klesá čas vrtání. Při řezné rychlosti 5 m/min je průměrný čas obrábění 30,42 sekundy. Při zvýšení řezné rychlosti na 10 m/min se nám průměrný čas obrábění snížil o 21,9 sekundy. Při zvýšení řezné rychlosti na 15 m/min se průměrný čas obrábění snížil o 26,53 sekundy oproti řezné rychlosti 5 m/min a při řezné rychlosti 20 m/min se oproti řezné rychlosti 5 m/min snížil průměrný čas obrábění o 27,7 sekundy.

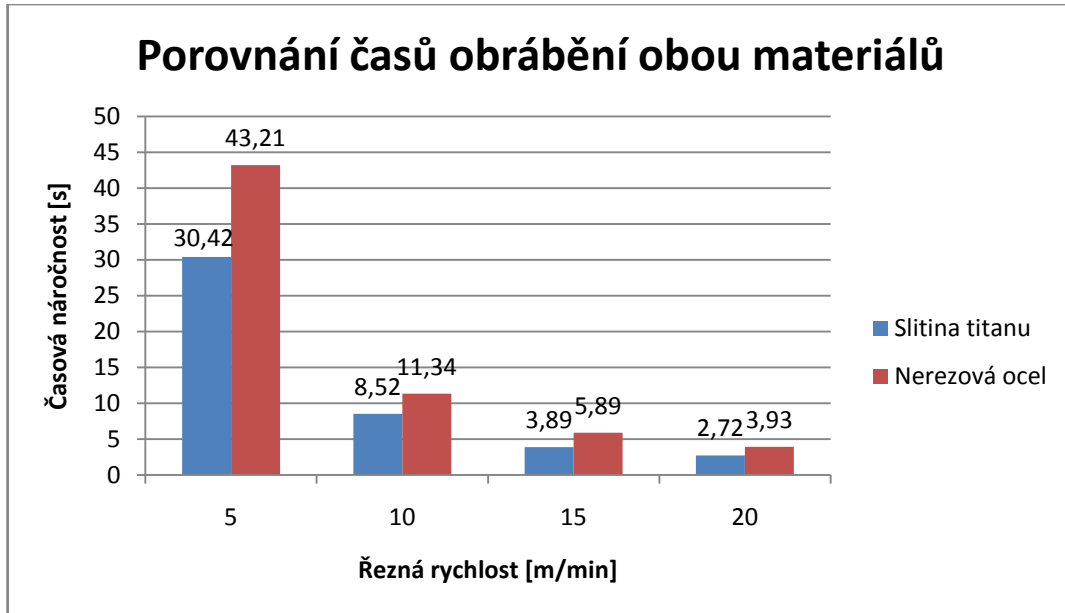
Na obrázku č. 22 je zachyceno porovnání časové náročnosti a řezné rychlosti při obrábění nerezové oceli.



Obrázek 22 - Časová náročnost při obrábění nerezové oceli

Z tohoto grafu je rovněž patrné, že se zvyšující se řeznou rychlostí nám časová náročnost obrábění klesá. Průměrný čas obrábění při řezné rychlosti 5 m/min je 43,21 sekundy. Při zvýšení řezné rychlosti na 10 m/min se průměrný čas obrábění snížil o 31,9 sekundy. Při zvýšení řezné rychlosti na 15 m/min se průměrný čas obrábění snížil o 37,3 sekundy oproti řezné rychlosti 5 m/min a při zvýšení řezné rychlosti na 20 m/min se průměrný čas obrábění snížil o 39,3 sekundy oproti řezné rychlosti 5 m/min.

Spojením předchozích dvou grafů, nám vznikne graf, na kterém je zachyceno porovnání průměrných časů obrábění pro jednotlivé řezné rychlosti a pro oba materiály. Toto porovnání je vidět na obrázku č. 23.



Obrázek 23 - Porovnání časové náročnosti

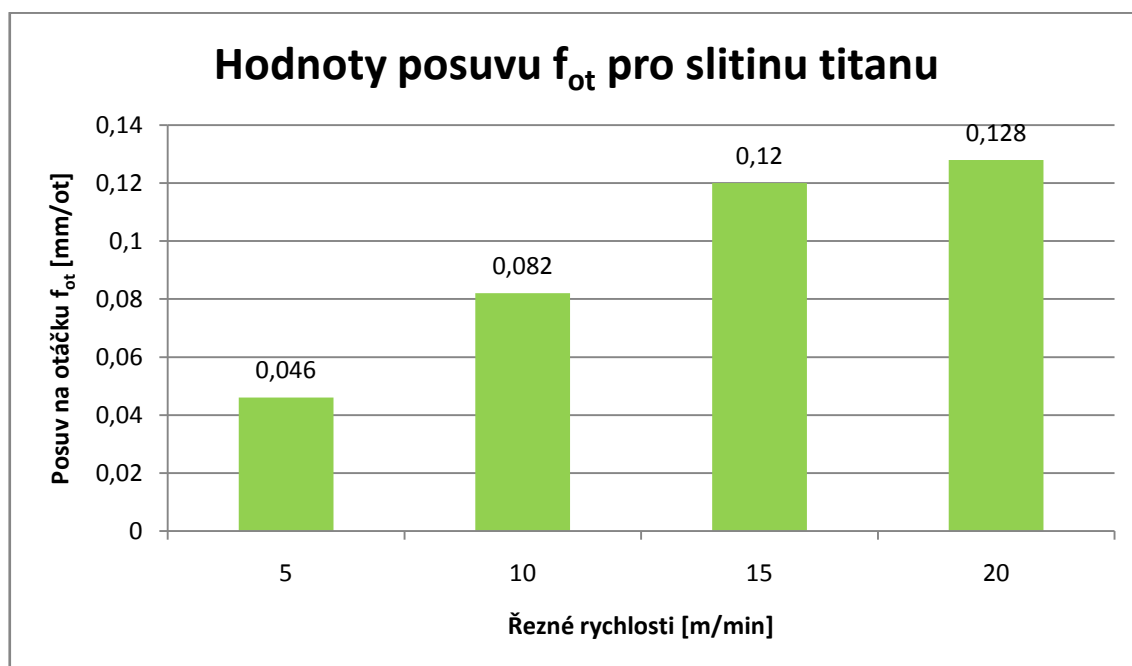
Vyhodnocení: Obrábění titanové slitiny bylo při všech řezných rychlostech rychlejší. Při řezné rychlosti 5 m/min bylo obrábění titanové slitiny v průměru kratší o 12,79 sekundy. Při obrábění řeznou rychlostí 10 m/min bylo obrábění titanové slitiny v průměru kratší o 2,8 sekundy, při obrábění řeznou rychlostí 15 m/min bylo obrábění titanové slitiny v průměru kratší o 2 sekundy a při obrábění řeznou rychlostí 20 m/min bylo obrábění titanové slitiny v průměru kratší pouze o 1,2 sekundy.

Závěr: Lze konstatovat, že slitina titanu Ti6AlV4 má z časového hlediska **lepší obrobiteľnosť** než nerezová ocel 15-5P.

V tabulce č. 4 a na obrázku č. 24 jsou zaneseny a vykresleny hodnoty vypočítaných posuvů (posuv na otáčku - f_{ot} a posuv na zub - f_z) pro jednotlivé řezné rychlosti. Tyto hodnoty platí pro slitinu titanu.:

Tabulka 4 - Hodnoty posuvů pro slitinu titanu

Řezné rychlosti →	5 m/min	10 m/min	15 m/min	20 m/min
Posuvy ↓				
f_{ot} [mm/ot]	0,046	0,082	0,12	0,128
f_z [mm/zub]	0,023	0,041	0,06	0,064



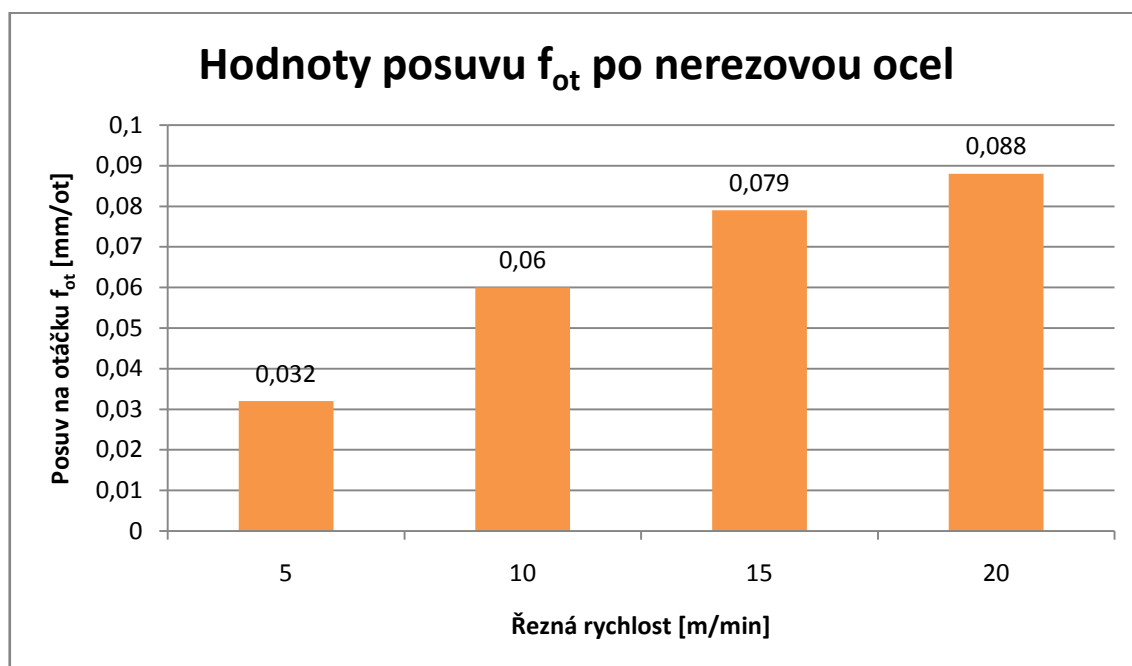
Obrázek 24 - Hodnoty posuvu pro slitinu titanu

Na grafu lze vidět, že posuv na otáčku f_{ot} se při zvětšující řezné rychlosti také zvětšoval. Tedy přesně naopak než tomu bylo u času vrtání. Při zvětšení řezné rychlosti z 5 m/min na 10 m/min se posuv skoro zdvojnásobil. Při zvětšení řezné rychlosti na 15 m/min se posuv oproti řezné rychlosti 5 m/min skoro ztrojnásobil. Avšak při zvětšení řezné rychlosti na 20 m/min se již hodnota posuvu zvětšila pouze nepatrně, a to o 0,008mm/ot oproti řezné rychlosti 15 m/min.

V tabulce č. 5 a na obrázku č 25, jsou zaneseny a vykresleny hodnoty posuvů na otáčku f_{ot} a posuvů na zub f_z ve vztahu k jednotlivým řezným rychlostem pro nerezovou ocel.

Tabulka 5 - Hodnoty posuvů pro nerezovou ocel

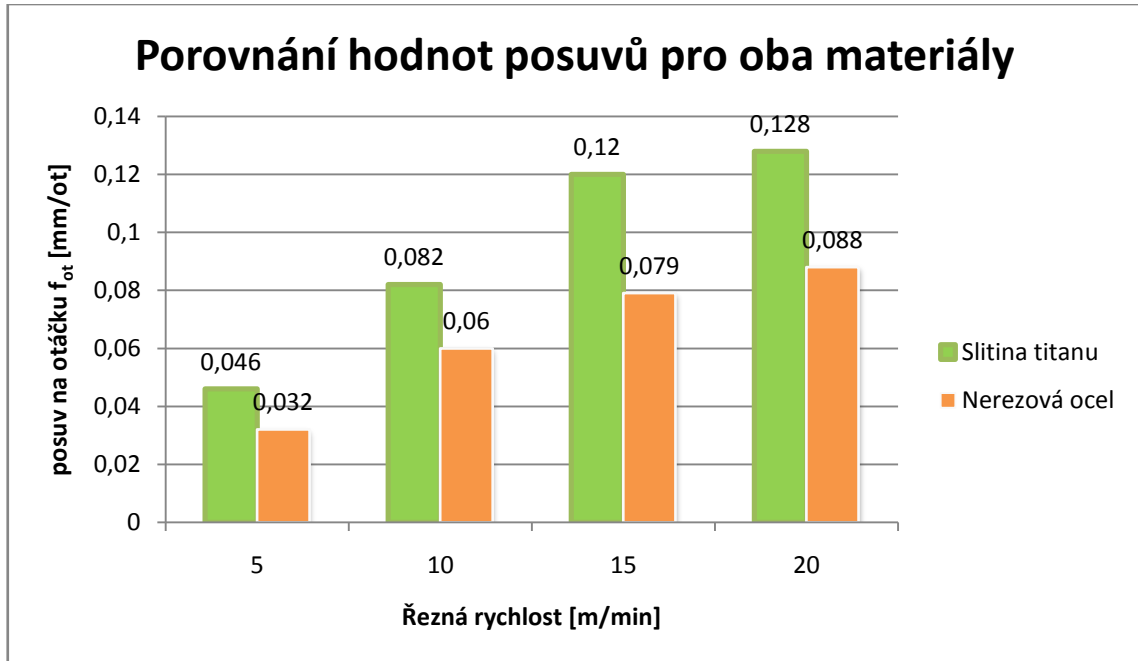
Řezné rychlosti →	5 m/min	10 m/min	15 m/min	20 m/min
Posuvy ↓				
f_{ot} [mm/ot]	0,032	0,06	0,079	0,088
f_z [mm/zub]	0,016	0,03	0,0395	0,044



Obrázek 25 - Hodnoty posuvu pro nerezovou ocel

Z grafu lze vyčíst, že opět při zvyšování řezné rychlosti se zvyšoval i posuv na otáčku f_{ot} , stejně jako tomu bylo u slitiny titanu. Tentokrát však posuv už nenarůstal tak razantně jako u titanové slitiny. Při zvětšení řezné rychlosti na 10 m/min byl posuv skoro dvojnásobný, ale při zvětšení řezné rychlosti na 15 m/min byla hodnota posuvu pouze 2,5 násobek oproti řezné rychlosti 5 m/min. Při řezné rychlosti 20 m/min byla hodnota posuvu, oproti řezné rychlosti 5 m/min, pouze 2,75 násobek.

Spojením předchozích dvou grafů dostaneme porovnání hodnot posuvů na otáčku f_{ot} při jednotlivých řezných rychlostech pro oba materiály. Porovnání je zachyceno na obrázku č. 26.



Obrázek 26 - Porovnání hodnot posuvů

Vyhodnocení: Hodnoty posuvů na otáčku f_{ot} při obrábění titanové slitiny byly vždy vyšší než u nerezové oceli. Posuv na otáčku při obrábění titanové slitiny dosahoval vždy zhruba 1,5x vyšších hodnot než při obrábění nerezové oceli.

Závěr: Lze konstatovat, že titanová slitina Ti6AlV4 má **lepší obrobiteľnosť** než nerezová ocel i z hlediska velikosti posuvu, jelikož při obrábění titanové slitiny bylo dosaženo vždy vyšších hodnot posuvu, než u nerezové oceli.

7 Závěr

V teoretické části mé bakalářské práce jsem popsal základní pojmy související s obráběním a problematikou obrobiteľnosti. Dále jsem zde charakterizoval základní rozdělení způsobů obrábění a popsal základní části obráběcích nástrojů. Následně jsem provedl charakteristiku řezného procesu, sil vznikajících při řezném procesu a drsnosti povrchu. Poté jsem stručně popsal a charakterizoval nejvíce využívané nástrojové materiály jako jsou: rychlořezná ocel, slinuté karbidy, cermety, řezná keramika, kubický nitrid bóru a polykrystalický diamant. Dále v teoretické části popisuji materiály využívající se ve strojírenství a to kovy, plasty, kompozity a keramiku. V poslední kapitole teoretické části je definována obrobiteľnost, popsáno hodnocení obrobiteľnosti a vypsány a následně charakterizovány metody zkoušení obrobiteľnosti.

V rámci praktické části mé bakalářské práce jsem provedl zkoušku obrobiteľnosti vrtáním při konstantním zatížení, kde jsem porovnával obrobiteľnost mezi slitinou titanu Ti6AlV4 a nerezovou ocelí 15-5PH. Zkouška byla prováděna pro čtyři řezné rychlosti a to 5, 10, 15, 20 m/min, při konstantním zatížení 5,5kg. Kritériem hodnocení obrobiteľnosti byl čas obrábění a velikost posuvu na otáčku f_{ot} .

Nejprve byla provedena zkouška vlivu řezné rychlosti na celkový čas obrábění. Jako jediná **vyhovující rychlost** byla vybrána rychlost **10 m/min**, jelikož pouze tato řezná rychlost splňovala podmínku časové náročnosti $8s < t < 20s$.

Poté jsem provedl porovnání průměrné časové náročnosti obou materiálů pro všechny čtyři řezné rychlosti. Z naměřených hodnot lze konstatovat, že **slitina titanu má**, z hlediska časové náročnosti, **lepší obrobiteľnost** než nerezová ocel, jelikož průměrný čas obrábění u titanové slitiny byl pro všechny řezné rychlosti vždy kratší.

Nakonec jsem, pomocí vzorců pro řeznou rychlost a strojní čas, vypočítal hodnoty posuvů na otáčku f_{ot} také pro všechny čtyři řezné rychlosti a zanesl je do tabulek a do grafů. Poté jsem tyto hodnoty porovnal pro oba materiály a zanesl do grafu. Z tohoto porovnání lze říci, že **titanová slitina má lepší obrobiteľnost** než nerezová ocel i z hlediska velikost posuvu, jelikož hodnoty posuvů na otáčku byly při obrábění titanové slitiny vždy větší.

8 Bibliografie

- [1] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2610-8.
- [2] *Základy obrábění* [online]. b.r. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: : http://www.sps-ko.cz/documents/STT_obeslova/Z%C3%A1klady%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf
- [3] *Skripta z Technologie II 2. díl: Doc. Ing. Robert ČEP, Ph.D.* [online]. b.r. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf
- [4] *Technologie výroby II: Řešené příklady. Fakulta strojního inženýrství: Ústav strojírenské technologie* [online]. 2002 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby_II.pdf
- [5] *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část. Fakulta strojního inženýrství: Ústav strojírenské technologie* [online]. b.r. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [6] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. čes. vyd. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN 91-972-2994-6.
- [7] *OVMT: Drsnost povrchu* [online]. b.r. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://files.ovmt.webnode.cz/200000030-3094f328a0/Drsnost%20povrchu.pdf>
- [8] *Tumlikovo: metal cutting technologies: Drsnost obrobeneho povrchu* [online]. 2010 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>
- [9] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky - struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Český normalizační institut, 1999.
- [10] *Struktura povrchů vybraných strojních součástí* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2009 [cit. 2017-06-02]. Dostupné z: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura_povrchu_vybranych_technologii_obrabeni.pdf
- [11] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost*

- povrchu*. 1. Praha: SNTL, 1989.
- [12] ČSN ISO 513. *Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů s určenou řeznou hranou - Označování skupin a podskupin použití*. 2015.
- [13] *Nástrojové materiály. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie* [online]. 2013 [cit. 2017-06-15]. Dostupné z:
http://utopm.fsid.cvut.cz/podklady/ON/2013_1_Nastrojove_materialy.pdf
- [14] NĚMEC, Milan, Jan SUCHÁNEK a Jan ŠANOVEC. *Základy technologie I. 2., přeprac. vyd.* V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04867-2.
- [15] MIKOVEC, Miroslav. *Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí*. Praha: SNTL, 1982.
- [16] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
- [17] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011. ISBN 978-802-4825-335.
- [18] MACEK, Karel. *3. Struktura a vlastnosti materiálu a jejich zkoušení* [online]. Praha, 2014 [cit. 2017-06-18]. Dostupné z:
http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [19] MÁDL, Jan a Vilém SCHUBERT. *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha: Editační středisko ČVUT, 1985.
- [20] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [21] *ASM Aerospace Specification Metals: Titanium Ti-6Al-4V* [online]. b.r. [cit. 2017-07-02]. Dostupné z:
<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mtp641>
- [22] *Aircraft materials: 15-5PH Stainless Steel* [online]. b.r. [cit. 2017-07-02]. Dostupné z: <https://www.aircraftmaterials.com/data/alstst/ams5659.html>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Ukázka základních pojmů[1]	10
Obrázek 2 - Způsoby obrábění rozdělené podle hlavních řezných pohybů 1 - Hlavní řezný pohyb 2,3 - Vedlejší řezné pohyby[2].....	12
Obrázek 3 - Prostorové složky síly F[6]	15
Obrázek 4 - Drsnosti povrchů při různých způsobech obrábění[10]	18
Obrázek 5 - Základní rozdělení konstrukčních materiálů[14]	23
Obrázek 6 - Hlavní parametry charakterizující obrobitelnost[16]	27
Obrázek 7 - Rozdělení materiálů do tříd obrobitelnosti[5].....	30
Obrázek 8 - Křivky otupení při různých řezných rychlostech[17]	31
Obrázek 9 - Stanovení jednotlivých trvanlivostí na základě kritéria opotřebení[17]	31
Obrázek 10 - Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti[17].....	32
Obrázek 11 - Schéma čelní zkoušky[17]	34
Obrázek 12 - Závislost řezné síly na řezné rychlosti při podélném soustružení[17]	35
Obrázek 13 - Schéma funkce Leysetterovi metody [17]	36
Obrázek 14 - Vrtačko-frézka Optimum	41
Obrázek 15 - Použitý vrták ze slinutého karbidu.....	41
Obrázek 17 - Slitina titanu	42
Obrázek 16 - Nerezová ocel.....	42
Obrázek 18 - Měřicí ústředna Mikronex SN 600.X.....	43
Obrázek 19 - Průběh vrtání vykreslený programem Mikronex CNC ústředna	43
Obrázek 20 - Dílenský mikroskop s digitálním odměřováním.....	44
Obrázek 21 - Časová náročnost při obrábění titanu.....	47
Obrázek 22 - Časová náročnost při obrábění nerezové oceli.....	48
Obrázek 23 - Porovnání časové náročnosti.....	49
Obrázek 24 - Hodnoty posuvu pro slitinu titanu.....	50
Obrázek 25 - Hodnoty posuvu pro nerezovou ocel	51
Obrázek 26 - Porovnání hodnot posuvů	52

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Chemické složení slitiny titanu Ti6AlV4[21]	42
Tabulka 2 - Chemické složení nerezové oceli 15-5PH[22]	42
Tabulka 3 - Průměrné časy vrtání se směrodatnou odchylkou	46
Tabulka 4 - Hodnoty posuvů pro slitinu titanu	50
Tabulka 5 - Hodnoty posuvů pro nerezovou ocel.....	51