

**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**Ústav technologie obrábění,  
projektování a metrologie**

**Obrobitelnost nově vyvíjených materiálů  
Machinability of new developer materials**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2022**

**Tomáš PIKEŠ**

**Studijní program:** Výroba a ekonomika ve strojírenství

**Studijní obor:** Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

**Vedoucí práce:** Ing. Vítězslav Rázek, CSc.



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pikeš** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **484931**  
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 nově vyvíjených materiálů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Machinability of new developer materials**

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Výrobní metody a technologické možnosti
3. Řezné podmínky a dosahované parametry
4. Možnosti experimentálního hodnocení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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


Datum zadání bakalářské práce: **16.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Vítězslav Rázek, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce


  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
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.

6.4.2022  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením svého vedoucího bakalářské práce. Veškerá literatura a podklady jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne

Podpis: \_\_\_\_\_



## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za věcné připomínky, cenné rady a vstřícnost při vypracování této bakalářské práce.

Také bych tímto chtěl poděkovat celé své rodině za obrovskou podporu během dosavadního studia a vypracovávání této bakalářské práce.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zaměřuje na studium obrobitelnosti nově vyvíjených materiálů. V úvodní části se zabírám analýzou faktorů, které ovlivňují obrobitelnost. V následující části se zaměřuji na hodnocení, značení a možnosti experimentálních měření obrobitelnosti. V závěrečné části práce se věnuji rozdělení konstrukčních materiálů a bližšímu představení vybraných nově vyvíjených materiálů se zaměřením na jejich obrobitelnost.

## **Klíčová slova**

Obrobitelnost, obrábění, nástroje, slitiny, slitiny s vysokou entropií, progresivní materiály, biomateriály, superslitiny

## **Abstract**

This bachelor thesis focuses on the study of machinability of newly developed materials. In the introductory part I deal with the analysis of factors that influence machinability. In the following part I focus on evaluation, marking and possibilities of experimental measurements of machinability. In the final part of the thesis I deal with the division of structural materials and a more detailed presentation of selected newly developed materials with a focus on their machinability.

## **Key words**

Machinability, machining, tools, alloys, HEA, progressive materials, biomaterials, superalloys

## Obsah

Seznam použitých zkratek .....	- 9 -
Úvod .....	- 10 -
1. Základy procesu obrábění .....	- 11 -
1.1. Řezné podmínky a síly .....	- 11 -
1.1.1. Řezné podmínky.....	- 11 -
1.1.2. Síly při soustružení .....	- 13 -
1.2. Mechanika tvorby třísky.....	- 15 -
1.2.1. Druhy třísek.....	- 15 -
1.2.2. Oblasti plastické deformace .....	- 16 -
1.3. Teplo a teploty při obrábění.....	- 17 -
1.3.1. Predikce řezných teplot .....	- 17 -
1.3.2. Měření řezných teplot .....	- 18 -
1.4. Povrchové vrstvy a měření drsnosti obrobeného povrchu.....	- 18 -
1.4.1. Parametry profilu povrchu.....	- 19 -
1.4.2. Měření drsnosti povrchu .....	- 20 -
2. Obráběcí nástroje .....	- 22 -
2.1. Geometrie nástroje .....	- 22 -
2.2. Nástrojové materiály.....	- 24 -
2.2.1. Rychlořezné oceli (HSS).....	- 25 -
2.2.2. Slinuté karbidy (SK) .....	- 25 -
2.2.3. Cermety.....	- 26 -
2.2.4. Řezná keramika .....	- 26 -
2.2.5. Kubický nitrid boru KNB .....	- 27 -
2.2.6. Diamant.....	- 27 -



2.3.	Opotřebení nástroje .....	- 28 -
2.3.1.	Fyzikální příčiny vzniku opotřebení .....	- 28 -
2.3.2.	Typy opotřebení nástroje .....	- 30 -
2.4.	Trvanlivost a životnost nástroje .....	- 30 -
3.	Obrobitelnost materiálů .....	- 33 -
3.1.	Značení obrobitelnosti .....	- 34 -
3.2.	Hodnocení obrobitelnosti .....	- 35 -
3.3.	Zkoušky obrobitelnosti .....	- 35 -
3.3.1.	Dlouhodobé zkoušky obrobitelnosti .....	- 36 -
3.3.2.	Krátkodobé zkoušky obrobitelnosti .....	- 38 -
4.	Nově vyvíjené materiály a jejich obrobitelnost .....	- 47 -
4.1.	Rozdělení materiálů .....	- 48 -
4.1.1.	Kovové materiály .....	- 48 -
4.1.2.	Polymery .....	- 49 -
4.1.3.	Keramické materiály .....	- 50 -
4.1.4.	Kompozitní materiály .....	- 50 -
4.2.	Nově vyvíjené materiály .....	- 51 -
4.2.1.	Kovové biomateriály .....	- 51 -
4.2.2.	Obrobitelnost biodegradabilních hořčíkových slitin .....	- 53 -
4.2.3.	Superslitiny .....	- 54 -
4.2.4.	Obrobitelnost superslitin .....	- 57 -
4.2.5.	Slitiny s vysokou entropií .....	- 59 -
4.2.6.	Obrobitelnost HEA .....	- 61 -
5.	Závěr .....	- 62 -
6.	Seznam literatury .....	- 64 -



---

7. Seznam obrázků.....	- 68 -
8. Seznam tabulek .....	- 70 -





## Seznam použitých zkratk

FEM	Finite Element Method
L	surface lay (povrchová úprava)
F	flaws (vady)
W	waviness (vlnitost)
R	roughness (drsnost)
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)
CLA	Chromatic Length Aberration
HSS	high speed steel (rychlořezná ocel)
SK	slinutý karbid
WC	wolfram karbid
NbC	niob karbid
TiC	titan karbid
TaC	tantal karbid
TiN	titan nitrid
TiCN	titan karbonitrid
PVD	physical vapour deposition
KNB	kubický nitrid boru
VBD	výměnná břitová destička
PVC	polyvinylchlorid
HEA	high entropy alloys (slitiny s vysokou entropií)
SLM	selective laser melting (selektivní laserové tavení)

## Úvod

Z historického hlediska byl vždy rozvoj a pokrok lidstva úzce spjat se schopností vynalézat, vyrábět a zpracovávat nové materiály. Postupem času si člověk osvojil dovednosti, které vedly k využívání materiálů se stále lepšími vlastnostmi. Z historického pohledu jsou tato jednotlivá období lidské civilizace pojmenována dle materiálu, který se v danou dobu využíval nejvíce. Od kamene, přes bronz až po železo. Ale teprve až v relativně nedávné době dospěli lidé k tomu, že nejlepších výsledných vlastností materiálu lze dosáhnou správnou kombinací jednotlivých prvků. Tyto znalosti, získané přibližně v posledních 100 letech, nám umožnily ovlivňovat vlastnosti materiálů. A proto jsme v dnešní době schopni vyvíjet materiály, které dosahují požadovaných vlastností. [1]

Cílem mé bakalářské práce je bližší přiblížení experimentálních možností hodnocení obrobitelnosti společně s faktory, které mají vliv na obrobitelnost nově vyvíjených materiálů. V následující části bakalářské práce se věnuji rozdělení konstrukčních materiálů a blíže představuji tři druhy nově vyvíjených materiálů společně s hodnocením obrobitelnosti těchto materiálů.

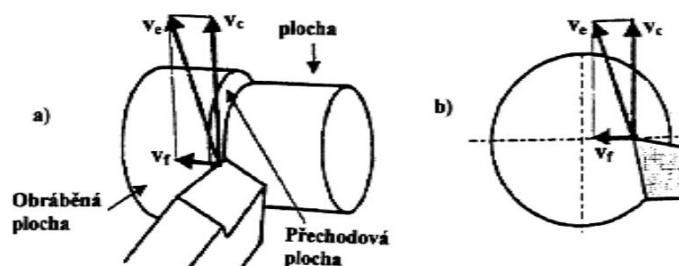
## 1. Základy procesu obrábění

„Obrábění je technologický proces, kterým vytváříme povrchy obrobku určitého tvaru, rozměrů a jakosti odebráním částic materiálu účinky mechanickými, elektrickými, chemickými, případně jejich kombinací.“ [2]

### 1.1. Řezné podmínky a síly

#### 1.1.1. Řezné podmínky

Obrábění je proces, při kterém odebíráme přebytečné vrstvy materiálu za pomoci řezného nástroje a tím měníme polotovary ve finální obrobek. Přebytečný materiál odchází od polotovaru v podobě třísek, které mají různorodé vlastnosti a tvary. Abychom byli schopni dosáhnout finálního tvaru obrobku, je potřeba si stanovit řezné podmínky. Řezné podmínky nastavujeme podle technologických vlastností obráběného materiálu tak, abychom byli schopni rychle a kvalitně obrobek při zachování životnosti nástroje. Hlavními řeznými podmínkami je řezná rychlost, posuv a hloubka řezu. [3]



Obrázek 1 – Druhy soustružení a) podélné soustružení b) čelní soustružení [3]

#### Řezná rychlost ( $v_c$ )

Řezná rychlost je taková rychlost, která působí mezi řezným nástrojem a obrobkem. Velikost řezné rychlosti se liší v závislosti na zvoleném nástroji a obráběném materiálu. Obvodovou řeznou rychlost lze určit dle následující vztahu:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1)$$

Kde:

$D$  – průměr obráběné plochy [mm]

$n$  – počet otáček vřetene [ $\text{min}^{-1}$ ] [3]

**Posuv ( $v_f$ )**

Posuv je vzdálenost, kterou urazí řezný nástroj během jedné otočky kolem obráběného průměru. Hodnotu posuvu nastavujeme dle zvolené obráběcí operace a v závislosti na vlastnostech obráběného materiálu. Při obrábění se posuv vyjadřuje rychlostí posuvu, která je dána následujícím vztahem.

$$v_f = f \cdot n \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2)$$

Kde:

$f$  – posuv na otáčku [mm]

$n$  – počet otáček vřetene [ $\text{min}^{-1}$ ]

**Tloušťka obráběné vrstvy ( $a_p$ )**

Tloušťka obráběné vrstvy ovlivňuje výslednou velikost a tvar průřezu odřezávané třísky. Při běžném soustružení nabývá hodnota tloušťky třísky od pár desetin milimetru až po několik milimetrů. Průřez třísky z odřezávané vrstvy jsme schopni pro základní operace podélného a čelního soustružení dopočítat dle následujících vztahů:

**Pro podélné soustružení:**

$$a_p = 0,5 \cdot (D - d) \text{ [mm]} \quad (3)$$

Kde:

$D$  – průměr obráběné plochy [mm]

$d$  – průměr obrobené plochy [mm]

**Pro čelní soustružení:**

$$a_p = L - l \text{ [mm]} \quad (4)$$

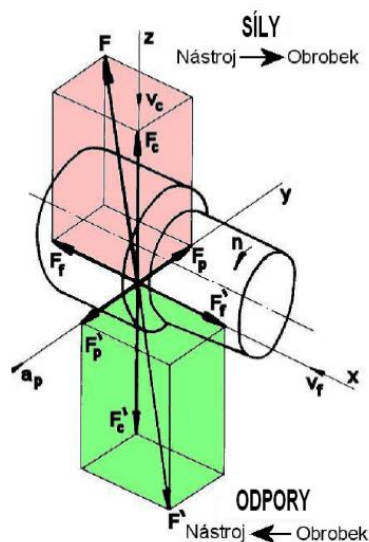
Kde:

$L$  – délka obráběné plochy [mm]

$l$  – délka obrobené plochy [mm] [3]

### 1.1.2. Síly při soustružení

Při soustružení vznikají mezi obráběcím nástrojem a obrobkem síly, které jsme schopni vypočítat ze zadaných řezných podmínek a z materiálových konstant pro obráběný materiál. Hlavní a výslednou silou při obrábění je celková řezná síla, kterou značíme  $F_e$ . Tato síla se skládá ze 3 složek, kde první složkou obrábění je obráběcí síla  $F_c$ , druhou složkou je posuvová síla  $F_f$  a třetí složkou je pasivní síla  $F_p$ . Následující složky a jejich odpory jsou znázorněny na obrázku 2. [3]



Obrázek 2 – Složky řezných sil a odporů při podélném soustružení [3]

#### Řezná síla

Řezná síla je síla, která působí ve směru hlavního pohybu vektoru řezné rychlosti na obráběcím stroji. Její velikost má největší vliv na potřebný řezný výkon obráběcího stroje. Řeznou sílu jsme schopni spočítat dle následujícího vztahu. [4]

$$F_c = c_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \text{ [N]} \quad (5)$$

Kde:

$c_{F_c}$  – materiálová konstanta [–]

$x_{F_c}$  – exponent vlivu  $a_p$  [–]

$y_{F_c}$  – exponent vlivu  $f$  [–]

$a_p$  – hloubka obráběné vrstvy [mm]

$f$  – posuv na otáčku [mm] [4]

## Síla posuvu

Posuvová síla působí ve směru, kterým se nástroj posouvá. Její velikost je v porovnání s řeznou silou přibližně poloviční. Tím pádem nemá posuvová síla oproti síle řezné takový vliv na příkon motoru, který zprostředkovává posuv obráběcího nástroje. Posuvovou sílu můžeme vypočítat podle následujícího vztahu. [4]

$$F_f = c_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \text{ [N]} \quad (6)$$

Kde:

$c_{F_f}$  – materiálová konstanta [–]

$x_{F_f}$  – exponent vlivu  $a_p$  [–]

$y_{F_f}$  – exponent vlivu  $f$  [–]

$a_p$  – hloubka obráběné vrstvy [mm]

$f$  – posuv na otáčku [mm]

## Pasivní síla

Pasivní síla působí kolmo ve směru na obráběnou plochu. Velikost pasivní síly je v porovnání s velikostí řezné síly asi čtvrtinová a působí na obráběcí soustavu tam, kde má soustava nejmenší tuhost. Pasivní síla má vliv na kvalitativní znaky finálního obrobku, kde má vliv především na přesnost obráběných ploch a chvění řezného nástroje při obrábění.

$$F_p = c_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \text{ [N]} \quad (7)$$

Kde:

$c_{F_p}$  – materiálová konstanta [–]

$x_{F_p}$  – exponent vlivu  $a_p$  [–]

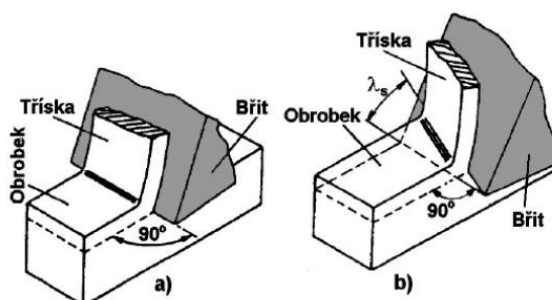
$y_{F_p}$  – exponent vlivu  $f$  [–]

$a_p$  – hloubka obráběné vrstvy [mm]

$f$  – posuv na otáčku [mm] [4]

## 1.2. Mechanika tvorby třísky

Tříška vzniká při obráběcím procesu v místě řezu, kde na sebe působí síly, které vznikají mezi obráběcím nástrojem a obrobkem. V tomto místě dochází z důvodů působení sil ke zvýšení teplot a k plastické deformaci obráběného materiálu, který je odváděn po hřbetě nástroje v podobě třísky. Z hlediska třískového obrábění dělíme řezný proces na dva základní procesy, a to podle nastavení úhlu řezného nástroje vůči obrobku. Jedná se o ortogonální nebo obecné řezání, jak můžeme vidět na následujícím obrázku 3. [3]



Obrázek 3 – Realizace řezného procesu a) ortogonální řezání b) obecné řezání [8]

### 1.2.1. Druhy třísek

Tvar výsledné třísky závisí na mnoha vstupních parametrech. Některé z těchto parametrů můžeme ovlivnit vhodným zvolením řezných podmínek nebo správně zvolenou geometrií řezného nástroje. Vlastnosti a tvary třísek jsou odlišné pro jednotlivé materiály. Mechanismus tvorby třísky je rozdílný pro krystalické a nekrystalické látky, přičemž v dnešní době ve strojírenství je většina používaných materiálů pro obrábění krystalická. V následující tabulce jsou rozděleny třísky dle jednotlivých tvarů podle normy ISO 3685. [5]

1. Stužkové třísky	2. Vinuté třísky	3. Spirálové třísky	4. Vlnité šroubovitě třísky	5. Kuželovité šroubovitě třísky	6. Obloukovité třísky	7. Elementární třísky	8. Jehlovité třísky
1.1. Dlouhé	2.1. Dlouhé	3.1. Ploché	4.1. Dlouhé	5.1. Dlouhé	6.1. Spojené		
1.2. Krátké	2.2. Krátké	3.2. Kuželovité	4.2. Krátké	5.2. Krátké	6.2. Dělené		
1.3. Smotané	2.3. Smotané		4.3. Smotané	5.3. Smotané			

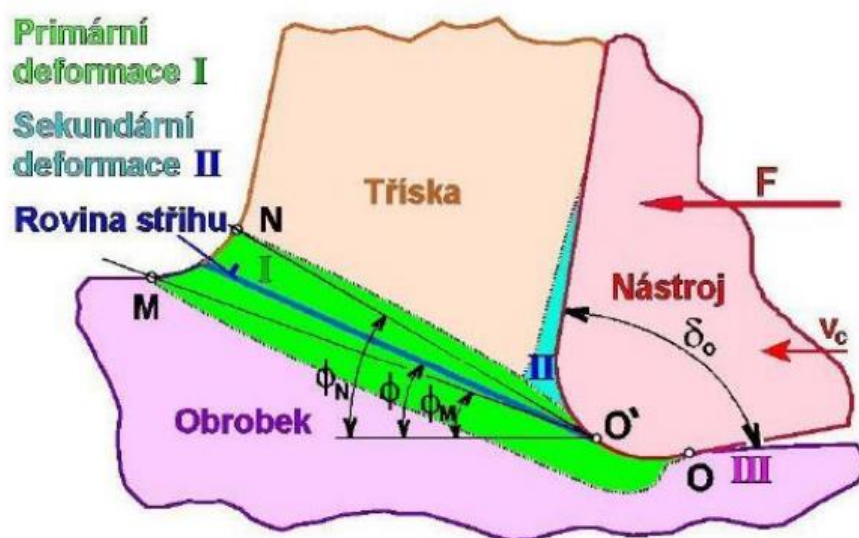
Obrázek 4 – Tvary třísek dle normy ISO 3685-1977 [5]

### 1.2.2. Oblasti plastické deformace

Plastické deformace rozdělujeme na tři základní oblasti, a to podle toho, v jakém místě k dané plastické deformaci dochází. V oblasti primární plastické deformace dochází poprvé k plastické deformaci obráběného materiálu. [6]

#### Oblast primární deformace

Oblast primární plastické deformace je na obrázku 5 ohraničena písmeny OMNO'. První dvě písmena OM označují začátek plastické deformace. Konec plastické deformace se značí písmeny NO'. Vlivem plastické deformace dochází v oblasti primární deformace ke změně tvaru struktury zrn. Zrna mění svůj tvar z kruhového na eliptický. Sekundární oblast plastické deformace vzniká na spodní straně odřezávané třísky. V tomto místě dochází k odpevňování vlivem působení vysokých teplot. S oblastí sekundární plastické deformace se váže působení sil mezi nástrojem a obrobkem. [6]



Obrázek 5 – Oblasti plastických deformací [2]

#### Oblast sekundární deformace

V oblasti sekundární deformace záleží v první řadě na rozložení normálních, respektive smykových napětích a teplotách v místě, kde se nástroj stýká s odcházející třískou. Styk mezi nástrojem a třískou rozdělujeme na dva hlavní styky, a to bodový nebo plošný styk. Za jistých podmínek může po průchodu materiálu primární deformací dojít k vytvoření nárůstku, který může negativně ovlivnit geometrii nástroje a tím zhorší výslednou kvalitu obrobeného povrchu. [6]



## Oblast terciální deformace

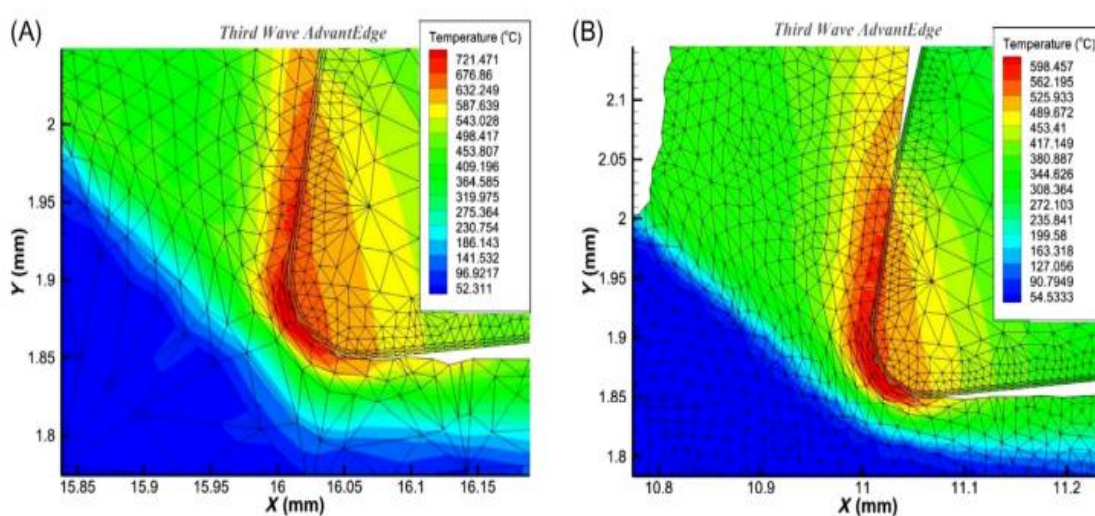
Terciální oblast plastické deformace se nachází v malé vzdálenosti přímo pod obrobeným povrchem. Hlavní příčinou terciální plastické deformace je tvar geometrie řezné hrany nástroje. [6]

### 1.3. Teplo a teploty při obrábění

Během obráběcího procesu, kdy dochází k odebrání určitého množství materiálu, se většina působící energie přemění na plastickou deformaci. Při plastické deformaci se většina působící energie transformuje právě na teplo. Teploty v místě řezu a jeho blízkosti poté dosahují od několika stovek až po více než tisíc stupňů Celsia. Velikost tepla má vliv na mechanické vlastnosti obrobku, tření na čele i hřbetě nástroje a na zpevňování obrobené vrstvy obráběného materiálu. Vysoké teploty také negativně ovlivňují vlastnosti nástrojových materiálů, a to hlavně tím, že zkracují životnost nástroje. [7], [2]

#### 1.3.1. Predikce řezných teplot

S vývojem výpočetní techniky se naskytly technologům nové možnosti, díky kterým jsou nyní schopni na základě počítačové modelace simulovat řezný proces a z něho určit teploty v místě řezu. Na obrázku 6 lze vidět simulaci teplot za pomoci metody FEM (finite element method). [7]

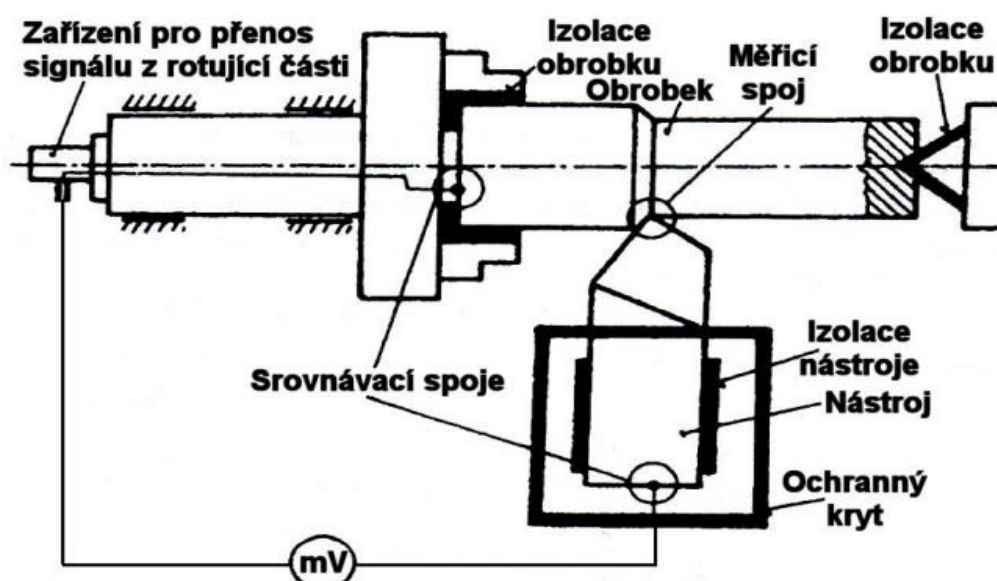


Obrázek 6 – Simulace teplot v místě řezu metodou FEM [7]

### 1.3.2. Měření řezných teplot

Z pohledu metrologie je měření teplotního pole značně složitý proces, na který je potřeba příslušné vybavení. Jedná se například o termokameru, která vzájemně komunikuje s programem v počítači. Měření lze také provádět za pomoci termočlánků, termistorů, pyrometrů a teplotních indikátorů. Zařízení pro měření teplot v místě řezu jsou povětšinou složeny z následujících součástí. Snímač teploty, který snímá teplotu v místě řezu. Naměřená data jsou dále převáděna a přenášena do přístroje, který ukazuje hodnoty příslušných teplot. [2], [8]

### 1.4. Povrchové vrstvy a měření drsnosti obrobeného povrchu

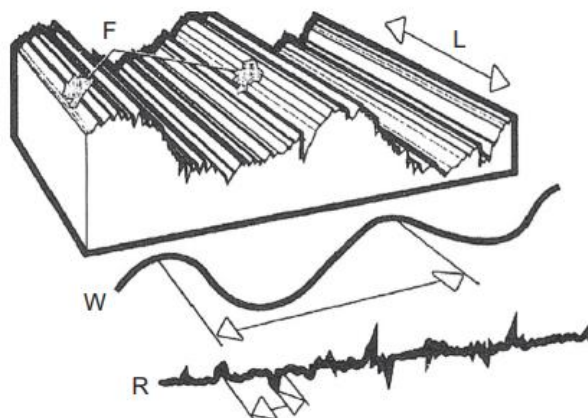


Obrázek 7 – Přirozený termočlánek [2]

Integrita a kontrola kvality obrobeného povrchu spadá mezi technologie povrchových úprav. Obor technologie povrchových úprav, neboli také povrchové inženýrství, se zabývá různými druhy výrobních a zpracovatelských postupů při výrobě produktů s cílem dosáhnout nejlepších možných požadovaných vlastností povrchové vrstvy. Zkoumá a zkvalitňuje povrchy u výrobků, které byly zhotoveny licím, tvářecím nebo obráběcím procesem. [9]

### 1.4.1. Parametry profilu povrchu

Obrobená plocha není nikdy dokonale hladká, a to ani za předpokladu použití nejmodernějších a nejpřesnějších nástrojů. Při bližším zkoumání obrobené plochy lze vidět opakující se pravidelné, ale i nepravidelné vzory, které tvoří výslednou texturu, jako lze vidět



Obrázek 8 – Topografie obrobeného povrchu [9]

na obrázku 8. K parametrům, které ovlivňují mikrostrukturu nejvíce, patří směr nerovnosti na obrázku 8 označen písmenem **L - surface lay**. Tento vzor vzniká rozdílnými směry obrábění. Vzory dělíme na rovnoběžné, kolmé, zkřížené, libovolné, bodové, kruhové a směřující ke středu povrchu. Na obrázku jsou také znázorněny pod písmenem **F - flaws** náhodné vady jako například škrábance, mikrootvory a trhliny. Dalším parametrem je vlnitost povrchu **W - waviness**, která určuje reliéf obrobené vrstvy. Vlnitost vzniká důsledkem chvění nebo vychýlením obrobku. Může být také způsobena špatným upnutím nástroje. Poslední parametr utvářející finální povrch je drsnost povrchu **R - roughness**. Drsnost popisuje nepravidelnosti, které vznikají činností řezné hrany během každého posuvu obrobku. [9], [10], [11]

#### Příklady parametrů drsnosti:

$R_p$  – největší výška výstupku profilu

$R_v$  – největší hloubka prohlubně profilu

$R_z$  – největší výška profilu

$R_c$  – průměrná výška prvků profilu

$R_t$  – celková výška profilu

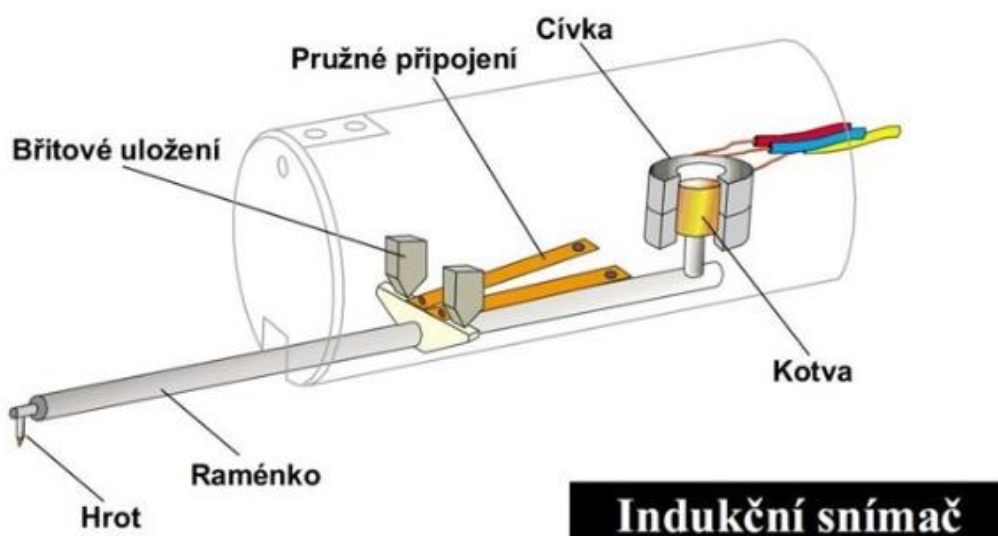
$R_a$  – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [10]

### 1.4.2. Měření drsnosti povrchu

Drsnost povrchu dle měření můžeme rozdělit na dva základní typy metod. V případě, kdy porovnáváme výsledný povrch obrobku s tzv. „porovnávací vzorkovnicí“, se jedná o způsob metody kvalitativní. Tento způsob metody se v dnešní době už téměř nevyužívá, protože není přesná a záleží pouze na lidském faktoru, který obrobek porovnává. V současnosti se používají pro měření drsnosti přístroje tzv. profilometry. Tyto přístroje dokáží kromě drsnosti změřit také vlnitost a tvar povrchové vrstvy. Profilometry rozdělujeme pomocí způsobu měření na kontaktní a bezkontaktní.[10]

#### Kontaktní měření

Měření drsnosti pomocí moderních profilometrů funguje na principu hrotu, který posouváme po obrobeném povrchu. Diamantový hrot postupně snímá polohu indukčním měřidlem. V měřidle se generuje elektrický signál, který je následně digitálně převáděn

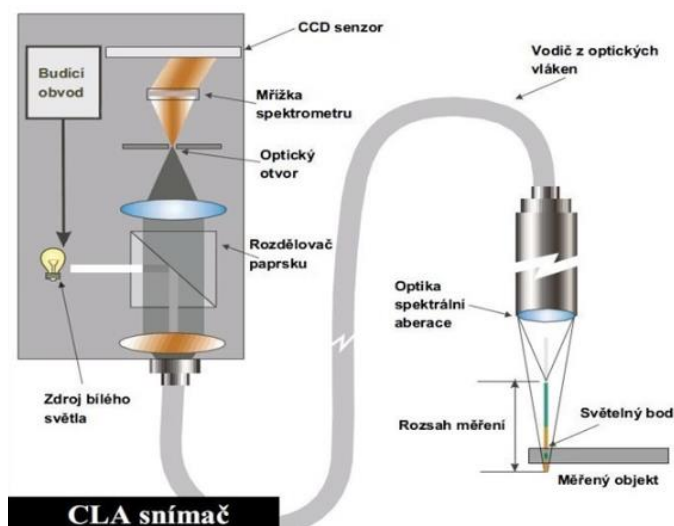


Obrázek 9 – Schéma indukčního snímače na měření povrchu kontaktním způsobem [10]

na obrazovku profilometru, nebo ho lze také pomocí USB převést do počítače, kde můžeme naměřené profily dále blíže zkoumat. Tento způsob měření drsnosti je praktikován v průmyslové praxi posledních sto let. Hlavním důvodem, proč jsou profilometry stále nejvíce využívaným způsobem měření drsnosti, je to, že dokáží měřit i povrch, který je po obrábění kontaminován drobnými nečistotami a vrstvami po řezných kapalinách. Naproti tomu bezkontaktní měřicí přístroje vyžadují k přesnému měření dokonale čistý povrch. [10]

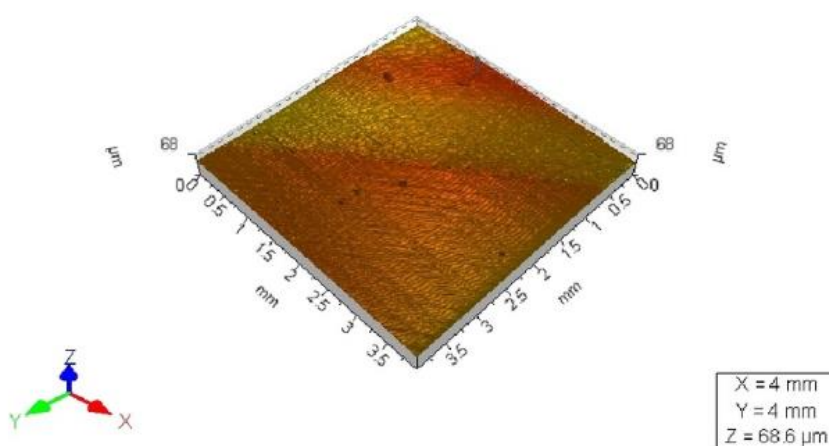
## Bezkontaktní měření

K vyhodnocování drsnosti povrchů bezkontaktní metodou se využívají přístroje pracující na principu snímačů. V současné praxi se využívají dva druhy snímačů. Prvním typem je CLA (Chromatic Length Aberration) snímač. CLA snímač pracuje na základě zdroje bílého světla a jeho



Obrázek 10 – Schéma CLA snímače [10]

odrazu od obrobeného povrchu. Měřicí přístroj poté propouští pouze určité vlnové délky, jež dopadají na senzor, který na základě počítačového programu převede tyto informace na 3D model. Přesnost CLA snímače je v řádu mikrometrů. Dalším typem bezkontaktního měřiče je laserový snímač, který není tak přesný jako CLA snímač. [10]



Obrázek 11 – 3D Snímek povrchu naměřený pomocí CLA snímače [10]

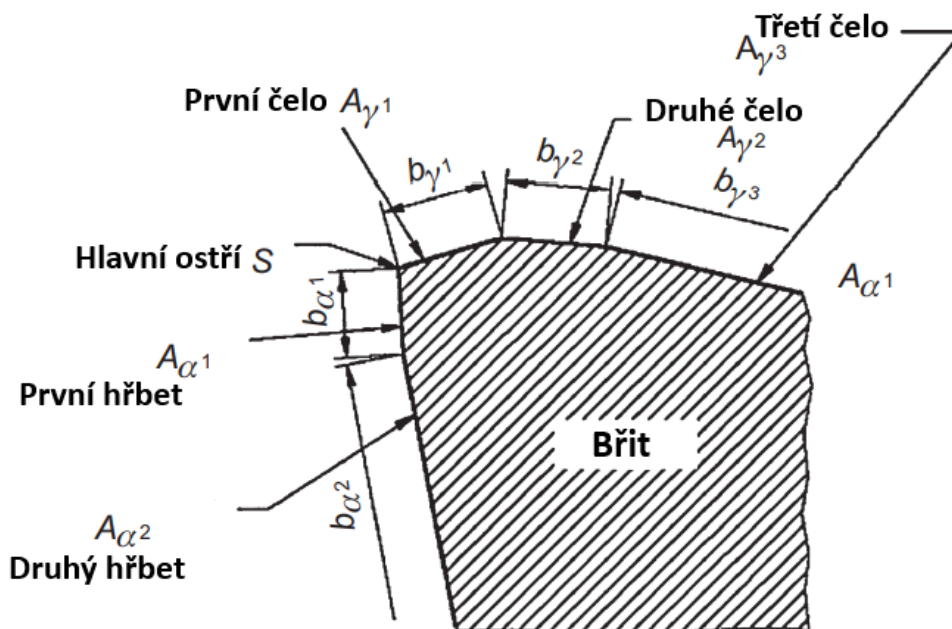
## 2. Obráběcí nástroje

„Obráběcí nástroj je aktivní prvek soustavy obrábění, který svými vlastnostmi bezprostředně umožňuje proces obrábění.“ [12]

Správný výběr nástroje je pro obráběcí proces klíčový. Volba vhodné geometrie a správného řezného materiálu může ve velké míře ovlivnit výrobní náklady a kvalitu výroby. Nejdůležitějším předpokladem pro realizaci obráběcího procesu je vyšší tvrdost nástrojového materiálu než obráběného materiálu. I přes veliký pokrok v oblasti řezných materiálů, neexistuje v dnešní době takový nástrojový materiál, který by byl schopný obrábět univerzálně všechny druhy materiálů. [13]

### 2.1. Geometrie nástroje

Geometrie nástroje ovlivňuje především velikost a rozložení sil, které působí mezi obrobkem a nástrojem. Přesnost, drsnost, kvalita obrobené plochy a odvod třísky jsou vlastnosti, na které má geometrie nástroje také značný vliv. Nástrojovou geometrii definujeme pomocí úhlů v příslušných rovinách. [13], [14]

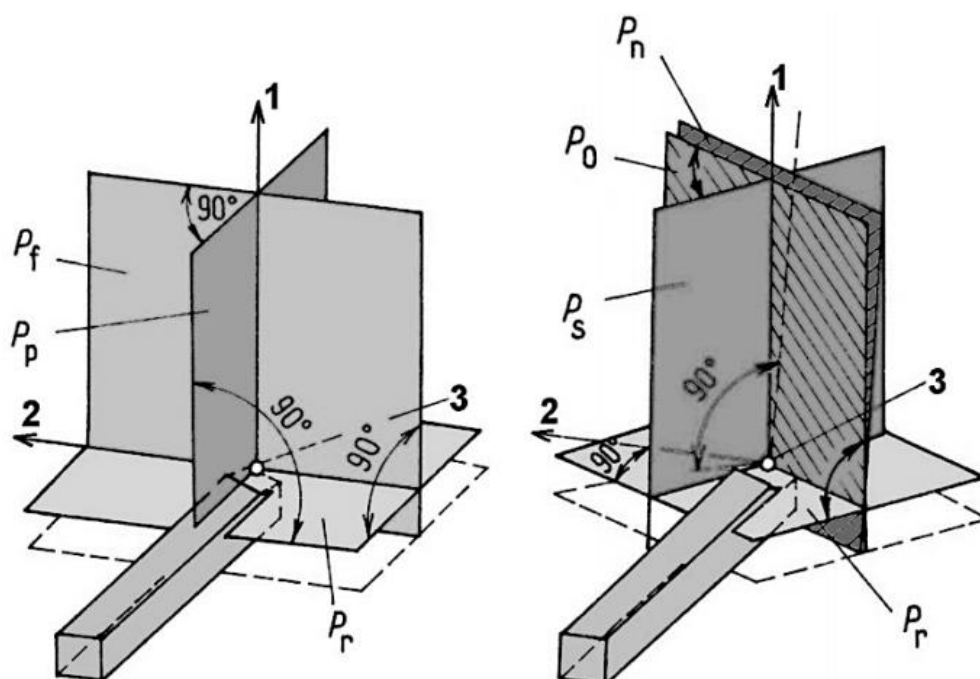


Obrázek 12 – Obecná geometrie řezného nástroje [14]



## Nástrojové roviny

Geometrie nástrojových rovin se využívají při konstrukci, výrobě, kontrole a případném ostření rezných nástrojů. Geometrie řezné části je u nástrojových rovin určována statickým pojetím, které je určeno na základě předpokládaného směru hlavního pohybu a z předpokládaného směru posuvu. Jednotlivé roviny jsou vždy označeny písmenem s příslušným indexem. Mezi nástrojové roviny patří základní, boční, zadní, ostřím ortogonální, normálová a další. [13], [12]

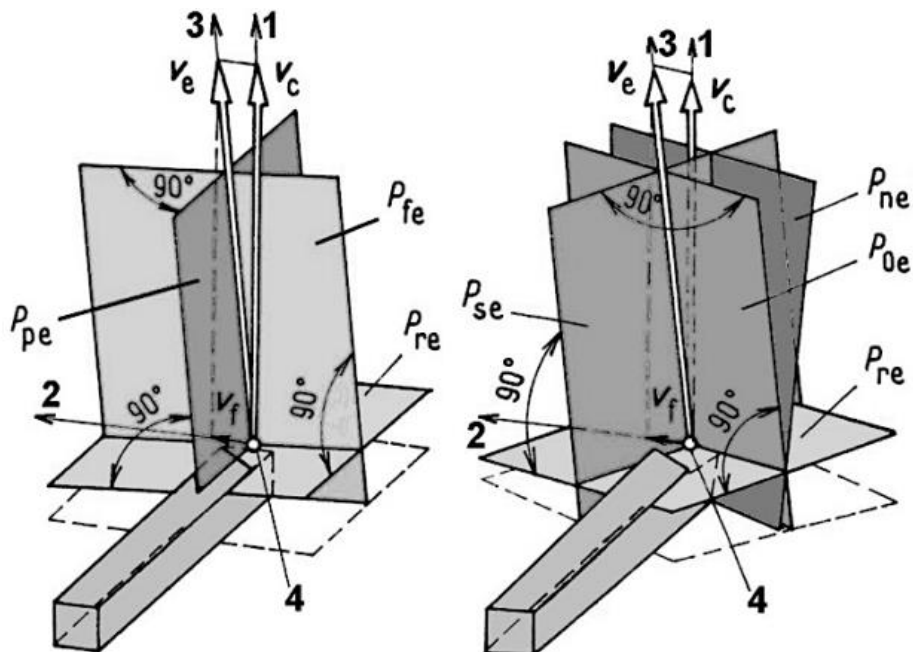


Obrázek 13 – Roviny nástrojové soustavy soustružnického nože [13]

- 1 – směr vektoru hlavního řezného pohybu
- 2 – směr posuvového pohybu
- 3 – uvažovaný bod ostří

## Pracovní roviny

Pracovní roviny slouží k určení geometrie při obráběcím procesu. Jsou označovány zcela totožně, až na jednu odlišnost. U pracovních rovin se navíc přidává k indexu písmeno e. [13]



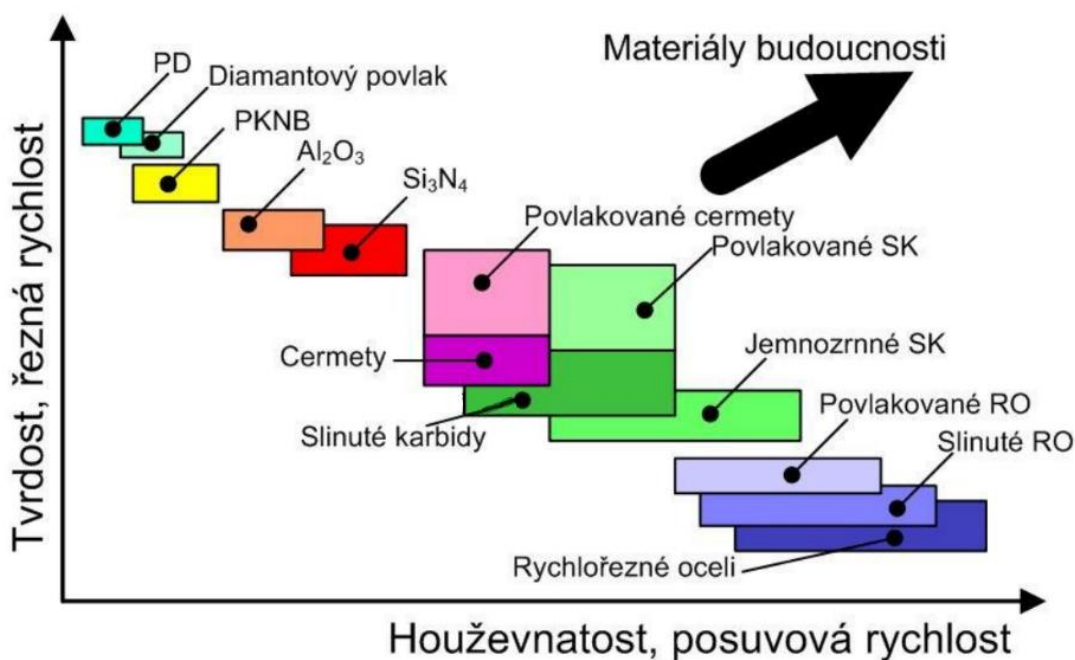
Obrázek 14 – Roviny pracovní soustavy soustružnického nože [13]

- 1 – směr vektoru hlavního pohybu
- 2 – směr posuvového pohybu
- 3 – směr řezného pohybu
- 4 – uvažovaný bod ostří

## 2.2. Nástrojové materiály

Obrábění je proces, při kterém vznikají v místě řezu vysoké teploty a tlaky. Nástroj je v důsledku těchto jevů vystaven vysokému namáhání. Kvůli těmto důvodům musí materiál řezného nástroje splňovat potřebné parametry, které závisí na typu zvoleného obráběcího postupu a také na materiálových vlastnostech obráběného materiálu. Při výběru nástrojového materiálu je kladen důraz na vlastnosti jako je vysoká tvrdost, která ale musí být na druhou stranu zároveň vyvážena potřebnou houževnatostí a vynikající tepelnou stabilitou. [12], [15]





Obrázek 15 – Porovnání vlastností nástrojových materiálů [16]

### 2.2.1. Rychlořezné oceli (HSS)

Rychlořezná ocel je taková ocelová slitina, jež je vysoce legována prvky, které jí dodávají potřebné vlastnosti pro obrábění. Přidáním wolframu dosáhneme zvýšené odolnosti proti opotřebení. Mezi další legující prvky řadíme kobalt, molybden, vanad a chrom. Rychlořezné oceli používáme při výrobě nástrojů se složitou geometrií a tvarem. Rychlořeznou ocel proto využíváme pro nástroje jako jsou vrtáky, výstružníky a frézy. Řezná rychlost se pro rychlořezné oceli pohybuje v řádech několik desítek m/min. [15]

### 2.2.2. Slinuté karbidy (SK)

Slinuté karbidy jsou nástrojové materiály složené ze dvou a více druhů materiálů. V dnešní době jsou nejvíce využívaným nástrojovým materiálem. Hlavní složku slinutých karbidů tvoří tvrdé karbidové částice zaručující nástroji potřebnou tvrdost a chemickou stabilitu. Nejvíce používaným karbidem pro výrobu nástrojů ze slinutých karbidů je karbid wolframu (WC). Mezi další často používané kubické karbidy patří například karbid niobu (NbC), karbid titanu (TiC), karbid tantalu (TaC) a mnohé další karbidy s velikostí zrna 0,8 až 10  $\mu\text{m}$ . Jako hlavní pojivo pro výrobu slinutých karbidů slouží kobalt, který tvoří 5 až 40 procent celkového objemu nástroje. [12]

Z důvodu poměrně velké finanční náročnosti výroby slinutých karbidů se přistoupilo k odlišnému způsobu výroby nástrojů ze slinutých karbidů oproti nástrojům z nástrojové oceli. Místo výroby monolitních nástrojů se přešlo na výrobu vyměnitelných břitových destiček, které se vyrábí dle norem definující například tvar, způsob uchycení a účel použití pro konkrétní typ obráběného materiálu. [12]

### **2.2.3. Cermety**

Slovo CERMET je složenina dvou anglických slov materiálů, které tvoří hlavní složky tohoto nástrojového materiálu. První materiálovou složkou jsou tvrdé keramické částice. Jedná se například titan karbid (TiC), titan nitrid (TiN) a titan karbonitrid (TiCN). Druhou hlavní složkou, ze které jsou cermety složené, jsou kovová pojiva typu nikl, molybden a kobalt. Cermety se vyrábějí podobně jako slinuté karbidy za použití technologie práškové metalurgie. Cermety mají vysokou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, vynikající pevnost za tepla a dobrou chemickou stabilitu. Avšak oproti slinutým karbidům mají nižší houževnatost a odolnost proti teplotním rázům. Cermety díky svým vlastnostem jsou vhodné pro využití při dokončovacích obráběcích operacích a také při jemném obrábění ocelí. Podobně jako u slinutých karbidů se cermety nejčastěji vyrábějí formou normovaných vyměnitelných destiček. Tyto destičky se také často dále povlakuje, a to především metodou PVD, která zaručuje zlepšené finální vlastnosti destičky. [12]

### **2.2.4. Řezná keramika**

Nástroje z řezné keramiky jsou nejčastěji vyráběny slinováním. Slinování řezné keramiky dělíme na slinování za studena, nebo na slinování za tepla. Nejčastější typy materiálů, ze kterého je řezná keramika vyrobena, jsou na bázi oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ) a nitridu křemíku ( $Si_3N_4$ ). Řezná keramika je schopna odolávat mnohem vyšším teplotám než ostatní řezné materiály. Lze s ní proto obrábět i bez použití řezných kapalin. Má velkou tvrdost, dobrou odolnost proti opotřebení a nízkou tepelnou vodivost. Běžné oceli můžeme obrábět řeznou rychlostí až 450 m/min. [12], [15]

### 2.2.5. Kubický nitrid boru KNB

Jedná se o syntetický materiál, který řadíme svou tvrdostí srovnatelnou s diamantem, mezi velmi tvrdé materiály. Jeho výroba probíhá za pomoci syntetizace, a proto ho v přírodní formě nelze nalézt. Jako nástrojový materiál je kubický nitrid boru využíván především kvůli jeho vlastnostem. Vyznačuje se velmi vysokou tvrdostí a pevností, a to i při vysokých teplotách. Jako nástrojový materiál je velmi odolný proti opotřebení a má dobrou chemickou stabilitu vůči železným kovům. Výroba kubického nitridu boru je po technické a ekonomické stránce velmi náročná.

Z důvodu vysoké výrobní ceny používáme kubický nitrid boru pouze ve formě vyměnitelných břitových destiček, případně ve formě, kdy je kubický nitrid boru připájen na vyměnitelnou břitovou destičku ze slinutého karbidu a tvoří pouze špičku, popřípadě řeznou hranu destičky. Vyměnitelné břitové destičky z kubického nitridu boru slouží k obrábění zušlechťených ocelí, tvrzených litin, žáruvzdorných slitin a superslitin. Při obrábění pomocí KNB dosahujeme vysoké kvality obrobeného povrchu, a proto se KNB využívá v leteckém a automobilovém průmyslu, kde se využívá například k obrábění bloků motorů, hřídelí a ložisek. [12], [17]

### 2.2.6. Diamant

Diamant je dle Mohsovy stupnice nejtvrdějším přírodním materiálem. Kromě vysoké tvrdosti patří mezi jeho pozitivní vlastnosti také výborná tepelná vodivost, odolnost vůči abrazivnímu opotřebení a nízký koeficient tření. Negativní vlastnosti ovlivňující obrábění diamantovými nástroji jsou nízká pracovní teplota a vysoká křehkost. Diamant je také vysoce afinitní k železným i neželezným kovům, jako například nikl. Přírodní diamant se jako nástrojový materiál využívá v obrábění pouze zřídka a pro konkrétní účely. Používá se také pro velmi přesné obrábění, kdy je kladen vysoký důraz na jakost povrchu. V průmyslu se k obrábění za pomoci diamantu používá syntetizovaný diamant, který je vyráběn ve formě VBD, kde ale tvoří diamantová složka pouze část destičky podobně jako je tomu například u KNB. Takto vyrobené destičky se využívají k obrábění hliníkových slitin, slitin mědi, plastů a kompozitu. [12]

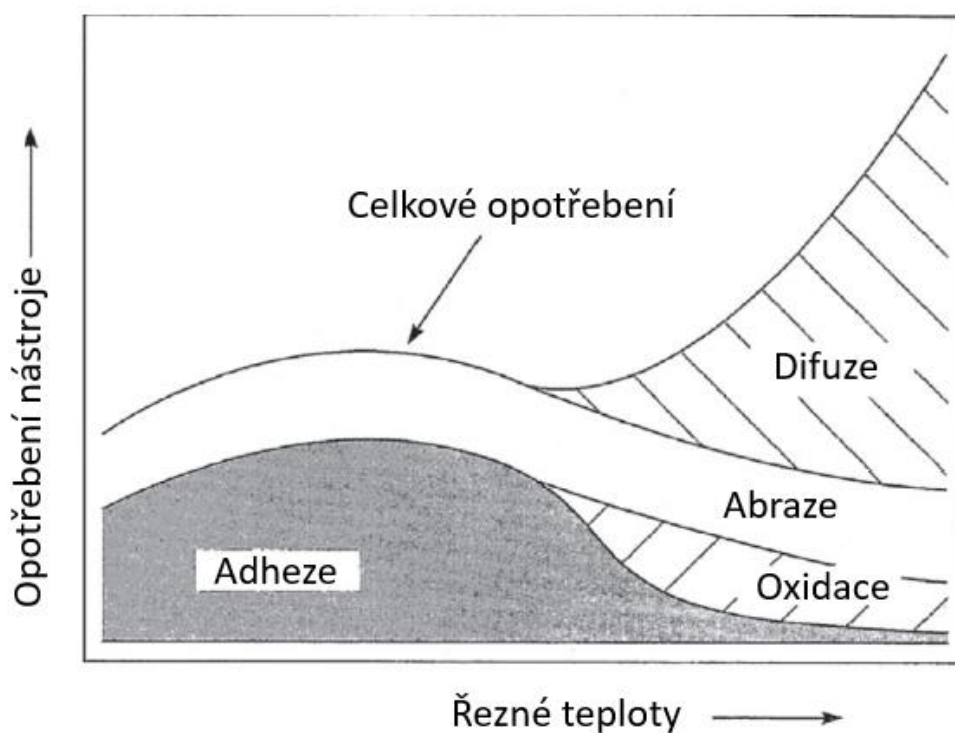
## 2.3. Opotřebení nástroje

Během obráběcího procesu dochází k opotřebovávání nástroje. Břit je vystaven vysokým teplotám a tlakům. Vlivem fyzikálních i chemických vlastností se mění tvar a tím i geometrie. Nástroj není poté schopen dosahovat takové přesnosti a kvality povrchu. [8]

### 2.3.1. Fyzikální příčiny vzniku opotřebení

#### Abráze

Abrazivní opotřebení nastává, když tvrdé částice přijdou do kontaktu s řeznou hranou nástroje, která má podobnou tvrdost jako nejtvrdší částice obráběného materiálu. Velikost abrazivního opotřebení lze kladně ovlivnit povlakováním nástroje.



Obrázek 16 – Mechanismy opotřebení v závislosti na řezné teplotě [18]

#### Adheze

Nastává v oblasti, kde se stýká tříška a čelo, na kterém se nacházejí nerovnosti s vrcholky. V daném místě dochází vlivem vysokých tlaků k navařování části třísky na vyměnitelnou břitovou destičku. Tyto nárůstky mají za následek vytrhávání malých částí z povrchu nástroje. Nízkouhlíkové oceli, korozivzdorné oceli a hliníkové slitiny jsou materiály, které často vlivem adheze způsobují destrukci břitové destičky. [8], [18], [6], [19]

## Difuze

K difuznímu opotřebení dochází při poměrně vysokých teplotách, kdy se začínají přenášet jednotlivé atomy z obráběného do nástrojového materiálu, ale i směrem opačným. Jelikož difuze probíhá jenom při vysokých teplotách, můžeme se s ní setkat většinou u nástrojových materiálů jako slinuté karbidy, řezná keramika, kubický nitrid boru a diamant.

## Oxidace

Jedná se o chemickou reakci, jež nastává v místě řezu při teplotách okolo 800 °C. Jednotlivé složky nástrojových materiálů, což bývá především kobalt, reagují s kyslíkem jako atmosférickou složkou. Vlivem oxidace se nástrojový materiál stává porézním a je tak více náchylný k různým typům opotřebení. Oxidací se také zvyšuje možnost abrazivního opotřebení nástroje.

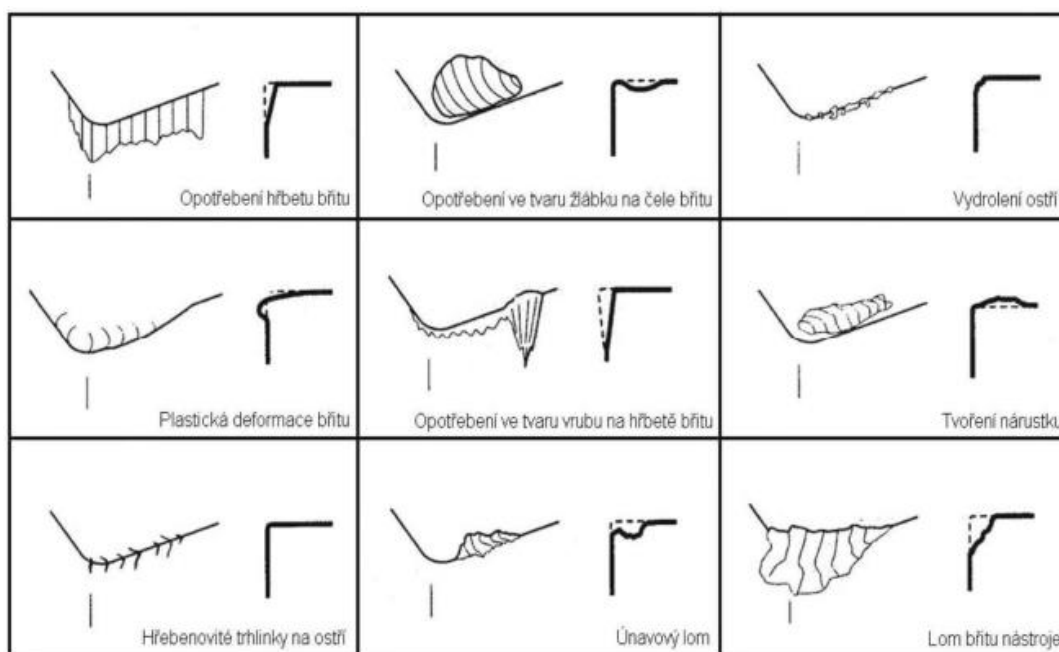
## Korozní opotřebení

Korozní opotřebení patří mezi chemické opotřebení, jež je způsobeno reakcí nástrojového materiálu s řeznou kapalinou obsahující prvky jako je síra nebo chlor. Tyto prvky v kombinaci s vysokým tlakem, pod kterým je kapalina dodávána do místa řezu, způsobují chemickou reakci s povrchovou vrstvou obráběcího nástroje. Povrchová vrstva poté rychle degraduje, a tím se stává nástroj náchylný k poškození. [8], [18], [6], [19]

### 2.3.2. Typy opotřebení nástroje

Na opotřebení řezných nástrojů má vliv mnoho parametrů. Některé z těchto parametrů můžeme ovlivnit správnou volbou řezných podmínek, proto zkoumáme a kontrolujeme opotřebení řezných nástrojů. Určujeme jejich typy, příčiny vzniku a řešíme, jak těmito příčinám předejít, a tím zvýšit životnost a spolehlivost řezných nástrojů. Naším cílem je nalezení optimálního průběhu opotřebení a intervalu pro výměnu řezného nástroje z důvodu zachování kvality výroby. Jednotlivé typy opotřebení jsou znázorněny v tabulce 1. [8]

Tabulka 1 – Klasifikace druhů opotřebení [8]



### 2.4. Trvanlivost a životnost nástroje

Trvanlivost nástroje je pro obráběcí proces jedním z klíčových parametrů, protože každá výměna nástroje vyžaduje velké množství času, který by jinak mohl být využit k obrábění. Životnost nástroje je čas v minutách, po který je nástroj schopen obrábět s dostatečnou přesností a stálou kvalitou povrchu, až do následné výměny řezného nástroje, která je předem stanovena. [20]



Oproti tomu životnost nástroje je daná součtem všech trvanlivostí nástroje. To v praxi znamená, že životnost nástroje uvažujeme od jeho uvedení do provozu až po jeho vyřazení. U monolitních nástrojů se jedná o dobu, kdy nástroj byl upnut do přípravku až po dobu, kdy je nástroj nutno vyjmout a nechat přeostřit. U VBD jde o dobu, kdy byla využita všechna použitelná ostří destičky. [21]

#### **Životnost monolitního nástroj:**

$$Z = \sum T_i = (x + 1) \cdot T \text{ [min]} \quad (8)$$

Kde:

$T_i$  – jednotlivé trvanlivosti [min]

$T$  – aritmetický průměr hodnot  $T_i$  [min]

$x$  – počet možných ostření nástroje [–]

#### **Životnost VBD:**

$$Z = \sum T_i = q \cdot T \text{ [min]} \quad (9)$$

Kde:

$T_i$  – trvanlivost jednotlivých ostří destičky [min]

$T$  – aritmetický průměr hodnot  $T_i$  [min]

$q$  – počet použitelných ostří destičky [–]

### Taylorův vztah:

Soustružení, frézování, vrtání a mnoho dalších operací jsou způsoby, kterými můžeme obrábět materiály, jež mají specifické mechanické vlastnosti. Pro každý materiál je potřeba zvolit vhodnou kombinaci řezných podmínek společně se správným materiálem řezného nástroje. Řezná rychlost, velikost posuvu, šířka záběru a řezné prostředí jsou hlavní podmínky ovlivňující trvanlivost nástroje. Z těchto podmínek má na trvanlivost největší vliv právě řezná rychlost. Tohoto jevu si všiml na počátku 20. století F. W. Taylor, podle kterého je pojmenován následující základní vztah pro určení trvanlivosti nástroje. [21]

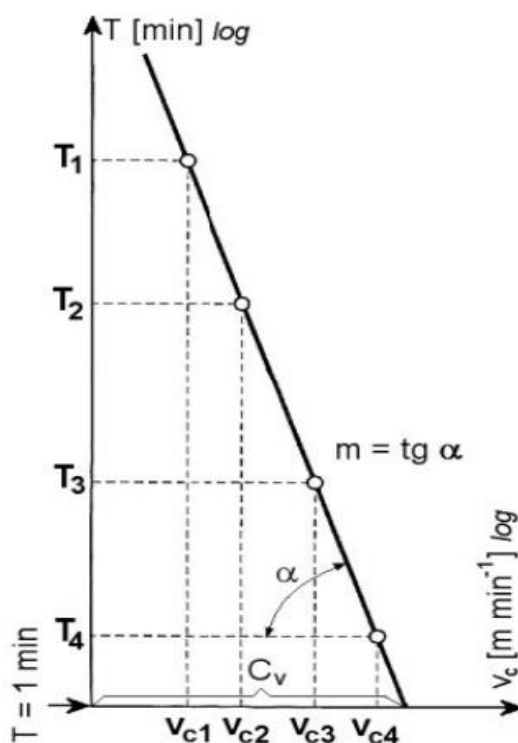
$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \text{ [min]} \quad (10)$$

Kde:

$C_T$  – konstanta [–]

$v_c$  – řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

$m$  – exponent (míra závislosti řezné rychlosti na trvanlivosti) [–]



Obrázek 17 – Zlogaritmovaný diagram  $T-v_c$  [21]



### 3. Obrobitelnost materiálů

Obrobitelnost materiálu je jedním z nejdůležitějších pojmů pro technologii obráběcího procesu. V praxi to znamená, jak moc dobře jde konkrétní typ materiálu zpracovávat při využití některé z metod obrábění. Znalost obrobitelnosti se využívá primárně pro stanovení řezných podmínek. [8]

Obrobitelnost lze definovat např. následující formulací:

*„Obrobitelnost je schopnost materiálu být obráběn konkrétním způsobem danou technologií, určitým nástrojem, v určitém řezném prostředí apod.“ [6]*

Z pohledu hlavních charakteristik obrobitelnosti dělíme obrobitelnost na dva základní druhy. Jedná se absolutní a relativní obrobitelnost:

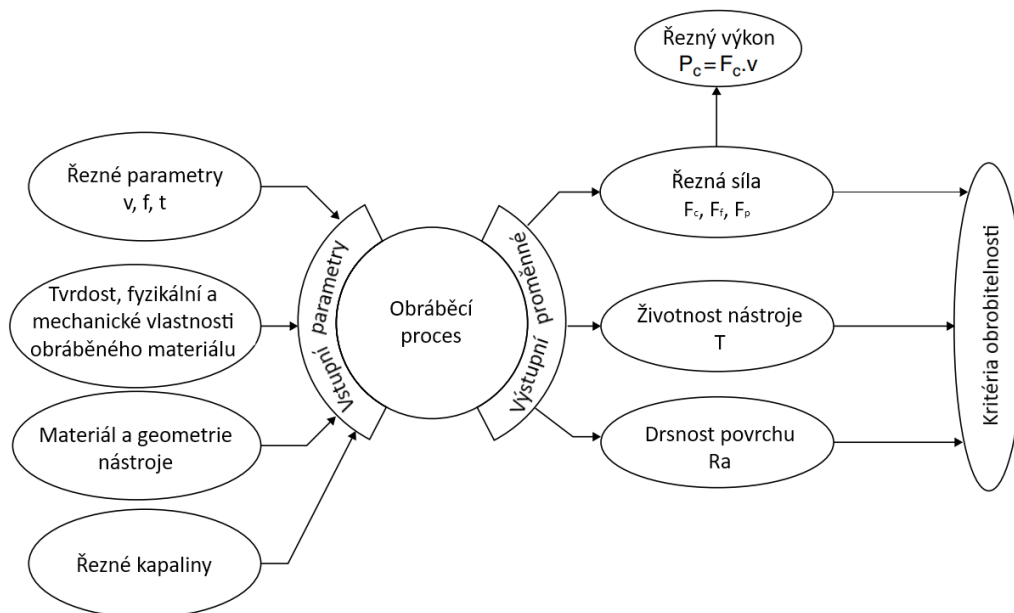
*„Absolutní obrobitelnost je charakterizována funkčním vztahem mezi parametry, které s obrobitelností souvisí, nebo určitou velikostí dané veličiny charakterizující obrobitelnost“ [6]*

*„Relativní obrobitelnost je charakterizována bezrozměrnými čísly, která udávají poměr velikostí určité veličiny, a sice poměr velikosti této veličiny vztahující se k danému materiálu obrobku, respektive nástroji a velikosti této veličiny odpovídající etalonovému materiálu obrobku, resp. nástroji.“ [6]*

Faktory, které mají vliv na výslednou obrobitelnost materiálu:

- 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
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu [8]

Schéma parametrů ovlivňující obrobiteľnosť materiálu:



Obrázek 18 – Vstupní parametry a výstupní proměnné ovlivňující obrobiteľnosť [22]

### 3.1. Značení obrobiteľnosti

Technické konstrukční materiály byly z důvodu snazšího vyhodnocování obrobiteľnosti rozděleny dle norem do skupin. Tyto skupiny značíme malými písmeny:

- a – litiny
- b – oceli
- c – těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi)
- d – lehké neželezné kovy (hliník a slitiny hliníku)
- e – plastické hmoty
- f – přírodní nerostné hmoty
- g – vrstvené hmoty
- v – tvrzené litiny pro výrobu válců

V každé skupině je jeden etalonový materiál, který slouží k porovnávání se zkoušeným materiálem. V rámci vztahu se poté stanoví relativní obrobiteľnosť materiálu v rámci skupiny, pod kterou zkoušený materiál spadá. [8]

### 3.2. Hodnocení obrobiteľnosti

*„Obrobiteľnosť hodnotíme predovšetkým z hľadiska intenzity opotrebovania břitu, ďalej tiež z hľadiska teplotného, silového, technologického a kvalitatívneho.“ [6]*

Pro hodnotení obrobiteľnosti najčastejši používame faktor intenzity opotrebovania řezné hrany nástroje. Hlavným kritériem je Taylorův vzťah a hodnoty řezných rychlostí, podle kterých se za pomoci následujícího vzťahu dá určit index obrobiteľnosti:

$$i = \frac{v_T}{v_{Tet}} \quad (11)$$

Kde:

$v_T$  – řezná rychlost odpovídající určité trvanlivosti nástroje pro zkoušený materiál

$v_{Tet}$  – řezná rychlost odpovídající určité trvanlivosti nástroje pro etalonový materiál

[6]

### 3.3. Zkoušky obrobiteľnosti

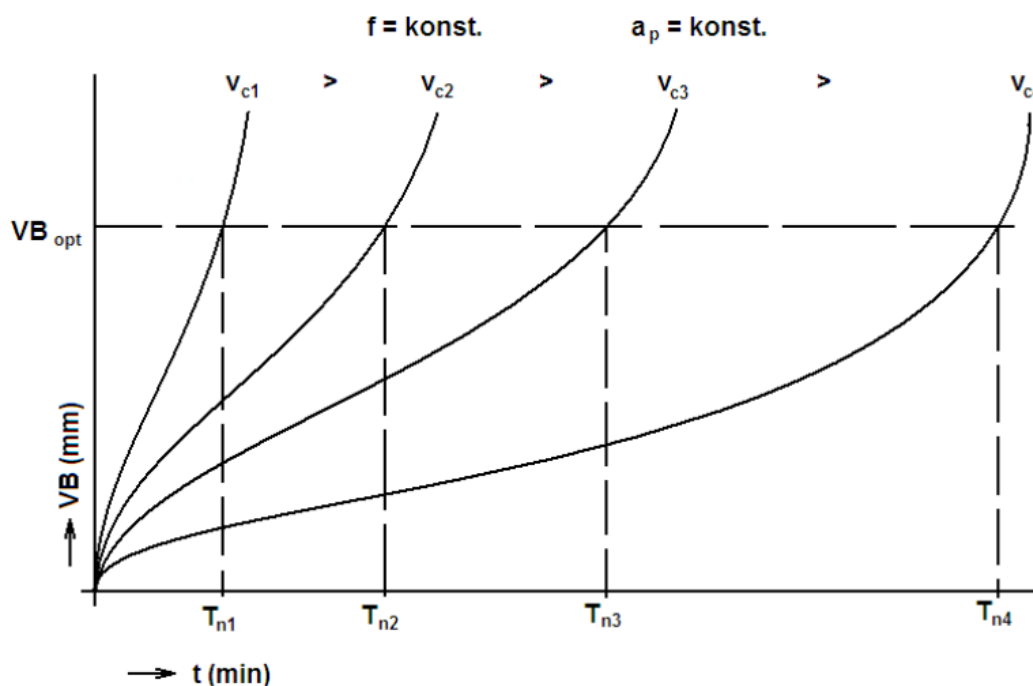
Obrobiteľnosť každého materiálu se může lišit na základě zvolené obráběcí metody a druhu materiálu. Ať už se jedná o soustružení, broušení či frézování, je potřeba provádět zkoušky pro jednotlivé druhy těchto obráběcích operací zvlášť. Zkoušky obrobiteľnosti dělíme dle doby trvání na zkoušky dlouhodobé a krátkodobé. Krátkodobé zkoušky pak ďalej rozdělujeme na zkoušky přímé a nepřímé. [21]

### 3.3.1. Dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti

Dlouhodobá zkouška obrobiteľnosti je jedním ze základních druhů zkoušek. Slouží především pro stanovování míry objektivit zkoušek obrobiteľnosti. Zkouška probíhá odebráním materiálu obráběním. Materiál je soustružen, nebo frézován konstantními hodnotami řezných parametrů jako je posuv, hloubka řezu, řezný nástroj a jeho geometrie. Zkouška probíhá pro různé řezné rychlosti vždy až do doby, kdy je ostří nástroje optimálně otupeno. Tento typ zkoušky není používán ve srovnání s krátkodobými zkouškami tak často. Hlavním důvodem je jeho časová a finanční náročnost, protože odebíráme velké množství materiálu po dlouhou dobu. [21]

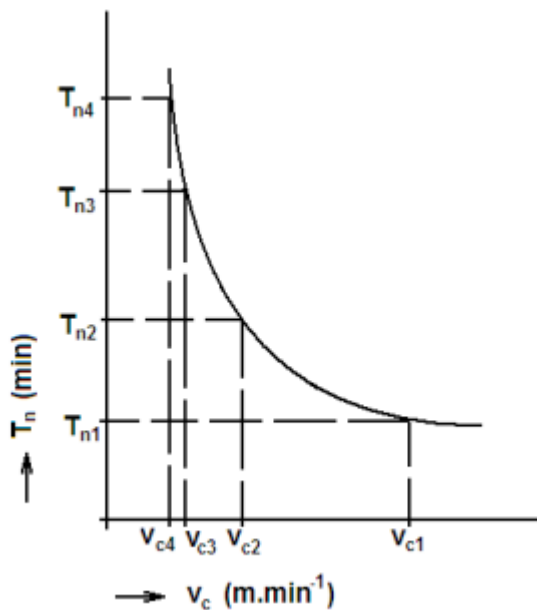
#### Popis průběhu dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti:

1. Změří se časový průběh opotřebení na hřbetu nástroje  $VB_B$  pro několik odlišných hodnot řezných rychlostí při konstantní velikosti posuvu  $f$  a hloubce řezu  $a_p$ . Z naměřených hodnot se sestrojí křivky otupení, které ukazují vliv řezné rychlosti na opotřebení nástroje v čase viz obrázek 19. [21]



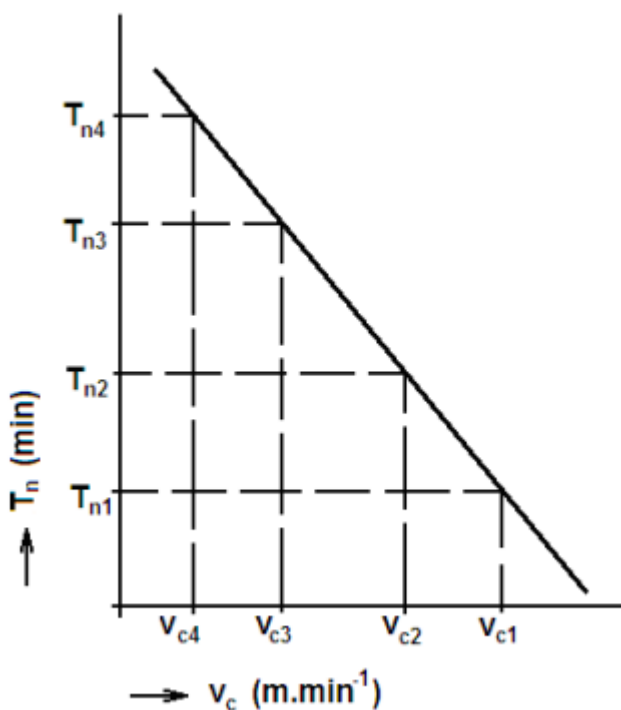
Obrázek 19 – Křivky otupení pro proměnné řezné rychlosti [21]

2. Následně se určí kritérium opotřebení  $VB_{opt}$  a stanoví se náležité trvanlivosti pro dílčí řezné rychlosti.



Obrázek 20 – Stanovení jednotlivých trvanlivostí na základě kritéria opotřebení [21]

3. Nakonec se sestrojí závislost  $T_n = f(v_c)$  v logaritmických souřadnicích. [OŘN][21]



Obrázek 21 – Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti [21]

### 3.3.2. Krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti

Krátkodobé zkoušky slouží k rychlému rozdělení nových materiálů do skupin podle jejich stupně obrobiteľnosti. Jsou také často využívány pro určování stupně obrobiteľnosti jednotlivých dodávek stejného druhu materiálu nebo při určování relativní obrobiteľnosti z taveb nově vyvíjených materiálů. Tento typ zkoušek je používán především kvůli krátké době trvání a nízké spotřebě materiálu oproti dlouhodobým zkouškám obrobiteľnosti. Nevýhodou krátkodobých zkoušek je jejich nízká objektivnost. [8]

#### Přímé metody

Obrobiteľnost materiálů se u přímých metod zjišťuje pomocí intenzity opotřebení nástroje a podmínek, které jsou smluvně či jinak specifikovány a upraveny. [8]

#### **Čelní krátkodobá zkouška**

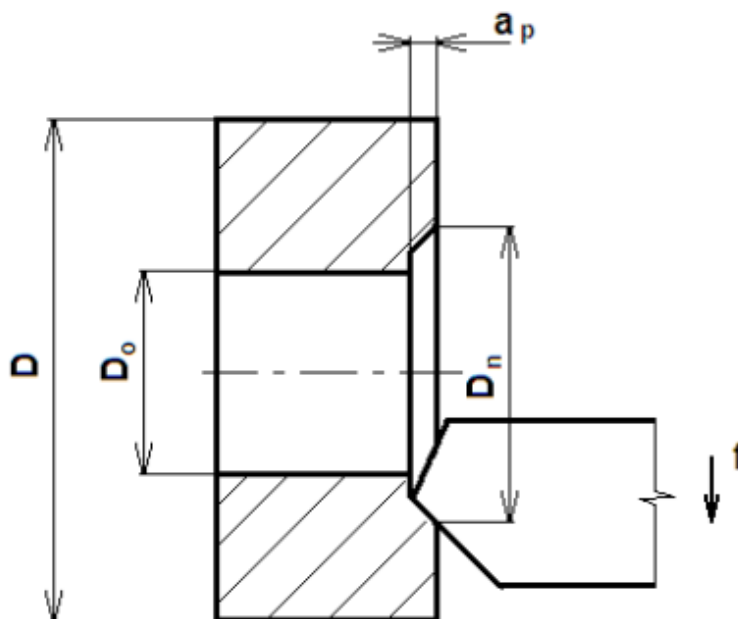
Čelní krátkodobá zkouška je prováděna za pomoci zkušebních disků. Soustružíme mezikružní na čele disků o průměru  $D_0$  a  $D$ . Obrábění probíhá za stálých otáček, posuvu a hloubky řezu od průměru  $D_0$ . Vlivem narůstajícího průměru se začíná zvětšovat i velikost řezné rychlosti. Takto obrábíme zkušební disky až do doby, kdy dosáhneme předepsaného opotřebení nástroje. Místo, kde jsme dosáhli předepsaného opotřebení označujeme průměrem  $D_n$ . Nakonec se porovnájí hodnoty dosažených řezných rychlostí zkoumaného materiálu vůči řezným rychlostem dosažených při obrábění příslušného etalonu. Nevýhodou této metody je potřeba výroby obrobku, který má veliký poměr průměru k délce. [8]

$$K_v = \frac{v_{c_{zk}}}{v_{c_{et}}} \quad (12)$$

Kde:

$v_{c_{zk}}$  – řezná rychlost zkoumaného materiálu [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

$v_{c_{et}}$  – řezná rychlost etalonového materiálu [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]



Obrázek 22 – Schéma čelní zkoušky obrábitelnosti [8]

### Mikrozkouška obrábitelnosti

Tento typ zkoušky lze provádět pouze u obráběcích nástrojů, které mají lapované funkční části. Vlivem lapování dosahujeme výrazně nižšího opotřebovávání nástroje v počáteční fázi obráběcího procesu. Na základě nižšího opotřebení nástroje lze velice rychle docílit požadovaných hodnot pro sestavení závislosti  $T_n = f(v_c)$  při značně menší spotřebě materiálu. Opotřebení na hřbetě nástroje poté vyháží z hodnot  $VB_B = 0,1 \text{ mm}$ , z čehož lze vyčíst, že závislost  $T_n - v_c$  je ve tvaru rovnoběžek.

### Snížení míry opotřebení

Zkoušení obrábitelnosti za pomoci snížení míry opotřebení vychází ze základního principu dlouhodobé zkoušky. Na rozdíl od běžné dlouhodobé zkoušky je zde snížené kritérium obrábitelnosti na  $v_{c5}$ . To znamená, že obrábíme zkoumaný materiál konstantní řeznou rychlostí po dobu 5 minut s předem stanovenou mezní mírou opotřebení nástroje. Tato míra nabývá hodnot od 0,2 až 0,3 mm. Takto provedená zkouška vykazuje sníženou míru objektivnosti, kdy z důvodu krátkodobosti zkoušky může být ovlivněn index hodnocení obrábitelnosti. [8]

### **Snížená řezivost nástroje**

Stejně jako metoda, při které se sníží míra opotřebení nástroje, vychází zkouška snížení řezivosti nástroje z principu dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti. Snížení řezivosti nástroje dosahujeme náležitým tepelným zpracováním nástroje. U takto upraveného nástroje jsme schopni docílit rychlejší degradace nástroje, při stejných řezných rychlostech v porovnání s totožným nástrojem, který nebyl tepelně zpracován. Mezi další možnosti snížení řezivosti nástroje patří také negativní ovlivnění nástrojové geometrie.

### **Zvýšení řezné rychlosti**

Tento typ metody využívá ke snížení trvanlivosti břítu nástroje změnu řezných podmínek. Především se jedná o řeznou rychlost, která se stanoví tak, aby byla zaručena krátkodobost zkoušky.

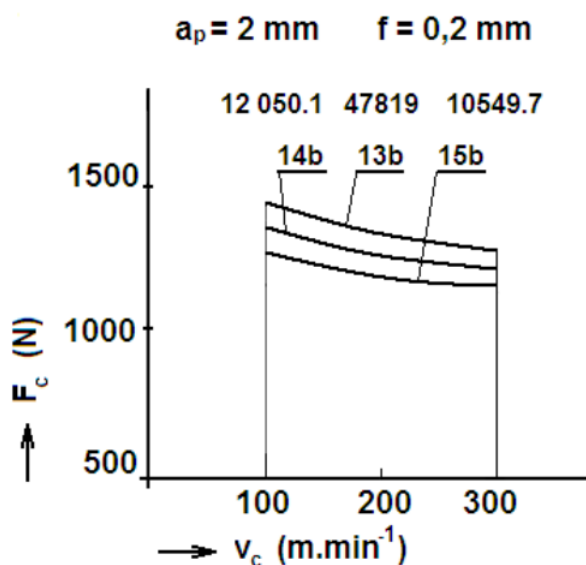
### **Nepřímé metody**

Metody měření nepřímým způsobem vychází z definovaných vztahů mezi opotřebením břítu a řeznými podmínkami, které vymezuje řezný proces. [8]

### **Dynamická metoda**

Hlavní podstata dynamické metody se zakládá na teoreticky i experimentálně dokázané podstatě, že materiál s vyšší houževnatostí klade při shodných řezných podmínkách z hlediska obrobiteľnosti vždy větší měrný řezný odpor. Obrobiteľnost stanovíme na základě závislosti složky řezné síly  $F_c$  na řezné rychlosti  $v_c$  tak, jak je stanoveno na obrázku 23. Hodnoty závislosti, které jsme si stanovili pro zkoumaný materiál, porovnáme s etalonovým materiálem, jež byl podroben dlouhodobé zkoušce obrobiteľnosti. Závislost zbývajících silových složek řezání  $F_f$ ,  $F_p$  z důvodu nízkého významu neuvádíme. Na obrázku 23 lze vidět ukázkou závislosti  $F_c$  na  $v_c$ , která byla stanovena pro konkrétní řezné podmínky. [8]





Obrázek 23 – Závislost řezné složky síly obrábění na řezné rychlosti [8]

### Měření tvrdosti obrobku

Postup u této metody probíhá vtlačováním kuželu z tvrdokovu a následným změřením průměru vtisku. Takto se provede změření tvrdosti nejdříve pro etalonový a poté i pro zkoumaný materiál. Výsledný index obrobitelnosti určíme dle následujícího vztahu:

$$K_v = \frac{d_e}{d_{zk}} \quad (13)$$

Kde:

$d_e$  – průměr vtisku do etalonového materiálu [mm]

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

Tento typ zkoušky je po materiálové stránce nenáročný a k měření lze využít standartních tvrdoměrů. [8]

## Mikrometrická metoda

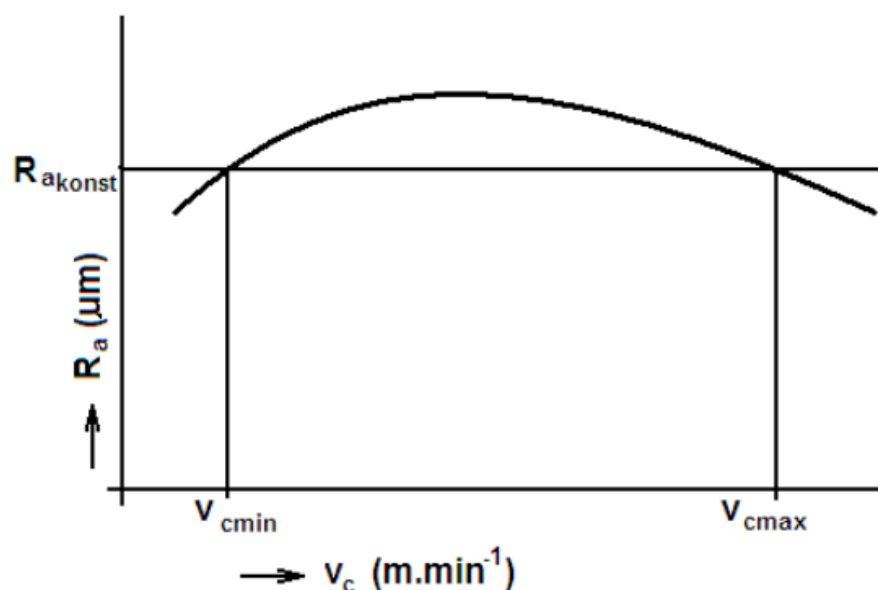
Tato zkouška je založena na principu porovnávání rozdílu řezných rychlostí etalonového a zkoumaného materiálu při shodných hodnotách drsnosti povrchu. Tato měřicí metoda je pouze doplňková, a proto ji nelze brát jako samostatné kritériu. V případě, že závislost mezi řeznou rychlostí a parametrem drsnosti  $R_a$  je odlišná. Stává se určení indexu obrobitelnosti velice obtížné. Index obrobitelnosti dopočítáváme ze vztahu:

$$K_v = \frac{(v_{c \max} - v_{c \min})_e}{(v_{c \max} - v_{c \min})_{zk}} \quad (14)$$

Kde:

$(v_{c \max} - v_{c \min})_e$  – rozdíl řezných rychlostí etalonového materiálu [ $m \cdot \min^{-1}$ ]

$(v_{c \max} - v_{c \min})_{zk}$  – rozdíl řezných rychlostí zkoušeného materiálu [ $m \cdot \min^{-1}$ ] [8]



Obrázek 24 – Mikrometrická metoda [8]

## Porovnání tvaru třísky

Jako u předchozí metody se jedná o typ doplňkové zkoušky, která je založena na srovnávání tvaru a druhu třísky. Vzájemně se porovnávají jednotlivé parametry třísky pro etalonový a zkoumaný materiál, které byly obráběny za totožných řezných podmínek. Výsledný index obrobiteľnosti se určí následujícím vztahem:

$$K_v = \frac{r_{te}}{r_{tzk}} = \frac{K_{zk}}{K_e} \quad (15)$$

Kde:

$r_{te}$  – poloměr svinované třísky etalonového materiálu [mm]

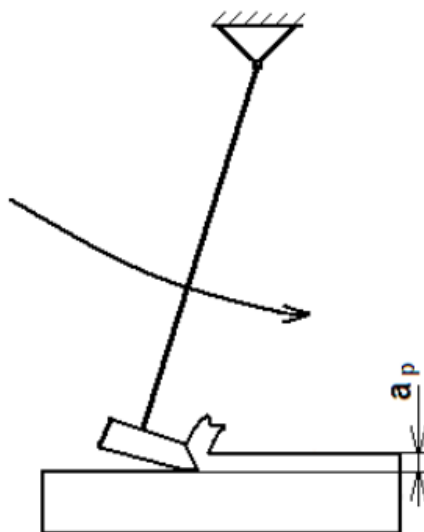
$r_{tzk}$  – poloměr svinované třísky zkoumaného materiálu [mm]

$K_{zk}$  – koeficient přechování třísky testovaného materiálu

$K_e$  – koeficient přechování třísky referenčního materiálu

## Leyensetterova metoda

Jde o poměrně jednoduchou metodu zjišťování obrobiteľnosti, která se svým principem podobá zkoušce Charpyho kladiva. Jedná se o nůž, který je upevněn v určité výšce, ze které je spuštěn do zkoumaného nebo etalonového materiálu, kde zanechá žlábek. Odečtením jednotlivých parametrů žlábků, jako je například hloubka, lze pomocí následujícího vztahu určit index obrobiteľnosti materiálu. [8]



Obrázek 25 – Schéma funkce Leyensetterova kladiva [8]

$$K_v = \frac{a_{pzk}}{a_{pe}} \quad (16)$$

Kde:

$a_{pzk}$  – hloubka vniknutí nože do zkoumaného materiálu [mm]

$a_{pe}$  – hloubka vniknutí nože do referenčního materiálu [mm]

### Vrtání při konstantním tlaku

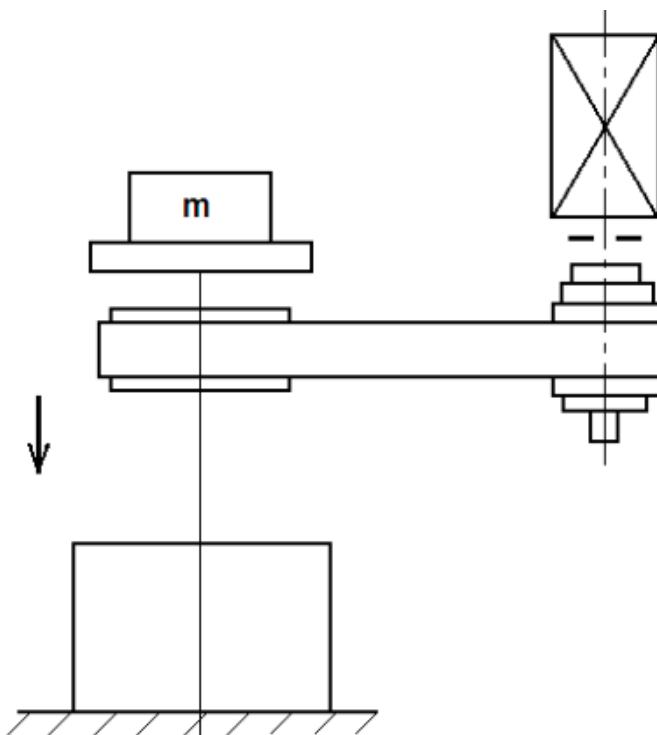
Metoda spočívá ve vyvrtávání otvoru do etalonového a zkoumaného materiálu za pomoci vrtáku až do jeho absolutního otupení. U vyvrtaných otvorů se potom určí hloubka, která se následně porovná za pomoci příslušného vztahu:

$$K_v = \frac{h_{zk}}{h_e} \quad (17)$$

Kde:

$h_{zk}$  – vyvrtaná hloubka otvoru do zkoušeného materiálu [mm]

$h_e$  – vyvrtaná hloubka otvoru do referenčního materiálu [mm] [8]



Obrázek 26 – Schéma vrtání při konstantním tlaku [8]

Zjišťovat obrobiteľnosť môžeme tak tiež obdobnou metódou vrtání, kedy vrtáme do predem stanovené hĺbky nemennou posuvnou silou. Rezná rýchlosť a priemer vrtáku je predem stanoven. Vrtáme do predem predvrtaných otvorů, aby bolo zamedzeno vlivu príčného ostří. Obrobiteľnosť sa stanoví na základe času vrtání nebo na veľkosti posuvu. Veľkosť posuvu priamo určuje mieru obrobiteľnosti materiálu. To znamená, že čím väčší je veľkosť posuvu při konstantních rezných podmínkách, tím je lepší i obrobiteľnosť zkoumaného materiálu. Hlavním kladem této metody je především její rychlost. [8]

### Pomocí teploty řezání

Jedná se o metodu, u které dosahujeme vysokého stupně objektivitě při poměrně malé spotřebě materiálu. Princip této metody spočívá v měření střední teploty řezání během obráběcího procesu, a to pro etalonový i zkoumaný materiál při stálých hodnotách průřezu třísky, avšak pro tři a více různých hodnot rezných rychlostí. Teploty bývají měřeny za pomoci metody přirozeného termočlánku nebo termodu. Důvodem využití těchto metod je vyloučení chemického vlivu materiálu. Obrobiteľnosti stanovíme dle vztahu:

$$K_v = \frac{\theta_e}{\theta_{zk}} \quad (18)$$

Kde:

$\theta_e$  – střední teplota řezání etalonového materiálu [°C]

$\theta_{zk}$  – střední teplota řezání zkoumaného materiálu [°C]

Zjednodušeně se dá říci, že čím je naměřená teplota při obrábění menší, tím je materiál lépe obrobiteľný. Nevýhodou určování obrobiteľnosti za pomoci teploty řezání je to, že zkoušku lze provádět pouze pro materiály patřící do jedné materiálové skupiny jako např. uhlíkové oceli, slitiny hliníku apod. [8]

**Měření hloubky zpevněné vrstvy**

U této metody dosahujeme výsledného indexu obrobitelnosti pomocí měření mikrotvrdomosti zpevněné vrstvy, která se nachází těsně pod obrobeným povrchem. Měření provádíme pro etalonový a zkoumaný materiál. Výsledné naměřené hodnoty dosadíme do následujícího vztahu:

$$K_v = \frac{HM_e}{HM_{zk}} \quad (19)$$

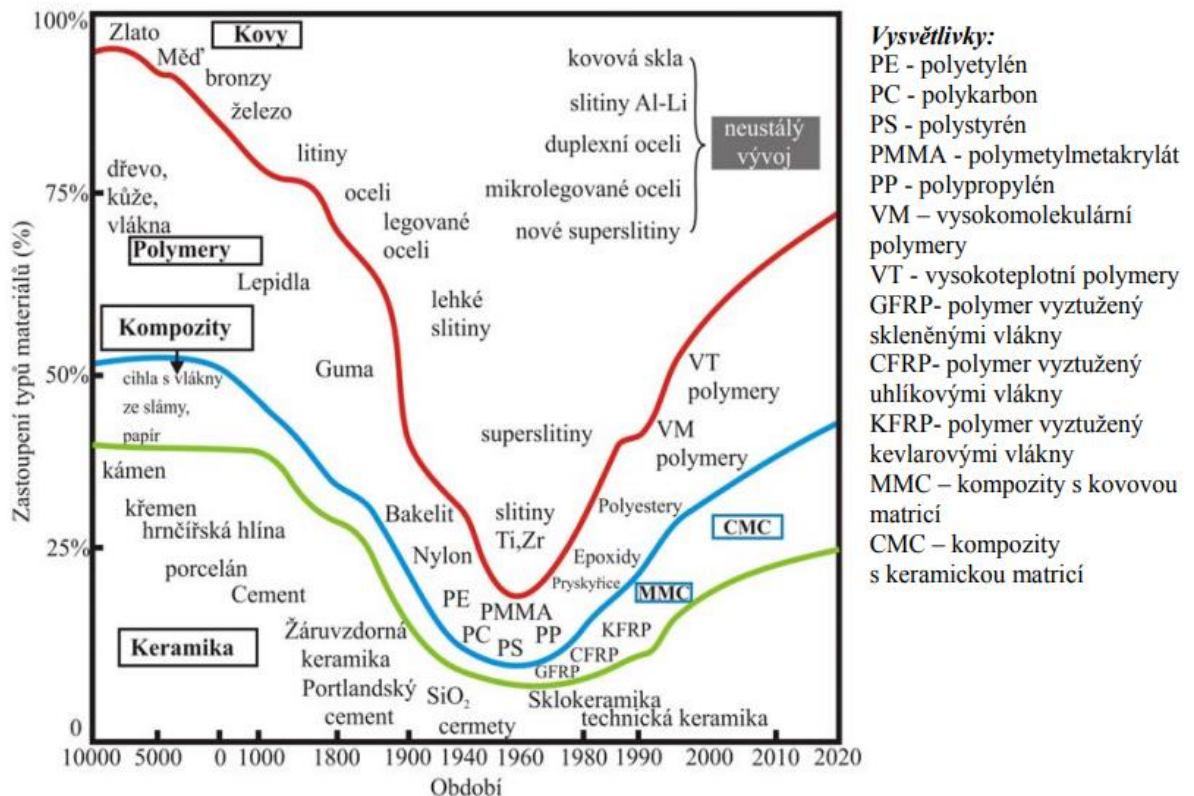
Kde:

$HM_e$  – hloubka zpevněné vrstvy etalonového materiálu [ $\mu\text{m}$ ]

$HM_{zk}$  – hloubka zpevněné vrstvy testovaného materiálu [ $\mu\text{m}$ ] [8]

## 4. Nově vyvíjené materiály a jejich obrobiteľnosť

Rozvoj ľudskej civilizácie bol vždy priamo spätý s výzkumom a využívaním nově vyvíjených materiálov, ktoré disponovali stále lepšími vlastnosťmi. Nově vyvíjené materiály vždy měly a budú mať zásadný vliv na zavádzení nových vynálezů do života ľudí. Na obrázku 27 lze vidět přehled vývoje využívání jednotlivých druhů materiálu v průběhu času.

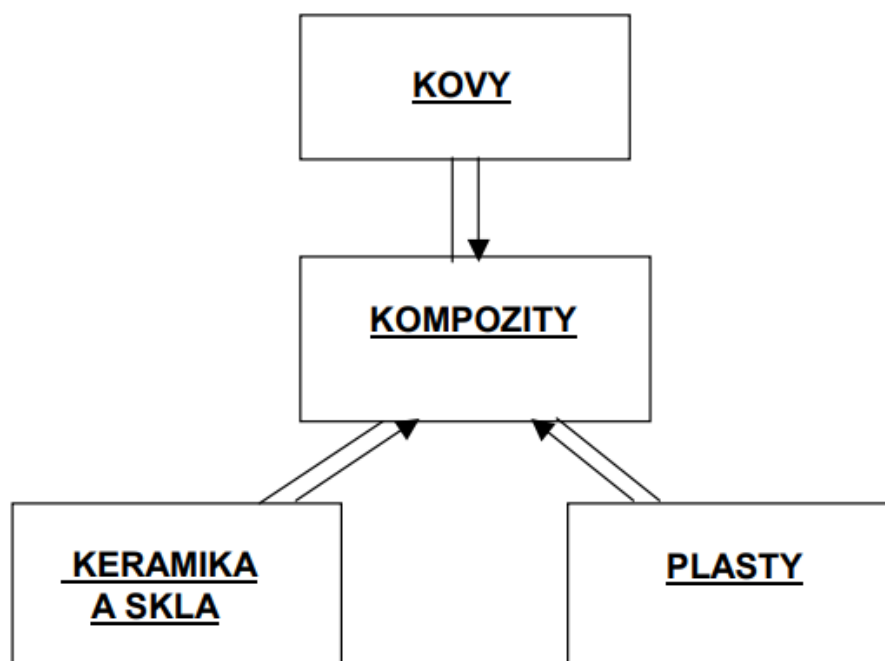


Obrázek 27 – Přehled vývoje používaných materiálů [23]

V současné době je tempo vývoje a zavádzení nových materiálov do praxe nejrychlejší v celé historii lidstva. Nově materiály jsou vyvíjeny za konkrétním účelem tak, aby byly schopny odolávat náročným pracovním podmínkám a měly specifické vlastnosti. V dnešní době máme k dispozici více než 50 tisíc běžně dostupných materiálov. Při takto vysokém počtu dostupných materiálov je důležité si stanovit požadavky, které budou na materiál kladeny. Hlavními parametry pro výběr správného materiálu je složení, vlastnosti, zpracování a typ aplikace daného materiálu. [23]

## 4.1. Rozdělení materiálů

Inženýrské konstrukční materiály dělíme v dnešní době do čtyř základních skupin. Každá skupina vždy obsahuje materiály, které mají srovnatelné vlastnosti a shodují se ve výrobních a zpracovatelských technologiích. [24]



Obrázek 28 – Základní rozdělení technických materiálů [24]

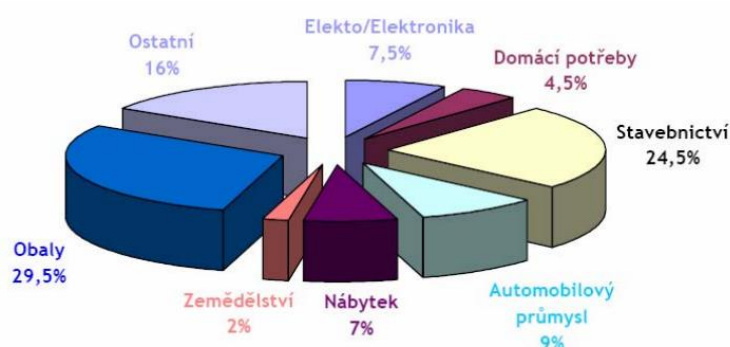
### 4.1.1. Kovové materiály

Typickými vlastnostmi kovových materiálů je především vysoký modul pružnosti, houževnatost, elektrická vodivost a dobrá tvárnost. Kovy lze zpevňovat legováním nebo tepelným zpracováním. Materiály se pouze v čistém stavu využívají velmi málo, protože nemají tak dobré vlastnosti jako slitiny. Slitiny kovů rozdělujeme na slitiny železa a slitiny neželezných kovů. Slitiny dále může třídit na základě materiálu, který je v ní obsažen nejvíce. Největší zastoupení mají slitiny železa, které dále členíme na oceli a litiny. Další druhy jsou např. slitiny mědi, hliníku, niklu a další. Slitiny jsou složeny ze dvou a více prvků. Kromě základního prvku se do nich dostávají prvky doprovodné. Tyto prvky mají většinou negativní vliv na mechanické vlastnosti. Z důvodu vylepšení vlastností se do slitin přidávají přísadové prvky, kterým se také říká prvky legující. Přidáním legujících prvků dosahujeme potřebných vlastností. [25]



#### 4.1.2. Polymery

Polymery, jež můžeme také znát pod pojmem plasty, jsou makromolekulární látky skládající se z velkých polymerních molekul. Vyznačují se nízkým modulem pružnosti a mají nízký koeficient tření. Kladnými vlastnostmi polymerů jsou jejich lehkost a pevnost. Pevnost polymerů se odvíjí od teploty, kdy s narůstající teplotou ztrácí polymery svou pevnost. Plasty vznikají procesem nazývaným polymerace. Při procesu polymerace se kromě makromolekulárních látek používají i další složky, které ovlivňují výsledné vlastnosti plastů. Jedná se např. o maziva, změkčovadla, stabilizátory, pigmenty a jiné přísady. Polymery se začaly masově používat až ve 20. století. V současnosti se polymery vyskytují téměř ve všech odvětvích a používají



Obrázek 29 – Rozdělení světové spotřeby polymerů v jednotlivých odvětvích (2005) [25]

se především jako obalové materiály. Na obrázku 29 lze vidět rozdělení využití polymerů v roce 2005 pro různá odvětví průmyslu. [25], [26], [24]

#### Dělení polymerů:

**Termoplasty** – jedná se o druh polymeru, který je při standardních pokojových teplotách tvrdý a nepříliš houževnatý. S rostoucí teplotou se stává plastický a lze ho poměrně dobře tvarovat za pomoci tepla. Při působení tepla se nemění chemická struktura, a proto je možné tvarování opakovat. Mezi termoplasty patří např. polyethylen, polypropylen, PVC a jiné. [26], [25]

**Reaktoplasty** – vznikají chemickým procesem nazývaným polymerace. Výsledného tvaru reaktoplastů se dosahuje při jejich vzniku za působení chemické reakce. Po proběhnutí chemické reakce již nelze jejich tvar měnit. Reaktoplasty jsou tvrdé a křehké. Mezi nejznámější zástupce reaktoplastů patří polyfenolformaldehyd. Můžeme ho také znát pod pojmem bakelit. [26], [25]

**Elastomery** – jsou polymery vyznačující se vysokou elastickou deformací při nízkém napětí. Mezi hlavní zástupce elastomerů patří kaučuky, jež slouží k výrobě mnoha druhů pryží. [25]

#### 4.1.3. Keramické materiály

Keramické materiály jsou anorganické látky heterogenní polykrystalické struktury. Jedná se o nekovové materiály vyráběné žárovým slinováním při vysokých teplotách. Základními vlastnostmi keramiky jsou vysoká tvrdost, žáruvzdornost a dobrá korozní odolnost. Keramika může sloužit také jako tepelný a elektrický izolant. Keramické materiály rozdělujeme na dva základní druhy. Prvním druhem keramických materiálů je porézní keramika, která také bývá označována jako tradiční. Mezi výrobky z tradiční keramiky patří např. stavební, zdravotnická, užitková a umělecká keramika. Druhým druhem je keramika technická, často označována jako konstrukční. Tento druh keramiky nachází uplatnění jako řezná, metalurgická, elektrotechnická, kosmická a biokeramika. [25]

#### 4.1.4. Kompozitní materiály

Kompozitní materiál je takový typ materiálu, který je složen nejméně ze dvou a více fyzikálně a chemicky různých složek. První složka, sloužící jako pojivo, se nazývá matrice. Hlavní funkcí matrice je přenášet zatížení do výztuže. Výztuž je druhou základní složkou a slouží jako zpevňující složka. Kombinací odlišných materiálů získáme odlišné vlastnosti než u homogenních materiálů. Proto kompozity používáme v případech, kdy homogenní materiály svými vlastnostmi zaostávají. Kompozity rozdělujeme podle druhu matrice na polymerní, kovovou, keramickou a uhlíkovou. Dále dělíme kompozity podle geometrie uspořádání matrice na částicové, vláknité, lamelární a hybridní kompozity. Kvůli skvělým mechanickým vlastnostem a nízké hmotnosti se kompozitní materiály používají především v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu. [25]

## 4.2. Nově vyvíjené materiály

V současné době se nové materiály zavádějí nejrychleji v dějinách lidstva. Na nově vyvíjené materiály jsou kladeny stále vyšší požadavky ohledně pracovních teplot, nižší spotřeby energie a také ochrany životního prostředí. Na rychlém tempu zavádění nových materiálů mají podíl především moderní výrobní technologie. Materiály jsou vyráběny za konkrétními účely a musí splňovat požadované vlastnosti. Začíná se pozvolna přecházet od kovových, dosud nepoužívanějších materiálů, k jiným perspektivnějším druhům. [23]

### 4.2.1. Kovové biomateriály

*„Biokompatibilní materiály jsou jakékoli materiály přírodního nebo syntetického původu, které se stýkají s živou tkání nebo s biologickými tekutinami.“ [23]*

V lékařství používáme mnoho typů biomateriálů. Jedná se například o materiály kompozitní, keramické, polymerní a kovové. V následujících odstavcích se budu zabírat pouze kovovými biomateriály. Kovové biomateriály používáme k nahrazení nebo obnově poškozených částí lidského těla. V současnosti slouží k výrobě implantátů kovové prvky, kterými jsou např. Fe, Cr, Co, Ni, Ti, Ta, Mo a W. Implantáty vyráběné z kovových biomateriálů nalézají užití jako umělé klouby, šrouby a destičky především v ortopedii. V ortodontii a stomatologii se uplatňují při výrobě rovnátek a zubních implantátů. Hlavní předností kovových biomateriálů je vysoká elektrická vodivost v porovnání s ostatními typy biomateriálů, a proto se používají k výrobě umělých elektronických orgánů. Úplně prvním materiálem vyvinutým čistě pro biomedicínské účely byla tzv. Shermanova vanadová ocel. Z této oceli se vyráběly šrouby a destičky sloužící k rychlejší léčbě těžkých zlomenin. Nejnovějšími trendy ve vývoji biomateriálů jsou paměťové a hořčíkové slitiny. [27]

## **Mechanické vlastnosti**

Vyrobené implantáty musí být podrobeny statickým i cyklickým zkouškám, při nichž se zjišťují mechanické charakteristiky jako např. mez kluzu, mez pevnosti, modul pružnosti, odolnost proti otěru a další. Potřebné vlastnosti se odlišují na základě použitého materiálu a místě aplikace. [23]

## **Slitiny s tvarovou pamětí**

Díky výhodné kombinaci mechanických a funkčních vlastností roste využití těchto slitin v oblasti lékařství. Mezi tyto vlastnosti patří především tzv. efekt tvarové paměti. Jedná se o schopnost materiálu vlivem teploty obnovit svůj původní tvar poté, kdy byla součástí vlivem mechanického zatížení zdeformována. Nejpoužívanější slitinou s tvarovou pamětí je tzv. nitinol. Jedná se termoelastický materiál tvořený z 50 % titanem a z 50 % niklem. Počátky využívání tohoto materiálu ve zdravotnictví sahají do 70. let 20. století, kdy se začal využívat v ortodontii. V současnosti se z nitinolu vyrábí zdravotnické součásti jako např. samorozšiřitelné stenty a kostní implantáty. [27]

## **Biologicky rozložitelné materiály**

Biologicky rozložitelné materiály často nazýváme pojmem biodegradabilní materiály. Jedná se o novou generaci kovových biomateriálů na bázi hořčíku. Byly vyvinuty tak, aby si zachovávaly potřebné mechanické a fyzikální vlastnosti po dobu implantace. Slouží především k fixaci těžkých zlomenin. V těchto případech musí být zajištěn neutrální stav těchto materiálů vůči prostředí, ve kterém jsou implantované, a to po konkrétní dobu. Po této době začne docházet k cílené degradaci materiálu. Materiál degraduje za vzniku iontů, jež jsou navíc prospěšné pro lidský organismus. Do značné míry napomáhají rychlejší regeneraci a hojení tkání. Oproti standardním materiálům jako např. titan, odpadá chirurgický zákrok spojený s odstraněním implantátů. Hořčíkové slitiny jsou vhodné pro výrobu plně biologicky rozložitelných intravaskulárních stentů, které se používají při léčbě arteriálních onemocnění. Díky vysoké pevnosti v tahu a nízké hmotnosti se hořčíkové slitiny používají také při léčbě osteosyntézy. Hořčíkové slitiny jsou biomateriály, které mají perspektivní budoucnost. Jelikož se ale jedná o poměrně nově vyvinuté materiály, je potřeba mnoho dalších výzkumů k potvrzení kompatibility s lidským organismem. [27]

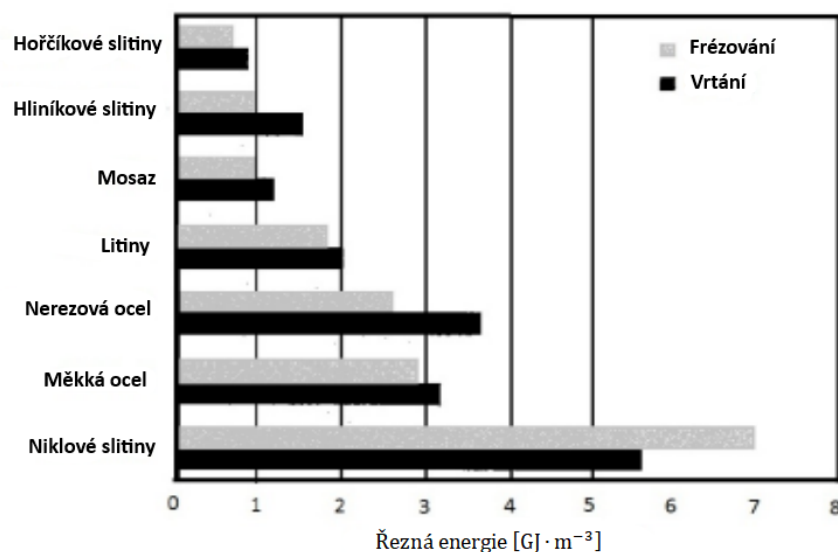
#### 4.2.2. Obrobitelnost biodegradabilních hořčíkových slitin

Následující kapitola se zabývá obrobitelností dvou hlavních hořčíkových slitin, které se používají pro medicínské účely. Jedná se o slitiny hořčíku AZ31 a AZ91. Složení slitin je uvedeno v tab. 2. Slitiny hořčíku jsou dobře obrobitelné a díky svým vlastnostem jejich využití roste. Obě slitiny hořčíku mají vynikající schopnost být obrobeny frézováním, vrtáním i soustružením. Nevýhodou, která zhoršuje obrobitelnost hořčíkových slitin, je jejich vysoká hořlavost. Z tohoto důvodu se při obrábění snažíme zabránit vzniku velmi jemných třísek a prachu, které by se mohly vznítit. Riziko lze snížit použitím řezných kapalin na vodní bázi. [28]

Tabulka 2 – Chemické složení hořčíkových slitin AZ31 a AZ91 [28]

Materiál	Podíl prvků (%)							
	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
AZ31	3,05	0,82	0,40	0,020	0,003	0,0012	0,0012	Bal.
AZ91	8,8	0,71	0,19	0,029	0,002	<0,001	0,0010	Bal.

Nízká tvrdost společně s nízkým modulem pružnosti nám umožňují nastavit řezné parametry na velmi vysoké hodnoty. Hořčíkové slitiny obrábíme vysokými řeznými rychlostmi. Vzhledem k vysoké tepelné vodivosti se nástroje při obrábění hořčíkových slitin opotřebovávají velice pomalu, a proto mají dlouhou životnost. Hořčíkové slitiny mohou být díky svým vlastnostem obráběny téměř všemi druhy nástrojových materiálů. Vlivem dobré obrobitelnosti se při obrábění hořčíkových slitin spotřebuje výrazně méně energie v porovnání s jinými druhy ocelí a slitin, viz. obrázek 30. [28]



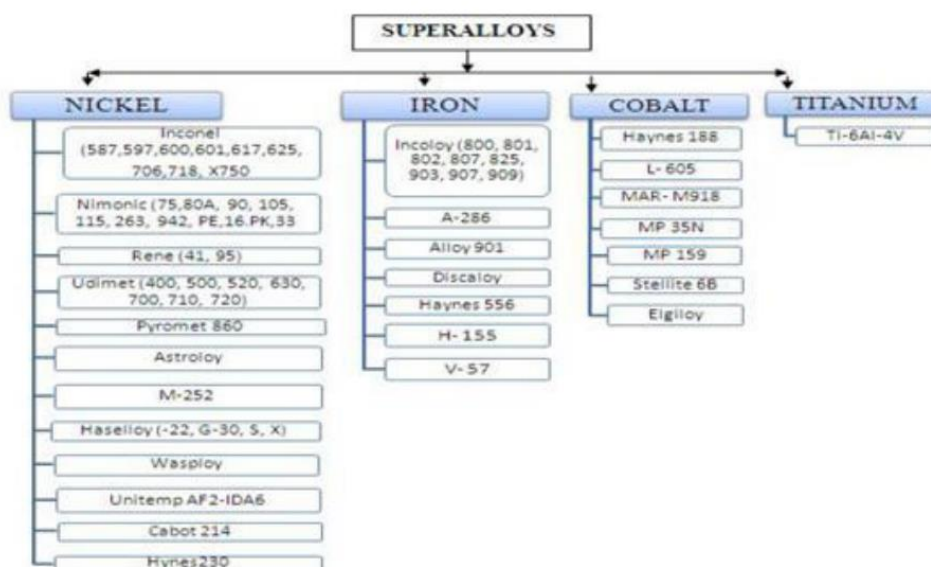
Obrázek 30 – Porovnání hodnot spotřeby řezné energie pro různé materiály [28]

### 4.2.3. Superslitiny

Superslitiny jsou takové typy slitin, které jsou konstruovány pro používání v prostředí s vysokými teplotami nad 540 °C. Vývoj superslitin započal již ve 30. letech 20. století a v současné době se vyrábí superslitiny čtvrté generace. Ty mohou odolávat až teplotám okolo 1 100 °C. Aby mohly pracovat při tak vysokých teplotách, jsou superslitiny čtvrté generace legovány např. rutheniem a iridiem. [23]

#### Vývoj a rozdělení superslitin

Prvním druhem superslitin jsou slitiny na bázi železa. Výroba toho typu slitin převládala až do počátku 40. let. Železné superslitiny byly vyráběny tvářením za studena. V průběhu 40. let se v důsledku přesného lití postupně přešlo na slitiny na bázi kobaltu. V 50. letech se začaly pomocí vakuového lití vyrábět slitiny s kvalitnějším složením a nižší kontaminací nepotřebnými prvky. Na základě vakuového lití bylo možné díky směrové krystalizaci začít vyrábět monokrystalické slitiny. V současnosti je hlavním výrobním postupem superslitin prášková metalurgie nebo odlévání. Superslitiny rozdělujeme na základě majoritního prvku do skupin, které můžeme vidět na obrázku 31. [23]



Obrázek 31 – Rozdělení superslitin [29]

### **Superslitiny na bázi Ni**

Niklové superslitiny patří pro své fyzikální a mechanické vlastnosti k nejčastěji používaným superslitinám v různých průmyslových oborech. Jedná se o nejvíce rozšířený typ žáruvzdorných slitin. Niklové superslitiny obsahují vždy nejméně 50 % niklu, doplněné dalšími legujícími prvky jako např. chrom, hliník a mnohé další. Příkladem takové slitiny je Inconel 718, který je jednou z neznámějších niklových superslitin. [30]

### **Superslitiny na bázi Ni-Fe**

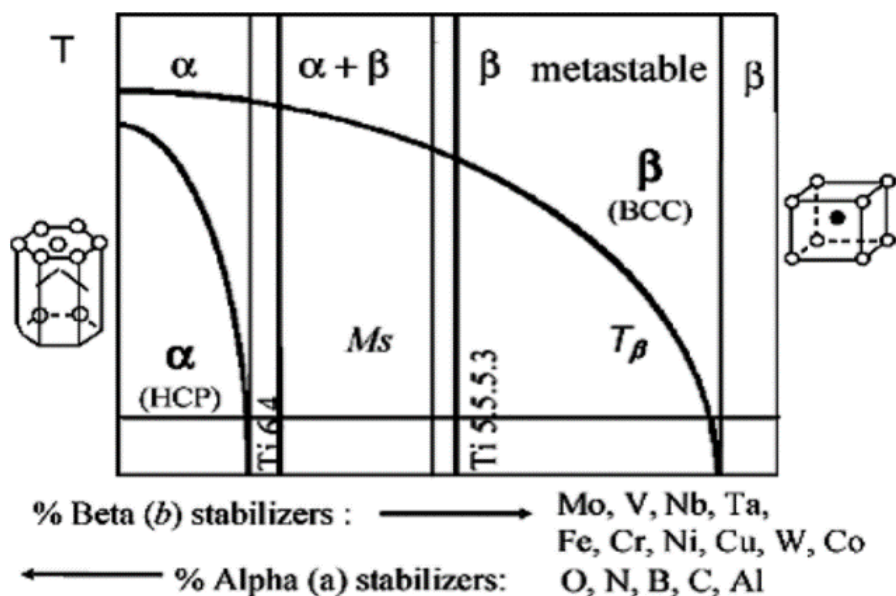
Svémi vlastnostmi se slitiny na bázi niklu a železa dají zařadit mezi martenzitické oceli a niklové superslitiny. V důsledku nahrazení drahého niklu železem se stávají levnější, ale zároveň ztrácejí své vlastnosti a nejsou schopny pracovat při tak vysokých teplotách jako niklové superslitiny. [23]

### **Superslitiny na bázi Co**

Kobaltové superslitiny jsou schopné si udržovat pevnost až do teplot mezi 980 až 1 100 °C. Mají také vynikající odolnost proti vysokoteplotní korozi. Díky jednodušší výrobě oproti niklovým superslitinám, kdy kobaltové slitiny mohou být odlévány na vzduchu nebo pod ochranou atmosférou tvořenou argonem, používáme kobaltové slitiny tam, kde můžou bez problémů nahradit niklové slitiny. [23]

## Superslitiny na bázi Ti

Letecký a automobilový průmysl jsou hlavními odvětvími, kde můžeme titanové slitiny nalézt. Kromě nízké hustoty a dobré pevnosti i při vysokých teplotách, jsou také odolné vůči korozi a tečení. Bývají také díky své biokompatibilitě používané pro biomedicínské účely. Titanové slitiny rozdělujeme do čtyř hlavních skupin podle struktury v tuhé fázi. Jednotlivé rozdělení struktur lze vidět na obrázku 32. Nejvíce využívanými jsou slitiny Ti6Al4V a Ti4Al2Sn4Mo0,5Si. [31]



Obrázek 32 – Fázový diagram titanových slitin [31]

## Aplikace superslitin

V souvislosti s uvedenými vlastnostmi se superslitiny uplatňují při výrobě součástí a komponentů pracujících při vysokých teplotách a v agresivních prostředích. Superslitiny na bázi niklu a titanu našly uplatnění především v leteckém a kosmickém průmyslu. Příkladem součástí vyrobených ze superslitin jsou části leteckých motorů, turbín, reaktivních motorů, námořních konstrukcí, reaktorů a čerpadel v jaderné energetice. Slouží také k výrobě tlakových nádob pro chemický průmysl. [23], [32]



#### 4.2.4. Obrobitelnost superslitin

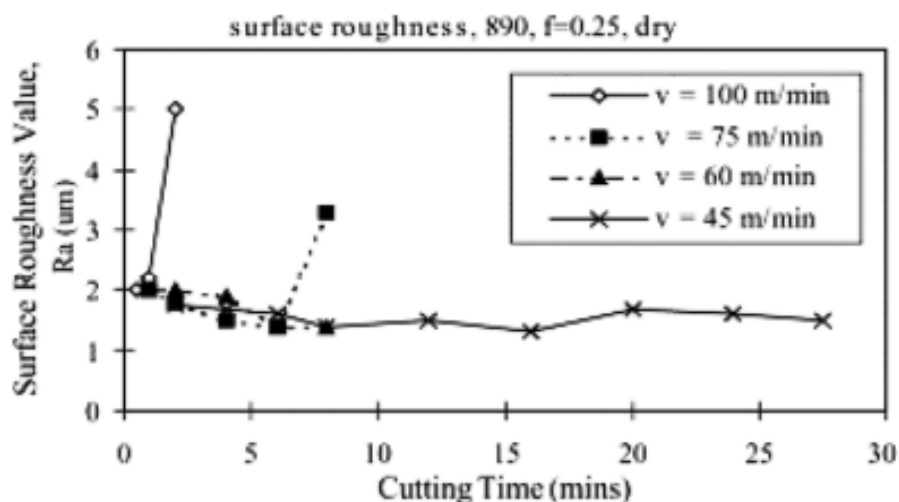
Superslitiny, především slitiny titanu a niklu, se v poslední době těší velkému zájmu zejména kvůli svým mechanickým a fyzikálním vlastnostem, které z nich činí velmi žádaný konstrukční materiál. I přes vysokou poptávku lze uvést, že proces získávání materiálu a následný tavební proces je velice náročný. Titanové a niklové superslitiny jsou poměrně drahým materiálem. Mají navíc nízký stupeň obrobitelnosti. Za nízký stupeň obrobitelnosti může především nízká tepelná vodivost, vysoká chemická reaktivita, nízký modul pružnosti a vysoká tvrdost i při zvýšených teplotách. [31]

#### Nástrojové materiály a řezné podmínky

Při obrábění superslitin jsou hlavními požadavky na nástroj především vysoká tvrdost, odolnost proti opotřebení, nízká chemická reaktivita a odolnost proti lomu. Jednou z možností obrábění superslitin je obrábění pomocí povlakovaných a nepovlakovaných slinutých karbidů. Obrábění probíhá při nízkých řezných rychlostech mezi 30 až 45 m/min. Při zvyšování řezných rychlostí dochází k rychlému nárůstu teplot v místě řezu. Vlivem vysoké teploty v oblasti primární deformace, a také vlivem vysokého napětí v oblasti sekundární deformace, dochází při řezných rychlostech okolo 60 m/min k rychlému opotřebení nástroje. Titanové a niklové superslitiny můžeme obrábět také pomocí CBN, ale z důvodu vysokých cen se tento nástrojový materiál používá pouze velmi omezeně. Další možností obrábění superslitin je řezná keramika. Nástroje z řezné keramiky mají potřebné vlastnosti, a proto s nimi lze obrábět i při vysokých řezných rychlostech. [31], [29]

## Integrita a drsnost povrchu

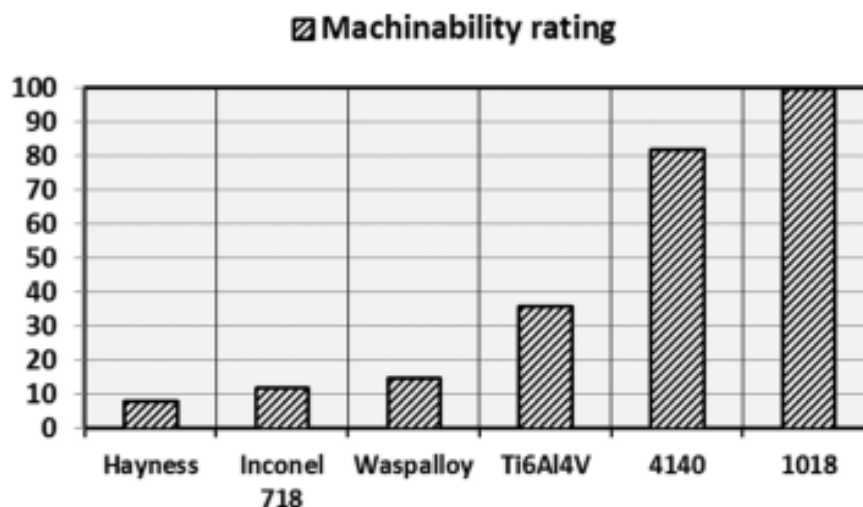
Hlavními faktory, které ovlivňují drsnost obrobeného povrchu, je především řezná rychlost, velikost posuvu a hloubka řezu. Na obrázku 33 lze vidět závislost drsnosti v průběhu času pro různé hodnoty řezných rychlostí při konstantním posuvu na otáčku, kdy je obráběna slitina titanu Ti6Al4V pomocí suchého obrábění kruhovou břitovou destičkou ze slinutého karbidu. [31]



Obrázek 33 – Graf drsnosti povrchu pro různé řezné rychlosti [31]

## Porovnání obrobitelnosti

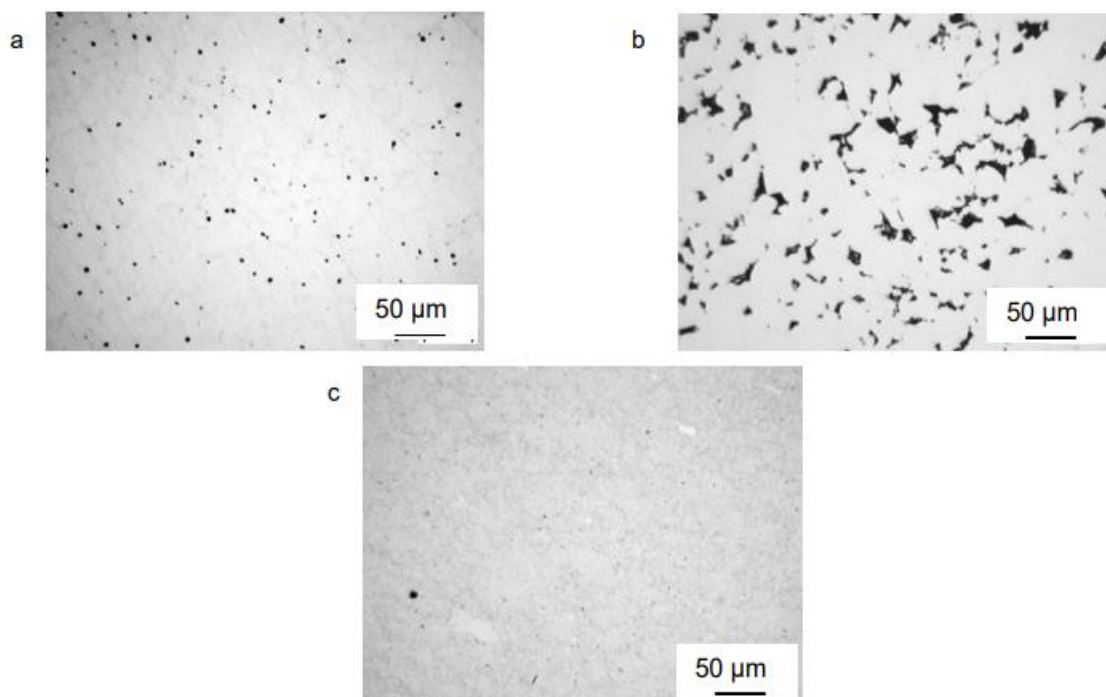
Superslitiny mají v porovnání s ocelí velmi nízký stupeň obrobitelnosti. Na obrázku 34 lze vidět hodnocení stupňů obrobitelnosti pro jednotlivé titanové a niklové superslitiny v porovnání s ocelí typu AISI 4110 a AISI 1018. [31]



Obrázek 34 – Srovnání hodnocení obrobitelnosti superslitin a ocelí [31]

#### 4.2.5. Slitiny s vysokou entropií

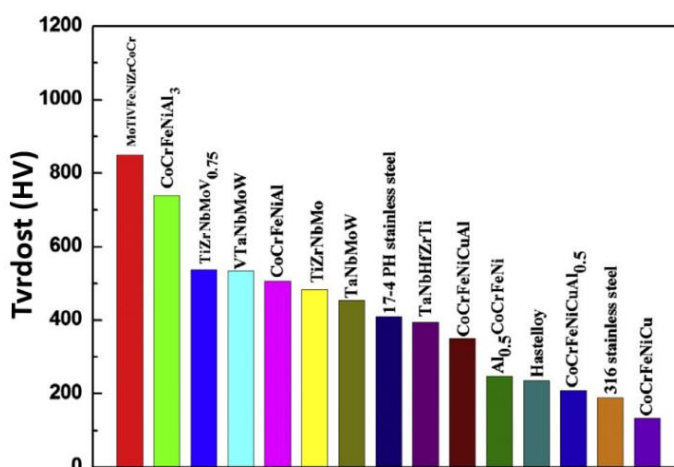
Slitiny s vysokou entropií představují relativně novou třídu materiálů, jejichž výzkumem se v posledních letech zabývají přední výzkumné ústavy po celém světě. Pojmenování slitin vychází z anglického překladu high entropy alloys, zkráceně HEA. Slitiny s vysokou entropií se liší od konvenčních slitin jejich skladbou. Oproti běžným slitinám se totiž jejich kompozice nezakládá na jednom hlavním prvku, ale je složena z více hlavních prvků, které jsou ve slitině rovnoměrně zastoupeny. Jedná se tedy o slitiny obsahující pět a více prvků, jež mají podobné ekvatomární složení. Vlivem vysoké entropie vznikají při výrobě slitin namísto intermetalických fází přednostně tuhé roztoky. Díky kombinaci různých prvků dosahují HEA výborných mechanických podmínek, kterými jsou např. kombinace vynikající pevnosti a tvrdosti při zachování vysoké plasticity. HEA disponují také skvělou korozní odolností a tepelnou stabilitou, kvůli které zachovávají dobré mechanické vlastnosti i za vysokých teplot. Proto se HEA aplikují v prostředích s vysokými teplotami, kde jsou navíc schopné odolávat oxidaci. HEA bývají známe pod názvem Cantorovy slitiny. Nazývají se podle Briana Cantora. Ten jako první na počátku 80. let 20. století přišel s teorií vysoko entropických slitin. Mikrostrukturu jedné z HEA lze vidět na obrázku 35. Jsou zde znázorněny mikrostruktury pro tři konkrétní postupy výroby. [33], [34]



Obrázek 35 – Mikrostruktura ekvatomární slitiny CoCrNiFeMn. Po: a) indukčním tavení a odlití; b) ML a SPS provedené při 800 °C; c) ML a SPS provedené při 1000 °C [33]

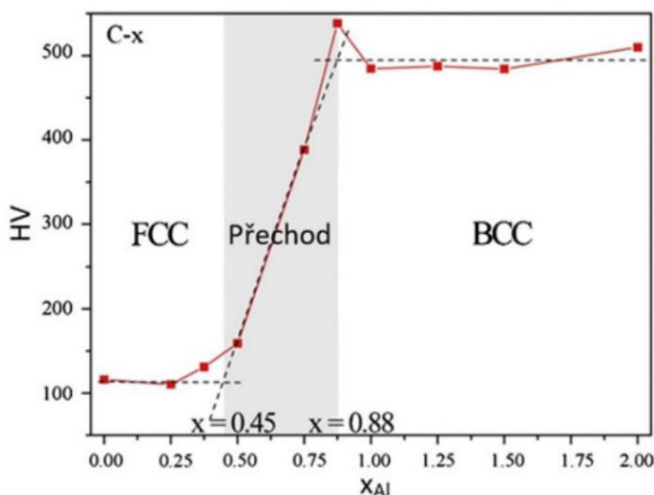
## Mechanické vlastnosti HEA slitin

Mechanické vlastnosti HEA jsou pro každou slitinu odlišné. Z dosavadních zdrojů a studií lze uvést, že HEA se vyznačují vysokou mezí únavy. Mezi další charakteristické vlastnosti patří vysoká pevnost a otěruvzdornost. Většina vysoce entropických slitin je odolná proti měknutí a oxidaci za vysokých teplot. Tvrdost HEA závisí na typu krystalické mřížky a na prvcích, ze kterých je slitina vyrobena. Na obrázku 36 lze vidět tvrdost dle Vickerse pro jednotlivé HEA v porovnání s niklovou superslitinou Hastelloy a nerezovými oceli AISI 17-4 PH, AISI 316. [33], [35]



Obrázek 36 – Přehled tvrdosti HEA v porovnání s nerezovými oceli a superslitinami [35]

Mechanické vlastnosti HEA, které jsou tvořeny tuhým roztokem, ovlivňuje druh krystalické mřížky. Slitiny uspořádané do FCC mřížky vykazují vysokou plasticitu a malou pevnost. Naopak slitiny uspořádané do BCC mřížky jsou málo plastické, ale zato vysoce pevné. Uspořádání tuhých roztoků BCC a FCC ovlivňuje mechanické vlastnosti slitiny. Dané uspořádání lze ovlivnit změnou chemického složení slitiny. Na obrázku 37 lze vidět, jak množství obsahu Al v HEA ovlivňuje tvrdost slitiny. [33],[35]



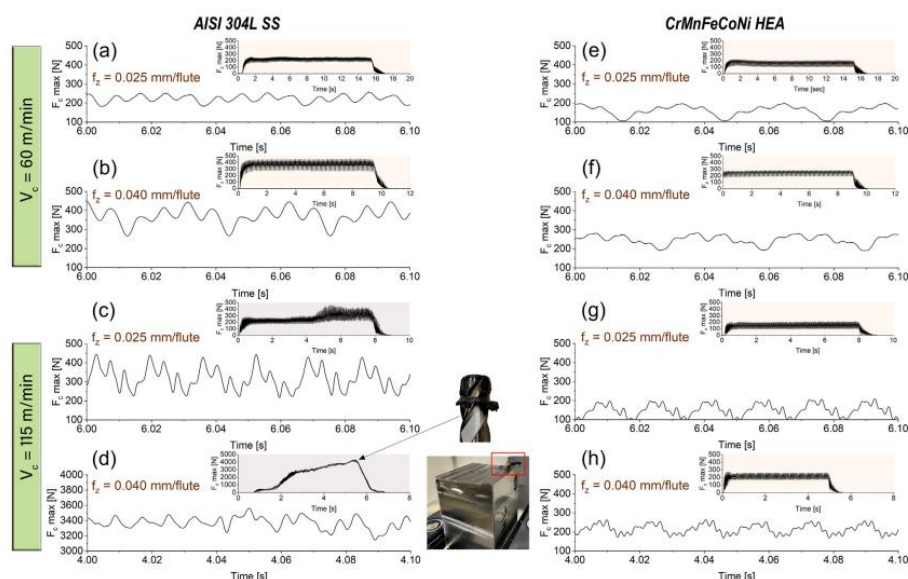
Obrázek 37 – Vliv struktury tuhého roztoku na tvrdost HEA [33]

#### 4.2.6. Obrobitelnost HEA

Jelikož se slitiny s vysokou entropií řadí mezi nejnověji vyvíjené materiály, není jejich obrobitelnost zcela známa. Obrobitelnost HEA záleží především na fyzikálních a mechanických vlastnostech. Slitiny s vysokou entropií mají široký rozsah mechanických vlastností podle chemického složení, které ovlivňuje vnitřní strukturu, a tím i vlastnosti slitiny. Tato část bakalářské práce se zaměřuje na obrobitelnost Cantorovy slitiny s vysokou entropií. Konkrétně se jedná o slitinu CrMnFeCoNi, která byla vyrobena metodou selektivního laserového tavení (SLM - Selective Laser Melting). Etalonem obrobitelnosti byla ocel AISI 304L. [36]

#### Popis měření a vyhodnocení obrobitelnosti

Obrobitelnost CrMnFeCoNi slitiny byla zkoumána pro různé řezné podmínky a porovnávána s nerezovou ocelí AISI 304L. Frézování probíhalo za pomoci nepovlakované karbidové stopkové frézy se čtyřmi drážkami pro různé hodnoty řezných rychlostí a posuvu. Jako chladicí kapalina byl použit olej HOCUT 795N. Cílem měření bylo zjištění průběhu řezných sil. Znázornění naměřených sil lze vidět na obrázku 38. Z měření vyplývá, že slitina s vysokou entropií je lépe obrobitelná, než nerezová ocel AISI304L. Takto dobrá obrobitelnost je zapříčiněna mechanickými vlastnostmi, kdy slitina má výraznou tvárnost, ale zároveň si udržuje dostatečnou pevnost. Je důležité si uvědomit, že obrobitelnost slitin s vysokou entropií závisí především na chemickém složení slitin, a proto bude do budoucna potřeba po vyvinutí nových slitin určovat jejich obrobitelnost za účelem stanovení využití těchto slitin pro konstrukční účely. [36]



Obrázek 38 – Naměřené hodnoty výsledných řezných sil pro nerezovou ocel AISI 304L a CrMnFeCoNi HEA [36]

## 5. Závěr

Hlavním úkolem této bakalářské práce bylo zaměření se na představení nově vyvíjených materiálů a zhodnocení obrobitelnosti těchto materiálů vůči obvykle používaným konstrukčním materiálům. V první části bakalářské práce se zabírám základními podmínkami a parametry, které mají přímý vliv při stanovování hodnoty obrobitelnosti. V druhé části rozebírám jednotlivé specifikace řezných nástrojů mající zásadní vliv na životnost nástrojů, a tím i obrobitelnost materiálů. Ve třetí části blíže představuji značení, hodnocení a především metody experimentálního zkoušení, které vedou ke stanovení obrobitelnosti. V poslední části bakalářské práce se zaměřuji na základní rozdělení konstrukčních materiálů a blíže představuji tři druhy nově vyvíjených materiálů, u kterých popisuji vlastnosti, možnosti aplikace a hlavně míru obrobitelnosti.

Pojem „nově vyvíjené materiály“ představuje nepřeberné množství materiálů, které byly nedávno vyvinuty, nebo jsou stále ve fázi vývoje. Tempo vývoje a představování nových materiálů je velice rapidní a zvyšuje tím potřebu zjišťování obrobitelnosti těchto materiálů. Ve své bakalářské práci jsem věnoval bližší pozornost třem druhům nově vyvíjených materiálů.

V oblasti biomateriálů se začaly vyvíjet materiály, které kromě potřebné biokompatibility mají také specifické funkční vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti patří například tvarová paměť a biodegradabilita. Spektrum hodnocení obrobitelnosti je v oblasti biomateriálů velice široké. Obrábět zde můžeme lehce obrobitelné hořčíkové slitiny, ale i například velice těžkoobrobitelné titanové slitiny.

Superslitiny se díky svým mechanickým a chemickým vlastnostem řadí mezi těžkoobrobitelné materiály. V důsledku narůstajícího využívání roste poptávka po výzkumu obrobitelnosti těchto materiálů. Výzkum se proto soustřeďuje na vývoj nových řezných nástrojů, povlakových materiálů a hybridních technik obrábění, aby bylo možné dosahovat vysokého objemu produkce výrobku z těchto materiálů.



Vícesložkové slitiny s vysokou entropií byly objeveny teprve na počátku 80. let, ale do bližšího povědomí se dostaly až okolo roku 2004. Svými mechanickými a chemickými vlastnostmi se rovnají, a někdy dokonce převyšují, vysokopevnostní oceli a niklové superslitiny. Navíc mají, jako nově vyvíjený materiál, vysoký potenciál pro další možná vylepšení. Obrobitelnost slitin s vysokou entropií se liší v závislosti na chemickém složení slitiny, způsobu výroby a mnoha dalších faktorech. Společně s vývojem nových slitin s vysokou entropií přímo poroste i zájem o zjišťování jejich obrobitelnosti s ohledem na využívání těchto materiálů v hromadné výrobě.

## 6. Seznam literatury

1. **CALLISTER, William, D a RETHWISCH, David, G.** *Materials science and engineering : an introduction, 10th edition.* Hoboken, NJ : Wiley, 2018. ISBN 9781119405436.
2. **HUMÁR, Anton.** *Technologie obrábění - 1. část.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003.
3. **ČEP, Robert.** *Technologie II – 2. díl [online].* Ostrava : VŠB-TUO. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_2dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf).
4. **MÁDL, Jan.** *Technologie obrábění. Vyd. 2., přeprac.* Praha : Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
5. **GRZESIK, Wit.** *Chip Formation and Control. In: Advanced Machining Processes of Metallic Materials [online].* [s. 113-146]: Elsevier, 2017. ISBN 9780444637116, Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63711-6.00007-7.
6. **MÁDL, Jan.** *Teorie obrábění.* Praha : České vysoké učení technické v Praze, 1990.
7. **GRZESIK, Wit.** *Heat in Metal Cutting. In: Advanced Machining Processes of Metallic Materials [online].* [s. 163-182]: Elsevier, 2017. ISBN 9780444637116. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63711-6.00009-0.
8. **ČEP, Robert a PETRŮ, Jana.** *Experimentální metody v obrábění: učební text.* Ostrava: VŠB-TUO : Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012. ISBN 978-80-248-2533-5.
9. **GRZESIK, Wit.** *Surface Integrity. In: Advanced Machining Processes of Metallic Materials [online].* [s. 533-561]: Elsevier, 2017. ISBN 9780444637116. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63711-6.00020-X.
10. **ELUC, Elektronická učebnice.** *Kontrola a měření jakosti povrchu.* Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1101>.



11. **Ostrava, VŠB-TU.** *Drsnost povrchu.* Ostrava : Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrických strojů a přístrojů. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/td/01-textyVSB/005\\_Drsnost%20povrchu.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/td/01-textyVSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf).
12. **KVASNIČKA Ivo, SLAVÍK Vladimír, ŠTAJNOCHR Lubomír.** *Obráběcí nástroje.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 1998.
13. **ČEP, Robert.** *Technologie II – 1. díl [online].* Ostrava : VŠB-TUO. Dostupné z: [https://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_1dil.pdf](https://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf).
14. **GRZESIK, Wit.** *Metal Cutting Operations and Terminology. In: Advanced Machining Processes of Metallic Materials [online].* [s. 7-20]: Elsevier, 2017. ISBN 9780444637116. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63711-6.00002-8.
15. —. *Cutting Tool Materials. In: Advanced Machining Processes of Metallic Materials [online].* Elsevier, 2017. ISBN 9780444637116. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63711-6.00004-1.
16. **HUMÁR, Anton.** *Materiály pro řezné nástroje.* Praha : MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
17. **CHENG, K.** *Machining dynamics: fundamentals, applications and practices.* [Springer series in advanced manufacturing] London : Springer, 2009. ISBN 978-1-84628-367-3.
18. **GRZESIK, Wit.** *Tool Wear and Damage. In: Advanced Machining Processes of Metallic Materials [online].* [s. 215-239]: Elsevier, 2017. ISBN 9780444637116. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63711-6.00012-0.
19. **Coromant, SANDVIK.** *Opotřebení břitu.* Materiály : SANDVIK Coromant. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>.
20. **DAVIM, J., Paulo.** *Machining [online].* London : Springer London, 2008. ISBN 978-1-84800-212-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-84800-213-5.

21. **Robert ČEP, Jana PETRŮ.** *ÚVOD DO TEORIE OBRÁBĚNÍ - Opatřebení řezných nástrojů.* Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3013-1.
22. **YOUSSEF, H.A.** *Traditional Machining – Machinability, Tooling, and Cutting Fluids.* [In Machining of Stainless Steels and Super Alloys] 2015. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781118919514.ch4>.
23. **LOSERTO VÁ, Monika.** *Progresivní materiály: učební text.* Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2575-5.
24. **MATERIÁLY VE STROJÍRENSTVÍ.** [Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1915/kap3.pdf>]
25. **SOJKA, Jaroslav a Petra VÁŇOVÁ.** *Základy progresivních konstrukčních materiálů: učební text.* [Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství] Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2578-6.
26. **Milan NĚMEC, Jan SUCHÁNEK, Jan ŠANOVEC.** *Základy technologie I.* [České vysoké učení technické v Praze] Praha : Nakladatelství ČVUT, 2006.
27. **IVANOVA, Elena P., Kateryna BAZAKA a Russell J. CRAWFORD.** *Metallic biomaterials: types and advanced applications. In: New Functional Biomaterials for Medicine and Healthcare [online].* [s. 121-147]: Elsevier, 2014. ISBN 9781782422655. Dostupné z: [doi:10.1533/9781782422662.121](https://doi.org/10.1533/9781782422662.121).
28. **CATHERINE, Louis Denis Kevin a Darulihsan Abdul HAMID.** *Mechanical Properties and Machinability of Magnesium Alloy AZ31 and AZ91 – A Comparative Review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online].* 2021. ISSN 1757-8981. Dostupné z: [doi:10.1088/1757-899X/1062/1/012054](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1062/1/012054).
29. **Gopala Rao THELLAPUTTA, Pulcharu Subhash CHANDRA, C.S.P. RAO.** *Machinability of Nickel Based Superalloys: A Review.* [s. 3712-3721]: Elsevier, 2017. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.266>.

30. **WANG, B., Liu, Z.** *Influences of tool structure, tool material and tool wear on machined surface integrity during turning and milling of titanium and nickel alloys: a review.* [s. 1925–1975]: Int J Adv Manuf Technol 98, 2018. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2314-1>.
31. **PERVAIZ, Salman, Amir RASHID, Ibrahim DEIAB a Mihai NICOLESCU.** *Influence of Tool Materials on Machinability of Titanium- and Nickel-Based Alloys: A Review.* [s. 219-252]: Materials and Manufacturing Processes [online], 2014. ISSN 1042-6914. Dostupné z: [doi:10.1080/10426914.2014.880460](https://doi.org/10.1080/10426914.2014.880460).
32. **MALI, Harlal Singh a UNUNE, Deepak Rajendra.** *Machinability of Nickel-Based Superalloys: An Overview.* Reference Module in Materials Science and Materials Engineering [online]: Elsevier, 2017. ISBN 9780128035818. Dostupné z: [doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.09817-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09817-9).
33. **VESELKA, Z., PRŮŠA, F., ŠENKOVÁ, A., & VOJTĚCH, D.** *Slitiny s vysokou entropií – historie, příprava, vlastnosti a výzkum.* Praha : Chemické Listy, 2020. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3523>.
34. **PICKERING, E. J. a N. G. JONES.** *High-entropy alloys: a critical assessment of their founding principles and future prospects.* [s. 183-202]: International Materials Reviews [online], 2016. ISSN 0950-6608. Dostupné z: [doi:10.1080/09506608.2016.1180020](https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1180020).
35. **ZHANG, Yong, a další.** *Microstructures and properties of high-entropy alloys.* Progress in Materials Science [online], 2014. ISSN 00796425. Dostupné z: [doi:10.1016/j.pmatsci.2013.10.001](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001).
36. **LITWA, Przemyslaw, Everth HERNANDEZ-NAVA, Dikai GUAN, Russell GOODALL a Krystian K. WIKA.** *The additive manufacture processing and machinability of CrMnFeCoNi high entropy alloy.* Materials & Design [online], 2021. ISSN 02641275. Dostupné z: [doi:10.1016/j.matdes.2020.109380](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109380).

## 7. Seznam obrázků

Obrázek 1 – Druhy soustružení a) podélné soustružení b) čelní soustružení [3].....	- 11 -
Obrázek 2 – Složky řezných sil a odporů při podélném soustružení [3].....	- 13 -
Obrázek 3 – Realizace řezného procesu a) ortogonální řezání b) obecné řezání [8] .....	- 15 -
Obrázek 4 – Tvary třísek dle normy ISO 3685-1977 [5].....	- 15 -
Obrázek 5 – Oblasti plastických deformací [2] .....	- 16 -
Obrázek 6 – Simulace teplot v místě řezu metodou FEM [7].....	- 17 -
Obrázek 7 – Přirozený termočlánek [2] .....	- 18 -
Obrázek 8 – Topografie obrobeného povrchu [9].....	- 19 -
Obrázek 9 – Schéma indukčního snímače na měření povrchu kontaktním způsobem [10] ....	- 20 -
Obrázek 10 – Schéma CLA snímače [10].....	- 21 -
Obrázek 11 – 3D Snímek povrchu naměřený pomocí CLA snímače [10] .....	- 21 -
Obrázek 12 – Obecná geometrie řezného nástroje [14] .....	- 22 -
Obrázek 13 – Roviny nástrojové soustavy soustružnického nože [13] .....	- 23 -
Obrázek 14 – Roviny pracovní soustavy soustružnického nože [13].....	- 24 -
Obrázek 15 – Porovnání vlastností nástrojových materiálů [16] .....	- 25 -
Obrázek 16 – Mechanismy opotřebení v závislosti na řezné teplotě [18].....	- 28 -
Obrázek 17 – Zlogaritmovaný diagram $T-v_c$ [21].....	- 32 -
Obrázek 18 – Vstupní parametry a výstupní proměnné ovlivňující obrobiteľnost [22].....	- 34 -
Obrázek 19 – Křivky otupení pro proměnné řezné rychlosti [21] .....	- 36 -
Obrázek 20 – Stanovení jednotlivých trvanlivostí na základě kritéria opotřebení [21] .....	- 37 -
Obrázek 21– Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti [21].....	- 37 -
Obrázek 22– Schéma čelní zkoušky obrobiteľnosti [8].....	- 39 -
Obrázek 23 – Závislost řezné složky síly obrábění na řezné rychlosti [8].....	- 41 -

Obrázek 24 – Mikrometrická metoda [8] .....	- 42 -
Obrázek 25– Schéma funkce Lyesetterova kladiva [8] .....	- 43 -
Obrázek 26 – Schéma vrtání při konstantním tlaku [8] .....	- 44 -
Obrázek 27 – Přehled vývoje používaných materiálů [23] .....	- 47 -
Obrázek 28 – Základní rozdělení technických materiálů [24] .....	- 48 -
Obrázek 29 – Rozdělení světové spotřeby polymerů v jednotlivých odvětvích (2005) [25]....	- 49 -
Obrázek 30 – Porovnání hodnot spotřeby řezné energie pro různé materiály [28] .....	- 53 -
Obrázek 31 – Rozdělení superslitin [29] .....	- 54 -
Obrázek 32 – Fázový diagram titanových slitin [31] .....	- 56 -
Obrázek 33 – Graf drsnosti povrchu pro různé řezné rychlosti [31] .....	- 58 -
Obrázek 34 – Srovnání hodnocení obrobitelnosti superslitin a ocelí [31] .....	- 58 -
Obrázek 35 – Mikrostruktura ekvatomární slitiny CoCrNiFeMn. Po: a) indukčním tavení a odlití; b) ML a SPS provedené při 800 °C; c) ML a SPS provedené při 1000 °C [33] .....	- 59 -
Obrázek 36 – Přehled tvrdosti HEA v porovnání s nerezovými oceli a superslitinami [35] ....	- 60 -
Obrázek 37 – Vliv struktury tuhého roztoku na tvrdost HEA [33] .....	- 60 -
Obrázek 38 – Naměřené hodnoty výsledných řezných sil pro nerezovou ocel AISI 304L a CrMnFeCoNi HEA [36] .....	- 61 -



## 8. Seznam tabulek

Tabulka 1 – Klasifikace druhů opotřebení [8]..... - 30 -

Tabulka 2 – Chemické složení hořčíkových slitin AZ31 a AZ91 [28] ..... - 53 -